

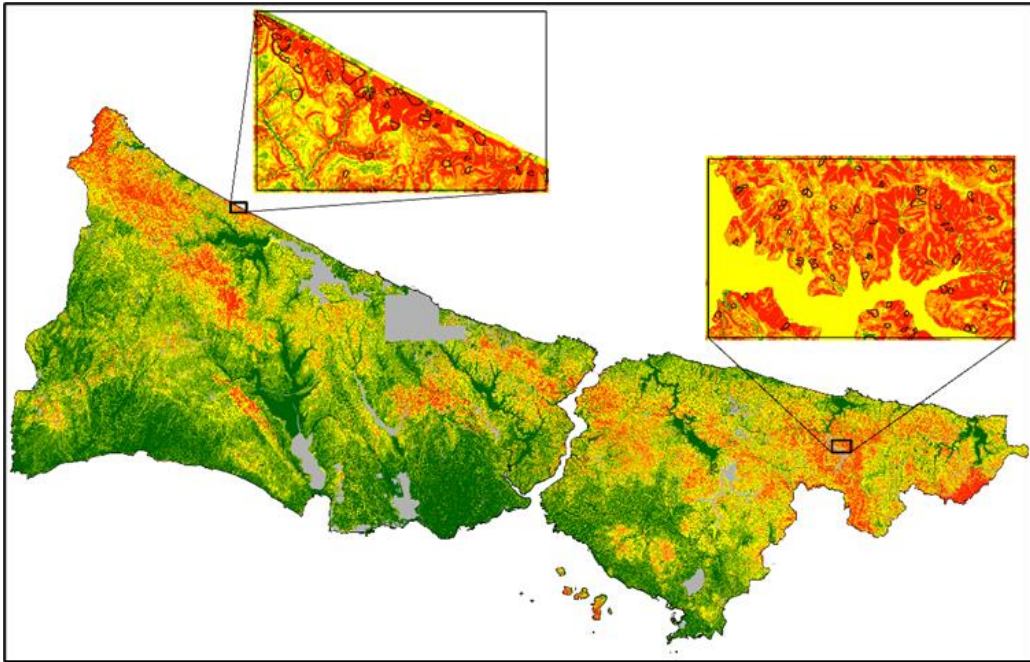


T.C
İSTANBUL BÜYÜKŞEHİR BELEDİYE BAŞKANLIĞI
DEPREM RİSK YÖNETİMİ VE KENTSEL İYİLEŞTİRME
DAİRESİ BAŞKANLIĞI
DEPREM VE ZEMİN İNCELEME ŞUBE MÜDÜRLÜĞÜ



İSTANBUL İLİ GENELİNDE
AFET RİSKİ ALTINDAKİ ALANLARIN BELİRLENMESİNE ALTLIK VERİ ÜRETMEK
AMACIYLA YER BİLİMSEL ARAŞTIRMALARIN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ İŞİ

HEYELAN ENVANTERİ VE DUYARLILIK HARİTASININ OLUŞTURULMASI İLE TEHLİKE VE
RİSK DEĞERLENDİRMESİ İÇİN YOL HARİTASININ BELİRLENMESİ



SONUÇ RAPORU



MART 2024
İSTANBUL

PROJE KÜNYESİ

Proje Adı:

İstanbul İli Genelinde Afet Riski Altındaki Alanların Belirlenmesine Altlık Veri Üretmek Amacıyla Yer Bilimsel Araştırmaların Gerçekleştirilmesi İşi

Heyelan Envanteri ve Duyarlılık Haritasının Oluşturulması ile Tehlike ve Risk Değerlendirmesi İçin Yol Haritasının Belirlenmesi

Projenin süresi:

30 Ay

Projeyi Destekleyen Kurum/Kuruluş:

İstanbul Büyükşehir Belediyesi Deprem ve Zemin İnceleme Müdürlüğü

BİMTAŞ Boğaziçi Peyzaj İnşaat Müşavirlik Teknik Hizmetler Sanayi Ticaret Anonim Şirketi

Projeyi Yürüten Kurum/Kuruluş:

İstanbul Teknik Üniversitesi, Avrasya Yer Bilimleri Enstitüsü, Katı Yer Bilimleri Anabilim Dalı

Ortadoğu Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü

Globetech Coğrafi Bilgi Teknolojileri Yazılım Planlama Harita Enerji Eğitim Mühendislik Danışmanlık Limited Şirketi

Projenin Yürütülmesinde Sorumlu Kişiler (adı, görevi, tlf, e-posta adresi):

Prof. Dr. Tolga Görüm, Proje Yürütücüsü, 0534 073 51 10, tgorum@itu.edu.tr

Prof. Dr. Mehmet Lütfi Süzen, Proje Yürütücüsü, 0532 583 03 40, suzen@metu.edu.tr

Proje Ekibi:

GLOBETECH Coğrafi Bilgi Teknolojileri

Prof. Dr. Tolga Görüm

Prof. Dr. Mehmet Lütfi Süzen

Abdüssamet Yılmaz

Mehmet Bilgekağan Çintimur

Tolga Kaya

Volkan Çalışkan

Yeşim Kınıkoğlu

BİMTAS

Banu BAĞDATLI

Emel ÖZTEP (Koordinatör)



İBB-DEZİM Kontrol Teskilatı

Muhammet ÜNLÜ

Nilüfer YILMAZ

Esra KALKAN ERTAN

Pınar AKSOY

Akif YEŞİLTAŞ

Esra FİTÖZ

İsra BOSTANCIOĞLU

Tarık TALAY (Proje Sorumlusu)

Dr. Evrim YAVUZ (Müdür Yrd.)

Kemal DURAN (Müdür)

Murat YÜN (Daire Başkanı)



DOI Numarası: 10.5281/zenodo.11108874

Bu yayının izinsiz olarak herhangi bir şekilde çoğaltılması, basılması, kaynak gösterilmeksizin alıntılar yapılması yasaktır.

Bu yayın içerisinden yapılacak alıntılarda şu şekilde kaynak gösterilmesi gerekmektedir:

Görüm, T., Süzen, M.L., Yılmaz, A., Kınikoğlu, Y., Çintimur, M.B., Kaya, T., Çalışkan, V., Ünlü, M., Yeşiltaş, A., Bostancıoğlu, İ., Talay, T. (2024). Heyelan Envanteri ve Duyarlılık Haritasının Oluşturulması ile Tehlike ve Risk Değerlendirmesi İçin Yol Haritasının Belirlenmesi - Sonuç Raporu - İstanbul İli Genelinde Afet Riski Altındaki Alanların Belirlenmesine Altlık Veri Üretmek Amacıyla Yer Bilimsel Araştırmaların Gerçekleştirilmesi İşi - (Sayfa Sayısı), İstanbul, Türkiye. doi: <https://doi.org/10.5281/zenodo.11108874>

İÇİNDEKİLER

1. Giriş	12
2. Mevcut Verilerin Analizi ve Eksiklerin Belirlenmesi	12
2.1. Heyelanların ve Heyelan Envanterlerinin Revizyonu için Gereken Öncelikli Verilerin Belirlenmesi	14
2.2. Heyelan Envanterlerine İlişkin Eksikliklerin Belirlenmesi	15
2.3. Heyelanlı Alanların Mekânsal Dağılımının Tespiti ve Öncelikli Alanların Belirlenmesi	16
2.4. Heyelanların CBS Tabanlı Sayısal Envanterlerinde Yer Alacak Öznitelik Bilgilerinin Tanımlanması ve Standartların Belirlenmesi	22
3. Heyelan Envanter Haritalarının Hazırlanması	23
3.1. Öncelikli Alanlarda Önceki Rapor ve Yayınların İncelenmesi	23
3.2. Öncelikli Alanlarda Uzaktan Algılama ve SYM Verilerinin İncelenmesi	28
3.3. Heyelan Envanter Verisinin Hazırlanması	29
3.3.1. Kırmızı Topoğrafya Görüntü Haritaları (RRIM) ve Heyelan Tanımlaması	29
3.3.2. Heyelan Envanteri	32
3.4. Saha Çalışmaları ile Envanter Kontrolleri ve Doğrulaması	49
4. Web Tabanlı Heyelan Envanter ve Duyarlılık Analiz Sistemi	55
4.1. Sistem Analiz Çalışmaları	55
4.2. Sistem Tasarım Çalışmaları	56
4.3. Sistem Altyapı Bileşenleri / Modülleri	60
4.3.1. Bildirim ve İletişim	61
4.3.2. Doküman Yöneticisi	62
4.3.3. Gösterge İnfografik	62
4.3.4. Kullanıcı Girişi ve Güvenlik	63
4.3.5. Kullanıcı Yönetimi ve Yetkilendirme	64
4.3.6. Kullanım Sözleşmesi Yöneticisi	65
4.3.7. Loglama ve Arşivleme	66
4.3.8. Parametre (Tanımlama) Yöneticisi	67
4.3.9. Sistem Yönetimi	68
4.3.10. Sorgulama ve Raporlama	69
4.3.11. Temel Harita Özellikleri	69
4.4. Heyelan Envanter Modülünün Geliştirilmesi	72
4.5. Heyelan Duyarlılık Haritalama Modellerinin Geliştirilmesi	77

4.6. Heyelan Duyarlılık Haritalama Yazılımının Geliştirilmesi.....	83
5. Heyelan Duyarlılık Haritalarının Hazırlanması	84
4.1. Uygun Haritalama Biriminin Seçilmesi	84
5.2. Heyelan Duyarlılık Faktör Haritalarının Belirlenmesi	84
5.3. Heyelan Duyarlılık Haritalarının Üretilmesi	88
5.3.1. Heyelan Duyarlılık Analizine Yönelik Faktör (Parametre) Verilerinin Hazırlanması.....	88
5.3.2. Heyelan Duyarlılık Analizlerine Yönelik Ön Hazırlık Çalışmaları	93
4.3.3. Çok Değişkenli İstatistiksel Analiz Yöntemleri ile Heyelan Duyarlılık Haritası Üretilmesi	95
4.3.4. Uzman Görüşüne Dayalı Yöntemler ile Heyelan Duyarlılık Haritası Üretilmesi	102
6. Sonuç ve Değerlendirme	105
Referanslar.....	108



ODTÜ



GLOBETECH
Geographical Information Technologies



Şekil Listesi

Şekil 2.1. İstanbul ili sınırları için 2013 yılına ait havadan LiDAR verisinin mekansal olarak kapladığı alan. Haritada siyah renkle gösterilen çerçeve Büyükçekmece Mezarlığının kuzeyindeki aktif heyelan alanını gösterir.	15
Şekil 2.2. Duman vd. 2006 tarafından haritalanan heyelanların dağılımı, tipleri (A) ve heyelanlara ait yoğunluk haritası (B).	18
Şekil 2.3. İBB DEZİM tarafından oluşturulan envanterde haritalanan heyelanların dağılımları, tipleri (A) ve heyelanlara ait yoğunluk haritası (B).	19
Şekil 3.1. Kırmızı Topoğrafya Görüntüleme Haritalarının (RRIM) üretilmesinde takip edilen işlem adımları	30
Şekil 3.2. Heyelanların haritalanmasında kullanılan haritalama altlıkları; ortofoto (A), hillshade (B), Kırmızı Topoğrafya Görüntüleme Haritalarının (RRIM) (C), heyelan envanter katmanı ile Kırmızı Topoğrafya Görüntüleme Haritasının (RRIM) birlikte gösterimi.....	31
Şekil 3.3. İstanbul il sınırları içerisinde haritalanan heyelanların dağılışı	32
Şekil 3.4. Avrupa yakası sınırları içerisinde haritalanan heyelanların dağılışı.....	33
Şekil 3.5. Asya yakası ve Adalar sınırları içerisinde haritalanan heyelanların dağılışı	33
Şekil 3.6. Heyelanların haritalanmasında kullanılan altlıklara göre heyelanların dağılışı. LiDAR SYM verisinde olmayıp 2021 uydü görüntüsü kullanılarak tespit edilen ve haritalanan, mavi renk ile temsil edilen, Avcıkoru/Şile yakınlarında hafriyat döküm alanında gelişen heyelan	34
Şekil 3.7. İstanbul heyelanlarının, km ² başına normalize edilmiş yoğunluk dağılımı haritası.....	35
Şekil 3.8. Heyelan tipi dağılışı haritası. Figürdeki örneklem penceresi TÜYAP bölgesinde bulunan heyelanlı alana ait akma, kayma ve karmaşık (kayma + akma) tipindeki heyelanları göstermektedir.....	37
Şekil 3.9. Heyelan malzeme tipi dağılışı haritası. Figürdeki örneklem penceresinde 3 farklı malzeme tipi bir arada gözlemlenmektedir.....	38
Şekil 3.10. Heyelanların alansal büyüklüklerine göre dağılışı. Figürdeki örneklem penceresinde TÜYAP bölgesindeki heyelanlara ait alansal büyüklük dağılımı yer almaktadır.	39
Şekil 3.11. Heyelanlara ait frekans ve büyüklüklerine ait Power-law üstsel ilişkileri.	40
Şekil 3.12. Heyelanların derinlik sınıflarına göre dağılışı. Figürdeki örneklem penceresinde TÜYAP bölgesindeki heyelanlara ait heyelan derinlik bilgisi yer almaktadır.	41
Şekil 3.13. Heyelanların hacim sınıflarına göre dağılışı. Figürdeki örneklem penceresinde Büyükçekmece bölgesindeki heyelanlara ait heyelan hacim bilgisi yer almaktadır.	42
Şekil 3.14. Çekmece gölleri etrafında gelişen heyelanlara ait Topoğrafik Engebelilik İndeksi (TRI) haritası	44

Şekil 3.15. Çekmece gölleri etrafında gelişen heyelanlara ait heyelan aynasının ortalama eğim haritası	45
Şekil 3.16. Çekmece gölleri etrafında gelişen heyelanlara ait Topoğrafik Nemlilik indeksi haritası	46
Şekil 3.17. Heyelan aktivite durumları ve morfolojik göstergeleri	47
Şekil 3.18. Heyelanların ortalama eğim sınıflarına göre dağılışı. Figürdeki örneklem penceresinde TÜYAP bölgesindeki heyelanlara ait heyelan ortalama eğim bilgisi yer almaktadır.	48
Şekil 3.19. Heyelanların bitki örtüsü yoğunluk sınıflarına göre dağılışı. Figürdeki örneklem penceresi orman örtüsü altındaki heyelanın tanımlama güçlüğünü ifade etmektedir.	49
Şekil 3.20. Proje ekibi tarafından saha çalışmasında kontrolü sağlanan Avcıkoru / Şile yakınlarında hafriyat döküm alanında gelişen heyelan (A) ve Darılık Barajı / Şile mevkiinde akarsu yan yamaçlarında gelişen heyelanlar (B).	50
Şekil 3.21. Çiftalan mevkiinde gelişen heyelanlar (A). Kırmızı Topoğrafya Görüntü Haritası (RRIM) ve heyelanlar (B).	51
Şekil 3.22. Ağaçlı mevkiinde gelişen heyelanlar (A). Kırmızı Topoğrafya Görüntü Haritası (RRIM) ve heyelanlar (B).	51
Şekil 3.23. Akpınar mevkiinde gelişen heyelanlar (A). Kırmızı Topoğrafya Görüntü Haritası (RRIM) ve heyelanlar (B).	52
Şekil 3.24. Çatalca mevkiinde gelişen heyelanlar (A). Kırmızı Topoğrafya Görüntü Haritası (RRIM) ve heyelanlar (B).	52
Şekil 3.25. Çatalca mevkiinde gelişen heyelanlar (A). Kırmızı Topoğrafya Görüntü Haritası (RRIM) ve heyelanlar (B).	53
Şekil 3.26. Büyükçekmece mevkiinde gelişen heyelanlar (A). Kırmızı Topoğrafya Görüntü Haritası (RRIM) ve heyelanlar (B).	53
Şekil 3.27. Büyükçekmece mevkiinde gelişen heyelanlar (A). Kırmızı Topoğrafya Görüntü Haritası (RRIM) ve heyelanlar (B).	54
Şekil 3.28. Firuzköy mevkiinde gelişen heyelanlar (A). Kırmızı Topoğrafya Görüntü Haritası (RRIM) ve heyelanlar (B).	54
Şekil 3.29. Avcıkoru mevkiinde gelişen heyelanlar (A). Kırmızı Topoğrafya Görüntü Haritası (RRIM) ve heyelanlar (B).	55
Şekil 4.1. Kavramsal Sistem Tasarımı	57
Şekil 4.2. Uygulamanın Fiziksel Bileşenleri	58
Şekil 4.3. Varlık-İlişki Şeması	59
Şekil 4.4. Heyelan Envanteri Duyarlılık Haritasının Oluşturulması Portalı Ana Sayfası.....	60
Şekil 4.5. Bildirim Penceresi.....	61
Şekil 4.6. Sistem Yönetimi - Bildirimler Ekranı	62
Şekil 4.7. Sistem Yönetimi - Bildirim Detayı Ekranı	62

Şekil 4.8. Yönetici Paneli Ekranı	63
Şekil 4.9. Sistem Yönetimi – Ölçümler Ekranı	63
Şekil 4.10. Uygulama Giriş Ekranı	64
Şekil 4.11. Sistem Yönetimi – Denetim Ekranı.....	64
Şekil 4.12. Kullanıcı Yönetimi – Yeni Kullanıcı Ekleme ve Yetkilendirme Ekranı	65
Şekil 4.13. Kullanıcı Yönetimi – Kullanıcılar Ekranı	65
Şekil 4.14. Kullanıcı Yönetimi – Kullanıcı Yetkilendirme Ekranı.....	66
Şekil 4.15. Sistem Yönetimi – Nesne Denetimi Ekranı.....	67
Şekil 4.16. Sistem Yönetimi – Nesne Denetim Detayları Penceresi.....	67
Şekil 4.17. Sistem Yönetimi – Denetim Ekranı.....	68
Şekil 4.18. Sistem Yönetimi – Ölçümler Ekranı	68
Şekil 4.19. Sistem Yönetimi – Sağlık Ekranı	69
Şekil 4.20. Harita Ekranı – Genel Harita İşlevleri.....	69
Şekil 4.21. Harita Ekranı – Harita Üzerinde Öznitelik Bilgisi Görüntüleme.....	70
Şekil 4.22. Harita Ekranı – Altlık Harita Seçimi	70
Şekil 4.23. Harita Ekranı – Harita Araçları	71
Şekil 4.24. Harita Ekranı - 3 Boyutlu Harita Gösterimi.....	71
Şekil 4.25. Heyelan Envanterleri Ekranı	72
Şekil 4.26. Heyelan Envanteri Ekle – Harita Ekranı	73
Şekil 4.27. Heyelan Envanteri Ekle Ekranı - Öznitelik Bilgileri.....	73
Şekil 4.28. Heyelan Envanteri Ekle - Harita Ekranı.....	74
Şekil 4.29. Dosya Ekranı.....	74
Şekil 4.30. Sorgulama Ekranı	75
Şekil 4.31. Heyelan Envanteri İşlemleri	75
Şekil 4.32. Kayıt Hareketleri.....	76
Şekil 4.33. Heyelan Envanterleri Ekranı	76
Şekil 4.34. Heyelan Envanter Örneği	77
Şekil 4.35. Duyarlılık Analiz Yöntemi Seçim Ekranı.....	77
Şekil 4.36. AHP Modeli ile Duyarlılık Analizi Ekranı	78
Şekil 4.37. AHP Modeli ile Duyarlılık Analizi için Parametre Seçim Ekranı	79
Şekil 4.38. SAW Modeli ile Duyarlılık Analizi Ekranı	79
Şekil 4.39. SAW Modeli ile Duyarlılık Analizi için Parametre Seçim Ekranı	80
Şekil 4.40. LRM Modeli ile Duyarlılık Analizi Ekranı.....	80

Şekil 4.41. ANN Modeli ile Duyarlılık Analizi Ekranı	81
Şekil 4.42. SVM Modeli ile Duyarlılık Analizi Ekranı	82
Şekil 4.43. Kırmızı Topoğrafya Görüntü Haritaları (RRIM)	83
Şekil 4.44. Kırmızı Topoğrafya Görüntü Haritaları (RRIM) (Yakınlaştırılmış Görüntü)	83
Şekil 4.45. Heyelan Envanter Verileri	84
Şekil 5.1. İstanbul ili Yükseklik Haritası (DEM)	88
Şekil 5.2. İstanbul ili Eğim Haritası	89
Şekil 5.3. İstanbul ili Bakı Haritası	89
Şekil 5.4. İstanbul ili Topoğrafik Nemlilik İndeksi (TWI)	90
Şekil 5.5. İstanbul ili Yükseklik Standart Sapma Haritası	90
Şekil 5.6. İstanbul ili Akarsulara Uzaklık Haritası	91
Şekil 5.7. İstanbul ili Litoloji Haritası	91
Şekil 5.8. İstanbul ili Faylara Uzaklık Haritası	92
Şekil 5.9. İstanbul ili CORINE Arazi Örtüsü Haritası	92
Şekil 5.10. İstanbul ili Yollara Uzaklık Haritası	93
Şekil 5.11. “Seed cell” Alanlarının Belirlenmesi İş Akışı	94
Şekil 5.12. Heyelan Alanı, Seed Cell Alanı ve Noktaları	94
Şekil 5.13. Parametre Katmanlarından Veri Aktarımı Yapılan Seed Cell Noktaları Öznitelik Tablosu	95
Şekil 5.14. LRM Yöntemi ile Üretilen İstanbul İli Heyelan Duyarlılık Haritası	96
Şekil 5.15. LRM Yöntemi ile Üretilen Heyelan Duyarlılık Haritası ve Heyelan Envanter Örnekleri	97
Şekil 5.16. LRM Analizi ROC Eğrisi ve Duyarlılık Haritası Histogramı	97
Şekil 5.17. LRM Yöntemi ile Üretilen İstanbul İli Anadolu Yakası Heyelan Duyarlılık Haritası	98
Şekil 5.18. LRM Analizi ROC Eğrisi ve Duyarlılık Haritası Histogramı (Anadolu Yakası)	99
Şekil 5.19. LRM Yöntemi ile Üretilen İstanbul İli Avrupa Yakası Heyelan Duyarlılık Haritası	99
Şekil 5.20. LRM Analizi ROC Eğrisi ve Duyarlılık Haritası Histogramı (Avrupa Yakası)	100
Şekil 5.21. İstanbul İl Sınırları Bazında LRM Yöntemi ile Hazırlanan Heyelan Duyarlılık Haritası (üstte) ile Anadolu ve Avrupa Yakaları için LRM Yöntemi ile Yapılan Ayrı Analizler Sonucu Hazırlanan Heyelan Duyarlılık Haritası (altta)	101
Şekil 5.22. SAW Yöntemi ile Üretilen İstanbul İli Heyelan Duyarlılık Haritası	103
Şekil 5.23. SAW Duyarlılık Haritası Histogramı	104

Tablo Listesi

Tablo 2.1. <i>İBB Harita Müdürlüğü bünyesinde bulunan ve talep edilen veriler, kapsadıkları yıl ve mekansal çözünürlükleri</i>	16
Tablo 2.2. <i>Heyelan envanterlerine ilişkin ölçeklere ait standart (Corominas vd., 2014).....</i>	21
Tablo 2.3. <i>CBS tabanlı sayısal heyelan envanterinde yer alan öznitelik bilgileri</i>	23
Tablo 3.1. <i>İstanbul ili kapsamında heyelan konusunda yapılan önceki çalışmalar</i>	25
Tablo 3.2. <i>Heyelan envanterinin oluşturulmasında haritalama altlıkları ve öznitelikleri</i>	29
Tablo 4.1. <i>AHP Önem Skala Değerleri ve Tanımları (Dağdeviren vd., 2004).....</i>	78
Tablo 5.1. <i>Heyelan Duyarlılık Faktörleri</i>	87
Tablo 5.2. <i>SAW için Parametre Ağırlıkları.....</i>	102
Tablo 6.1. <i>Lojistik Regresyon Modeli (LRM) ile elde edilen Anadolu ve Avrupa yakası duyarlılık sınıfı dağılımları.</i>	105
Tablo 6.2. <i>Bina envanterine göre Avrupa ve Anadolu yakası için Lojistik Regresyon Modeli (LRM) ile elde edilen heyelan duyarlılık değerlendirmesi.....</i>	106



1. Giriş

İstanbul İli Genelinde Afet Riski Altındaki Alanların Belirlenmesine Altlık Veri Üretmek Amacıyla Yer Bilimsel Araştırmaların Gerçekleştirilmesi İşi, 07.05.2021 tarihinde İstanbul Büyükşehir Belediyesi, Deprem Risk Yönetimi ve Kentsel İyileştirme Daire Başkanlığı, Deprem ve Zemin İnceleme Müdürlüğü-DEZİM (bundan sonra İDARE olarak anılacaktır) ile Boğaziçi Peyzaj İnşaat Müşavirlik Teknik Hizmetler San. Tic. A.Ş.-BİMTAŞ (bundan sonra YÜKLENİCİ olarak anılacaktır) arasında imzalanan protokol doğrultusunda 16 Haziran 2021 tarihinde başlamıştır.

Projenin iş paketlerinden biri olan “Heyelan Envanteri ve Duyarlılık Haritasının Oluşturulması ile Tehlike ve Risk Değerlendirmesi için Yol Haritasının Belirlenmesi” hizmeti kapsamında İstanbul il sınırları içerisinde gerçekleşmiş heyelanlara ilişkin envanterler (ör. arşiv, tarihsel, çok zamanlı ve olay envanterleri) sayısal olarak üretilmiş, bu envanterlerden yola çıkılarak uzman görüşüne dayalı yöntemler ve çok değişkenli istatistiksel analiz yöntemleri kullanılarak heyelan duyarlılık haritaları hazırlanmıştır.

Proje çalışmaları 4 aşamada gerçekleştirilmiştir:

- Mevcut veriler analiz edilmiş, tespit edilen eksikler raporlanmıştır.
- Heyelan envanter verileri hazırlanmıştır.
- Heyelan duyarlılık haritaları hazırlanmıştır.
- Web tabanlı Heyelan Envanter ve Duyarlılık Analiz sistemi geliştirilmiştir.

Proje çalışmalarına ilişkin detaylar başlıklar halinde rapor içerisinde sunulmuştur.

2. Mevcut Verilerin Analizi ve Eksiklerin Belirlenmesi

Heyelanların zamansal olabilirliğine ilişkin değerlendirmeler, farklı hareket mekanizması ve duyarlılık faktörlerinin dikkate alınması ile gerçekleştirilir. Heyelanların, mekansal, zamansal ve diğer yüzey süreçleri ile olan etkileşimleri bakımından sahip oldukları farklılıkların dikkate alındığı değerlendirme yaklaşımı altında ele alınması gerekmektedir. Farklı amaç, yöntem ve ölçeklerde haritalanan heyelanlar insan ve insana ait yapılar için kaçınma alanları olarak tanımlanmaktadır. Bu bakımdan herhangi bir heyelanın mekânsal gerçekleşme olasılığına ait değerlendirme heyelanların konum olarak nerede geliştiği bilgisinin toplanmasıyla başlar.

Bugün bu heyelan ve heyelana ait jeomorfolojik birimlerin detaylı ve hassas şekilde haritalanması heyelanın dinamiklerinin ve ilişkin yüzey süreçlerinin anlaşılması bakımından önemlidir.

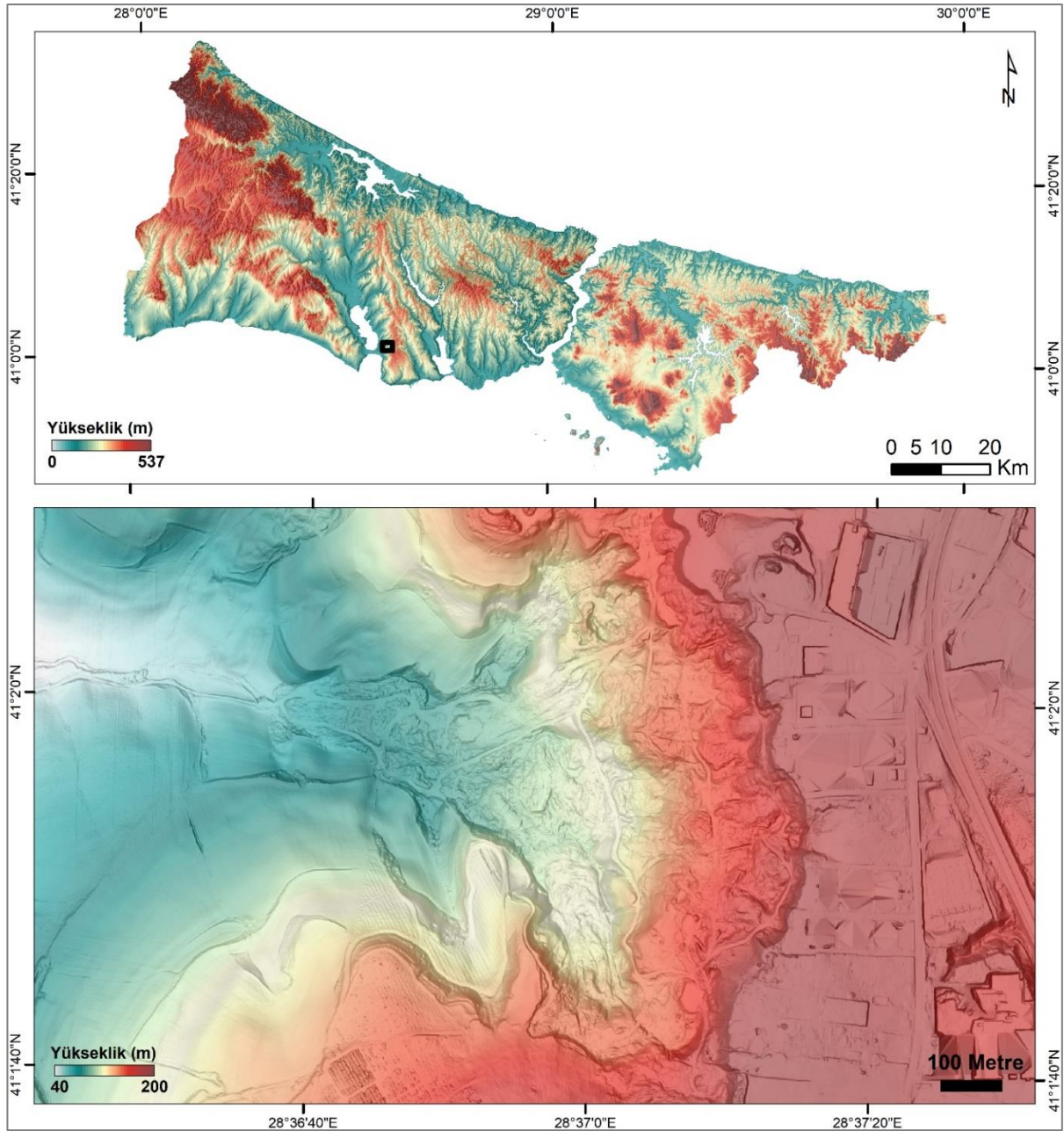
Belirli bir alanda gelişen heyelan; bir kopma bölgesi boyunca hareket ederek, hacmi, su içeriği ve yamaç gradyanına bağlı olarak enerjisini yitirir ve genel olarak hareket eden malzeme durağan hale gelerek heyelanın birikim alanını meydana getirir. Belirli bir alanda gerçekleşmiş heyelan zamana bağlı olarak tekrar aktif hale geçebildiği gibi stabilite kazanarak bu statüsünü sürdürebilir. Bu bakımdan heyelanlar uzun dönemde çevresel değişimlerden ve özellikle suya bağlı erozyonel süreçlerden de etkilenir. Dolayısıyla yüzey sularının yaptığı erozyon türü ve göreceli hızları, suyun toplanma alanları ve birim alana uyguladıkları göreceli makaslama dayanımlarının bilinmesi de önemlidir.

Yüksek çözünürlüklü Sayısal Yükseklik Modelleri (SYM) ve/veya Stereo Hava Fotoğrafları heyelanların tanımlanması, dağılımlarının haritalanması ve heyelanları hazırlayıcı faktörlere ilişkin farklı mekansal ölçeklerde bilgilerin toplanmasında temel verileri oluşturmaktadır. Bu temel altlık veriler içerisinde özellikle Light Detection and Ranging (LiDAR) yöntemi yüksek çözünürlüklü SYM verisi sağlamanın yanı sıra, bitki örtüsüne bağımlılığı ortadan kaldırdığı için günümüzde heyelan çalışmalarında yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. LiDAR verileri, özellikle bitki örtüsüyle kaplı dağlık ve engebeli arazilerde, mekansal bilginin elde edilmesinde önemli katkılar sağlamanın yanı sıra zaman alan noktasal olarak ölçümlerin yapılabilirdiği yersel çalışmalara alternatif bir yöntemdir.

Heyelanların belirlenmesi ve envanter haritalarının oluşturulması sonrasındaki adımı kapsayan duyarlılık çalışmalarında ise heyelan oluşumunu hazırlayan topoğrafik (örn. eğim, bakı, vb.), jeolojik (litoloji, faya olan uzaklık, vb.), hidrolojik (akarsu aşındırma indeksi, drenaj yoğunluğu, vb.) arazi kullanım özellikleri gibi koşul parametrelerine ait bilgilere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu bakımdan bu iş paketi kapsamında ihtiyaç duyulan veriler: (1) Heyelan envanterinin hazırlanmasında ihtiyaç duyulan temel altlıklar ve (2) Heyelan duyarlılık haritalarının hazırlanmasında ihtiyaç duyulan koşul parametrelerine ait altlıklar olmak üzere iki ana başlık altında toplanmıştır.

2.1. Heyelanların ve Heyelan Envanterlerinin Revizyonu için Gereken Öncelikli Verilerin Belirlenmesi

Heyelan envanterine ilişkin yapılan ön değerlendirmelerde İstanbul ilinin tamamını kapsayan en detaylı verinin 2013 yılında Haziran ve Temmuz aylarında BİMTAŞ tarafından üretilen Hava LiDAR verileri olduğu belirlenmiştir. Yersel çözünürlüğü yaklaşık olarak 0,25m olan bu verinin 1:10.000 ölçeğinde hazırlanması gereken envanter için çözünürlüğü 1m olarak belirlenmiştir. Hava LiDAR verilerinden elde edilen yüksek çözünürlüğe sahip SYM modeli (Şekil 2.1); Kırmızı Rölyef Görüntü Haritası (Red Relief Image Map (RRIM)) yöntemi kullanılarak yapılan heyelan tespitinde ana temel altlık olarak belirlenmiştir. Bunun yanı sıra LiDAR verisinin toplanması sırasında algılanan ortofoto mozaiklerinden de heyelanların, özellikle kaya düşmelerinin ve heyelan tanımlamasına ilişkin bitki ve yüzey tekstürü yorumlanarak heyelanların belirlenmesinde kullanılmıştır. Ayrıca İBB DEZİM'in 2020 yılında tamamladığı heyelan bilgi envanteri de heyelanların tanımlanması ve yorumlanmasında kullanılmıştır. 2013 yılını temel alan detaylı envanterin oluşturulmasından sonra özellikle dörder yıl aralıklarla, 2017 ve 2021 yılları için detaylı olan 2013 yılı envanteri kullanılarak ortofoto mozaikleri temelinde yerleşim alanları ve ilişkin kazılarla ortadan kalkan heyelan alanları belirlenerek envanter revize edilmiştir. Aynı zamanda yeni oluşmuş heyelan alanları bu görüntüler kullanılarak ofis çalışmalarına dayalı değerlendirme sonlandırılmış, yapılan saha çalışmaları ile heyelan envanteri nihai haline getirilmiştir.



Şekil 2.1. İstanbul ili sınırları için 2013 yılına ait havadan LiDAR verisinin mekansal olarak kapladığı alan. Haritada siyah renkle gösterilen çerçeve Büyükçekmece Mezarlığının kuzeyindeki aktif heyelan alanını gösterir.

2.2. Heyelan Envanterlerine İlişkin Eksikliklerin Belirlenmesi

Bu çalışma kapsamında üretilen envanterin oluşturulabilmesi için ihtiyaç duyulan diğer veriler Tablo 2.1’de belirtilmiştir. Heyelan envanteri, en yüksek mekansal çözünürlüğe sahip 2013 yılı verisi temelinde hazırlanarak sonraki sekiz yıllık dönem için en güncel ve geçerli envanterin

oluşturulmasında ortofoto mozaikleri, varsa sonraki dönemi, özellikle 2021 yılı Haziran ayında İstanbul Avrupa Yakası için toplanan verilere ihtiyaç duyulduğu ortaya konulmuştur.

Tablo 2.1. İBB Harita Müdürlüğü bünyesinde bulunan ve talep edilen veriler, kapsadıkları yıl ve mekansal çözünürlükleri

İBB Harita Müdürlüğü Verileri		
Veri Türü	Yılı	Çözünürlük
DTM	1987	10-20m
Ortomozaik	1996	5-10m
Ortomozaik	1996	5-10m
DTM	2005	1m
Uydu Görüntüsü	2006	1-5m
Ortomozaik	2006	1-5m
DTM	2006	1-5m
Uydu Görüntüsü	2011	5m
Ortomozaik	2013	0.3m
DTM	2013	1 m
DTM	2016-2017	2.5 m
DTM	2021	0.2-0.6m
Ortomozaik	2021	0.2-0.6m

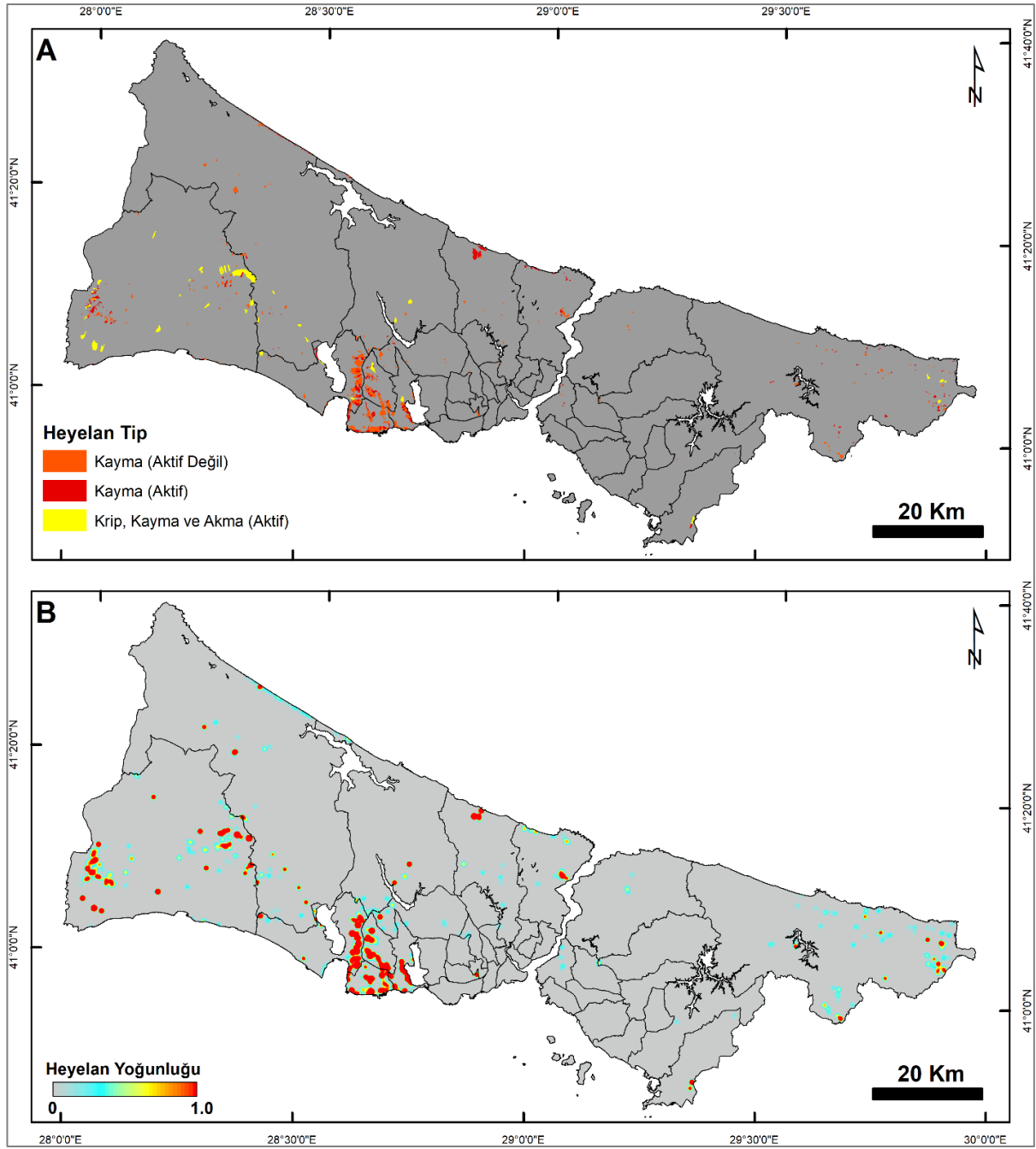
Özellikle 2013 yılı sonrasına ait veri setleri envanterin oluşturulmasında ve en güncel envanterin tamamlanmasında öncelik verilmesi gereken veri setleridir.

2.3. Heyelanlı Alanların Mekânsal Dağılımının Tespiti ve Öncelikli Alanların Belirlenmesi

Heyelanların mekânsal dağılımlarının tespit edilmesi ve buna bağlı öncelikli alanların belirlenmesi heyelan envanter çalışmalarının doğruluk ve hassasiyetini artırması açısından son derece önemlidir. Heyelanlı alanların mekansal tespitleri için önceki çalışmalara ait envanterler, literatür ve arşiv verileri incelenmiştir. Bu envanterler içerisinde bölge için yapılan detaylı araştırmalardan birisi olan Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (MTA) tarafından 2004 yılında “İstanbul Metropolü Batısındaki (Küçükçekmece-Silivri-Çatalca

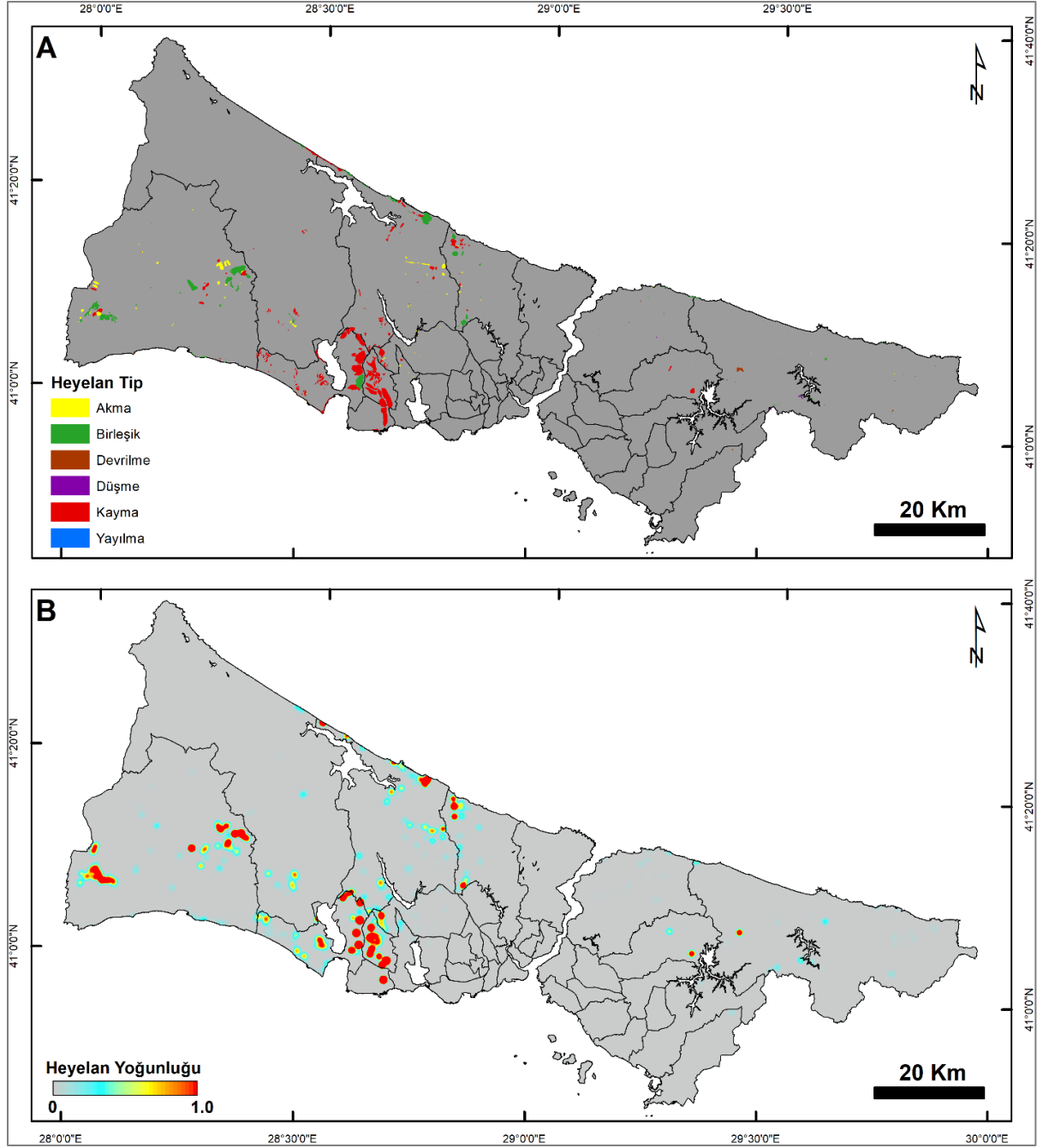
Yöresi) Kentsel Gelişme Alanlarının Yer Bilim Verileri” başlıklı özel yayına konu olan ve daha sonra bu alan için 2006 yılında Türkiye Heyelan Envanter Haritaları projesi kapsamında basılan 1/500.000 ölçekli Türkiye Heyelan Envanteri Haritası, İstanbul Paftası (Duman vd., 2006) özel yayın serisi (6) çalışmaları mevcuttur. Bu çalışmalar kapsamında ortaya konulan heyelan dağılım haritasına göre toplam 578 heyelan haritalanmıştır. Bu heyelanların büyük bir bölümü Büyükçekmece ve Küçükçekmece gölleri arasında kalan kesimde ve Silivri kesiminde yoğun bir dağılım göstermektedir. Bunun yanı sıra İstanbul’un Asya kesiminde ise Şile ilçesinin doğu ve kuzeydoğu kesimlerinde yoğunlaşmaktadır (Şekil 2.2).





Şekil 2.2. Duman vd. 2006 tarafından haritalanan heyelanların dağılımı, tipleri (A) ve heyelanlara ait yoğunluk haritası (B).

Bu envanterin yanı sıra İBB DEZİM tarafından 2020 yılında tamamlanan Heyelan Bilgi Envanterine ait veriler heyelan öncelikli bölgelerinin belirlenmesinde değerlendirilmiştir. Büro ve saha çalışmaları sonucu oluşturulan bu envanterde 513 adet alansal bazlı heyelanın yanı sıra 18 adet nokta bazlı heyelan yer almaktadır (Şekil 2.3).



Şekil 2.3. İBB DEZİM tarafından oluşturulan envanterde haritalanan heyelanların dağılımları, tipleri (A) ve heyelanlara ait yoğunluk haritası (B).

Yapılan değerlendirmelerde bu heyelanların Duman vd. (2006) ile örtüşen kısımlarının büyük bir kesimi Avrupa kesiminde, Büyükçekmece ve Silivri kesiminde yer alırken, Asya kesiminde iki envanter arasında dağılım bakımından Şile çevresinde belirgin farklar olduğu

gözlenmektedir. Özellikle İBB DEZİM tarafından oluşturulan envanterin aktif heyelan alanlarına yoğunlaşmış olması bu farklılığın olası nedeni olarak gösterilebilir.

İki envanter arasındaki farklılıklardan bir diğeri ise tamamlandıkları yıllardır. Duman vd. (2006) tarafından yapılan envanter 2004 ve 2006 yılları arasındaki saha çalışmaları ile tamamlanmıştır. Buna karşın İBB DEZİM tarafından oluşturulan envanter 2020 yılı içerisinde tamamlanarak yayınlanmıştır. Arada geçen on dört yıllık süre zarfında oluşan heyelanları da kapsamı bakımından İBB DEZİM heyelan bilgi envanteri daha güncel bir envanteredir.

Çalışma kapsamında İstanbul Büyükşehir Belediyesi (İBB) tarafından oluşturulan ve özellikle aktif heyelanları içeren heyelan envanterleri ile yakın zamanda gelişen heyelanların lokaliteleri tespit edilmiştir. Yine Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (MTA) tarafından oluşturulan Türkiye Heyelan Veri Tabanı (Çan vd., 2013) kullanılarak heyelan alanları tespit edilmiş ve bu alanlardaki envanterler güncellenmiştir.

Geçmiş envanterlerin incelenmesinin yanında özellikle sanayi ve yerleşim alanlarının etrafında gelişen heyelanların tespit edilmesi, ekonomik açıdan ve insan hayatı üzerinde oluşturduğu risk faktörleri de gözetilerek öncelikli alanlar olarak nitelendirilmiştir. Yine dolgu alanları, maden işletmeleri, otoyol inşaatları, Havalimanı inşaatları ve bu yapılaşmanın neden olduğu şev stabilite koşullarındaki değişimler, özellikle bu alanları heyelanlara daha duyarlı hale getirmektedir. Bu açıdan bakıldığında yeni yapılaşma alanlarında envanter açısından öncelikli alanlar içerisinde nitelendirilmektedir.

Literatür taraması yapılarak mevcut heyelan çalışmalarının lokaliteleri tespit edilmiş ve buna bağlı olarak çalışılan heyelan alanlarındaki envanterler ve tanımlamalar heyelana duyarlı alanların belirlenmesi hususunda katkı sağlamıştır.

Özellikle aşırı nüfus ve hızlı kentleşmenin getirdiği problemler göz önünde bulundurularak, İstanbul ili özelinde uzun zamansal dönemleri kapsayan hava fotoğrafları, Sayısal Yükseklik Modelleri (SYM) ve uydu görüntüleri kullanılarak, arazi kullanımının değişimi tespit edilmiştir. Buna bağlı antropojenik (insan) kaynaklı ve doğal faktörlerin tetiklediği önceki çalışmalarda rapor edilen heyelanlar ve bu heyelanlı alanlar kullanılarak yaptığımız çıkarım ile benzer duyarlı lokaliteler envanterin oluşturulması açısından öncelikli alanlar olarak belirlenmiştir.

Yaptığımız diğer bir değerlendirme ise bu envanterlerin ölçeği konusundadır. Duman vd. (2006) diğer bir adıyla MTA envanteri 1:25.000 ve 1:30.000 ölçekli hava fotoğraflarına dayanmaktadır. Bu kapsamda bu envanterin ölçeği orta ölçekli (1:250.000 – 1:25.000) heyelan envanterleri sınıfına karşılık gelmektedir (Tablo 2.2). İBB DEZİM tarafından üretilen envanter ise ölçeği itibariyle (1:25.000 – 1: 5.000) yerel (*ing. local*) ölçekte hazırlanmıştır.

Tablo 2.2. Heyelan envanterlerine ilişkin ölçeklere ait standart (Corominas vd., 2014).

Çalışmanın Ölçeği	Etki Mesafesi	I(M)/F ^a	Tehlike Tanımlayıcısı
Ulusal <1:250.000	İçermez	Dikkate alınmaz	Heyelanların meydana geldiği idari birim (lokasyon)/yıl bilgisi yok
Bölgesel 1:250.000- 1:25.000	Genellikle içermez	Genellikle belirlenmiş (sabit) büyüklük değeri	Heyelanların km ² / yıl bilgisi yok
Yerel 1:25.000-1:5.000	İçerir	Mekana bağlı dağıtılmış büyüklük (şiddet)	Belirli bir büyüklüğe ya da şiddete sahip bir olayın yıllık meydana gelme olasılığı (tekrarlanma sıklığı) sahip bir olayın yıllık meydana gelme olasılığı
Sahaya özgü >1:5.000	İçerir	Mekana bağlı dağıtılmış şiddet	Belirli bir şiddete sahip bir olayın yıllık meydana gelme olasılığı (tekrarlanma sıklığı)
^a Şiddet (büyüklük)/frekans			

- Ulusal (<1:250.000) ve bölgesel (1:250.000-1:25.000) ölçeklerde küçük heyelanlar tekil olarak haritalanamazlar. Ulusal ölçekte yapılan çalışmalar ülke bazında mevcut problemin genel dağılımı hakkında fikir edinilmesi için yapılır. Bölgesel ölçekte yapılan çalışmalar ise bölgesel gelişme projelerinin ilk aşamalarında veya büyük mühendislik projelerinin ön değerlendirmesinde özellikle duraysız alanların genel dağılımlarının çıkarılması için yapılır.
- Yerel ölçekte (1:25.000-1:5.000) ve daha büyük ölçeklerde (>1:5.000) heyelanlar ve risk altındaki elemanlar ayrı ayrı değerlendirilmelidirler.

- Yerel ölçekteki bölgelendirmeler geniş alanlarda stabilite analizlerinin gerçekleştirilmesine imkân verir; runout mesafeleri değerlendirilebilir. Veri kalitesinden ve SYM çözünürlüğünden ciddi oranda etkilenirler. Bu ölçek planlama, erken uyarı ve acil müdahale için referans ölçektir. Ayrıca, öncelikli olarak önlem çalışmalarının yapılacağı sahaların tespitinde alan daraltma açısından bölgelendirmede temel ölçektir.
- Sahaya özgü bölgelendirme daha çok tasarım öncesi alan araştırmalarının gerçekleştirilmesi amacıyla yapılmaktadır.

Heyelan duyarlılık ve tehlikenin ifadesi ölçeğe (haritalama birimine), heyelan tipine, değerlendirilen risk elemanına ve kabul edilebilir risk kriterlerine bağlı olarak değişir; ör. Yerel ölçekte; belirli bir büyüklükte veya şiddette heyelanın bir yıl içerisinde gerçekleşme olasılığı tehlikenin bu ölçekteki ifadesi olarak önerilmektedir (Corominas vd., 2014).

2.4. Heyelanların CBS Tabanlı Sayısal Envanterlerinde Yer Alacak Öznitelik Bilgilerinin Tanımlanması ve Standartların Belirlenmesi

Proje kapsamında CBS tabanlı oluşturulan sayısal heyelan envanterinin içeriğinde yer alan öznitelik bilgileri Burns ve Madin 2017 tarafından “Protocol for Landslide Inventory Mapping from LiDAR Data in Washington State” başlıklı standart belirleme çalışmasında önerilen uluslararası standart çerçevesinde belirlenmiştir. Bu çalışmada önerilen standartlara ek olarak İstanbul Metropolitan alanının ihtiyaçları doğrultusunda ek öznitelik bilgileri de deneyimlerimiz ve uzman görüşlerimiz kapsamında belirlenerek sayısal envanterdeki her bir heyelan için tanımlanmıştır. CBS tabanlı sayısal heyelan envanterinde yer alan öznitelik bilgileri Tablo 2.3’te belirtilmiştir.

Tablo 2.3. CBS tabanlı sayısal heyelan envanterinde yer alan öznelik bilgileri

Öznelik Adı	Açıklama
Heyelan_ID	Sayıların her heyelan için benzersiz olması gerekir. Bu, heyelan dikliği, kaynak ve birikim alanı ile ilişkili alt bilgilerde kullanılan birincil anahtar özneliktir.
Malzeme_Tipi	Cruden ve Varnes (1996) sınıflandırması temelinde, kaya (K), zemin (Z) ve moloz (M) dahil olmak üzere heyelan malzemesinin türünü ifade eder.
Hareket_Tipi	Cruden ve Varnes (1996) sınıflandırması temelinde, kayma, akma, düşme ve bir alt sınıf olarak karmaşık heyelanlar (her iki hareket tipini içeren) için öncelikli hareket ve sonraki hareket dikkate alınarak isimlendirilmiştir. Örneğin, Kayma-Akma gibi.
Hareket_Kodu	"Hareket_Tipi" alanına karşılık gelen harfli kodu içerir. Biçimlendirmenin tamamı büyük harflerden oluşur. Karmaşık heyelanlar için boşluksuz tipler arasında "+" kullanılmıştır. Örneğin, ZK+ZA bir Zemin kayma-akma kompleksini belirtir.
Aktivite	Cruden ve Varnes (1996) sınıflandırması temelinde, aktivitenin durumunu ifade eder. Burada uzman görüşüne dayalı morfolojik belirteçler (örn. gerilme çatlakları, heyelan dikliğinin morfolojik bakımdan sarplığı, akarsu aşındırmasının heyelan gövdesi içerisindeki varlığı gibi) dikkate alınarak aktif, eski ve kalıntı olarak sınıflandırmalar yapılmıştır.
Egim	Heyelanın deforme olmamış komşu yamaçlarından alınan ortalama yamaç eğiminin derece cinsinden ifadesine karşılık gelir. Bu bilgi heyelanların ortalama derinliğinin hesaplanmasında değerlendirilir.
Ort_Egim	Heyelan ana gövdesinin derece cinsinden ortalama topoğrafik eğimini ifade eder.
Hs_Yukseklık	Heyelan ana dikliğinin (heyelan yarası) metre cinsinden yüksekliğini ifade eder.
Hey_Derinlik	Heyelan derinliği için temel alınan eşik değeri 5 metredir. Bu değerin altı "Sığ Heyelan" üstü ise "Derin Heyelan" olarak adlandırılmıştır.
Hacim	Kayma düzlemi yaklaşık derinliği ve heyelan alanının çarpımından elde edilen, birim olarak metre-küp cinsinden ifade edilir.
Alan	Heyelanın kapladığı yüzey alanını metre kare cinsinden ifade eder.
Genişlik	Haritalanan heyelanın ortalama genişliğini ifade eder.
Uzunluk	Haritalanan heyelanın yamaç gradyanı boyunca uzunluğunu ifade eder.
Bitki_Örtüsü	Heyelan ana gövdesi üzerinde gelişmiş bitki örtüsünün yoğunluğunu (Çok yoğun, yoğun, orta, seyrek, yok) ifade eder.
Tetikleyici	Heyelanı tetikleyen faktörü (deprem, yağış, insan, bilinmiyor) ifade eder.
Ols_Tarihi	Heyelanın oluşum tarihi biliniyorsa bu alanda belirtilir, aksi durumda, tarihi bilinmeyenler için N/A ifadesi kullanılır.
Gzlm_Tarihi	Saha gözlemi varsa bunun tarihine ilişkin bilgiyi ifade eder. Yapılmamış gözlemler için N/A ifadesi kullanılır.
Gzlm_Verisi	Saha gözlemi haricinde başka verilerden faydalanıldıysa (Örn. Hava fotoğrafı, Uydu görüntüsü, LiDAR verisi, vb.) bu alanda belirtilecektir.
Srml_Kisi	Veri girişini yapan sorumlu teknik personelin adı ve soyadını belirtir.
Ek_Açıklama	Varsa ek yorum ve hususları belirtir.

3. Heyelan Envanter Haritalarının Hazırlanması

3.1. Öncelikli Alanlarda Önceki Rapor ve Yayınların İncelenmesi

İstanbul il sınırları içerisinde gelişmiş heyelanlarla ilgili çalışmalar 2000' li yılların başlarında başlamıştır. Bu kapsamda yapılan çalışmalarda çoğunlukla tekil bir heyelanın ya da bir heyelan kompleksinin oluşum ve gelişimi üzerine yoğunlaşmıştır.

İstanbul il sınırları içerisinde gelişen heyelanlara ait çalışmalar heyelan envanter çalışmaları ile de desteklenmiştir. Bu kapsamda özellikle heyelanların yıllar içerisindeki oluşum ve gelişimlerinin kaydedildiği İBB tarafından oluşturulan heyelan envanterleri, hava fotoğrafları ve topoğrafya haritalarından üretilen Sayısal Yükselti Modelleri (SYM) kullanılarak haritalanan heyelanları içeren, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (MTA) tarafından oluşturulan, Türkiye Heyelan Veri Tabanı (Çan vd., 2013) projesi ve İstanbul Teknik Üniversitesi Avrasya Yer Bilimleri Enstitüsü tarafından arşiv envanterleri ve istatistiksel metotlar kullanılarak oluşturulan Türkiye Ölümcül Heyelan Veri Tabanı (FATALDOT) (Görüm ve Fidan, 2021) bu envanter çalışmalarının en kapsamlı olanlarıdır. Oluşturulan bu envanterlerden İBB tarafından oluşturulan heyelan envanterleri yeni bir olay geliştiğinde kaydedilmesi bakımından aktif heyelanların lokasyonlarını içermektedir. MTA tarafından oluşturulan Türkiye Heyelan Veri Tabanı özellikle eski, büyük ve çözünürlük parametreleri nedeniyle tespit edilebilecek boyutta olan heyelanları içermektedir. İstanbul Teknik Üniversitesi Avrasya Yer Bilimleri Enstitüsü tarafından oluşturulan Türkiye Ölümcül Heyelan Veri Tabanı (FATALDOT) ölümcül heyelanların lokasyonlarını içermektedir. Bu veri tabanında dikkati çeken bir diğer konu İstanbul ili özelinde Türkiye'nin diğer alanlarıyla kıyaslandığında da insan kaynaklı (antropojenik) tetiklenen heyelanların çoğunlukta olduğu görülmektedir. Bu durum İstanbul'daki şehirleşme hızı ile de çok yakından ilişkilidir.

İstanbul'da yapılan heyelan çalışmalarının çoğunlukla birkaç lokalitede toplandığı yapılan literatür taraması sonucunda saptanmıştır. Bu alanlar genellikle aktif, büyük ve yerleşim alanlarını tehdit edebilecek heyelanların bulunduğu alanlardır. Bu bağlamda yapılan çalışmalar özellikle Avrupa yakasının kuzeyinde yer alan maden ve dolgu sahalarında (Eyüp), yerleşim alanlarının yoğunlaştığı Avrupa Yakasının güneyindeki (Beylikdüzü, Büyükçekmece, Küçükçekmece, Avcılar) görece olarak daha aktif heyelanları bulunduğu alanları kapsamaktadır.

Heyelan çalışmaları konu dağılımına bakıldığında, genel olarak heyelan zamansal aktivite durumlarının incelenmesi (Acar vd., 2004; Kuşku ve Dalgıç, 2020; Bayık vd., 2021), derinlik (Duman vd., 2005; Yalçinkaya vd., 2015; Gürer vd., 2016; Grit ve Kanli, 2016; Martino vd., 2018; Karcıoğlu, 2019; Kuşku ve Dalgıç, 2020;), aktivite (Duman vd., 2005; Acar vd., 2008; Bayrakdar ve Döker, 2011; Doğan vd., 2012; Yalçinkaya vd., 2015; Görüm ve Nefeslioğlu, 2015; Gürer vd., 2016; Grit ve Kanli, 2016; Lenti vd., 2016; Martino vd., 2018; Keskinsezer

ve Dağ, 2019; Kuşku ve Dalgıç, 2020;), tehlike (Duman vd., 2005; Ertek ve Erginal, 2006), risk (Keskinsezer ve Dağ, 2019; Kuşku ve Dalgıç, 2020;), envanter (Görüm ve Fidan, 2021; Duman vd., 2006; Çan vd., 2013;), duyarlılık (Duman vd., 2006; Nefeslioğlu vd., 2010;), önlem (Bayrakdar ve Döker, 2011;), hız (Yalçinkaya vd., 2015; Bayık vd., 2021) ve yamaç duraylılığı (Ertek ve Erginal, 2006; Tokgöz, 2009; Özcep vd., 2010; Martino vd., 2016; Lenti vd., 2016;) ile ilgili çalışmaların ön planda olduğu gözlemlenmektedir.

Literatür taramasında ulaşılan çalışmaların hem tanımlanan problem hem getirilen çözümler bakımından birçok farklı yöntem kullanılmıştır. Burada özellikle istatistik, GNSS (GPS), jeofizik, arşiv, jeoteknik, Uzaktan Algılama (UZAL) ve Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) gibi hem kantitatif ve gözleme dayalı yöntemler kullanılmıştır (Tablo 3.1).

Bu kapsamda literatür taraması sonucunda ulaşılan 24 çalışmada tanımlanan ve analiz edilen heyelanların genellikle anahtar lokalitelerdeki problemlere çözüm aradığı gözlemlenmiştir. Bu durum özellikle İstanbul genelinde bakıldığında farklı boyutta heyelan tehlikesine maruz kalma ihtimali olan alanların tespit edilmesine olan ihtiyacı açık bir şekilde vurgulamaktadır.

Tablo 3.1. İstanbul ili kapsamında heyelan konusunda yapılan önceki çalışmalar

SIRA	YAZAR	TARİH	MAKALE	KONU	YÖNTEM	ÇALIŞMA ALANI
1	M. Acar, M. T. Özlüdemir, R. N. Çelik, S. Erol, T. Ayan	2004	Landslide Monitoring Through Kalman Filtering: A Case Study in Gürpınar	Heyelan Zamansal Aktivite	İstatistik - GPS	Gürpınar / Beylikdüzü
2	T. Y. Duman, T. Can, R. Ulusay, M. Kecer, O. Emre, S. Ates, I. Gedik	2005	A Geohazard Reconnaissance Study Based on Geoscientific Information For Development Needs of The Western Region of Istanbul (Turkey)	Heyelan Derinlik, Aktivite ve Tehlike	CBS - Jeofizik	İstanbul
3	Ertek, T.A., Erginal, A.E.	2006	Anthropogenetically Triggered Landslide Factors of The Varyant Landslide Area at Büyükçekmece, NW Turkey	Heyelan Tehlike ve Yamaç Duraylılığı	Arşiv	Büyükçekmece
4	T. Y. Duman, T. Can, C. Gökçeoglu, H., A. Nefeslioğlu, H. Sonmez	2006	Application Of Logistic Regression for Landslide Susceptibility Zoning of Cekmece Area, Istanbul, Turkey	Heyelan Duyarlılık ve Envanter	UZAL - İstatistik	Büyükçekmece - Küçükçekmece

5	M. Acar, M. Haberler-Weber, T. AYAN	2008	Bulanık Çıkarım Sistemleri İle Heyelan Bloklarının Belirlenmesi : Gürpınar Örneği	Heyelan Aktivite	Bulanık Mantık - GPS	Gürpınar / Beylikdüzü
6	N. Tokgöz	2009	Case Study of The Agacli Landslide–Gully Complex During Post-Coal-Mining Reclamation and Afforestation	Yamaç Duraylılığı ve Heyelan Aktivite	GPS - İstatistik	Ağaçlı / Eyüp
7	H. A. Nefeslioglu, E. Sezer, C. Gokceoglu, A. S. Bozkir, T. Y. Duman	2010	Assessment of Landslide Susceptibility by Decision Trees in the Metropolitan Area of Istanbul, Turkey	Heyelan Duyarlılık	İstatistik	İstanbul
8	F. Ozcep, E. Erol, F. Saraçoğlu, M. Haliloğlu	2010	Seismic landslide analysis: Gurpınar (Istanbul) as a case history	Yamaç Duraylılığı	Jeofizik - Jeoteknik	Gürpınar / Beylikdüzü
9	C. Bayrakdar, M. F. Döker	2011	İstanbul Kuzeyindeki Madencilik Faaliyetlerinden Kaynaklanan Mekânsal Sorunlara Bir Örnek: Çiftalan Köyü Heyelanları	Heyelan Aktivite ve Önlem	UZAL - CBS	Çiftalan Köyü / Eyüp
10	U. Doğan, D. Öz, S. Ergintav	2012	Kinematics of landslide estimated by repeated GPS measurements in the Avcılar region of Istanbul, Turkey	Heyelan Aktivite	GPS	Avcılar
11	T. Çan, T. Y. Duman, Ş. Olgun, Ş. Çörekçioğlu, F. K. Gülmez, H. Elmacı, S. Hamzaçebi, Ö. Emre	2013	Türkiye Heyelan Veri Tabanı	Heyelan Envanter	UZAL - CBS	İstanbul (Türkiye)
12	E. Yalçinkaya, H. Alp, S. Martino, O. Özel, E. Görgün, L. Lenti, P. Bigarre, M.S. Arslan, B.B. Akşahin	2015	Büyükçekmece (İstanbul) Heyalan Alanının Jeofizik Yöntemlerle İncelenmesi	Heyelan Aktivite , Hız ve Derinlik	Jeofizik	Büyükçekmece - Küçükçekmece
13	T. Görüm, H. A. Nefeslioglu	2015	Çok Zamanlı Heyelan Aktivitesinin Belirlenmesinde Jeomorfolojik Bir Yaklaşım	Heyelan Aktivite	UZAL - CBS	Firuzköy / Avcılar

14	A. Gürer, T. B. Varlı, O. M. İlkısık, Ö. F. Gürer	2016	Electrical İmaging Of the Geoenvironment Around Water İnfrastructures İn Istanbul City	Heyelan Derinlik, Aktivite	Jeofizik	Arnavutköy
15	S. Martino, P. Bigarrè, S. Coccia, C. Bourdeau, L. Lenti, O. Ozel, E. Yalcinkaya	2016	Integrated engineering-geological and numerical approach applied to the large Büyükçekmece (Turkey) landslide for evaluating earthquake-induced effects	Yamaç Duraylılığı	GPS - Jeofizik	Büyükçekmece
16	M. Grit, A. I. Kanli	2016	Integrated Seismic Survey for Detecting Landslide Effects on High-Speed Rail Line at Istanbul-Turkey	Heyelan Derinlik ve Aktivite	Jeofizik	Silivri
17	E. Yalcinkaya, H. Alp, O. Ozel, E. Gorgun, S. Martino, L. Lenti, C. Bourdeau, P. Bigarre, S. Coccia	2016	Near-Surface Geophysical Methods For Investigating The Buyukcekmece Landslide İn Istanbul, Turkey	Heyelan Derinlik ve Aktivite	Jeofizik	Büyükçekmece
18	L. Lenti, S. Martino, G. Musolino	2016	Considering Seismic Coefficient Distributions Within Slopes to Calculate Landslide Reactivation Probability	Yamaç Duraylılığı, Heyelan Aktivite	Jeofizik	Avcılar - Beylikdüzü
19	S. Martino, L. Lenti, C. Bourdeau	2018	Composite Mechanism of The Büyükçekmece (Turkey) Landslide as Conditioning Factor for Earthquake-İnduced Mobility	Heyelan Derinlik ve Aktivite	UZAL - GPS - Jeofizik - İstatistik	Büyükçekmece
20	A. Keskinsezer, E. Dağ	2019	Investigating Of Soil Features and Landslide Risk İn Western-Atakent (İstanbul) Using Resistivity, MASW, Microtremor and Boreholes Methods	Heyelan Aktivite ve Risk	Jeofizik	Atakent
21	G. Karcıoğlu	2019	Near-Surface Resistivity Structure Near Avcılar Landslide İn İstanbul, Turkey By 2D İnversion Of VLF Data	Heyelan Derinlik	Jeofizik	Avcılar
22	İ. Kuşku, S. Dalgıç	2020	Modeling Of Support System for Preventing Retrogressive Slide of Ambarlı Landslide İn Avcılar District, Istanbul	Heyelan Zamansal Aktivite, Derinlik ve Risk	Jeofizik	Ambarlı / Avcılar
23	C. Bayık, S. Abdikan, A. Ozdemir, M.	2021	Investigation Of the Landslides İn Beylikdüzü-Esenyurt	Heyelan Zamansal	InSAR - Çok Zamanlı	Beylikdüzü - Esenyurt

	Arıkan, F. B. Sanlı, U. Dogan		Districts of Istanbul from Insar and GNSS Observations	Aktivite ve Hız	SAR - GNSS	
24	T. Görüm, S. Fidan	2021	Spatiotemporal Variations of Fatal Landslides İn Turkey	Heyelan Envanter	CBS - Arşiv - İstatistik	İstanbul (Türkiye)

3.2. Öncelikli Alanlarda Uzaktan Algılama ve SYM Verilerinin İncelenmesi

İBB Harita Müdürlüğü tarafından temin edilen 0,10 m ile 10 m arasında mekânsal çözünürlüğü olan ortofotolar (1954, 1956, 1959, 1961, 1962, 1967, 1970, 1973, 1975, 1990, 1993, 2012, 2013, 2015), 0,10 m mekânsal çözünürlüğe sahip IMG dosyaları (veride tarih bilgisi belirtilmemiştir), 0,25 m mekânsal çözünürlüğe sahip Sayısal Yüzey Modelleri (DSM) (2012-2013), 0,20 m ile 20 m arasında mekânsal çözünürlüğe sahip Sayısal Arazi Modelleri (DTM) (1987, 2006), 1 m mekânsal çözünürlüğe sahip Sayısal Yükseklik Modelleri (DEM) (2013) ve son olarak ise Google ve ArcGIS veri tabanlarından temin edilen 0,50 m ile 1 m arasında mekânsal çözünürlüğe sahip uydu görüntüleri (2020, 2021, 2022) heyelan envanterinin oluşturulmasında haritalama altlıkları olarak kullanılmıştır (Tablo 3.2).

1996, 2006 ve 2022 yıllarına ait ortofotolar, 2005, 2013, 2016, 2017 ve 2022 yıllarına ait Sayısal Arazi Modelleri (DTM), 2006 ve 2011 yıllarına ait uydu görüntülerinin eksik olması ve bunların yanında 1996 ortofoto dosyasının hasarlı olması nedeniyle heyelan haritalama ve kontrol çalışmalarında kullanılamamışlardır.

Çalışma kapsamında özellikle ormanlık alanlarda, yüzey morfolojisini tanımlamada bitki örtüsüne olan bağımlılığı ortadan kaldırması, yüksek hassasiyette mekânsal çözünürlük sunması ve heyelan envanterlerinin oluşturulmasında diğer yöntemlere kıyasla daha doğru sonuçlar vermesi açısından (örn, Razak vd., 2011; Petschko vd., 2016); Hava LiDAR yöntemi ile oluşturulan yüksek çözünürlüklü Sayısal Yükselti Modelleri (DEM) kullanılmıştır. Bu haritalama katmanı mekânsal çözünürlük (1 m) ve morfolojiyi yansıtmadaki hassasiyeti açısından heyelan haritalamada temel altlık olarak kullanılmıştır.

Yine haritalama ve haritalanan heyelanların kontrollerinin sağlanmasında, ortofotolar, DSM, DTM, Google ve ArcGIS veri tabanlarındaki 0,50 m ile 1 m arasında mekânsal çözünürlüğe sahip uydu görüntüleri gibi haritalama altlıkları kullanılmıştır.

Özellikle heyelan envanterinin güncelliğinin sağlanması ve buna bağlı doğruluğu yüksek bir envanter oluşturulması açısından DEM, DTM, DSM ve ortofotolar kullanılarak haritalanan heyelanlar 2020, 2021 ve 2022 uydu görüntüleri kullanılarak kontrol edilmiştir.

Tablo 3.2. Heyelan envanterinin oluşturulmasında haritalama altlıkları ve öznelilikleri

İBB Harita Müdürlüğü Verileri ve Diğer Veriler				
Veri Türü	Yılı	Çözünürlük	Kaynak	Envanter Durumu
Ortofoto	1954	2,5 m	HGM	√
	1956	8,4 m	HGM	√
	1959	3,4 m	HGM	√
	1961	2,5 m	HGM	√
	1962	3,4 m	HGM	√
	1967	1,6 m	HGM	√
	1970	2,5 m - 5,9 m - 3,4 m	HGM	√
	1973	5,9 m - 8,4 m	HGM	√
	1975	3,4 m	HGM	√
	1990	2,5 m	HGM	√
	1993	5,9 m	HGM	√
	1996	5 m- 10 m	İBB	—
	1996	1 m	İBB	Var- Dosya Bozuk
	2006	1 m - 5 m	İBB	—
	2006	2 m	İBB	√
	2012	0,10 m	İBB	√
	2013	2,5 m - 2,7 m - 2,8 m - 0,10 m - 0,30 m	HGM-İBB	√
	2015	2,5 m - 3 m	HGM	√
	2022	0,20 m - 0,60 m	İBB	—
IMG	Tarih Bilgisi Yok	0,10 m	İBB	√
DSM	2012-2013	0,25 m	İBB	√
DTM	1987	10 m -20 m	İBB	√
	2005	1 m	İBB	—
	2006	1 m -5 m	İBB	√
	2013	1 m	İBB	—
	2016 - 2017	2,5 m	İBB	—
	2022	0,20 m - 0,60 m	İBB	—
Uydu Görüntüsü	2006	1 m - 5 m	İBB	—
	2011	5 m	İBB	—
	2020-2021-2022	0,50 m	Maxar	√
DEM	2013	1 m	İBB	√

3.3. Heyelan Envanter Verisinin Hazırlanması

3.3.1. Kırmızı Topoğrafya Görüntü Haritaları (RRIM) ve Heyelan Tanımlaması

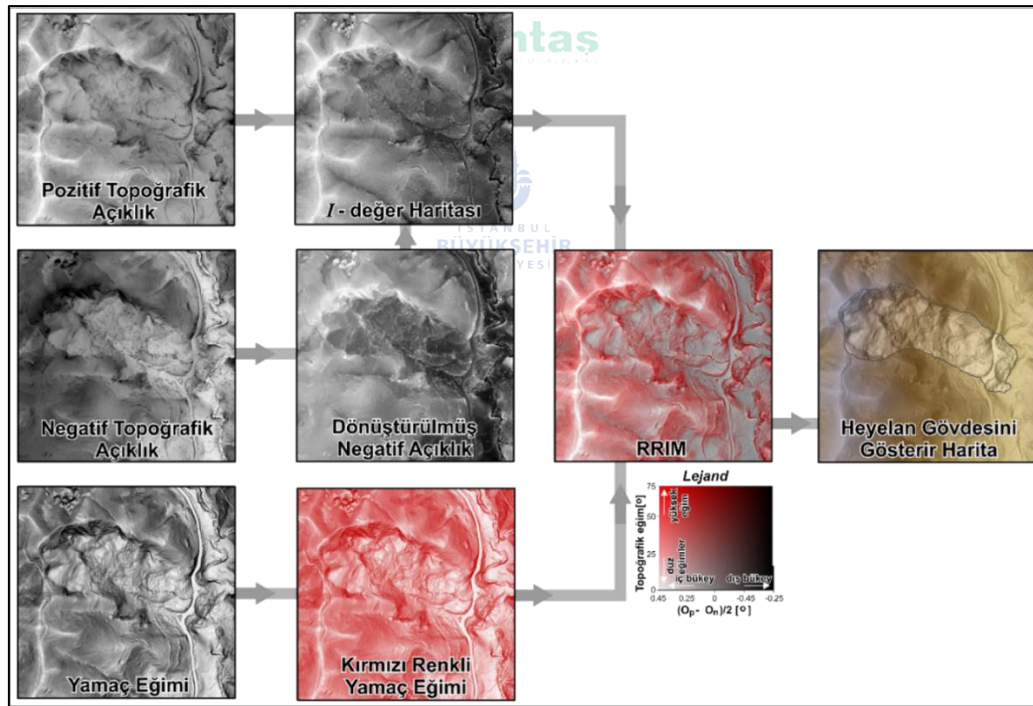
Heyelan envanter verisinin hazırlanmasında ilk adım olarak haritalama altlıklarının üretilmesi yer alır. Bu kapsamda Sayısal Yükseklik Modelleri (DEM) kullanılarak heyelanların tanımlanmasında hillshade gibi DEM türevlerinde gözlemlenen gölgelendirmeye bağlı 3B derinlik algısındaki bozulmaların önüne geçebilmek ve heyelan gövdelerinin, heyelanlara ait

jeomorfolojik birimlerin hassas bir şekilde haritalanabilmesi için Kırmızı Topoğrafya Görüntüleme Haritaları (RRIM) (Chiba vd., 2008) üretilmiştir.

Kırmızı Topoğrafya Görüntüleme Haritaları (RRIM) yöntemi kırmızı renklendirilmiş eğim katmanının, topoğrafik açıklık değerleri olan pozitif açıklık (Op) ve negatif açıklık (On) değerleri kullanılarak üretilen “I” katmanı ($I=Op-On/2$) ile kombinasyonu sonucunda elde edilir (Chiba vd., 2007; Chiba vd., 2008) (Şekil 3.1).

Topoğrafik açıklık değerleri olarak ifade edilen iki değerden biri olan pozitif açıklık (Op) değeri sabit bir noktadan topoğrafyaya bakıldığında gözlemlenebilen içbükey yüzeyleri, ikincisi olan negatif açıklık (On) değerleri ise dış bükey yüzeyleri (Yokoyama vd., 2002) temsil eder.

Kırmızı topoğrafya görüntüleme haritaları özellikle topoğrafyadaki yatay/dikey eğim değerlerini ve içbükey/dışbükey yamaçları gölgelendirmeden bağımsız bir şekilde gösterebildiği için heyelanların hassas bir şekilde haritalanabilmesinde (Görüm, 2019) temel haritalama altlığı olarak kullanılmıştır (Şekil 3.2).

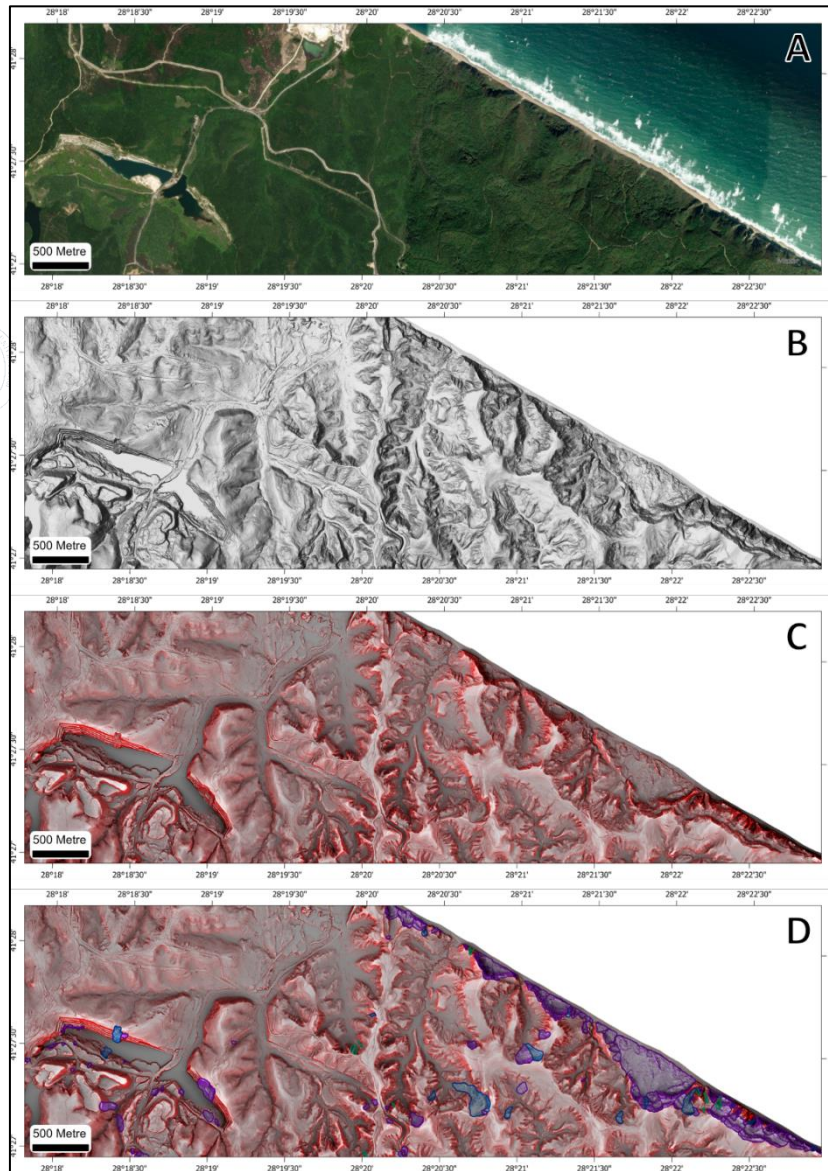


Şekil 3.1. Kırmızı Topoğrafya Görüntüleme Haritalarının (RRIM) üretilmesinde takip edilen işlem adımları

Heyelanların tanımlanmasında basamaklı-engebeli topoğrafya, heyelanlara bağlı oluşan diklikler, yarı dairesel nişleri ve deforme olmuş yol benzeri yapılar gibi yüzey morfolojisindeki

değişimler (Dikau., 1996), heyelanların haritalanmasında tanımlama parametreleri olarak kullanılan parametrelerden bazılarıdır.

Heyelanların tanımlanmasında kullanılan parametreler ayrıca uydu görüntüleri, ortofotolar, DTM, DSM ve gölgelendirme haritaları kullanılarak tekrar analiz edilmiş, böylece tanımlama doğruluğunun artırılması sağlanmıştır. Heyelanlar Cruden ve Varnes (1996) sınıflandırması temel alınarak kayma, kayma bileşenli akma ve akma olarak sınıflandırılmıştır.

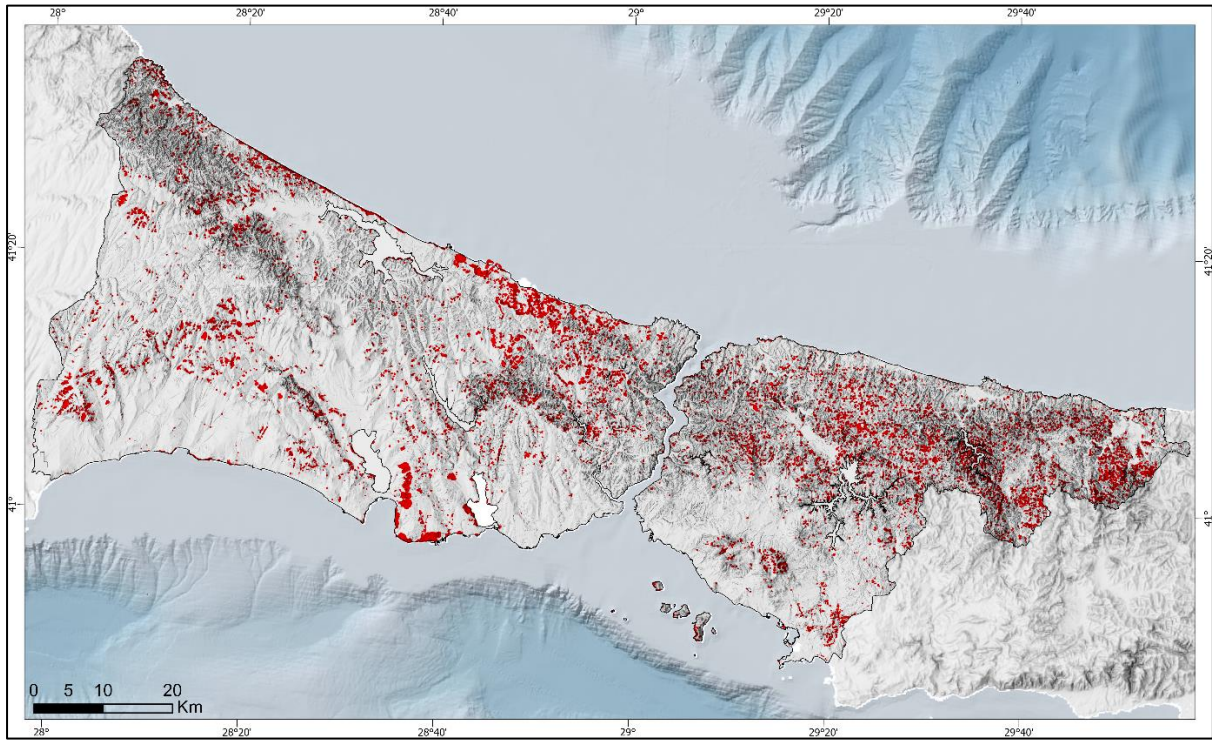


Şekil 3.2. Heyelanların haritalanmasında kullanılan haritalama altlıkları; ortofoto (A), hillshade (B), Kırmızı Topoğrafya Görüntüleme Haritalarının (RRIM) (C), heyelan envanter katmanı ile Kırmızı Topoğrafya Görüntüleme Haritasının (RRIM) birlikte gösterimi

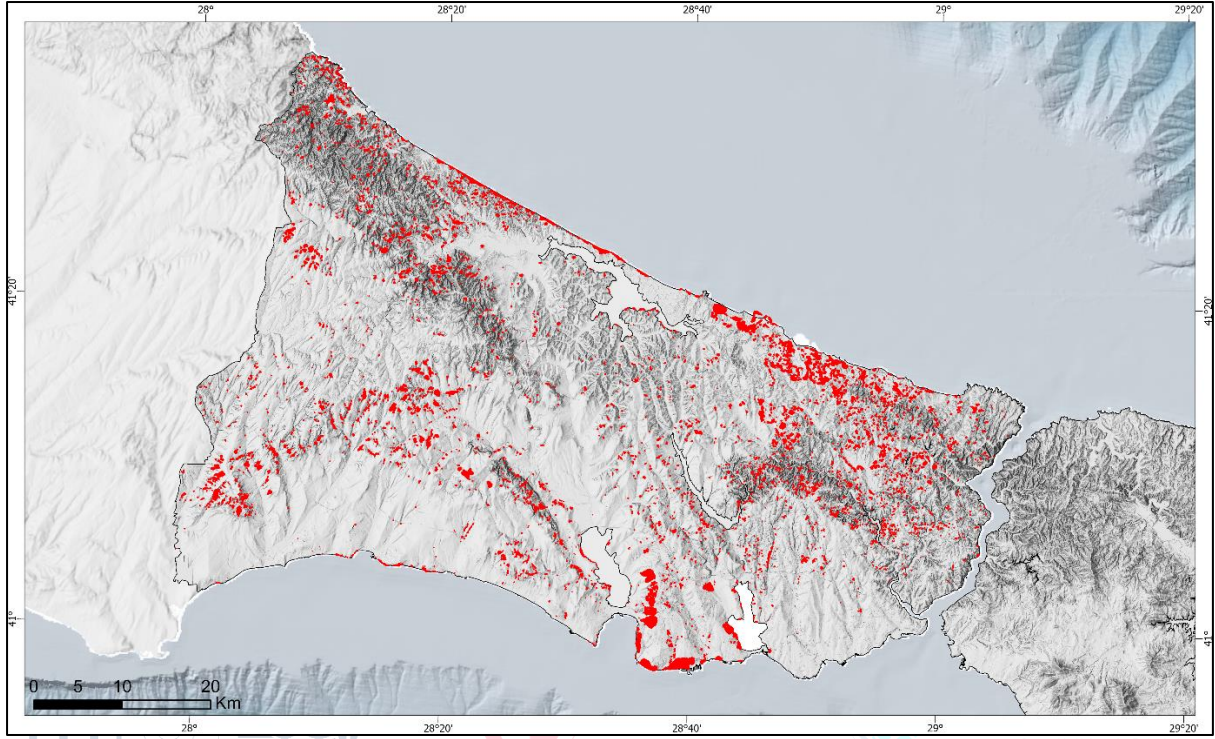
3.3.2. Heyelan Envanteri

Heyelan envanterinin hazırlanmasında temel altlık olarak 2013 yılı LiDAR verisinden üretilen Sayısal Yükseklik Modeli (SYM), ortofotolar ve uydu görüntüleri kullanılmıştır.

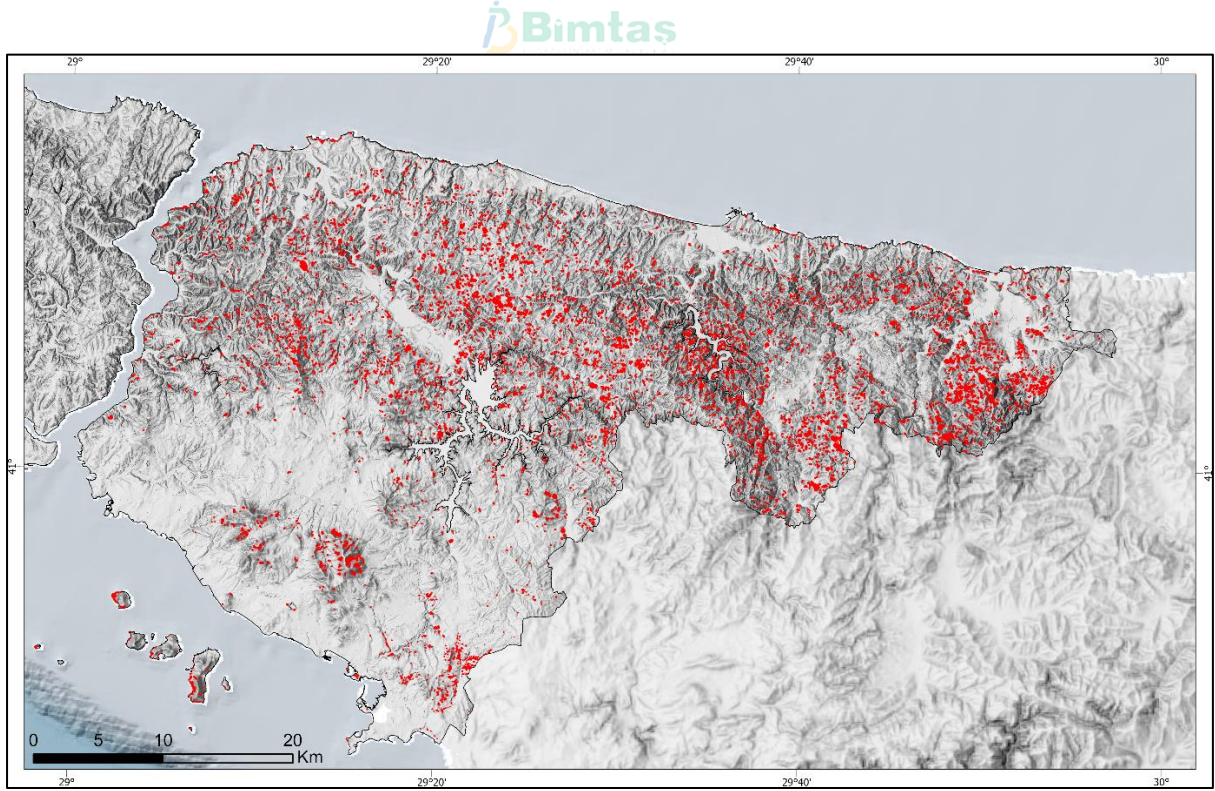
İstanbul il genelinde 5.345 km² 'lik alanda toplamda 17.764 adet heyelan haritalanmıştır (Şekil 3.3). Haritalanan heyelanların 9447 adeti Avrupa yakasında (Şekil 3.4), 8317 adeti ise Anadolu yakası ve adalarda (Şekil 3.5) bulunmaktadır. Bu aşamada DEM verilerinden üretilen RRIM haritaları heyelanlara ait morfolojik deliller hassas bir şekilde gözlemlenebilmesine olanak sağlamıştır. Bu haritalama yöntemi sayesinde hem morfolojik üniteler hem de heyelan envanterinde yer alan öz nitelik bilgileri daha hassas bir şekilde hesaplanarak kaydedilmiştir.



Şekil 3.3. İstanbul il sınırları içerisinde haritalanan heyelanların dağılışı

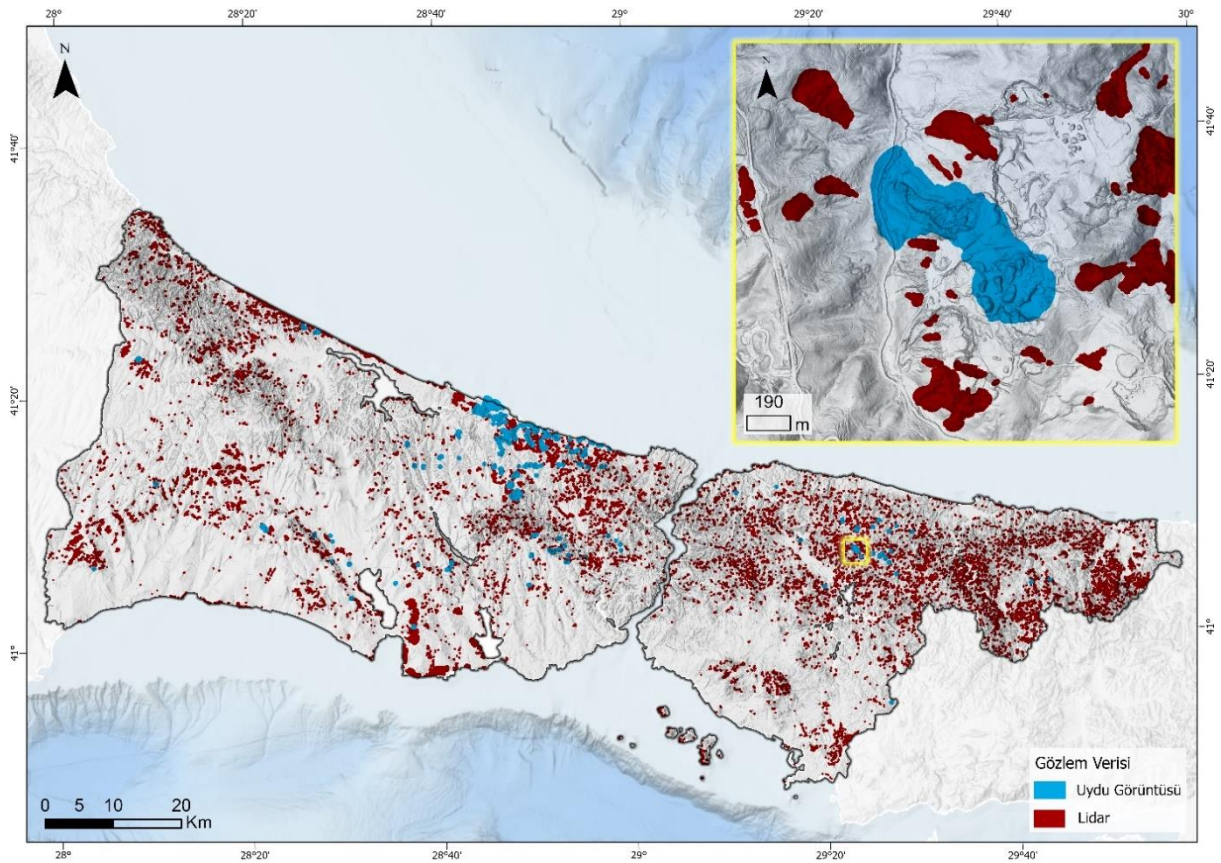


Şekil 3.4. Avrupa yakası sınırları içerisinde haritalanan heyelanların dağılışı



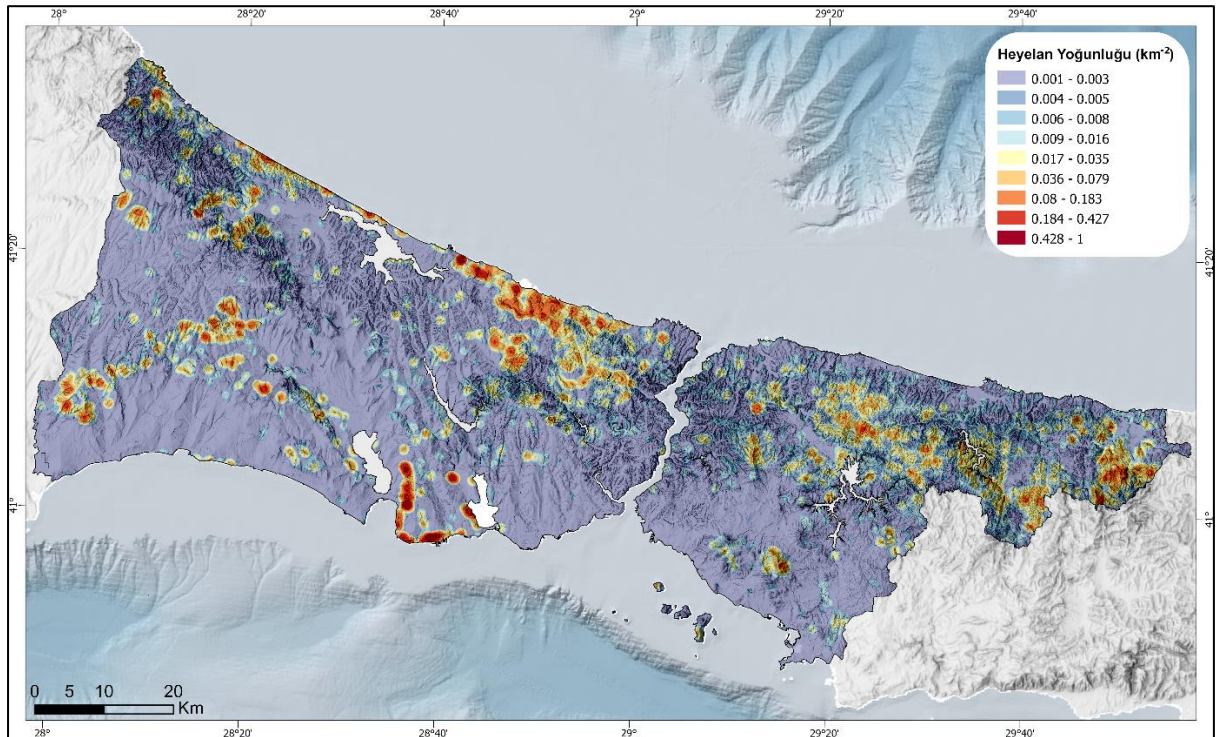
Şekil 3.5. Asya yakası ve Adalar sınırları içerisinde haritalanan heyelanların dağılışı

Heyelan envanteri güncelliğini sağlamak adına antropojenik faaliyetlere bağlı arazi kullanımındaki değişiklikler güncel uydu görüntüleriyle tespit edilmiş ve buna bağlı belirli alanlarda heyelan varlığının ortadan kaldırılması ile bu heyelanlar envanterden çıkarılmıştır. Heyelan envanterinin hazırlandığı temel altlık 2013 yılına ait DEM verisi kullanılarak haritalanan 20537 heyelan güncel uydu görüntüleri kullanılarak revize edilmiş ve bunun sonucu 3240 adet heyelan envanterden çıkarılmıştır. Yapılan bu düzeltme sonucunda envanterdeki heyelan sayısı 17297 olarak güncellenmiştir. Yine DEM verisinin üretildiği yıldan günümüze kadar gelişen ve morfolojisi tanımlanabilir olan heyelanlar da uydu görüntüleri kullanılarak haritalanmıştır. Bu haritalama sonucunda 467 adet yeni heyelan envantere eklenmiş ve böylece envanterdeki heyelan sayısı 17764 olarak kaydedilmiştir (Şekil 3.6).



Şekil 3.6. Heyelanların haritalanmasında kullanılan altlıklara göre heyelanların dağılışı. LiDAR SYM verisinde olmayıp 2021 uydu görüntüsü kullanılarak tespit edilen ve haritalanan, mavi renk ile temsil edilen, Avcıkoru/Şile yakınlarında hafriyat döküm alanında gelişen heyelan

Heyelanların yoğunlaştığı alanları tespit etmek için çalışma alanından Kernel Density metodu ile yoğunluk analizi yapılmıştır. Bu analiz sonucunda km^2 başına düşen heyelan sayısına göre envanter normalize edilmiş ve bunun sonucunda özellikle çalışma alanı içerisindeki antropojenik faaliyetlerin yoğunlukta olduğu alanlar heyelan varlığının yoğunlukta olduğu alanları temsil etmektedir. Bu açıdan bakıldığında özellikle Çekmece Göllerinin etrafı, Avrupa yakası kuzey kıyı kuşağı, Terkos Gölü çevresi, otoyol, havalimanı gibi İstanbul içerisinde kalan yapıların çevresi, özellikle kuzeydeki maden ve dolgu sahalarının çevresi heyelanların sıklıkla görüldüğü alanları temsil etmektedir. Bunun yanında yerleşim alanlarının geniş alanlar kapladığı ve yapılaşmanın yoğun olduğu alanlarla, arazi kullanımı açısından ormanlık alanlar heyelan yoğunluğunun az olduğu alanları temsil etmektedir (Şekil 3.7).



Şekil 3.7. İstanbul heyelanlarının, km^2 başına normalize edilmiş yoğunluk dağılımı haritası

Çalışma alanı içerisinde toplam yüzey alanı olarak en büyük alan kaplayan heyelan tipi, 65 km^2 toplam yüzey alanı ile kaymalar, ikinci olarak 7,52 km^2 ile karmaşık (kayma bileşenli akmalar) ve en küçük toplam yüzey alanı ise 6,48 km^2 'lik toplam yüzey alanıyla akmalara aittir. Çalışma alanındaki heyelan tip desenindeki hâkim hareket tipi, kayma tipindeki heyelanlardır.

Heyelanların haritalanmasının ardından heyelan envanterinin oluşturulması aşamasına geçilmiştir. Bu kapsamda her bir heyelan için Cruden ve Varnes (1996) sınıflandırması temelinde heyelan malzemesinin türü (Malzeme_Tipi) ve heyelan tipi (Hareket_Tipi), heyelanın içerisinde hesaplanan ortalama eğim (Ort_Egim), heyelana komşu deforme olmamış yamaçtan hesaplanan ortalama eğim (Egim) ve heyelan aynasının yüksekliği (Hs_Yukseklık), heyelan derinliği (Hey_Derinlik), hareket eden malzemenin hacmi (Hacim), heyelanların m² (Alan m²) ve km² (Alan km²) cinsinden yüzey alanları, heyelanların olduğu alanlardaki bitki örtüsü yoğunluğu (Bitki_Örtüsü) gibi heyelan öznitelik bilgileri hesaplanarak, heyelan envanterine kaydedilmiştir.

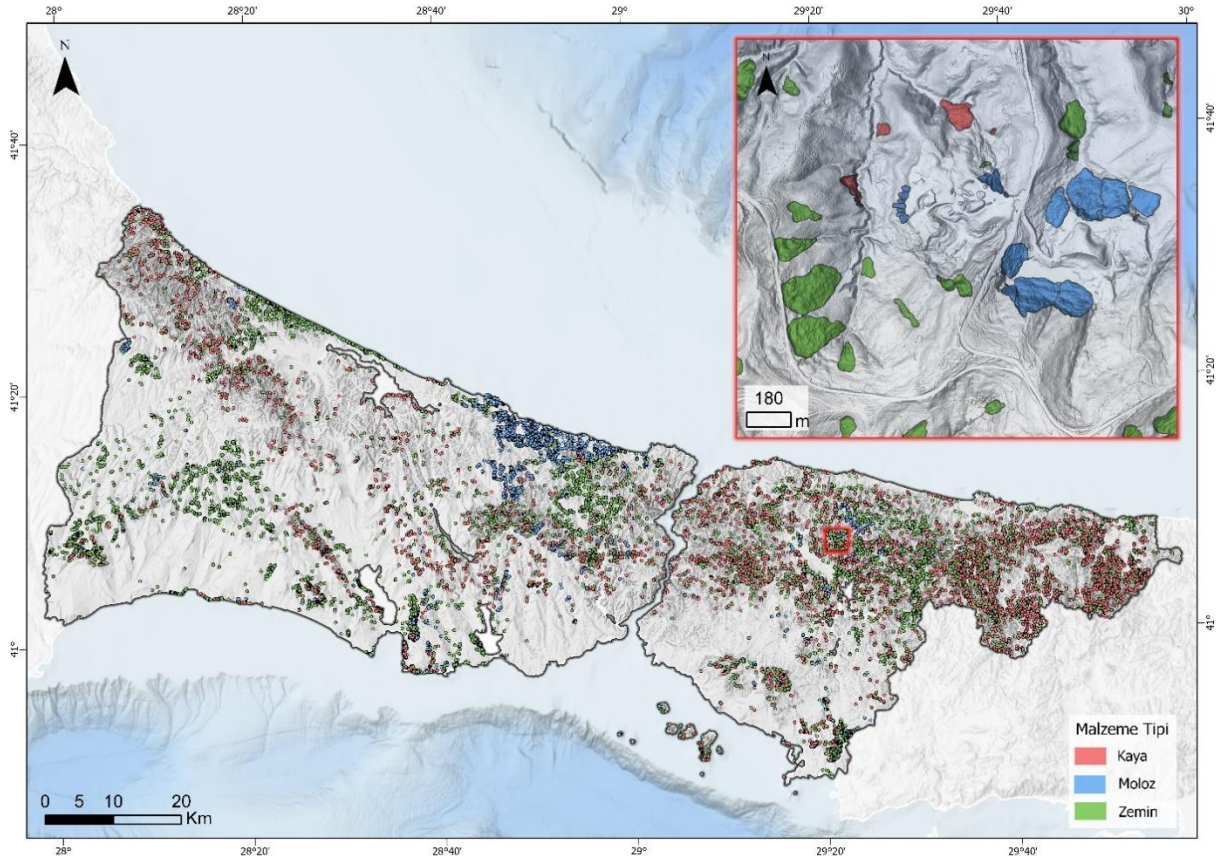
Cruden ve Varnes (1996) tarafından önerilen hareketin tipine göre sınıflama baz alınarak yapılan heyelan tip sınıflaması kapsamında 13.569 adet kayma, 2.821 adet akma ve 1.374 adet karmaşık (kayma+akma) tipinde heyelan olduğu saptanmıştır (Şekil 3.8). Bu bağlamda İstanbul ili sınırları içerisinde haritalanan heyelanların sırasıyla en fazla %76,38 kısmının kayma tipinde, %15,88'lik kısmının akma tipinde ve %7,73'ü kısmının ise karmaşık (kayma+akma) tipinde olduğu gözlemlenmektedir.



Heyelanlar, Cruden ve Varnes (1996) tarafından tanımlanan malzeme tip sınıflaması baz alınarak, hareket eden malzemenin tipine göre üç ana kategoride sınıflanmıştır. Bu sınıflamaya göre hareket eden malzeme kaya, zemin ve moloz (antropojenik faaliyete bağlı oluşan zemin malzemesi) olarak sınıflanmıştır. Hareket eden malzeme tipine göre 6.634 adet heyelanın kaya, 2.563 adet heyelanın moloz ve 8.567 adet heyelanın ise zemin sınıfı içerisinde yer aldığı tespit edilmiştir (Şekil 3.9).

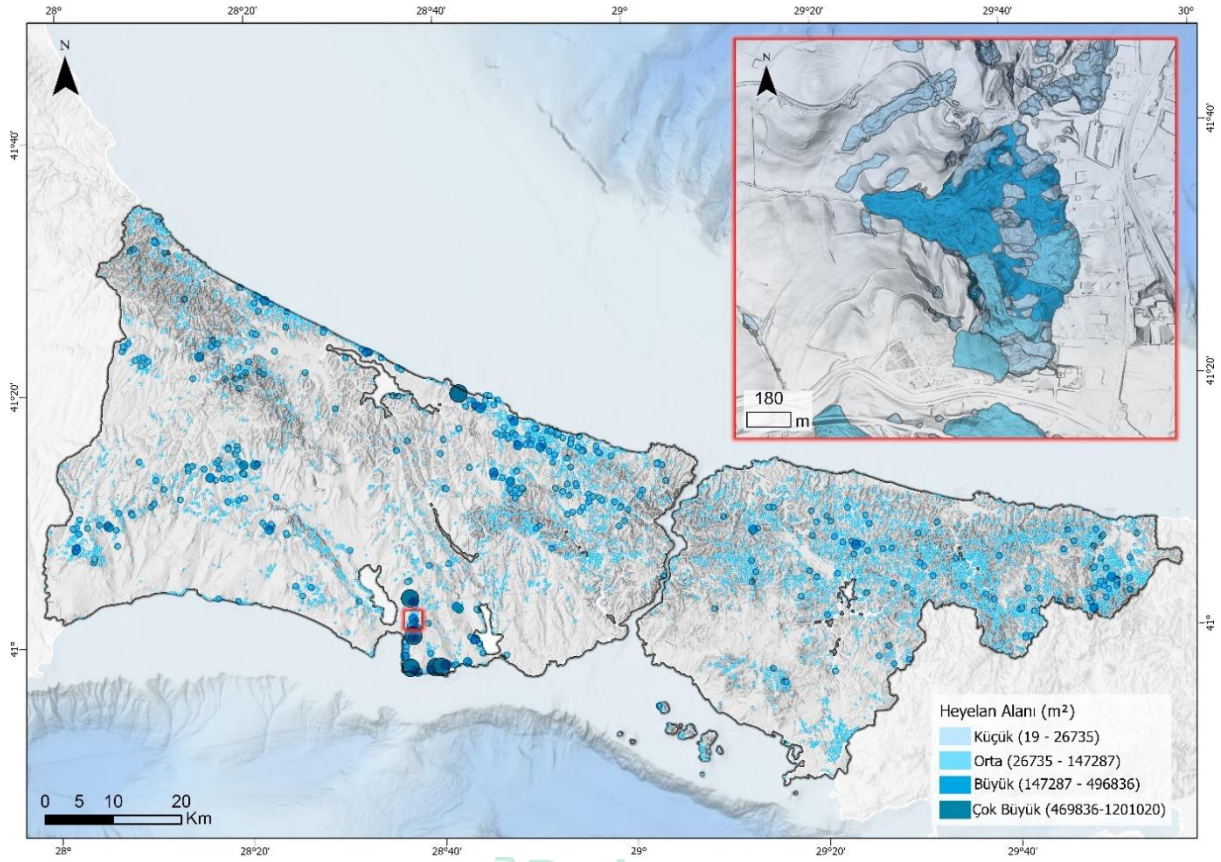
37

Heyelan envanterinde tanımlanan hareket tipi ve malzeme tipi katmanlarının birleştirilmesi ile heyelanların hareket kod katmanı oluşturulmuştur. Bu katman içerisinde heyelanlar KK (Kaya Kayması), MA (Moloz Akması), MK (Moloz Kayması), MK+MA (Moloz Kayması + Moloz Akması), ZA (Zemin Akması), ZK (Zemin Kayması) ve ZK+ZA (Zemin Kayması + Zemin Akması) olarak sınıflanmıştır.

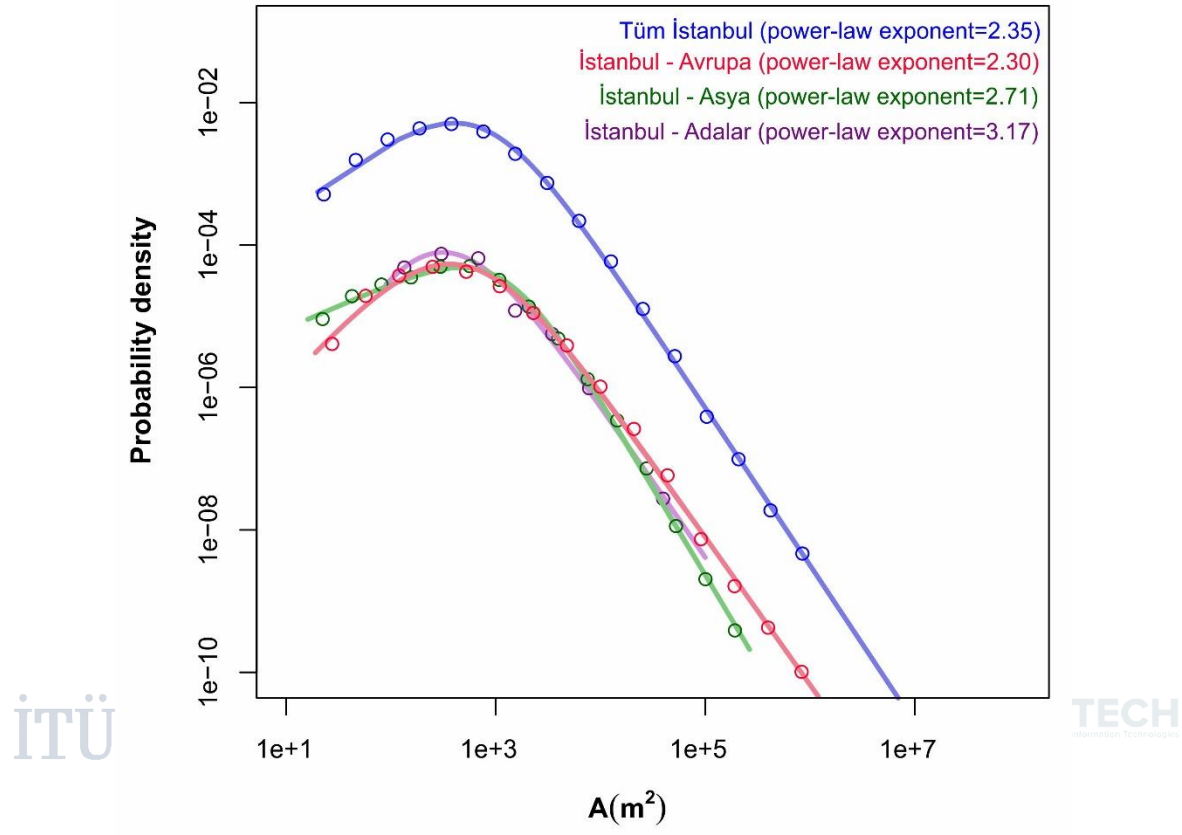


Şekil 3.9. Heyelan malzeme tipi dağılışı haritası. Figürdeki örneklem penceresinde 3 farklı malzeme tipi bir arada gözlemlenmektedir.

Heyelanların yüzey alanları küçük, orta, büyük ve çok büyük olarak dört sınıfa ayrılmıştır. Bu sınıflama sonucunda 19 m² ile 26.735 m² arası yüzey alanına sahip 17.369 adet heyelanın küçük sınıfı içerisinde, 26.735 m² ile 147.287 m² arası yüzey alanına sahip 356 adet heyelanın orta sınıfı içerisinde, 147.287 m² ile 469.836 m² arası yüzey alanına sahip 32 adet heyelanın büyük sınıfı içerisinde ve 469.839 m² ile 1.201.020 m² arası yüzey alanına sahip 7 adet heyelanın ise çok büyük sınıfı içerisinde yer aldığı tespit edilmiştir (Şekil 3.10).



Heyelanlara ilişkin frekans ve büyüklük analizleri Power-law üstsel ilişkileri kapsamında hesaplanmıştır (Şekil 3.11). Bu ilişkiler kapsamında İstanbul Avrupa yakasındaki heyelanların diğer alanlara göre alansal bakımdan daha büyük heyelan oluşturma olasılığına sahip olduğu belirlenmiştir. Buna karşın ortalama heyelan büyüklüklerinin olasılıkları benzer bir power-law üstsel ilişkisine sahiptir.



Şekil 3.11. Heyelanlara ait frekans ve büyüklüklerine ait Power-law üstsel ilişkileri.

Heyelan Kayma Derinliğinin Hesaplanması

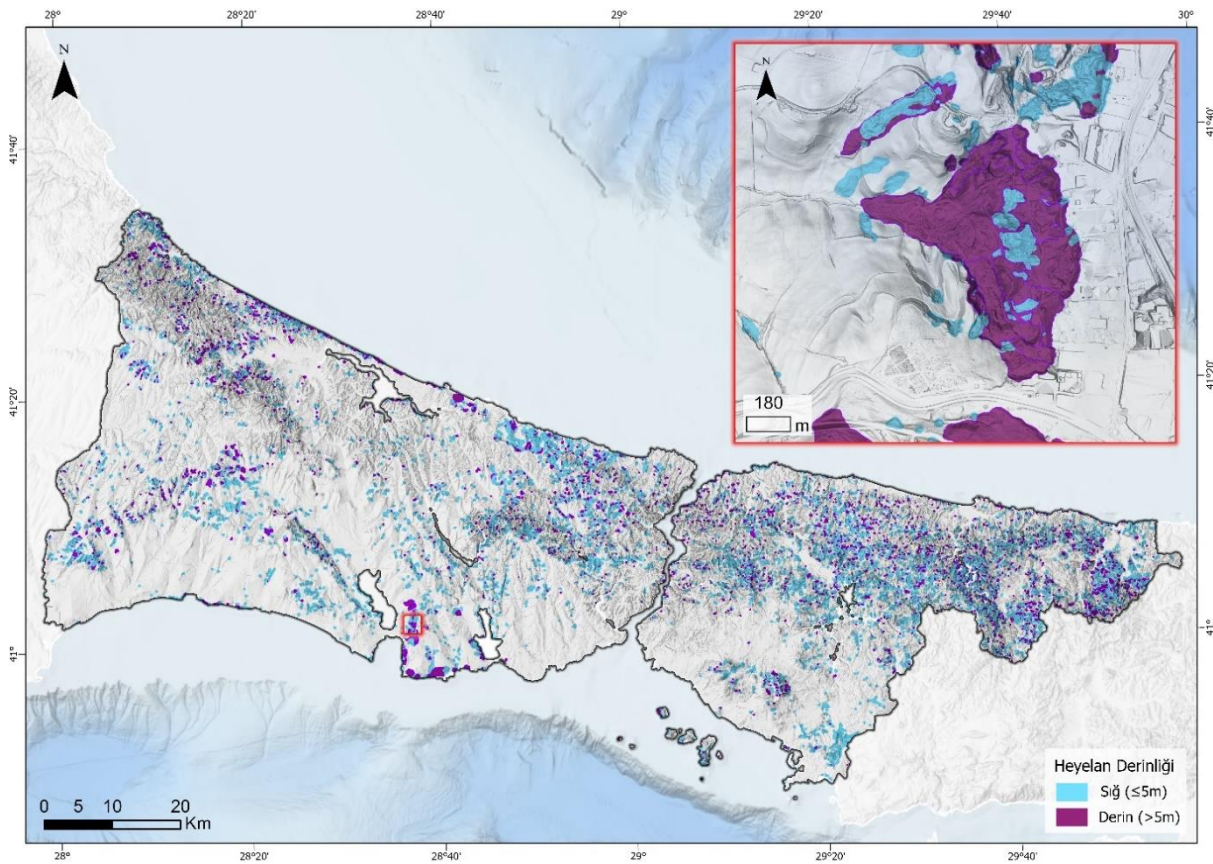
Heyelan kayma derinliklerinin hesaplanmasında Burns ve Madin (2009) tarafından önerilen protokolde yer alan heyelan aynası yüksekliği, ortalama eğim değeri ve sonrasında heyelan kayma derinliği değeri ArcGIS (v10.8) yazılımı kullanılarak hesaplanmıştır.

İlk etapta her bir heyelanın heyelan aynası yüksekliğinin hesaplanması için, farklı noktalardan en düşük ve en yüksek yükselti değerinin farkları alınmıştır. Sonrasında farklı noktalardan alınan yükselti değerlerinin ortalaması alınarak heyelan aynası yüksekliği tespit edilmiştir. Heyelan aynası yüksekliği tespit edildikten sonra ikinci adım olan ortalama eğim değerleri hesaplanmıştır. Eğim değerinin hesaplanmasında, heyelan oluşmadan önceki muhtemel yamaç eğiminin hesaplanması gerekmektedir. Bu değer, heyelana komşu olan deformasyon gelişmemiş yamaçtan alınan ortalama eğim değerinin hesaplanması ile bulunur.

Heyelan derinlik sınıflamasında önceki çalışmalarda kayma derinliği sığ heyelanlar için <2 m, derin heyelanlar için >5m (Sidle ve Ochiai, 2006) gibi farklı eşik değerler tanımlanmıştır, ancak genel kabul gören bir eşik değeri mevcut değildir. Çalışma kapsamında derinlik

sınıflamasında sabit bir eşik değeri olmadığı için Burns ve Madin (2009) tarafından önerilen protokol (Burns ve Madin, 2009; Slaughter vd., 2017) baz alınarak yapılan heyelan derinlik (sığ-derin) sınıflamasında; 5 m eşik değeri olarak tanımlanmıştır.

Heyelan derinlik hesaplaması kapsamında yapılan analizlere bağlı olarak 5 m’lik kayma derinliği eşik değeri baz alındığında, heyelan derinliği 5 m’ye eşit ya da altında değeri alan heyelanlar sığ, 5 m’den büyük olan heyelanlar derin olarak tanımlanmıştır. Bu kapsamda haritalanan heyelanların 11968 adeti sığ grubu içerisinde, 5796 adetinin ise derin sınıfı içerisinde yer aldığı tespit edilmiştir (Şekil 3.12).



Şekil 3.12. Heyelanların derinlik sınıflarına göre dağılışı. Figürdeki örneklem penceresinde TÜYAP bölgesindeki heyelanlara ait heyelan derinlik bilgisi yer almaktadır.

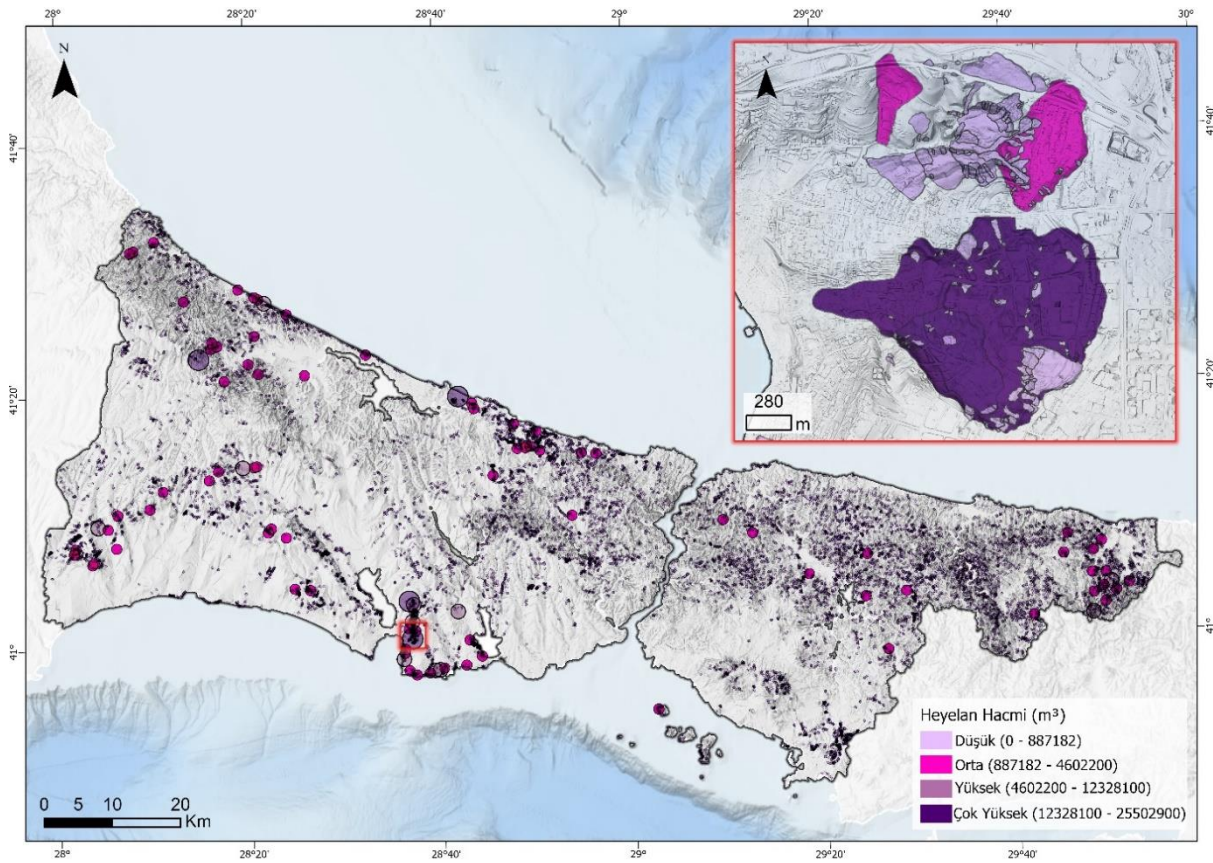
Hacim ve hız

Heyelanların hacimlerinin hesaplanmasında Burns ve Madin (2009) tarafından önerilen protokol takip edilmiş olup, heyelan kayma derinliği (m) ile heyelan alanı çarpılarak (m²) her bir heyelana ait hacim (m³) değeri hesaplanmıştır (Burns ve Madin., 2009).

Heyelan Hacmi (L_v)= $LD \cdot LA$

Bu eşitlikte heyelan hacmi (L_v), kayma derinliğinin (LD) heyelan alanı (LA) ile çarpımından elde edilmektedir.

Heyelan alan ve heyelan derinlik hesaplamalarına bağlı olarak bu iki sayısal değerin çarpılması (Heyelan Alanı x Heyelan Derinliği) sonucu heyelan hacim bilgisi hesaplanmıştır. Bu kapsamda heyelan hacim bilgisi düşük, orta, yüksek ve çok yüksek olarak sınıflanmıştır. Hareket eden kütlenin hacmine göre 17657 heyelan düşük, 90 heyelan orta, 13 heyelan yüksek ve 4 heyelan çok yüksek sınıfı içerisinde hesaplanarak heyelan envanterine kaydedilmiştir (Şekil 3.13).



Şekil 3.13. Heyelanların hacim sınıflarına göre dağılışı. Figürdeki örneklem penceresinde Büyükçekmece bölgesindeki heyelanlara ait heyelan hacim bilgisi yer almaktadır.

Aktivite durumunun tanımlanması

Çalışma kapsamında heyelanlara ait aktivite durumlarının tanımlanmasında ölçülebilen, objektif bir standart belirlenmesi hedeflenmiştir. Bu bakımdan heyelanlara ait Topoğrafik

Engebelilik İndeksi (TRI), heyelan aynasının ortalama yamaç eğimi ve heyelan içerisinde gelişen kanalların yoğunluğu hesaplanarak, bu parametrelere bağlı aktivite durum bilgisinin tespit edilmesi amaçlanmıştır.

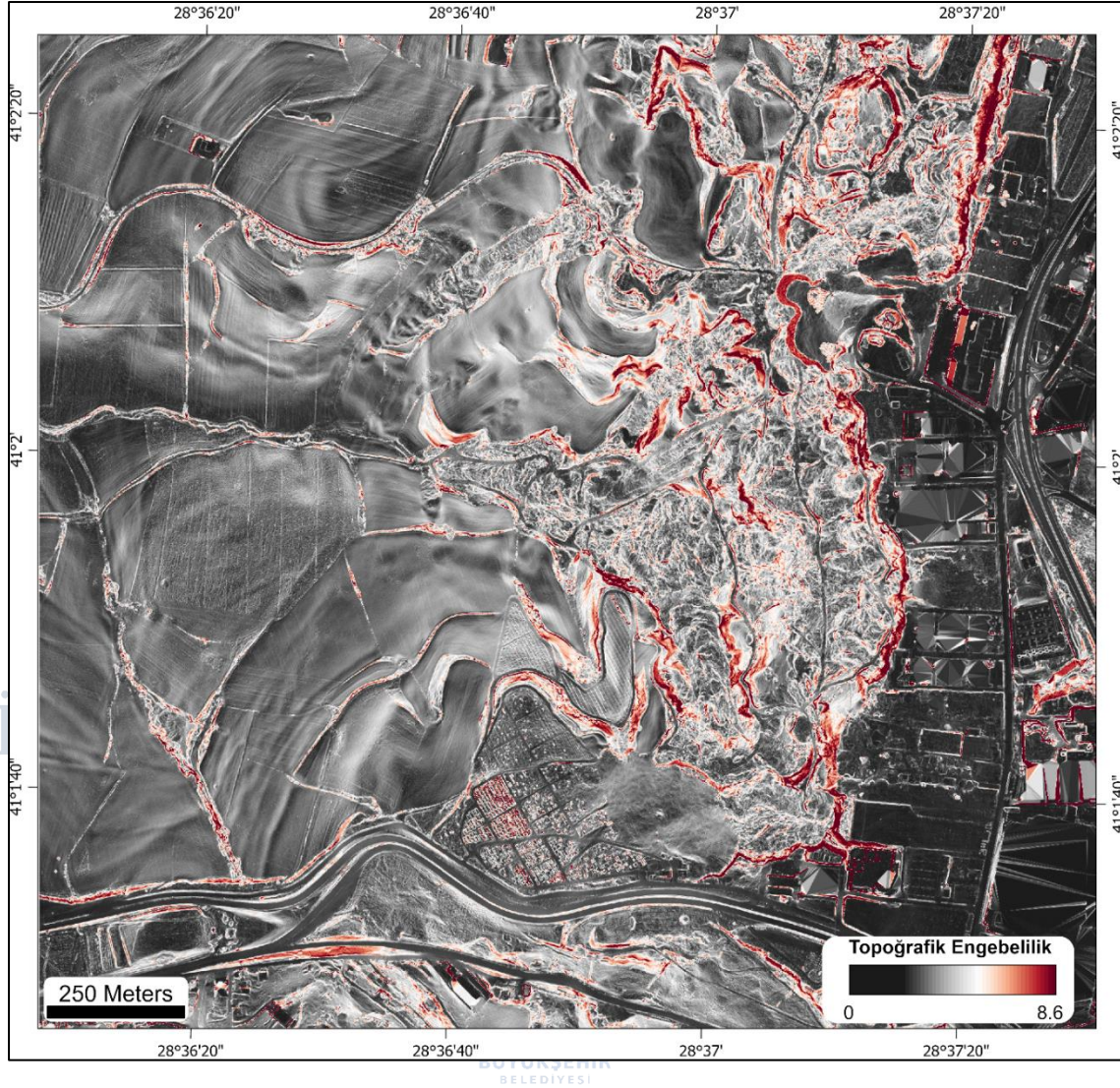
Topoğrafik Engebelilik İndeksi

Riley vd., (1999) tarafından geliştirilen Topoğrafik Engebelilik İndeksi'nde (TRI) her piksel için, ilk olarak merkezdeki piksel ve etrafındaki sekiz piksele ait yükselti değerinin farkı bulunur. Sonrasında bulunan farkların kareleri alınır ardından toplanır ve tekrar kareleri alınır (Riley vd., 1999). Topoğrafik Engebelilik İndeksinde (TRI);

$$TRI = (\sum(z_c - z_i)^2) / 2$$

formülde z_c değeri merkezdeki pikselin yükselti bilgisini, z_i ise komşu sekiz pikselden birinin yükselti bilgisini temsil eder (Riley vd., 1999). Her bir heyelana ait morfolojik heterojenliğin tespit edilmesi için Topoğrafik Engebelilik İndeksi (TRI) üretilmiştir (Şekil 3.14).

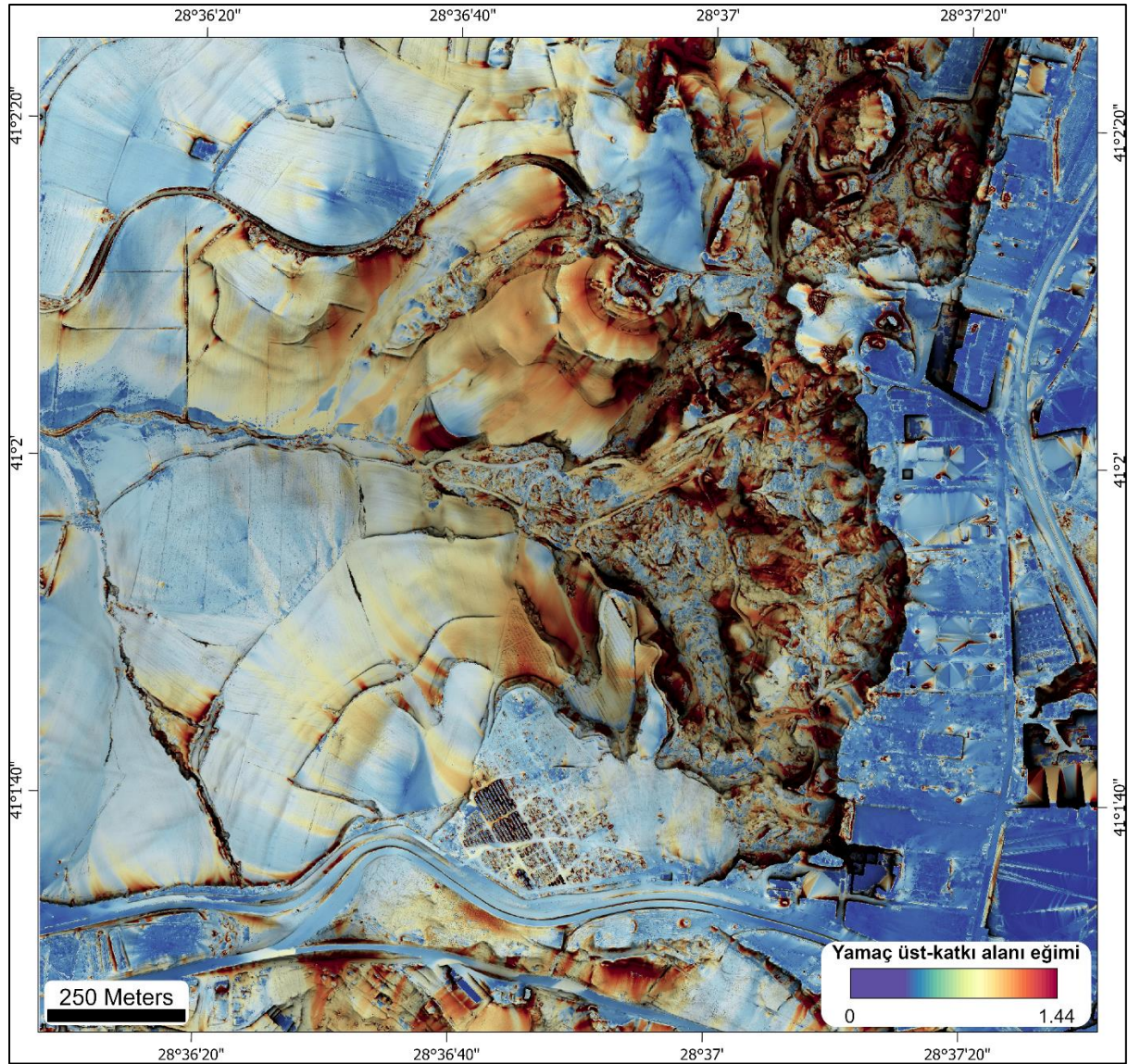




Şekil 3.14. Çekmece gölleri etrafında gelişen heyelanlara ait Topoğrafik Engebелilik İndeksi (TRI) haritası

Heyelan aynasının ortalama eğimi

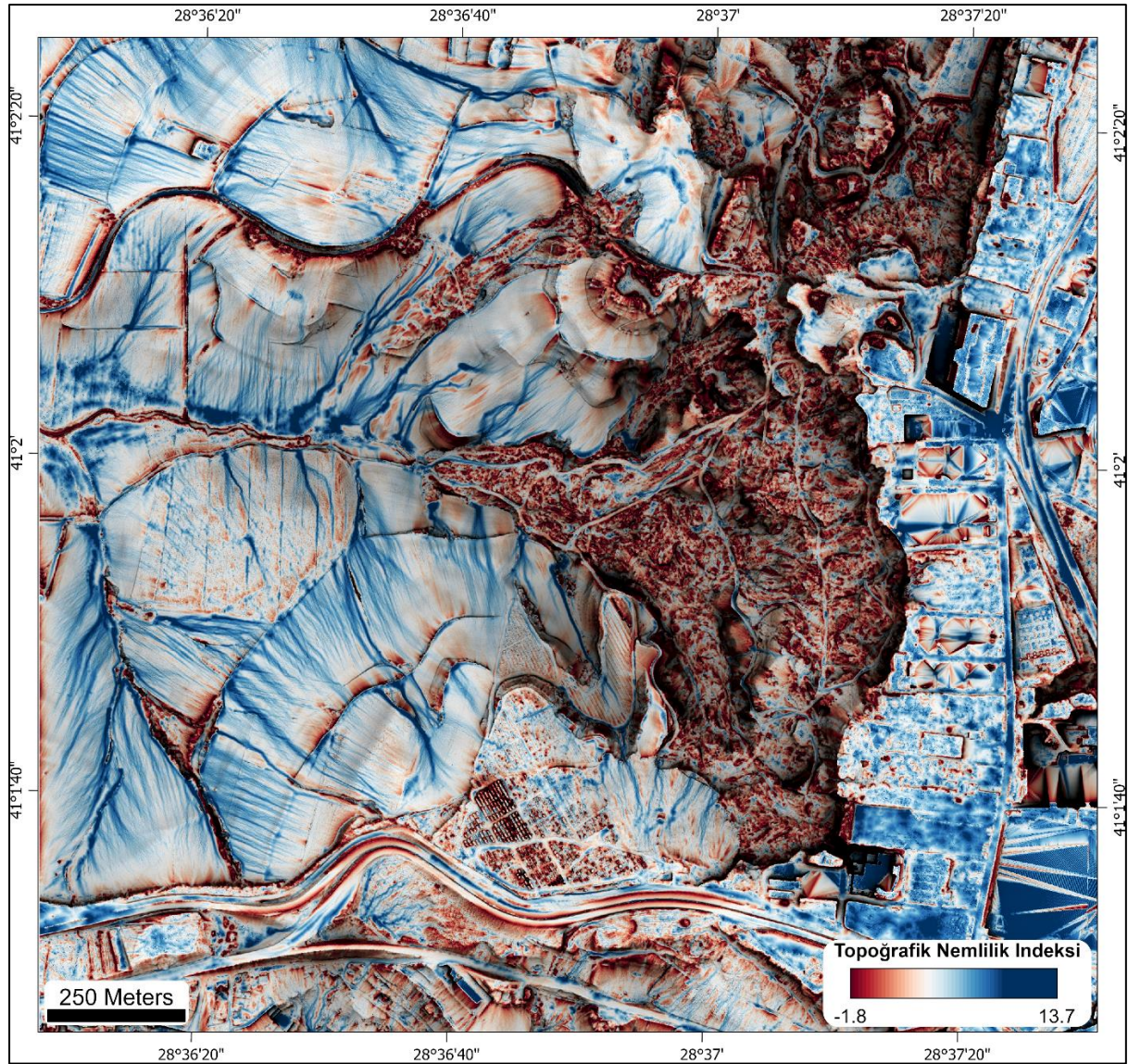
Heyelan aynasının yamaç eğimi ortalaması ArcGIS (v10.8) programı ile hesaplanmıştır. Parametrenin aktivite değerlendirmesine dahil edilmesinde, heyelan aynasının sarplığı ne kadar yüksek ise görel olarak heyelan aktivitesi yüksek olarak kabulü esas alınmıştır (Şekil 3.15).



Şekil 3.15. Çekmece gölleri etrafında gelişen heyelanlara ait heyelan aynasının ortalama eğim haritası

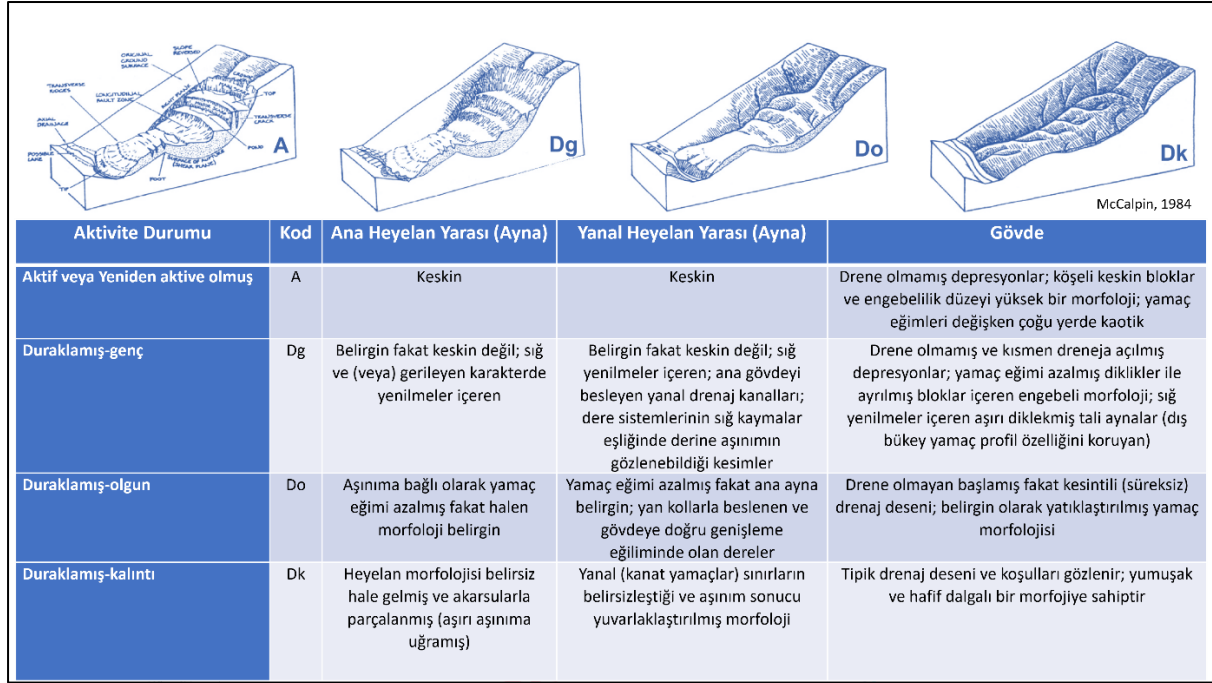
Kanal yoğunluğu

Yüksek aktiviteye sahip bir heyelan birimi içerisinde kanal sisteminin gelişebilmesi için gerekli olan zaman faktörü göz önünde bulundurularak kanal yoğunluğu değeri aktivite parametresi olarak belirlenmiştir. Her bir heyelan içerisinde gelişmiş olan kanal sistemi analiz edilmiştir. Her bir heyelan için, heyelan alanı içerisinde kalan kanal uzunluğunun heyelan alanına bölünmesi sonucu kanal yoğunluğu değerleri hesaplanmıştır (Şekil 3.16).



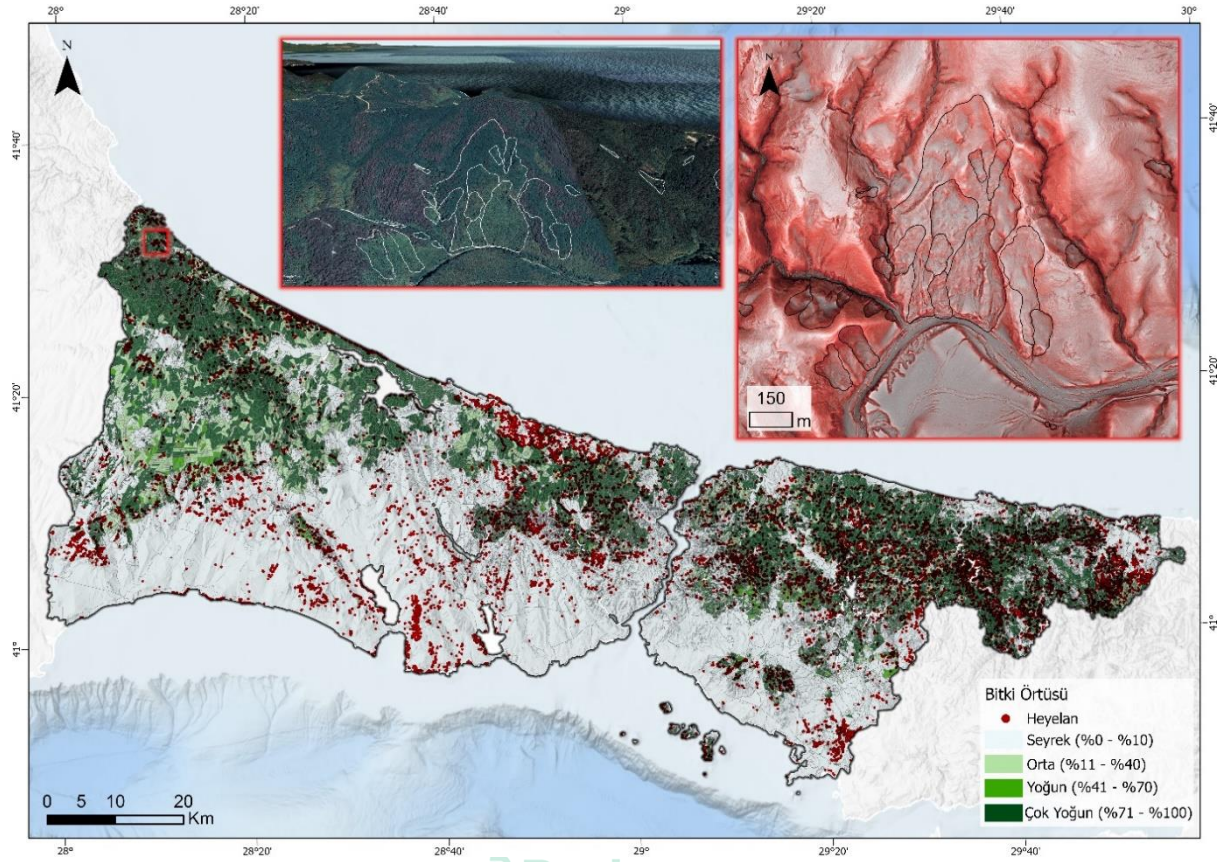
Şekil 3.16. Çekmece gölleri etrafında gelişen heyelanlara ait Topoğrafik Nemlilik indeksi haritası

Heyelan aktivitesinin belirlenmesinde kullanılan üç parametre her bir heyelan için ayrı ayrı hesaplanarak analiz edilmiş ve böylece morfolojik göstergelere bağlı olarak yapılan değerlendirmeler sonucunda heyelan aktivite durumu McCalpin, 1984 tarafından önerilen heyelan aktivite durum sınıfları (Aktif veya Yeniden aktive olmuş, Duraklamış-genç, Duraklamış-olgun, Duraklamış-kalıntı) baz alınarak envantere kaydedilmiştir (Şekil 3.17).



Şekil 3.17. Heyelan aktivite durumları ve morfolojik göstergeleri

Heyelanların özellikle aktivite durumlarının temsil edilmesinde önemli bir veri kaynağı olan heyelan alanı içerisinde hesaplanan ortalama eğim değeri her bir heyelan için hesaplanmıştır. Bu kapsamda ortalama eğim değerleri düşük (0-16°), orta (16-23°), yüksek (23-31°) ve çok yüksek (31-57°) olarak dört sınıfa ayrılmıştır. Ortalama eğim hesaplaması sonucunda 4.114 heyelanın düşük, 6.376 heyelanın orta, 5.053 heyelanın yüksek, 2.221 heyelanın ise çok yüksek eğim sınıfı içerisinde yer aldığı tespit edilmiştir (Şekil 3.18). Özellikle akarsu vadilerindeki yan yamaçlarda, Kuzey kıyılarında, nispeten Avrupa yakasının güney kıyılarında, Kuzeybatı ve Kuzeydoğuda yer yer dağlık tepelik ve ormanlık alanlardaki heyelanlar yüksek ve çok yüksek eğim değerleri ile temsil edilmektedir.



Şekil 3.19. Heyelanların bitki örtüsü yoğunluk sınıflarına göre dağılışı. Figürdeki örneklem penceresi orman örtüsü altındaki heyelanın tanımlama güçlüğünü ifade etmektedir.

Yukarıda belirtilen analizler sonucunda 14 adet öznitelik bilgisi 17.764 adet heyelanın her biri için hesaplanarak heyelan envanterlerine kaydedilmiştir.

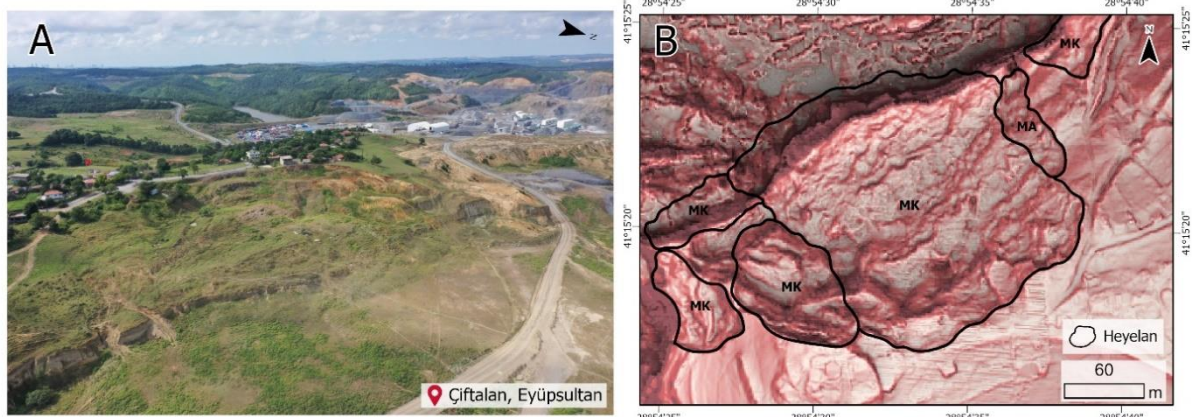
3.4. Saha Çalışmaları ile Envanter Kontrolleri ve Doğrulaması

Heyelan envanterlerinin arazide kontrollerinin sağlanması kapsamında 17-18-19 Haziran 2022 tarihlerinde İstanbul il sınırları içerisinde 22 lokasyonda envanter kontrolü ve saha çalışması düzenlenmiştir (Şekil 3.20). Bu kapsamda özellikle hareket eden malzemenin büyüklüğü ve bitki örtüsünün açıklığının elverişli olduğu alanlarda gerekli kontroller sağlanarak envanter doğruluğunun artırılmasına katkı sağlanmıştır. Aşağıda saha çalışmalarında kontrolleri tamamlanan alanlara ait dokuz örnek sunulmuştur.



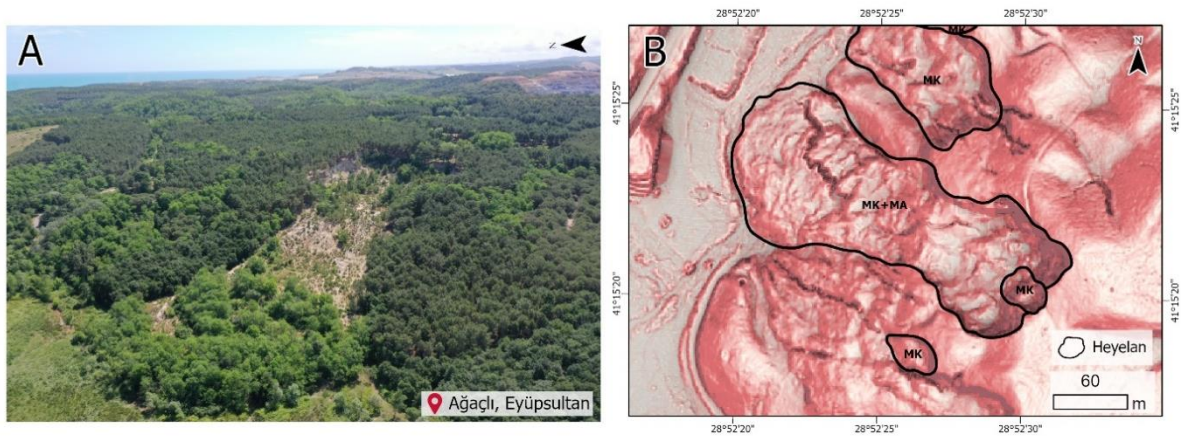
Şekil 3.20. Proje ekibi tarafından saha çalışmasında kontrolü sağlanan Avcıkoru / Şile yakınlarında hafriyat döküm alanında gelişen heyelan (A) ve Darılık Barajı / Şile mevkiinde akarsu yan yamaçlarında gelişen heyelanlar (B).

Saha çalışmaları kapsamında İstanbul Avrupa yakası kuzey kesimlerinde yayılış gösteren Ağaçlı Üyesi (Tda) ve Kırac Üyesinde (Tik), Çiftalan mevkiinde gelişen kaymaların bulunduğu alanda saha çalışması düzenlenmiştir. Bu kapsamda bölgede yürütülmekte olan madencilik faaliyetlerinin yamaç stabilitelerine olan olumsuz etkisi ve dolayısıyla heyelan açısından duyarlı zonların oluşmasına neden oldukları gözlemlenmiştir (Şekil 3.21).



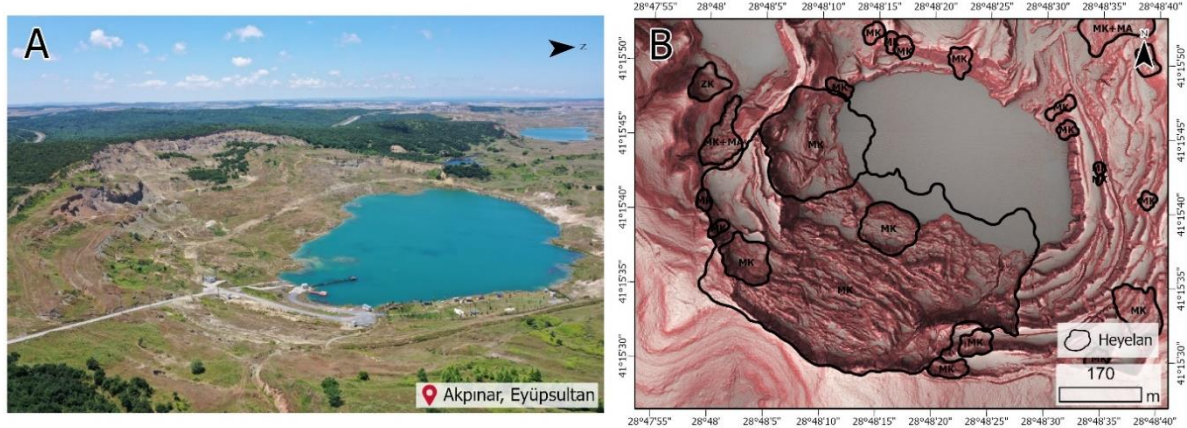
Şekil 3.21. Çiftalan mevkiinde gelişen heyelanlar (A). Kırmızı Topoğrafya Görüntü Haritası (RRIM) ve heyelanlar (B).

Yine Eyüpsultan ilçe sınırları içerisinde yer alan Ağaçlı mevkiinde, Ağaçlı Üyesi (Tda) üzerinde madencilik faaliyetlerine bağlı tetiklenen Ağaçlı heyelanı saha çalışması kapsamında yerinde gözlemlenmiştir (Şekil 3.22).



Şekil 3.22. Ağaçlı mevkiinde gelişen heyelanlar (A). Kırmızı Topoğrafya Görüntü Haritası (RRIM) ve heyelanlar (B).

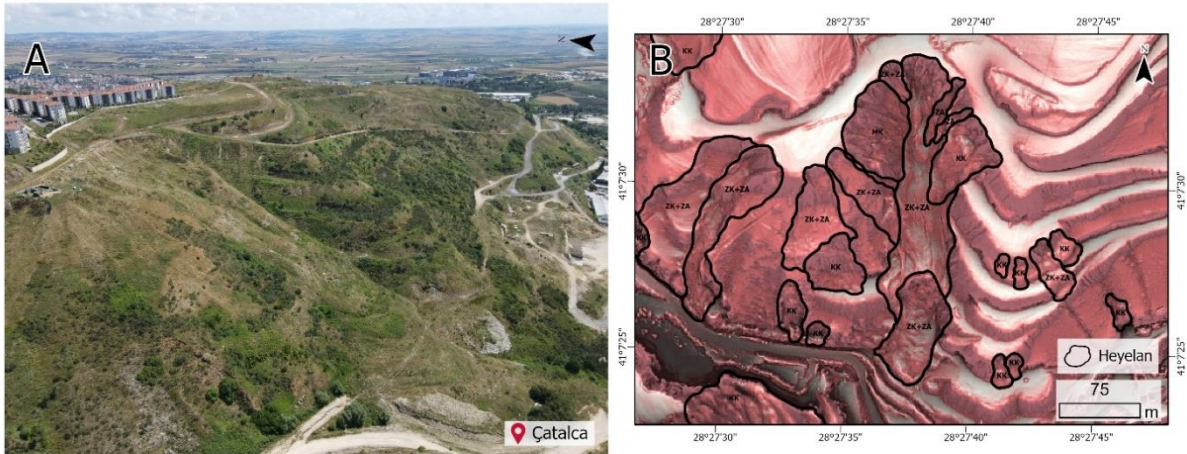
Aynı bölgede Akpınar mevkiinde Ağaçlı Üyesi (Tda) üzerinde gelişen kayma saha çalışması kapsamında yerinde gözlemlenmiştir (Şekil 3.23).



Şekil 3.23. Akpınar mevkiinde gelişen heyelanlar (A). Kırmızı Topoğrafya Görüntü Haritası (RRIM) ve heyelanlar (B).

Ağaçlı Üyesi (Tda) ve Kırac Üyesinin (Tik) genel anlamda yayılış gösterdiği bölge, madencilik faaliyetleri ve hafriyat döküm alanları gibi antropojenik etkiye fazlaca maruz kalması nedeniyle yüksek heyelan yoğunluğuna sahiptir.

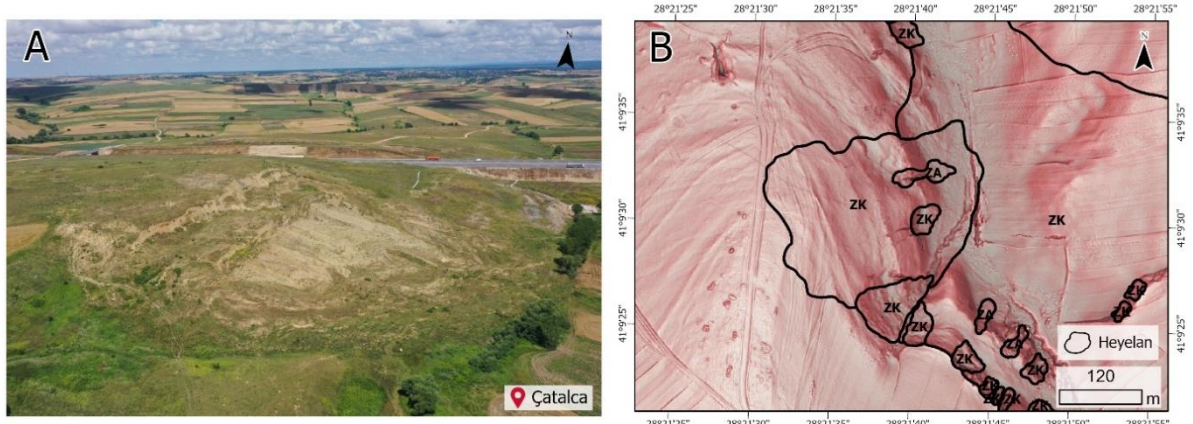
Çatalca mevkiinde Kocabayır Grubu (PTRk) üzerinde gelişen Kayma, Akma ve Kayma +Akma şeklinde gelişen heyelanlar saha çalışması kapsamında yerinde gözlemlenmiştir (Şekil 3.24).



Şekil 3.24. Çatalca mevkiinde gelişen heyelanlar (A). Kırmızı Topoğrafya Görüntü Haritası (RRIM) ve heyelanlar (B).

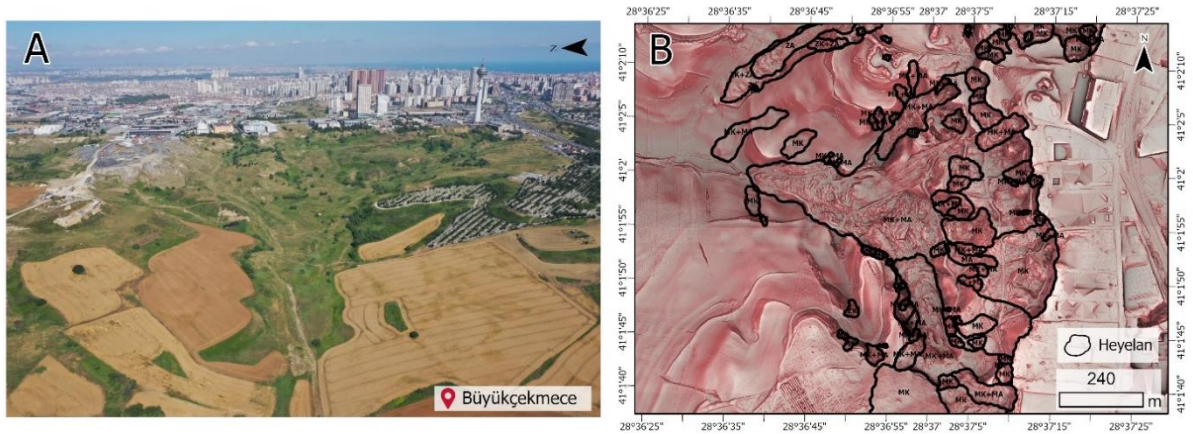
Yine Çatalca mevkiinde otoyol inşaatı esnasında yapılan yol hafriyatı ve çevre düzenleme alanında yamaç stabilitesinin bozulmasına bağlı olarak gelişen kaymalar saha çalışması

kapsamında yerinde gözlemlenmiştir. Bu alanda heyelanlar 2013 (LiDAR verisi) yılı sonrasında oluştuğu için uydu görüntüleri üzerinden haritalanmışlardır (Şekil 3.25).

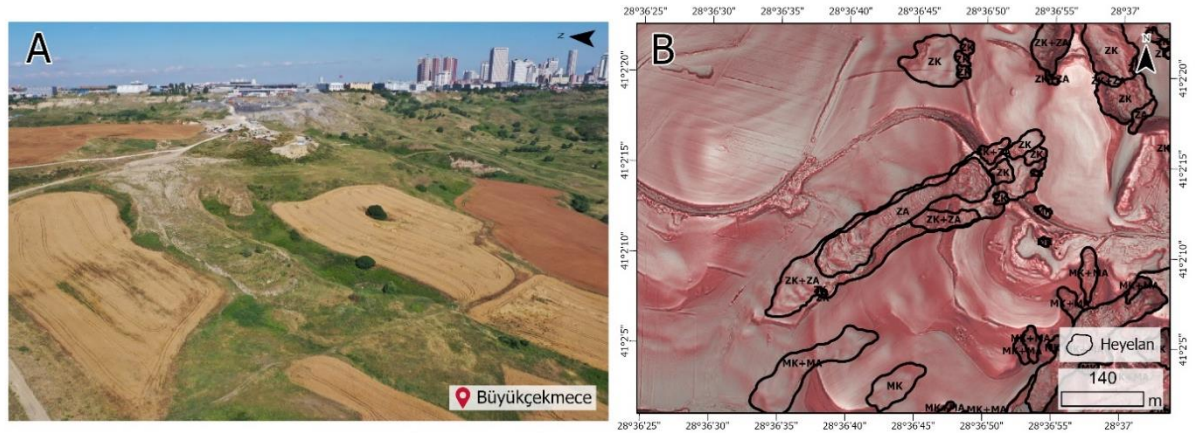


Şekil 3.25. Çatalca mevkiinde gelişen heyelanlar (A). Kırmızı Topoğrafya Görüntü Haritası (RRIM) ve heyelanlar (B).

Kıraç ve Gürpınar Üyelerinin yayılış gösterdiği Büyükçekmece mevkiinde, heyelana duyarlı malzemelerin kontrolsüz antropojenik faaliyetlerinin tetiklediği kayma, akma ve kayma + akmalar saha çalışması kapsamında yerinde gözlemlenmiştir (Şekil 3.26 ve Şekil 3.27).

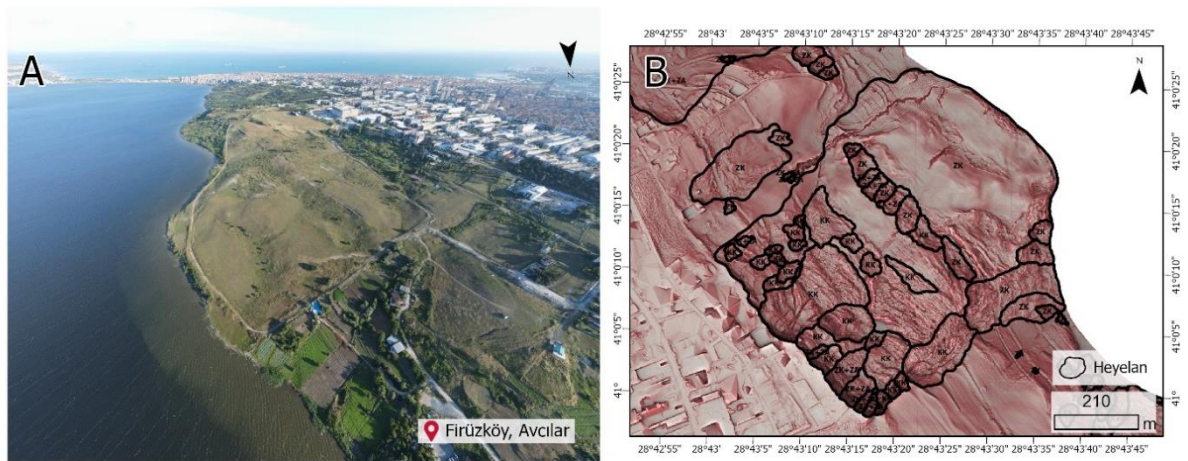


Şekil 3.26. Büyükçekmece mevkiinde gelişen heyelanlar (A). Kırmızı Topoğrafya Görüntü Haritası (RRIM) ve heyelanlar (B).



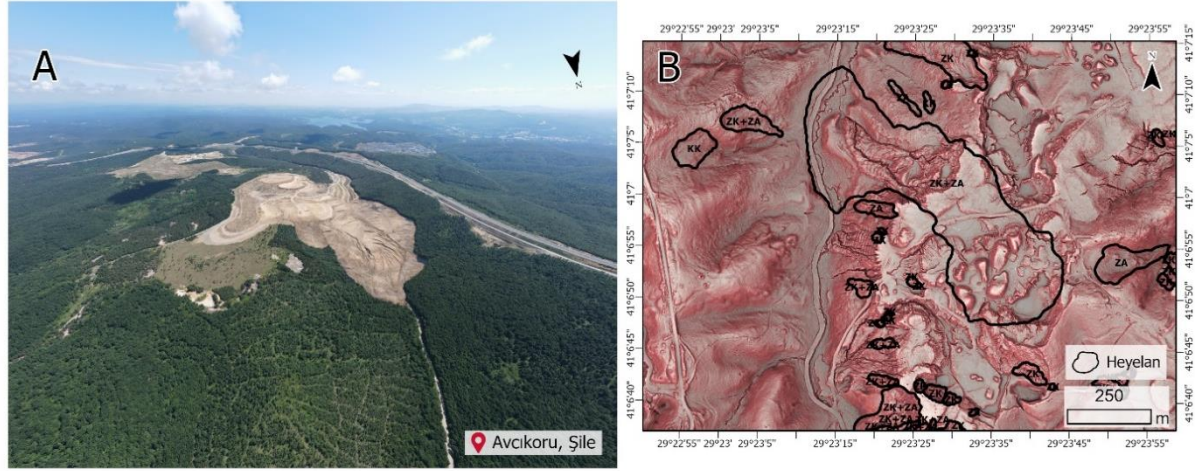
Şekil 3.27. Büyükçekmece mevkiinde gelişen heyelanlar (A). Kırmızı Topoğrafya Görüntü Haritası (RRIM) ve heyelanlar (B).

Firuzköy mevkiinde gelişen kayma ve etrafındaki şehirsiz alanın bu heyelana etkisi saha çalışması kapsamında yerinde gözlemlenmiştir (Şekil 3.28).



Şekil 3.28. Firuzköy mevkiinde gelişen heyelanlar (A). Kırmızı Topoğrafya Görüntü Haritası (RRIM) ve heyelanlar (B).

İstanbul Asya yakasında Avcıkoru Tabiat Parkı mevkiinde yer alan hafriyat döküm alanının zaman içerisinde stabilitesinin bozulmasına bağlı olarak oluşturduğu heyelan saha çalışması kapsamında yerinde gözlemlenmiştir (Şekil 3.29).



Şekil 3.29. Avcıkoru mevkiinde gelişen heyelanlar (A). Kırmızı Topoğrafya Görüntü Haritası (RRIM) ve heyelanlar (B).

İstanbul ili özelinde yukarıda sıralanan örnek lokasyonlarda öne çıkan en önemli heyelan tetikleyici faktörlerden birinin antropojenik faaliyetler olduğu dikkati çekmektedir.

4. Web Tabanlı Heyelan Envanter ve Duyarlılık Analiz Sistemi

4.1. Sistem Analiz Çalışmaları



Web tabanlı Heyelan Envanter ve Duyarlılık Analiz Sistemi'nin oluşturulma sürecinin başlangıcında sistemin geliştirilmesi ve gerekli iş süreçlerinin belirlenmesine yönelik sistem analiz çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu süreci takiben tamamlanan tasarım çalışmaları sonucunda, dinamik olarak değişen koşullarda güncellenen veriler (envanter ve analiz verileri) ile kullanıcıların herhangi bir üçüncü parti yazılıma ihtiyaç duymadan web tarayıcısı üzerinden, heyelan duyarlılığının tespitine yönelik analizler çalıştırabileceği ve analiz sonuçlarını paylaşabileceği çevrimiçi bir sistem oluşturulmuştur.

Analiz çalışmaları kapsamında Sistem Analiz Raporu hazırlanmıştır. Bu raporda sistemin geliştirilmesine yönelik sistem arayüzleri, kullanıcı arayüzleri, donanım arayüzleri, yazılım arayüzleri ve kullanıcı gereksinimlerine yer verilmiştir. Sistemin gerekliliklerinin karşılanabilmesi ve test edilebilmesini sağlayabilecek detay seviyesinde tüm genel ve yazılım gereksinimleri belirlenmiştir.

Raporun Literatürle ilgili başlığında, heyelan envanterleri ve heyelan duyarlılığının belirlenmesi konusunda ülke ve dünya genelindeki çalışmaların son durumları ortaya konulmuştur. Ayrıca İstanbul Büyükşehir Belediyesi'ne bağlı Deprem ve Zemin İnceleme

Müdürlüğü bünyesinde 2005 – 2020 yılları arasında gerçekleştirilmiş olan çalışmalar incelenmiş ve ilgili bilgileri raporda sunulmuştur. Bu bağlamda; "İlçe Heyelan Farkındalık Kitapçıkları", "İstanbul ili, 1/25.000 Ölçekli Arazi Kullanımına Esas Jeoloji Etüt Raporu", "Beylikdüzü ve Büyükçekmece İlçelerindeki Muhtelif Heyelan Sahalarının Araştırılması, İncelenmesi ve İzlenmesi Projesi-HEYZEP", "İstanbul Kara Alanındaki Olası Diri Fayların Araştırılması ve Öncelikli Heyelanlı Alanlarda Çok Disiplinli Araştırmalar Yapmak Suretiyle Heyelan Tespit ve İzleme Yöntemlerinin Geliştirilmesi Kapsamında Bilimsel ve Teknik İş Birliği Protokolü", "İstanbul İl Alanının Jeolojisi Çalışmaları", "Anadolu Yakası Mikrobölgeleme Projesi", "Avrupa Yakası Güneyi Mikrobölgeleme Projesi", "İstanbul Avcılar İlçesi Ambarlı Mahallesi Güneyindeki Zemin Hareketlerine Yönelik (Ayrıntılı Jeoloji - Jeoteknik) Duyarlılık Etüdü" çalışmaları incelenmiştir.

Kurumda kullanılan mevcut sistemler, yazılımlar ve donanım altyapısı incelenmiş, kullanım özellikleri belirlenmiş ve kurumun mevcut altyapısı analiz edilmiştir. Bunlara ek olarak ülkemizdeki heyelanla ilgili mevzuat ve kurumsal yapılarla ilgili bilgilere raporda yer verilmiştir.

Gerek mekansal gerekse de mekansal olmayan çalışma konusu ile ilgili mevcut veriler ve gereksinimler doğrultusunda ihtiyaç duyulan veriler tespit edilmiş ve veri analizi gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, kurumdan teslim alınan veriler incelenmiş, analiz edilmiş ve metaveri bilgilerini içeren bir tablo hazırlanarak rapor içerisinde sunulmuştur. Buna göre analiz edilen veriler; 1/100.000 ölçekli jeoloji haritası ve raporu, Afete Maruz Bölgeler, Bina Envanter Verisi, DEM, Eğim, Heyelan Bilgi Envanter verileri, 1/25.000 ölçekli jeoloji etüt raporu ve verileri, Mikrobölgeleme heyelan verileri, HEYZEP verileri ve TÜBİTAK Heyelan Diri Fay İzleme çalışmasından elde edilen verilerden oluşmaktadır.

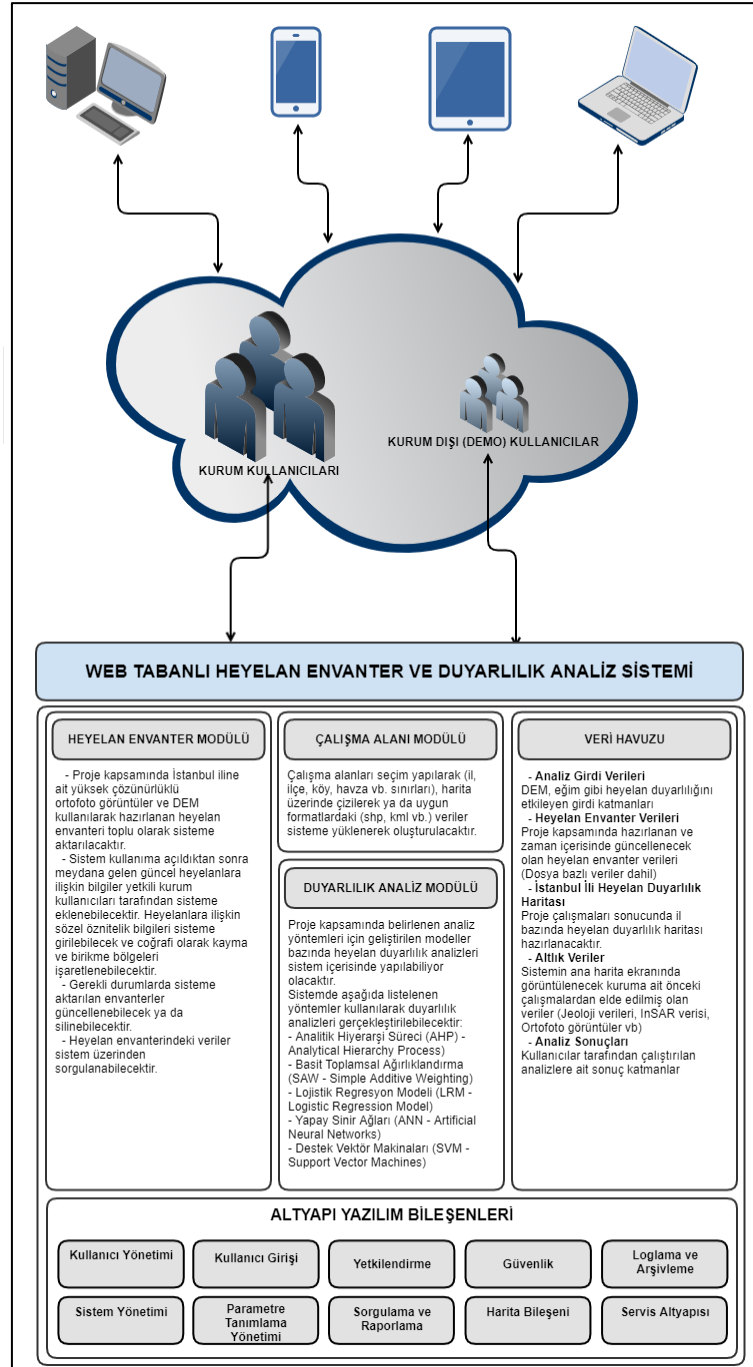
4.2. Sistem Tasarım Çalışmaları

Web tabanlı Heyelan Envanter ve Duyarlılık Analiz Sistemi'nin geliştirilmesi kapsamında yazılım geliştirme faaliyetlerine yönelik sistem tasarımına ilişkin çalışmalar gerçekleştirilmiş ve Sistem Tasarım Raporu hazırlanmıştır.

Sistem Tasarım Raporu, proje kapsamında geliştirilen sisteme ilişkin olarak kavramsal sistem tasarımı, sistem mimarisi, sistem içerisindeki modüller, uygulamanın fiziksel bileşenleri, veri yapıları ve tasarımı, heyelan duyarlılık haritalarının üretilmesindeki iş akışları, sistemle ilgili yedekleme stratejisi ve test planı ile ilgili açıklamaların yer aldığı başlıkları içermektedir.

Uygulama genel olarak sistem yönetimi, kullanıcı yönetimi, loglama, arşivleme gibi altyapı yazılım bileşenleri üzerine geliştirilen modüllerden oluşmaktadır. Buna göre, sistemde Heyelan Envanter Modülü, Çalışma Alanı Modülü (analiz çalışmaları için), Duyarlılık Analiz Modülü ve Veri Havuzu şeklinde bileşenler tasarlanmıştır.

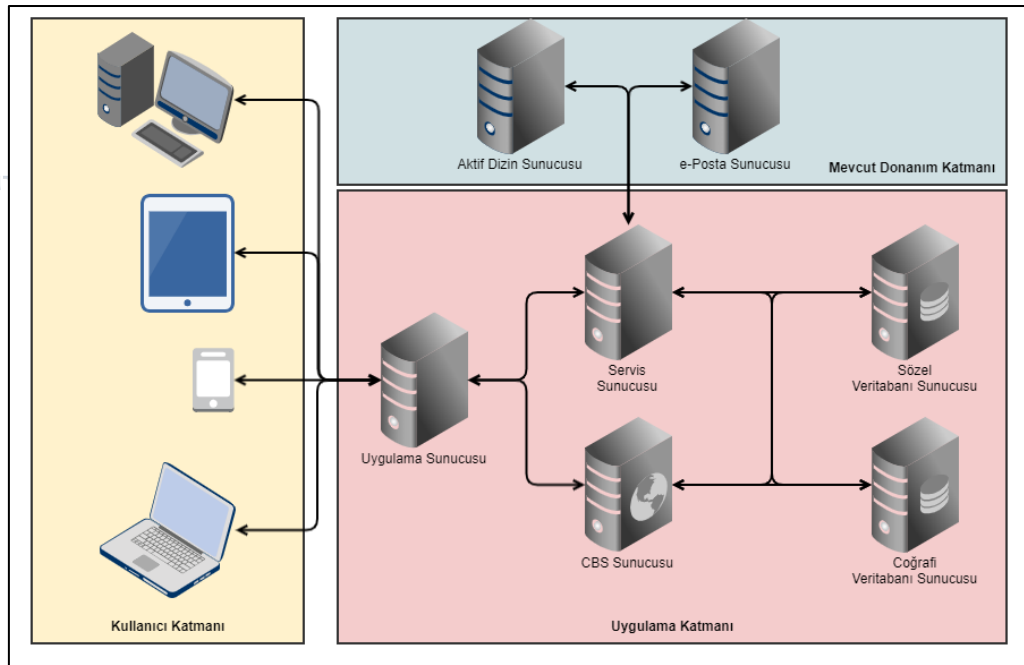
Sisteme ilişkin kavramsal yapı aşağıdaki şekilde gösterilmektedir (Şekil 4.1).



Şekil 4.1. Kavramsal Sistem Tasarımı

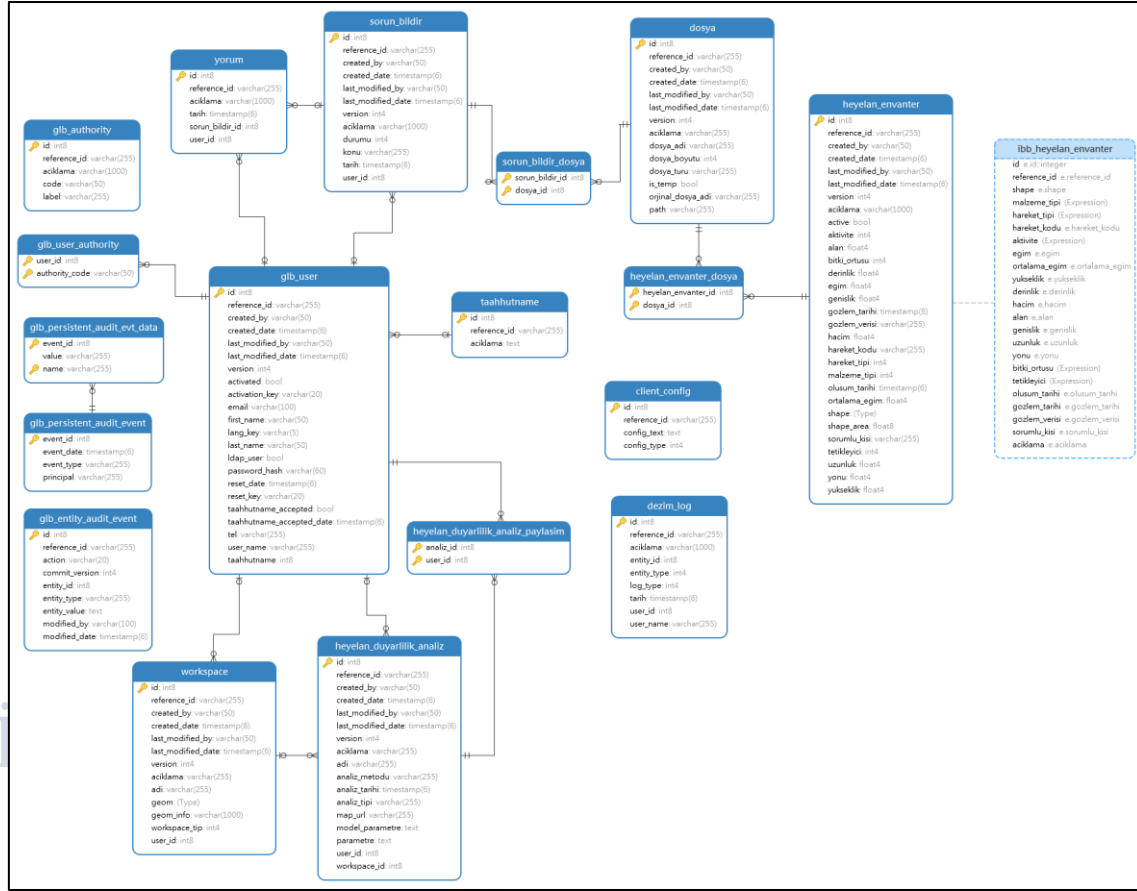
Sistemin tasarımında teknik tasarım hedefi olarak kullanıcı dostluğu, kullanım kolaylığı, güvenlik, yüksek performans gibi kriterler ön planda tutulmuştur.

Web tabanlı Heyelan Envanter ve Duyarlılık Analiz Sistemi, İstanbul Büyükşehir Belediyesi'ne bağlı Bilgi İşlem Dairesi'ne ait sunucu altyapısı üzerinde işletileceği için tüm yapı kurumun kontrolü altındadır. Kuruma ait olan CBS, Servis ve Uygulama sunucuları ile coğrafi ve sözel veri tabanı sunucuları, kurum içerisinde kullanılan bağlantılar (LAN, protokol vb) yoluyla birbiri ile ilişkili donanımlardan oluşmaktadır. Sistemin dışarı ile bağlantısı uygulama sunucusu üzerinden yayınlanması sonucunda gerçekleşmektedir ve diğer tüm sunucular dışarıya tamamen kapalı olarak işlevlerini yürütmektedir (Şekil 4.2).



Şekil 4.2. Uygulamanın Fiziksel Bileşenleri

Sistem veri tabanı tasarımında Varlık-İlişki Şeması (Entity Relationship Diagram) tekniği kullanılmıştır. ER modeli oluşturulan veri tabanı nesneleri arasında ilişki kurarak, nesnelerin özelliklerini ortaya koymaktadır (Şekil 4.3).



Şekil 4.3. Varlık-İlişki Şeması

Tasarım çalışmaları sırasında Duyarlılık Analizi için aşağıdaki işlem adımları belirlenmiştir:

- Analiz öncesinde çalışma alanının belirlenmesi
- Duyarlılık modelinin belirlenmesi
- Duyarlılık girdi katmanlarının belirlenmesi
- AHP ve SAW modelleri için ağırlıklandırma yapılması
- LRM, ANN, SVM modelleri için envanterin belirlenmesi
- Analizin çalıştırılması

Geliştirilen sisteme ait veri tabanları içerisinde depolanan coğrafi ve sözel veriler, verilerle ilişkili dosyalar (doküman, fotoğraf vb), kullanıcı kayıtları ve işlem kayıtları gibi her tür verinin, sistemde herhangi bir arıza veya hata ortaya çıkması durumunda, verilerin geri dönülemez biçimde kaybedilmesini engellemek üzere geri yüklenebilmesi amacıyla belli periyotlarla yedeklenmesi oldukça önemlidir. Söz konusu sistem, İstanbul Büyükşehir Belediyesi'ne bağlı Bilgi İşlem Birimi'ne ait sunucular, donanımlar, yazılımlar üzerinde işletileceği için yedekleme konusunda ilgili birimin kurumda kullanılmakta olan diğer

sistemler için halihazırda uyguladığı kuralların geçerli olması uygundur. Sistem tasarım raporunda da sistem ve veri yedekleme çalışmaları için öneri niteliğinde yedekleme prosedürleri sunulmuştur.

4.3. Sistem Altyapı Bileşenleri / Modülleri

Proje kapsamında geliştirilen Web Tabanlı Heyelan Envanter ve Duyarlılık Analiz Sistemi'nin altyapısını oluşturan ve temel sistem işlevlerini içeren uygulama ile İBB - Deprem ve Zemin İnceleme Müdürlüğü Heyelan Envanteri Duyarlılık Haritasının Oluşturulması Portalı kullanıma açılmıştır. Bahsi geçen portala <https://dezimapp.ibb.gov.tr> linki üzerinden ulaşılmaktadır. Portal ana sayfasında proje ile ilgili amaç, kapsam ve İstanbul Büyükşehir Belediyesi'ne bağlı Deprem ve Zemin İnceleme Müdürlüğü tarafından gerçekleştirilen güncel çalışmalara yer verilmiştir (Şekil 4.4).



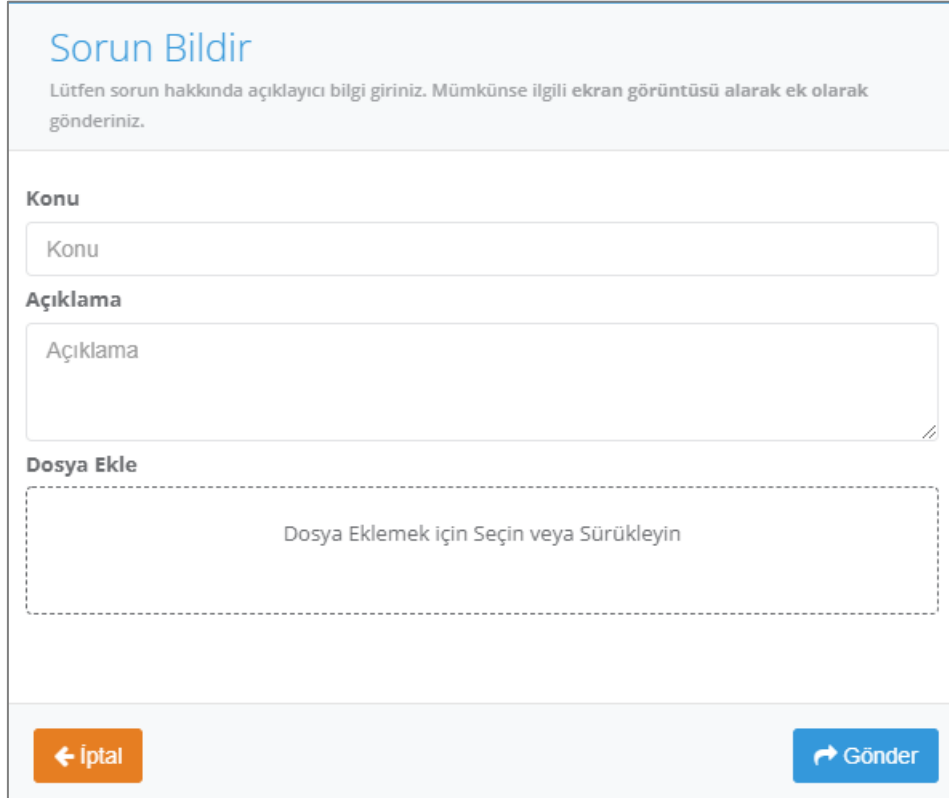
Şekil 4.4. Heyelan Envanteri ve Duyarlılık Haritasının Oluşturulması Portalı Ana Sayfası

Kullanıcılar portal sayfasında yer alan "Proje" bağlantısına tıklayarak uygulama sayfasına erişebilmekte ve kendileri için sağlanan kullanıcı adı ve şifresi ile sisteme giriş yapabilmektedir.

Web Tabanlı Heyelan Envanter ve Duyarlılık Analiz Sistemi işi Sistem Altyapı Bileşenleri / Modülleri alt faaliyeti kapsamında gerçekleştirilen iş kırılımları aşağıdaki başlıklarda açıklanmıştır.

4.3.1. Bildirim ve İletişim

Kullanıcılar sistem üzerinden konu, açıklama ve ilgili ekran görüntülerini yükleyerek bildirimde bulunabilmektedir (Şekil 4.5).



Sorun Bildir

Lütfen sorun hakkında açıklayıcı bilgi giriniz. Mümkünse ilgili ekran görüntüsü olarak ek olarak gönderiniz.

Konu

Konu

Açıklama

Açıklama

Dosya Ekle

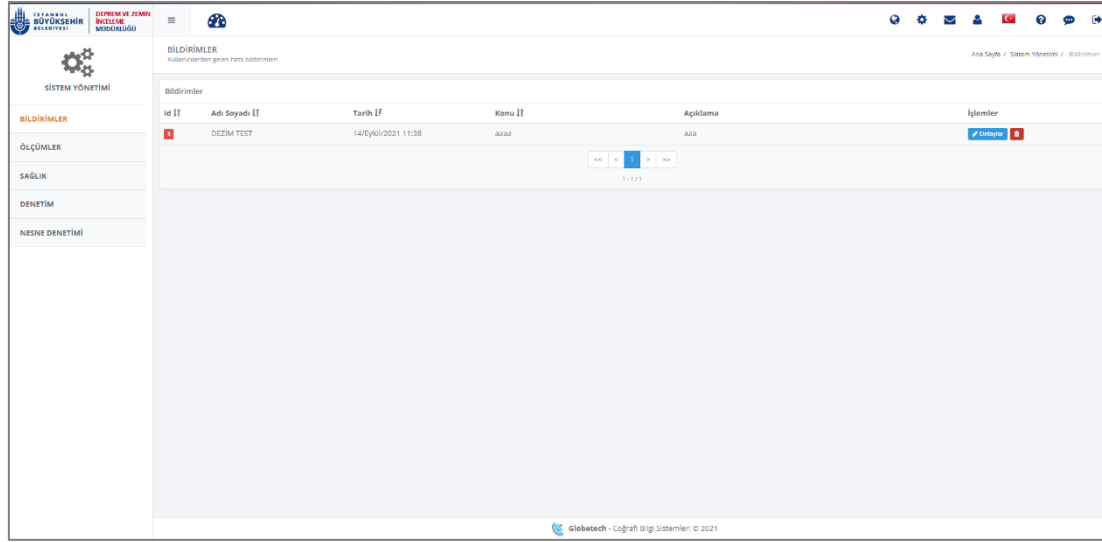
Dosya Ekleme için Seçin veya Sürükleyin

← İptal

→ Gönder

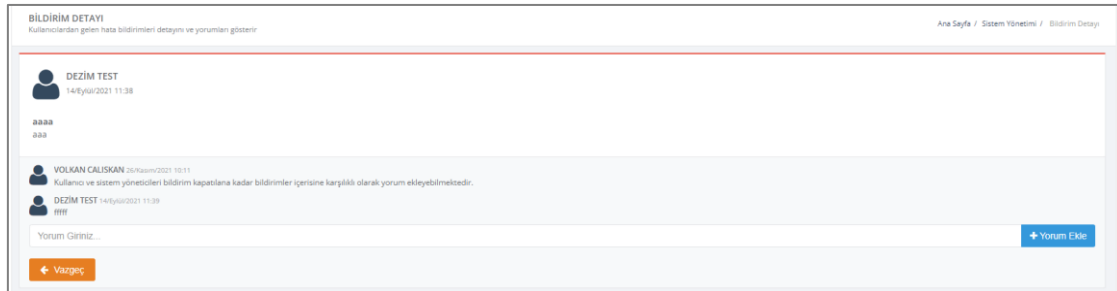
Şekil 4.5. Bildirim Penceresi

Kullanıcılar oluşturdukları bildirimleri listeleyebilmekte, bildirim durumunu ve detaylarını görüntüleyebilmektedir. Aynı şekilde sistem yöneticileri de kullanıcıların göndermiş olduğu bildirimleri listeleyebilmekte ve detaylarını görüntüleyebilmektedir (Şekil 4.6).



Şekil 4.6. Sistem Yönetimi - Bildirimler Ekranı

Kullanıcı ve sistem yöneticileri bildirim kapatılana kadar bildirimler içerisinde karşılıklı olarak yorum ekleyebilmektedir. Sistem yöneticileri açık olan bildirimleri kapatarak sonlandırabilmektedir (Şekil 4.7).



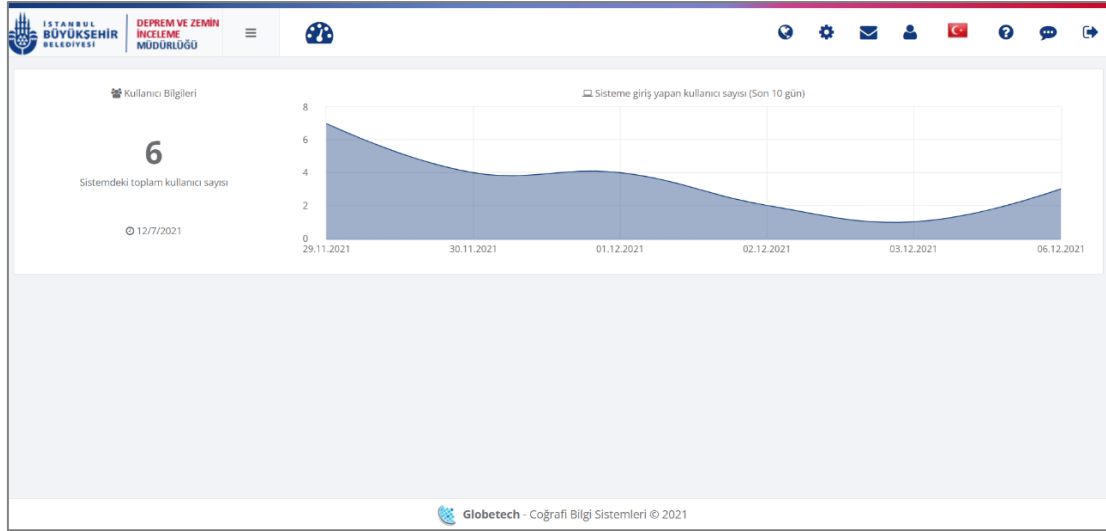
Şekil 4.7. Sistem Yönetimi - Bildirim Detayı Ekranı

4.3.2. Doküman Yöneticisi

Mevcut sistem altyapısı, yazılım nesnelere kullanıcılar tarafından dosya/doküman ekleme/silme, belli formatlardaki (pdf, png, jpg) dokümanları uygulama içerisinde görüntüleyebilme vb. özelliklerin eklenebileceği yapıda geliştirilmiş durumdadır.

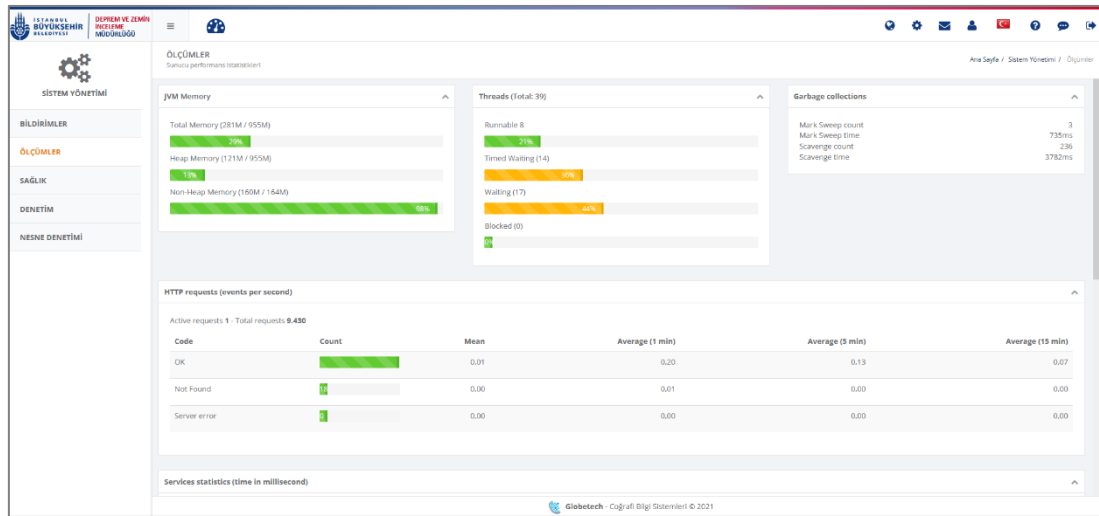
4.3.3. Gösterge İnfografik

Sistem içerisinde toplanan bilgiler ile ilgili farklı grafik türlerinde grafik (chart) oluşturulabilmektedir (Şekil 4.8). Kullanıcı veya kullanıcı grubu özelinde ayrı gösterge ekranı oluşturulabilmektedir.



Şekil 4.8. Yönetici Paneli Ekranı

Sistemin çalıştığı sunucu ile ilgili hafıza kullanımı, istek sayısı, ön belleğe alınmış nesne sayısı gibi istatistiki bilgiler görüntülenebilmektedir. Sistem içerisinde veri tabanı, diskler ve e-mail sunucusunun çalışma durumu ile ilgili bilgi alınabilmektedir (Şekil 4.9).

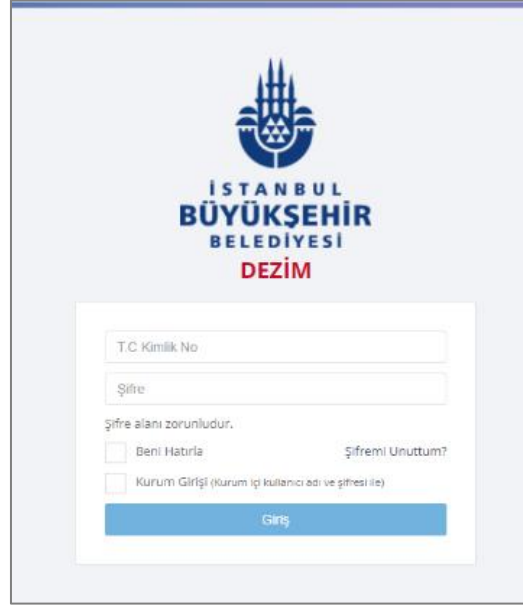


Şekil 4.9. Sistem Yönetimi – Ölçümler Ekranı

4.3.4. Kullanıcı Girişi ve Güvenlik

Kullanıcılar kullanıcı adı ve şifre ile sisteme giriş yapabilmektedir (Şekil 4.10). Sistemde yeni kullanıcı oluşturulabilmekte, kullanıcı parolaları yeni kullanıcı oluşturulduğunda sistem tarafından rastgele belirlenebilmektedir. Kullanıcılar şifrelerini değiştirebilir veya yenileyebilirler. Kullanıcıların şifrelerini unutmaları halinde gereken güvenlik kontrol bilgileri

alınarak sistemde kayıtlı e-posta adresine geçici süreli şifre değiştirme e-postası gönderilmektedir.

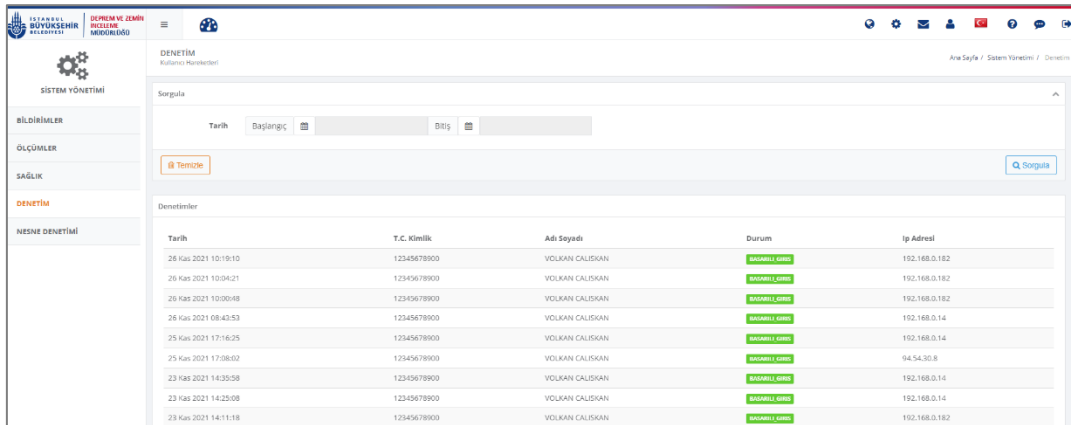


The image shows the login screen of the application. At the top, there is the logo of the Istanbul Metropolitan Municipality (İstanbul Büyükşehir Belediyesi) with the word 'DEZİM' below it. The login form contains the following fields and options:

- T.C. Kimlik No (Text input)
- Şifre (Text input)
- Şifre alanı zorunludur. (Label)
- ☐ Beni Hatırla (Remember me)
- ☐ Şifremi Unuttum? (Forgot my password)
- ☐ Kurum Girişi (Kurum içi kullanıcı adı ve şifresi ile) (Institution login)
- Giriş (Login button)

Şekil 4.10. Uygulama Giriş Ekranı

Kullanıcıların sisteme giriş denetimleri (tarih, ip, giriş tipi, kullanıcı bilgileri ve başarılı, başarısız) kaydedilir ve sorgulanarak görüntülenebilir (Şekil 4.11).



The image shows the 'Denetim' (Audit) screen in the system management interface. It includes a search bar and a table of audit logs.

Tarih	T.C. Kimlik	Adı Soyadı	Durum	İp Adresi
26 Kas 2021 10:10:10	12345678900	VOLKAN CAUSKAN	BASARILI GİRİŞ	192.168.0.182
26 Kas 2021 10:04:21	12345678900	VOLKAN CAUSKAN	BASARILI GİRİŞ	192.168.0.182
26 Kas 2021 10:00:48	12345678900	VOLKAN CAUSKAN	BASARILI GİRİŞ	192.168.0.182
26 Kas 2021 08:43:53	12345678900	VOLKAN CAUSKAN	BASARILI GİRİŞ	192.168.0.14
25 Kas 2021 17:16:25	12345678900	VOLKAN CAUSKAN	BASARILI GİRİŞ	192.168.0.14
25 Kas 2021 17:08:02	12345678900	VOLKAN CAUSKAN	BASARILI GİRİŞ	94.54.30.8
23 Kas 2021 14:35:58	12345678900	VOLKAN CAUSKAN	BASARILI GİRİŞ	192.168.0.14
23 Kas 2021 14:25:08	12345678900	VOLKAN CAUSKAN	BASARILI GİRİŞ	192.168.0.14
23 Kas 2021 14:11:18	12345678900	VOLKAN CAUSKAN	BASARILI GİRİŞ	192.168.0.182

Şekil 4.11. Sistem Yönetimi – Denetim Ekranı

4.3.5. Kullanıcı Yönetimi ve Yetkilendirme

Sistemde giriş yapan kullanıcıların gerçekleştirebildikleri işlemleri kısıtlayan kullanıcı rolleri bulunmaktadır. Sistem dış kullanıcılar için kullanıcı hesapları tanımlanabilmesine ve bu kullanıcıların sistem yöneticisi tarafından kullanıcı rollerinin ihtiyaca göre değiştirilebilmesine

imkân sağlamaktadır. Rol bazlı menüler uyarlanabilmekte, hangi rolün hangi menü ve alt menüleri görebileceği belirlenebilmektedir (Şekil 4.12).

Yeni kullanıcı oluşturduğunuzda sistem gıfte belirleme işlemleri kullanıcıların e-mail adresine otomatik olarak gönderilecektir.

☐ Kurum Kullanıcı

T.C. Kimlik No: T.C. Kimlik No

Adı: Adı

Soyadı: Soyadı

E-mail: E-mail

Telefon: Telefon

Rolü: Kullanıcı Rolü Seçiniz...

Globetech - Coğrafi Bilgi Sistemleri © 2021

Şekil 4.12. Kullanıcı Yönetimi – Yeni Kullanıcı Ekleme ve Yetkilendirme Ekranı

Sistemde yer alan tüm kullanıcılar, kullanıcıların durumları (aktif/pasif/kurum içi/kurum dışı), kullanıcıların yetkileri listelenebilmekte ve sorgulanabilmektedir (Şekil 4.13).

Kullanıcılar

Sorgula

Kullanıcı Adı: E-mail: AKTİF

Adı: Soyadı:

ID	Kullanıcı Adı	Adı	Soyadı	Email	Durumu	Yetkileri	Ekleme Tarihi	İşlemler
1	12345678900	VOLKAN	CALISKAN	volkan.caliskan@globetech.com.tr	Aktif	ROL_1, ROL_2, ROL_3, ROL_4, ROL_5, ROL_6, ROL_7, ROL_8, ROL_9, ROL_10	12/04/2021 13:15	☐ ☐
2	12345678902	TOLGA	KAYA	tolga.kaya@globetech.com.tr	Aktif	ROL_1, ROL_2, ROL_3, ROL_4, ROL_5, ROL_6, ROL_7, ROL_8, ROL_9, ROL_10	12/04/2021 13:15	☐ ☐
3	ibb	İBB	TEST	ibbtest@ibb.gov.tr	Aktif	ROL_1, ROL_2, ROL_3, ROL_4, ROL_5, ROL_6, ROL_7, ROL_8, ROL_9, ROL_10	14/05/2021 10:16	☐ ☐
4	dezim	DEZİM	TEST	dezimtest@ibb.gov.tr	Aktif	ROL_1, ROL_2, ROL_3, ROL_4, ROL_5, ROL_6, ROL_7, ROL_8, ROL_9, ROL_10	14/05/2021 10:17	☐ ☐
5	lutfi.suzen	Lutfi	Suzen	suzen@metu.edu.tr	Aktif	ROL_1, ROL_2, ROL_3, ROL_4, ROL_5, ROL_6, ROL_7, ROL_8, ROL_9, ROL_10	27/05/2021 22:46	☐ ☐
6	tolga.gorum	Tolga	Gorum	tgorum@itu.edu.tr	Aktif	ROL_1, ROL_2, ROL_3, ROL_4, ROL_5, ROL_6, ROL_7, ROL_8, ROL_9, ROL_10	27/05/2021 22:47	☐ ☐

Globetech - Coğrafi Bilgi Sistemleri © 2021

Şekil 4.13. Kullanıcı Yönetimi – Kullanıcılar Ekranı

4.3.6. Kullanım Sözleşmesi Yöneticisi

Sisteme kullanım sözleşmesi eklenebilmekte veya var olan kullanım sözleşmesi güncellenebilmektedir. Kullanıcılar sisteme ilk girişlerinde sistemde bulunan son kullanım

sözleşmesini kabul ederek giriş yapabilmektedir. Sistemde kullanıcının hangi güvenlik sözleşmesini kabul ettiği ve kabul tarihi görüntülenebilmektedir.

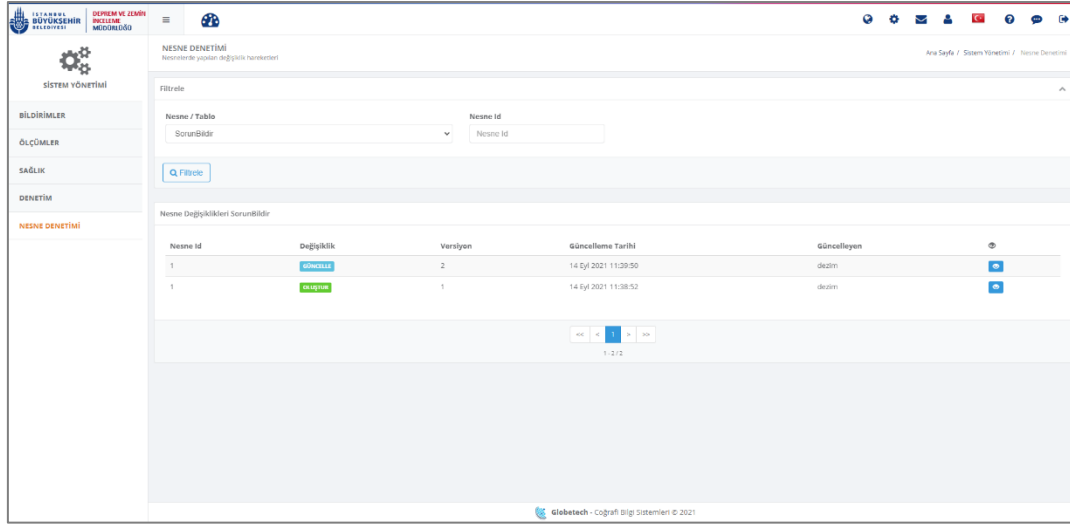
4.3.7. Loglama ve Arşivleme

Sistem üzerinde gerçekleşen belirli hareketler, sisteme başarılı veya başarısız giriş yapan kullanıcılar, sisteme eklenen, sistemde düzenlenen ve silinen verilerin kaydı sistem loglarında tutulmaktadır. Sistem loglarını görme hakkı olan kişiler sistem yöneticisi tarafından yetkilendirilebilmektedir (Şekil 4.14). Sisteme girilen, güncellenen ve silinen veriler tarihleri ve işlemi yapan kişi bilgisi ile silinmemek üzere kaydedilmektedir.

Arşivi görebilen kişiler sistem yöneticisi tarafından yetkilendirilmektedir.

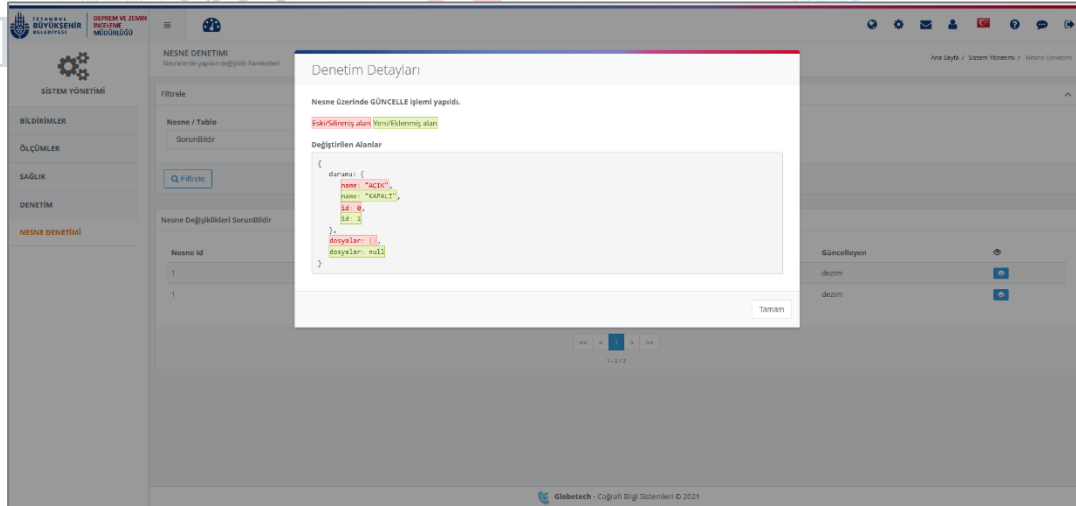
Şekil 4.14. Kullanıcı Yönetimi – Kullanıcı Yetkilendirme Ekranı

Sistemde belirlenen nesneler (yazılım nesneleri) için; nesne üzerinde yapılan değişiklikler tarih, güncelleyen ve versiyon bazlı izlenebilmektedir (Şekil 4.15).



Şekil 4.15. Sistem Yönetimi – Nesne Denetimi Ekranı

İki versiyon arasındaki farklar görüntülenebilmektedir (Şekil 4.16).



Şekil 4.16. Sistem Yönetimi – Nesne Denetim Detayları Penceresi

4.3.8. Parametre (Tanımlama) Yöneticisi

Mevcut sistem altyapısı, sistem içerisinde kullanılması planlanan parametre bazlı veri giriş bölümlerinin (combobox, sabit çarpan değerleri vb.) girdilerinin sistem yöneticisi tarafından güncelleme, silme ve ekleme işlemleri ile ilgili fonksiyonların eklenebileceği şekilde geliştirilmiş durumdadır.

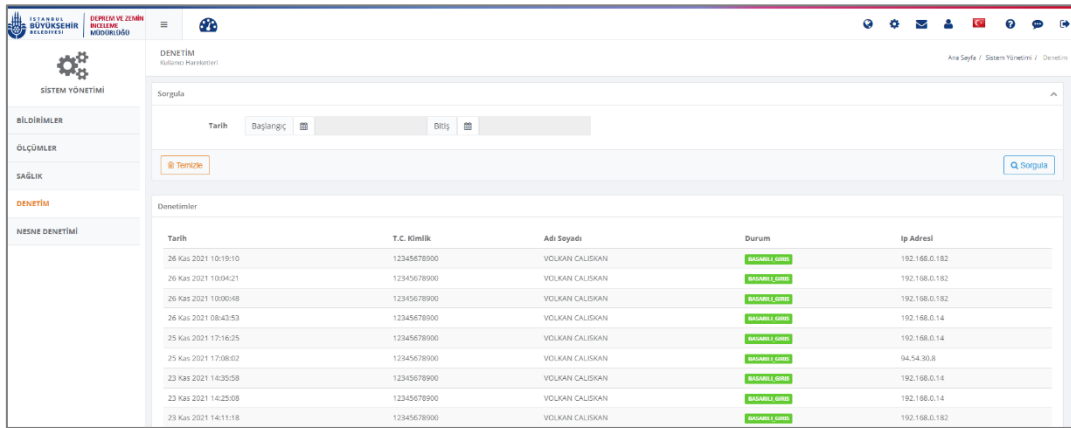
Buna göre;

1. Sistem içerisinde tanımlamalar vardır.

- Her bir tanımlama ayrı menü olarak verilmektedir.
- Her bir tanımlama için; ekleme, silme ve güncelleme yapılabilir.
- Tanımlamalar modülüne yetki bazlı erişim vardır.

4.3.9. Sistem Yönetimi

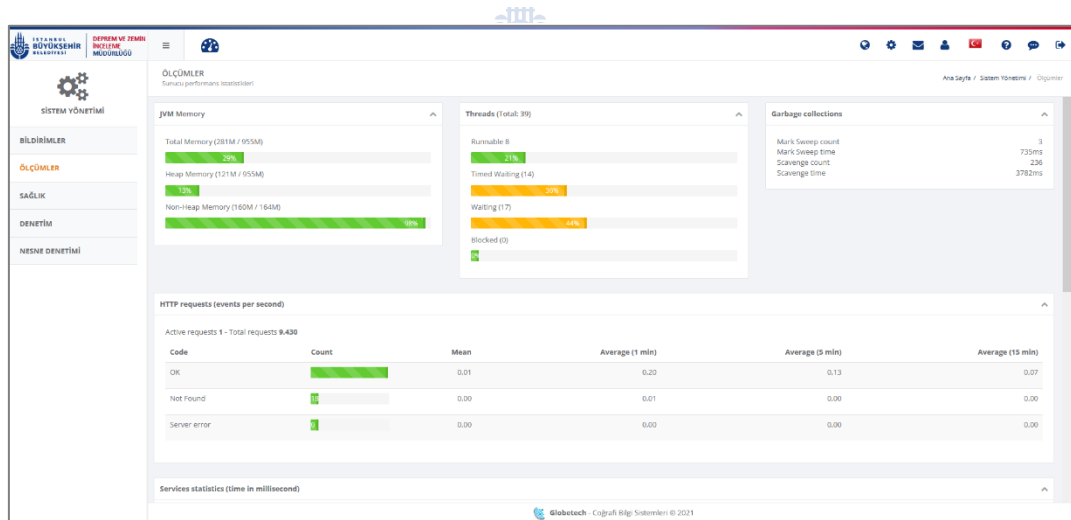
Uygulamada sisteme giriş yapan kullanıcılar ile ilgili kayıtlar görüntülenebilmektedir (Şekil 4.17).



Tarih	T.C. Kimlik	Adı Soyadı	Durum	İp Adresi
26 Kas 2021 10:19:10	12345678900	YOLKAN CALISKAN	BAŞARI	192.168.0.182
26 Kas 2021 10:04:21	12345678900	YOLKAN CALISKAN	BAŞARI	192.168.0.182
26 Kas 2021 10:00:48	12345678900	YOLKAN CALISKAN	BAŞARI	192.168.0.182
26 Kas 2021 08:43:53	12345678900	YOLKAN CALISKAN	BAŞARI	192.168.0.14
25 Kas 2021 17:16:25	12345678900	YOLKAN CALISKAN	BAŞARI	192.168.0.14
25 Kas 2021 17:08:02	12345678900	YOLKAN CALISKAN	BAŞARI	94.54.30.8
23 Kas 2021 14:35:58	12345678900	YOLKAN CALISKAN	BAŞARI	192.168.0.14
23 Kas 2021 14:25:08	12345678900	YOLKAN CALISKAN	BAŞARI	192.168.0.14
23 Kas 2021 14:11:18	12345678900	YOLKAN CALISKAN	BAŞARI	192.168.0.182

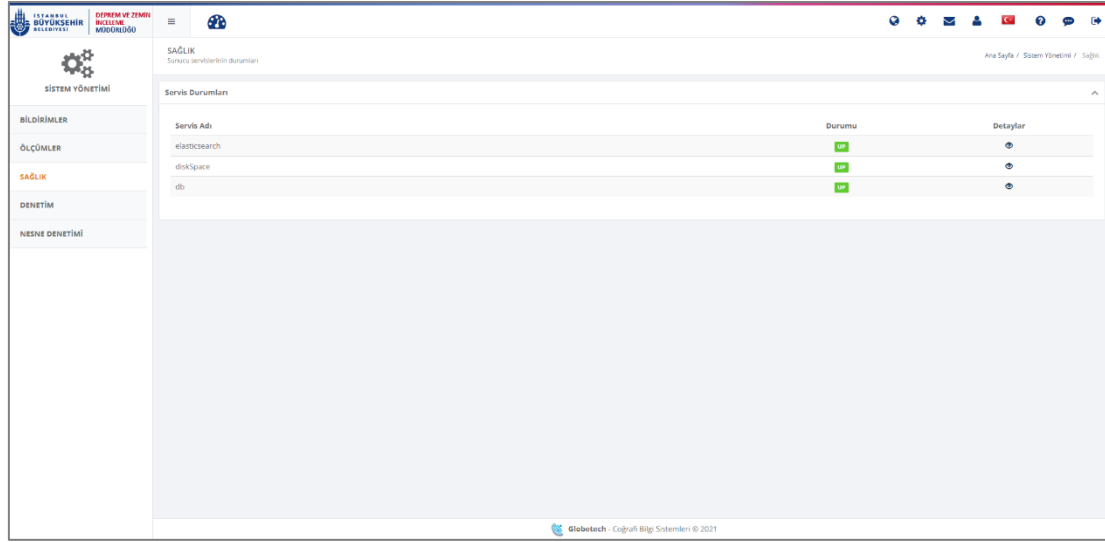
Şekil 4.17. Sistem Yönetimi – Denetim Ekranı

Sistemde sunucu performansı ile ilgili istatistikler görüntülenebilmektedir (Şekil 4.18).



Şekil 4.18. Sistem Yönetimi – Ölçümler Ekranı

Sunucu servislerinin durumları ile ilgili bilgiler görüntülenebilmektedir (Şekil 4.19).



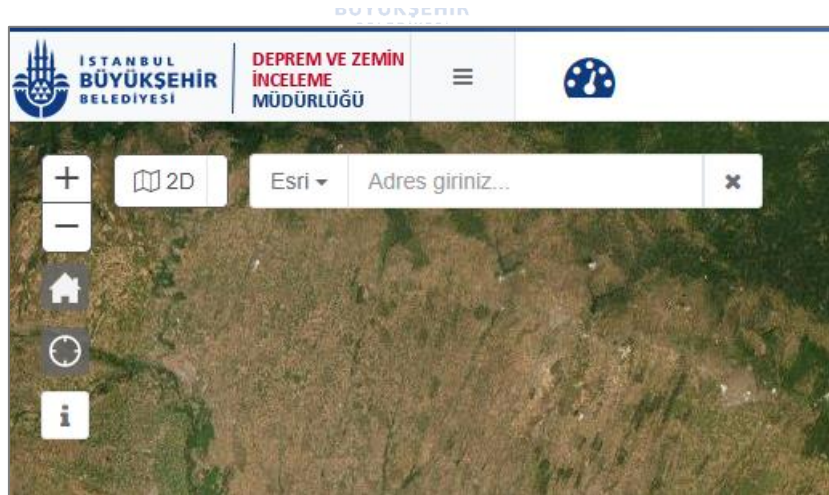
Şekil 4.19. Sistem Yönetimi – Sağlık Ekranı

4.3.10. Sorgulama ve Raporlama

Sistemde bulunan veriler ile ilgili yönetici özetleri, istatistikler ve raporlar oluşturulabilmekte, grafiksel gösterimler yapılabilmektedir. Kullanıcılar sisteme girdikleri verileri sorgulayabilmektedir.

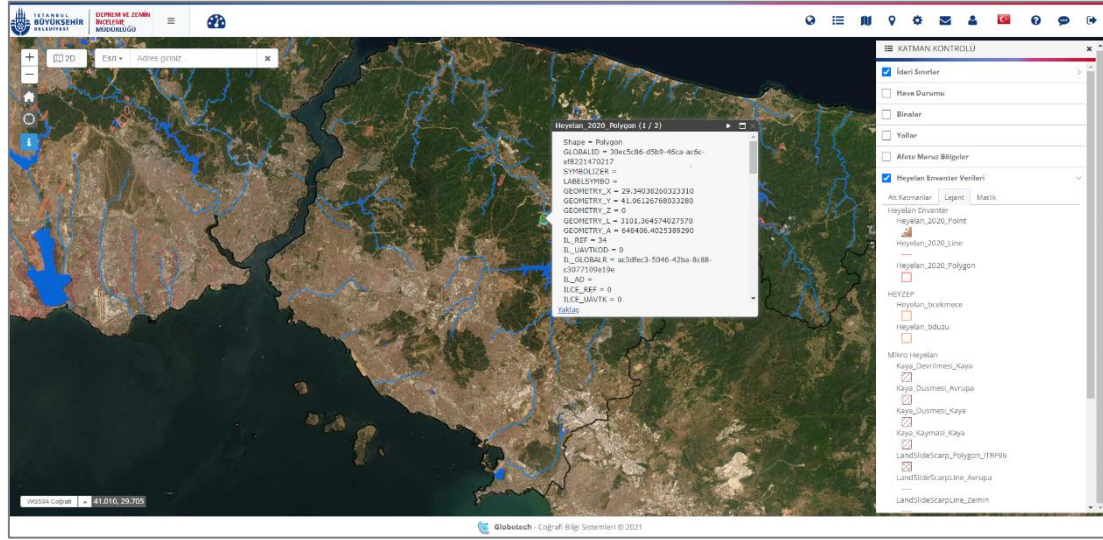
4.3.11. Temel Harita Özellikleri

Sistem yaklaş-uzaklaş, kaydırma, bilgi alma, varsayılan harita alanı gibi genel harita işlevleri sağlamaktadır (Şekil 4.20).



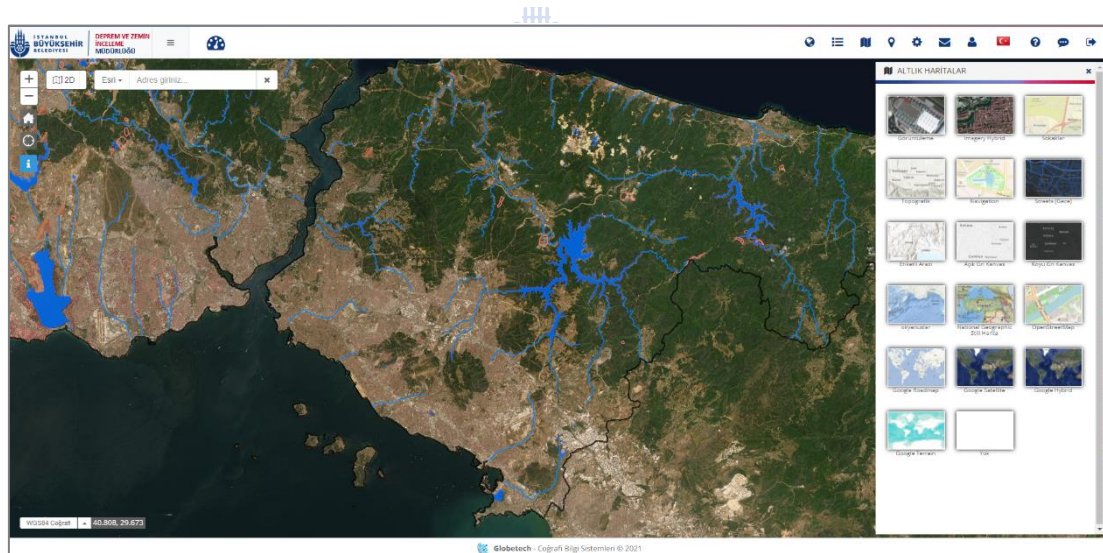
Şekil 4.20. Harita Ekranı – Genel Harita İşlevleri

Kullanıcılar katmanların görünürlüğünü açılıp kapatabilmekte, sembolojilerini görüntüleyebilmekte, saydamlık oranını ayarlayabilmekte ve katmanların öznitelik bilgisini alabilmektedir (Şekil 4.21).



Şekil 4.21. Harita Ekranı – Harita Üzerinde Öznitelik Bilgisi Görüntüleme

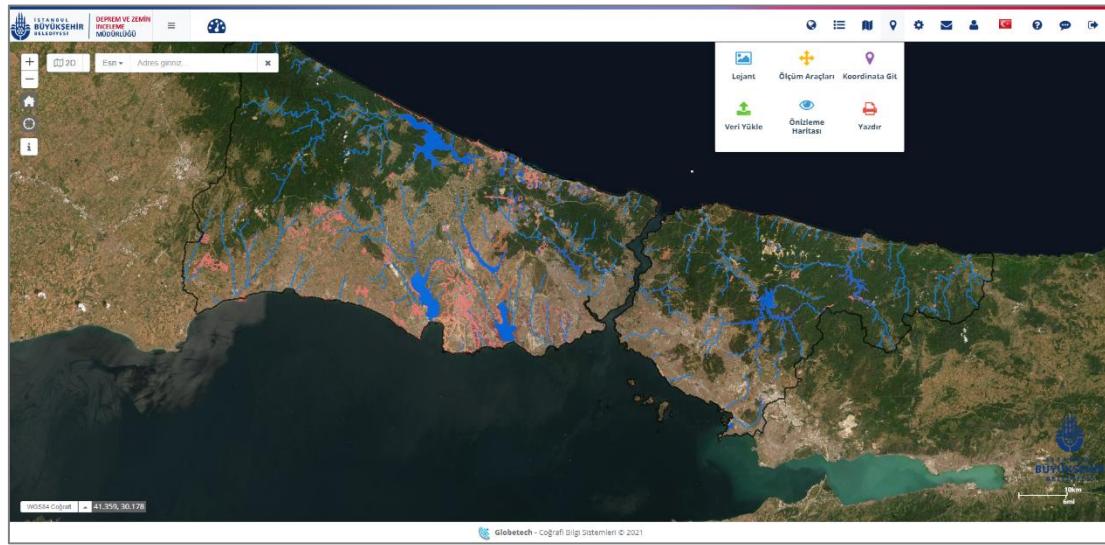
Altlık olarak kullanılan haritalar değiştirilebilmekte, ArcGIS Online, Open Street Map, Google Satellite Map, Google Hybrid Map vb. harita servislerinin yol, uydu ve topoğrafik haritaları altlık olarak gösterilebilmektedir (Şekil 4.22).



Şekil 4.22. Harita Ekranı – Altlık Harita Seçimi

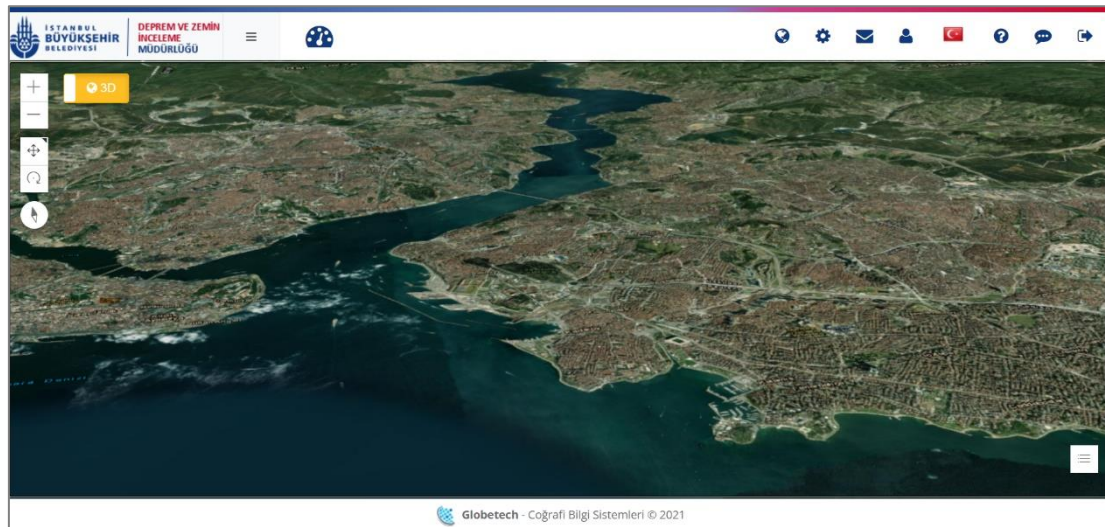
Harita üzerinden çizim yaparak alan, mesafe ölçümü yapılabilmekte ve istenilen noktanın koordinat bilgisi gösterilebilmektedir. Ölçüm sonucu birimi değiştirilebilmekte, alan için;

metrekare, kilometrekare, hektar, vb., mesafe için; metre, kilometre, vb., konum için; farklı koordinat referans sistemlerinde (WGS84-Coğrafi- ED50-UTM, vb.) gösterim yapılabilmektedir. Haritanın ölçeği gösterilebilmektedir. Mevcut haritanın görünümünü daha üst seviyeden gösteren ön izleme haritası bulunmaktadır. Haritayı yazdırma işlemi yapılabilmektedir. Sistemde yer bulucu özelliği bulunmaktadır. Bu özellik ile Google, Yandex veya ESRI'nin yer bulucuları kullanılabilmektedir. Sistem mevcut konumunuzu gösterebilmektedir (Şekil 4.23).



Şekil 4.23. Harita Ekranı – Harita Araçları

2B-3B harita geçişleri yapılabilmekte, geçişlerde mevcut kapsanan alan bilgisi korunmaktadır (Şekil 4.24).



Şekil 4.24. Harita Ekranı - 3 Boyutlu Harita Gösterimi

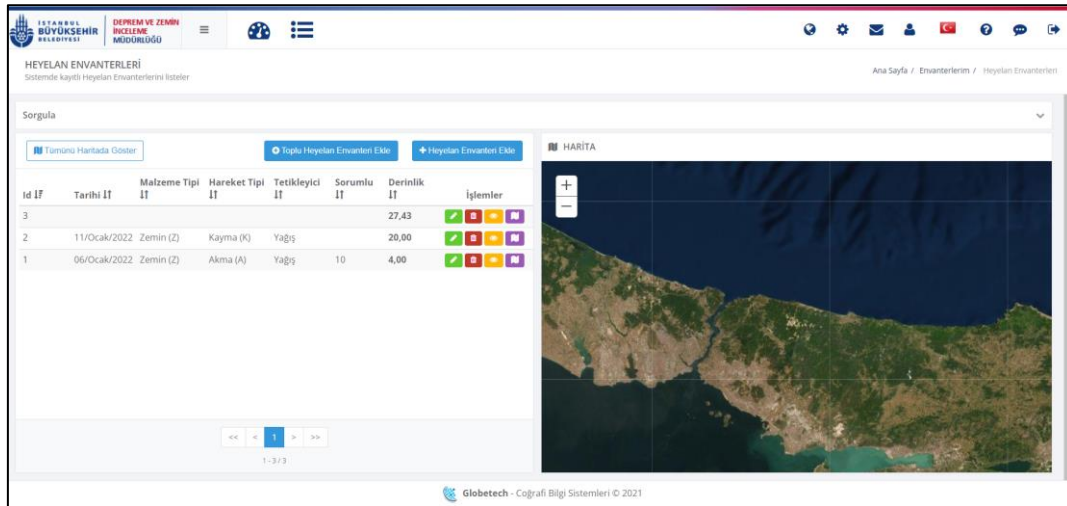
Kurumdan temin edilen coğrafi veriler, ArcGIS Server üzerinden harita servisleri olarak paylaşılmış ve sisteme harita katmanları olarak eklenmiştir. Sistemin ana harita ekranındaki Katman Kontrolü penceresinde yayınlanan veriler listelenmekte, verilerin harita penceresindeki görünürlükleri kullanıcı tercihlerine göre açılıp kapatılabilmektedir.

4.4. Heyelan Envanter Modülünün Geliştirilmesi

Projede geliştirilen Web Tabanlı Heyelan Envanter ve Duyarlılık Analiz Sistemi'nin başlangıç portal sayfasında yer alan "Proje" bağlantısına tıklayarak uygulama sayfasına erişebilmekte ve kendileri için sağlanan kullanıcı adı ve şifresi ile sisteme giriş yapabilmektedir.

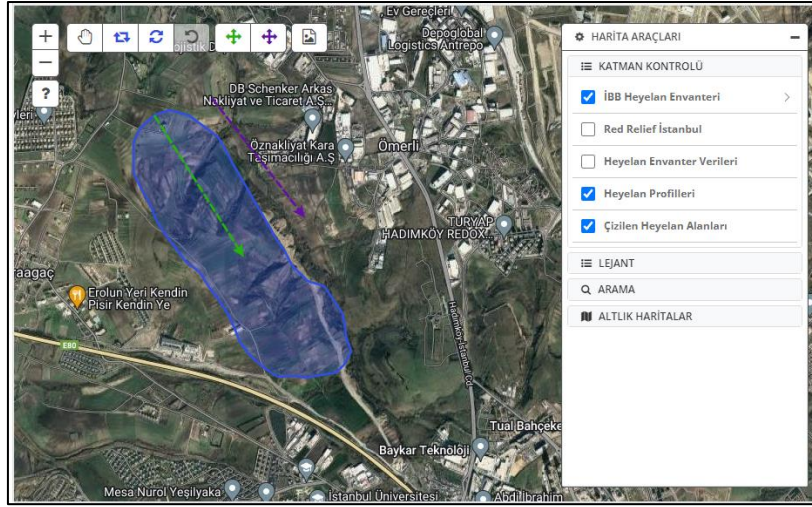
Web Tabanlı Heyelan Envanter ve Duyarlılık Analiz Sistemi işi Heyelan Envanter Modülünün Geliştirilmesi alt faaliyeti kapsamında sistemde yapılan geliştirmeler aşağıda detaylandırılmıştır:

- Kullanıcılar sisteme yeni heyelan envanteri ekleyebilmektedir. Heyelan envanteri ekleme işlemi, kullanıcıların heyelan alanı çizmesi, heyelan öznitelik bilgilerini girmesi ile eklenebileceği gibi sisteme yüklenen dosyadan (Shape veya KML formatında) toplu olarak da aktarılabilmektedir (Şekil 4.25).



Şekil 4.25. Heyelan Envanterleri Ekranı

- Kullanıcılar harita üzerinde bulunan düğmeler yardımı ile heyelan alanları çizebilmektedir (Şekil 4.26).

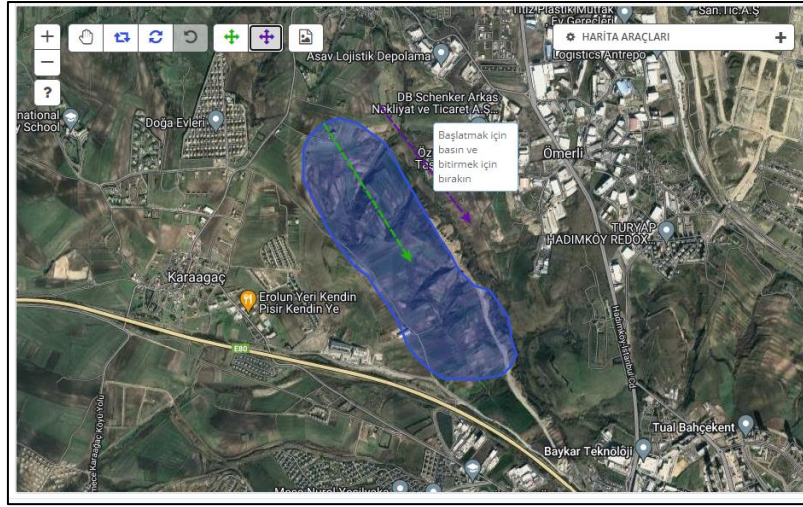


Şekil 4.26. Heyelan Envanteri Ekle – Harita Ekranı

- Kullanıcılar heyelan envanter veri girişinde heyelanın sözel öznitelik bilgilerini ekleyebilmektedir (Şekil 4.27).

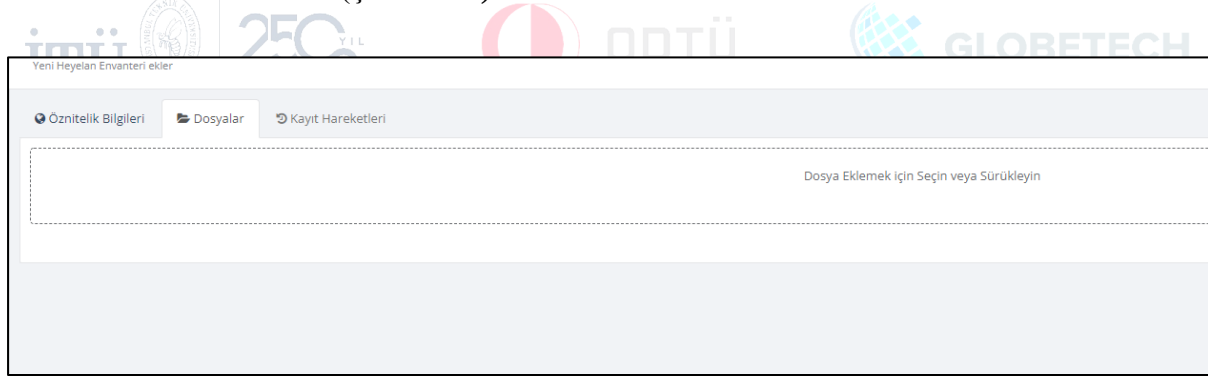
Şekil 4.27. Heyelan Envanteri Ekle Ekranı - Öznitelik Bilgileri

- Kullanıcılar tarafından coğrafi olarak heyelan aynası profili ve eğim profili çizilebilmektedir (Şekil 4.28).



Şekil 4.28. Heyelan Envanteri Ekle - Harita Ekranı

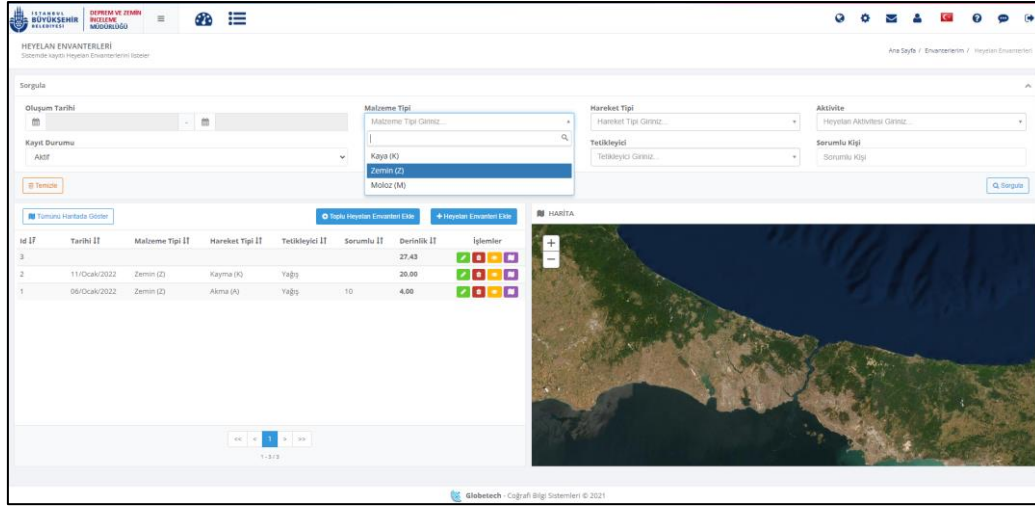
- Kullanıcılar tarafından girilen heyelan envanterine resim, pdf vb. dosyalar eklenebilmektedir (Şekil 4.29).



Şekil 4.29. Dosya Ekranı

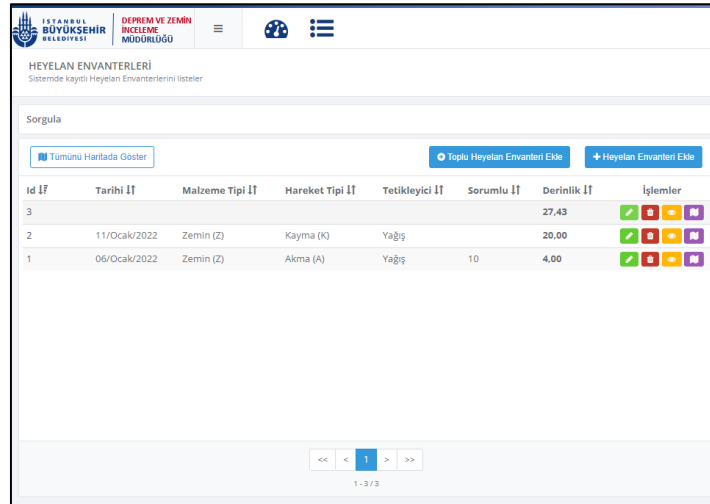
- Kullanıcılar tarafından sistemde bulunan heyelan envanterleri öznitelik bilgilerine göre sorgulanabilmekte ve sorgu sonucu harita üzerinde gösterilebilmektedir (Şekil 4.30).

İstanbul İli Genelinde Afet Riski Altındaki Alanların Belirlenmesine Altlık Veri Üretmek Amacıyla Yer Bilimsel Araştırmaların Gerçekleştirilmesi İşi



Şekil 4.30. Sorgulama Ekranı

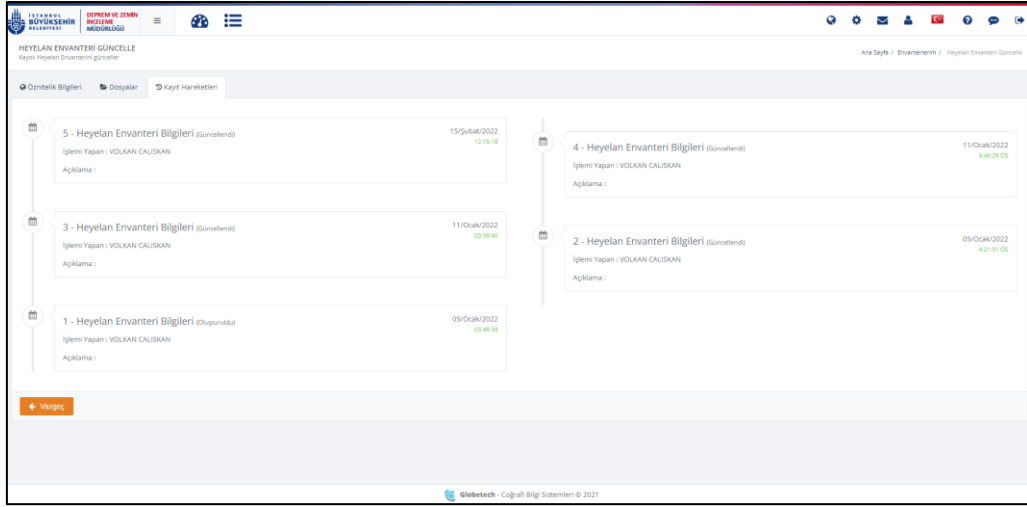
- Kullanıcılar sistemde bulunan heyelan envanterlerini güncelleyebilmektedir. Güncelleme işlemi hem öznitelik bilgileri hem de coğrafi veriler için yapılabilmektedir. Kullanıcılar güncelleme işleminin yanında sistemde kayıtlı envanterlere "Sil/Pasife Al", "Envanteri Göster", "Ana Haritada Göster" işlemlerini de yapabilmektedir. Gerekli durumlarda silinen envanterler listelenebilmekte ve geri getirilebilmektedir (Şekil 4.31).



Şekil 4.31. Heyelan Envanteri İşlemleri

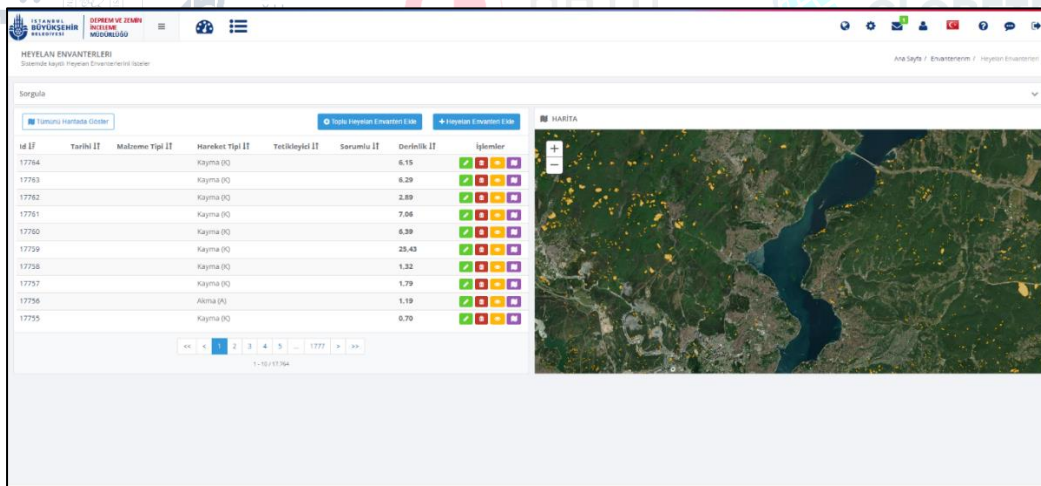
- Sistemde bulunan heyelan envanterleri üzerinde yapılan işlemler kullanıcı, işlem tarihi ve yapılan işlemi gösterir şekilde loglanmaktadır (Şekil 4.32).

İstanbul İli Genelinde Afet Riski Altındaki Alanların Belirlenmesine Altlık Veri Üretmek Amacıyla Yer Bilimsel Araştırmaların Gerçekleştirilmesi İşi



Şekil 4.32. Kayıt Hareketleri

- Proje kapsamında hazırlanan heyelan envanter verileri sistem veri tabanına aktarılmıştır (Şekil 4.33, Şekil 4.34).



Şekil 4.33. Heyelan Envanterleri Ekranı

Şekil 4.34. Heyelan Envanter Örneği

4.5. Heyelan Duyarlılık Haritalama Modellerinin Geliştirilmesi

Proje kapsamında uygulama içerisinde beş farklı modele göre heyelan duyarlılık haritalama modülü geliştirilmiştir. Bu modeller, Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP), Basit Toplamsal Ağırlıklandırma (SAW), Lojistik Regresyon Modeli (LRM), Yapay Sinir Ağları (ANN) ve Destek Vektör Makinaları (SVM) şeklindedir (Şekil 4.35).

Geliştirilen sistemde yukarıda belirtilen modeller kullanılarak heyelan duyarlılık analizleri çalıştırılabilmektedir.

Şekil 4.35. Duyarlılık Analiz Yöntemi Seçim Ekranı

Kullanılan modellere ilişkin genel bilgiler ve sistemdeki arayüz ekranlarından örneklere aşağıda yer verilmiştir:

Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP)

Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP), 1977 yılında Thomas L. Saaty tarafından geliştirilen, problemleri hiyerarşik bir yapıda ele alan ve ikili karşılaştırma mantığına dayanan çok kriterli

karar verme yöntemlerinden biridir. AHP karar almada, grup veya bireyin önceliklerini de dikkate alan, nitel ve nicel değişkenleri bir arada değerlendiren matematiksel bir yöntemdir (Dağdeviren vd., 2004).

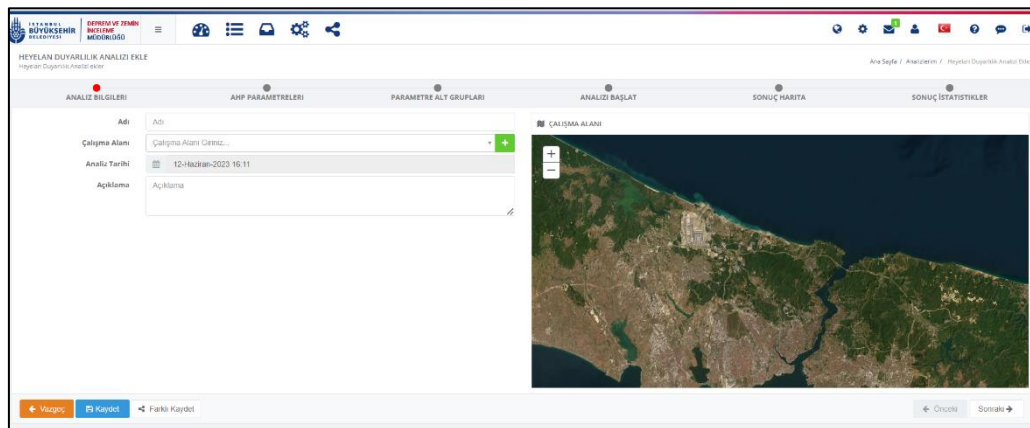
Çok kriterli karar verme teknikleri birbirinden bağımsız faktörlerin etkisini dikkate alarak, karar vericiye en uygun kararın verilmesinde yardımcı olan yaklaşımlardır. AHP'nin karar vericiler tarafından tercih edilmesinin nedeni çok kriterli kararların alınmasında subjektif kriterleri dikkate alabilmesidir.

AHP'nin en önemli aşaması ikili karşılaştırma karar matrislerinin oluşturulmasıdır. Karar matrisleri oluşturulduktan sonra izleyen aşama öncelik veya ağırlıkların belirlenmesidir (Tablo 4.1).

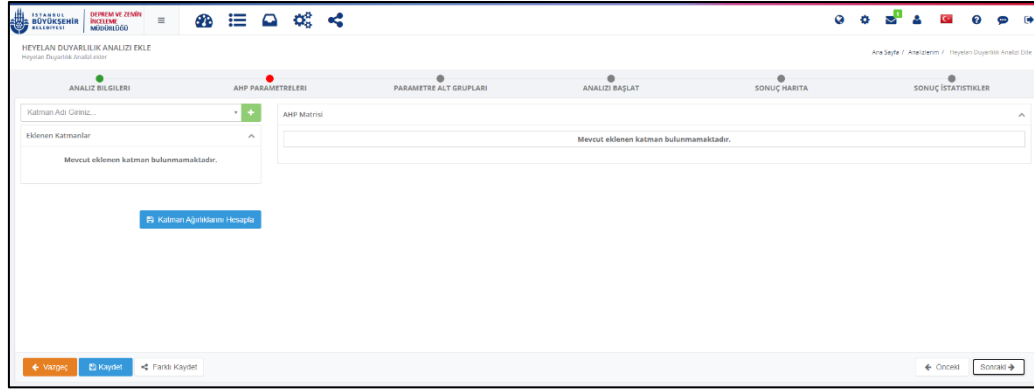
Tablo 4.1. AHP Önem Skala Değerleri ve Tanımları (Dağdeviren vd., 2004)

Değer	Tanım	Açıklama
1	Eşit önemli	İki seçenek de eşit derecede öneme sahiptir.
2	Orta derecede önemli	Tecrübe ve yargı bir kriteri diğerine karşı biraz üstün kılmaktadır.
5	Kuvvetli derecede önemli	Tecrübe ve yargı bir kriteri diğerine karşı oldukça üstün kılmaktadır.
7	Çok kuvvetli derecede önemli	Bir kriter diğerine göre üstün sayılmıştır.
9	Kesin önemli	Bir kriterin diğerinden üstün olduğunu gösteren kanıt çok büyük güvenilirliğe sahiptir.
2, 4, 6, 8	Ara değerler	Uzlaşma gerektiğinde kullanılmak üzere iki ardışık yargı arasındaki değerlerdir.

Sistemdeki AHP yöntemi ile duyarlılık analizi ekranlarından örnekler Şekil 4.36 ve Şekil 4.37'de yer almaktadır.



Şekil 4.36. AHP Modeli ile Duyarlılık Analizi Ekranı



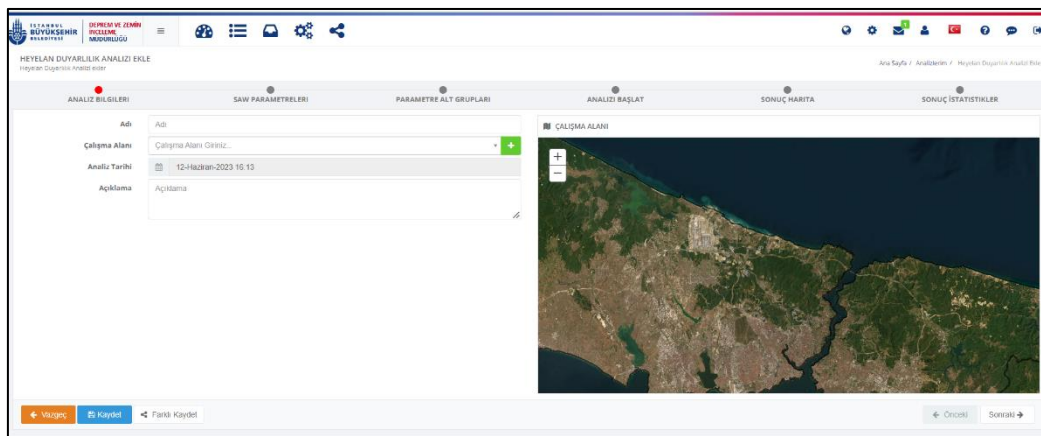
Şekil 4.37. AHP Modeli ile Duyarlılık Analizi için Parametre Seçim Ekranı

Basit Toplamsal Ağırlıklandırma (SAW)

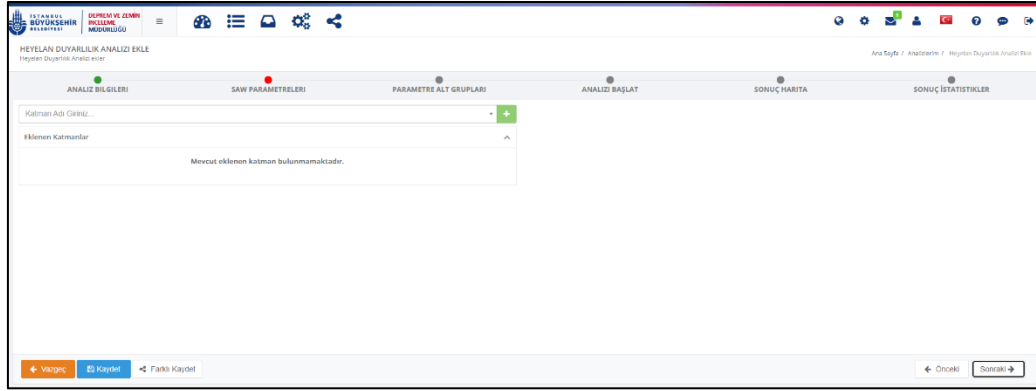
Basit Toplamsal Ağırlıklandırma (SAW) yöntemi genellikle ağırlıklı toplama yöntemi olarak da bilinmektedir. SAW yönteminin temel konsepti, tüm özelliklerin her bir alternatifindeki performans puanlarının ağırlıklı toplamının bulunmasına dayalıdır. SAW yöntemi, karar matrisinin diğer tüm mevcut alternatif derecelendirmeler ile karşılaştırılabilir bir ölçeğe normalleştirilmesi sürecini gerektirir (Putra vd., 2018).

Bu yöntemde öncelikle karar matrisi normalize edilir. Daha sonra her bir kriter ağırlığı ile daha önce hesaplanmış olan değerlerinin çarpılması sonucunda her bir alternatifin toplam değeri bulunur. Elde edilen değerlerin yüksek olması alternatifin daha fazla tercih edilmesi gerektiğini işaret eder.

Web tabanlı analiz sistemi içerisindeki SAW modeli ile heyelan duyarlılık analiz ekranları Şekil 4.38 ve Şekil 4.39’da gösterilmiştir.



Şekil 4.38. SAW Modeli ile Duyarlılık Analizi Ekranı



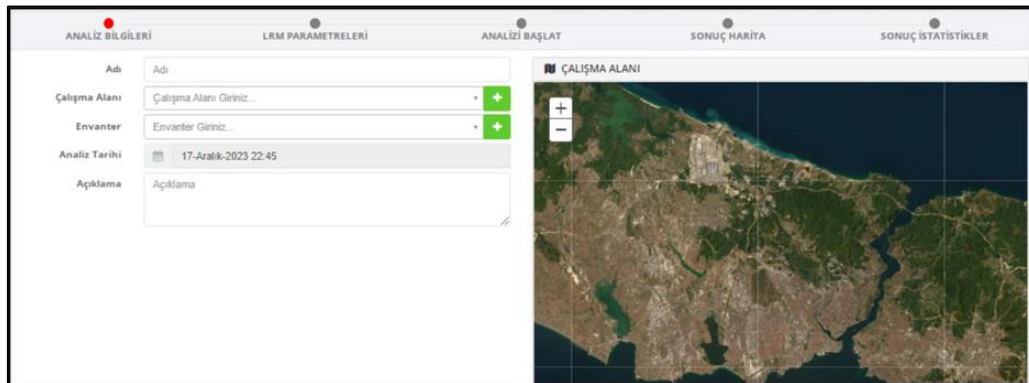
Şekil 4.39. SAW Modeli ile Duyarlılık Analizi için Parametre Seçim Ekranı

Lojistik Regresyon Modeli (LRM)

Lojistik regresyon, bağımlı değişkenin ikili olduğu makine öğrenimi modelleri oluşturmak için kullanılan istatistiksel bir yöntemdir. Lojistik regresyon, verileri ve bir bağımlı değişken ile bir veya daha fazla bağımsız değişken arasındaki ilişkiyi tanımlamak için kullanılır. Bağımsız değişkenler nominal, sıralı veya aralık tipinde olabilir.

Makine öğrenimi literatüründe maksimum-entropi sınıflama (MaxEnt) veya log-doğrusal sınıflayıcı olarak da bilinir. Modelin çoklu değerli nominal değişkenler için genellenmiş olan versiyonu da olup çoklu-nominal lojistik regresyon olarak adlandırılır. Lojistik regresyon modeli olası sonuçların ortaya çıkma olasılıklarını lojistik bir fonksiyon aracılığıyla belirleyici faktörlerin (bağımsız değişkenler) fonksiyonu olarak ifade eder.

Sistemdeki Lojistik Regresyon Modeli (LRM) ile Heyelan Duyarlılık Analizi çalıştırma ekranına ait örnek görüntü Şekil 4.40'ta verilmiştir.



Şekil 4.40. LRM Modeli ile Duyarlılık Analizi Ekranı

Yapay Sinir Ağları (ANN)

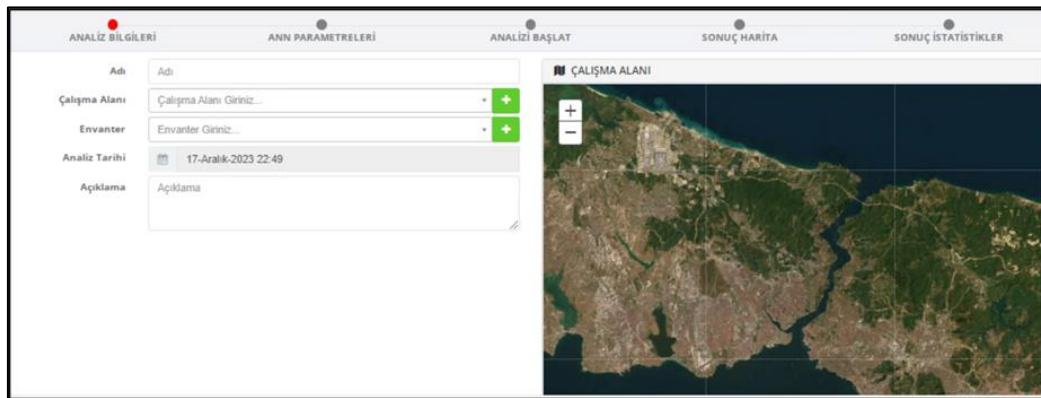
Yapay sinir ağları (ANN), hayvan beyinlerini oluşturan biyolojik sinir ağlarında keşfedilen nöronal organizasyon ilkeleri kullanılarak inşa edilen makine öğrenimi modellerinin bir dalıdır.

Bir ANN, biyolojik bir beyindeki nöronları gevşek bir şekilde modelleyen yapay nöronlar adı verilen bağlı birimler veya düğümler topluluğuna dayanır. Her bağlantı, biyolojik beyindeki sinapslar gibi, diğer nöronlara bir sinyal iletebilir. Yapay bir nöron sinyalleri alır, sonra bunları işler ve kendisine bağlı nöronlara sinyal gönderebilir. Bir bağlantıdaki "sinyal" gerçek bir sayıdır ve her nöronun çıktısı, girdilerinin toplamının doğrusal olmayan bir fonksiyonu ile hesaplanır. Bağlantılar kenar olarak adlandırılır. Nöronlar ve kenarlar tipik olarak öğrenme ilerledikçe ayarlanan bir ağırlığa sahiptir. Ağırlık, bir bağlantıdaki sinyalin gücünü artırır veya azaltır. Nöronların bir eşiği olabilir, öyle ki bir sinyal yalnızca toplam sinyal bu eşiği geçerse gönderilir.

Tipik olarak, nöronlar katmanlar halinde toplanır. Farklı katmanlar girdileri üzerinde farklı dönüşümler gerçekleştirebilir. Sinyaller ilk katmandan (giriş katmanı) son katmana (çıkış katmanı), muhtemelen katmanları birden fazla kez geçtikten sonra gider.

Diğer bir deyişle, fonksiyonun temel yapısını ağırlıkların büyüklüğü ve işlem elemanlarının işlem şekli belirler. Sinir ağlarının davranışları, yani girdi veriyi çıktı veriye nasıl ilişkilendirdikleri, ilk olarak nöronların transfer fonksiyonlarından, nasıl birbirlerine bağlandıklarından ve bu bağlantıların ağırlıklarından etkilenir.

Sistemdeki Yapay Sinir Ağları (ANN) ile Heyelan Duyarlılık Analizi çalıştırma ekranına ait örnek görüntü Şekil 4.41’de verilmiştir.



Şekil 4.41. ANN Modeli ile Duyarlılık Analizi Ekranı

Destek Vektör Makineleri (SVM)

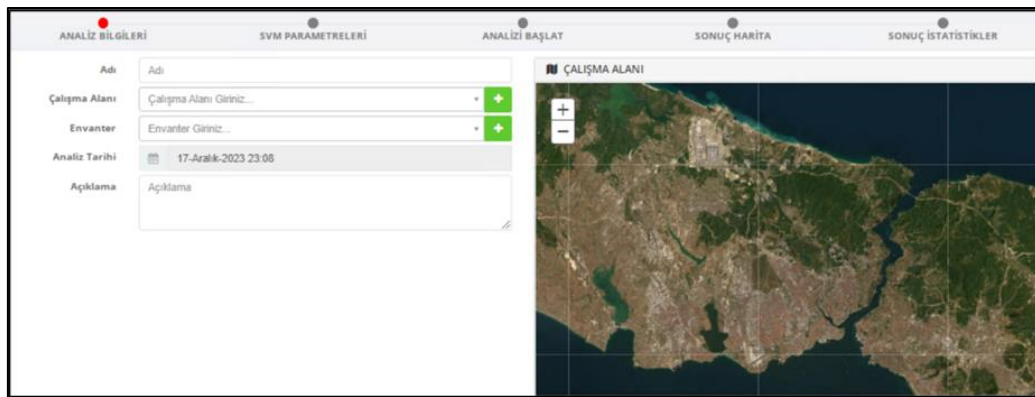
Destek Vektör Makinesi (SVM), önceden tanımlanmış sınıflara, etiketlere veya çıktılarına dayalı olarak veri noktaları arasındaki sınırları belirleyen optimum veri dönüşümleri gerçekleştirerek karmaşık sınıflandırma, regresyon ve aykırı değer tespit problemlerini çözmek için denetimli öğrenme modellerini kullanan bir makine öğrenimi algoritmasıdır.

Teknik olarak, SVM algoritmasının birincil amacı, farklı sınıfların veri noktalarını ayırt edici bir şekilde ayıran bir hiper düzlem belirlemektir. Hiper düzlem, en büyük marjın dikkate alınan sınıfları ayıracağı şekilde konumlandırılır.

SVM'ler potansiyel olarak ikili sınıflandırma problemleri için tasarlanmıştır. Bununla birlikte, hesaplama açısından yoğun çok sınıflı problemlerdeki artışla birlikte, bu tür çok sınıflı sınıflandırmaları ikili yollarla uygulayabilen SVM'leri formüle etmek için birkaç ikili sınıflandırıcı oluşturulmuş ve birleştirilmiştir.

Matematiksel bağlamda SVM, çekirdek fonksiyonları kullanarak veri özelliklerini dönüştürmek için çekirdek yöntemlerini kullanan bir dizi makine öğrenimi algoritmasını ifade eder. Çekirdek fonksiyonları, karmaşık veri kümelerini veri noktası ayrımını kolaylaştıracak şekilde daha yüksek boyutlara eşleme sürecine dayanır. Fonksiyon, karmaşık veri noktalarını eşlemek için daha yüksek boyutlar ekleyerek doğrusal olmayan problemler için veri sınırlarını basitleştirir.

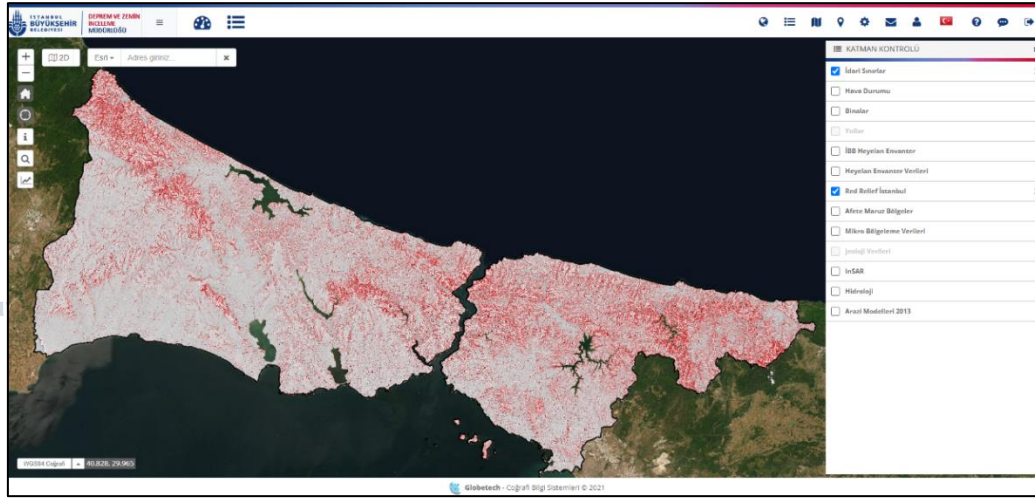
Sistemdeki Destek Vektör Makineleri (SVM) ile Heyelan Duyarlılık Analizi çalıştırma ekranına ait örnek görüntü Şekil 4.42'de verilmiştir.



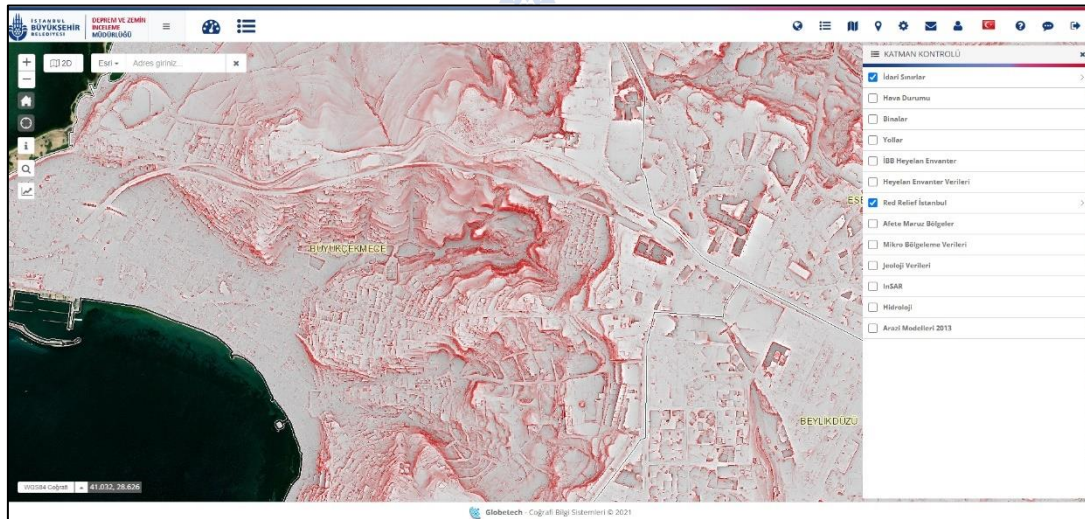
Şekil 4.42. SVM Modeli ile Duyarlılık Analizi Ekranı

4.6. Heyelan Duyarlılık Haritalama Yazılımının Geliştirilmesi

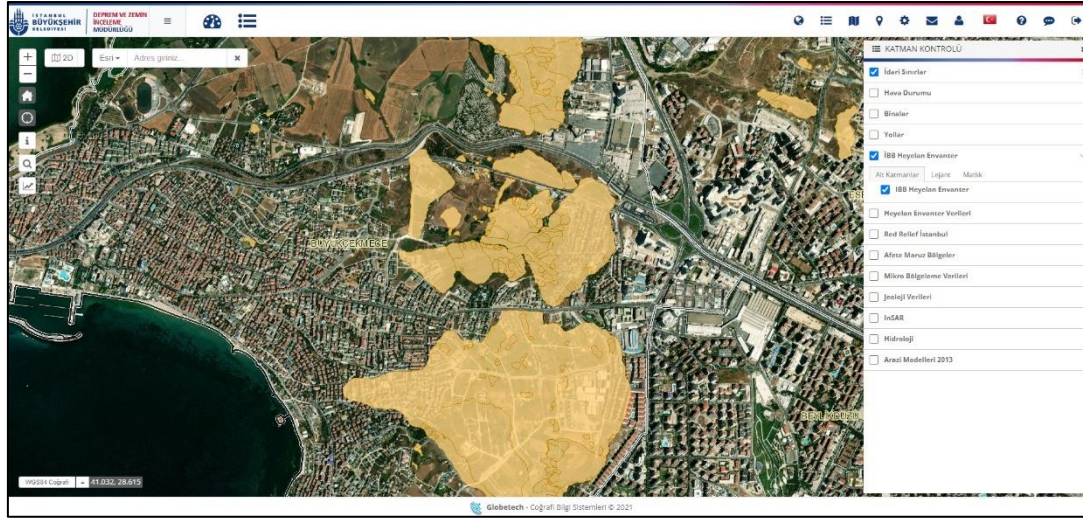
Geliştirilen Web Tabanlı Heyelan Envanter ve Duyarlılık Analiz Sistemi'nin harita ekranında İstanbul'un Avrupa, Anadolu ve Adalar kısımları için bütünsel olarak oluşturulan Kırmızı Topoğrafya Görüntü Haritaları (RRIM), proje çalışmaları sonucunda hazırlanan heyelan envanter verileri, heyelan duyarlılık analiz parametreleri ve heyelan duyarlılık haritası gibi katmanlar servis olarak yayınlanarak kullanıcılara sunulmuş durumdadır (Şekil 4.43, Şekil 4.44, Şekil 4.45).



Şekil 4.43. Kırmızı Topoğrafya Görüntü Haritaları (RRIM)



Şekil 4.44. Kırmızı Topoğrafya Görüntü Haritaları (RRIM) (Yakınlaştırılmış Görüntü)



Şekil 4.45. Heyelan Envanter Verileri

5. Heyelan Duyarlılık Haritalarının Hazırlanması

4.1. Uygun Haritalama Biriminin Seçilmesi

Çalışma kapsamında İstanbul ili heyelan duyarlılık haritası 1/10.000 ölçek baz alınarak hazırlanmıştır. Hedeflenen ölçeğe uygun olması açısından duyarlılık haritalarının hazırlanması için gerçekleştirilen analizlerde kullanılan parametre verilerinin ve analiz sonuçlarının çözünürlüğü 5 metre olarak belirlenmiştir. Bu bağlamda öncelikle 1 metre çözünürlüklü LiDAR DEM verisi yeniden örnekleme (Resample) işlemine tabi tutularak 5 metre çözünürlüğe getirilmiştir. Eğim, bakı gibi topoğrafik parametre katmanları DEM verisi kullanılarak türetilmiştir. Diğer veriler de DEM verisi baz alınarak 5 metre çözünürlüklü olacak şekilde hazırlanmıştır.

5.2. Heyelan Duyarlılık Faktör Haritalarının Belirlenmesi

Heyelan duyarlılığının tespit edilmesinde en temel aşama, heyelan duyarlılığını etkileyen faktörlerin belirlenmesidir. Bu bağlamda Proje Eş Yürütücüleri Prof. Dr. M. Lütfi Süzen ve Doç. Dr. Tolga Görüm'ün konuya ilişkin geçmiş deneyimleri ve yapılan literatür araştırmaları ışığında İstanbul ili heyelan duyarlılık haritalarının hazırlanması için kullanılan faktörler belirlenmiştir.

Heyelan oluşumunda etkili olan faktörler genel olarak hazırlayıcı ve tetikleyici faktörler olarak ikiye ayrılmaktadır. Hazırlayıcı faktörler doğal kökenli iken, tetikleyici faktörler insan etkisini

de içermektedir. Hazırlayıcı faktörler, Jeolojik (litoloji, yapısal özellikler, yeraltı suyu koşulları), Topoğrafik (yamaç eğimi, yamaç yönelimi, yamaç şekli, yükseklik, drenaj ağı) ve Çevre (bitki örtüsü, arazi kullanım potansiyeli) şeklinde 3 ana grupta toplanmaktadır. Tetikleyici faktörler ise, deprem, yağış ve insan etkisini kapsamaktadır (Gökçeoğlu ve Ercanoğlu, 2001).

Dünyada heyelan duyarlılığının belirlenmesi ve haritalanmasına ilişkin yapılan çalışmalar incelendiğinde eğim ve litolojik özellikler gibi bazı faktörlerin pek çok çalışmada kullanıldığı ve uzmanlar tarafından kabul gördüğü anlaşılmaktadır. Bu faktörlerin yanı sıra ana faylara olan uzaklık, arazi kullanım potansiyeli, bitki örtüsü gibi faktörler de çeşitli çalışmalarda göz önünde bulundurulmuştur (Gökçeoğlu ve Ercanoğlu, 2001).

M. Lütfi Süzen tarafından pilot bölge olarak Asarsuyu Havzası'nda uygulaması yapılan ve heyelan duyarlılığı tahminleme yöntemi geliştirilmesine yönelik gerçekleştirilen çalışmada uzaktan algılama ürünleri, jeolojik haritalar ve topoğrafik haritalar şeklinde üç veri grubu belirlenmiştir. Bu kapsamda bölgeye dair litoloji haritası, faylara uzaklık, fay yoğunluğu, yükseklik, drenajlara uzaklık, drenaj yoğunluğu, sırtlara/tepelere uzaklık, bakı, eğim, yerleşimlere uzaklık, enerji hatları, yol ağı ve otoyola uzaklık ile arazi örtüsü parametre katmanları kullanılmıştır (Süzen, 2002).

Tolga Görüm tarafından gerçekleştirilen Melen Boğazı ve yakın çevresini kapsayan bölgeye yönelik heyelan duyarlılık analizi çalışmasında yükseklik, eğim, bakı, yamaç eğriselliği, akarsu aşındırma gücü endeksi, Topoğrafik Nemlilik İndeksi (TWI), litoloji, jeomorfoloji ve arazi kullanımı parametreleri kullanılmıştır. Belirlenen tüm parametrelerin kullanıldığı analiz sonucunun doğruluğunun yüksek olması sebebiyle elde edilen harita bölgenin duyarlılık haritası olarak kabul edilmiştir. Elde edilen heyelan duyarlılık sınıfları, yüksek, orta ve düşük olmak üzere üç ana gruba ve on alt sınıfa ayrılmıştır (Görüm, 2006).

Heyelan duyarlılığını etkileyen ana faktörlerden biri bölgenin zemin özelliklerini gösteren litolojik yapıdır (Ayalew et al. 2005, Wang et al. 2009, Dai and Lee 2002). Farklı litolojik yapıya sahip birimlerde su iletim özelliklerinin ve birimlerin kayma gerilimlerinin farklı olması nedeniyle kaymaya karşı duyarlılık da farklı olmaktadır (Arca ve Kutoğlu, 2017).

Topoğrafik faktörlere bakıldığında, heyelanların oluşmasına zemin hazırlayan en önemli nedenlerden biri arazi eğimidir. Eğimin fazla olduğu bölgelerde heyelan riski de buna bağlı olarak artmaktadır (Öztürk, 2002). Yamaç eğimi, kütle hareketlerinin oluşumunu ve

hareketlenen malzemenin hareket mesafesini kontrol eden en önemli parametrelerden birisidir. Yamaç eğiminin kayma yüzeyindeki kayma ve normal gerilmeleri etkileyen asıl duraylılık faktörü olduğu söylenebilir (Demir, 2011).

Bakı ya da başka bir deyişle yamaç yönü, topraktaki nem tutma oranı ve arazi örtüsü gelişimini etkilemektedir. Bu nedenle toprak dayanımı ve heyelan duyarlılığını etkileyen faktörlerden biridir (Dai ve Lee, 2001).

Yükseklik faktörünün heyelana duyarlı alanların belirlenmesinde etkisi tam olarak belirlenmemiştir ve araştırmaya açık konulardan biridir. Ancak bazı bilimsel çalışmalarda yüksekliğin de heyelana neden olan etmenlerden biri olduğu belirtilmektedir (Dai ve Lee, 2002). Ayrıca yükseklik faktörü biyolojik etmenlere ve doğal-yapay unsurlara etki etmekte, buna bağlı olarak da şev durağanlığına ve şev kırılmalarına yol açabilmektedir (Vivas, 1992; Arca ve Kutoğlu, 2017).

Yükseklik faktörü, deniz seviyesinden olan yükseklik değerlerini temel alan topoğrafik yükseklik ya da çalışılan alandaki topoğrafik elemanların birbirlerine göre yükseklik farklarını temel alan göreceli yükseklik olarak düşünülebilir. Çok yüksek kotlardaki birimler, kayaç türü malzemelerden oluşmaktadır ve daha alt kotlardaki malzemelere göre daha yüksek dayanıma sahip oldukları için bu alanlarda heyelan duyarlılığı daha düşüktür (Caniani ve ark., 2008).

Topografik Nemlilik İndeksi (TWI), yerel topoğrafyanın hidrolojik süreç üzerindeki kontrolünü ölçerek heyelana eğilimli olan alanların hidrolojik benzerliğini karakterize etmede önemlidir. Bu indeks toprak nemi ve yüzey doygunluğunun mekânsal dağılımını göstermektedir (Qin ve ark., 2011).

Faylara yakınlık kayaçlarda parçalanmaya neden olabilmekte ve bu durum yamaçların duraylılığını olumsuz yönde etkileyerek heyelan duyarlılığının artmasına sebep olabilmektedir (Luzi ve Pergalani, 1999). Fay hatlarının kendilerini çevreleyen malzemeyi zayıflatması sonucunda faylara yakın mesafelerde daha fazla heyelan oluşmaktadır (Wachal ve Hudak, 2000).

Heyelan duyarlılığını arttıran etmenlerden biri de insan eliyle yapılan yollardır. Yamaçlardan geçen yollar hem topoğrafyada hem de yamaç topuğunda yük azalmasına neden olmaktadır. Topoğrafyanın bu şekilde değişmesi ve yük azalması sonucunda yamaç gerisinde gerilme

artışları meydana gelmekte ve bu gerilme çatlakların gelişmesine neden olmaktadır (Demir, 2011).

Akarsulara yakınlık da duraylılık açısından önemli bir faktördür. Akarsular yamaç topuğunu erozyona uğratarak ya da yamacı oluşturan malzemenin akarsu seviyesinin altındaki kesimini suya doymuş hale getirerek heyelan duyarlılığının artmasına neden olabilmektedir (Demir, 2011).

Zeminde arazi örtüsü varlığı, yamaçların stabil olduğunun dolaylı bir göstergesidir. Boş ve seyrek arazi örtüsü ile kaplı alanlar, ormanlık alanlarla kaplı bölgelere göre daha fazla duraysızlık göstermektedir. Bitki örtüsü varlığının yamacın duraylılığı üzerinde hem olumlu hem de olumsuz etkileri vardır. Ağaç ya da bitkilerin yaprakları suyu emme ve buharlaştırma özelliğinden dolayı yağışın süzülme etkisini azaltır. Bunun yanı sıra kökler, zemin içerisindeki suyu alarak terleme yoluyla buharlaştırır ve boşluk suyu basıncının azalmasına neden olurlar. Bu durum yamaç duraylılığını olumlu yönde etkilemektedir. Ancak kök ve gövdeler zemin yüzeyinin geçirgenliğini artırarak suyun zemin içerisine girişini kolaylaştırır. Bu durumda boşluk suyu basıncı artar. Ayrıca ağaçların ağırlıkları yamaçtaki normal ve kayma gerilmelerini arttırabilmektedir. Sonuç olarak, bitki örtüsü özellikleri zeminde bir tahribe yol açmamış, aksine zemini güçlendirecek özellikte katkıda bulunmuşsa duraylılığa olumlu yönde etki ettiği kabul edilmektedir. Ancak yamaçlarda gelişebilecek kayma yüzeyleri üzerinde aşırı yük oluşturabilecek bitki örtüsünün de olumsuz etkisi olduğu görülmektedir (Çevik ve Topal, 2003; Perotto-Baldivieso vd., 2004; Kamp, 2008; Pradhan, 2010; Demir, 2011).

Proje kapsamında dünyada yapılan heyelan duyarlılığını tespit çalışmalarına yönelik literatür araştırmaları ve İstanbul'un heyelan envanteri ile yapısal özellikleri göz önünde bulundurularak aşağıdaki tabloda belirtilen heyelan duyarlılık faktörleri belirlenmiştir (Tablo 5.1).

Tablo 5.1. Heyelan Duyarlılık Faktörleri

Heyelan Duyarlılık Faktörleri	
Topoğrafik Faktörler	Yükseklik
	Eğim
	Bakı
	Topoğrafik Nemlilik İndeksi (TWI)
	Akarsulara Uzaklık
	Yükseklik Standart Sapması
Jeolojik Faktörler	Litoloji

Arazi kullanımına ilişkin Faktörler	Faylara Uzaklık
	CORINE Arazi Örtüsü
	Yollara Uzaklık

5.3. Heyelan Duyarlılık Haritalarının Üretilmesi

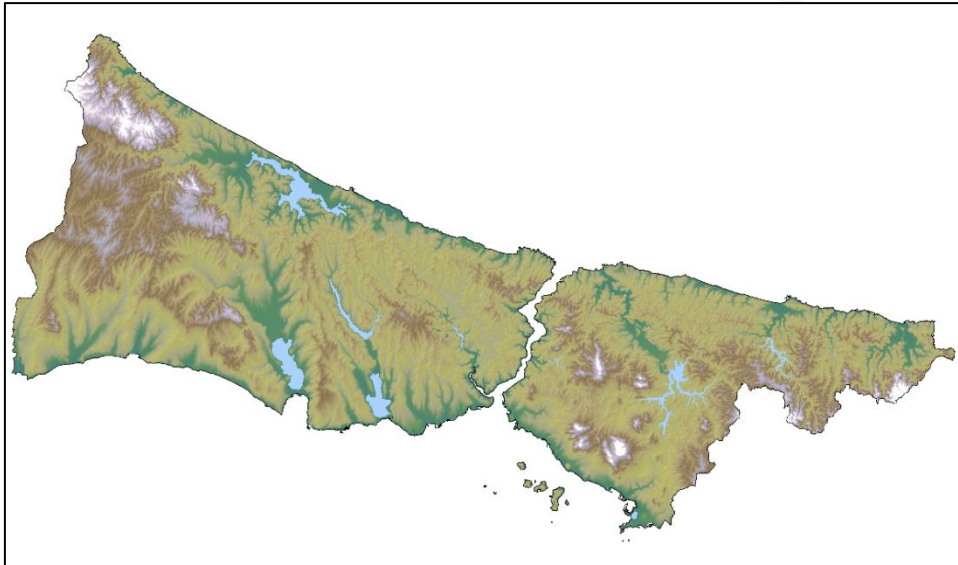
5.3.1. Heyelan Duyarlılık Analizine Yönelik Faktör (Parametre) Verilerinin Hazırlanması

Heyelan duyarlılık analizlerinde kullanılan parametre verileri CBS tabanlı olarak ArcGIS ve SAGA GIS uygulamalarında yer alan analiz fonksiyonları kullanılarak hazırlanmıştır.

Topoğrafik Duyarlılık Parametreleri

- **Yükseklik**

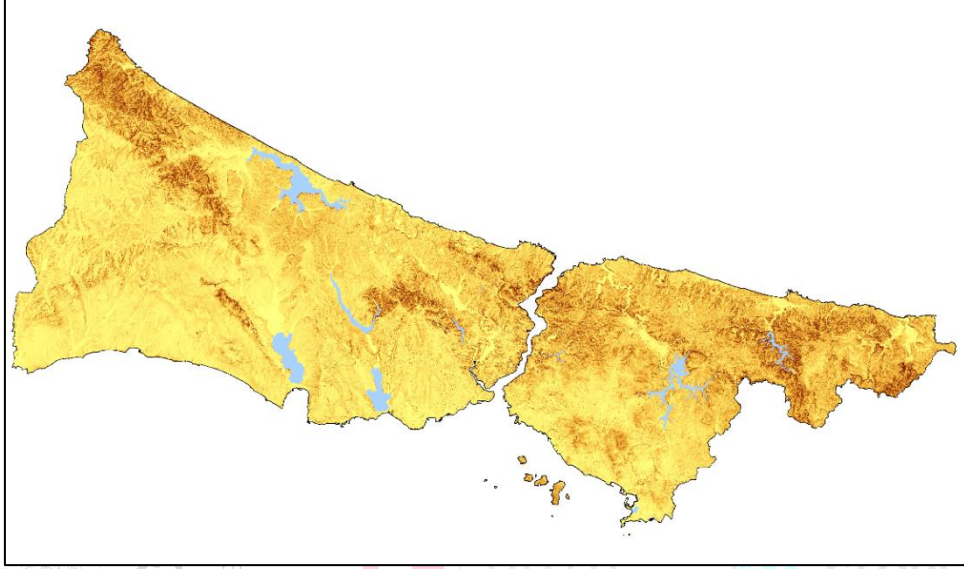
İdare'den temin edilen 1 metrelik LiDAR DEM verisi, 5 metre çözünürlük için yeniden örnekleme (Resample) işlemine ve veri içerisindeki topoğrafik anlamda problemli alanların düzeltilmesi için doldurma (Fill) işlemine tabi tutulmuştur.



Şekil 5.1. İstanbul ili Yükseklik Haritası (DEM)

- **Eğim**

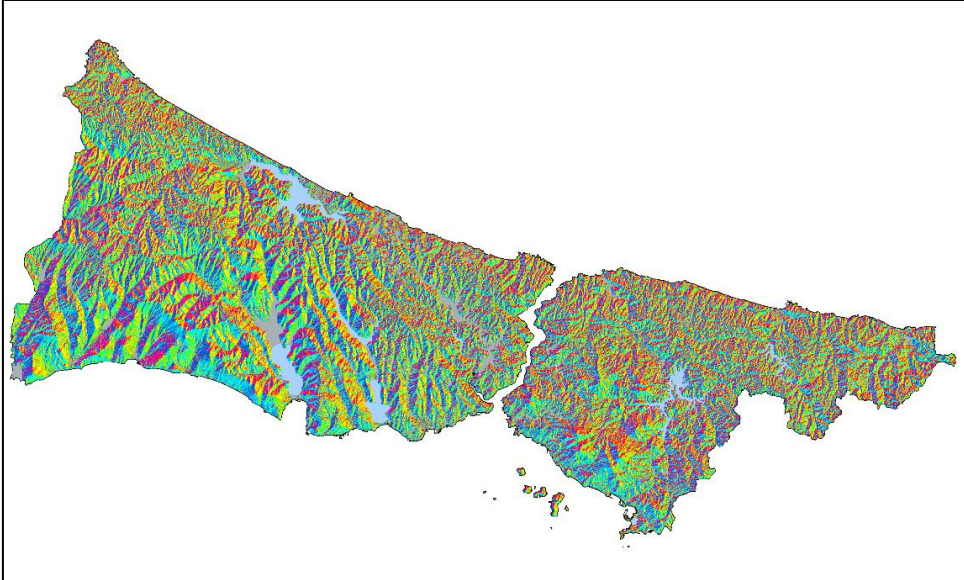
5 metre çözünürlüklü LiDAR DEM verisinden eğim derecelerine göre üretilmiştir.



Şekil 5.2. İstanbul ili Eğim Haritası

- **Bakı**

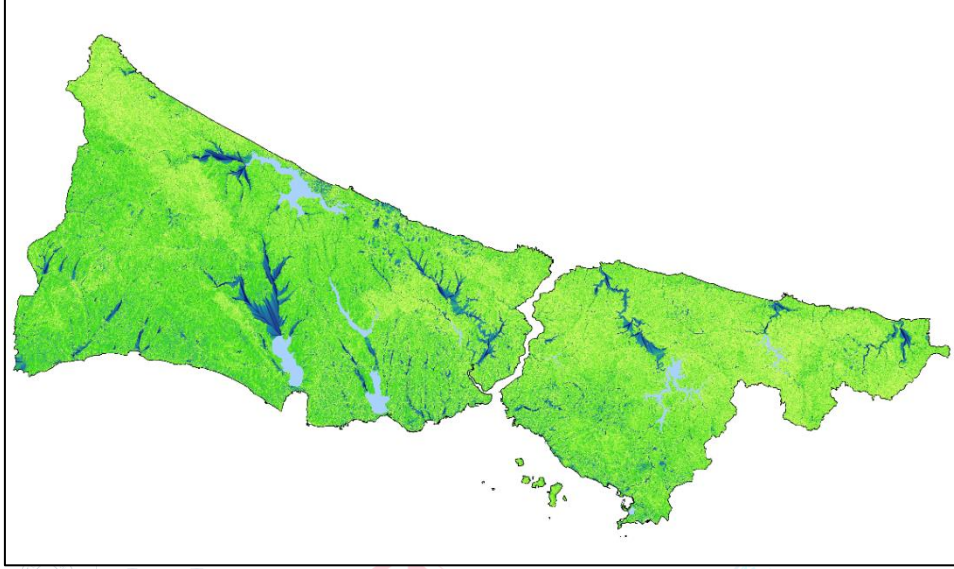
5 metre çözünürlüklü LiDAR DEM verisinden üretilmiş ve bakılara göre sınıflandırılmıştır.



Şekil 5.3. İstanbul ili Bakı Haritası

- **Topoğrafik Nemlilik İndeksi (TWI)**

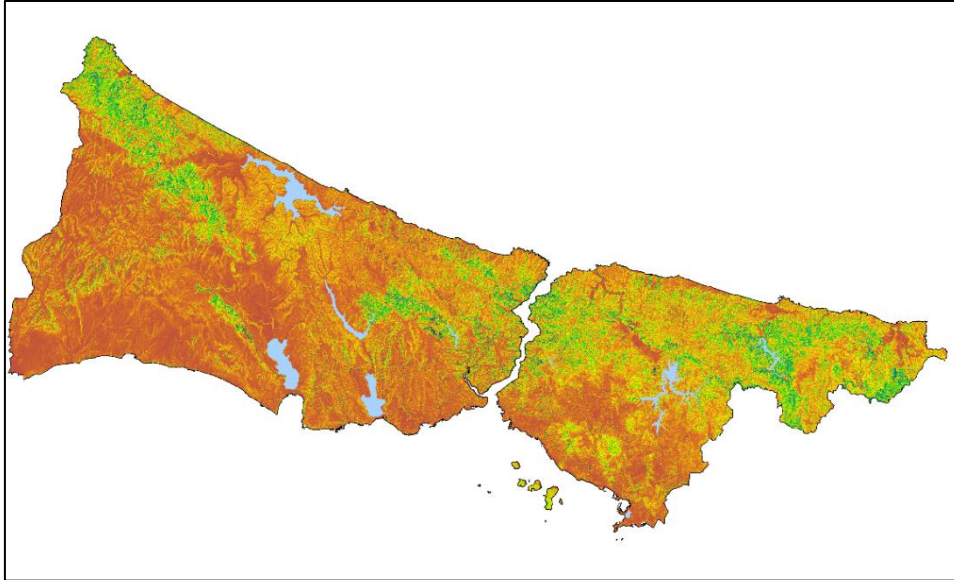
5 metre çözünürlüklü LiDAR DEM verisinden üretilmiştir.



Şekil 5.4. İstanbul ili Topoğrafik Nemlilik İndeksi (TWI)

- **Yükseklik Standart Sapması**

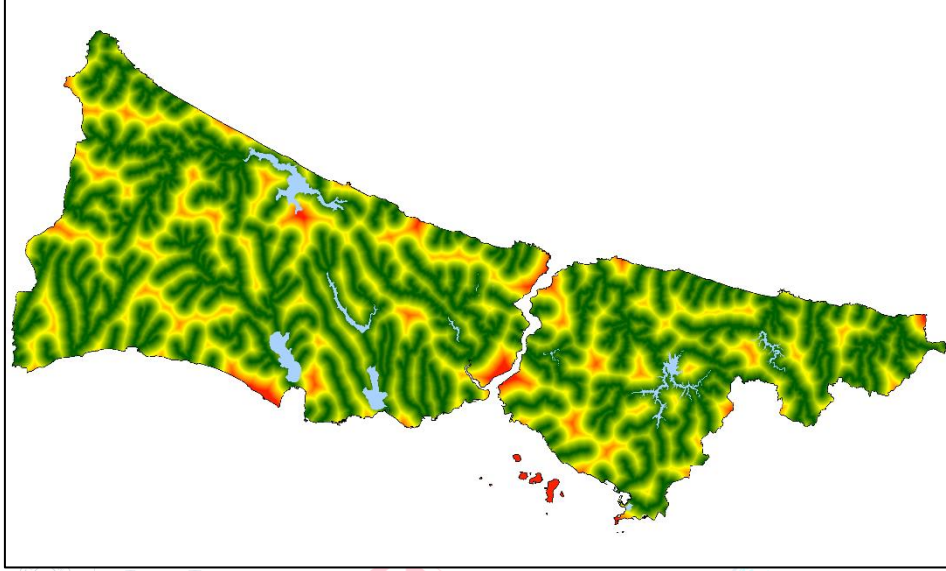
5 metre çözünürlüklü LiDAR DEM verisinden üretilmiştir.



Şekil 5.5. İstanbul ili Yükseklik Standart Sapma Haritası

- **Akarsulara Uzaklık**

ArcGIS uygulamasındaki “Euclidean Distance” fonksiyonu kullanılarak üretilmiştir.

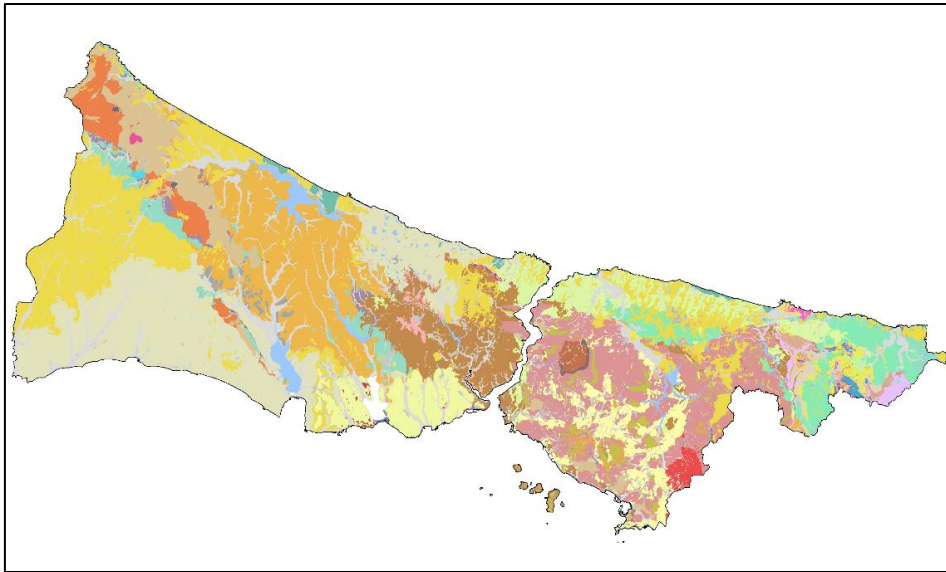


Şekil 5.6. İstanbul ili Akarsulara Uzaklık Haritası

Jeolojik Duyarlılık Parametreleri

- **Litoloji**

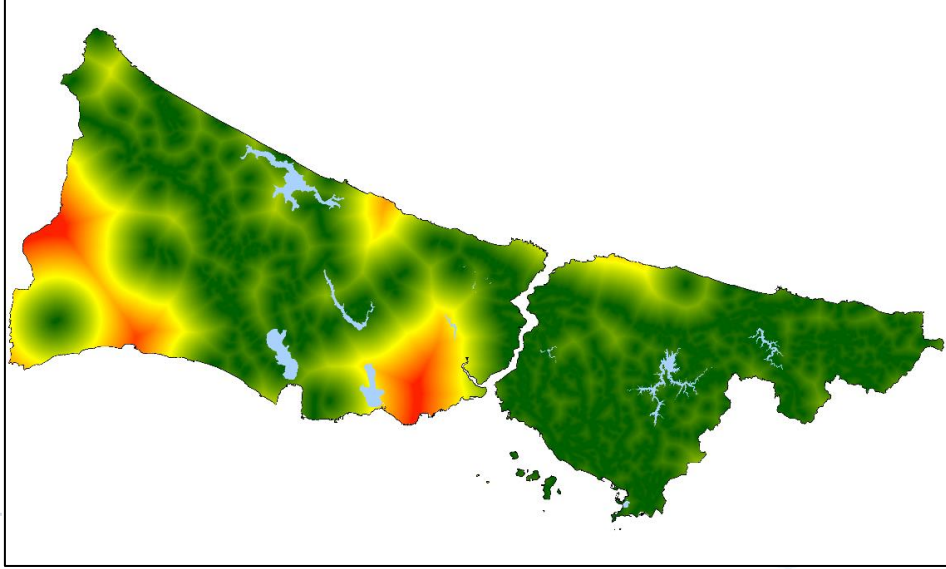
İdare’den temin edilen 1/25.000 ölçekli Jeoloji verisine ait tabloda yer alan “Simge” sütunu kullanılarak her bir jeolojik birimin formasyon ve litolojik bilgileri tabloya aktarılmış ve vektör formatındaki veri analizlerde kullanılmak üzere 5 metre çözünürlüklü raster veri formatına dönüştürülmüştür.



Şekil 5.7. İstanbul ili Litoloji Haritası

- **Faylara Uzaklık**

İdare'den temin edilen fay verisi ile ArcGIS uygulamasındaki “Euclidean Distance” fonksiyonu kullanılarak üretilmiştir.

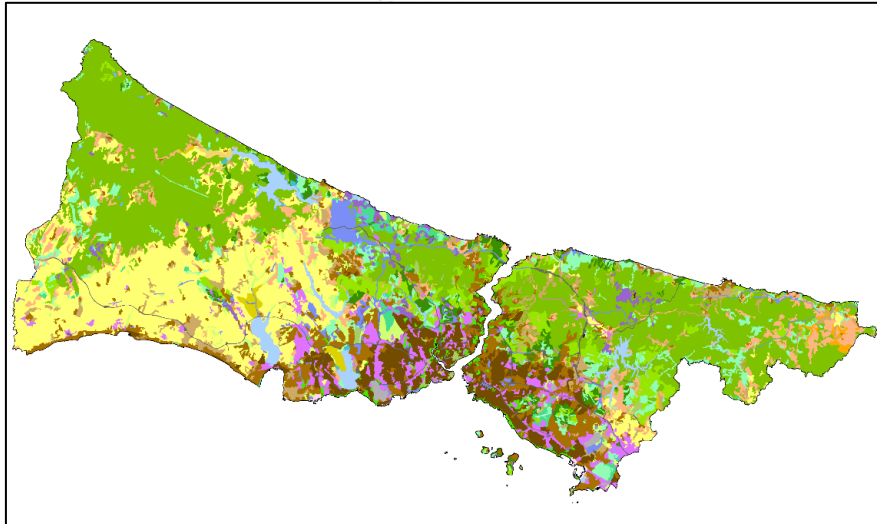


Şekil 5.8. İstanbul ili Faylara Uzaklık Haritası

Arazi Kullanımına İlişkin Parametreler

- **CORINE Arazi Örtüsü**

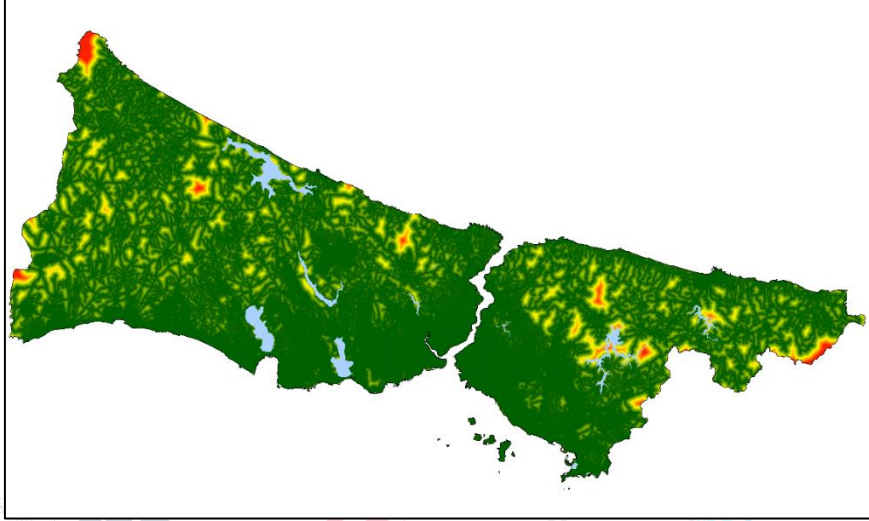
CORINE arazi örtüsü verisi analizlerde kullanılmak üzere 5 metre çözünürlüklü raster veri formatına dönüştürülmüştür.



Şekil 5.9. İstanbul ili CORINE Arazi Örtüsü Haritası

- **Yollara Uzaklık**

İdare’den temin edilen yol verisi ile ArcGIS uygulamasındaki “Euclidean Distance” fonksiyonu kullanılarak üretilmiştir.

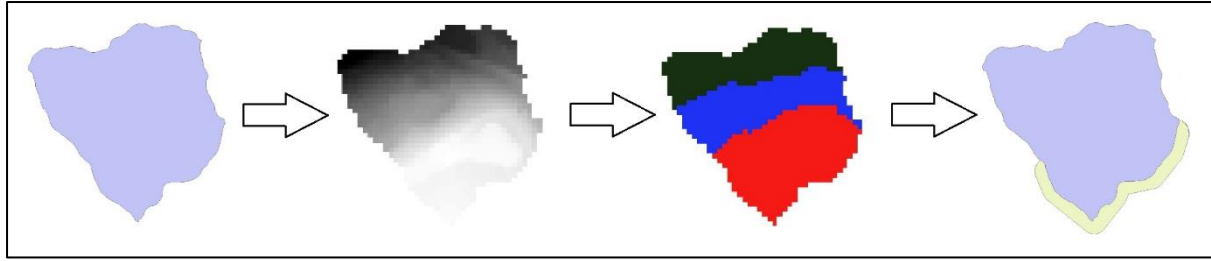


Şekil 5.10. İstanbul ili Yollara Uzaklık Haritası

5.3.2. Heyelan Duyarlılık Analizlerine Yönelik Ön Hazırlık Çalışmaları

Heyelan duyarlılık analizlerinde hem çok değişkenli istatistiksel yöntemlerdeki örnekleme stratejisinde, hem de uzman görüşüne dayalı yöntemlerdeki parametre ağırlıkları ve sınıflarının belirlenmesinde kullanılmak üzere heyelan envanter verilerinden “seed cell” alanları oluşturulmuştur.

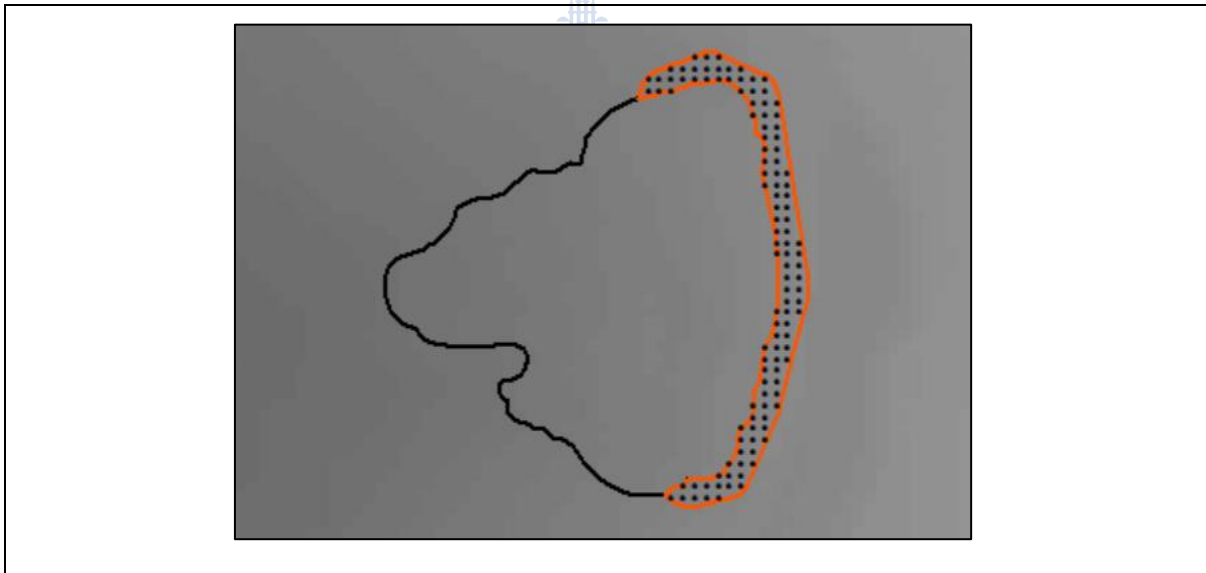
“Seed cell” kavramı bir bölgede oluşan heyelanların mekansal ve morfolojik oluşum koşullarını anlamak ve istatistiksel duyarlılık çalışmalarına kaynak oluşturmak amacıyla öne sürülmüş ve geliştirilmiştir (Süzen 2002, Süzen ve Doyuran 2004). “Seed cell” kavramı bir heyelanın duyarlılığını kaybetmeden önceki morfolojik koşulları heyelana en yakın henüz kaymamış aynı su toplama havzası içindeki alanlardan üretilebileceğini öne sürmektedir. Heyelan envanterinin etrafına atılan ve heyelan topuk alanını içermeyen bir tampon bölge “seed cell” üretim alanı olarak kullanılabilir. Tampon bölgenin genişliği ve uzunluğu çalışma özelinde değişebilmektedir. Proje kapsamında tampon bölge heyelanın alanı ile orantılandırılmış ve uzunluğu ile heyelan uzunluğunun taç bölgesindeki ilk üçte birlik bölgesi olarak tanımlanmıştır (Şekil 5.11).



Şekil 5.11. “Seed cell” Alanlarının Belirlenmesi İş Akışı

“Seed cell” alanlarının oluşturulmasında öncelikle 17.764 adet heyelan içerisinde alan büyüklüğü 1.000 m² ile 100.000 m² arasında olup malzeme tipi Moloz olmayan 7.600 adedi seçilmiştir. Seçilen heyelan alanları için Şekil 5.11’de gösterilen iş akışı doğrultusunda geliştirilen Phyton kodu ile her bir heyelanın içerisine düşen DEM verisi elde edilmiş, bu veri yüksekliklere göre 3 gruba ayrılmış, heyelanın taç bölgesindeki üçte birlik kısımda tampon bölge oluşturulmuştur.

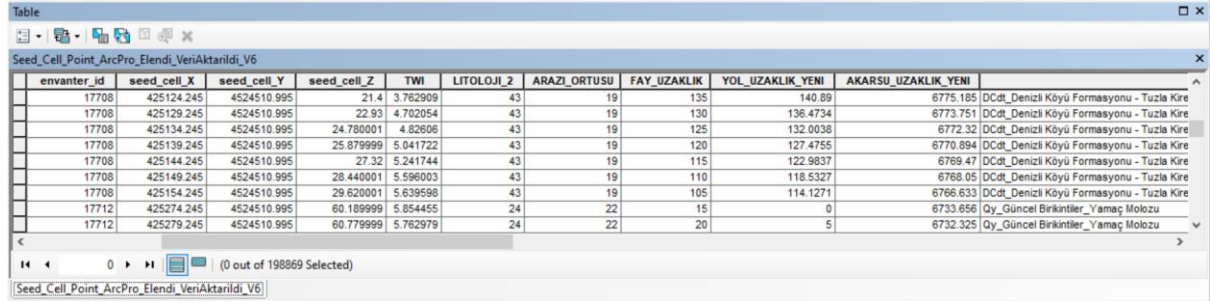
Oluşturulan tampon bölgeler (Seed cell) içerisinde altlık olarak kullanılan 5 metre çözünürlüklü DEM verisinin piksellerinin merkezine denk gelecek şekilde noktalar oluşturulmuştur (Şekil 5.12). Elde edilen noktaların ilgili heyelanın meydana geldiği su tutma havzasının dışında başka bir havzaya geçip geçmediği kontrol edilmiş ve bu durumdaki noktalar elimine edilmiştir.



Şekil 5.12. Heyelan Alanı, Seed Cell Alanı ve Noktaları

Seed cell alanları içerisindeki noktalara ilişkin olduğu heyelana ait ID numarası ve her bir parametre katmanının piksel değerleri aktarılmıştır (Şekil 5.13). Söz konusu noktalar

istatistiksel yöntemler ile duyarlılık analizi aşamasında eğitim seti ve test verisi olarak kullanılmak üzere hazırlanmıştır.



envanter_id	seed_cell_X	seed_cell_Y	seed_cell_Z	TWI	LİTOLOJİ_2	ARAZI_ORTUSU	FAY_UZAKLIK	YOL_UZAKLIK_YENİ	AKARSU_UZAKLIK_YENİ	
17708	425124.245	4524510.995	21.4	3.762909	43	19	135	140.89	6775.185	DCdt_Denizli Köyü Formasyonu - Tuzla Kire
17708	425129.245	4524510.995	22.93	4.702054	43	19	130	136.4734	6773.751	DCdt_Denizli Köyü Formasyonu - Tuzla Kire
17708	425134.245	4524510.995	24.780001	4.82606	43	19	125	132.0038	6772.32	DCdt_Denizli Köyü Formasyonu - Tuzla Kire
17708	425139.245	4524510.995	25.879999	5.041722	43	19	120	127.4755	6770.894	DCdt_Denizli Köyü Formasyonu - Tuzla Kire
17708	425144.245	4524510.995	27.32	5.241744	43	19	115	122.9837	6769.47	DCdt_Denizli Köyü Formasyonu - Tuzla Kire
17708	425149.245	4524510.995	28.440001	5.596003	43	19	110	118.5327	6768.05	DCdt_Denizli Köyü Formasyonu - Tuzla Kire
17708	425154.245	4524510.995	29.620001	5.639598	43	19	105	114.1271	6766.633	DCdt_Denizli Köyü Formasyonu - Tuzla Kire
17712	425274.245	4524510.995	60.189999	5.854455	24	22	15	0	6733.656	Qy_Güncel Birikintiler_Yamaç Molozu
17712	425279.245	4524510.995	60.779999	5.762979	24	22	20	5	6732.325	Qy_Güncel Birikintiler_Yamaç Molozu

Şekil 5.13. Parametre Katmanlarından Veri Aktarımı Yapılan Seed Cell Noktaları Öznitelik Tablosu

Uzman görüşüne dayalı yöntem kullanılarak duyarlılık haritasının üretilmesi aşaması için ise elde edilen verilerden her bir parametre bazında sınıfların belirlenmesi ve ağırlık puanlarının verilmesine yönelik hesaplamalar yapılmıştır.

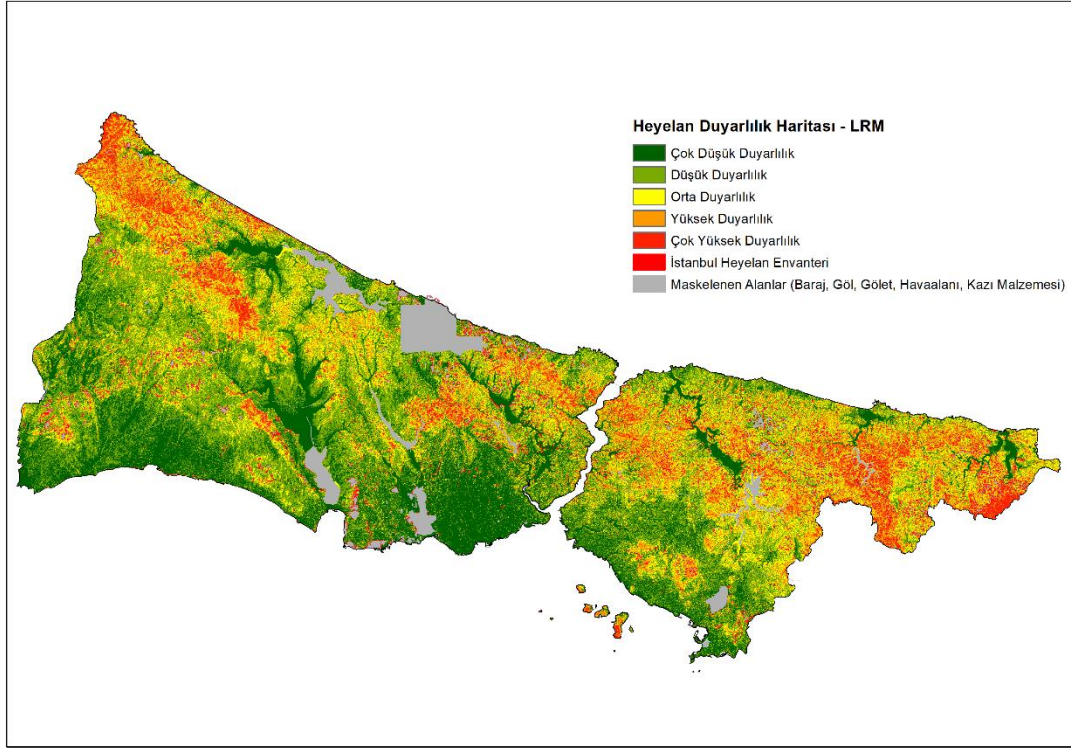
4.3.3. Çok Değişkenli İstatistiksel Analiz Yöntemleri ile Heyelan Duyarlılık Haritası Üretilmesi

4.3.3.1. İstanbul İli Bazında Hazırlanan Heyelan Duyarlılık Haritası

Duyarlılık haritalarının üretilmesi için istatistiksel analiz yöntemlerinden Lojistik Regresyon Modeli (LRM) kullanılmıştır. İlk etapta İstanbul il sınırları içerisindeki tüm alanlar için toplu bir duyarlılık analizi çalıştırılmıştır.

Ön hazırlık aşamasında elde edilen ve parametre bilgileri aktarılan yaklaşık 200.000 seed cell noktası, daha önce heyelan olmuş yerlerin temsiliyeti açısından pozitif örneklem olarak alınmıştır. İl sınırları içerisinde heyelan envanter alanları ve seed cell alanları haricindeki yerlere rastgele atılan aynı sayıdaki nokta ise negatif örneklem havuzunu oluşturmaktadır. Elde edilen noktaların %70'i eğitim veri seti, %30'u test veri seti olarak kullanılmıştır.

Proje kapsamında belirlenen duyarlılık parametrelerin tümünün kullanıldığı LRM yöntemi ile üretilen duyarlılık haritası Şekil 5.14'te sunulmaktadır.



Şekil 5.14. LRM Yöntemi ile Üretilen İstanbul İli Heyelan Duyarlılık Haritası



Yüksek duyarlılığa sahip alanlar ile heyelan envanter alanlarının karşılaştırmasını gösteren örnek alanlar Şekil 5.15'te verilmiştir. Heyelan envanter alanlarının büyük çoğunluğu çok yüksek ve yüksek duyarlılığa sahip alanlar üzerinde yer almaktadır.



Örnekleri

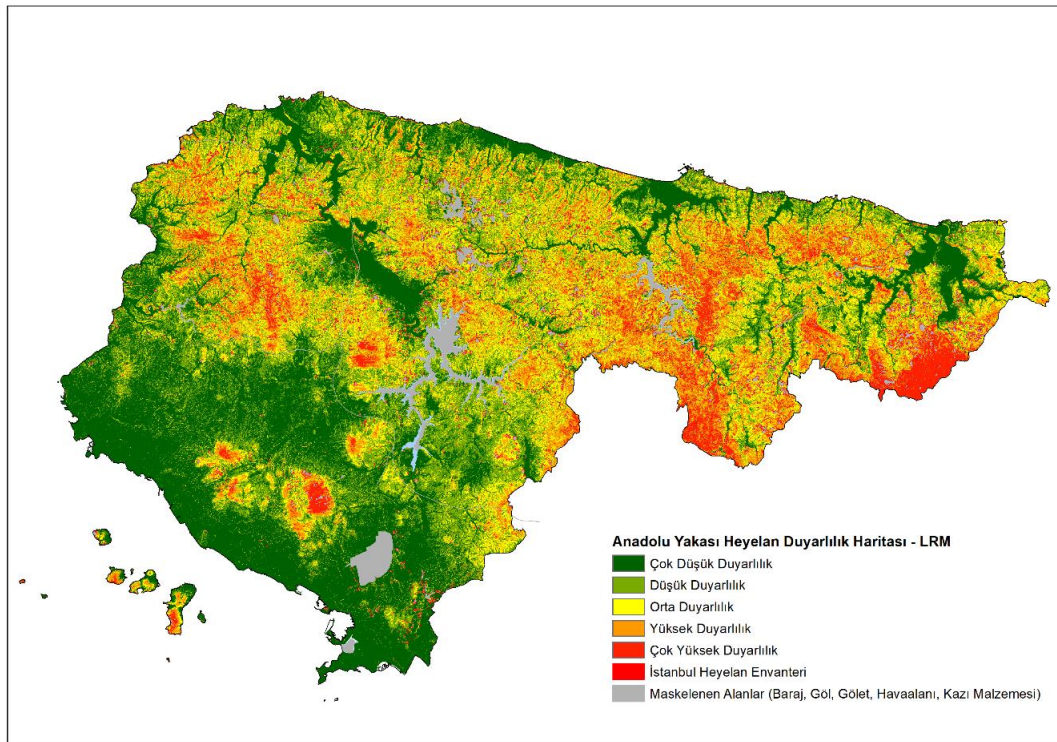


Şekil 5.16. LRM Analizi ROC Eğrisi ve Duyarlılık Haritası Histogramı

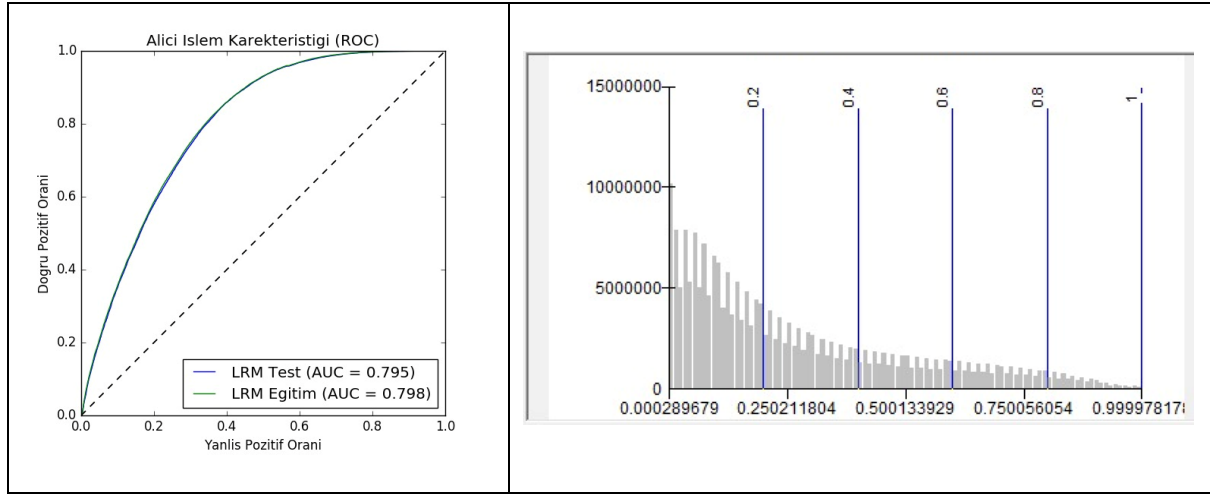
4.3.3.2. İstanbul İli Anadolu ve Avrupa Yakası Bazında Hazırlanan Heyelan Duyarlılık Haritaları

Proje çalışmaları kapsamında LRM yöntemi ile heyelan duyarlılık analizi İstanbul ili Anadolu ve Avrupa yakaları için ayrı olarak da çalıştırılmıştır. Hazırlık aşamasında elde edilen ve pozitif örneklem havuzunu oluşturan seed cell noktaları Anadolu ve Avrupa yakaları için ayrılmıştır. Seed cell alanları dışından da aynı sayılarda negatif örneklem noktaları rastgele olarak seçilmiştir. Bu durumda Anadolu yakası için 91.359, Avrupa yakası için ise 107.510 pozitif örnek nokta ile aynı sayılarda belirlenen negatif örnek nokta analizlerde kullanılmıştır.

Anadolu yakası için çalıştırılan LRM duyarlılık analizi sonucu Şekil 5.17’de, sonuca ilişkin ROC eğrisi ve histogram ise Şekil 5.18’de gösterilmektedir.

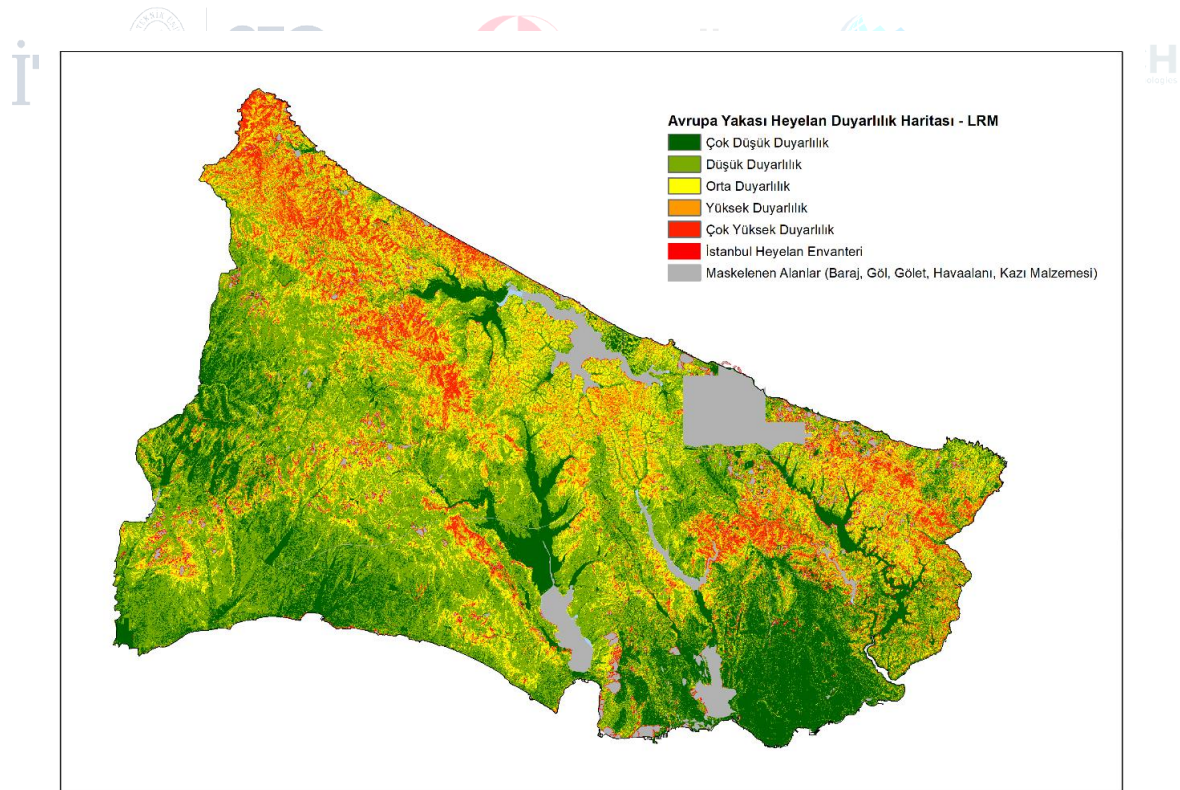


Şekil 5.17. LRM Yöntemi ile Üretilen İstanbul İli Anadolu Yakası Heyelan Duyarlılık Haritası

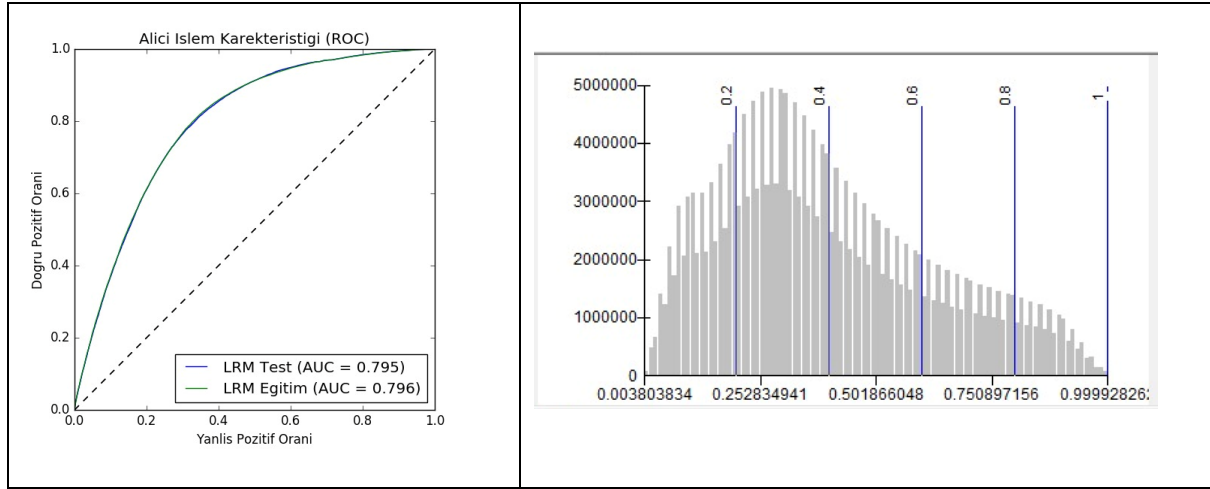


Şekil 5.18. LRM Analizi ROC Eğrisi ve Duyarlılık Haritası Histogramı (Anadolu Yakası)

Avrupa yakası için LRM yöntemi ile elde edilen duyarlılık analizi sonucu Şekil 5.19’da, sonuca ilişkin ROC eğrisi ve histogram ise Şekil 5.20’de yer almaktadır.



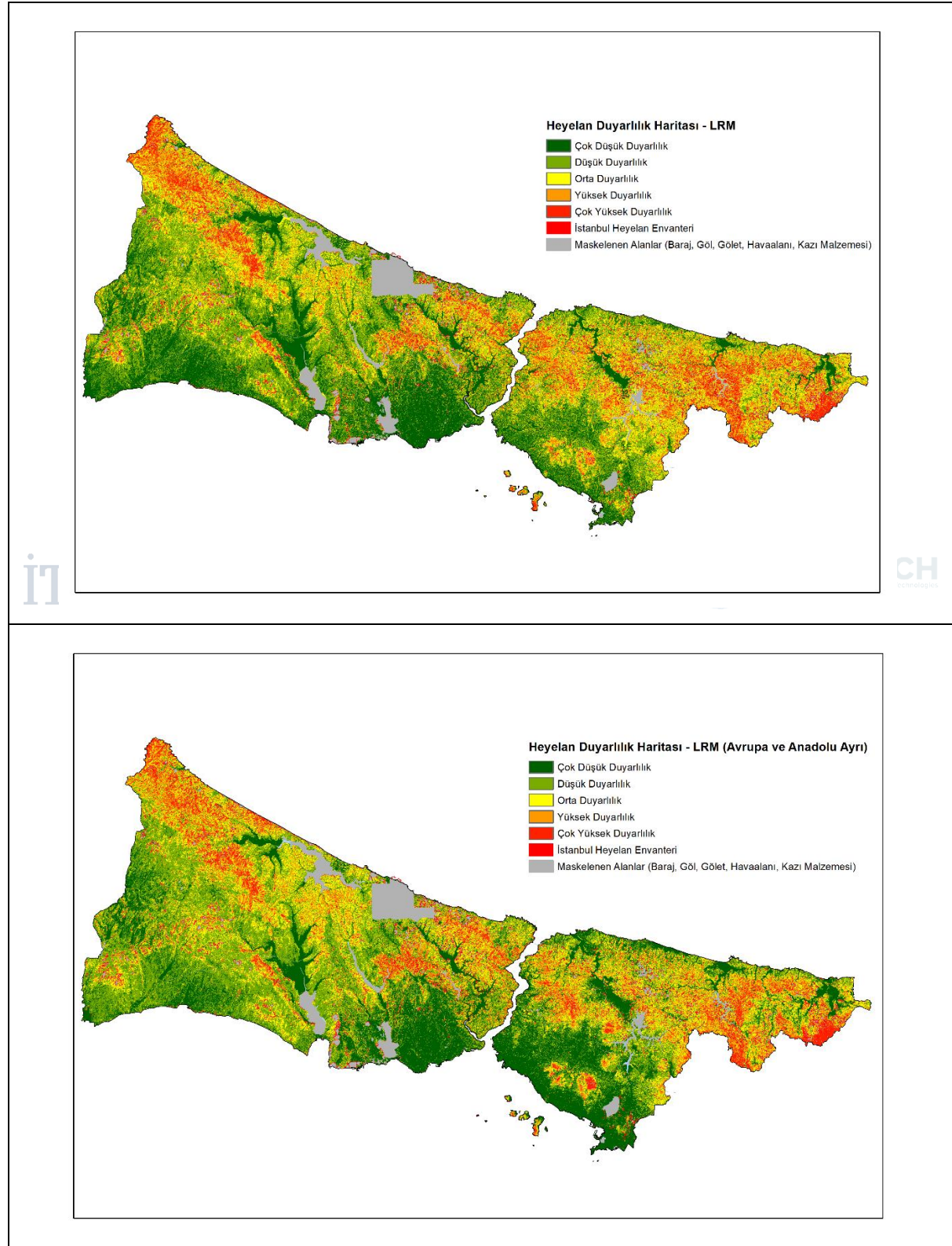
Şekil 5.19. LRM Yöntemi ile Üretilen İstanbul İli Avrupa Yakası Heyelan Duyarlılık Haritası



Şekil 5.20. LRM Analizi ROC Eğrisi ve Duyarlılık Haritası Histogramı (Avrupa Yakası)

Ayrı LRM analizleri çalıştırılarak elde edilen Anadolu ve Avrupa yakası duyarlılık haritalarının tek bir harita üzerinde gösterimi ile tüm İstanbul ili için LRM yöntemiyle elde edilen duyarlılık haritası farklılıklarının ortaya konulması amacıyla Şekil 5.21’de verilmiştir.





Şekil 5.21. İstanbul İl Sınırları Bazında LRM Yöntemi ile Hazırlanan Heyelan Duyarlılık Haritası (üstte) ile Anadolu ve Avrupa Yakaları için LRM Yöntemi ile Yapılan Ayrı Analizler Sonucu Hazırlanan Heyelan Duyarlılık Haritası (altta)

4.3.4. Uzman Görüşüne Dayalı Yöntemler ile Heyelan Duyarlılık Haritası Üretilmesi

Uzman görüşüne dayalı yöntemlerden Basit Toplamsal Ağırlıklandırma (SAW) ile heyelan duyarlılık haritası üretilmesine karar verilmiştir. Duyarlılık analizi için hangi parametrelerin kullanılacağı Proje Eş Yürütücüleri tarafından belirlenmiştir. Buna göre analizde litoloji, eğim, topoğrafik nemlilik indeksi, akarsulara uzaklık, DEM standart sapması ve bakı katmanları kullanılmıştır.

Parametre verilerinden kategorik olan litoloji için birim, arazi örtüsü için kullanım tipi ve bakı için yönler bazında heyelan sayıları, alansal yüzdeler ve seed cell alanları içerisindeki birim alanlarının yoğunlukları hesaplanmıştır. DEM standart sapması, eğim gibi sürekli veriler için ise seed cell noktalarındaki parametre değerleri Natural Breaks yöntemi ile sınıflara ayrılarak elde edilen sınıflar bazında yoğunluk ve benzeri hesaplar yapılmıştır. Bu çalışmalar, parametre sınıflarına verilecek ağırlıkların belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilmiştir.

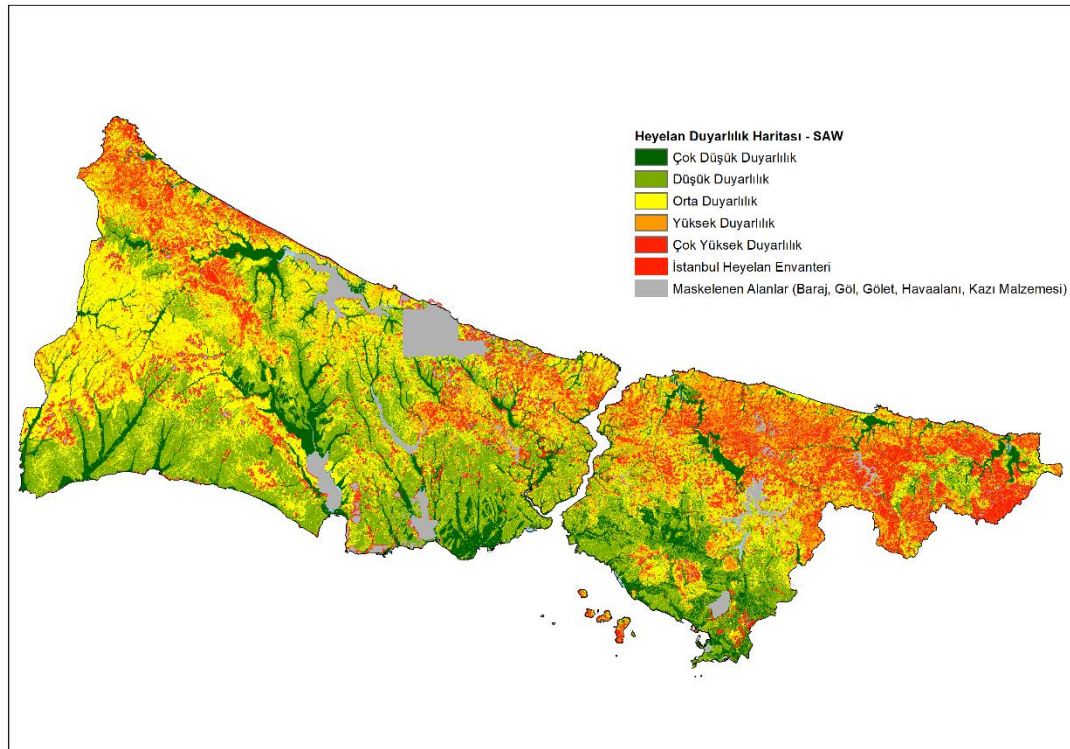
Söz konusu parametrelerin SAW analizi için kullanılan kendi ağırlıkları ve içerdikleri sınıflara atanan ağırlık puanları Tablo 5.2’de belirtilmiştir.

Tablo 5.2. SAW için Parametre Ağırlıkları

Parametreler	Parametre Ağırlığı	Sınıflar	Sınıf Ağırlıkları
Litoloji	0.35	Çok Yüksek	5
		Yüksek	4
		Orta	3
		Düşük	2
		Çok Düşük	1
Eğim	0.25	Çok Yüksek	5
		Yüksek	4
		Orta	3
		Düşük	2
		Çok Düşük	1
TWI	0.15	Çok Yüksek	5
		Yüksek	4
		Orta	3
		Düşük	2
		Çok Düşük	1
Akarsuya Uzaklık	0.10	Çok Yüksek	5
		Yüksek	4
		Orta	3
		Düşük	2

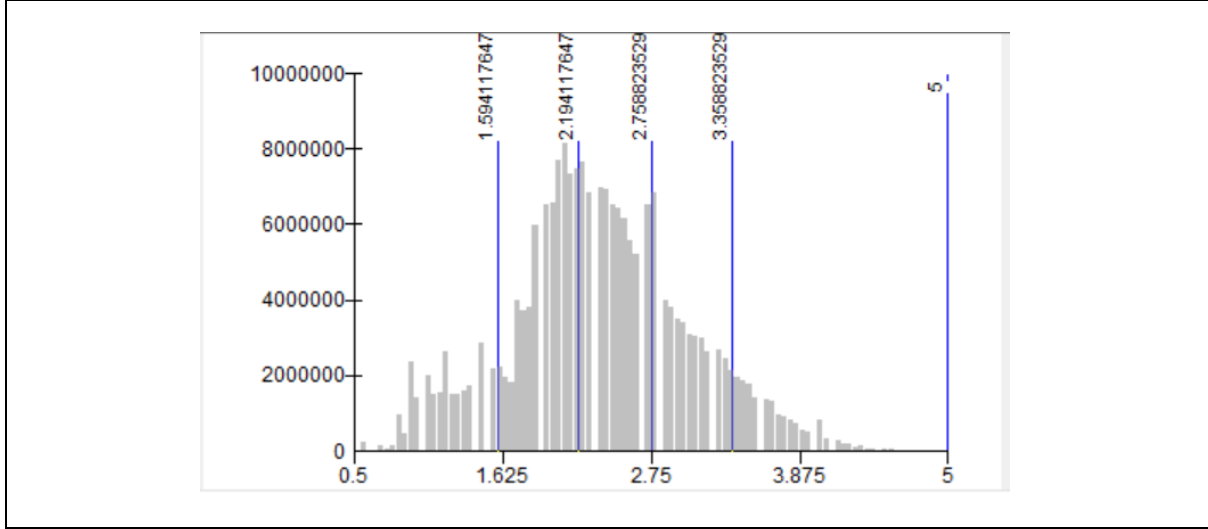
		Çok Düşük	1
DEM Standart Sapması	0.10	Çok Yüksek	5
		Yüksek	4
		Orta	3
		Düşük	2
		Çok Düşük	1
Bakı	0.05	Çok Yüksek	5
		Yüksek	4
		Orta	3
		Düşük	2
		Çok Düşük	1

SAW analizi sonucunda elde edilen heyelan duyarlılık haritası Şekil 5.22’de gösterilmektedir.



Şekil 5.22. SAW Yöntemi ile Üretilen İstanbul İli Heyelan Duyarlılık Haritası

SAW heyelan duyarlılık haritasına ait histogram Şekil 5.23’te yer almaktadır.



Şekil 5.23. SAW Duyarlılık Haritası Histogramı



6. Sonuç ve Değerlendirme

Proje kapsamında gerçekleştirilen çalışmalar sonucunda Lojistik Regresyon Modeli (LRM) kullanılarak Anadolu ve Avrupa yakası için ayrı ayrı üretilen heyelan duyarlılık haritaları değerlendirilmiş ve bu sonuçların diğer alternatif analiz sonuçlarına (il genelinde LRM ve Basit Toplamsal Ağırlıklandırma (SAW) ile üretilen duyarlılık haritaları) göre İstanbul ili heyelan duyarlılığını daha doğru temsil ettiği öngörülmüştür.

Bu bağlamda elde edilen heyelan duyarlılık haritasının duyarlılık sınıflarının her iki yaka ve il genelinde hem alansal olarak hem de bina bazlı değerlendirmeleri yapılmıştır.

Sonuç haritadaki duyarlılık sınıflarının alansal dağılımı incelendiğinde (Tablo 6.1), İstanbul il sınırının Anadolu yakası için yüksek ve çok yüksek duyarlılığa sahip alanların sırasıyla %15,8 ve %5,7'sine, Avrupa yakasında ise %11,1 ve %5,9'una karşılık geldiği belirlenmiştir. Buna karşılık heyelan duyarlılık haritası ile İstanbul Büyükşehir Belediyesi'nden sağlanan en güncel bina vektörü (2016'ya ait) karşılaştırıldığında Anadolu yakasında binaların yaklaşık %0,96'sı Avrupa yakasında ise %4,22'si bu iki sınıfa düşmektedir (Tablo 6.2).

Tablo 6.1. Lojistik Regresyon Modeli (LRM) ile elde edilen Anadolu ve Avrupa yakası duyarlılık sınıfı dağılımları.

Bölge	Duyarlılık Sınıfı	Açıklama	Alan (m ²)	Yüzde (%)
Anadolu	1	Çok Düşük	606.129.275	32,41
Anadolu	2	Düşük	451.578.300	24,15
Anadolu	3	Orta	409.495.925	21,90
Anadolu	4	Yüksek	296.288.250	15,80
Anadolu	5	Çok Yüksek	106.642.850	5,70
Avrupa	1	Çok Düşük	801.596.875	23,07
Avrupa	2	Düşük	1.358.214.350	39,09
Avrupa	3	Orta	719.831.350	20,72
Avrupa	4	Yüksek	387.172.100	11,10
Avrupa	5	Çok Yüksek	208.049.425	5,90

Tablo 6.2. Bina envanterine göre Avrupa ve Anadolu yakası için Lojistik Regresyon Modeli (LRM) ile elde edilen heyelan duyarlılık değerlendirmesi.

Bölge	LRM Sonucu (Majority)	Açıklama	Bina Sayısı	Yüzde (%)
Anadolu	1	Çok Düşük	378.027	75,41
Anadolu	2	Düşük	98.018	19,55
Anadolu	3	Orta	20.432	4,08
Anadolu	4	Yüksek	4.450	0,89
Anadolu	5	Çok Yüksek	354	0,07
Avrupa	1	Çok Düşük	445.997	52,75
Avrupa	2	Düşük	284.007	33,59
Avrupa	3	Orta	79.721	9,43
Avrupa	4	Yüksek	27.897	3,30
Avrupa	5	Çok Yüksek	7.812	0,92
İstanbul Geneli	1	Çok Düşük	824.024	61,19
İstanbul Geneli	2	Düşük	382.025	28,37
İstanbul Geneli	3	Orta	100.153	7,44
İstanbul Geneli	4	Yüksek	32.347	2,40
İstanbul Geneli	5	Çok Yüksek	8.166	0,61

Metropolitan alan içerisindeki yüksek ve çok yüksek duyarlılığa sahip alanların değerlendirilmesinde mevcut yerleşme olmayan ve yapılaşma olan bölgeler için farklı izleme ve mücadele yöntemleri gerekmektedir. Bu çalışmada tanımlanmış heyelanların her biri birer kaçınma zonu olarak dikkate alınması gerekliliğinden, heyelan envanteri duyarlılık çalışmalarında doğrudan çok yüksek duyarlılığa sahip sınıfa koyulmuştur. Mevcut yerleşim

alanlarında öncelikle InSAR gibi yöntemlerle bölgesel deformasyonların ortaya konulmasının ardından detay izleme çalışmalarının (örn. yersel veya havadan LiDAR, GPS vb.) yapılması, tespit edilen deformasyon alanlarında jeoteknik arazi temelli araştırmaların (örn. sondaj, inklinometre vb.) gerçekleştirilmesinin ardından gerekli önleyici tedbirler tasarlanmalıdır. Bunun yanı sıra, metropoliten alan içerisinde toplanan yağmur sularının yüzeyden akışları engellenmeli ve kontrollü bir şekilde su kütlelerine (deniz, göl, baraj vb.) ulaştırılmaları sağlanmalıdır.

Heyelan alanlarına kaçak olarak dökülen molozlar heyelanın aktivitesini değiştireceği için engellenmeli, heyelan alanları bu doğrultuda sürekli izlenmelidir. InSAR ve LiDAR çalışmaları belli bir tekrarlama periyodu (örn. mevsimsel, yıllık) içerisinde düzenli olarak tekrar etmelidir. Yoğun aktivite olan alanların (maden sahası, döküm sahaları gibi) ise izleme periyotlarının daha sık gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Yoğun antropojenik aktivitenin olduğu alanlar, taş ocakları, madencilik faaliyetlerinin bulunduğu ve büyük mühendislik projelerinin yapıldığı alanlar, heyelan envanterine dahil edilmiş ancak heyelan duyarlılık kapsamında değerlendirilmemiştir.

Henüz yerleşime açılmamış alanlar için ise planlama ve imar çalışmaları esnasında heyelana duyarlı alanların göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Mevcut arazi kullanımının değiştirilmesi söz konusu olacak ise değişim sonucunda heyelan duyarlılığının değişeceği unutulmamalıdır. Özellikle orman alanlarında LiDAR verileri kullanılarak varlığı tanımlanmış heyelanlar, her ne kadar eski veya kalıntı heyelanlar olsa da bu tip arazi kullanımı değişikliklerinin heyelanları aktif hale getirebileceği önemle değerlendirilmelidir. Bu nedenle İstanbul metropoliten alanı düzenli aralıklarla LiDAR ile taranmalı, heyelan envanterleri güncellenmeli ve bunlar ışığında varsa değişen parametrelerde haritalanmalı (örneğin, arazi kullanımı, topografya ile ilgili parametreler gibi) ve duyarlılık haritaları yeniden hazırlanmalıdır. Öte yandan LiDAR veri alımı beklenmeden saha gözlemleri ile tespit edilen yeni gelişmiş heyelanlar envantere girilmeli ve elde bulunan heyelan duyarlılık haritaları ile karşılaştırılmalı ve gerekiyorsa haritalar güncellenmelidir.

Referanslar

Arca, D., Kutoğlu Ş.H., 2017. Frekans Oranı Metodu ile Heyelan Duyarlılık Haritasının Üretilmesi, TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası, 16. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı, 3-6 Mayıs 2017, Ankara.

Ayalew L., Yamagishi H., Marui H., Kanno T., 2005. Landslides in sado island of Japan part II. GIS-based susceptibility mapping with comparisons of results from two methods and verifications, Engineering Geology, 81, 432–445.

Burns, W. J., & Madin, I. (2009). Protocol for inventory mapping of landslide deposits from light detection and ranging (LiDAR) imagery.

Burns, W. J., Mickelson, K. A., & Madin, I. (2016). Landslide susceptibility overview map of Oregon. Oregon Department of Geology and Mineral Industries.

Caniani, D., Pascale, S., Sdao, F. ve Sole, A., 2008. Neural networks and landslide susceptibility: a case study of the urban area of Potenza, Natural Hazards, 45, 55–72.

CHIBA, T., SUZUKI, Y., & HIRAMATSU, T. (2007). Digital terrain representation methods and red relief image map, a new visualization approach. Map, Journal of the Japan Cartographers Association, 45(1), 27-36.

Chiba, T., Kaneta, S. I., & Suzuki, Y. (2008). Red relief image map: new visualization method for three dimensional data. The international archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences, 37(B2), 1071-1076.

Cruden, D. M., Varnes, D. J., & Turner, A. K. (1996). Landslides: investigation and mitigation.

Çan, T., Duman, T. Y., Olgun, Ş., Çörekçioğlu, Ş., Karakaya-Gülmez, F., Elmacı, H., ... & Emre, Ö. (2013). Türkiye Heyelan Veri Tabanı. TMMOB Coğrafi Bilgi Sistemleri Kongresi.

Dağdeviren, M., Akay, D., Kurt, M. (2004). İş Değerlendirme Sürecinde Analitik Hiyerarşi Prosesi ve Uygulaması.

Dai F.C., Lee C.F., Li J., Xu Z.W., 2001. Assessment of landslide susceptibility on the natural terrain of Lantau Island, Hong Kong, Environmental Geology, Volume 40, Number 3, 381-391.

Dai F.C., Lee C.F., 2002. Landslide characteristics and slope instability modeling using GIS, Lantau Island, Hong Kong. Geomorphology, 42, 213-228.

Demir, G., 2011. Kuzey Anadolu Fayı Üzerinde Niksar-Suşehri Arasındaki Alanın CBS Tabanlı Heyelan Duyarlılık Analizi, Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon.

DIKAU, R. A. (1996). Landslide recognition: identification, movement and causes (Vol. 1). Wiley-Blackwell.

Duman T.Y, Kecer M., Ateş S., Emre O., Gedik I., Karakaya F., Durmaz S., Olgun S., Sahin H., Gökmenoğlu O. (2004) İstanbul Metropolü Batısındaki (Küçükçekmece-Silivri-Çatalca yöresi) Kentsel Gelişme Alanlarının Yer Bilim Verileri, MTA Özel Yayınları No: 3, s 249 (Ankara).

Duman, T. Y., H. A. Nefeslioğlu, T. Çan, Ş. Ateş, S. Durmaz, Ş. Olgun, S. Hamzaçebi, and M. Keçer (2006). "Türkiye Heyelan Envanteri Haritası-1: 500.000 ölçekli İstanbul Paftası." Ankara: MTA Özel Yayınlar Serisi-6.

Gökçeoğlu,C. ve Ercanoğlu, M., 2001. Heyelan duyarlılık haritalarının hazırlanmasında kullanılan parametrelere ilişkin belirsizlikler, *Yerbilimleri*, 23, 189-206.

Görüm, T., 2006. Coğrafi Bilgi Sistemi ve İstatistiksel Yöntemler Kullanılarak Heyelan Duyarlılık Analizi: Melen Boğazı ve Yakın Çevresi, Yüksek Lisans Tezi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Coğrafya Anabilim Dalı, İstanbul Üniversitesi, İstanbul.

Görüm, T. (2019). Landslide recognition and mapping in a mixed forest environment from airborne LiDAR data. *Engineering Geology*, 258, 105155.

Görüm, T., & Fidan, S. (2021). Spatiotemporal variations of fatal landslides in Turkey. *Landslides*, 18(5), 1691-1705.

Guzzetti, F., Mondini, A. C., Cardinali, M., Fiorucci, F., Santangelo, M., & Chang, K. T. (2012). Landslide inventory maps: New tools for an old problem. *Earth-Science Reviews*, 112(1-2), 42-66.

Kamp, U., Growley B. J., Khattak, G. A. ve Owen, L. A., 2008. GIS-based landslide susceptibility mapping for the 2005 Kashmir earthquake region, *Geomorphology*, 101, 631–642

Luzi, L. ve Pergalani, F., 1999. Slope Instability in Static and Dynamic Conditions for Urban Planning: The “Oltre Po Pavese” Case History (Region Lombardia-Italy), *National Hazard*, 20, 57-82.

McCalpin, J.P., 1984. *Paleoseismology*, Academic Press, New York. 629 pp.

Öztürk K., 2002. Heyelanlar ve Türkiyeye Etkileri. *Gazi Eğitim Fakültesi Dergisi* Cilt 22, Sayı 2 s:35-50.

Perotto-Baldiviezo, H. L., Thurow, T. L., Smith, C. T., Fisher, R. F. ve Wu, X. B., 2004. GIS-Based Spatial Analysis and Modeling for Landslide Hazard Assessment in Steeplands, Southern Honduras, Agriculture, Ecosystems & Environment, 103,1, 165-176.

Petschko, H., Bell, R., & Glade, T. (2016). Effectiveness of visually analyzing LiDAR DTM derivatives for earth and debris slide inventory mapping for statistical susceptibility modeling. Landslides, 13(5), 857-872.

Pradhan, B. ve Lee, S., 2010. Landslide susceptibility assessment and factor effect analysis: backpropagation artificial neural networks and their comparison with frequency ratio and bivariate logistic regression modeling, Environmental Modelling & Software, 25, 747–759

Pradhan, B., 2010. Remote sensing and GIS-based landslide hazard analysis and crossvalidation using multivariate logistic regression model on three test areas in Malaysia, Advances in Space Research, 45, 1244–1256

Putra, D. W. T., Punggara, A. A. (2018). Comparison Analysis of Simple Additive Weighting (SAW) and Weighed Product (WP) In Decision Support Systems.

Qin. C.Z., Zhu. A.X., Pei. T., B.L., Scholten. T., Behrens T., 2011. An approach to computing topographic wetness index based on maximum downslope gradient, Precision Agriculture. 12(1) (2011) 32-43.

Razak, K. A., Straatsma, M. W., Van Westen, C.J., Malet, J. P., & De Jong, S. M. (2011). Airborne laser scanning of forested landslides characterization: Terrain model quality and visualization. Geomorphology, 126(1-2), 186-200.

Riley, S. J., DeGloria, S. D., & Elliot, R. (1999). Index that quantifies topographic heterogeneity. intermountain Journal of sciences, 5(1-4), 23-27.

Sidle, R., & Ochiai, H. (2006). Processes, prediction, and land use. Water resources monograph. American Geophysical Union, Washington.

Slaughter, S. L., Burns, W. J., Mickelson, K. A., Jacobacci, K. E., Biel, A., & Contreras, T. A. (2017). Protocol for landslide inventory mapping 42 from lidar data in Washington State. Washington Geological Survey Bulletin, 82, 1-27.

Süzen, M.L., 2002. Data Driven Landslide Hazard Assessment Using Geographical Information System and Remote Sensing, Ph.D. Thesis, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Geo. Eng. Dept, METU, Ankara.

Süzen, M. L., & Doyuran, V. (2004). Data driven bivariate landslide susceptibility assessment using geographical information systems: a method and application to Asarsuyu catchment, Turkey. Engineering Geology, 71(3-4), 303-321

Vivas L., 1992. los andes venezolanos. academia nacional de la historia, Caracas

Varnes D. J. (1978) Slope movement types and processes. In: Schuster RL, Krizek RJ (eds), Landslides analysis and control, special report, vol 176. Transportation Research Board, National Academy of Sciences, New York, pp 12-33.

Varnes, D. J., & Cruden, D. M. (1996). Landslide types and processes. Landslides: investigation and mitigation, Transportation Research Board special report, 247.

Wachal, D. J. ve Hudak, P. F., 2000. Mapping landslide susceptibility in Travis County, Texas, USA, GeoJournal, 51 (3), 245-253.

Wang W.D., Xie C.M., Du X. G., 2009. Landslides susceptibility mapping based on geographical information system, guizhou, south-west china, Environmental Geology, 58, 33-43.

Yokoyama, R., Shirasawa, M., & Pike, R. J. (2002). Visualizing topography by openness: a new application of image processing to digital elevation models. Photogrammetric engineering and remote sensing, 68(3), 257- 266.

