ERZURUM ABDURRAHMAN GAZİ TÜRBESİ VE ÇEVRESİNDEKİ ZEMİN STABİLTESİNİN TÜMLEŞİK JEOFİZİK YÖNTEMLER İLE İNCELENMESİ

Mücahit KARAKÜTÜK

Danışman: Doç. Dr. Çağlar ÖZER

Yüksek Lisans Tezi

Jeoloji Mühendisliği Ana Bilim Dalı

2026

(Her hakkı saklıdır.)

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
JEOLOJİ MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

ERZURUM ABDURRAHMAN GAZİ TÜRBESİ VE ÇEVRESİNDEKİ ZEMİN STABİLTESİNİN TÜMLEŞİK JEOFİZİK YÖNTEMLER İLE İNCELENMESİ

(Investigation of Soil Stability in Erzurum Abdurrahman Gazi Tomb and Its Surroundings Using Integrated Geophysical Methods)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mücahit KARAKÜTÜK

Danışman: Doç. Dr. Çağlar ÖZER
İkinci Tez Danışmanı: Doç. Dr. Eren PAMUK

Erzurum
Ocak, 2026

KABUL VE ONAY TUTANAĞI

Mücahit KARAKÜTÜK tarafından hazırlanan "Erzurum Abdurrahman Gazi Türbesi ve Çevresindeki Zemin Stabiltesinin Tümleşik Jeofizik Yöntemler İle İncelenmesi" başlıklı çalışması 07 / 01 / 2026 tarihinde yapılan tez savunma sınavı sonucunda başarılı bulunarak jürimiz tarafından Jeoloji Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Jeoloji Mühendisliği Bilim Dalında yüksek lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı:	Prof. Dr. Aydın BÜYÜKSARAÇ *Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi*	Aslı ıslak imzalıdır
Danışman:	Doç. Dr. Çağlar ÖZER *Atatürk Üniversitesi*	Aslı ıslak imzalıdır
Jüri Üyesi:	Doç. Dr. Erdem BAYRAK *Atatürk Üniversitesi*	Aslı ıslak imzalıdır
Jüri Üyesi:	Dr. Öğretim Üyesi Kaan Hakan ÇOBAN *Karadeniz Teknik Üniversitesi*	Aslı ıslak imzalıdır
İkinci Tez Danışmanı:	Doç. Dr. Eren PAMUK *Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi*	Aslı ıslak imzalıdır

Enstitü Yönetim Kurulunun …./…/…. tarih ve …… sayılı kararı.

Bu tezin Atatürk Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili maddelerinde belirtilen şartları yerine getirdiğini onaylarım.

Prof. Dr. Alper NUHOĞLU

Enstitü Müdürü

Aslı ıslak imzalıdır

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildiriş, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU

Yüksek Lisans Tezi olarak Doç. Dr. Çağlar Özer danışmanlığında sunulan "Erzurum Abdurrahman Gazi Türbesi ve Çevresindeki Zemin Stabiltesinin Tümleşik Jeofizik Yöntemler İle İncelenmesi " başlıklı çalışmanın tarafımızdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını, yararlanılan eserlerin kaynakçada gösterildiğini, Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından belirlenmiş olan Turnitin Programı benzerlik oranlarının aşılmadığını ve aşağıdaki oranlarda olduğunu beyan ederiz.

Tez Bölümleri	**Tezin Benzerlik Oranı (%)**	**Maksimum Oran (%)**
Giriş	*1*	**30**
Kuramsal Temeller	*2*	**30**
Materyal ve Yöntem	*20*	**35**
Araştırma Bulguları ve Tartışma	*6*	**20**
Sonuç ve Öneriler	*0*	**20**
Tezin Geneli	*11*	**25**

Not: *Yedi kelimeye kadar benzerlikler ile Başlık, Kaynakça, İçindekiler, Teşekkür, Dizin ve Ekler kısımları tarama dışı bırakılabilir. Yukarıdaki azami benzerlik oranları yanında tek bir kaynaktan olan benzerlik oranlarının* ***%5'den*** *büyük olmaması gerekir.*

Beyan edilen bilgilerin doğru olduğunu, aksi halde doğacak hukuki sorumlulukları kabul ve beyan ederiz.

Tez Yazarı (Öğrenci)	**Tez Danışmanı**
Mücahit Karakütük	Doç. Dr. Çağlar Özer
14.1.2026	**14.1.2026**
İmza: Aslı ıslak imzalıdır	İmza: Aslı ıslak imzalıdır

***** Tez ile ilgili YÖKTEZ'de yayınlamasına ilişkin bir engelleme var ise aşağıdaki alanı doldurunuz.

☐ Tezle ilgili patent başvurusu yapılması / patent alma sürecinin devam etmesi sebebiyle Enstitü Yönetim Kurulunun …./…/…. tarih ve ……. sayılı kararı ile teze erişim 2 (iki) yıl süreyle engellenmiştir.

☐ Enstitü Yönetim Kurulunun …./…/…. tarih ve ……. sayılı kararı ile teze erişim 6 (altı) ay süreyle engellenmiştir.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans çalışmam sürecinde, tez konumun belirlenmesinden arazi çalışmalarının tamamlanmasına kadar her aşamada desteklerini esirgemeyen danışman hocam **Doç. Dr. Çağlar ÖZER**'e ve eş danışmanım **Doç. Dr. Eren PAMUK**'a içtenlikle teşekkür ederim.

Arazi çalışmalarımın gerçekleştirilmesi için gerekli çalışma izinlerini sağlayarak araştırmamın yürütülmesine olanak sunan **Erzurum Büyükşehir Belediyesi** yönetimine teşekkür ederim. Tez çalışmasında kullanılan cihaz ve ekipman desteği için **Getatekno Zemin Laboratuvarı**'na, **Getatekno Zemin Mühendisliği** personellerine ve Jeofizik Mühendisi Ali Albak'a süreç boyunca teknik yardım ve destekleri için minnettarım.

Bu sürecin en büyük manevi destekçisi olan ve sabrı, anlayışı, her daim yanımda oluşu ile kıymetli eşim **Şeyma Hülya KARAKÜTÜK**'e ve hayatımın en değerli varlığı olan oğlum **Ömer UĞUR KARAKÜTÜK**'e teşekkür ederim.

Mücahit KARAKÜTÜK

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ERZURUM ABDURRAHMAN GAZİ TÜRBESI VE ÇEVRESİNDEKİ ZEMİN STABİLİTESİNİN TÜMLEŞİK JEOFİZİK YÖNTEMLER İLE İNCELENMESİ

Mücahit KARAKÜTÜK

Danışman: Doç. Dr. Çağlar ÖZER
İkinci Tez Danışmanı: Doç. Dr. Eren PAMUK

Amaç: Bu çalışmanın amacı, Erzurum ili Palandöken ilçesinde yer alan Abdurrahman Gazi Türbesi ve çevresinin zemin özelliklerini bütüncül jeofizik yöntemler kullanarak incelemek, zemin davranışını etkileyen zayıf birimleri belirlemek ve bölgede oluşabilecek potansiyel kayma yüzeyi tehlikelerini ortaya koymaktır. Tarihi ve kültürel öneme sahip yapının uzun vadeli korunmasına yönelik olarak, yerel zemin dinamiklerinin güvenilir ve detaylı biçimde değerlendirilmesi hedeflenmiştir.

Yöntem: Araştırmada dört temel jeofizik yöntem uygulanmıştır: Sismik P-Kırılma, Çok Kanallı Yüzey Dalgası Analizi (MASW), Tek istasyon Mikrotremör (HVSR) ve Elektrik Rezistivite Tomografisi (ERT). Sismik kırılma verileri ile tabaka kalınlıkları ve P-dalga hızları elde edilmiştir. MASW yöntemi ile zeminin kesme dalgası hız profilleri ve Vs_{30} değerleri hesaplanmıştır. Mikrotremör ölçümleri zeminin hâkim periyodu ve büyütme faktörü özelliklerinin belirlenmesini sağlamıştır. ERT kesitleri, zemin içindeki düşük özdirençli, suya doygun zonlar ile muhtemel kayma yüzeylerinin tespitinde kullanılmıştır. Tüm yöntemler birlikte yorumlanarak bölgeye ilişkin bilgi edinilmiştir.

Bulgular: Elde edilen veriler, yüzey ile temel kayaçlar arasında değişen kalınlıklarda zayıf zemin birimlerinin bulunduğunu ve çalışma alanının bazı bölümlerinde suya doygun seviyelerin geliştiğini göstermektedir. MASW yönteminden hesaplanan Vs_{30} değerleri, türbe çevresindeki zeminin düşük sismik hızlı sınıflar tarafından temsil edildiğini ortaya koymuştur. Mikrotremör sonuçlarına göre, bölgenin hâkim periyot ve zemin büyütme faktörü değerleri bölgedeki zemin özelliklerinin yerel sismik davranış açısından farklılık gösterdiğini ortaya koymaktadır. ERT kesitlerinde belirlenen düşük özdirençli zonlar, olası kayma yüzeyleri ile uyumlu bir dağılım göstermiştir. Topoğrafik eğimin yüksek olduğu alanlarda zemin birimlerinin süreksizlik gösterdiği gözlemlenmiştir.

Sonuç: Çalışma, Abdurrahman Gazi Türbesi çevresinde zemin stabilitesinin yerel jeolojik koşullar, topoğrafya ve suya doygun birimler tarafından etkilendiğini ortaya koymaktadır. Elde edilen jeofizik bulgular, bölgedeki olası kayma yüzeylerinin mevcut ERT kesitlerinde detaylandırılmadığını ve özellikle türbenin kuzey ve kuzeybatı yönlerinde daha detaylı mühendislik çalışmalarına ihtiyaç duyulduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Abdurrahman Gazi Türbesi, MASW, Mikrotremör, Elektrik Rezistivite Tomografisi, Sismik Kırılma, Zemin Stabilitesi, Heyelan.

Ocak 2026, 152 sayfa

ABSTRACT

MASTER THESIS

INVESTIGATION OF SOIL STABILITY IN ERZURUM ABDURRAHMAN GAZI TOMB AND ITS SURROUNDINGS USING INTEGRATED GEOPHYSICAL METHODS

Mücahit KARAKÜTÜK

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Çağlar ÖZER
Co-supervisor: Assoc. Prof. Dr. Eren PAMUK.

Purpose: The aim of this study is to examine the soil properties around the Abdurrahman Gazi Tomb, located in the Palandöken district of Erzurum, using integrated geophysical methods; to identify weak units affecting soil behavior; and to reveal potential slip-surface hazards that may develop in the area. The study also aims to reliably evaluate local soil dynamics for the long-term preservation of this historically and culturally significant structure.

Method: Four primary geophysical methods were applied in the research: Seismic Refraction, Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW), Microtremor, and Electrical Resistivity Tomography (ERT). Seismic refraction data provided layer thicknesses and P-wave velocities. MASW identified shear-wave velocity profiles and Vs_{30} values of the soil. Microtremor measurements allowed the determination of the dominant soil period and soil amplification characteristics. ERT sections were used to detect low-resistivity, water-saturated zones and potential slip surfaces. All methods were jointly interpreted to obtain detailed information about the study area.

Findings: The obtained data indicate the presence of weak soil units of varying thickness between the surface and basement rocks, and that water-saturated levels have developed in some parts of the study area. Vs_{30} values calculated from the MASW method revealed that the ground around the tomb is represented by low seismic velocity classes. Microtremor results indicate that the dominant period and ground amplification factor values of the region reveal that the ground properties in the region differ in terms of local seismic response. The low resistivity zones identified in the ERT sections exhibit a distribution consistent with possible slip surfaces. Discontinuities in the soil units were observed in areas with high topographic slopes.

Results: The study reveals that soil stability around the Abdurrahman Gazi Tomb is influenced by local geological conditions, topography, and water-saturated units. The geophysical data obtained indicate that potential slip surfaces in the region are not detailed in existing maps and that more detailed engineering studies are needed, especially to the north and northwest of the tomb. The integrated use of geophysical methods provides reliable information that contributes both to the preservation of the historical structure and to land-use planning.

Keywords: Abdurrahman Gazi Tomb, MASW, Microtremor, Electrical Resistivity Tomography, Seismic Refraction, Soil Stability, Landslide.

January 2026, 152 pages

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY TUTANAĞI i
ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU ii
TEŞEKKÜR iii
ÖZET iv
ABSTRACT v
İÇİNDEKİLER vi
TABLOLAR DİZİNİ viii
ŞEKİLLER DİZİNİ ix
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ xi
GİRİŞ 1
Çalışmanın Amacı 1
Kullanılan Jeofizik Yöntemler 1
Çalışmanın Önemi 2
KURAMSAL TEMELLER 4
Literatür Taraması 4
Ülkemizde Zemin Stabilitesi ve Jeoteknik Problemlerde Tümleşik Jeofizik Çalışmaları 4
Erzurum ve Çevresinde Yürütülen Yerbilimsel Çalışmalar 10
Çalışma Alanının Tanımı 16
Abdurrahman Gazi Türbesi'nin Tarihçesi ve Önemi 16
Çalışma Alanının Topografik ve Jeolojik Özellikleri 17
Gizemli Yolun Tanımı ve Yerleşimi 25
MATERYAL VE YÖNTEM 31
Kullanılan Yöntemler ve Veri Toplama 31
Sismik P-Kırılma Yöntemi 31
Çok Kanallı Yüzey Dalgası Analiz Yöntemi (MASW) 33
Zeminin Dinamik ve Elastik Parametreleri 35
Mikrotremör Yöntemi 38
Yatay/Düşey Spektral Oran (HVSR) Yöntemi 39
Elektrik Rezistivite Tomografi (ERT) Yöntemi 40
ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA 49
Sismik P-Kırılma Verilerinin Değerlendirilmesi 49
Çok Kanallı Yüzey Dalgası Analizi (MASW) Verilerinin Değerlendirilmesi 52
Mikrotremör Verilerinin Değerlendirilmesi 60

Elektrik Rezistivite Tomografi (ERT) Verilerinin Değerlendirilmesi 65
Uygulanan Jeofizik Metotları ile elde edilen bulguların korelasyonu 71
SONUÇ VE ÖNERİLER 73
KAYNAKLAR 75
EKLER 82
EK 1. Sismik Kırılma (P-Kırılma) 82
EK 2. MASW 1D 93
EK 3. MASW 2D 104
EK 4. MİKROTREMÖR 115
ÖZGEÇMİŞ 138

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 1. Çalışma Alanına Ait Sınır Koordinatlar (UTM WGS 84 37 ZON) 18
Tablo 2. Vp/Vs Oranına Göre Zemin Durumu (Ercan, 2001). 35
Tablo 3. Dinamik Elastisite Modülüne Göre Zemin Sınıflaması (Bowles, 1986). 36
Tablo 4. Kayma Modülü Değerinde Göre Zemin ya da Kayaçların Durumu (Keçeli,1990) .. 36
Tablo 5. Bulk Modülü Değerlerine Göre Zemin ya da Kayaçların Dayanımı (Keçeli,1990) . 37
Tablo 6. Poisson Oranı Sınıflaması ve Zemin Sıkılığı (Ercan, 2001) 37
Tablo 7. Zemin Birimlerinin Yoğunluk Sınıflaması (Keçeli,1990) 38
Tablo 8. ERT ölçülerinde kullanılan başlıca elektrod dizilimleri (Candansayar, 2016) 42
Tablo 9. Arazi çalışmalarına ait yapılan çalışmalara ait sayılar ve arazi bilgileri 42
Tablo 10. İnceleme Alanı Sismik P-Kırılma ve MASW Ölçüm Koordinatları 50
Tablo 11. Tez çalışma alanı için MASW ve sismik -P kırılma yöntemleri ile hesaplanan Zeminin Dinamik ve Elastik Parametreleri 53
Tablo 12. MASW Yönteminden Elde Edilen Vs_{30} Hızları 55
Tablo 13. Mikrotremör Arazi Ölçüm Koordinatları 61
Tablo 14. Mikrotremör çalışmalarından elde edilen Zemin Hakim Periyodu ve Büyütme Değerleri 62
Tablo 15. Elektrik Rezistivite Tomografi (ERT) profillerinin orta noktalarının koordinatları 66

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Abdurrahman Gazi Türbesi genel görünüm 16
Şekil 2. Çalışma Alanına Ait Sınır Noktaları 18
Şekil 3. Çalışma alan sınırı (Google Earth, 2025) 19
Şekil 4. Çalışma alanı topografya gösterimi (Google Earth) 19
Şekil 5. Abdurrahman Gazi Türbesi ve çevresinin 2B'lu ve 3B'lu Topoğrafyası 20
Şekil 6. İnceleme Alanı ve Çevresinin Genel Jeoloji Haritası a) MTA Yerbilimleri 1/500.000 (URL-3), b) i46 pafta 1/100.000 (MTA,1988) 22
Şekil 7. İnceleme alanın EDFZ'a olan uzaklığı. Kırmızı çizgiler fay bilgilerini temsil etmektedir (diri faylar Emre vd., 2013'den alınmıştır). 25
Şekil 8. Gizemli Yolun Çalışma Alanı İçerisindeki Görünümü (sarı çizgi ile) 26
Şekil 9. Erzurum'da bulunanGizemli Yol'dan bir görünüm 27
Şekil 10. Kanada Gizemli Yol (URL-4) 28
Şekil 11. ABD Pensilvanya Gizemli Yol (URL-5) 29
Şekil 12. Hindistan Gizemli Yol (URL-6) 29
Şekil 13. İskoçya Gizemli Yol (URL-7) 30
Şekil 14. Sismik dalgaların yer içerisindeki temsili yayınım yolları 31
Şekil 15. Bir katman sınırına gelen ışının kırılması ve yansıması (Çıvgın, 2019'dan değiştirilerek alınmıştır.) 33
Şekil 16. Aktif kaynaklı MASW yöntemi verileri için yüzey dalgası analizi adımları (Gürel, 2024). 34
Şekil 17. Nakamura (1989) tarafından önerilen H/V yöntemini temsil eden basit bir yer modeli (Tekebaş, 2022) 39
Şekil 18. Yarı sonsuz ortam içindeki akım ve potansiyel çizgileri (Van Nostrand ve Cook, 1966) 41
Şekil 19. Pickwin modülü genel çalışma akış şeması (Şenkaya, 2009) 43
Şekil 20. Masw-1 profilinin 2B'lu ölçü geometrisi (1'er jeofon atlanarak atışlar gerçekleştirilmiştir.) 44
Şekil 21. Masw-1 profili için elde edilen dispersiyon eğrileri (devamlı çizgileri dispersiyon eğrilerini, Kesikli çizgiler ve siyah halkalar sinyal/gürültü oranını göstermektedir) 44
Şekil 22. Masw-1 profili için 1B'lu başlangıç modellerinin enterpolasyonu ile elde edilen 2B'lu Vs-derinlik kesiti 45
Şekil 23. Veri işlem akış şeması (Nakamura Yöntemi, H/V) (Beker, 2013) 46

Şekil 24. M-1 noktasına ait ham data kaydı. 47
Şekil 25. M-1 noktasına ait pencere secimi. 47
Şekil 26. M-1 noktasına ait H/V spektrumu ve hakim frekansı 47
Şekil 27. Sismik P-Kırılma ve MASW profillerinin orta noktalarının lokasyonları 49
Şekil 28. Sismik kırılma-1 ölçümü P- dalga hızı yol-zaman grafiği ve yeraltı modeli 51
Şekil 29. Sismik kırılma-2 ölçümü P dalga hızı yol-zaman grafiği ve yeraltı modeli 52
Şekil 30. MASW çalışma noktaları 53
Şekil 31. Çalışma alanı Vs_{30} dağılım haritası 56
Şekil 32. Çalışma alanı için elde edilen Kayma dalgası hızı (Vs) seviye haritatları (5m,11m, 20m ve 27m) 57
Şekil 33. Çalışma alanına ait 30 m derinliğe kadar 3B'lu Vs derinlik modeli 58
Şekil 34. Mikrotremör arazi ölçüm noktaları 61
Şekil 35. Çalışma alanı zemin hakim periyot dağılım haritası 63
Şekil 36. Çalışma alanı H/V Genliği (A0-büyütme faktörü) haritası 64
Şekil 37. Çalışma alanı ERT noktaları 66
Şekil 38. ERT-1 verisine ait ait iki boyutlu yeraltı modeli 67
Şekil 39. ERT-2 verisine ait ait iki boyutlu yeraltı modeli 68
Şekil 40. ERT-3 verisine ait iki boyutlu yeraltı modeli (kesikli çizgi olası kayma düzlem sınırını göstermektedir) 69
Şekil 41. ERT-4 profilinin 2B'lu rezistivite modeli (kesikli çizgi olası kayma düzlem sınırını göstermektedir) 70
Şekil 42. ERT-5 verisine ait ait iki boyutlu yeraltı modeli (kesikli çizgi olası kayma düzlem sınırını göstermektedir) 71

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

AGT	**:** Abdurrahman Gazi Türbesi
MASW	**:** Yüzey Dalgalarının Çok Kanallı Analizi
ERT	: Elektrik Rezistivite Tomografi
HVSR / H/V	: Zemin Büyütmesi
SİS	: Sismik kırılma serimleri
MİKRO	: Mikrotremör serimleri
Vp	: P-dalgası hızı
Vs	: S-dalgası hızı
Vp/Vs	: P- ve S- dalga hızları oranı
Vs_{30}	: İlk 30 m ortalama S-dalgası hızı
ρ	: Yoğunluk
ν	: Poisson oranı
Gmax / G	: Maksimum kayma modülü / Kayma modülü
E / Ed	: Elastisite modülü / Dinamik elastisite modülü
K	: Hacim modülü
fo	: Zemin hâkim frekansı
T	: Zemin periyodu
1-B / 2-B / 3-B	: Boyutlu modeller
URL	: İnternet kaynağı
DFZ	: Doğu Anadolu Fay Zonu
KAFZ	: Kuzey Anadolu Fay Zonu
BKFZ	: Başköy Kandilli Fay Zonu
AFZ	: Aşkale Fay Zonu
PFZ	: Palandöken Fay Zonu
EDFZ	: Erzurum Dumlu Fay Zonu
AFAD	: Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı
İRAP	: İl Afet Risk Azaltma Planı
MTA	: Maden Tetkik Arama Genel Müdürlüğü
TBDY 2018	: Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018

Hz : Hertz (Frekans birimi)

SeisImager/SW : MASW analiz yazılımı

GİRİŞ

Çalışmanın Amacı

Bu çalışmanın ana hedefi, Erzurum ili sınırlarında bulunan Abdurrahman Gazi Türbesi (AGT) ve çevresinin zemin stabilitesini kapsamlı bir şekilde jeofizik yöntemlerle inceleyerek, bölgedeki mevcut ve potansiyel heyelan risklerini tespit etmek, türbe çevresindeki zemin dinamik özelliklerini araştırmaktır. AGT, tarihi ve manevi önemi nedeniyle korunması gereken nitelikte bir yapı olup, çevresindeki zemin özelliklerinin detaylı bir şekilde incelenmesi, hem ilgili yapıyı etkileyecek yerbilimsel mühendislik özellikleri açısından hem de çevre yerleşim alanlarının sürdürülebilirliğini sağlamak adına kritik öneme sahiptir.

Bu bağlamda, Sismik P-Kırılma, Çok Kanallı Yüzey Dalga Analizi (MASW), Tek istasyon Mikrotremör ve Elektrik Rezistivite Tomografisi (ERT) gibi bir dizi jeofizik yöntem kullanılmıştır. Bu yöntemlerin birlikte kullanılması, AGT çevresindeki zemin özelliklerinin farklı fiziksel parametreleri ile yüksek çözünürlüklü bir şekilde belirlenmesine olanak sağlamış, yerel zemin koşullarına ilişkin detaylı veriler sunmuştur.

Araştırma, Erzurum Büyükşehir Belediyesi mülkiyetinde bulunan AGT ve çevresinde gerçekleştirilmekte olup, çalışmanın yasal ve teknik açıdan sürdürülebilirliğini sağlamak amacıyla Erzurum Büyükşehir Belediyesi'nden gerekli izinler alınmıştır *(Yazı No: E-35894417-000-162965)*. Çalışma, yalnızca türbenin korunmasına yönelik bir amaç taşımakla birlikte, bölgede yaşayan halkın güvenliği açısından da büyük önem taşımaktadır. Bu doğrultuda, araştırmanın çıktıları tarihi yapının uzun vadeli korunmasına altlık sağlayacak çıktılar üretmiş ve Erzurum ili genelinde deprem ve heyelan gibi risklerin azaltılması yönünde yeni veriler sunmuştur.

Kullanılan Jeofizik Yöntemler

Bu araştırmada, AGT ve çevresindeki zemin stabilitesini ve zemin dinamik özelliklerini detaylı bir şekilde analiz etmek amacıyla bir dizi jeofizik yöntem entegre bir şekilde kullanılmıştır. Saha çalışmalarında uygulanan başlıca yöntemler şu şekildedir:

1. **Sismik P-Kırılma**: Sismik kırılma yöntemi, yer altındaki jeolojik tabakaların elastik dalga hızlarını (Vp) ve derinliklerini belirlemek için kullanılmıştır. Sismik enerji kaynakları (balyoz) ile oluşturulan sismik dalgalar, yer altındaki tabakalar arasında

kırılmalar oluşturur ve bu dalgaların seyahat süreleri ölçülerek tabakaların hız yapısı ve geometri bilgileri elde edilir. Bu yöntem ile;

- Türbe çevresindeki zemin tabakalarının kalınlıklarının belirlenmesi,
- Kaya/zemin sınırlarının ve jeolojik birimlerin tanımlanması,
- Bölgedeki zeminin mühendislik özelliklerinin modellenmesinde bu yöntem kullanılmıştır.

2. **Çok Kanallı Yüzey Dalga Analizi (MASW)**: Yüzey dalgalarının yayılma hızlarını ölçerek, zeminin kesme dalgası hız profilini belirleyen bu yöntem, türbe çevresindeki zeminin dinamik özelliklerinin anlaşılmasında önemli bir rol oynamıştır. Bu yöntem ile;

   - Zeminin sınıflandırması,
   - Elastik modüller ve rijitlik dağılımlarının araştırılması,
   - Heyelan potansiyelinin değerlendirilmesi sağlanmıştır.

3. **Tek istasyon Mikrotremör Yöntemi**: Bu yöntem, pasif sismik gürültü verilerini analiz ederek, zemin hakim titreşim periyodunun belirlenmesine olanak sağlar. Türbenin bulunduğu bölgenin zemin etkisinin anlaşılmasına katkı sağlamıştır. Bu yöntem ile;

   - Bölgenin zemin hakim periyodunun belirlenmesi, ve bu periyod değerlerine göre türbenin bulunduğu zeminin rezonans etkilerinin analiz edilmesi,
   - Yerel zemin koşullarının yapı güvenliği üzerindeki etkilerinin anlaşılması amacıyla bu yöntem kullanılmıştır.

4. **Elektrik Rezistivite Tomografisi (ERT)**: Yüzey altındaki jeolojik birimlerin elektriksel özelliklerini belirleyen bu yöntem, türbe çevresindeki zemin özelliklerinin ve olası heyelan alanlarının tespitinde kullanılmıştır.

   - Heyelan sınırlarının ve potansiyel kayma düzlemlerinin belirlenmesi,
   - Su içeriği yüksek zeminlerin ve yer altı su seviyesinin tespiti,
   - Türbe çevresindeki jeolojik yapıların ayrıntılı modellenmesi için bu yöntem tercih edilmiştir.

Çalışmanın Önemi

Abdurrahman Gazi Türbesi, yalnızca Erzurum ili için değil, Türkiye genelinde de tarihi ve kültürel bir öneme sahiptir. Türbe, manevi değeri ve tarihi dokusuyla korunması gereken

önemli bir yapı olup, çevresindeki zemin koşulları ve olası heyelan riskleri nedeniyle dikkatli bir inceleme ve değerlendirme gerektirmektedir. Bu çalışma, türbe çevresindeki zemin stabilitesinin detaylı bir şekilde incelenmesini ve bölgedeki heyelan risklerinin araştırılmasını hedefleyerek, tarihi yapıların korunması ve sürdürülebilir yerleşim alanlarının sağlanması açısından önemli bir bilimsel katkı sunmaktadır.

Türkiye'nin birçok bölgesi gibi Erzurum da, jeolojik ve topografik yapısı nedeniyle heyelan riski taşıyan alanlara sahiptir. Bazı heyelan alanlarının lokal ölçekte detaylandırılmaması, türbe çevresi gibi kritik bölgelerde daha kapsamlı incelemelerin gerekliliğini ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, bu çalışma, mevcut haritalarda yer almayan olası heyelan alanlarının araştırılmasına katkı sağlayacaktır.

Araştırmanın önemi, teknik ve bilimsel boyutlarının ötesinde, sosyal ve kültürel açıdan da ele alınabilir. Tarihi yapılar, toplumların kimliğini yansıtan ve kuşaktan kuşağa aktarılan değerler arasında yer almaktadır. Bu çerçevede, türbenin korunması yalnızca fiziksel bir yapının sürdürülebilirliğiyle sınırlı kalmayıp, aynı zamanda kültürel mirasın muhafaza edilmesi açısından da büyük önem taşımaktadır. Çalışmanın bulguları, türbenin bulunduğu bölgedeki zemin stabilitesiyle ilgili önleyici tedbirlerin belirlenmesine katkı sağlayarak, bu tarihi yapının gelecekte de güvenli bir şekilde varlığını sürdürebilmesine katkı sunacaktır.

Ayrıca, bu çalışma kapsamında kullanılacak jeofizik yöntemlerden elde edilecek bulgular (Sismik P-Kırılma, MASW, Tek İstasyon Mikrotremör ve ERT), bölgedeki zemin dinamik özelliklerini araştırarak gelecekteki çalışmalara rehberlik edecektir. Böylelikle, araştırma hem akademik literatüre katkı sağlayacak hem de mühendislik uygulamalarında kullanılabilecek yeni bilgiler sunmuştur. Araştırma, yalnızca heyelan ve zemin özelliklerini araştırmanın yanında AGT'nin uzun vadeli korunması ve çevresindeki yerleşim alanlarının güvenliğinin sağlanması için temel yerbilimsel mühendislik bilgilerini içermektedir.

KURAMSAL TEMELLER

Literatür Taraması

Ülkemizde Zemin Stabilitesi ve Jeoteknik Problemlerde Tümleşik Jeofizik Çalışmaları

Gürbüz (2003), Karabük ilindeki bir heyelan bölgesini jeofizik yöntemlerle analiz etmiştir. Araştırma kapsamında Sismik P-kırılma, Düşey Elektrik Sondaj (DES) ve mikrotremor gibi yöntemler kullanılarak heyelan yapısının geometrik ve fiziksel özellikleri incelenmiştir. Çalışmada, kayma yüzeyinin ve tabaka kalınlıklarının belirlenmesi sağlanmış ve bu yöntemlerin heyelan gibi karmaşık jeolojik yapıları incelemede etkili olduğu vurgulanmıştır. Özellikle, mikrotremor çalışmaları sonucunda heyelan yönü ve akma zonu haritalanmıştır. Araştırma, jeofizik tekniklerin karmaşık zemin koşullarında detaylı veri sağlamada ne kadar önemli olduğunu göstermiştir.

Drahor ve arkadaşlarının (2006), Türkiye'nin Aydın ili Söke ilçesinde meydana gelen bir heyelan bölgesini incelemek için elektriksel özdirenç tomografisi (ERT) yöntemini uygulamıştır. Çalışmada, heyelan geometrisinin ve malzeme özelliklerinin belirlenmesine odaklanılmış, saha öncesinde sentetik modelleme yapılmıştır. ERT sonuçları, heyelanın kayma yüzeyini ve alanın altında bir fayın varlığını açıkça ortaya koymuş, ayrıca suya doygun zonların belirlenmesini sağlamıştır. Bu araştırma, ERT tekniğinin, karmaşık jeolojik yapılarda yüksek doğrulukta veri sağlayarak heyelan incelemelerindeki önemini göstermektedir.

Kılıç (2006), Isparta'nın Senirkent ilçesinde yaşanan heyelanların nedenlerini ve bölgenin jeolojik yapısını incelemek amacıyla bir araştırma gerçekleştirmiştir. Çalışmada, 1995 ve 1996 yıllarında yaşanan heyelanların ardından, anakaya üzerindeki malzeme kalınlığını ve kayma yüzeylerini belirlemek üzere rezistivite ve sismik yöntemler kullanılmıştır. 27 noktada yapılan DES ve Schlumberger elektrot dizilimi ile elde edilen veriler, heyelan bölgesindeki malzeme kalınlığının 150 metreye kadar ulaşabileceğini ve alterasyon zonlarının kaymaya neden olan kritik unsurlar olduğunu göstermiştir. Çok atışlı sismik kırılma yöntemiyle P-dalgası hızlarının ölçülmesi, kayma düzlemlerinin detaylı haritalanmasını sağlamıştır.

Jongmans ve Garambois (2007), heyelanların jeofizik yöntemlerle incelenmesine dair bir durum değerlendirmesi sunmuşlardır. Çalışmada, özellikle 1990 sonrası literatüre odaklanarak heyelanların karakterizasyonunda kullanılan yüzey jeofizik yöntemlerinin avantajları ve sınırlamaları ele alınmıştır. Heyelan araştırmalarında, jeofizik tekniklerin

kullanımının başlangıçta yetersiz olduğu, ancak 2- Boyutlu (2-B), 3- Boyutlu (3-B) ve 4-Boyutlu (4-B) görüntüleme yöntemlerinin gelişmesiyle ilginin arttığı vurgulanmıştır. Çalışma, heyelanların kayma yüzeylerinin tanımlanmasından su hareketlerinin izlenmesine kadar uzanan geniş bir yelpazede jeofizik tekniklerin potansiyelini ve gerekliliğini ortaya koymaktadır. Yazarlar, jeofizik yöntemlerin doğru bir şekilde uygulanabilmesi için jeolojik ve jeoteknik verilerle kalibre edilmesi gerektiğini ve bu yaklaşımların farklı disiplinler arasındaki iş birliğini güçlendireceğini belirtmişlerdir.

Demirbaş (2008), Trabzon ve Gümüşhane bölgelerindeki iki farklı heyelan alanında jeofizik yöntemlerle yapılan araştırmaların sonuçlarını sunmuştur. Çalışmada, heyelan kütlelerinin geometrik ve fiziksel özelliklerini belirlemek amacıyla sismik kırılma, MASW, DES ve yer radarı (GPR) gibi yöntemler kullanılmıştır. Bu yöntemlerle, heyelan alanlarının kayma yüzeyi, malzeme kalınlığı, su doygunluk durumu, P- ve S- dalgası hızları gibi önemli parametreler tespit edilmiştir. Elde edilen veriler, farklı jeofizik tekniklerin heyelan araştırmalarındaki etkinliğini karşılaştırmalı olarak değerlendirmiş ve yöntemler arasında yüksek uyum gözlemlenmiştir. Çalışma, jeofizik yöntemlerin karmaşık heyelan alanlarının detaylı analizi için oldukça faydalı olduğunu ortaya koymaktadır.

Göktürkler ve arkadaşlarının (2008), İzmir'in Altındağ bölgesindeki heyelan bölgesinin jeofizik yöntemlerle araştırılmasını konu almaktadır. Araştırmada, ERT ve sismik kırılma tomografisi (SRT) teknikleri bir arada kullanılarak, heyelan kütlesinin içyapısı, fiziksel özellikleri ve kayma yüzeyi geometrisi incelenmiştir. Elde edilen bulgular, heyelan malzemesinin düşük özdirenç ve düşük sismik hız ile karakterize edildiğini ortaya koymuştur. Ayrıca, heyelan yatağını oluşturan sıkışmış klastik kayaçlar, yüksek özdirenç ve yüksek sismik hız ile tanımlanmıştır. Entegre yorumlama yöntemiyle kayma yüzeyinin geometrisi tespit edilmiş ve heyelan malzemesinin kalınlığındaki değişimler belirlenmiştir. Bu bulgular, Altındağ heyelan bölgesindeki kütle hareketlerinde su içeriğinin önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir.

Eichkitz ve arkadaşlarının (2009), Gschliefgraben heyelan sahasının yüzeysel sismik yansıma yöntemiyle incelenmesini ve bu verilerden üç boyutlu bir yapısal model oluşturulmasını konu alır. Çalışmada, sismik yansıma profilleri, kuyulardan alınan veriler ve dijital yükseklik modelleri kullanılarak, heyelan bölgesindeki yer altı jeolojisi detaylı bir şekilde modellenmiştir. Modelleme süreci, petrol ve doğal gaz endüstrisinde kullanılan bir standarda dayanmaktadır. Elde edilen sonuçlar, heyelan kütlesinin içyapısını, farklı jeolojik katmanların ve fay hatlarının konumlarını göstermektedir. Bu model, heyelan malzemesinin

hacmini hesaplamak ve bölgenin detaylı bir jeolojik haritasını çıkarmak için kullanılabileceği rapor edilmiştir.

Al-Saigh ve arkadaşlarının (2010), heyelan kayma yüzeyinin derinliğini ve eğimini belirlemek için sismik kırılma yönteminin uygulanmasını ele almaktadır. Çalışma, Musul Barajı'nın güneyinde, Tigris Nehri boyunca yer alan bir heyelan bölgesinde gerçekleştirilmiştir. Sismik kırılma yöntemiyle yapılan ölçümler, kayma yüzeyinin derinliğinin 3,5 ila 6,0 metre arasında değiştiğini ve eğiminin 16° ile 27° arasında olduğunu ortaya koymuştur. Bulgular, kayma yüzeyinin üzerinde yer alan malzemenin fiziksel özelliklerinde, özellikle de sismik hızlarda önemli farklılıklar olduğunu göstermektedir. Ayrıca, elde edilen veriler, kayma yüzeyinin kesme dayanımı parametrelerini belirlemek için bir geri analiz tekniğinde kullanılmıştır. Analiz sonucunda, sismik verilerden hesaplanan kesme dayanımı ile laboratuvar test sonuçları arasında 2°'lik bir fark olduğu bulunmuştur. Bu çalışma, SRT'nin heyelan incelemelerinde çevre dostu ve ekonomik bir alternatif sunduğunu göstermektedir.

Özçep ve arkadaşlarının (2010) çalışmasında, İstanbul Gürpınar bölgesindeki zemin stabilitesi, depremlerin tetiklediği şev kaymaları açısından incelenmiştir. Araştırmada, zemin özellikleri ve dayanım parametrelerini belirlemek için sondaj, laboratuvar testleri ve sismik kırılma ile MASW yöntemleri kullanılmıştır. Hem statik hem de psödostatik analizler sonucunda, statik koşullarda stabilite sorunu bulunmamasına rağmen, deprem sırasında artan ivme ile şev stabilitesinin tehlikeye girdiği gözlemlenmiştir. Çalışma, deprem kaynaklı kaymaların önlenmesi için şev iyileştirme projeleri önerirken, şehir planlamasında sismik risk değerlendirmesinin önemini vurgulamaktadır.

Schmitt ve arkadaşlarının (2011) çalışmasında, Kanada'nın Alberta bölgesindeki Peace River heyelanı, çeşitli jeofizik yöntemler kullanılarak incelenmiştir. Heyelanın yapısını ve süreçlerini anlamak amacıyla sismik yansıma, dikey sismik profil ve ERT tekniklerinden yararlanılmıştır. Bu yöntemler sayesinde, heyelan kaynaklı kırılma yüzeyinin konumu ve litolojinin eğim stabilitesindeki rolü belirlenmiştir. Çalışmada, farklı jeofizik yöntemlerin bir arada kullanılmasının, heyelan süreçlerini anlamada daha kapsamlı bilgiler sunduğu vurgulanmıştır.

Colangelo ve arkadaşları (2012) çalışmasında, İtalya'nın Basilicata bölgesinde meydana gelen bir heyelan olayı, ERT yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Çalışmada, heyelan gövdesinin derin yapısal özelliklerini belirlemek için hem boyuna hem de enine yönlerde iki ERT profili elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, kayma yüzeyinin konumunu ve yüksek su içeriğine sahip bölgeleri tanımlamış, bu alanların eğim stabilitesini olumsuz etkilediği belirtilmiştir. ERT sonuçları, bölgedeki stratigrafik verilerle karşılaştırılarak doğrulanmış ve

risk yönetimi sürecinde tahliye kararları alınmasına ve eğim stabilizasyon planlarının geliştirilmesine yardımcı olmuştur.

Işık ve arkadaşlarının (2012) çalışmasında özdirenç yönteminin heyelan bölgelerinde kayma yüzeylerinin tespitinde jeoteknik yöntemlere destek sağlayabilecek etkili bir araç olduğunu rapor etmiştir. Etimesgut-Ankara'daki Yıldırım Beyazıt Parkı'nda gerçekleştirilen çalışmada, 60 elektrot ile yapılan çoklu elektrot özdirenç ölçümleri, jeolojik sondajlar ve inklinometre verileriyle birlikte değerlendirilmiştir. Çalışma sonuçları, yüzeyden yaklaşık dört metre derinlikte alüvyon ve Pliyosen yaşlı birimler arasındaki sınırın tespit edilmesini sağlamış ve bu sınırın kayma zonlarının yerini tahmin etmede kritik bir rol oynadığı görülmüştür. Bu durum, özdirenç yönteminin, yeraltı litolojisinin ve heyelan risklerinin değerlendirilmesinde önemli bir katkı sunduğunu ortaya koymaktadır.

Capizzi ve arkadaşlarının (2014) çalışmasında, Agrigento Katedrali'nin bulunduğu tepedeki heyelanlar, yapının temel stabilitesini ciddi şekilde tehdit etmektedir. Bu çalışmada, ERT, SRT, MASW ve mikrotremor yöntemlerinin bir arada kullanıldığı entegre jeofizik yöntemler uygulanmıştır. İnceleme, stratigrafik sondaj verileriyle ilişkilendirilerek, alt yüzeyin detaylı üç boyutlu modelini oluşturmayı ve kayma yüzeylerinin sınırlarını belirlemeyi amaçlamıştır. Bu entegre yöntemler, kireçtaşı ve killi birimler arasındaki karmaşık geçişleri ve yapısal bozuklukları tespit ederek, heyelanlı alanın litolojik ve geometrik özelliklerinin daha iyi anlaşılmasını sağlamıştır. Bulgular, katedral ve çevresindeki heyelanları stabilize etmek için alınması gereken önlemler konusunda rehberlik etmektedir.

Uyanık ve Çatlıoğlu (2014) çalışmasında, Süleyman Demirel Üniversitesi Batı Yerleşkesi'nde heyelan riski taşıyan bir alanda yapılan araştırmada, ERT ve Sismik Kırılma Tomografi yöntemleri kullanılarak heyelan geometrisi ve zeminin mekanik özellikleri incelenmiştir. Çalışmada, elde edilen 2 boyutlu veriler, heyelanlı alanın kayma yüzeyini, kayan malzeme ve topuk kısmını belirlemek amacıyla analiz edilmiştir. Bulgular, kayan malzemenin gevşek yapıda olduğunu, ancak topuk kısmının daha sıkı bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca, bölgede yağış kaynaklı yüzeysel kaymaların önüne geçmek için drenaj sistemlerinin iyileştirilmesi ve yapılaşmadan kaçınılması gerektiği belirtilmiştir.

Yılmaz ve Narman (2014), Burdur ve Isparta arasında yer alan bir bölgede ortaya çıkan aktif bir heyelanın detaylı bir incelemesini gerçekleştirmiştir. Çalışmada, iki boyutlu elektrik rezistivite görüntüleme ve doğal potansiyel (SP) yöntemleri ile heyelan alanındaki mobilize malzeme modülleri, kayma yuvası ve korunma suyu hareketleri araştırılmaktadır. Araştırma sonucunda, yüzeyin altında heterojen yapılar ve geçirimsiz malzeme katmanlarının varlığı tespit edilmiş; bu katmanların kaymanın yanal ve dikey farklılıkları belirlemede etkili olduğu

gözlemlenmiştir. SP yöntemi ile sıvı akış yollarını ve bu yolların neden olduğu yük değişimlerini haritalandırmıştır. Bulgular, kayma yüzeyinin yaklaşık 10 metre derinlikte olması ve suyunun heyelan dinamikleri üzerinde önemli bir rol oynadığını ortaya çıkardı. Çalışma, jeofizik yöntemlerin heyelan sisteminin incelenmesinde önemli bir araç olduğunu vurgulamakta ve risk değerlendirmelerine katkı sağlamaktadır.

Çatlıoğlu (2015), Süleyman Demirel Üniversitesi Batı Yerleşkesinde heyelan riski taşıyan bir alanın ayrıntılı analizini yapmak amacıyla jeofizik çalışmalar gerçekleştirmiştir. Çalışma kapsamında ERT, sismik kırılma ve MASW modelleri hazırlanmıştır. Araştırmanın amacı, heyelan geometrisini, kayma derinliğini ve kayan malzeme mekaniğinin özelliklerini belirlemektir. Elde edilen sonuçlar, riskin belirlenmesine ve alınacak önlemlerin planlanmasına önemli bir zemin hazırlamıştır.

Gelişli (2018) çalışmasında, heyelanların karmaşık doğası ve buna bağlı olarak bu doğal afetlerin incelenmesinde multidisipliner yöntemlere olan ihtiyaçlar detaylandırılmıştır. Yazar, özellikle son yıllarda jeofizik yöntemlerin bu alanda kullanımını vurgulamış ve elektrik özdirenç, sismik yöntemler ve elektromanyetik analiz gibi tekniklerin, heyelan sınırlarının belirlenmesinden kayan kütle içindeki su dağılımına kadar çeşitli araştırmalarda sağladığı katkılara dikkat çekmiştir. Bu yöntemlerin, jeoteknik ve hidrojeolojik analizlerle birleştirilmesinin önemine vurgu yapan çalışma, heyelan risk analizleri için jeofizik ölçümlerin pratik bir araç olduğunu ortaya koymaktadır.

Hussain ve arkadaşlarının (2020) çalışmasında, Sobradinho'daki bir vadide yer alan heyelan bölgesinin detaylı bir şekilde incelenmiştir. Çalışmada, yanal kayma yüzeylerinin belirlenmesi ve bu yüzeylerin özelliklerinin anlaşılabilmesi amacıyla MASW ile ERT yöntemlerinin bir arada kullanımı değerlendirilmiştir. ERT yöntemiyle kayma yüzeylerinin ve geçirgen yolların tespiti gerçekleştirilmiştir. Araştırmanın sonuçları, jeofiziksel yöntemlerin jeoteknik ve jeolojik analizlerle bütünleştirilmesinin, heyelanların karakterizasyonu ve eğim stabilite analizinde etkili sonuçlar sunduğunu ortaya koymuştur.

Kanbur ve arkadaşlarının (2020) çalışmasında, Isparta'nın Senirkent bölgesindeki yerel zemin etkileri, mikrotremor (H/V) ve yüzey dalgaları analiz yöntemleri kullanılarak incelenmiştir. Araştırma kapsamında, Kapı Dağı yamacında ve Senirkent havzasında yer alan alüvyal tortuların zemin özellikleri ortaya konmuştur. Mikro bölgelendirme çalışmalarıyla, baskın zemin frekans aralıkları 0.8-6.6 Hz, zemin büyütme faktörleri ise 1.8-6.8 olarak belirlenmiştir. Ayrıca ReMi yöntemiyle elde edilen Vs_{30} (kayma dalga hızlarının 30m derinliğe kadar ortalama değeri) değerlerine göre, güneydeki yamaç birikimlerinin daha yüksek zemin sınıfına (C ve B) sahip olduğu; kuzeydeki alüvyal tortuların ise düşük Vs_{30} değerleriyle ile

zemin sınıfı D olarak sınıflandırıldığı rapor edilmiştir. Çalışma, bölgedeki zemin yapısının doğru bir şekilde anlaşılmasının, deprem risklerinin azaltılmasında kritik öneme sahip olduğunu ortaya koymuştur.

Boyd ve arkadaşlarının (2021) çalışmasında, aktif heyelan bölgelerinde uzun vadeli jeoelektrik izleme verilerinin işlenmesine yönelik bir metodoloji geliştirilmiştir. Çalışmada, İngiltere'nin Howardian Tepeleri'nde yer alan Hollin Hill heyelan sahasındaki uzun dönemli jeoelektrik veri toplama ve analiz yöntemleri ele alınmıştır. ERT teknikleri, saha içindeki arazi değişimlerine uyum sağlamak için zamansal ve mekânsal çözümleme modelleriyle birleştirilmiştir. Bulgular, eğim hareketlerinin neden olduğu topografik bozulmaların izlenmesinin yanı sıra, zaman içinde değişen elektrik özdirenç haritalarının heyelan alanının hidrolojik ve jeoteknik özelliklerini anlamada önemli katkılar sağladığını göstermiştir.

Şenkaya ve arkadaşlarının (2022) çalışmasında, Trabzon'un Işıklar paleo-heyelan alanındaki farklı yer değiştirmelerin nedenleri incelenmiştir. Çalışmada, heyelan alanının jeolojik ve jeofizik özelliklerini belirlemek için P-dalgası SRT, ERT, MASW ve mikrotremor gibi çok sayıda jeofizik yöntem kullanılmıştır. Bulgular, heyelan alanındaki yer değiştirmelerin heterojen zeminin katman özelliklerinden ve kayma yüzeylerinin derinliğinden kaynaklandığını göstermiştirler. Bu yöntemlerin birleşimi, yer altı jeolojisinin daha geniş bir çerçevede anlaşılmasına ve heyelan dinamiklerinin daha doğru yorumlanmasına olanak tanığı vurgulanmıştır.

Karaaslan ve arkadaşlarının (2023) çalışmasında, Sakarya ili Değirmendere bölgesindeki aktif bir heyelan yapısı, ERT ve MASW yöntemleri entegre edilerek incelenmiştir. Araştırmada, kayma yüzeyinin özellikleri ve yer altı yapıların mekanik ile hidrojeolojik karakterleri detaylandırılmıştır. Bulgular, yüksek dirençli bir kayma malzemesinin düşük dirençli bir kil taşı tabakası üzerinde hareket ettiğini göstermiştir. Ayrıca, MASW yöntemiyle kayma malzemesinin düşük makas dalgası hızlarına sahip olduğu, buna karşın alttaki kil taşı tabakasının yüksek hızlara ve rijitliğe sahip bir temel tabaka karakteri sunduğu belirlenmiştir. Araştırma, bu jeofizik yöntemlerin birlikte kullanımının yorum hatalarını önemli ölçüde azalttığını ve heyelanların karakterizasyonunda daha güvenilir sonuçlar sağladığını göstermektedir.

Alonso-Pandavenes ve arkadaşlarının (2023) çalışmasında, Ekvador'un Cotopaxi bölgesindeki Pujilí heyelan alanında, heyelan kayma yüzeyinin ve içyapısının mikrotremor yöntemiyle belirlenmesine yönelik kapsamlı bir analiz yapılmıştır. Bulgular, kayma yüzeyinin konumunun ve kayma kütlesinin içyapısının, HVSR tekniğiyle yüksek doğrulukla saptanabildiğini göstermiştir. Nakamura (1989) yöntemiyle elde edilen zemin hakim frekansı

(fo) ve sediman kalınlığı verileri, kayma yüzeyinin daha iyi anlaşılmasına katkıda bulunmuştur. Araştırma, HVSR yönteminin erken dönem heyelan incelemeleri için hızlı, ekonomik ve etkili bir yöntem olduğunu ortaya koymuştur.

Alemdağ ve arkadaşlarının (2024) çalışmasında, Trabzon'un Düzköy ilçesindeki Şahinkaya Üyesi'nin jeomorfolojik ve karstik yapıları çok disiplinli bir yaklaşımla incelenmiştir. Çalışma, karst oluşumlarının iç özelliklerinin anlaşılması amacıyla ERT, MASW, sismik kırılma, SP ve GPR gibi bir dizi jeofizik yöntemi bir arada kullanmıştır. Elde edilen sonuçlar, karst boşluklarının ve suyla doygun zonların belirlenmesine yönelik etkili bir metodoloji ortaya koymuş ve kullanılan yöntemlerin verimlilik sıralamasını değerlendirmiştir. Bu analiz, bölgedeki karstik oluşumların daha iyi anlaşılması için önemli bir referans niteliği taşımaktadır.

Silahtar ve Karaaslan'ın (2024) çalışmasında, Sakarya'nın Karapürçek ilçesinde meydana gelen aktif bir heyelan kütlesinin modellenmesi, ERT, MASW ve mikrotremör yöntemlerinin entegrasyonu ile gerçekleştirilmiştir. Çalışma, yüksek özdirençli ve yüksek Vs değerlerine sahip kumtaşının, düşük özdirençli ve düşük Vs hızına sahip kil tabakası üzerinde hareket ettiğini ortaya koymuştur. Araştırma, heyelanın farklı kotlardaki kayma yüzeyleri ve doğrultularını tespit ederek, bu yüzeylerin jeomorfolojik ve hidrojeolojik süreçlerle nasıl etkileşimde bulunduğunu detaylandırmıştır. Bulgular, jeofizik yöntemlerin kombinasyonunun kütle hareketinin detaylı bir şekilde karakterize edilmesine olanak tanıdığını göstermektedir.

Erzurum ve Çevresinde Yürütülen Yerbilimsel Çalışmalar

Özkan ve arkadaşlarının (1984) çalışmasında, Erzurum-Narman bölgesindeki Karadağ yöresinde yer alan polimetalik cevherleşmelerin jeolojik özellikleri ve kökeni incelenmiştir. Bu polimetalik cevherleşmelerin, Alt-Orta Eosen yaşlı dasitik volkanizmanın etkisiyle gerçekleşen hidrotermal süreçlerden kaynaklandığı sonucuna ulaşılmıştır.

Bayraktutan ve arkadaşlarının (1996) çalışmasında, Erzurum Ovası'ndaki aktif tektonik bir zon içerisindeki radon gazı jeokimyası incelenmiştir. Çalışma, farklı litolojik birimler üzerinde toprak gazı örneklemeleri yaparak, aktif fay hatlarını haritalama ve bölgedeki jeolojik tehlikeleri değerlendirme amacıyla gerçekleştirilmiştir. Araştırma boyunca, toplamda 252 farklı noktadan radon ölçümleri alınmış ve özellikle aktif fay zonlarında radon yoğunluklarının anormal şekilde yükseldiği gözlemlenmiştir.

Bayrak ve arkadaşlarının (2001) çalışmasında, Türkiye'nin Kuzey Anadolu Fay Zonu boyunca meydana gelen sismik aktiviteyle ilişkili olarak, tarihi depremlerin etkileri incelenmiştir. Araştırma kapsamında, belirli zaman dilimlerinde meydana gelen büyük ölçekli

depremlerden sonra oluşan yüzey deformasyonları, fay kırılmaları ve yer hareketi verileri detaylı bir şekilde değerlendirilmiştir. Çalışmada, özellikle Erzincan ve çevresindeki deprem aktivitesine odaklanılarak, bölgenin sismik tehlike düzeyi hakkında önemli çıkarımlar yapılmıştır.

Yarbaşı ve arkadaşlarının (2003) çalışmasında, Erzurum Yenişehir Yerleşim Alanı'nın zemin özellikleri jeoteknik yöntemler kullanılarak incelenmiştir. Çalışma, bölgenin sismik risk altında olması nedeniyle zemin türlerinin fiziksel ve mekanik özelliklerini belirlemeyi amaçlamıştır. İnceleme sonucunda dokuz farklı geoteknik birim haritalandırılmış ve zemin örneklerinde granülometri, kıvam limitleri, geçirgenlik, kompaksiyon ve kesme dayanımı gibi testler uygulanmıştır. Elde edilen bulgular, alüvyon yelpazeler üzerinde gelişen şehrin aktif faylarla kesilen bölgelerinde yapılaşma planlamalarının dikkatli şekilde yapılması gerektiğini göstermiştir.

Akbulut ve arkadaşlarının (2004) çalışmasında, 25 ve 28 Mart 2004 tarihlerinde meydana gelen Aşkale-Ilıca (Erzurum) depremleri sonrasında bölgede gözlemlenen zemin ve yapı problemleri analiz edilmiştir. Araştırma, depremlerin etkilerinin yapılaşma ve zemin koşulları ile olan ilişkisini incelemiş; özellikle gevşek alüvyon zeminler üzerine inşa edilen yapılarda hasarın daha yoğun olduğunu ortaya koymuştur. Çalışma, ağır hasarın büyük ölçüde mühendislik hizmeti almamış yığma yapılarda yoğunlaştığını, bunun yanında zeminin dinamik etkilerinin de yapı hasarlarının şiddetini artırdığını göstermiştir. Ayrıca, depremden etkilenen bölgelerde topoğrafik faktörlerin ve yerel zemin koşullarının, deprem sırasında oluşan hasarların dağılımını büyük ölçüde etkilediği tespit edilmiştir.

Yarbaşı ve arkadaşlarının (2004) çalışmasında, Erzurum şehir merkezinin batı kesimindeki zemin koşullarının jeoteknik haritalama yöntemiyle değerlendirilmesi ele alınmıştır. Çalışma, bölgenin beş farklı jeoteknik birime ayrılarak, zemin türü, katman kalınlığı, malzeme özellikleri ve hidrojeolojik koşullara göre analiz edilmesini sağlamıştır. Araştırmada, zemin özelliklerinin yapılaşmaya uygunluğunu ve planlama süreçlerinde kullanılması gereken zemin jeotekniği kriterlerini detaylı bir şekilde sunmaktadır.

Çakır ve arkadaşlarının (2006) çalışmasında, 2004 yılında Erzurum'un Aşkale ilçesinde meydana gelen depremlerden sonraki fiziksel, sosyal ve psikolojik etkiler incelenmiştir. Çalışmada, depremlerin 9 kişinin ölümü ve 139 kişinin yaralanmasıyla sonuçlandığı, 305 binanın oturulamaz hale geldiği, ayrıca önemli sayıda hayvanın telef olduğu rapor edilmiştir. İncelenen bölgelerde, yapıların çoğunun mühendislik hizmeti almamış yığma kerpiç evlerden oluştuğu ve bu durumun can kayıplarını artırdığı vurgulanmıştır.

Şengör ve arkadaşlarının (2008) çalışmasında, Doğu Anadolu Yüksek Platosu'nun, küçük ölçekli bir "Türk tipi orojen" olarak nasıl şekillendiği ve bunun kıtasal kabuk oluşum süreçleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışma, Arabistan ve Avrasya plakalarının geç Miyosen'deki çarpışması sonrasında oluşan post-çarpışma magmatizmasına odaklanmıştır. Bu süreçlerin, kabukta yaygın bir volkanizmaya neden olduğu ve bunun jeolojik yapı ile mineral yataklarının dağılımını etkilediği belirtilmiştir. Doğu Anadolu'da farklı yaş gruplarına ve jeokimyasal özelliklere sahip volkanik kayaçların meydana gelmesi, levha alçalmasının ve yer kabuğu hareketlerinin bir sonucu olarak değerlendirilmiştir. Bu yaklaşım, diğer Türk tipi orojenlerin oluşum dinamiklerini anlamada da kıymetli bir model sunmaktadır.

Yıldırım ve Parlak'ın (2008) çalışmasında, Erzurum'un Tekman-Pasinler bölgesindeki Şahvelet Ofiyolitlerinin jeolojik ve petrografik özellikleri detaylı şekilde incelenmiştir. Araştırmada, bölgedeki kayaçların stratigrafik konumu ve oluşum ortamına ilişkin veriler, alan gözlemleri ve kimyasal analizlerle değerlendirilmiştir. Bu çalışmada, Neotetis Okyanusu'nun kapanma süreciyle birlikte geliştiği ve yeni okyanusal kabuk oluşumlarına katkı sağladığı sonucuna ulaşılmıştır.

Yarbaşı ve Kalkan'ın (2009) çalışmasında, Erzurum'daki yerleşim alanlarının jeoteknik özellikleri detaylı olarak incelenmiştir. Çalışma, aktif fayların kontrolü altındaki alüvyon yelpazelerinde yer alan zemin birimlerinin fiziksel, mekanik ve hidrojeolojik özelliklerini belirlemeyi hedeflemiştir. Alüvyon birimleri üzerinde yapılan detaylı arazi çalışmaları ve laboratuvar deneyleri sonucunda, zemin birimlerinin taşıma kapasitesi ve yer altı suyu derinliği gibi parametreler haritalandırılmıştır. Elde edilen veriler, beş farklı jeoteknik bölgenin tanımlanmasına olanak sağlamıştır.

Çakıcı ve arkadaşlarının (2012) çalışmasında, Erzurum'un Kırkdeğirmenler Mahallesi'nde kentsel kullanım alanı içerisinde yer alan heyelanların jeoteknik özellikleri incelenmiştir. Çalışma kapsamında, mühendislik jeolojisi haritaları hazırlanmış, laboratuvar ve arazi analizleri ile zemin örneklerinin fiziksel ve mekanik özellikleri değerlendirilmiştir. Özellikle, kayan zemin malzemelerinin kohezyon, içsel sürtünme açısı ve geçirgenlik katsayısı gibi parametreleri ölçülerek, dört farklı heyelan bölgesinin duraylılık analizleri gerçekleştirilmiştir.

Yarbaşı'nın (2015) çalışmasında, Erzurum'un Oltu ilçesi ve çevresindeki yerleşim alanlarının jeoteknik özellikleri incelenmiştir. Çalışma, Kuzey Doğu Anadolu Fay Zonu (KDAFZ) üzerinde yer alan Oltu-Narman havzasında, zemin türleri, katman kalınlıkları, malzeme özellikleri, hidrojeolojik durum ve topoğrafyanın deprem riskine etkilerini değerlendirmiştir. Araştırma sonucunda dört jeoteknik bölge belirlenmiş, her bölge zemin

türleri ve stabilite açısından detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Özellikle, eski ve yeni alüvyon birimleri üzerinde yerleşim bulunması nedeniyle sıvılaşma riski vurgulanmış ve yapılaşma için jeoteknik verilerin kullanılmasının önemi belirtilmiştir.

Koçyiğit ve Canoğlu'nun (2017) çalışmasında, Erzurum çek-apart havzasının neotektonik yapısı ve sismik aktivitesi incelenmiştir. Araştırma, Kuzey Anadolu Fay Zonu (KAFZ) ve Doğu Anadolu Fay Zonu (KAFZ) sistemleri arasında yer alan Doğu Anadolu Tektonik Bloğu'na odaklanmıştır. Erzurum çek-apart havzası, sinistral doğrultu atımlı fay zonları ve eğik normal faylarla sınırlanmış olup, özellikle Geç Kuaterner döneminden itibaren neotektonik deformasyonlarla şekillenmiştir. Çalışmada, havzanın jeolojik gelişim süreci, çevresindeki sınır-fay segmentlerinin haritalandırılması ve sismik risklerin değerlendirilmesi üzerine yoğunlaşılmıştır. Bulgular, havzanın önemli bir deprem riski taşıdığını ve büyük ölçekli sismik tehlike haritalarının hazırlanmasının gerekliliğini ortaya koymuştur.

Karaca ve Bayram'ın (2019) çalışmasında, Erzurum Havzası'ndaki yerleşim ve zemin ilişkisi jeolojik ve jeoteknik özellikler açısından incelenmiştir. Çalışma, Erzurum Havzası'nın sıkışma ve gerilme tektoniği etkisiyle oluşmuş bir ova olduğunu ve kentleşmenin alüvyonla kaplı, sıvılaşma riski yüksek zeminlerde yayılmaya devam ettiğini göstermektedir. Araştırmada, zemin özelliklerinin deprem sırasında yapısal hasarların dağılımında kritik rol oynadığı, özellikle yüksek katlı yapıların risk oluşturduğu belirtilmiştir.

Özer'in (2019) çalışmasında, Erzurum ve çevresinde zemin büyütme etkileri HVSR yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Çalışma, bölgesinde bulunan 10 adet ivme-ölçer ile 2013-2017 yılları arasında kaydedilen 17 depreme dayalı analizlere odaklanmıştır. Alüvyon birimler üzerinde yer alan şehir merkezinde ve çevresinde düşük frekanslarda yüksek büyütme değerleri tespit edilmiştir. Çalışma sonuçları, yapılaşma planlarında zemin hakim frekansı ve rezonans etkisinin dikkate alınması gerektiğini vurgulamaktadır.

Aydın ve arkadaşlarının (2020) çalışmasında, Erzurum şehir merkezinde yapılması planlanan Hafif Raylı Sistem güzergâhının fiziksel zemin parametreleri açısından uygunluğu incelenmiştir. Çalışmada, rotary temel sondaj, MASW ve mikrotremor yöntemleri kullanılarak güzergâh üzerinde belirli noktalardaki zemin yapısının sorunlu olduğu tespit edilmiştir. Bu sorunlu noktalara yönelik zemin iyileştirme önerilerinde bulunulmuş veya alternatif güzergâhlar geliştirilmiştirler.

Bayrak ve arkadaşlarının (2020) çalışmasında, Erzurum-Aşkale'de 11 Mayıs 2017 tarihinde meydana gelen Mw 4.7 büyüklüğündeki depremin, yer ivmesi zayıflama ilişkileri üzerinden analiz edilmesi ele alınmıştır. Çalışma kapsamında, AFAD tarafından kaydedilen 20 farklı ivme-ölçer verisi kullanılarak, farklı zemin tiplerinde en uygun yer ivmesi zayıflama

ilişkisinin belirlenmesi hedeflenmiştir. Sadigh ve arkadaşlarının (1997) zayıflama ilişkisinin, gözlemlenen ivme değerleri ile en iyi uyumu sağladığı tespit edilmiştir.

Erzurum İl Afet Risk Azaltma Planı'nda (2021), Erzurum'un doğal afetlere karşı hazırlık ve risk azaltma politikaları kapsamlı bir şekilde ele alınmıştır. Çalışma, ilin deprem, heyelan, sel, kaya düşmesi, çığ ve meteorolojik afetlere duyarlılığını analiz etmiş; bu afetlere karşı alınabilecek önlemleri belirlemek amacıyla çok yönlü bir yaklaşım benimsemiştir. Plan, İl Afet ve Acil Durum Müdürlüğü koordinasyonunda; üniversiteler, kamu kurumları ve sivil toplum kuruluşlarının katkısıyla oluşturulmuş, Sendai Çerçevesi ve Türkiye Afet Müdahale Planı (TAMP) esas alınarak uygulanabilir bir çerçeve sunmuştur. Eylem planlarıyla, afetlerden önce risklerin en aza indirilmesi ve afet sonrası müdahale ihtiyaçlarının azaltılması hedeflenmektedir.

Özer ve arkadaşlarının (2022) çalışmasında, Erzurum ve çevresindeki neotektonik ve yapısal özellikler farklı jeofizik parametreler üzerinden incelenmiştir. Çalışmada, bölgedeki sismotektonik özelliklerin b-değeri, manyetik anomali, Curie noktası derinliği (CPD), P-dalgası hızı (Vp) ve Vp/Vs oranı gibi parametrelerle ilişkisi değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, özellikle Ilıca, Pasinler, Karlıova ve Karaçoban bölgelerinde düşük Vp değerlerinin yüksek manyetik anomaliyle uyum gösterdiğini ortaya koymuştur. Ayrıca, b-değerindeki değişimlerin bölgesel deprem tehlikeleriyle ilişkili olduğu belirtilmiş ve bu parametrelerin bir arada değerlendirilmesinin bölgedeki jeotermal ve tektonik süreçlerin daha iyi anlaşılmasına katkı sağladığı belirtilmiştir.

Birinci ve arkadaşlarının (2022) çalışmasında, Erzurum ilinin coğrafi özellikleri fiziki, beşeri ve iktisadi yönlerden detaylı bir şekilde ele alınmıştır. Araştırma kapsamında il 20 farklı yöre başlığı altında incelenmiş ve her birinin çevre-insan etkileşimi bağlamında karşılaştırmaları yapılmıştır. Bulgular, Erzurum'un geniş arazi yapısının doğal kaynak kullanımı, tarım ve hayvancılık faaliyetleri ile kentleşme süreçlerine etkisini ortaya koymuştur.

Çelebi ve arkadaşlarının (2023) çalışmasında, Erzurum'un Oltu ilçesinde yer alan Oltu Rus Kilisesi'nin deprem davranışı, yapısal dinamik özellikler bağlamında analiz edilmiştir. Çalışmada, kilisenin modsal parametreleri ve zemin dinamik özellikleri çeşitli yöntemlerle belirlenmiştir. Mikrotremor yöntemi kullanılarak kilisenin çevresi ve iç mekan zemin hakim frekansının yaklaşık 3 Hz olduğu, zemin büyütme faktörünün ise 2.5 ile 3 arasında değiştiği tespit edilmiştir. Sonlu eleman modeli kullanılarak yapılan analizler, tarihi yapılar için restorasyon süreçlerinde mühendislik yaklaşımlarında multidisipliner çalışmanın önemini göstermektedir.

Küçükuğurlu'nun (2024) çalışmasında, 19. yüzyılda Erzurum'da meydana gelen büyük depremlerin etkileri, görgü tanıklarının anlatımları ve Osmanlı arşivlerindeki belgeler doğrultusunda incelenmiştir. Çalışmada, Erzurum'un volkanik arazideki yapısı nedeniyle depremlerden ciddi şekilde etkilendiği, özellikle kent merkezinde zararın daha belirgin olduğu ortaya konulmuştur.

Karslı ve Bayrak (2024), Erzurum'un Yakutiye ilçesine bağlı Hilalkent Mahallesi'nin zemin dinamik özellikleri, tek istasyonlu mikrotremor ölçümleri ile detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Çalışma kapsamında, 49 farklı noktada mikrotremor ölçümleri gerçekleştirilmiş ve zemin hakim frekansı ile büyütme faktörü değerleri hesaplanmıştır. Araştırma, özellikle bölgenin batı kesiminde daha düşük Vs_{30} değerleri ve yüksek Kg (sismik hasar görebilirlik indeksi) tespit ederek, bu alanların deprem sırasında daha yüksek risk taşıdığını vurgulamıştır.

Saraç ve arkadaşlarının (2024) çalışmasında, Atatürk Üniversitesi merkez kampüsünde zemin dinamik parametreleri, mikrotremor yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Çalışma kapsamında, kampüste belirlenen 45 ölçüm noktasında HVSR analizleri yapılmış ve zemin hakim frekansı ile zemin büyütme faktörü değerleri hesaplanmıştır. Bulgular, kampüsün güneydoğusunda düşük zemin hakim frekansları ve yüksek zemin büyütme faktörleri gözlemlendiğini, kuzeydoğuda ise bu değerlerin tersine olduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca Kg değerleri hesaplanarak, güneydoğu kesiminin zayıf zemin özellikleri nedeniyle deprem riski açısından kritik olduğu belirtilmiştir. Çalışma, pasif yöntemlere dayalı bulguların aktif jeofizik yöntemlerle desteklenmesi gerektiğini vurgulamaktadır.

Sarıgül ve arkadaşlarının (2024) çalışmasında, Erzurum'un Palandöken ve Yakutiye ilçelerindeki zemin büyütme özellikleri, mikrotremor yöntemi ve bir boyutlu eşdeğer lineer analiz yöntemiyle detaylı bir şekilde incelenmiştir. Çalışmada 25 farklı ölçüm noktasından mikrotremor verileri toplanmış, bu veriler HVSR yöntemiyle analiz edilerek zemin hakim periyodu, zemin büyütme faktörü ve Kg değerleri hesaplanmıştır. Bulgular, özellikle alüvyon zeminlerde yüksek büyütme ve uzun periyot değerlerinin, zemin performansı üzerinde olumsuz etkiler yaratabileceğini ortaya koymuştur.

Çalışma Alanının Tanımı

Abdurrahman Gazi Türbesi’nin Tarihçesi ve Önemi

Erzurum'un güneydoğusunda, Palandöken Dağı'nın eteklerinde konumlanan Abdurrahman Gazi Türbesi, İslam ordularının Anadolu'ya yönelik seferleri sırasında şehit düştüğüne inanılan Abdurrahman Gazi'ye atfedilmektedir. Halk arasında yaygın bir inanışa göre, Abdurrahman Gazi, Hz. Muhammed'in sancaktarlığını yapmış ve Erzurum'un fethi sırasında şehit olmuştur. (URL-1).

Türbenin inşa tarihi kesin olarak bilinmemekle birlikte, 1796 yılında dönemin Erzurum Valisi Yusuf Ziya Paşa'nın eşi Ayşe Hanım tarafından yeniden yaptırıldığı ve yanına bir cami ilave edildiği bilinmektedir. Türbenin giriş kapısının üzerindeki kitabe, Hattat Salim'in eseridir. Türbe içerisinde yer alan Abdurrahman Gazi Hazretleri’nin makamı 4,85 m uzunluğundadır (Şekil 1; URL-2).



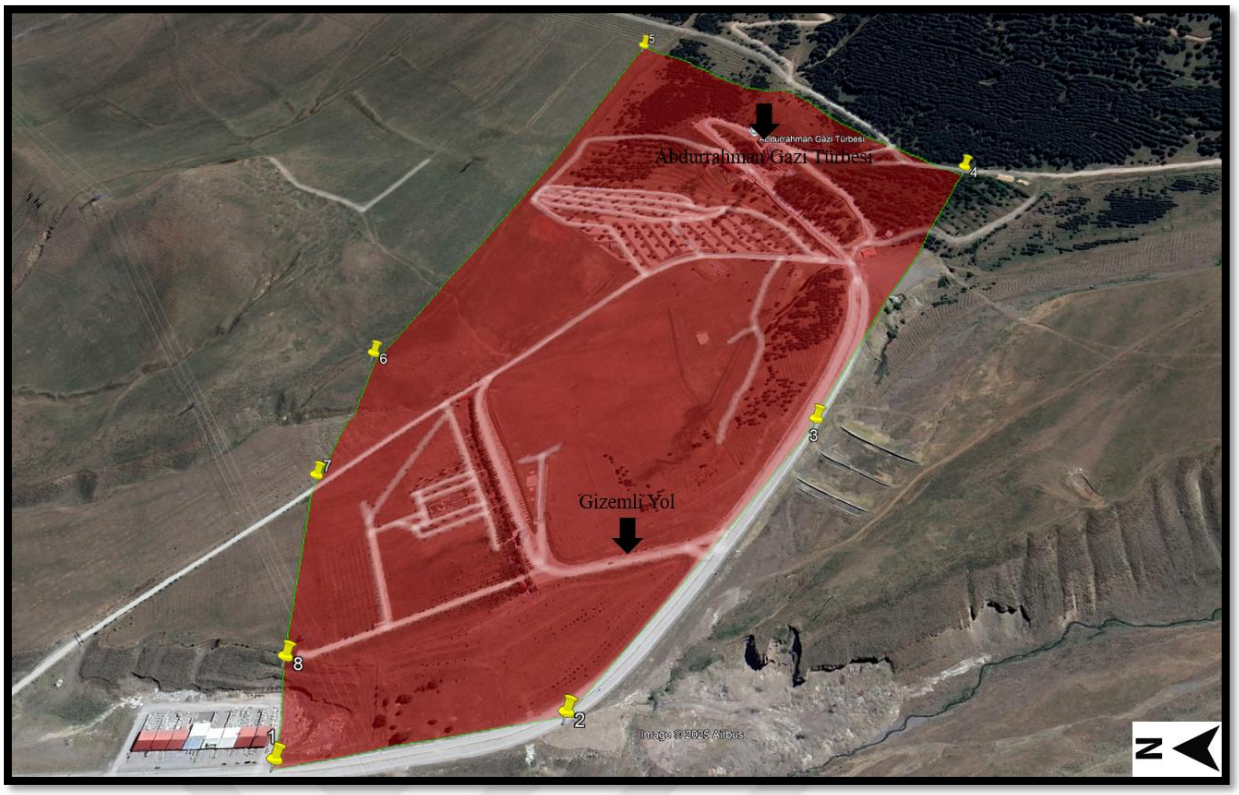
Şekil 1. Abdurrahman Gazi Türbesi genel görünüm

Erzurum'un önemli sembollerinden biri olan Abdurrahman Gazi Türbesi, bölgeye gelen ziyaretçiler için manevi bir durak niteliğindedir. Türbede medfun olduğu düşünülen Abdurrahman Gazi'nin kimliği üzerinde tarihçiler ve araştırmacılar arasında çeşitli görüşler bulunmaktadır. Bazı kaynaklar, Abdurrahman Gazi'yi Sahabe-i Kiram'dan bir şahsiyet olarak tanımlarken, diğer bazıları onun Erzurum'un İslam topraklarına katılmasında etkili bir komutan olduğunu ifade etmektedir (Gürbüz, 2016). Türbenin tarihsel bağlamı incelendiğinde, Abdurrahman Gazi'nin Hz. Peygamber'in bayraktarı olarak anılan Ebu Abdurrahman Habib b. Mesleme el-Fihrî olabileceği düşünülmektedir. Habib b. Mesleme, Erzurum'un fethi sırasında stratejik başarıları ile tanınmış bir komutandır. Bazı tarihsel kayıtlarda, onun Bizans İmparatorluğu'na karşı düzenlenen seferlerdeki etkin rolü ve Erzurum'daki yönetimi sırasında Müslüman toplumun inşa sürecine yaptığı katkılar vurgulanmaktadır (Gürbüz, 2016).

Türbe, şehir merkezinden uzakta, bir tepenin yamacında konumlanmıştır. Bu durum, Bizans saldırıları ve diğer siyasi çalkantılar nedeniyle türbenin güvenlik gerekçesiyle taşınmış olabileceği ya da ata ruhlarına saygı çerçevesinde Türk kültürüne uygun bir seçim olduğu düşüncelerini akla getirmektedir (Berkli, 2007; Gürbüz, 2016). Türbenin dört metre uzunluğundaki sandukası, Abdurrahman Gazi'ye duyulan hürmet ve onun uzun boylu olması gibi özellikler dikkate alınarak yapılmış olabileceği düşünülmektedir. Türbe ve çevresindeki yapılar, Erzurum'un manevi değerleri arasında önemli bir yer teşkil etmektedir.

Çalışma Alanının Topografik ve Jeolojik Özellikleri

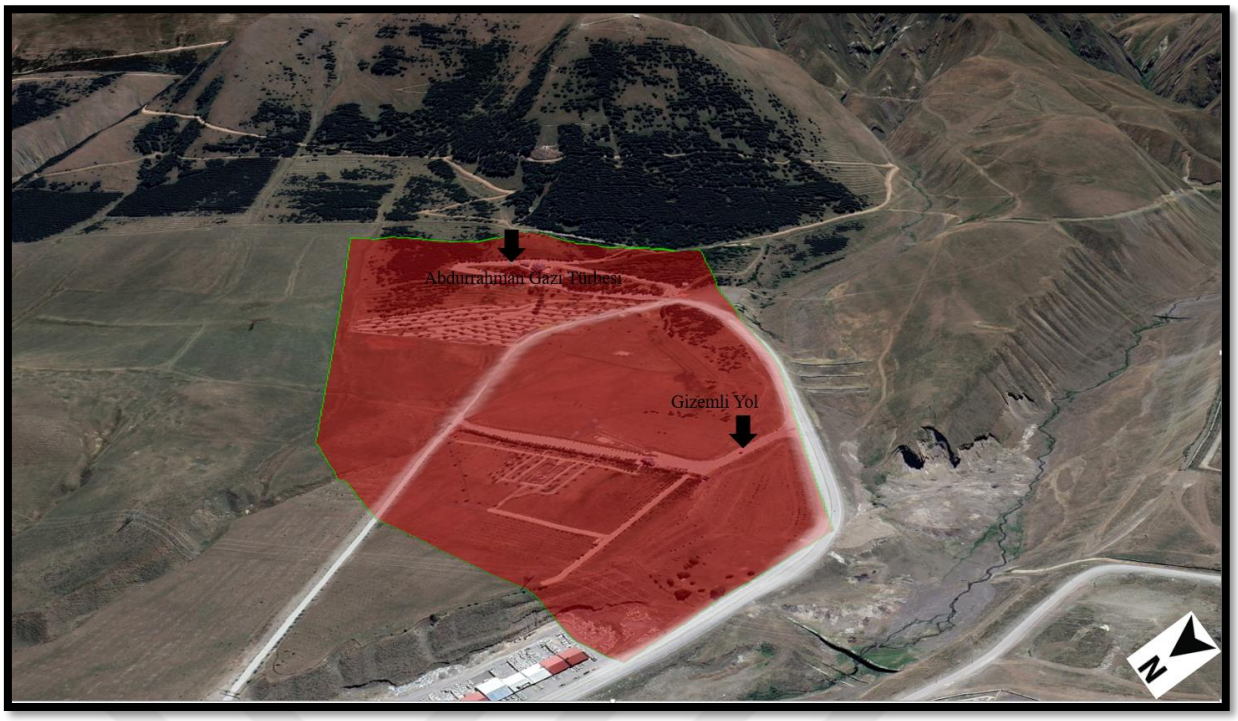
Araştırma sahası, Erzurum ili Palandöken ilçesine bağlı Maksut Efendi Mahallesi sınırları içinde bulunmakta ve şehir merkezine yaklaşık 2.5 km uzaklıkta yer almaktadır. Toplam yüzölçümü 41.4 hektar olan çalışma alanının çevresi 2.65 kilometre uzunluğundadır. Tablo-1'de gösterilen koordinatlar içerisinde arazi çalışmaları yapılmıştır (Şekil 2).



Şekil 2. Çalışma Alanına Ait Sınır Noktaları

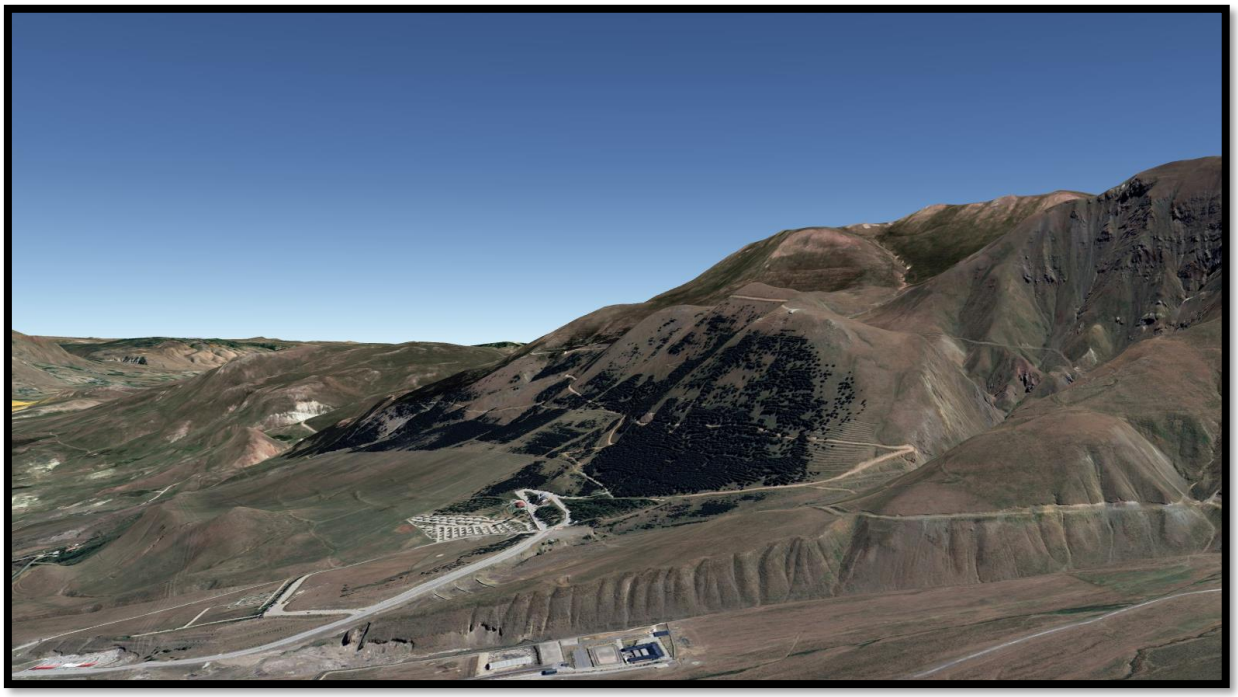
Tablo 1. Çalışma Alanına Ait Sınır Koordinatlar (UTM WGS 84 37 ZON)

Sıra No	X Koordinat	Y Koordinat
1	696963	4417237
2	696985	4416996
3	697281	4416770
4	697647	4416570
5	697982	4416956
6	697463	4417249
7	697280	4417273
8	697055	4417248

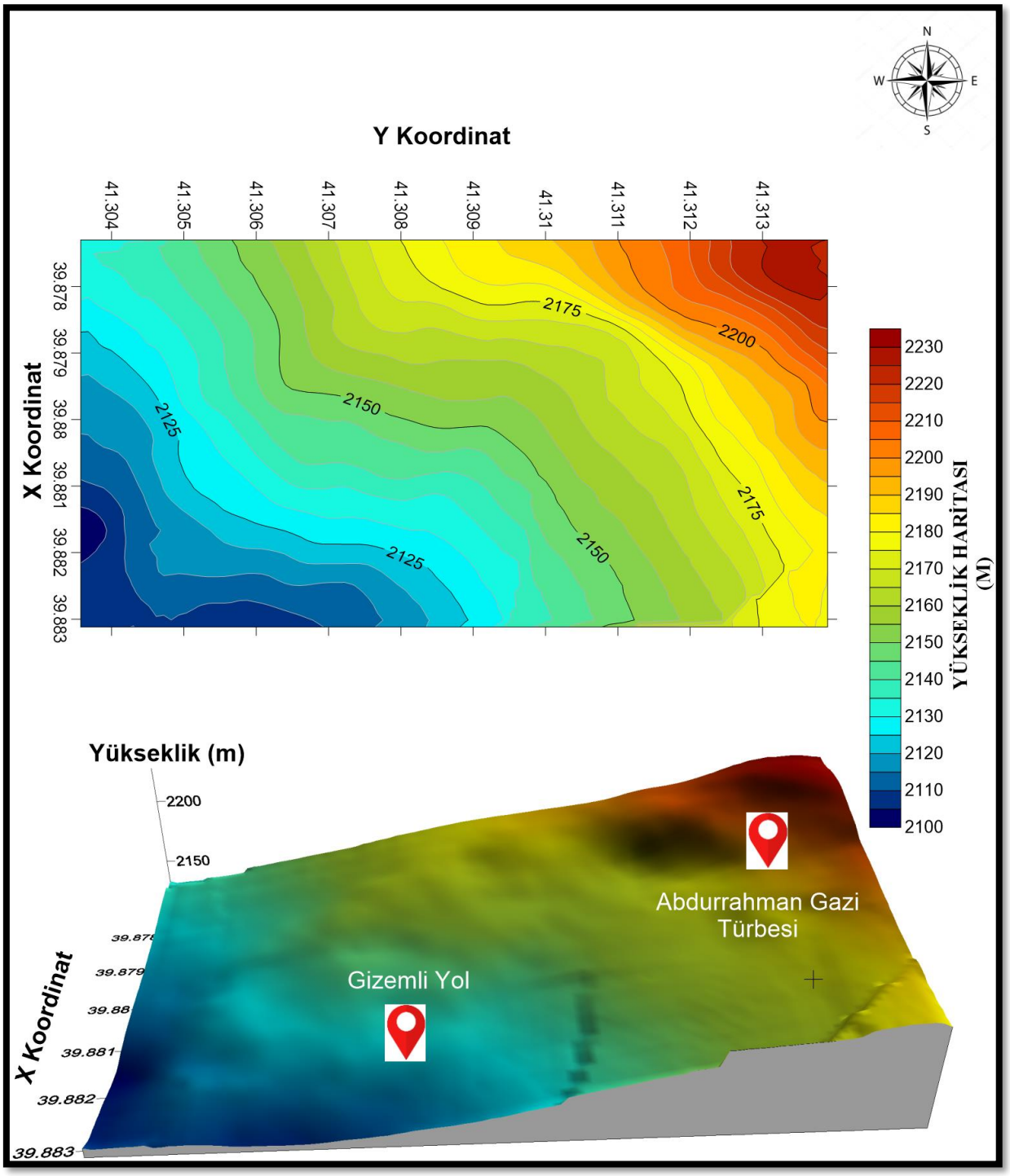


Şekil 3. Çalışma alan sınırı (Google Earth, 2025)

Çalışma alanı sınırlarında, Google Earth programı kullanılarak eş yükselti eğrileri oluşturulmuş ve topoğrafik eğim haritası üretilmiştir. Analiz sonucunda, çalışma alanındaki yükselti değerlerinin 2100 m ile 2230 metre arasında değiştiği, bölgedeki ortalama eğimin ise yaklaşık %26 olduğu tespit edilmiştir (Şekil 5).



Şekil 4. Çalışma alanı topografya gösterimi (Google Earth)



Şekil 5. Abdurrahman Gazi Türbesi ve çevresinin 2B'lu ve 3B'lu Topoğrafyası

1. Erzurum İli ve Çalışma Alanının Genel Jeolojisi

Erzurum, Türkiye'nin Doğu Anadolu Bölgesi'nde yer almakta olup, hem tektonik hem de jeolojik açıdan karmaşık bir yapıya sahiptir. Bölge, Arap levhası ile Avrasya levhası arasında sıkışma rejimi altında bulunmakta ve bu durum, KAFZ, DAFZ ve KDAFZ gibi büyük fay zonlarının oluşumuna neden olmuştur (Şengör ve Yılmaz, 1981). Bu aktif fay sistemleri, Erzurum bölgesindeki depremselliğin temel nedenlerini oluşturmaktadır. Bölgedeki sıkışma

rejimi ve levha hareketleri, hem yüzey deformasyonlarına hem de zemin stabilitesini etkileyen önemli jeoteknik problemlere yol açmaktadır.

Erzurum ve çevresindeki tektonik yapılar, bölgedeki sismik aktiviteyi ve yer şekillerini önemli ölçüde etkilemektedir. Yapılan çalışmalar, Erzurum il sınırları içinde dört ana tektonik unsurun varlığını ortaya koymuştur (Koçyiğit ve Canoğlu, 2017): Aşkale Fay Zonu (AFZ), Başköy-Kandilli Fay Zonu (BKFZ), Palandöken Fay Zonu (PFZ) ve Erzurum-Dumlu Fay Zonu (EDFZ). Bu faylar, bölgenin jeolojik yapısını ve yerel sismik riskleri anlamada kritik rol oynamaktadır (Şekil 6).

2. Aşkale Fay Zonu (AFZ),

Batıdan doğuya doğru sıralandığında ilk sırada yer almakta olup, sol yönlü doğrultu atım hareketi göstermektedir. Kocyigit ve Canoglu (2017) tarafından yapılan çalışmalarda, AFZ'nin bölgedeki aktif tektonik hareketleri belirgin şekilde etkilediği ve bu fayın potansiyel deprem riski oluşturabilecek bir özellik taşıdığı belirtilmiştir. Aşkale Fay Zonu'nun hareketinin, yerleşim alanlarını doğrudan etkileyebileceği ve yerel ölçekte sismik aktivitelerin artmasına neden olabileceği vurgulanmaktadır.

3. Başköy-Kandilli Fay Zonu (BKFZ)

Erzurum'un güneydoğusunda yer alan önemli bir fay hattıdır. Sol yönlü doğrultu atımı gösteren bu fay, başta morfolojik değişiklikler olmak üzere, yerel jeolojik yapı üzerinde etkiler yaratmaktadır. Bu fay zonunun doğrultu atım hareketlerinin, bölgedeki yerleşim yerlerinde bazı yapısal zayıflamalara yol açabileceğini ve bu nedenle bölgesel sismik risklerin artabileceğini belirtmişlerdir.

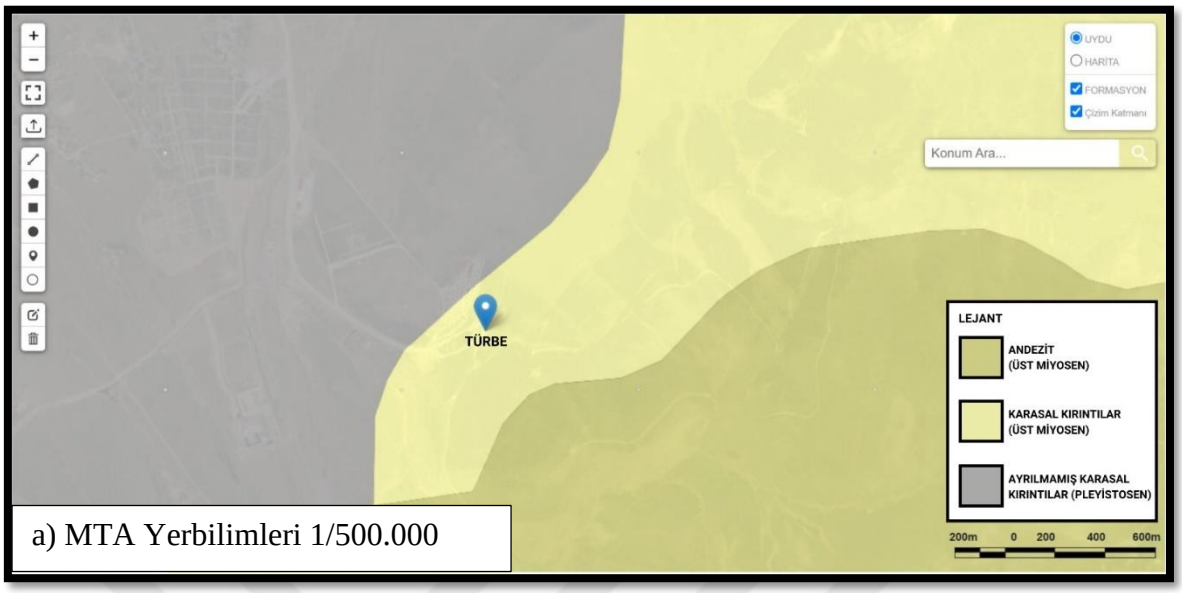
4. Palandöken Fay Zonu (PFZ),

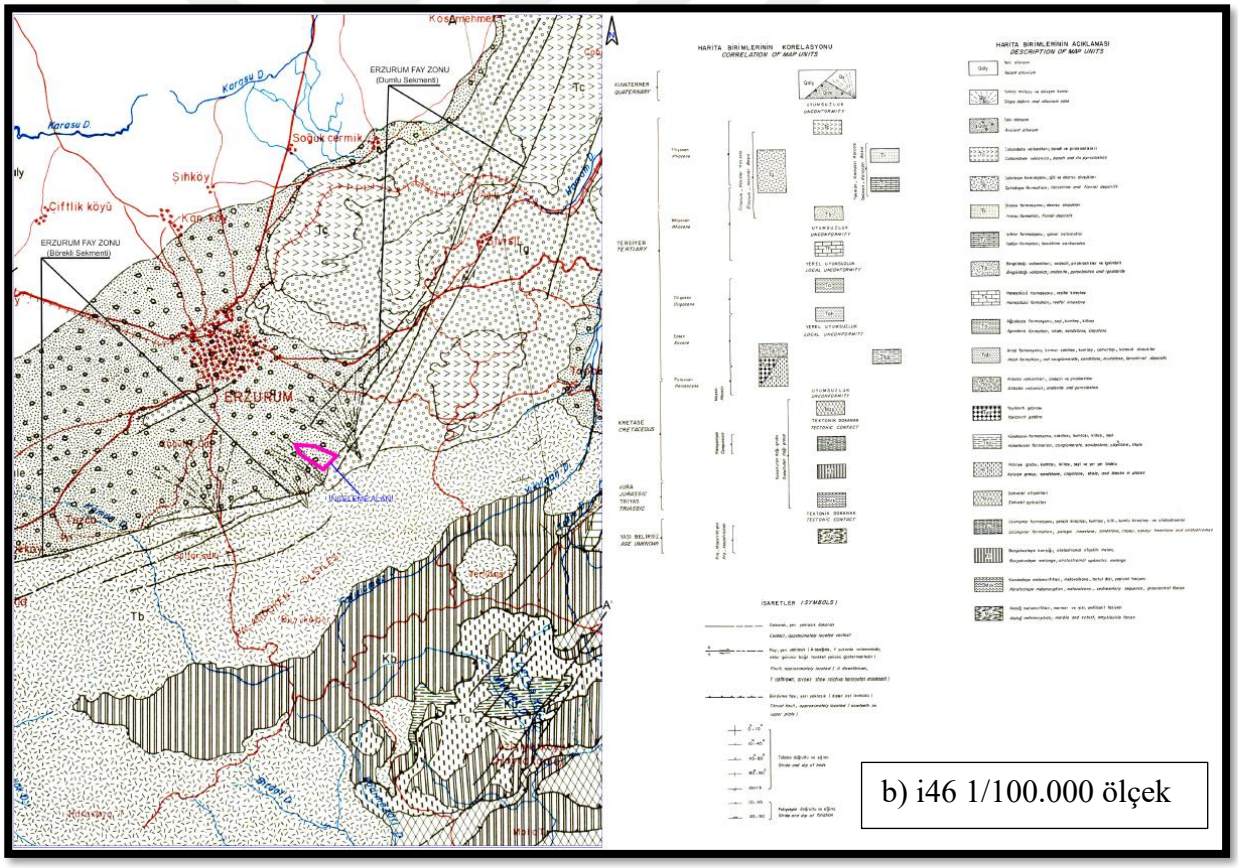
Erzurum'un kuzeydoğusunda yer alan ve sol yanal atımlı ters faylardan oluşan önemli bir tektonik yapıdır. Bu fay, bölgedeki en belirgin tektonik unsurlardan biri olarak, özellikle Palandöken Dağları'nın batı kesimlerinde büyük morfolojik değişiklikler yaratmaktadır. Bu fay hattının etkisi, yerel yerleşim yerlerinde sismik riskleri arttırmakta olup, Kocyigit ve Canoglu (2017), Palandöken Fay Zonu'nun yerel düzeydeki jeolojik yapı üzerindeki etkilerini detaylandırmışlardır.

5. Erzurum-Dumlu Fay Zonu (EDFZ)

Sol yönlü doğrultu atımlı bir fay hattı olarak Erzurum ilinin doğusunu etkileyen büyük bir tektonik unsurdur. Kocyigit ve Canoglu (2017), bu fayın büyük ölçekli yer değişimlerine

neden olabileceğini ve Erzurum çevresindeki sismik tehditlerin boyutlarını daha iyi anlamak için bu zonun ayrıntılı bir şekilde incelenmesi gerektiğini vurgulamaktadır.





Şekil 6. İnceleme Alanı ve Çevresinin Genel Jeoloji Haritası. a) MTA Yerbilimleri 1/500.000 (URL-3), b) i46 pafta 1/100.000 (MTA,1988)

Erzurum ve çevresindeki bu fay zonlarının incelenmesi, bölgedeki sismik tehlikenin değerlendirilmesinde önemli bir yer tutmaktadır. Kocyigit ve Canoglu (2017) yapmış oldukları

çalışmalarda, bu tektonik yapıların bölgedeki yerleşim alanları için potansiyel tehdit oluşturduğunu ortaya koymaktadır.

Erzurum çevresindeki litolojik birimler, zayıf mühendislik özelliklerine sahip kayaçlardan ve kalın alüvyon tabakalarından oluşmaktadır (Ketin, 1966). Özellikle yamaç eğimlerinin yüksek olduğu alanlarda bu litolojik yapı, heyelan oluşumuna elverişli bir ortam sunmaktadır. Palandöken Dağları çevresindeki eğimli topoğrafya ve yoğun kar erimeleri, heyelan riskini daha da artırmaktadır (Atalay, 1987).

Çalışma sahası, MTA'nın Erzurum İ46 paftası sınırlarında yer almaktadır. Şekil 6'da gösterilen 1/100.000 ölçekli genel jeoloji haritasına göre, araştırma alanımız eski alüvyon birimleri, Gelinkaya Formasyonu'na ve Çobandede Volkanitleri'ne karşılık gelmektedir. Alanın kuzeyinden güneyine doğru ilerledikçe zemin özelliklerinin sağlam birimlerden daha zayıf birimlere doğru geçiş yaptığı gözlemlenmiştir. Bu durum, bölgedeki zemin stabilitesinin incelenmesi açısından kritik bir veri sunmaktadır. Farklı litolojik birimlerin varlığı, zemin davranışının hem yerel jeolojik süreçlerden hem de bölgedeki litolojik heterojenlikten etkilendiğini göstermektedir. Bu bağlamda, alanın mühendislik jeolojisi açısından detaylı bir şekilde incelenmesi önem arz etmektedir.

6. Gelinkaya Formasyonu

Gelinkaya Formasyonu, karasal bir birim olup, boz renkli tüfitlerin yanı sıra çakıltaşı, kumtaşı, kiltaşı ve marn ardalanmasından meydana gelmektedir. Bu formasyon, ilk kez Arpat (1965) tarafından tanımlanmış ve daha sonraki araştırmalarda da kabul görmüştür. İnceleme alanında, formasyonun kuzeydoğu ve güneydoğu kesimlerinde iki ayrı alanda yüzeylendiği gözlemlenmiştir. Kuzeydeki yüzeylenimi, Toprakkale Köyü'nün doğusundan başlayarak Ovacık Nahiyesi'ne doğru genişlerken, güneydeki yüzeylenimi Gelinkaya Köyü'nden başlayarak Erzurum Ovası'na (Daphan Ovası) kadar ulaşmaktadır (Timur, 2000).

Gelinkaya Formasyonu, çakıltaşı, kumtaşı, kiltaşı, marn ve tüfitlerin ardalanmasından oluşmaktadır. Çakıltaşları, tane boyu açısından çakılcık boyutundan blok boyutuna kadar değişim göstermekte ve genellikle Ziyarettepe Volkanitleri'nden türemiştir. Kumtaşlarında ise normal derecelenme, teknemsi yapılar ve çapraz tabakalanma gibi özellikler dikkat çeker. Kiltaşları, boz renkli olup paralel laminalıdır ve karbonat oranının yüksek olduğu bölgelerde marnla geçişli yapılar oluşturmaktadır (Timur, 2000).

Formasyon içerisinde Ulmus carpinoides, Alnus miolgiponica ve Zelkova ungeri gibi fosillere rastlanmıştır. Bu fosil topluluğu, formasyonun Üst Miyosen-Pliyosen (muhtemelen

Pliyosen) yaşına işaret etmektedir. Birimin litofasiyes özellikleri ve birincil sedimenter yapıları, çökelmenin göl ve akarsu ortamlarında gerçekleştiğini göstermektedir (Timur, 2000).

7. Çobandede Volkanitleri

Çobandede Volkanitleri, ağırlıklı olarak bazaltlardan oluşan Pliyosen ve daha genç volkanik kayaçları içermektedir. İlk olarak Tokel (1965) tarafından Çobandede bazaltları ve Akkuş (1965) tarafından Kargapazarı bazaltları olarak adlandırılmıştır. Ancak, birimdeki piroklastik düzeylerin önemini vurgulamak ve daha kolay telaffuz edilmesi amacıyla bu kayaçlar "Çobandede Volkanitleri" olarak yeniden adlandırılmıştır. Özellikleri ve konumları açısından, Karayazı volkanitleri ile karşılaştırılabilir niteliktedir (Demirtaş ve arkadaşları, 2010).

Bu volkanitler, koyu siyah ve kahverengi tonlarında olup genellikle gaz boşlukları ve soğuma eklemleri içeren lav akıntıları şeklindedir. Lavlar akma dokusu sergilerken, bazaltlar plajiyoklas mikrolitlerinin yoğun olduğu bir hamur içerisinde olivin, hornblend, ojit, andezin-labrador arasında değişen plajiyoklas çubukları ve opak mineraller barındırır (Demirtaş ve arkadaşları, 2010).

Çalışma alanında yer alan Abdurrahman Gazi Türbesi ve çevresinin jeolojik yapısının, Şekil 6.'da gösterilen 1/100.000'lik İ46 pafatasında, eski alüvyon birimleri ve sahadaki geçilen formasyonlar hakkında önemli bilgiler sunmaktadır. Şehir merkezi, ayrışmamış karasal kırıntılardan (kum, çakıl, silt, kil vb.) oluşurken, türbenin bulunduğu alanın benzer bir şekilde karasal kırıntılardan meydana geldiği anlaşılmaktadır. Bununla birlikte, Palandöken Dağı'na doğru ilerledikçe andezit birimlerinin sıkılaştığı görülmektedir. Andezitik yapıların ortaya çıkışı, volkanik faaliyetlerin ve bölgedeki tektonik hareketlerin bir göstergesi olarak değerlendirilmektedir.

Çalışma alanında, Şekil 7.'de gösterilen kırmızı renk taralı alan olası aktif heyelan sahası olarak değerlendirilmiş olup, bu saha çalışma alanına yaklaşık 1.90 km mesafededir. Ayrıca, çalışma alanı Erzurum Fay Zonu'nun Dumlu Segmenti'ne yaklaşık 1.50 km, Börekli Segmenti'ne hattına ise yaklaşık 2 km uzaklıktadır. Bu durum, çalışma alanının hem heyelan hem de sismik tehlike açısından yüksek risk potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir.



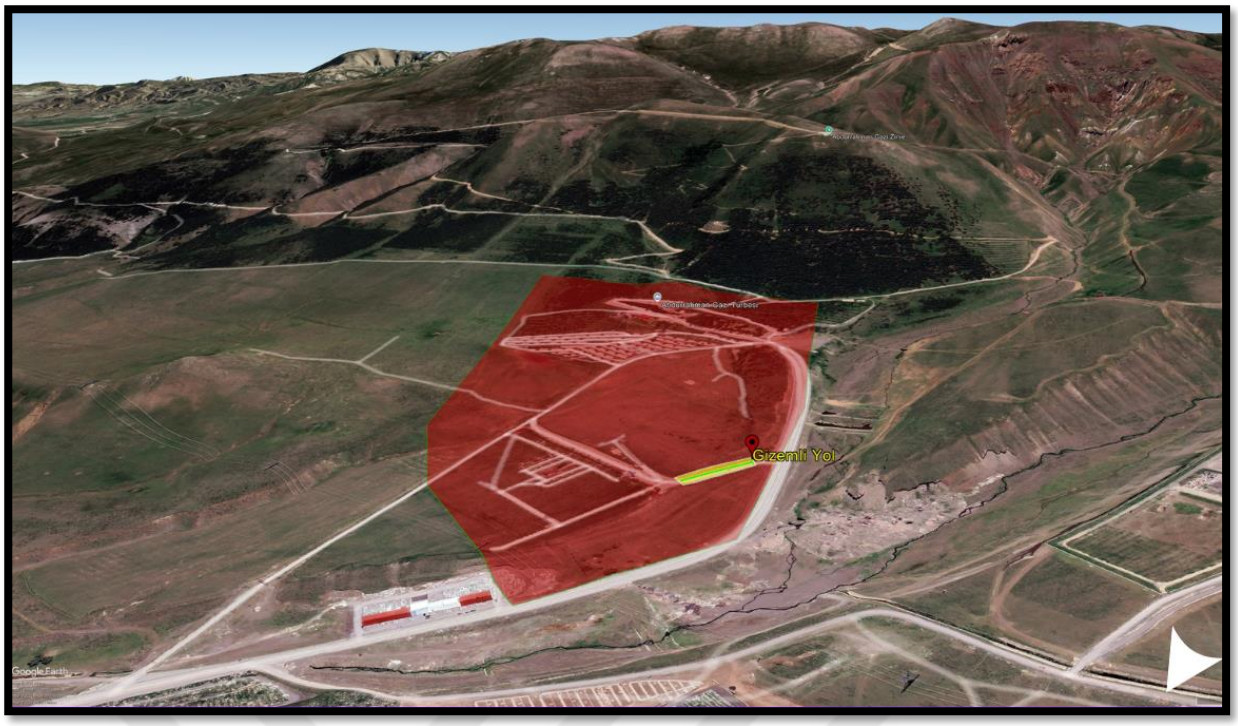
Şekil 7. İnceleme alanın EDFZ'a olan uzaklığı. Kırmızı çizgiler fay bilgilerini temsil etmektedir (diri faylar Emre vd., 2013'den alınmıştır).

Dumlu Segmenti, genel olarak K30ºD doğrultusunda uzanmakta olup, Tortum'un güneyindeki Şenyurt'tan Erzurum'un doğusunda yer alan Sütevleri'ne kadar devam etmektedir. Bu segmentin, Mw 6.90 büyüklüğünde bir deprem üretme potansiyeline sahip olduğu değerlendirilmektedir (Kürçer, 2024). Erzurum şehir merkezi ve çevresi, büyük ölçüde eski alüvyon tabakaları, Karasu Nehri'nin güncel alüvyon çökelleri ve alüvyon yelpazeleri üzerine inşa edilmiştir. Bu tür genç ve suya doygun zeminler üzerine kurulu yerleşim alanlarında, depremler sırasında sıvılaşma ve yanal yayılma gibi etkiler nedeniyle ciddi hasarlar oluşturabileceği öngörülmektedir (Güler, 2023).

Sütevler Hendeği'nde yapılan kazılarda, EDFZ üzerinde son 8300 yıl içinde iki depremin meydana geldiği belirlenmiş ve bu depremler radyokarbon yöntemi kullanılarak tarihlendirilmiştir. Ayrıca, EDFZ'nda son 5500 yıl içinde herhangi bir deprem izine rastlanmaması, bu segmentin gelecekte deprem üretme riskinin artabileceğine işaret etmektedir. (Güler, 2023)

Gizemli Yolun Tanımı ve Yerleşimi

Abdurrahman Gazi Türbesi ve çevresindeki dikkat çekici unsurlardan biri de yerel halk tarafından "Gizemli Yol" olarak adlandırılan yapıdır (Şekil 8.). Bu yolun işlevi ve geçmişi hakkında kesin bilgilere ulaşılamamaktadır. Bölgeye gelen ziyaretçiler arasında merak uyandıran bu yapı, bulunduğu konum itibariyle dikkat çekmektedir.



Şekil 8. Gizemli Yolun Çalışma Alanı İçerisindeki Görünümü (sarı çizgi ile)

Yolun türbeye yakınlığı, geçmiş dönemlerde bölgeyi ziyaret edenler için bir bağlantı noktası olabileceğine dair ipuçları vermektedir. Bununla birlikte, bu yapının sadece bir geçit mi yoksa başka bir amacı olan daha özel bir yol mu olduğuna dair netlik bulunmamaktadır. Yolun yapısı ve çevresindeki doğal unsurlar incelendiğinde, insan eliyle oluşturulmuş olabileceği ya da doğal yollarla şekillenmiş bir oluşum olabileceği olasılıkları üzerinde durulmaktadır.

Gizemli Yol ya da bir diğer ismiyle Manyetik Yol'un en dikkat çekici özelliği, Abdurrahman Gazi Türbesi'ne olan yakınlığıdır (Şekil 9). Halk arasında, bu olayın türbenin manevi gücüyle ilişkilendirildiğine dair inançlar bulunmaktadır. Özellikle Abdurrahman Gazi'nin, İslam tarihi ve bölgesel efsaneler açısından önemli bir figür olması, bu tür inançların ve hikayelerin yaygınlaşmasına zemin hazırlamaktadır. Türbenin çevresi ve Gizemli Yol, inanç turizmi kapsamında değerlendirilebilecek önemli bir destinasyon olarak öne çıkmaktadır. (İskender, 2023).

Çalışma alanı içerisindeki bu yol, araçların motor kapalıyken yokuş yukarı hareket ettiği izlenimi yaratmaktadır. Fenomen yol, fiziksel bir gerçeklikten ziyade bir optik illüzyona dayalı olduğu düşünülmektedir. Bölgedeki yolların eğimi, çevresel referans noktalarının eksikliğiyle birleşerek bir optik yanılsama yaratmaktadır. Göz yanılması, insanların yerçekimine aykırı bir durum algılamasına neden olur. Optik illüzyonun temel nedeni ise çevredeki eğimlerin yanıltıcı şekilde algılanmasıdır. İnsan gözünün ufuk çizgisini doğru algılayamaması, yerçekimine aykırı bir hareket olduğu izlenimini yaratır. Bunun en önemli nedeni, çevredeki dağlar, ağaçlar ve yol kenarındaki topografik şekillerin, eğimi olduğundan farklı göstermesidir. Benzer durumlar,

2003 yılında yapılan bir çalışmada, Padova ve Pavia Üniversiteleri araştırmacıları tarafından "optik yanılsamalar" kapsamında incelenmiştir. Çalışmada, ufuk çizgisinin eksikliği ve çevresel unsurların göz yanıltıcı etkileri deneysel olarak doğrulanmıştır (Clark, 2003).

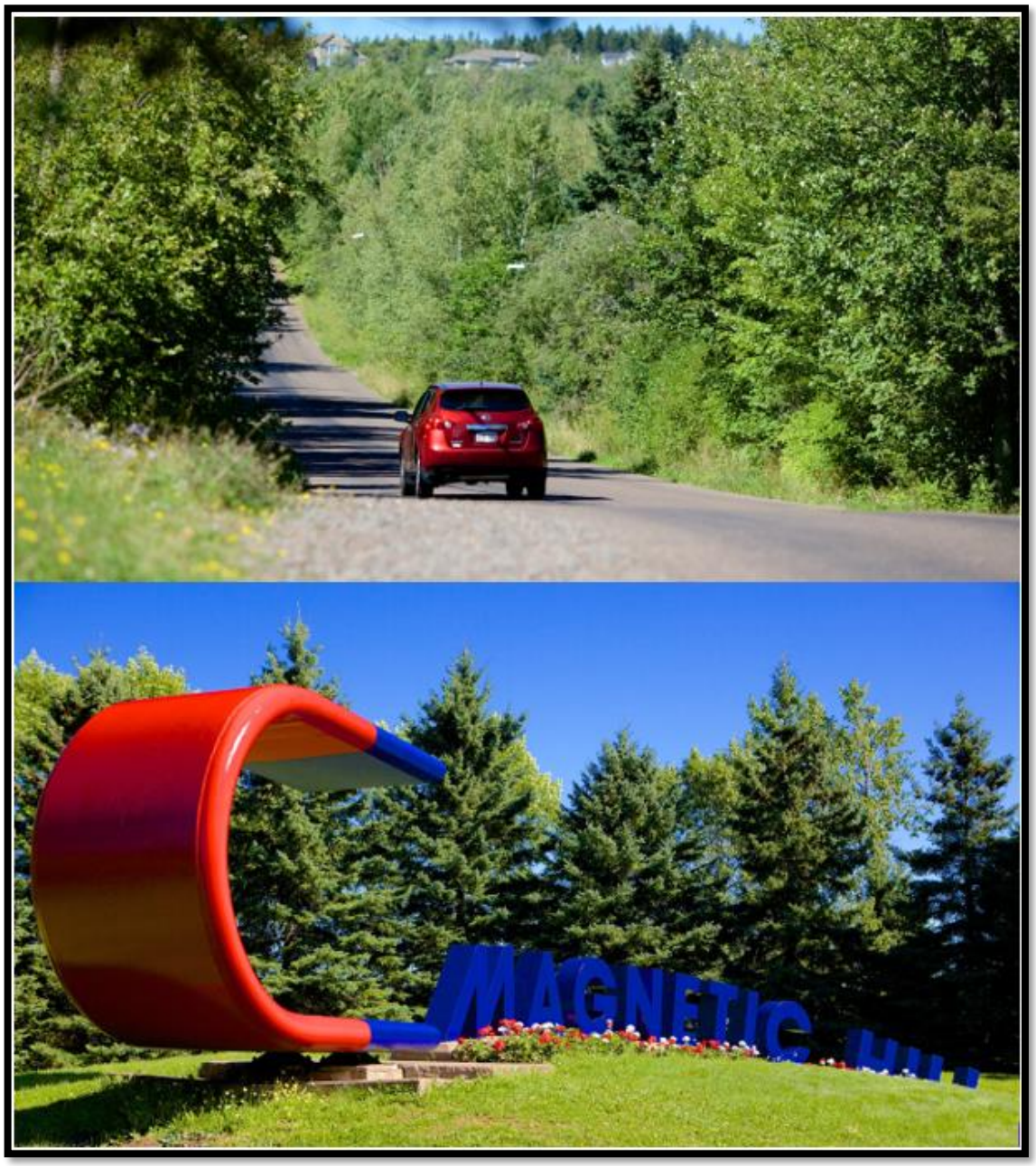


Şekil 9. Erzurum'da bulunan Gizemli Yol'dan bir görünüm

Fenomen yolun Erzurum'a özgü bir olay olmadığı ve dünyanın farklı yerlerinde de bu benzer optik illüzyonların yaşandığı görülmektedir. Bu tür gizemli yollar "Gravity Hill" veya " Magnetic Hill" olarak adlandırılmaktadır

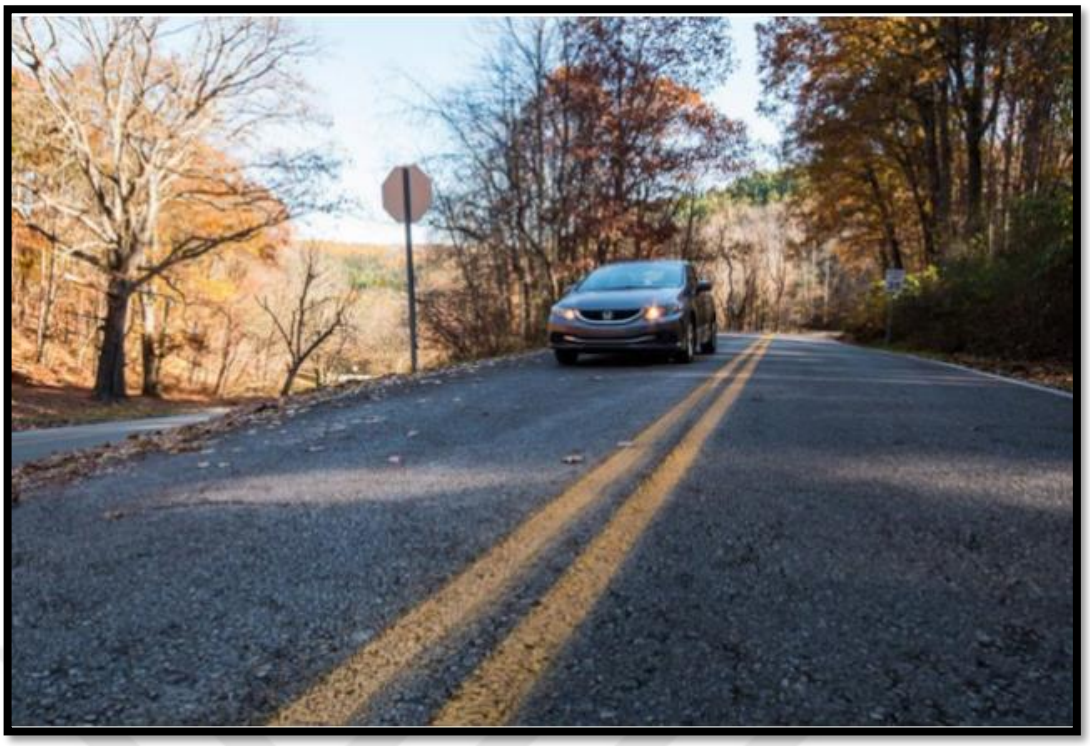
Dünyadaki diğer örnekleri;

- **Magnetic Hill, Kanada**: New Brunswick eyaletinde bulunan bu yol, araçların yokuş yukarı hareket ediyormuş gibi göründüğü bir optik illüzyona sahiptir (Şekil 10).



Şekil 10. Kanada Gizemli Yol (URL-4)

- **Gravity Hill, ABD**: Pensilvanya'da yer alan bu yol, benzer şekilde araçların yokuş yukarı hareket ettiği izlenimini verir (Şekil 11).



Şekil 11. ABD Pensilvanya Gizemli Yol (URL-5)

- **Magnet Hill, Hindistan**: Ladakh bölgesindeki bu yol, araçların motor kapalıyken yokuş yukarı hareket ettiği bir yer olarak bilinir (Şekil 12).



Şekil 12. Hindistan Gizemli Yol (URL-6)

- **Electric Brae, İskoçya**: Ayrshire bölgesindeki bu yol, araçların yokuş yukarı hareket ediyormuş gibi göründüğü bir diğer örnektir (Şekil 13).



Şekil 13. İskoçya Gizemli Yol (URL-7)

Bu tür yolların ortak özelliği, çevresel faktörlerin ve yolun eğiminin birleşimiyle oluşan optik illüzyonlardır. Gerçekte, araçlar yokuş aşağı hareket ederken, çevresel referans noktaları nedeniyle yokuş yukarı gidiyormuş gibi algılanır. Gerek Abdurrahman Gazi Türbesi'ne yakınlığı gerek ise halk tarafından şehirde önemli bir yeri olması sebebiyle Gizemli Yol da çalışma alanına eklenmiş ve bir dizi jeofizik ölçüm bu alanda da gerçekleştirilmiştir.

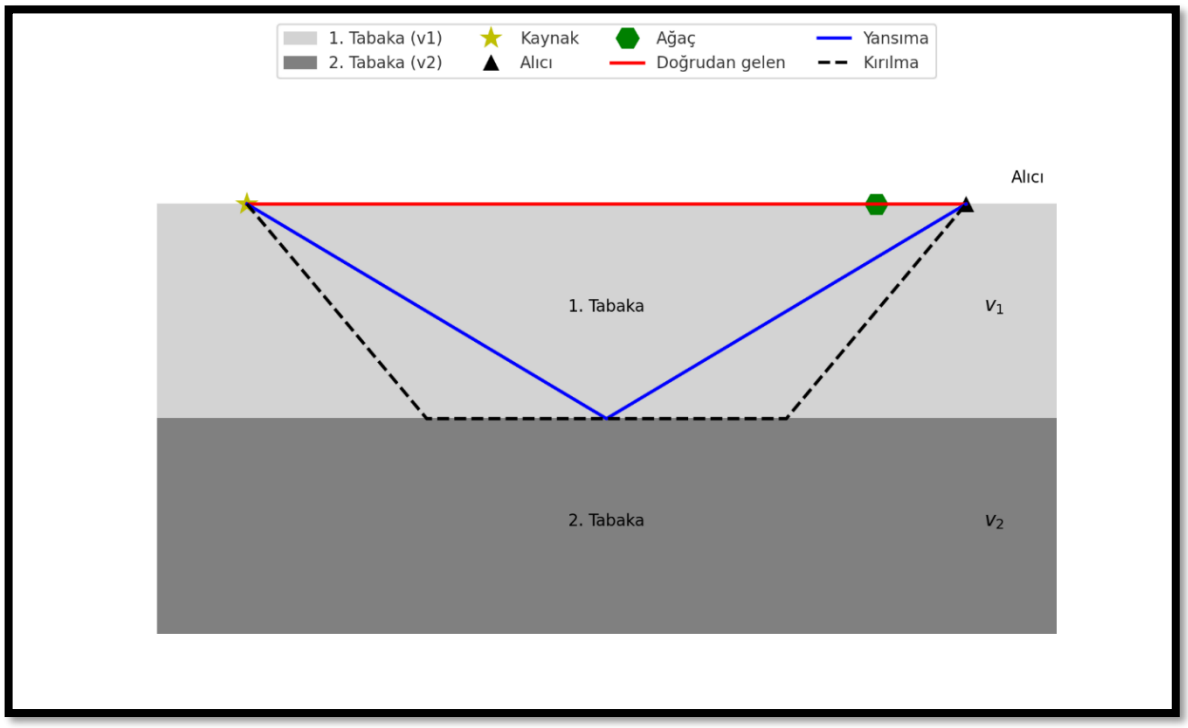
MATERYAL VE YÖNTEM

Kullanılan Yöntemler ve Veri Toplama

Sismik P-Kırılma Yöntemi

Sismik yöntemler, yer altındaki katmanların jeolojik özelliklerini belirlemek için elastik dalgaların yer içinde yayılımını esas alan fizik kurallarına dayanır. Veri toplama ve analiz süreçlerinde hızlı, pratik ve ekonomik bir çözüm sunan bu yöntemler, sismik dalgaların izlediği yollara göre iki ana gruba ayrılır: Sismik kırılma ve Sismik yansıma. Bu yöntemlerin temelini, sismik dalga hızları oluşturur. Sismik dalgaların kırılma ve yansıma özellikleri incelenerek yer altındaki tabakaların derinliği, eğim özellikleri, sismik dalga hızları ile zeminin elastik parametreleri belirlenebilmektedir (Çıvgın, 2019).

Sismik kırılma yöntemi, yüzeye yakın bir noktada veya sığ derinliklerde üretilen sismik dalgaların, yer altında kırılarak ilerledikten sonra yüzeydeki jeofon adı verilen algılayıcılara ulaşma süresinin ölçülmesi esasına dayanır. Bu yöntem, dalgaların yer altındaki katmanlar boyunca izlediği yol ve harcadığı zamanın analiz edilmesiyle yer altı jeolojik yapısının özelliklerini ortaya koymayı amaçlar. Başka bir ifadeyle, bu yöntemle sismik dalgaların yer içinde kat ettiği süre hesaplanmaktadır (Şekil 14).



Şekil 14. Sismik dalgaların yer içerisindeki temsili yayınım yolları

Sismik dalgaların yayılımı, *Huygens, Fermat ve Snell* prensipleri olmak üzere üç temel fizik kuralına dayanmaktadır.

1. Huygens Prensibi

Huygens ilkesine göre, bir dalga yayılırken üzerindeki her nokta, yeni bir dalga kaynakçığı gibi davranarak ilerlemeyi sürdürür ve bu noktadan küresel dalgalar yayılır. Farklı noktalardan yayılan bu dalgalar, birbirleriyle etkileşim sonucu bazı bölgelerde güçlerini birleştirerek daha güçlü hale gelirken, bazı bölgelerde ise birbirlerini zayıflatabilir veya yok edebilir. Eğer dalgalar arasındaki mesafe tam bir dalga boyunun katları kadar ise dalgalar birbirini güçlendirir; ancak mesafe yarım dalga boyu kadar olduğunda dalgalar birbirini sönümler (Keçeli, 2009).

2. Fermat Prensibi

Sismik ışınlar, iki nokta arasında ilerlerken daima en kısa güzergâhı izler. Homojen bir ortamda bu yol doğrusal bir hat şeklinde ilerler. Ancak ışın bir ara yüzeye ulaştığında, tabakalar arasındaki hız farklarına bağlı olarak yüzeyin normali doğrultusunda yön değiştirir. Bu değişim ışının ya normale yaklaşmasına ya da normallerden uzaklaşmasına neden olur. Snell yasası, ışınların bu davranışını açıklayan temel ilke olarak Fermat'ın prensibine dayanır. Snell yasasına göre, ışın ara yüzeye geldiğinde, tabakalardaki hız farklılıkları ve yüzey normaliyle yaptığı açı ışının yeni yönünü belirler (Çıvgın, 2019).

3. Snell Yasası

Snell Yasası, ışığın ya da sismik dalgaların bir ortamdan başka bir ortama geçerken izlediği yolun matematiksel bir ifadesidir. Bu yasa, sismik yöntemlerin temel fiziksel prensiplerinden biridir ve yerbilimlerinde yeraltı katmanlarının özelliklerini anlamada önemli bir rol oynar (Sheriff ve Geldart, 1995).

Snell Yasası, sismik yöntemlerin yanı sıra optik, akustik ve diğer fiziksel sistemlerde de kullanılmaktadır. Ancak jeofizik araştırmalarda yeraltı yapılarının detaylı bir şekilde modellenmesi ve anlaşılmasında vazgeçilmez bir araçtır. Yeraltı katmanlarının dalga hızlarındaki değişimler önemli bilgiler içerir. (Sheriff ve Geldart, 1995).

$$\left(Sin\frac{\text{İ}1}{V1}\right) = \left(Sin\frac{\text{İ}2}{V2}\right) \qquad 4.1$$

eşitliği ile ifade edilir. Burada V sismik dalga hızıdır (Şekil 14)

Ara yüzeye gelen ışın üç yol izleyebilir:

1- İkinci tabakaya geçiş yapıldığında, dalga ara yüzeyin normaline yaklaşarak veya ondan uzaklaşarak ilerler. Bu durum, sismik dalganın kırılması olarak tanımlanır.

2- Eğer gelen dalga, ikinci tabakanın normali ile 90° açı yaparak kırılırsa, bu duruma kritik kırılma denir. Bu koşulda,

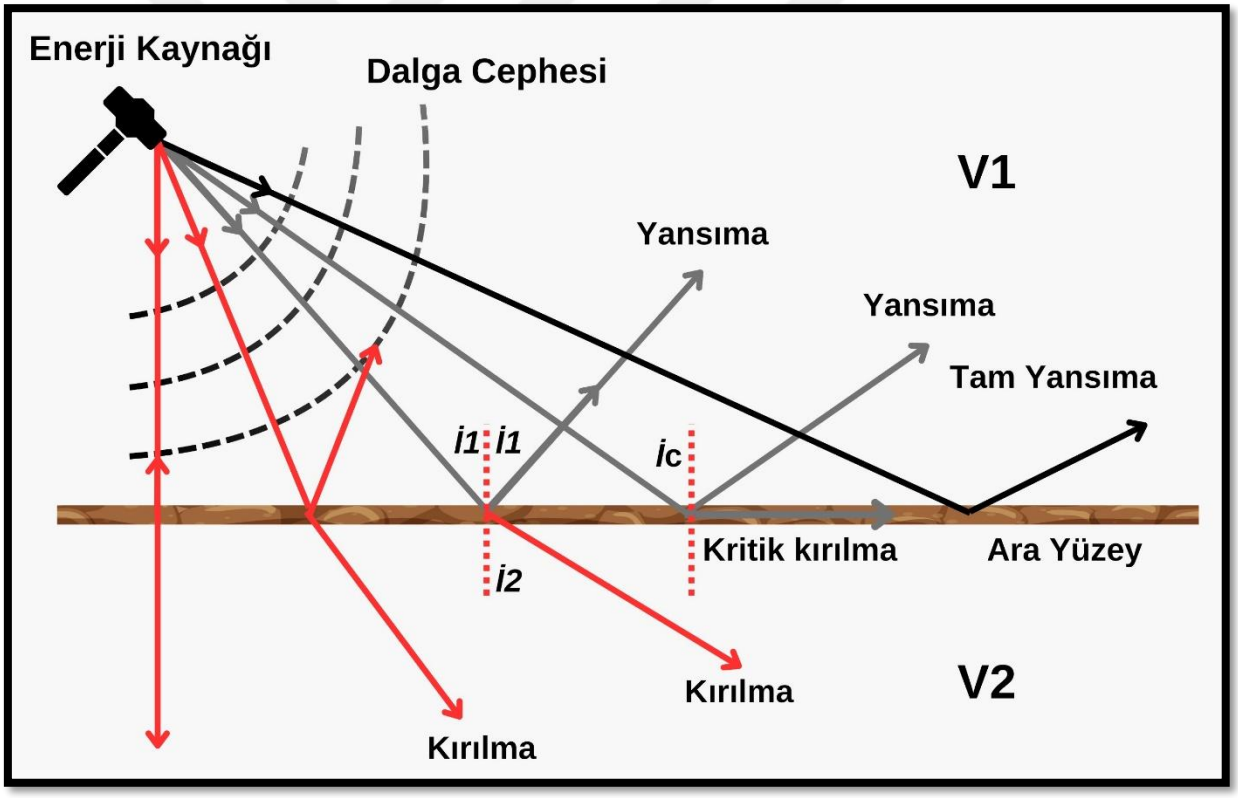
$$Sin\frac{\text{İc}}{V1} = \frac{Sin90}{V2} \qquad 4.2$$

eşitliğini sağlayan geliş açısı, tabakalardaki sismik dalga hızlarının oranına göre

$$\text{İc} = \arcsin\left(\frac{V1}{V2}\right) \qquad 4.3$$

formülüyle hesaplanır ve buna kritik açı denir.

3- Işın, ara yüzeye normal bir açıyla geldiğinde, aynı açıyla yansıyarak ilk yüzeyde ilerler. Bu olay, yansıma olarak adlandırılır. Kritik kırılma mesafesinin ötesinde, tam yansıma gerçekleşir ve gelen dalga tamamen yansır (Şekil 15).



Şekil 15. Bir katman sınırına gelen ışının kırılması ve yansıması (Çıvgın, 2019'dan değiştirilerek alınmıştır.)

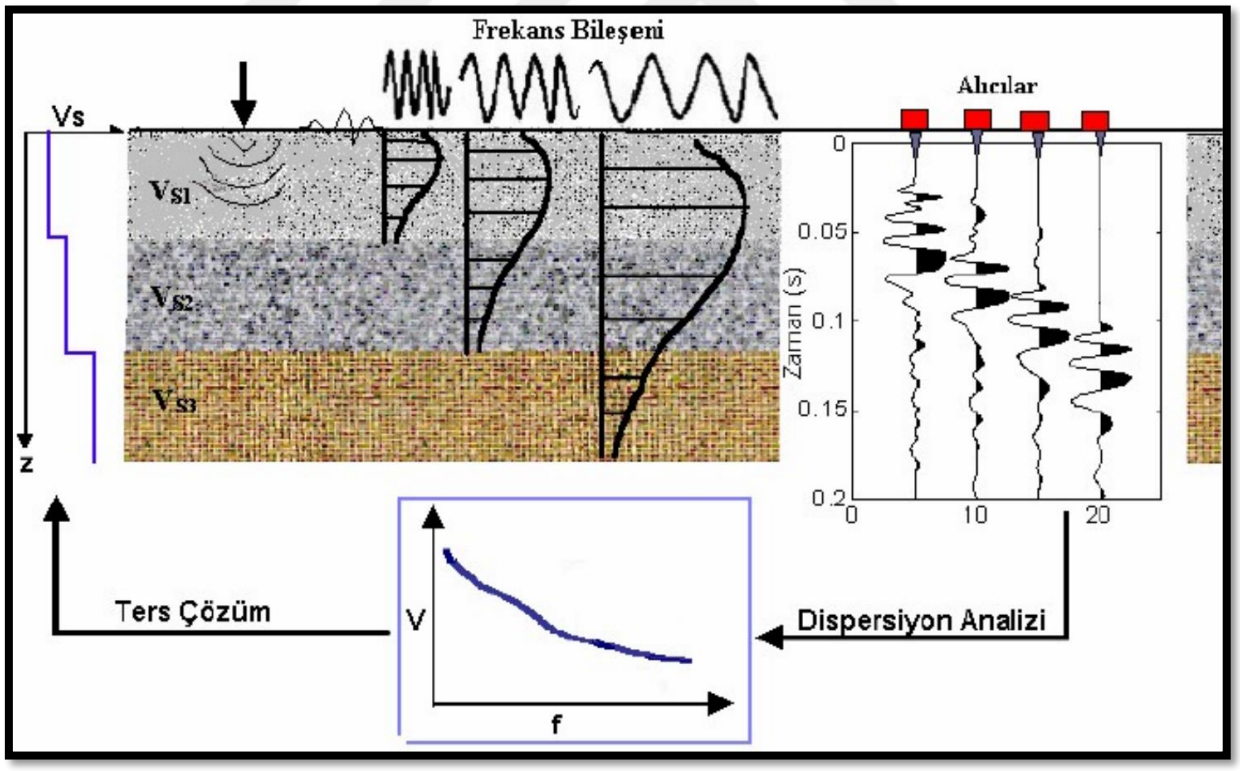
Çok Kanallı Yüzey Dalgası Analiz Yöntemi (MASW)

Aktif kaynak olan Çok Kanallı Yüzey Dalgası Analiz Yöntemi (MASW), ilk olarak Park ve arkadaşları (1999) tarafından geliştirilmiştir. Bu yöntem, 1-30 Hz frekans aralığındaki yüzey dalgalarının analizine odaklanır ve birkaç metreden onlarca metre derinliğe kadar inceleme

yapabilme kapasitesine sahiptir. Bu yöntem, balyoz, ağırlık düşürme veya titreşim gibi yapay kaynaklar kullanılarak yüzey dalgalarının incelenmesine dayanır (Park vd. 2007).

Yüzey dalgalarının analizine yönelik ilk uygulamalar, iki alıcı ile gerçekleştirilen Spektral Analiz Yöntemi tekniğiyle başlamıştır. Bu yöntem zaman içinde geliştirilmiş ve 24 veya daha fazla jeofonun kullanıldığı MASW ve Kırılma Mikrotremor (ReMi) gibi daha kapsamlı tekniklere dönüşmüştür (Park vd. 1999; Louie 2001). Her iki yöntem de yerin kayma dalgası hız yapısının özelliklerini belirlemek için yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Temel prensipleri benzer olmakla birlikte bu yöntemler arasındaki en belirgin fark, yüzey dalgalarının ölçülmesinde kullanılan sismik kaynağın türüdür.

Şekil 16'da gösterildiği gibi, MASW yöntemi üç temel aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada, jeofonlar kullanılarak arazide veri kaydının alınmasıdır. İkinci aşamada, frekans-dalga sayısı dönüşümü uygulanarak dağılım görüntüsü elde edilir. Bu görüntüde temel mod ve yüksek modlar belirlenir ve temel mod dikkatle seçilerek dispersiyon eğrisi oluşturulur. Son aşamada ise elde edilen dispersiyon eğrisine ters çözüm işlemi uygulanarak derinliğe bağlı katman kalınlıkları ile her katmana ait kayma dalgası hızları ve yayılma hızları hesaplanmaktadır.



Şekil 16. Aktif kaynaklı MASW yöntemi verileri için yüzey dalgası analizi adımları (Gürel, 2024).

MASW yönteminin uygulanabilmesi ve veri toplanabilmesi için bir enerji kaynağı, jeofon ve sismik kayıt cihazı gereklidir. Rayleigh dalgası analizinde genellikle 4.5 Hz'lik düşey

jeofonlar kullanılır. Arazide veri kaydı sırasında kullanılan jeofonların frekansı ne kadar düşük olursa, araştırma sonucunda ulaşılabilecek derinlik o kadar artacaktır.

Arazide kullanılan aktif kaynak, araştırma derinliğini etkileyen diğer önemli bir faktördür. Aktif kaynak olarak balyoz, ağırlık düşürme veya patlayıcılar gibi yöntemler tercih edilebilir. Kullanılan enerji miktarı ne kadar yüksek olursa, elde edilebilecek araştırma derinliği de o kadar artacaktır.

Zeminin Dinamik ve Elastik Parametreleri

Sismik P-kırılma ve MASW yöntemleriyle, zemin tabakalarının dinamik ve elastik özelliklerinin belirlenmesinde yaygın olarak kullanılan jeofizik yöntemlerdir. Sismik kırılma yöntemi, farklı derinliklerdeki tabakaların P- dalga (Vp) hızlarını belirleyerek zemin sıkılığını, yoğunluğu ve tabaka kalınlıkları hakkında bilgi verir. MASW yöntemi ise Rayleigh dalgalarının yayılma hızlarını analiz ederek kesme dalgası (Vs) hız profilini oluşturur. Bu hız değerleri kullanılarak zeminin kayma modülü (G), elastisite modülü (E), hacim modülü (K) ve Poisson oranı (ν) gibi elastik parametreler hesaplanır. Elde edilen bu parametreler, zeminin deprem etkileri altındaki davranışını anlamada, taşıma gücü analizlerinde ve yerel zemin sınıflamasında büyük önem taşır.

1. Sismik Hız Oranı (Vp/Vs):

Bu oran, zeminin sıkılık derecesini göstermektedir. **3'ten büyük** değerler zeminin daha gevşek bir yapıda olduğunu ifade eder. Bu oran aynı zamanda zeminin **sıvılaşma potansiyeli** hakkında da fikir verir. Suya doygun siltli veya kumlu zeminlerde söz konusu değerin 3'ü aşması, deprem süresi, büyüklüğü ve etkilediği bölgenin özelliklerine bağlı olarak zeminde sıvılaşma olasılığının bulunduğunu ortaya koymaktadır (Ercan, 2001). Sismik hız oranına göre zemin tanımlanması Tablo 2'de gösterilmiştir.

Tablo 2. Vp/Vs Oranına Göre Zemin Durumu (Ercan, 2001).

Vp/Vs Oranı	Zemin/Kaya Sıkılığı
Sonsuz-2.49	Çok Gevşek
2.49-1.87	Gevşek
1.87-1.71	Sıkı-Katı
1.71-1.50	Katı
1.50-1.41	Sağlam

2. Elastisite Modülü (E, kg/cm^2)

Basit çekme ya da basınç durumlarında ortaya çıkan gerilme-şekil değiştirme ilişkisini ifade eden elastisite modülü, bir kayacın elastik davranışa ve rijitliğe karşı gösterdiği direncin bir göstergesidir. Bu değer, sismik dalga hızları ile yoğunluk verilerinin birlikte değerlendirilmesiyle hesaplanabilir. Bu modül, jeolojik birimlerin dayanım ve bütünlük özelliklerini değerlendirmede önemli bir ölçüttür (Tunçel, 2014). Elastisite modülüne göre zemin tanımlanması Tablo 3'de gösterilmiştir.

$$E = G * \frac{3 * Vp^2 - 4 * Vs^2}{Vp^2 - Vs^2} \quad 4.4$$

Tablo 3. Dinamik Elastisite Modülüne Göre Zemin Sınıflaması (Bowles, 1986).

E_d(kg/cm^2)	Zemin Özelliği
0-2000	Gevşek Zeminler
2000 - 10000	Orta Sağlam Zeminler
10000 - 30000	Sağlam Zeminler
> 30000	Çok Sağlam Zeminler

3. Kayma (Shear) Modülü (μ, kg/cm2)

Formasyonun yatay yönde etkili olan makaslama gerilmelerine karşı gösterdiği dayanımı ifade eder. Sıvılar makaslama direncine sahip olmadığından bu parametre sıfır kabul edilir. Kayma modülünün yüksek olması, zeminin özellikle deprem sırasında ortaya çıkan yatay yükler karşısında daha dayanıklı olduğunu gösterir. Ayrıca bu parametre, zeminin sıkı-gevşek ya da katı-yumuşak karakterine ilişkin önemli bilgiler sunar (Karslı vd. 2017). Kayma modülüne göre zemin sınıflaması Tablo 4'de gösterilmiştir.

$$Gmax = p * Vs^2 \quad 4.5$$

Tablo 4. Kayma Modülü Değerinde Göre Zemin ya da Kayaçların Durumu (Keçeli,1990)

Kayma Modülü	Zemin Özelliği
<400	Çok Zayıf
400-1500	Zayıf
1500-3000	Orta
3000-10000	Sağlam
>10000	Çok Sağlam

4. Bulk (Sıkışmazlık) Modülü (K, kg/cm^2)

Bulk modülü, bir kayacın sıkışmaya karşı gösterdiği dirençle ilişkili temel bir parametredir. Bu modül, yoğunluk ile sismik hızların birlikte değerlendirilmesi sonucu hesaplanır. Hidrostatik bir basınç altında bulunan kayaçta meydana gelen gerilme-şekil değiştirme oranını tanımlayarak, malzemenin sıkışabilirliğine dair önemli bilgiler sunar (Tunçel, 2014). Sıkışmazlık modülüne göre zemin sınıflaması Tablo 5'de verilmiştir.

$$E = G * \left(\frac{3 * Vp2 \ - 4 * Vs2}{Vp2 \ - Vs2}\right) \qquad 4.6$$

Tablo 5. Bulk Modülü Değerlerine Göre Zemin ya da Kayaçların Dayanımı (Keçeli,1990)

Bulk Modülü	Zemin Özelliği
<400	Çok Zayıf
400-1500	Zayıf
1500-3000	Orta
3000-10000	Sağlam
>10000	Çok Sağlam

5. Poisson Oranı (σ)

Poisson oranı, bir malzemenin boyuna yönde meydana gelen birim şekil değişiminin enine yöndeki birim şekil değişimine oranı olarak tanımlanır ve formasyonun katılığı ya da gözeneklilik düzeyi hakkında bilgi sağlar. Bu değer, aynı zamanda Vp/Vs hız oranıyla ilişkili olup zeminin sıkılığı ve sıvılaşma eğilimi hakkında da önemli ipuçları verir. Özellikle suya doygun siltli kum veya kumlu zeminlerde bu oranın 3'ün üzerine çıkması, maruz kalınacak yükün büyüklüğüne ve süresine bağlı olarak sıvılaşma riskinin bulunduğuna işaret eder. Poisson oranı genellikle gözeneksiz yapılarda 0-0.25, orta gözeneklilikte 0.25-0.35 ve yüksek gözeneklilikte 0.35-0.50 aralığında değişir (Karslı vd. 2017). Poisson oranına göre zemin sınıflaması Tablo 6'da gösterilmiştir.

$$P = \frac{Vp2 - 2 * Vs2}{2 * \ Vp2 - 2 * Vs2} \qquad 4.7$$

Tablo 6. Poisson Oranı Sınıflaması ve Zemin Sıkılığı (Ercan, 2001)

Poisson Oranı	Zemin/Kaya Sıkılığı
0.5	Cıvık - Sıvı
0.4-0.5	Çok Gevşek
0.3-0.39	Gevşek
0.2-0.29	Sıkı - Katı
0.1-0.19	Katı
0.0-0.09	Sağlam

6. Yoğunluk: ρ (gr/cm^3)

Boyuna dalga hızına göre ampirik olarak Telford (1976) tarafından verilen yoğunluk değeri aşağıdaki formülden hesaplanır. Yoğunluk değerlerine göre zemin sınıflaması Tablo 7 ‘de gösterilmiştir.

$$\rho = 0.31 * Vp0.25 \quad 4.8$$

Tablo 7. Zemin Birimlerinin Yoğunluk Sınıflaması (Keçeli,1990)

Yoğunluk	Tanımlama
<1.20	Çok Düşük
1.20-1.40	Düşük
1.40-1.90	Orta
1.90-2.20	Yüksek
>2.20	Çok Yüksek

Mikrotremör Yöntemi

Mikrotremörler, yer kabuğunda meydana gelen düşük genlikli ve sürekli titreşimlerdir. Bu titreşimler hem doğal hem de insan kaynaklı faktörlerden ortaya çıkabilir. Doğal kaynaklar arasında okyanus dalgaları, rüzgar, gel-git etkileri gibi olaylar bulunurken; insan faaliyetlerinden kaynaklanan trafik, endüstriyel makineler, sanayi gürültüleri gibi etkenler de bu titreşimlere neden olabilir. Mikrotremörlerin genlikleri genellikle 0.1 mikron ile 1 mikron arasında değişirken, periyotları ise 0.05 saniyeden 2 saniyeye kadar farklılık gösterebilir (Kanai ve Tanaka, 1954, 1961).

Doğal kaynaklı titreşimler, düşük frekanslı (<1 Hz) atmosfer olayları, gel-git etkileri, jeotermal aktiviteler ve okyanus dalgaları gibi doğal süreçlerle meydana gelir. Buna karşın, daha yüksek frekanslı (>1 Hz) titreşimler genellikle insan faaliyetlerine bağlı olarak ortaya çıkar. Örneğin, trafik, sanayi makineleri ve fabrika faaliyetleri gibi faktörler bu titreşimlere yol açar. İnsan kaynaklı titreşimler çoğunlukla yer yüzeyine yakın alanlarda yoğunlaşırken, belirli zaman dilimlerinde, örneğin gündüz-gece veya hafta içi-hafta sonu gibi dönemlerde belirgin değişiklikler gösterebilir. Doğal kaynaklı düşük frekanslı titreşimler "mikroseism" olarak adlandırılırken, insan kaynaklı yüksek frekanslı titreşimler "mikrotremör" olarak tanımlanır Tekebaş, 2022).

Mikrotremörlerin mühendislik çalışmalarında kullanımı ilk olarak Kanai ve Tanaka (1961) tarafından başlatılmıştır. Yatay/Düşey Spektral Oran (H/V) yöntemi ise Nogoshi ve

Igarashi (1971) tarafından geliştirilmiş olup, daha sonra Nakamura (1989) tarafından detaylandırılarak yaygınlaştırılmıştır.

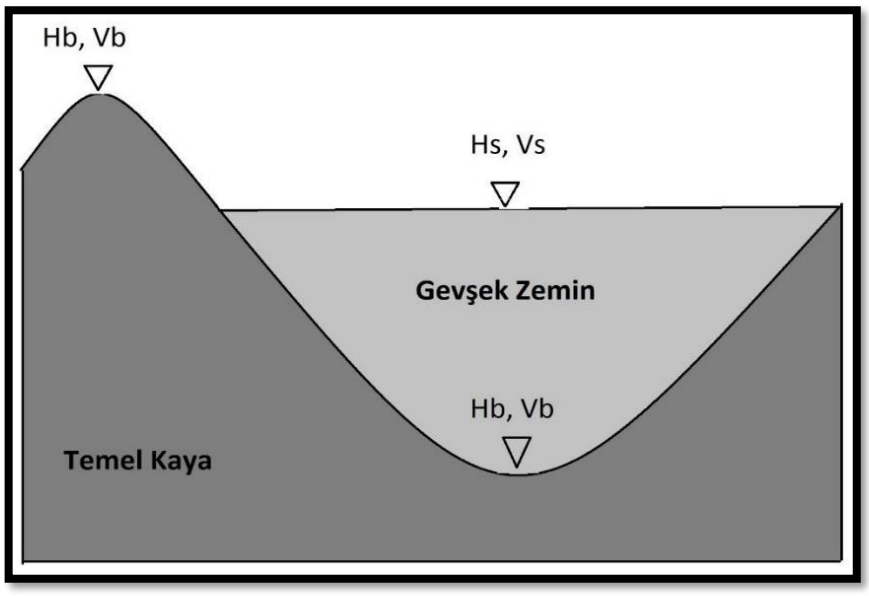
Mikrotremör yöntemlerinin uygulama amaçları;

- Zemin hakim periyodun belirlenmesinde,
- Yerel zemin koşullarına bağlı olarak yer hareketlerinin neden olduğu zemin büyütme etkilerinin tespitinde ve zemin hakim periyodunun belirlenmesinde,
- Mikrobölgelendirme çalışmalarında,
- Sismik bölgelendirme sonucunda elde edilen veriler ile belirlenen alanın jeoteknik risklere karşı farklı risk seviyelerinin belirlenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Yatay/Düşey Spektral Oran (HVSR) Yöntemi

Mikrotremor verileri kullanılarak temel kaya üzerindeki zeminin baskın frekansını belirlemek amacıyla Yatay/Düşey Spektral Oran (HVSR) yöntemi geliştirilmiş olup, bu yöntem Nakamura yöntemi olarak da adlandırılmakladır (Nakamura 1989).

Sedimanter bir tabakanın transfer fonksiyonu, bu tabakanın yüzeyinde ölçülen yatay bileşenin spektrumu (Hs) ile yakındaki temel kaya üzerinde kaydedilen yatay bileşenin spektrumu (Hb) arasındaki oran kullanılarak hesaplanabilir. Sedimanter tabakalarda meydana gelen ve yayılan gürültü kaynaklı Rayleigh dalgaları sediman yüzeyinde kaydedilen düşey bileşen (Vs) ile tespit edilebilir. Ancak bu dalgalar temel kaya üzerindeki düşey bileşen (Vb) üzerinden gözlemlenemez (Şekil 17).

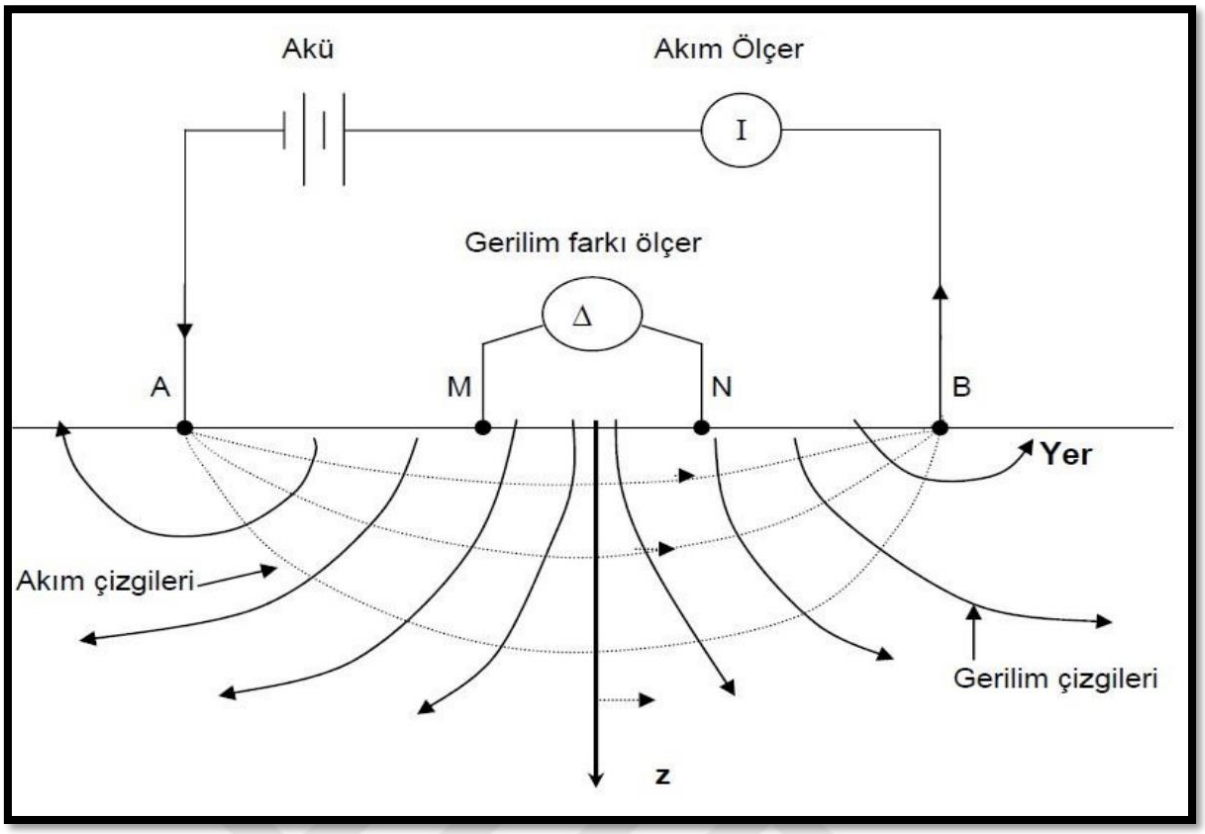


Şekil 17. Nakamura (1989) tarafından önerilen H/V yöntemini temsil eden basit bir yer modeli (Tekebaş, 2022)

Nakamura Yöntemi, yer hareketlerinin yüzey tabakası tarafından nasıl güçlendirildiğini belirlemek amacıyla geliştirilmiş bir tekniktir. Yöntem, yatay/dikey spektral oranı kullanılarak rezonans frekanslarını ve zemin büyütme faktörlerini hesaplamaya dayanır. İlk olarak 1980'lerde Japonya'daki sismik güvenlik çalışmalarına katkı sağlamak için geliştirilmiş olup, hem mikrotremörler hem de deprem hareketleri üzerinden uygulanabilir bir yöntem olarak kabul edilmektedir. Nakamura'ya göre, yöntemin temel dayanağı, yatay hareketlerin dikey hareketlere oranının belirli bir frekans aralığında karakteristik büyütme özellikleri göstermesidir (Nakamura, 2019). Bu teknik, sıkça Rayleigh dalgaları ile karıştırılsa da, aslında yüzey tabakasında SH dalgalarının çoklu yansımalarına dayanmaktadır. Nakamura'ya göre, Rayleigh dalgaları düşük frekanslarda enerji bakımından zayıftır ve H/V eğrisindeki tepe noktalarının asıl nedeni SH dalgalarının çoklu yansımalarıdır (Nakamura, 2019). Mikrotremörler ve deprem hareketleri üzerinden hesaplanan H/V oranları, yüzey tabakasının özelliklerini belirlemede kritik bir rol oynar. Özellikle sahada yapılan uzun süreli mikrotremörler ölçümleri, HVSR yönteminin zaman içerisindeki değişimlere karşı kararlı sonuçlar verdiğini göstermektedir (Nakamura, 2019). Nakamura Yöntemi'nin temel avantajlarından biri, saha çalışmaları sırasında hızlı ve düşük maliyetli ölçümler yapılmasına olanak tanımasıdır. Geleneksel sismik yöntemlere kıyasla, geniş alanlarda zemin dinamik özelliklerini belirlemek ve potansiyel tehlikeleri haritalamak için oldukça kullanışlı bir araçtır.

Elektrik Rezistivite Tomografi (ERT) Yöntemi

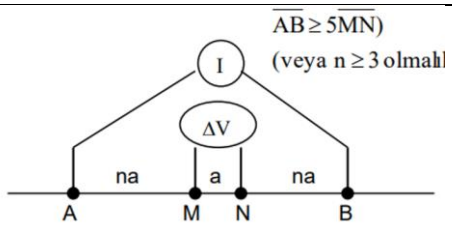
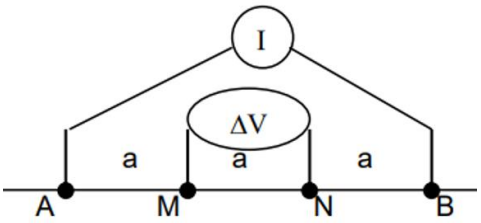
Elektrik Rezistivite Tomografisi (ERT), yeraltının elektriksel özdirenç dağılımını belirlemek için kullanılan jeofizik bir yöntemdir. ERT'nin temelleri, elektrik akımının yeraltına uygulanması ve yeraltı yapılarının bu akıma verdiği tepkilerin ölçülmesiyle başlamıştır. Elektrik rezistivite yönteminin gelişiminde en büyük katkıyı Fransız fizikçi Conrad Schlumberger (1878-1936) yapmıştır. Conrad Schlumberger ve kardeşi Marcel Schlumberger, elektrik akımının yeraltı yapılarını belirleme çalışmalarında öncül olmuşlardır. Conrad Schlumberger, 1912 yılında elektriksel özdirenç ölçümlerini jeofizik amaçlarla ilk kez sahada uygulamıştır (Reynolds, 2011). Bu çalışma, yeryüzü ve yeraltı yapılarının karakterize edilmesi için elektrik yöntemlerinin temelini atmıştır. ERT'nin temel prensibi, yüzeye yerleştirilen elektrotlar aracılığıyla yere elektrik akımı verilmesi ve bu akımın yeraltındaki formasyonlarda ilerlerken karşılaştığı direncin ölçülmesine dayanmaktadır. Bu yöntemle yeraltındaki tabakaların konumu, kalınlığı ve yapısal farklılıkları belirlenebilir (Şekil 18).



Şekil 18. Yarı sonsuz ortam içindeki akım ve potansiyel çizgileri (Van Nostrand ve Cook, 1966)

A ve B akım elektrotları, M ve N gerilim elektrotları olmak üzere elektrotların farklı konumlarına dayanan çeşitli elektrot dizilimleri önerilmiştir. Elektrotların bir doğrultuda sıralandığı Schlumberger, Wenner ve Dipol-Dipol dizilimleri ise geleneksel elektrot dizilimleri olarak bilinir. Bu dizilimler, araştırmanın amacına göre seçilmektedir (Tablo 8). Örneğin, derinlik odaklı çalışmalar için Schlumberger ve Wenner dizilimleri tercih edilirken, yanal süreksizliklerin tespitinde Schlumberger dizilimi öne çıkmaktadır. Arkeolojik araştırmalar için ise yarım-Wenner, yarım-Schlumberger, iki elektrot ve Gradyant dizilimleri sıklıkla kullanılmaktadır. Heyelan araştırması için uyguladığımız özdirenç çalışmasında Wenner-Schulumberger elektrot dizilimi uygulanmıştır.

Tablo 8. ERT ölçülerinde kullanılan başlıca elektrod dizilimleri (Candansayar, 2016)

Elektrod Dizilimi	Geometrisi
(a) Schlumberger	
(b) Wenner	

Wenner-Schlumberger dizilimi, dört elektrot kullanılarak oluşturulan ve orta noktaya göre simetrik bir yapıya sahip bir ölçüm düzenidir. Bu dizilimde, elektrot aralıkları belirli bir "n" faktörüne göre ayarlanır. Özellikle "n=1" olduğunda, Wenner dizilimi ile aynı yapı elde edilir. Ölçülen görünür özdirenç değeri dizilimin orta noktasına atanır ve hem "a" hem de "n" değerleri bağımsız olarak veya birlikte artırılarak daha derin seviyelerden veri toplanabilir. Dizilimin duyarlılık kesiti incelendiğinde, potansiyel elektrotlar arasında kalan pozitif alanın Wenner dizilimine kıyasla daha dar olduğu, ancak derine doğru daha yayvan bir şekilde uzandığı gözlemlenir. Bu özellik, Wenner-Schlumberger diziliminin hem yatay hem de düşey süreksizliklere karşı duyarlılığını artıran bir etken olarak öne çıkmaktadır (Berge, 2011).

VERİ TOPLAMA

Bu çalışma kapsamında, inceleme alanının zemin özelliklerini ortaya koymak amacıyla farklı jeofizik yöntemlerle arazi çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Uygulanan ölçümler, zemin tabakalarının özelliklerini ve yapısını belirlemeye yönelik olarak planlanmıştır. Ölçü sayıları, serim boyları ve araziye ait temel bilgiler Tablo 9'da özetlenmiştir.

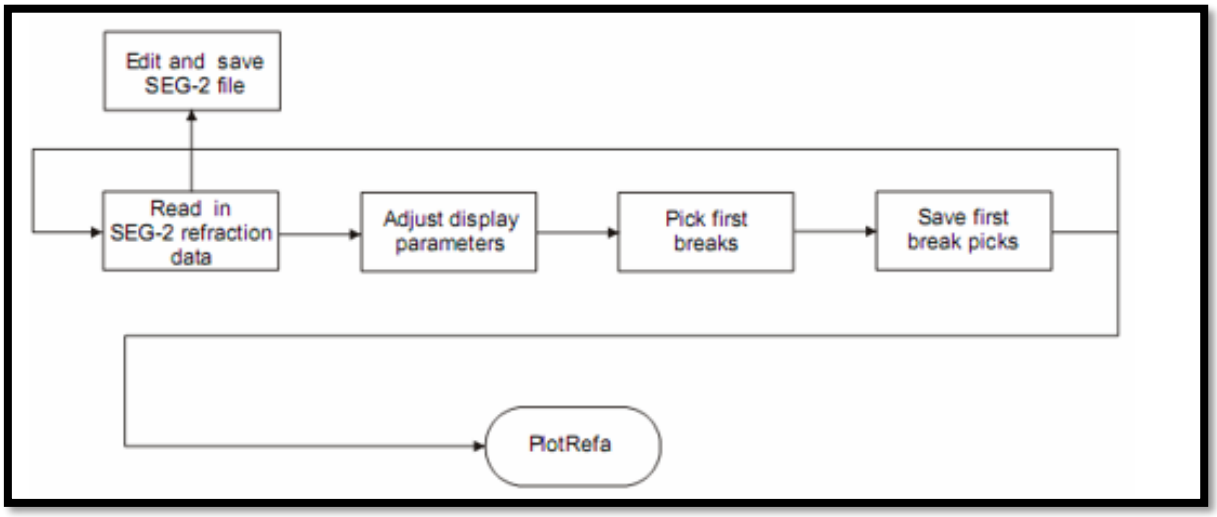
Tablo 9. Arazi çalışmalarına ait yapılan çalışmalara ait sayılar ve arazi bilgileri

Arazi çalışması tanımı	Adet	Serim boyu(m)	Jeofon/Elektrot aralığı (m)
SİSMİK P-KIRILMA	22	75.0	3
MASW	22	81.0	3
MİKROTREMÖR	45	-	-
ERT	5	117.5	2.5

Sismik P-Kırılma, MASW yöntemleri ile veri toplama ve değerlendirme

Tez kapsamında 22 profil boyunca Sismik P-Kırılma ve MASW ölçümleri alınmıştır. MASW 24 kanallı Ambregeo marka sismik aleti ve 4.5 Hz lik düşük frekanslı alıcılar (jeofon) kullanılmıştır (Şekil 20). Jeofon aralıkları 3 m olarak seçilmiştir. Kaynak olarak balyoz (10 kg) kullanılmıştır. MASW yöntemi uygulamasında düz, ters ve ara atışlar ile veri toplanmıştır. Kaynağın ilk jeofona olan uzaklığı (ofset) düz ve ters atışlarda 12 m, ara atışlarda iki jeofon arasının orta noktasından vurup bir jeofon atlayarak yeniden seçilmiştir. Örnekleme aralığı 0,5-1 msn kayıt uzunluğu 2 sn'dir. Profil uzunlukları 81 m'dir. Sinyal/ Gürültü oranını artırmak için her noktada 3 adet ölçü alınarak yığma (stack) işlemi yapılmıştır. Sismik P-Kırılma ölçülerinde ise MASW ölçülerinden farklı olarak 14 Hz düşey jeofon kullanılmıştır. Örnekleme aralığı 0.25ms iken kayıt uzunluğu 0.5 s'dir. Sismik P-Kırılma yöntemi uygulamasında düz, orta ve ters atışlar ile veri toplanmıştır. Ofset mesafesi jeofon aralığının 2 katı (6m) olacak şekilde ölçüm alınmıştır

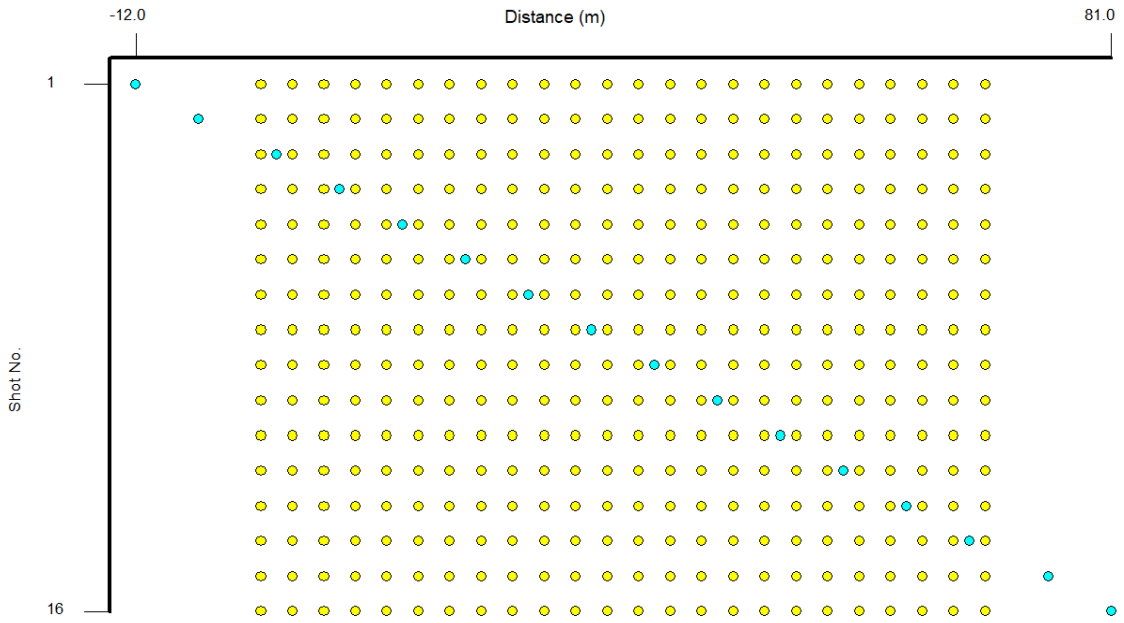
Seisimager yazılımı, sismik kırılma çalışmalarından elde edilen kırılma dalgası kayıtlarının görüntülenmesi, düzenlenmesi ve analiz edilmesi için kullanılan bir programdır. Bu kapsamda, ilk varış zamanlarının belirlenmesinde **Pickwin**, belirlenen bu zamanların yorumlanarak hız modeline dönüştürülmesinde ise **Plotrefa** modülü görev almaktadır (Şenkaya, 2009) (Şekil 19).



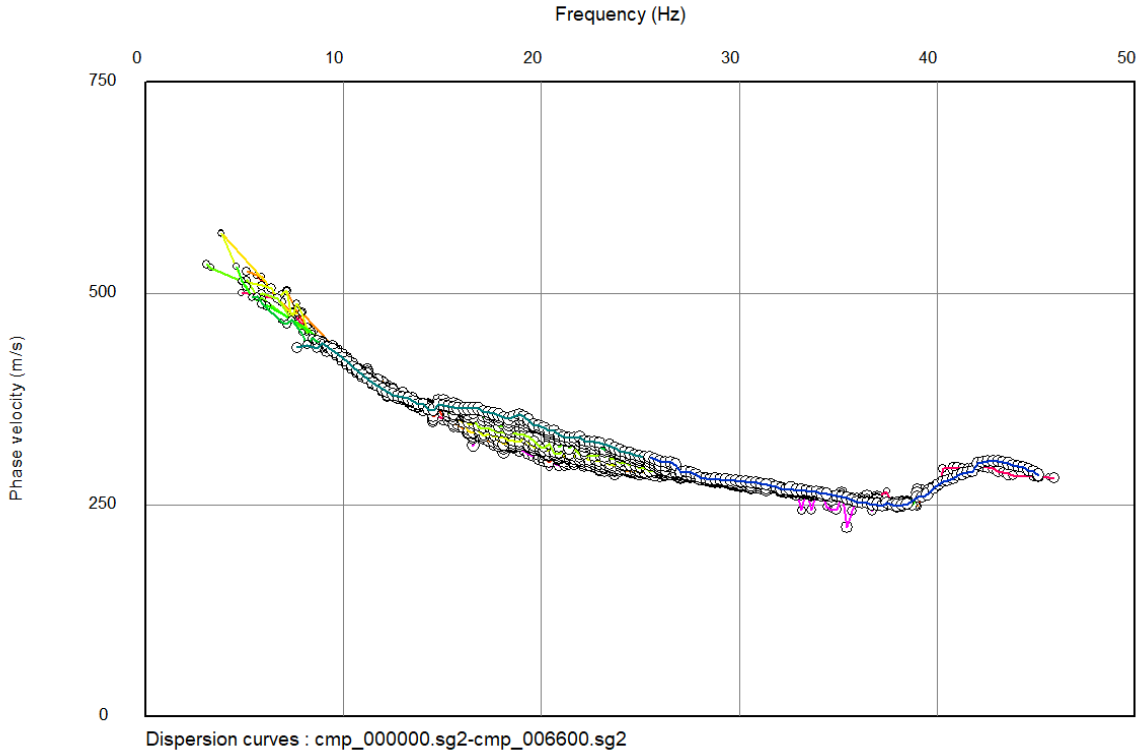
Şekil 19. Pickwin modülü genel çalışma akış şeması (Şenkaya, 2009)

Seisimager yazılımı, masw çalışmalarından elde edilen yüzey dalgası kayıtlarının görüntülenmesi, düzenlenmesi ve analiz edilmesi için kullanılan bir programdır. Bu kapsamda, **Surface Wawe Analysis Wizard**, belirlenen bu zamanların yorumlanarak hız modeline dönüştürülmesinde ise **WaceEq** modülü kullanılmaktadır.

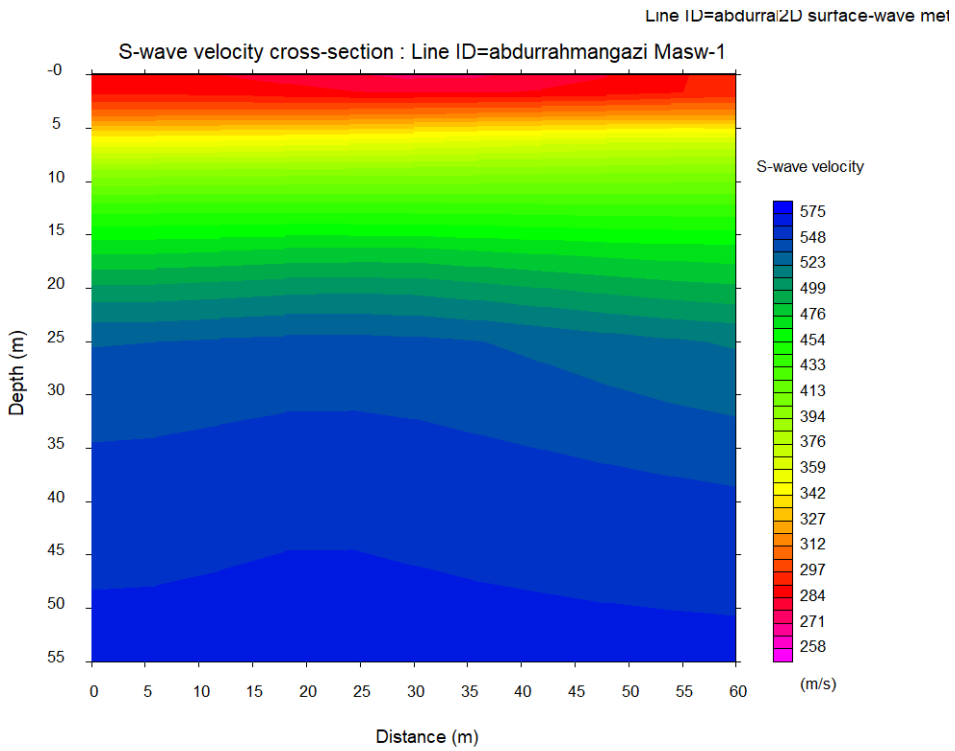
Örnek olması amacıyla, 2B Vs–derinlik kesitinin oluşturulmasına yönelik adımlar Masw-1 profili üzerinden detaylı biçimde açıklanmıştır (Şekil 20-22). Diğer kesitler ek'te verilmiştir.



Şekil 20. Masw-1 profilinin 2B'lu ölçü geometrisi (1'er jeofon atlanarak atışlar gerçekleştirilmiştir.)



Şekil 21. Masw-1 profili için elde edilen dispersiyon eğrileri (devamlı çizgileri dispersiyon eğrilerini, Kesikli çizgiler ve siyah halkalar sinyal/gürültü oranını göstermektedir)



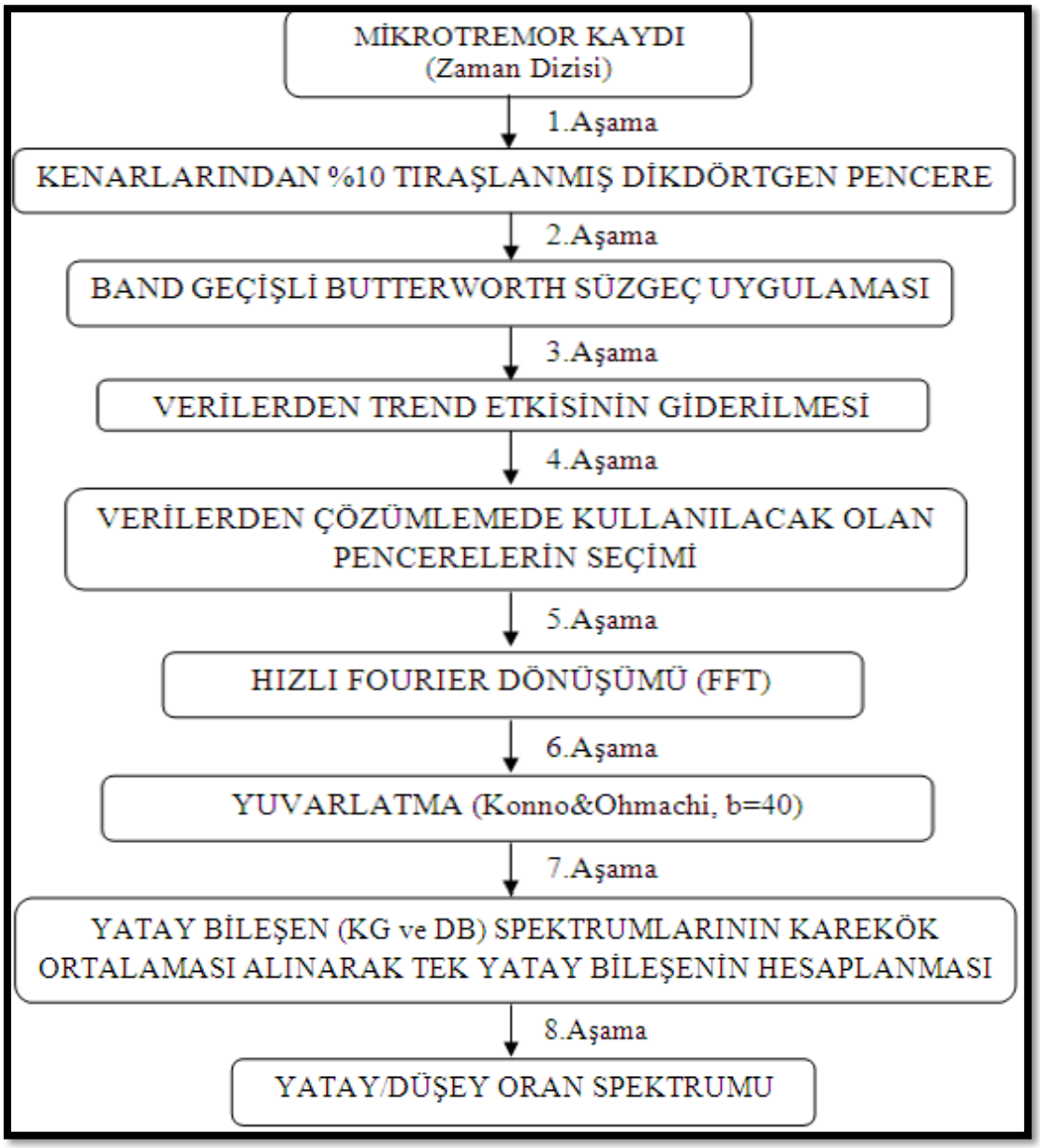
Şekil 22. Masw-1 profili için 1B'lu başlangıç modellerinin enterpolasyonu ile elde edilen 2B'lu Vs-derinlik kesiti

Tek istasyon mikrotremor ile veri toplama ve değerlendirme

Tez çalışma alanında toplam 45 noktada 5 adet kayıt cihazıyla tek istasyon mikrotremor ölçüsü alınmıştır. Zaman ortamında elde edilen üç bileşen (D-B, K-G ve Z) mikrotremor kayıtlarının veri işlem aşamalarından sonra, sismometrenin üzerinde bulunduğu zemininin özelliklerini yansıtan parametreler (baskın periyot ve H/V spektral oranı) belirlenmektedir.

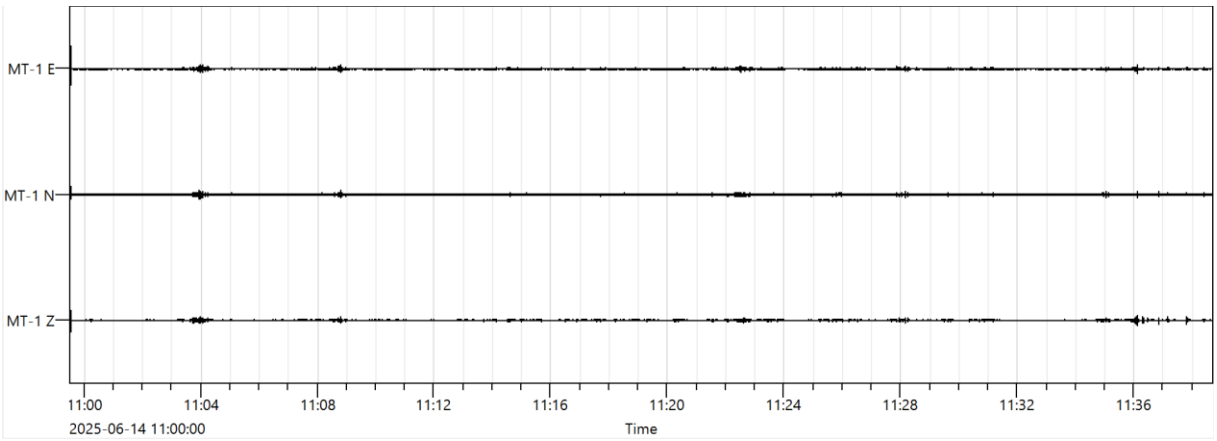
Mikrotremor ölçümlerinde Smartsolo IGU-BD3C-LC marka sismometre kullanılmıştır. Mikrotremor kayıtları en az 30 dk boyunca ve 200 Hz örnekleme aralığı ile alınmıştır. Bu tez çalışmasında, ölçü noktaları, bölgenin tamamını kapsayacak şekilde seçilmiş ve ölçü alımında minimum kültürel gürültü seviyeli zaman aralığında ölçüler toplanmıştır. Kültürel gürültünün fazla olduğu yerlerde kayıt süresi daha uzun tutulmuştur.

Çalışma alanında zemin hakim periyodu ve büyütme parametrelerinin belirlenmesi amacıyla oluşturulan 45 noktada geniş-band hız ölçen üç bileşen sismometre ile alınan mikrotremor kayıtlarına, Nakamura (1989) tarafından geliştirilen H/V (Yatay/Düşey Spektral Oran) yöntemi Geopsy paket programı (Wathelet *vd*., 2020) kullanılarak değerlendirilmiştir. Mikrotremor verilerinin Nakamura Yöntemi ile değerlendirilmesinde yürütülen işlemlerin akış şeması Şekil 23'de verilmiştir.

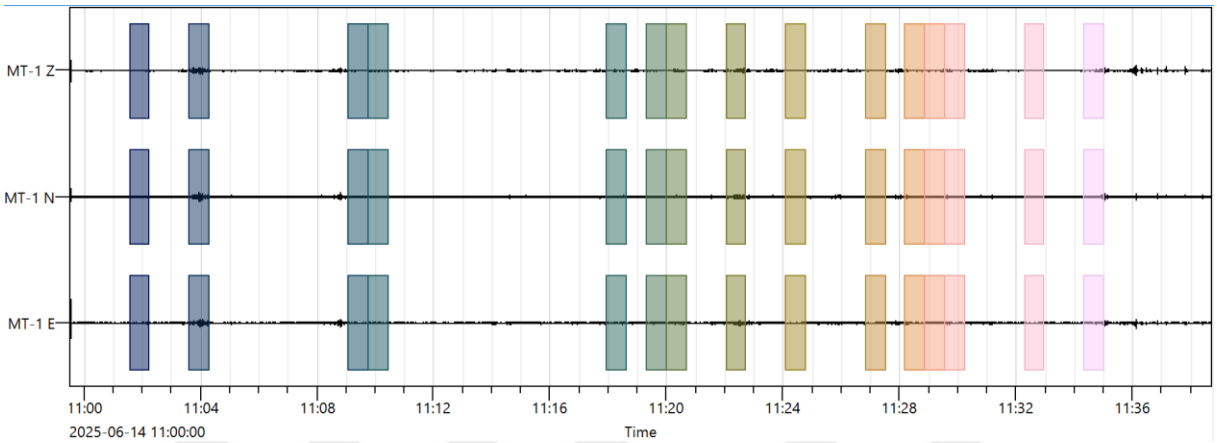


Şekil 23. Veri işlem akış şeması (Nakamura Yöntemi, H/V) (Beker, 2013)

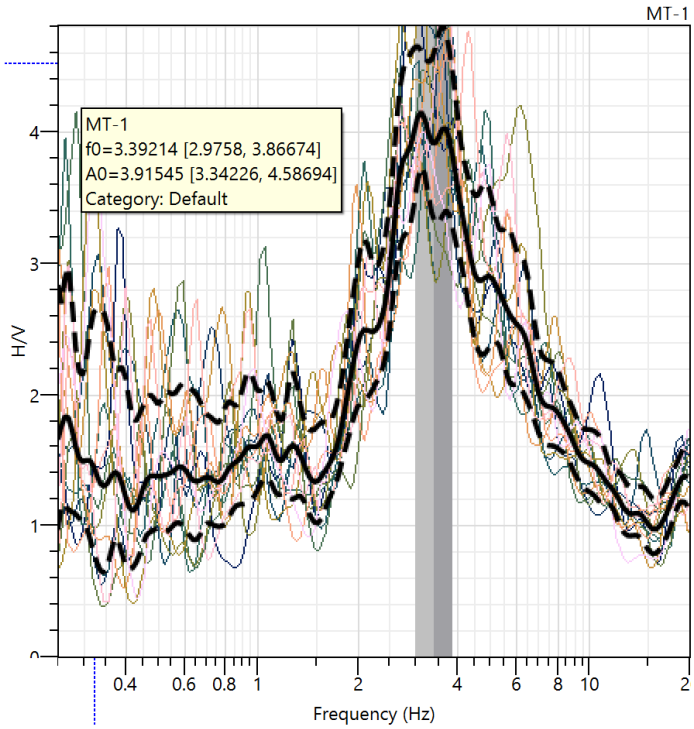
Örnek teşkil etmesi amacıyla, mikrotremör H/V ve To analizinin değerlendirme adımları MT-1 istasyonu üzerinden ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Diğer ölçüm noktalarına ait sonuçlar ise eklerde sunulmuştur. (Şekil 24, Şekil 25, Şekil 26)



Şekil 24. M-1 noktasına ait ham data kaydı.



Şekil 25. M-1 noktasına ait pencere secimi.



Şekil 26. M-1 noktasına ait H/V spektrumu ve hakim frekansı

ERT ile veri toplama

Tez çalışması kapsamında toplam **5** adet ölçüm hattında Elektrik Özdirenç Tomografisi (ERT) uygulamaları gerçekleştirilmiştir. Ölçümlerde çok elektrotlu tomografi sistemine sahip Ambregeo Marka 48 kanallı cihazı kullanılmıştır. Her hat üzerinde elektrotlar 2.5m aralıklarla yerleştirilmiş olup, veri toplama sırasında arazi koşullarına uygun şekilde paslanmaz çelik çubuk elektrotlar tercih edilmiştir. ERT yöntemi için ölçüm hatları boyunca **Wenner–Schlumberger** dizilimleri uygulanmıştır.

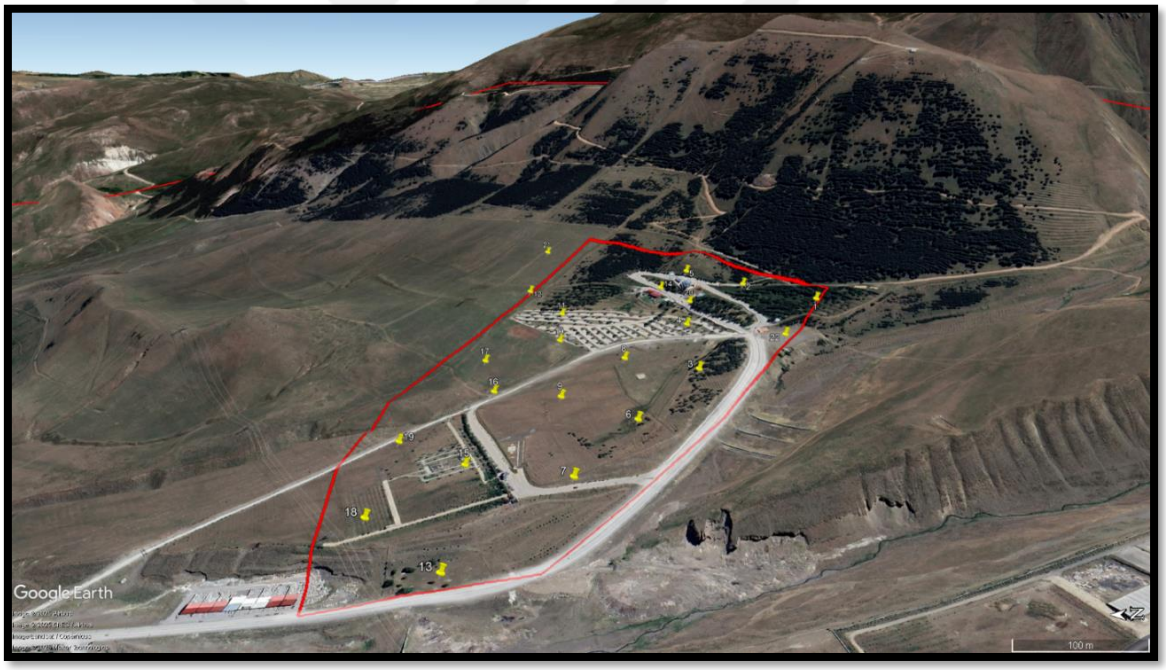
Akım ve potansiyel elektrotlarının otomatik olarak seçildiği çok kanallı ölçüm modunda cihaz, her ölçüm seti için belirlenen dizilime uygun şekilde akım vermiş ve eş zamanlı potansiyel farklarını kaydetmiştir. Veri toplama sırasında temas direncinin yüksek olduğu noktalar düzeltilmiş, gerekli durumlarda zemin nemlendirilerek elektrot-zemin temasının iyileştirilmesi sağlanmıştır.

Ölçümler sırasında her bir dizilim için cihaz tarafından önerilen maksimum akım seviyesi kullanılmış, böylece sinyal/gürültü oranı artırılarak daha derin seviyelere yönelik sağlıklı veri elde edilmiştir. Hat uzunlukları ortalama 117.5m olup, her hatta binlerce ölçüm noktası oluşturacak şekilde veri seti tamamlanmıştır.

ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Sismik P-Kırılma Verilerinin Değerlendirilmesi

Sismik kırılma çalışmalarında 24 kanallı Ambregeo Echo24 marka cihaz kullanılmıştır. Kayıtlarda kullanılan jeofonlar düşey yönlü 14 hz tipindedir. İnceleme alanın tamamının özelliğinden veri alabilecek şekilde 22 noktadan baştan, ortadan ve tersten vuruş yapılarak arazi çalışmaları gerçekleştirilmiştir (Şekil 27). Kırılma verileri SeisImager/Pickwin yazılımı kullanılarak analiz edilmiştir. Ters çözüm süreci sonucunda yeraltına ait P-hız modelleri oluşturulmuştur. Bu aşamada, belirlenen yeraltı parametreleriyle teorik zaman değerleri yeniden hesaplanmış, elde edilen değerler ölçüm sonuçlarıyla karşılaştırılarak hata payı en aza inene kadar işlem tekrarlanmıştır. Her profil için P- dalgalarına ait ölçüm zamanları ayrı ayrı değerlendirilmiş ve bu sayede yeraltının derinlik-hız ilişkisini gösteren modeller elde edilmiştir. Arazi çalışmalarına ait iş programı Tablo 9'da ve yapılan çalışmalara ait noktaların koordinatları Tablo 10'da gösterilmiştir.



Şekil 27. Sismik P-Kırılma ve MASW profillerinin orta noktalarının lokasyonları

Tablo 10. İnceleme Alanı Sismik P-Kırılma ve MASW Ölçüm Koordinatları

İNCELEME ALANI KIRILMA ve MASW PROFİLLERİNİN ORTA NOKTA KOORDİNATLARI		
SERİM NO	**KOORDİNAT (UTM WGS 84 37 ZON)**	
	X Koordinat	**Y Koordinat**
P-Kırılma - MASW 1	697599	4416597
P-Kırılma - MASW 2	697699	4416697
P-Kırılma - MASW 3	697399	4416795
P-Kırılma - MASW 4	697599	4416793
P-Kırılma - MASW 5	697761	4416770
P-Kırılma - MASW 6	697269	4416881
P-Kırılma - MASW 7	697139	4416950
P-Kırılma - MASW 8	697498	4416889
P-Kırılma - MASW 9	697374	4416985
P-Kırılma - MASW 10	697599	4416997
P-Kırılma - MASW 11	697699	4416998
P-Kırılma - MASW 12	697797	4417054
P-Kırılma - MASW 13	696998	4417100
P-Kırılma - MASW 14	697748	4416829
P-Kırılma - MASW 15	697201	4417095
P-Kırılma - MASW 16	697444	4417087
P-Kırılma - MASW 17	697551	4417109
P-Kırılma - MASW 18	697100	4417198
P-Kırılma - MASW 19	697300	4417193
P-Kırılma - MASW 20	697677	4416772
P-Kırılma - MASW 21	697946	4417026
P-Kırılma - MASW 22	697498	4416658

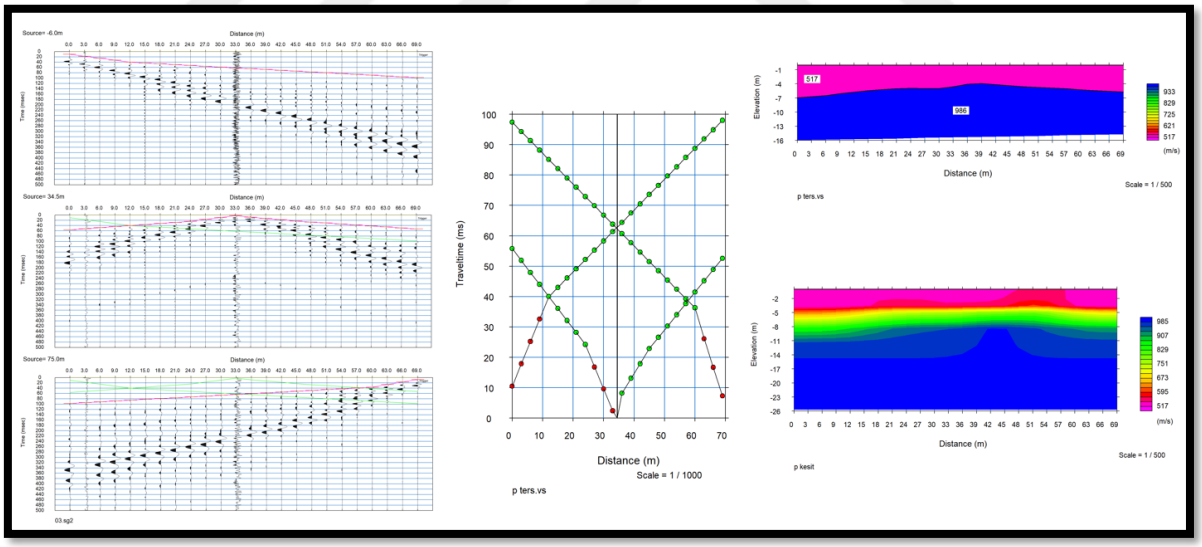
Dinamik-elastik parametreler, cisimlerin gerilmeler altında hacim ve birim değiştirmelerini kontrol eden parametrelerdir. Kayaçların ve zeminlerin deformasyonları birinci derecede bu parametrelere bağlıdır. Sismik hızlardan elde edilen sismik hız oranı (Vp/Vs), hesaplanmıştır (Tablo 11).

Kırılma verilerinden zemin tabakalarının dinamik ve elastik özellikleri hesaplanabilmektedir. Bu yöntemle elde edilen başlıca parametreler; yoğunluk (ρ), poisson oranı (ν), kayma modülü (Gmax), young modülü (E), hacim modülü (K) değerleridir. Bu parametreler, zeminin elastik davranışını, deformasyon kapasitesini ve deprem yükleri altındaki tepkisini anlamak açısından büyük önem taşır.

Abdurrahman Gazi Türbesi çevresinde gerçekleştirilen sismik kırılma ölçümlerine ait veriler incelendiğinde, yapılan çalışmalar kapsamında görüntülenebilen maksimum derinlikte zemin yapısının iki tabakalı bir karakter sergilediği görülmektedir. Birinci tabaka genellikle düşük P Kırılma ve sahip olup, gevşek ve zayıf zemin malzemelerinden oluşmaktadır. Bu tabakada elde edilen Vp değerleri 441-698 m/sn arasında değişmektedir. Söz konusu hız aralıkları, yüzeydeki zeminlerin yüksek boşluk oranına sahip, suya doygun ve kohezyonu zayıf bir yapıda olduğunu göstermektedir. Bu tür malzemeler, özellikle eğimli arazilerde yüzeysel kayma veya heyelan riski açısından kritik öneme sahiptir.

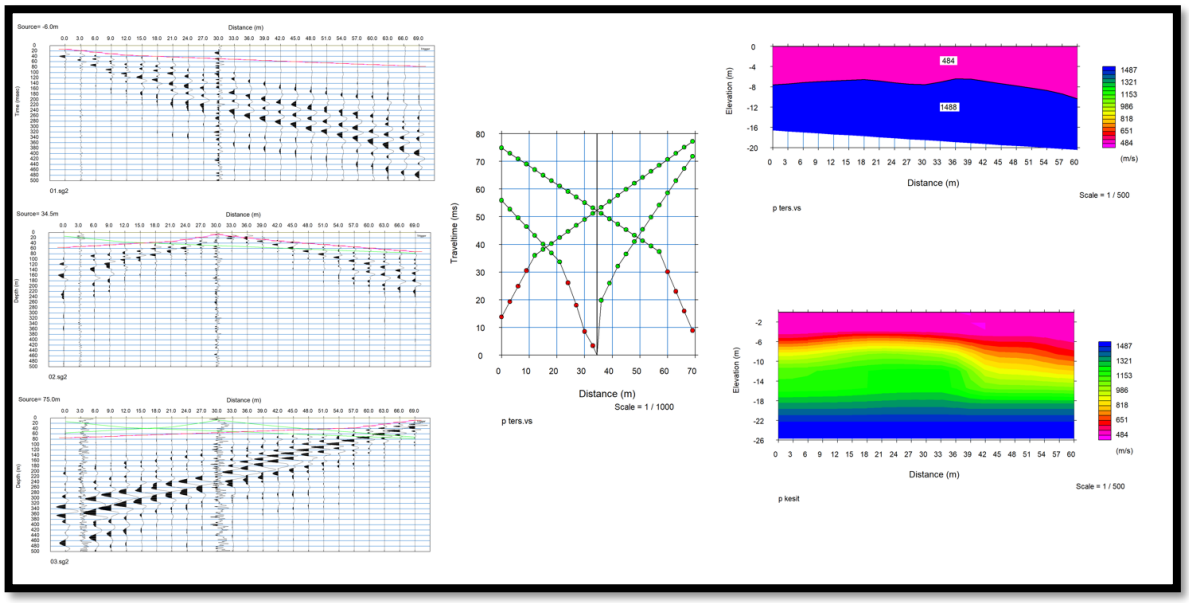
İkinci tabakada ise Vp ve değerlerinde belirgin bir artış gözlenmektedir. Bu tabakada Vp genellikle 1500-2000 m/sn, civarındadır. Artan hız değerleri, zeminin daha sıkı ve yarı kaya özellikleri kazandığını, dolayısıyla daha rijit bir birim oluşturduğunu göstermektedir. Ancak, iki tabaka arasındaki hız farkının fazla olması, geçiş zonunda zayıflık düzlemi oluşabileceğine işaret etmektedir.

Arazi çalışmaları kapsamında yapılan P- kırılma verilerine ait yol zaman grafiği ve yer altı modeline ait değerlendirmeler Şekil 28'de ve Şekil 29'de gösterilmiştir. Diğer verilerin değerlendirme aşamaları Ek'ler kısmında sunulmuştur.



Şekil 28. Sismik kırılma-1 ölçümü P- dalga hızı yol-zaman grafiği ve yeraltı modeli

Profilde P- dalgası kayıtlarında jeofonların uzaklıklarına bağlı olarak, varış zamanları düz atış için 10-100 ms arasında, orta atış için 0-60 ms arasında, ters atış için 10-100 ms arasında değişmektedir. Birinci profilde, pembe ile gösterilen yerler P- dalga hızı modelinde 517 m/sn ve tabaka kalınlığı yaklaşık olarak 7 m seviyelerindedir. Mavi renkle gösterilen yerler P- dalga hızı modelinde 986 m/sn'lik hıza sahiptir (Bkz. Şekil 28).



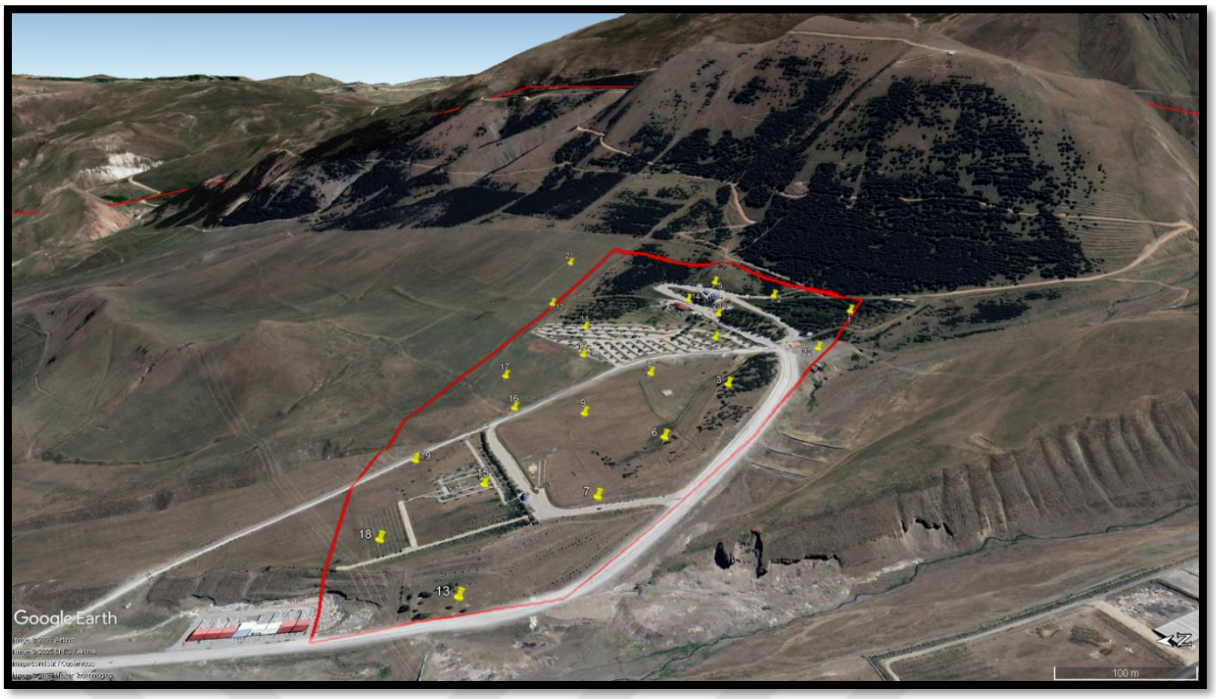
Şekil 29. Sismik kırılma-2 ölçümü P dalga hızı yol-zaman grafiği ve yeraltı modeli

Profilde P- dalgası kayıtlarında jeofonların uzaklıklarına bağlı olarak, varış zamanları düz atış için 10-80 ms arasında, orta atış için 0-60 ms arasında, ters atış için 10-80 ms arasında değişmektedir. Birinci profilde, pembe ile gösterilen yerler P- dalga hızı modelinde 484 m/sn ve tabaka kalınlığı yaklaşık olarak 8m seviyelerindedir. Mavi renkle gösterilen yerler P- dalga hızı modelinde 1488 m/sn'lik hıza sahiptir (Şekil 29).

Diğer ölçümlere ait P- dalga hızı yol-zaman grafiği ve yeraltı modeli Ek'ler kısmında verilmiştir.

Çok Kanallı Yüzey Dalgası Analizi (MASW) Verilerinin Değerlendirilmesi

Çok Kanallı Yüzey Dalgası Analizi (MASW) çalışmalarında 24 kanallı cihaz kullanılmıştır. Kayıtlarda kullanılan jeofonlar 4,5 hz'dir. İnceleme alanın her noktasından veri alabilecek şekilde 22 profilde baş, ters ve ara atışlar yapılarak arazi çalışmaları gerçekleştirilmiştir. MASW verileri SeisImager/SW V.5.15 yazılımı kullanılarak analiz edilmiştir. Çok-kanallı yüzey dalgası verilerinden faz hızı eğrisi elde edilmiştir. Ters çözüm işleminde temel mod frekans bağımlı faz hızı eğrisi kullanılmıştır. Ters çözüm işleminde sönümlü en küçük kareler algoritması kullanılarak 1B'lu Vs-derinlik kesitleri elde edilmiştir. İterasyon sayısı 5 ile 15 arasında değişmektedir. Her bir Vs-derinlik kesiti kabul edilebilir RMS değeri ile elde edilmiştir. Ayrıca Sahada her bir jeofonun arasından da ara atışlar yapılarak yüzey dalgası verisi toplanmış ve 2- Boyutlu olarak Vs-derinlik profilleri elde edilmiştir. İnceleme alanında yapılan MASW ölçüm profillerinin orta noktalarının dağılımları Şekil 30'da ve ölçüm koordinatları Tablo 10'da gösterilmiştir.



Şekil 30. MASW çalışma noktaları

Tablo 11. Tez çalışma alanı için MASW ve sismik -P kırılma yöntemleri ile hesaplanan Zeminin Dinamik ve Elastik Parametreleri

SİS NO	Tabaka No	Vp (m/sn)	Masw (m/sn)	h (m)	r (gr/cm^3)	Vp/Vs	υ	G_{max} (kg/cm^2)	E_d (kg/cm^2)	K (kg/cm^2)	Vs_{30} (m/sn)	YEREL ZEMİN
SİS1	1	517	288	7	1.48	1.80	0.28	1224	3122	2313	409	ZC
	2	986	469		1.73	2.10	0.35	3815	10330	11776		
SİS2	1	484	240	8	1.45	2.02	0.34	836	2236	2286	345	ZD
	2	1488	411		1.92	3.62	0.46	3247	9474	38235		
SİS3	1	628	399	8	1.55	1.57	0.16	2467	5731	2822	565	ZC
	2	1695	665		1.99	2.55	0.41	8783	24751	45349		
SİS4	1	518	332	7	1.48	1.56	0.15	1628	3748	1792	467	ZC
	2	1197	533		1.82	2.25	0.38	5172	14237	19190		
SİS5	1	441	274	4	1.42	1.61	0.19	1065	2525	1339	380	ZC
	2	1728	404		2.00	4.28	0.47	3257	9583	55247		
SİS6	1	698	395	5	1.59	1.77	0.26	2482	6277	4442	579	ZC
	2	1571	638		1.95	2.46	0.40	7932	22229	37518		
SİS7	1	501	298	4	1.46	1.68	0.23	1300	3189	1942	541	ZC
	2	1310	618		1.86	2.12	0.36	7112	19300	22474		
SİS8	1	713	448	7	1.60	1.59	0.17	3210	7536	3851	570	ZC
	2	1738	621		2.00	2.80	0.43	7707	21993	50092		
SİS9	1	677	457	5	1.58	1.48	0.08	3297	7132	2840	576	ZC
	2	1771	607		2.01	2.92	0.43	7398	21210	53114		
SİS10	1	731	383	5	1.61	1.91	0.31	2361	6189	5452	475	ZC
	2	1284	499		1.85	2.57	0.41	4614	13020	24395		
SİS11	1	470	301	5	1.44	1.56	0.15	1306	3009	1443	467	ZC
	2	1303	525		1.86	2.48	0.40	5126	14384	24739		

Tablo 11. (Devamı)

SİS12	1	453	223	6	**1.43**	**2.03**	**0.34**	**710**	**1903**	**1984**	**375**	**ZC**
	2	958	452		**1.72**	**2.12**	**0.36**	**3518**	**9547**	**11113**		
SİS13	1	483	252	4	**1.45**	**1.92**	**0.31**	**921**	**2420**	**2157**	**461**	**ZC**
	2	1283	528		**1.85**	**2.43**	**0.40**	**5164**	**14440**	**23608**		
SİS14	1	599	224	6	**1.53**	**2.67**	**0.42**	**768**	**2180**	**4470**	**347**	**ZD**
	2	1452	402		**1.91**	**3.61**	**0.46**	**3088**	**9007**	**36166**		
SİS15	1	643	398	5	**1.56**	**1.62**	**0.19**	**2469**	**5873**	**3152**	**567**	**ZC**
	2	1557	619		**1.94**	**2.52**	**0.41**	**7450**	**20951**	**37202**		
SİS16	1	696	360	6	**1.59**	**1.93**	**0.32**	**2060**	**5429**	**4954**	**485**	**ZC**
	2	1427	531		**1.90**	**2.69**	**0.42**	**5364**	**15230**	**31587**		
SİS17	1	569	292	8	**1.51**	**1.95**	**0.32**	**1289**	**3406**	**3176**	**442**	**ZC**
	2	1422	544		**1.90**	**2.61**	**0.41**	**5625**	**15911**	**30934**		
SİS18	1	652	377	5	**1.56**	**1.73**	**0.25**	**2223**	**5552**	**3685**	**523**	**ZC**
	2	1178	567		**1.81**	**2.08**	**0.35**	**5830**	**15731**	**17391**		
SİS19	1	940	440	8	**1.71**	**2.14**	**0.36**	**3318**	**9023**	**10720**	**505**	**ZC**
	2	1641	534		**1.97**	**3.07**	**0.44**	**5618**	**16188**	**45560**		
SİS20	1	338	222	5	**1.33**	**1.52**	**0.12**	**654**	**1466**	**644**	**358**	**ZD**
	2	1456	408		**1.91**	**3.57**	**0.46**	**3183**	**9277**	**36289**		
SİS21	1	625	314	10	**1.55**	**1.99**	**0.33**	**1526**	**4063**	**4011**	**392**	**ZC**
	2	1256	448		**1.84**	**2.80**	**0.43**	**3698**	**10556**	**24137**		
SİS22	1	567	350	3	**1.51**	**1.62**	**0.19**	**1850**	**4412**	**2389**	**547**	**ZC**
	2	1207	583		**1.82**	**2.07**	**0.35**	**6201**	**16716**	**18311**		

MASW yöntemiyle yapılan ölçümler, zeminin sismik dalga yayılım hızlarını kullanarak dinamik özelliklerini belirlemeye yarar. Bu yöntemle öncelikle kayma dalgası hızı (Vs) profili elde edilir. Elde edilen bu hız profili yardımıyla zeminin Vs_{30} değeri, kayma modülü (Gmax), elastisite modülü (Ed), Poisson oranı (ν) ve yoğunluk (ρ) gibi temel mühendislik parametreleri Vp değerini de kullanarak hesaplanabilir.

MASW verileri, zeminin tabakalaşma durumunu, sertlik değişimlerini ve dinamik davranış özelliklerini ortaya koyduğu için özellikle deprem mühendisliği ve zemin sınıflandırmalarında güvenilir bir yöntem olarak kullanılmaktadır. Bu sayede, yüzeyden itibaren belirli bir derinliğe kadar zeminin elastik davranışı, rijitliği ve olası zayıf tabaka geçişleri detaylı biçimde değerlendirilebilmektedir. MASW yönteminden elde edilen ilk 30m'deki ortalama hızı ve 2018 yılında yürürlüğe giren Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğinde (TBDY 2018) göre zemin sınıflaması Tablo 12'de gösterilmiştir.

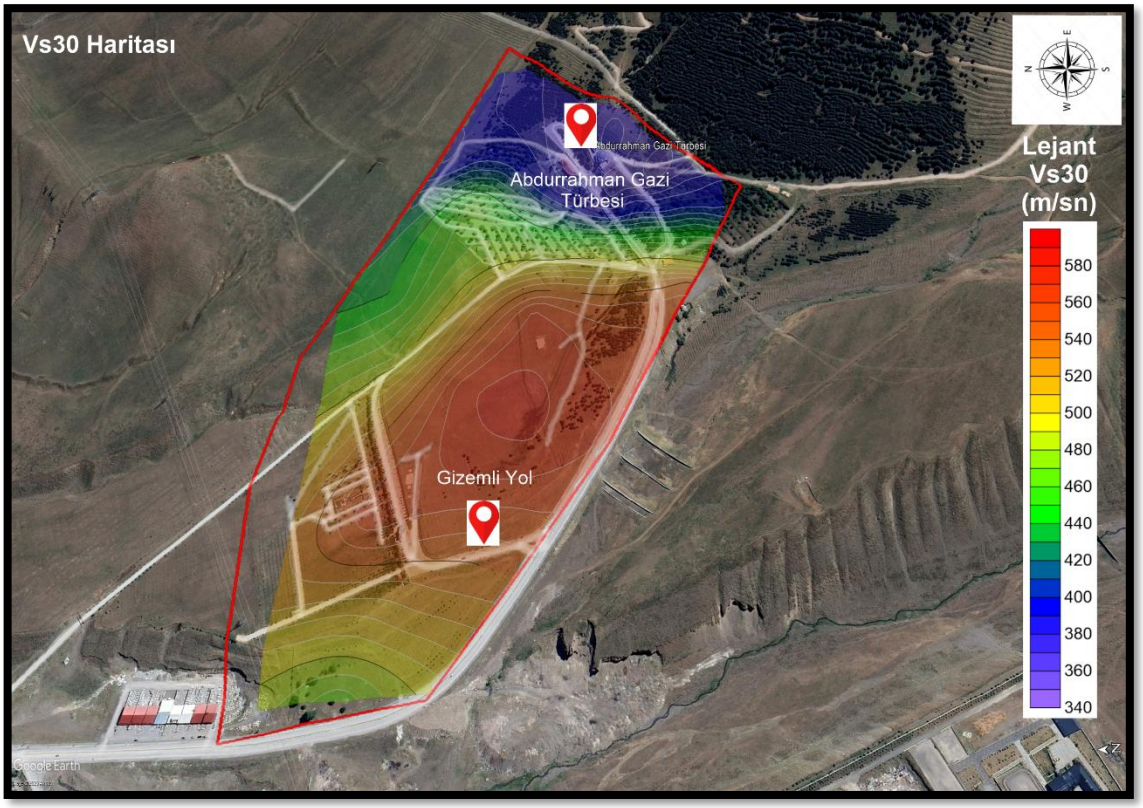
Tablo 12. MASW Yönteminden Elde Edilen Vs_{30} Hızları

SİS NO	Tabaka No	Vp (m/sn)	Vs (m/sn)	Vs_{30} (m/sn)	YEREL ZEMİN	SİS NO	Tabaka No	Vp (m/sn)	Vs (m/sn)	Vs_{30} (m/sn)	YEREL ZEMİN
SİS1	1	517	288	**409**	**ZC**	**SİS12**	1	453	223	**375**	**ZC**
	2	986	469				2	958	452		
SİS2	1	484	240	**345**	**ZD**	**SİS13**	1	483	252	**461**	**ZC**
	2	1488	411				2	1283	528		
SİS3	1	628	399	**565**	**ZC**	**SİS14**	1	599	224	**347**	**ZD**
	2	1695	665				2	1452	402		
SİS4	1	518	332	**467**	**ZC**	**SİS15**	1	643	398	**567**	**ZC**
	2	1197	533				2	1557	619		
SİS5	1	441	274	**380**	**ZC**	**SİS16**	1	696	360	**485**	**ZC**
	2	1728	404				2	1427	531		
SİS6	1	698	395	**579**	**ZC**	**SİS17**	1	569	292	**442**	**ZC**
	2	1571	638				2	1422	544		
SİS7	1	501	298	**541**	**ZC**	**SİS18**	1	652	377	**523**	**ZC**
	2	1310	618				2	1178	567		
SİS8	1	713	448	**570**	**ZC**	**SİS19**	1	940	440	**505**	**ZC**
	2	1738	621				2	1641	534		
SİS9	1	677	457	**576**	**ZC**	**SİS20**	1	338	222	**358**	**ZD**
	2	1771	607				2	1456	408		
SİS10	1	731	383	**475**	**ZC**	**SİS21**	1	625	314	**392**	**ZC**
	2	1284	499				2	1256	448		
SİS11	1	470	301	**467**	**ZC**	**SİS22**	1	567	350	**547**	**ZC**
	2	1303	525				2	1207	583		

2018 yılında yürürlüğe giren Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğinde (TBDY 2018), zeminlerin deprem sırasında farklı davranışlar gösterebileceği kabul edilmekte ve bu nedenle zeminler belirli sınıflara ayrılmaktadır. Sınıflandırmada özellikle ortalama kayma dalga hızı (Vs_{30}), Standart Penetrasyon Testi (SPT-N30) ve kayma modülü gibi parametreler dikkate alınmaktadır.

Çalışma alanında Vs_{30} değerleri 345-579 m/sn aralığında değişmektedir. Bu hız aralıkları, bölgedeki zeminlerin genellikle TBDY 2018'e göre zemin "ZC" sınıfında olduğunu, ancak SİS-2, SİS-14 ve SİS-20 noktalarında Vs_{30} değerlerinin düşmesi nedeniyle "ZD" sınıfı özellik gösterdiğini ortaya koymaktadır. ZD sınıfında kalan bu bölgelerde zeminlerin görece gevşek, suya doygun veya düşük kesme dalgası hızına sahip birimler içerdiği düşünülmektedir.

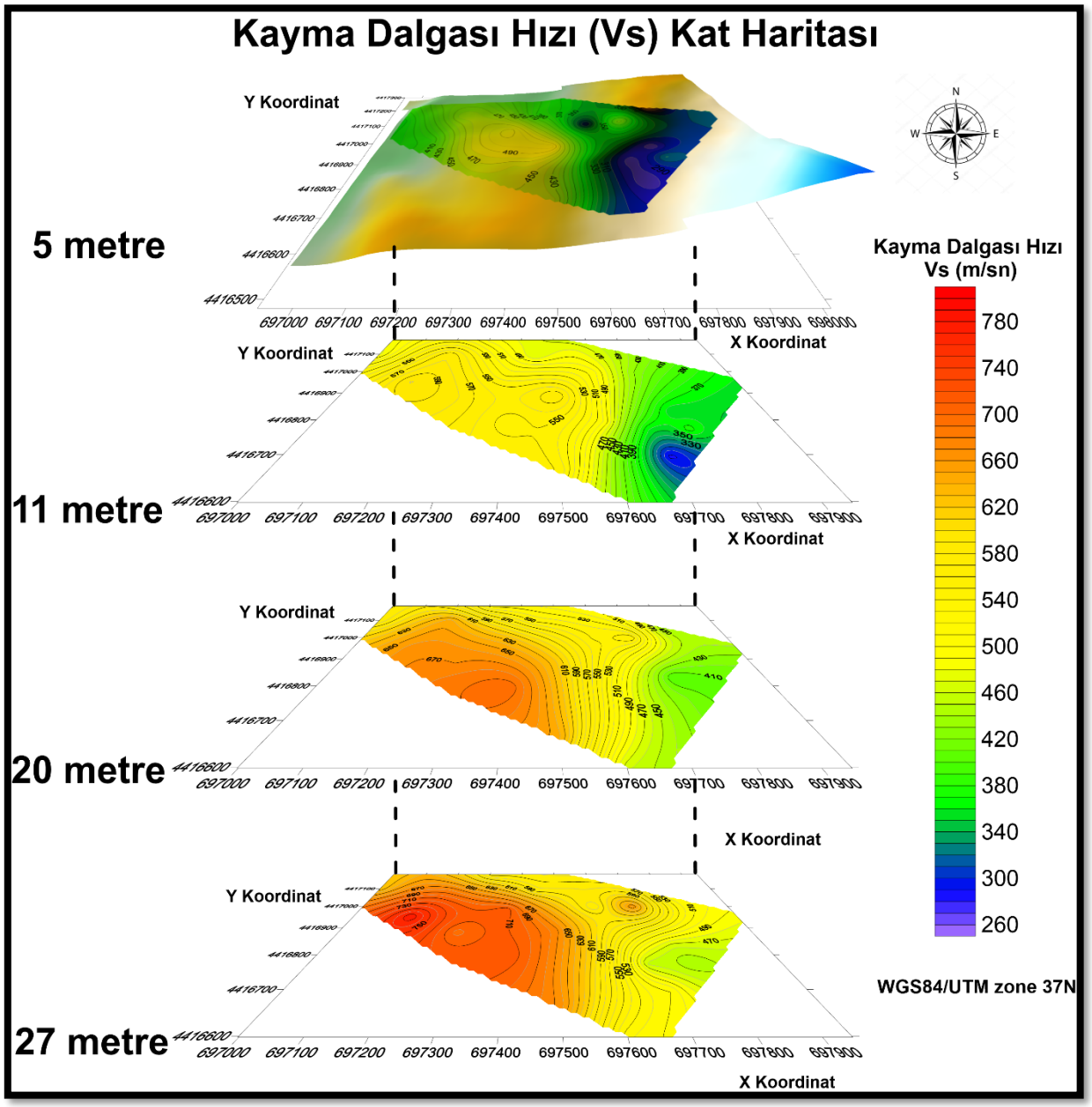
Çalışma alanında yapılan ölçümlerden elde edilen Vs_{30} değerleri kullanılarak bölgenin kayma dalgası hızını gösteren alansal dağılım haritası hazırlanmıştır. Şekil 31'de verilen bu harita, sahadaki zemin özelliklerininVs30 değerinin konuma bağlı değişimini ayrıntılı biçimde ortaya koymaktadır.



Şekil 31. Çalışma alanı Vs_{30} dağılım haritası

Çalışma alanına ait Vs_{30} haritasına göre, Vs_{30} değerleri 345 ile 579 m/sn arasında değişmektedir. Harita genelinde Abdurrahman Gazi Türbesi'nin bulunduğu kuzey kesimlerde hız değerlerinin düşük olduğu, bu alanlarda zeminin nispeten daha gevşek bir yapıya sahip olduğu görülmektedir. Güneybatı ve orta bölümlerde ise hızların arttığı, bu kesimlerde zeminin daha sıkı ve dayanımlı özellik gösterdiği anlaşılmaktadır. Türbe çevresindeki düşük Vs_{30} değerleri, zeminin yer yer yumuşak karakterde olabileceğini ve eğimli yüzeylerde kayma açısından dikkat edilmesi gereken alanlar bulunduğunu düşündürmektedir. Buna karşılık Gizemli Yol çevresinde daha yüksek Vs_{30} değerleri gözlenmiş olup, bu bölgelerde zeminin daha oturmuş ve stabil bir yapı sergilediği söylenebilir (Şekil 31).

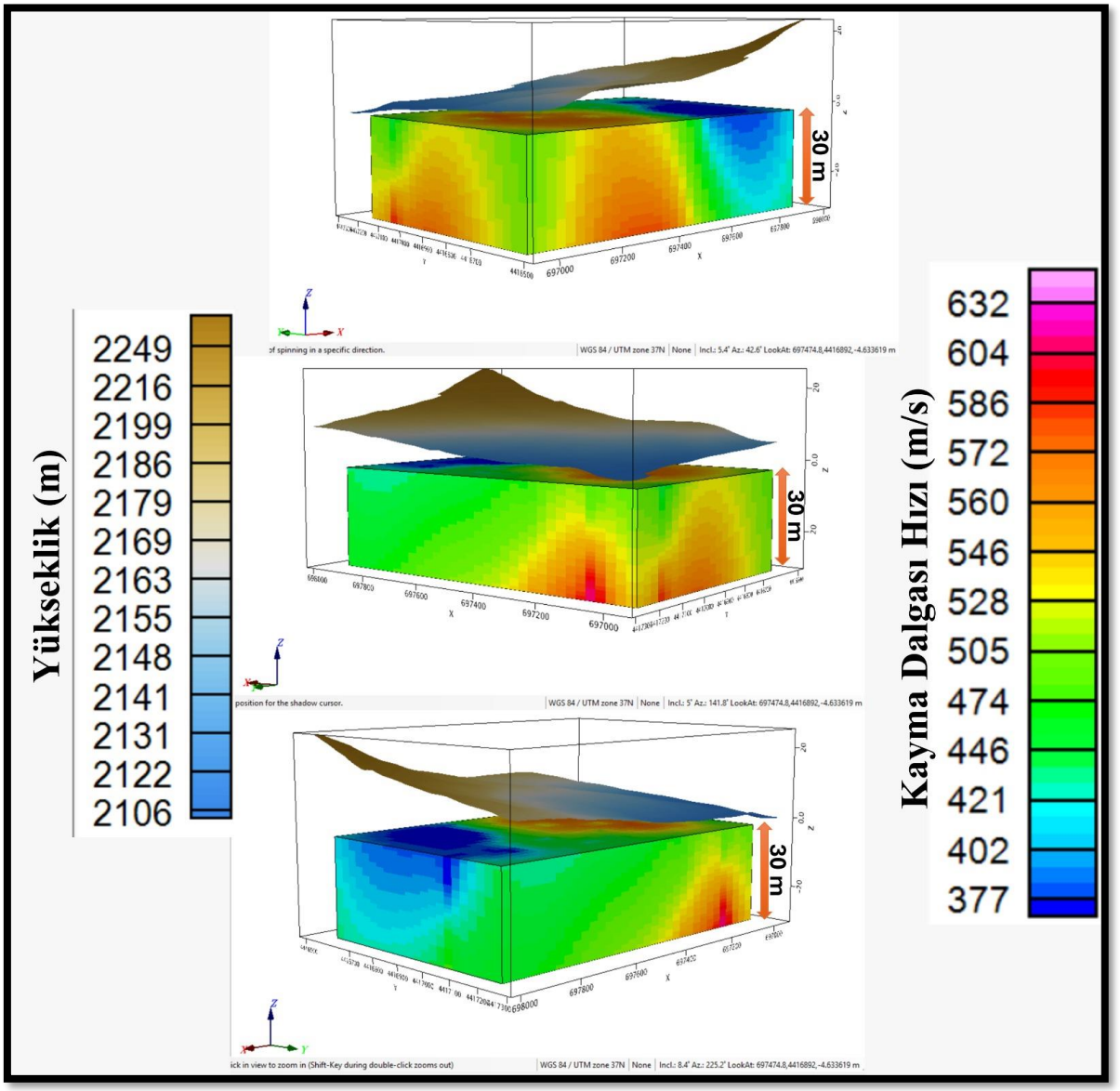
Çalışma alanına ait farklı derinliklerdeki (seviye) kayma dalgası hızı (Vs) dağılımları için 5, 11, 20 ve 27 metre derinliklerdeki zeminlerin kayma dalgası hızları Şekil 32'de gösterilmektedir. Genel olarak yüzeyden derine doğru ilerledikçe Vs değerlerinde belirgin bir artış görülmektedir. Bu durum, derinlere doğru zeminin daha sıkı ve oturmuş bir yapıya geçtiğini ortaya koymaktadır.



Şekil 32. Çalışma alanı için elde edilen Kayma dalgası hızı (Vs) seviye haritatları (5m,11m, 20m ve 27m)

5 metre derinlikteki haritada, kuzey kesimlerde düşük hız değerlerinin (yaklaşık 300-400 m/sn) hâkim olduğu, bu bölgelerin daha gevşek zemin özellikleri taşıdığı anlaşılmaktadır. Aynı derinlikte güneybatıya doğru hızların artması, bu alanlarda zeminin daha dayanımlı ve rijit bir yapı sergilediğini göstermektedir. 11 metre derinlikte hız değerlerinin genel olarak arttığı ve 500 m/sn civarına ulaştığı gözlenmektedir. Bu seviyede özellikle orta ve güney kesimlerde sıkı zemin birimlerinin etkisi belirginleşmektedir. 20 ve 27 metre derinliklerde ise Vs değerlerinin 600-750 m/sn aralığına çıktığı, zeminin bu derinliklerde sıkı bir karakter kazandığı görülmektedir. Özellikle 27 metre derinlikteki yüksek hız değerleri, alt seviyelerde daha oturmuş ve stabil bir yapının hâkim olduğu görülmektedir.

Çalışma alanı çevresine ait üç boyutlu Vs_{30} modeline göre zeminlerin derinlik boyunca hız değişimleri hacimsel olarak Şekil 33'de gösterilmiştir. Görselde açık mavi ve yeşil tonların hâkim olduğu kuzey kesimlerde Vs_{30}değerlerinin daha düşük olduğu, bu alanların nispeten daha yumuşak zemin özellikleri taşıdığı görülmektedir. Buna karşılık güney ve güneybatı yönlerinde turuncu ve kırmızı tonlarla ifade edilen bölgelerde Vs_{30} değerlerinin arttığı, bu alanların daha sıkı ve dayanımlı zemin koşullarına sahip olduğu belirlenmiştir. Üç boyutlu görünüm, yüzeyden derine doğru zeminin kademeli olarak sıkılaştığını ve özellikle türbe çevresinde zemin özelliklerinin yatayda da değişkenlik gösterdiğini ortaya koymaktadır. Bu dağılım, alan genelinde zemin davranışının homojen olmadığını ve yerel koşulların mühendislik açısından dikkate alınması gerektiğini göstermektedir (Şekil 33).



Şekil 33. Çalışma alanına ait 30 m derinliğe kadar 3B'lu Vs derinlik modeli

Genel olarak, yüzeyden derine doğru Vs değerlerindeki artış, bölgede zemin tabakalarının üstte daha gevşek, altta ise daha sıkı bir yapı sergilediğini ortaya koymaktadır. Bu durum, Abdurrahman Gazi Türbesi çevresinde topoğrafik eğim de dikkate alındığında yüzeysel kayma potansiyelinin daha çok üst tabakalarda etkili olabileceğini, derin seviyelerde ise zeminin daha sağlam bir davranış gösterdiğini düşündürmektedir.

Sismik P-Kırılma ve MASW yöntemlerinden elde edilen dalga hızları, zeminin mühendislik davranışının belirlenmesinde temel verileri oluşturur. Bu bölümde, bu hızlardan yararlanılarak zeminin elastik parametreleri hesaplanmış ve değerlendirilmiştir.

Kayma modülü (Gmax), zeminin küçük deformasyonlar altındaki rijitliğini belirlemekte kullanılan önemli bir büyüklüktür. Türbe çevresinde elde edilen veriler incelendiğinde, Gmax değerlerinin tabakalar arasında belirgin bir farklılık gösterdiği görülmüştür. Üst tabakalarda düşük kayma dalgası hızları (Vs) nedeniyle Gmax değerleri oldukça düşüktür ve bu durum zeminlerin gevşek, suya doygun ve deformasyona açık yapıda olduğunu göstermektedir. Buna karşılık ikinci tabakada hem yoğunluğun hem de Vs hızlarının artmasıyla Gmax değerleri de yükselmiştir. Bu artış, alt tabakaların daha sıkı ve rijit bir karakter kazandığını, dolayısıyla yük altında daha az şekil değiştirdiğini göstermektedir. Ancak iki tabaka arasındaki kayma modülü farkı, tabaka sınırında zayıflık düzlemlerinin gelişmesine zemin hazırlayabilir. Bu durum özellikle eğimli arazilerde, üst tabakanın altındaki sağlam zemine göre daha kolay kayma eğilimi göstermesine neden olabilir.

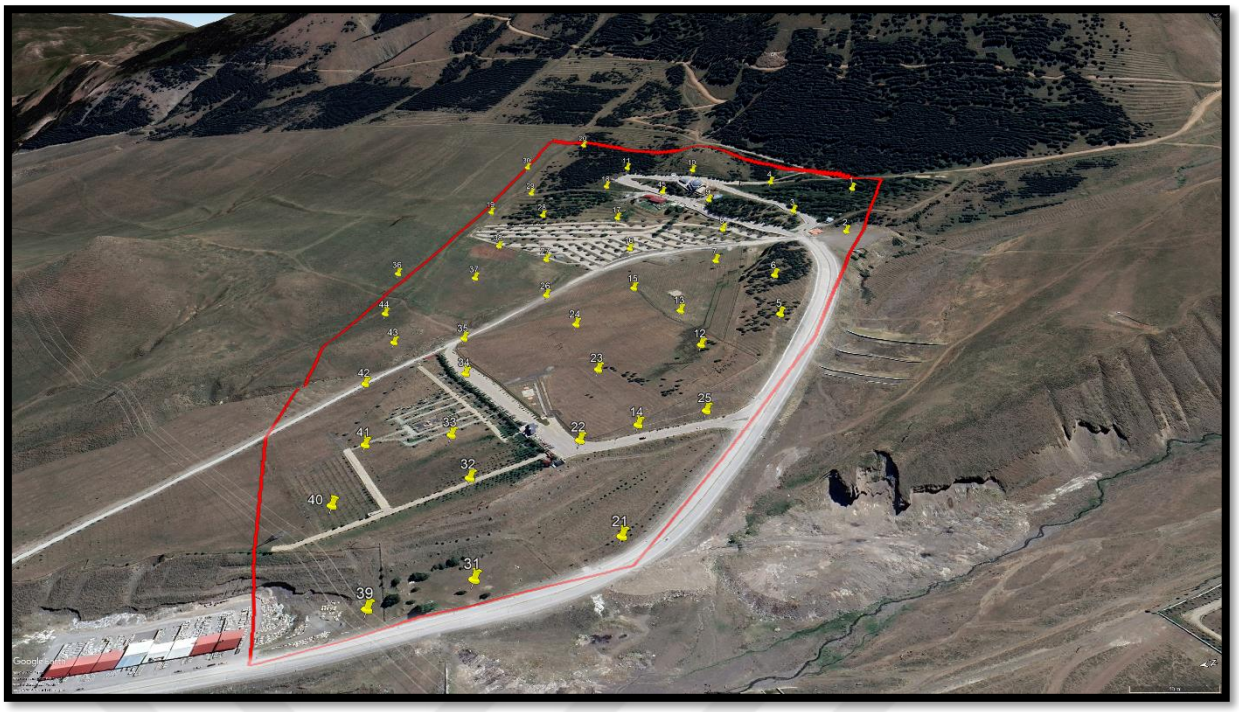
Elastisite modülü (Ed), zeminin yük altında elastik deformasyon davranışını ifade eder ve Gmax ile doğrudan ilişkilidir. Türbe çevresinde yapılan hesaplamalarda, üst tabakalarda Ed değerlerinin düşük, alt tabakalarda ise belirgin şekilde yüksek olduğu görülmüştür. Bu durum, üst birimlerin sıkışabilirliğinin fazla, taşıma gücünün ise düşük olduğunu göstermektedir. Ed değerlerinin yer yer 100-400 MPa civarında değiştiği, bazı kesitlerde (örneğin Sis3 ve Sis6) 1000 MPa'ın üzerine çıktığı gözlenmiştir. Bu artış, alt seviyelerdeki zeminlerin yarı kaya veya çok sıkı malzeme karakterine sahip olduğunu düşündürmektedir. Ancak üst tabakalarda düşük Ed değerleri, hem deprem yükleri altında büyütme etkisine hem de oturma veya kayma riskine işaret etmektedir. Özellikle gevşek tabakaların kalın olduğu bölgelerde (yaklaşık 5-8 m) elastisite modülünün düşüklüğü, heyelan açısından kritik bir zayıflık oluşturabilir.

Zeminin yoğunluk (ρ) değerleri de dinamik davranışın belirlenmesinde önemli bir göstergedir. Elde edilen verilerde yoğunluk değerlerinin genel olarak 1.4-1.6 g/cm³ aralığında değiştiği görülmektedir. Bu değerler, yüzeydeki zeminlerin gevşek dokulu veya suya doygun malzemelerden oluştuğunu göstermektedir. Yoğunluğun düşük olması, zeminin birim hacim ağırlığının az olduğunu ve suyun etkisiyle taşıma kapasitesinin kolaylıkla azalabileceğini ifade

eder. Alt tabakalarda yoğunluk değerleri nispeten artış göstermekte olup, bu da daha sıkı ve az boşluklu bir yapının varlığına işaret etmektedir. Ancak yüzeydeki düşük yoğunluklu birimler, özellikle yağışlı dönemlerde doygunluğa ulaştığında efektif gerilmelerin azalmasına ve kayma dayanımının düşmesine neden olabilir. Bu durum, türbe çevresinde potansiyel yüzeysel kaymaların gelişmesi açısından önemli bir risk faktörüdür.

Mikrotremör Verilerinin Değerlendirilmesi

Mikrotremör çalışmalarında Smartsolo IGU-BD3C-LC marka cihaz kullanılmıştır. Kayıtlarda kullanılan cihaz, üç bileşenli geniş bant sismik kayıt istasyonu olup 0,2 Hz-150 Hz frekans aralığındadır. İnceleme alanın her noktasından veri alabilecek şekilde 45 noktadan arazi çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Mikrotremör verileri Geopsy yazılımı (Wathelet vd. 2020) kullanılarak analiz edilmiştir. Mikrotremor verilerinin değerlendirilmesinde yatay bileşenin düşey bileşene spektral oranı (Nakamura Yöntemi) yöntemi kullanılmıştır. Öncelikle üç bileşen mikrotremor verilerinin trend etkisi giderildikten sonra 0.05-20 Hz aralığında bant geçişli süzgeç uygulanmış ve 40,96 sn'lik pencereler seçilerek her bir pencereye %5 cosinüs taper uygulanmıştır. Herbir pencere için Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT) uygulanarak her bir bileşene ait genlik spektrumları elde edilmiştir. Elde edilen spektrumlara ise band genişliği b=40 seçilerek Konno-Ohmachi yuvarlatması uygulanmıştır. Yatay bileşen genlik spektrumlarının düşey bileşen genlik spektrumuna oranlanlanması ile H/V spektral oran grafiği elde edilmiştir. Bu spektrumda maximum genlik büyütme faktörü, bu genliğe karşılık gelen frekans zekim hakim frekansı olarak belirlenmiştir. Mikrotremör ölçümlerinin noktasal dağılımları Şekil 34'de ve ölçüm koordinatları Tablo 13'de gösterilmiştir.



Şekil 34. Mikrotremör arazi ölçüm noktaları

Tablo 13. Mikrotremör Arazi Ölçüm Koordinatları (UTM WGS 84 37 ZON)

Ölçü No	X Koordinat	Y Koordinat	Ölçü No	X Koordinat	Y Koordinat	Ölçü No	X Koordinat	Y Koordinat
M-1	697630	4416615	M-16	697601	4416895	M-31	696998	4417100
M-2	697514	4416664	M-17	697700	4416899	M-32	697098	4417096
M-3	697601	4416700	M-18	697798	4416899	M-33	697179	4417113
M-4	697701	4416702	M-19	697767	4417053	M-34	697300	4417100
M-5	697302	4416804	M-20	697933	4416914	M-35	697398	4417095
M-6	697400	4416781	M-21	697018	4416999	M-36	697614	4417173
M-7	697496	4416820	M-22	697129	4417015	M-37	697575	4417084
M-8	697599	4416786	M-23	697255	4416984	M-38	697659	4417052
M-9	697689	4416783	M-24	697375	4416990	M-39	696991	4417168
M-10	697768	4416788	M-25	697161	4416908	M-40	697102	4417197
M-11	697838	4416865	M-26	697495	4417009	M-41	697193	4417182
M-12	697266	4416889	M-27	697600	4416997	M-42	697327	4417192
M-13	697362	4416888	M-28	697737	4416992	M-43	697425	4417170
M-14	697144	4416967	M-29	697814	4417001	M-44	697511	4417183
M-15	697463	4416917	M-30	697899	4416998	M-45	697744	4416833

Mikrotremör yöntemiyle, arazide zeminin doğal titreşimlerini ölçerek yeraltı tabakalarının dinamik özelliklerinin belirlenmesini sağlayan bir jeofizik yöntemdir. Bu yöntemle, genellikle zeminin hâkim titreşim periyodu (T_0) ve spektral genlik oranlarından elde edilen hâkim frekans (f_0) gibi veriler elde edilir. Ayrıca bu ölçümlerden yatay/düşey spektral

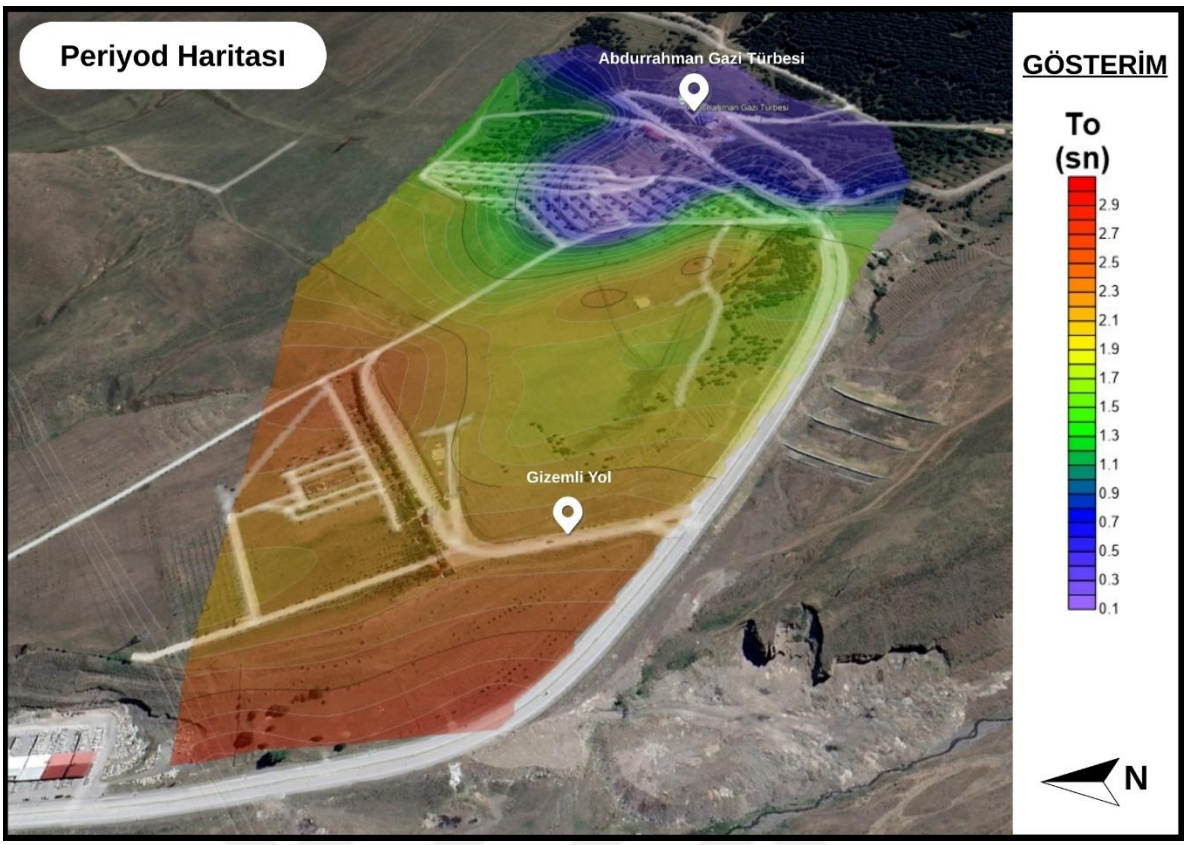
oran (H/V) eğrileri oluşturularak zeminin dinamik davranışı hakkında önemli bilgiler elde edilir. Mikrotremör verileri, özellikle deprem etkileri altında zeminin büyütme potansiyelini ve yerel rezonans özelliklerini değerlendirmek açısından oldukça kullanışlıdır. Özellikle heyelan riski taşıyan bölgelerde zemin tabakalarının süreksizlikleri ve zayıf zonların tespitinde önemli bilgiler sunmaktadır.

Tablo 14. Mikrotremör çalışmalarından elde edilen Zemin Hakim Periyodu ve Büyütme Değerleri

Ölçü No	Fo	To	HV	Ölçü No	Fo	To	HV	Ölçü No	Fo	To	HV
M-1	3.39	0.29	3.91	M-16	5.64	0.18	1.64	M-31	0.36	2.78	3.68
M-2	0.68	1.47	3.76	M-17	6.35	0.16	2.90	M-32	0.44	2.27	5.41
M-3	3.58	0.28	3.55	M-18	0.78	1.28	3.76	M-33	0.45	2.22	2.74
M-4	3.54	0.28	4.53	M-19	0.74	1.35	3.87	M-34	0.40	2.50	9.04
M-5	0.33	3.03	8.71	M-20	2.85	0.35	2.36	M-35	0.40	2.50	6.54
M-6	0.60	1.67	2.06	M-21	0.35	2.86	4.14	M-36	0.49	2.04	0.53
M-7	0.46	2.17	3.61	M-22	0.43	2.33	15.03	M-37	0.45	2.22	14.92
M-8	0.69	1.45	2.41	M-23	0.54	1.85	6.51	M-38	0.58	1.72	4.89
M-9	5.08	0.20	2.54	M-24	0.53	1.89	7.87	M-39	0.34	2.94	6.48
M-10	3.08	0.32	2.11	M-25	0.44	2.27	3.88	M-40	0.48	2.08	3.00
M-11	4.26	0.23	2.33	M-26	0.59	1.69	8.24	M-41	0.44	2.27	4.72
M-12	0.30	3.33	3.31	M-27	0.78	1.28	6.15	M-42	0.40	2.50	8.54
M-13	0.56	1.79	3.06	M-28	0.77	1.30	2.75	M-43	0.46	2.17	11.10
M-14	0.30	3.33	4.74	M-29	0.82	1.22	3.91	M-44	0.45	2.22	6.42
M-15	0.46	2.17	8.59	M-30	0.77	1.30	8.99	M-45	7.09	0.14	2.22

Çalışma alanında gerçekleştirilen mikrotremör ölçümlerinden elde edilen zemin hâkim periyot (To) değerleri Tablo 14.'de, zemin özelliklerinin yatayda belirgin bir değişim gösterdiğini ortaya koymaktadır. Harita genelinde To değerlerinin batıdan doğuya doğru azaldığı, bu durumun ise zeminin mühendislik özelliklerinde önemli farklılıklara işaret ettiği görülmektedir. To değerleri 0.3-3.2 saniye arasında değişmekte olup, batı kesimlerde yüksek, doğu kesimlerde ise düşük değerler hâkimdir (Şekil 35).

Mikrotremor ölçümleri 45 noktada yapılmış ve 4 adet ölçüm noktası uygun pik karakterine sahip olmadığı için elenerek 41 noktadaki sonuçlar gridlenerek haritalanmıştır.

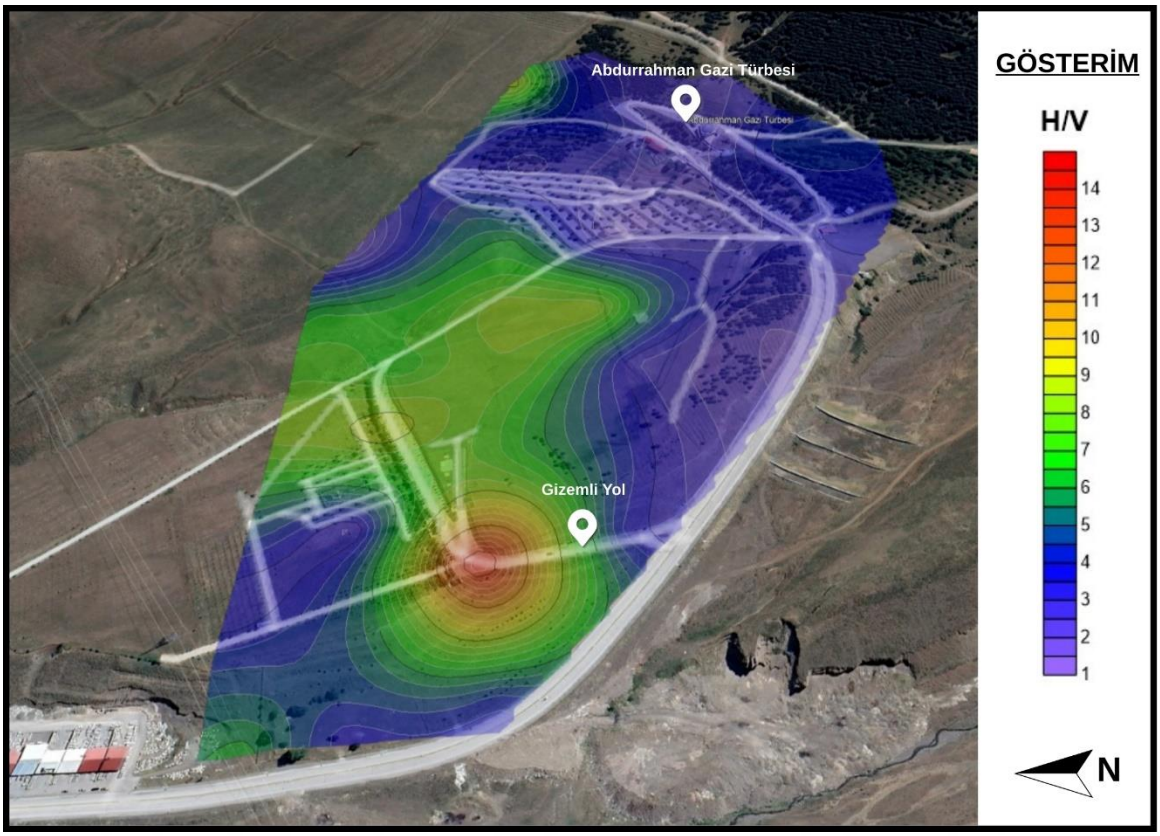


Şekil 35. Çalışma alanı zemin hakim periyot dağılım haritası

Batı kesiminde gözlenen yüksek To değerleri (>2 sn), zemin kalınlığının fazla olduğu, düşük kayma dalgası hızlarına sahip, gevşek ve zayıf malzemelerin egemen olduğu bir ortamı göstermektedir. Bu alanlarda zemin tabakaları sismik dalgaları daha uzun süre titreştirebilir. Bu durum, olası bir sismik uyarım sırasında yüzey hareketlerinin büyütülmesine ve heyelan açısından dengesiz zemin koşullarının oluşmasına neden olabilir. Buna karşın, haritanın doğu kesiminde mavi-mor tonlarla ifade edilen ve topuk şeklinde belirginleşen düşük To zonu dikkat çekmektedir. Bu bölgede To değerleri 0.3-0.8 saniye aralığında olup, zeminin nispeten ince örtü malzemesine sahip olduğunu düşündürmektedir. Bu alanın geometrik olarak topuk biçimli bir yapıda olması, muhtemel heyelan kütlesinin alt sınırına veya kayma yüzeyinin bittiği daha sağlam bir birimi temsil ettiği düşünülmektedir.

Sismik açıdan bakıldığında, düşük To değerleri zeminin yüksek kayma dalgası hızına sahip olduğunu ve enerjiyi hızlı biçimde sönümlediğini gösterir. Bu nedenle, mavi-mor renkli topuk biçimli bölgenin heyelan açısından görece stabil bir kesimi temsil ettiği, buna karşın onun hemen batısında yer alan yüksek To değerli bölgelerin ise gevşek ve kalın zemin örtüsü nedeniyle daha hareketli karakterde olabileceği düşünülmektedir. Bu durum, alanda olası bir kayma hareketinin batıdan doğuya doğru gelişmiş olabileceğini ve topuk kısmında hareketin durulduğunu düşündürmektedir.

Çalışma alanında yapılan mikrotremör ölçümlerinden elde edilen H/V genlik oranı değerleri, zemin özelliklerinin deprem dalgalarını büyütmesi hakkında fikir verebilmektedir. Harita genelinde H/V değerlerinin 1.5 ile 14.5 arasında değiştiği görülmektedir (Şekil 36).



Şekil 36. Çalışma alanı H/V Genliği (A0-büyütme faktörü) haritası

H/V oranının yüksek olduğu bölgeler yumuşak ve zayıf zemin birimlerinin egemen bulunduğu alanları temsil etmektedir. Bu alanlarda zemin, gelen dalgaları büyütme eğilimindedir ve sismik enerjiyi uzun süre tutabilir. Dolayısıyla, H/V genlik oranlarının yüksek çıkması, zemin tabakalarının kalın, gevşek ve düşük kayma dalgası hızına sahip olduğunu göstermektedir. Nitekim türbenin batı çevresinde H/V değerlerinin 12-14 civarında olması, burada zemin koşullarının heyelan açısından oldukça zayıf ve dengesiz bir karakterde olduğunu düşündürmektedir. Benzer şekilde doğu kesimde M-36 civarında gözlenen yüksek H/V genliğinin, yerel zemin kalınlaşması veya farklı litolojik geçişlerle ilişkili olabileceği değerlendirilmektedir.

Düşük H/V değerlerinin (1.5-4 aralığı) hâkim olduğu doğu ve güneydoğu kesimlerde ise zemin daha rijit özellik göstermektedir. Bu bölgelerde zeminin sismik dalgaları büyütme potansiyeli daha düşüktür. Söz konusu alanlar, heyelan açısından daha stabil zemin koşullarını temsil etmektedir.

H/V genliği zemin büyütmesini doğrudan yansıtmamaktadır. Bu değer yalnızca mikrotremor kayıtlarından elde edilen bir frekans oranıdır. Bu nedenle gerçek zemin büyütmesini belirlemek için tek başına yeterli değildir. Standart speketral oran yöntemi, zemin transfer fonksiyonu hesaplamaları gibi dfarklı yöntemler ile doğrudan zemin büyütmesi elde edilebilir.

H/V genlik oranı haritası, To (hâkim periyot) haritasında belirlenen zayıf zonlarla genel olarak benzer eğilim göstermektedir. Her iki haritada da batı kesimlerde zemin zayıflığına, doğu kesimlerde ise sağlam zemin koşullarına işaret eden bir geçiş izlenmektedir. Bu durum, mikrotremör analizlerinden elde edilen parametrelerin birbirini desteklediğini ortaya koymaktadır. Özellikle yüksek H/V değerlerinin görüldüğü alanlar, To değerlerinin de yüksek olduğu bölgelerle çakışmakta olup, bu durum zayıf zeminlerin ve olası kayma yüzeylerinin çalışma alanının batı kesiminde yoğunlaştığını göstermektedir.

Heyelan açısından değerlendirildiğinde, yüksek H/V genlik oranlarının görüldüğü alanlar zemin büyütmesi ve titreşim etkilerinin artmasına neden olabileceğinden, kütle hareketlerinin başlaması veya mevcut bir heyelan kütlesinin yeniden aktif hale gelmesi açısından risk taşıyabileceği düşünülmektedir. Buna karşın, düşük H/V oranlarının hâkim olduğu doğu ve güneydoğu kesimleri (özellikle topuk olarak düşünülen kısmına karşılık gelen bölge) görece daha sağlam bir tabanı temsil etmektedir.

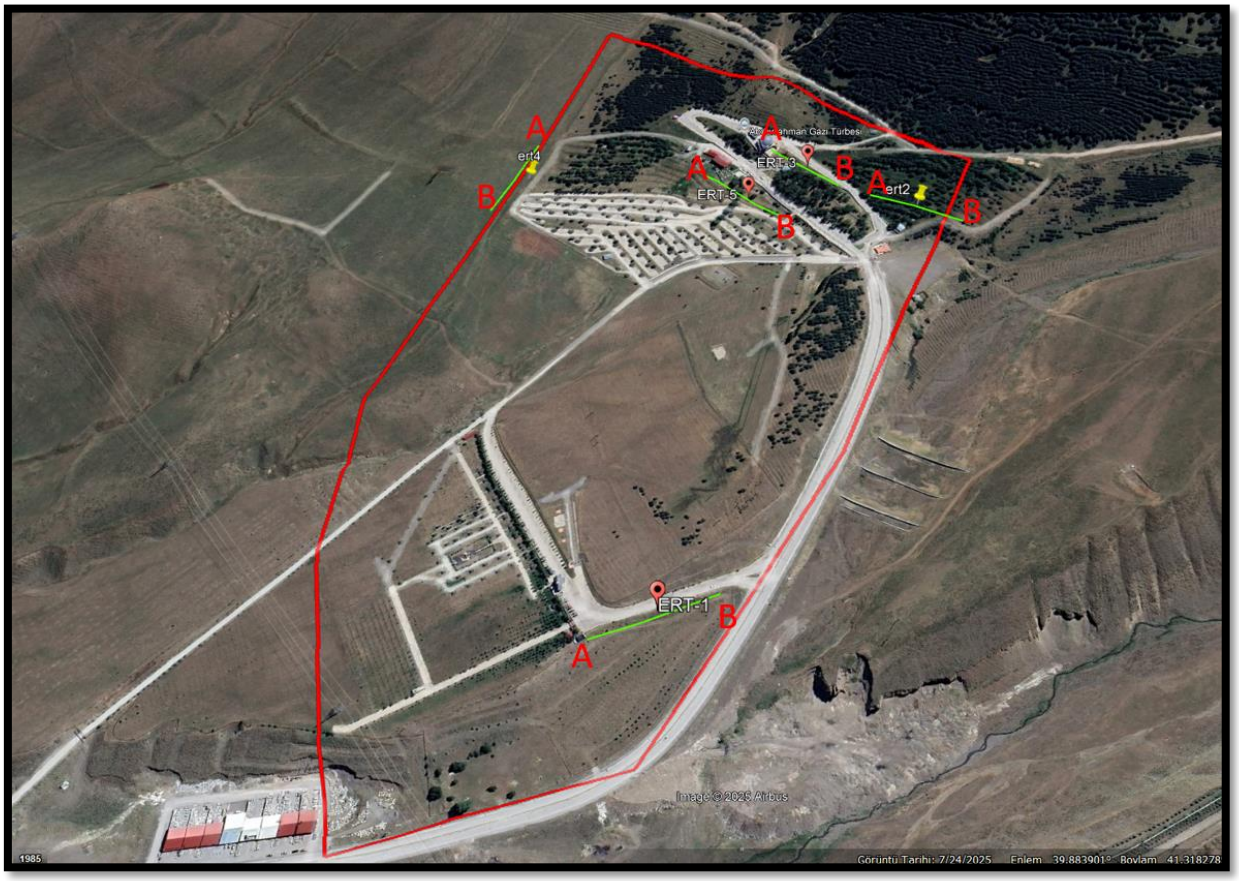
Genel özet olarak, periyot (To) ve H/V genlik oranı haritaları birlikte değerlendirildiğinde, her iki parametrenin de çalışma alanında benzer bir mekânsal dağılım sergilediği görülmektedir. Batı kesimlerde yüksek To ve H/V değerleri, zemin tabakalarının kalın, gevşek ve düşük kayma dalgası hızına sahip olduğunu; dolayısıyla heyelan açısından zayıf ve potansiyel olarak tehlikeli bir alanı temsil ettiğini göstermektedir. Buna karşılık doğu ve güneydoğu kesimlerde düşük To ve H/V değerleri, daha rijit ve sağlam bir zemin yapısına işaret etmekte olup, bu bölgenin heyelan topuğuna karşılık gelen nispeten stabil alan olduğunu düşündürmektedir. Sonuç olarak, her iki harita da zemin özelliklerindeki değişimin batıdan doğuya doğru belirgin biçimde azaldığını ve olası kayma yüzeyinin batı kesiminde geliştiğini ortaya koymaktadır.

Elektrik Rezistivite Tomografi (ERT) Verilerinin Değerlendirilmesi

Elektrik Rezistivite Tomografi (ERT) çalışmalarında, saha verileri Ambrogeo marka 48 elektrotlu cihaz ile toplanmıştır. Ölçümlerde Wenner-Schlumberger dizilim yöntemi kullanılmıştır. Elde edilen verilerin ters çözümü, RES2DINV(Geotomo Software,2001) programında en küçük kareler yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Ters çözüm sonuçları modeller

halinde sıralı olarak sunulmuştur. Saha ölçümleri sırasında topoğrafik bilgiler elde edildiğinden, bu veriler ters çözüm modellerine dâhil edilmiştir.

İnceleme alanında heyelan potansiyelinin bulunduğu değerlendirilen noktalar ile ‘gizemli yol’ olarak adlandırılan bölgeyi temsil eden konumlar dikkate alınarak toplam beş farklı noktada arazi çalışmaları yürütülmüştür (Şekil 37). Yapılan ölçümlere ait koordinatlar ise Tablo 15’de ayrıntılı biçimde sunulmuştur.



Şekil 37. Çalışma alanı ERT noktaları

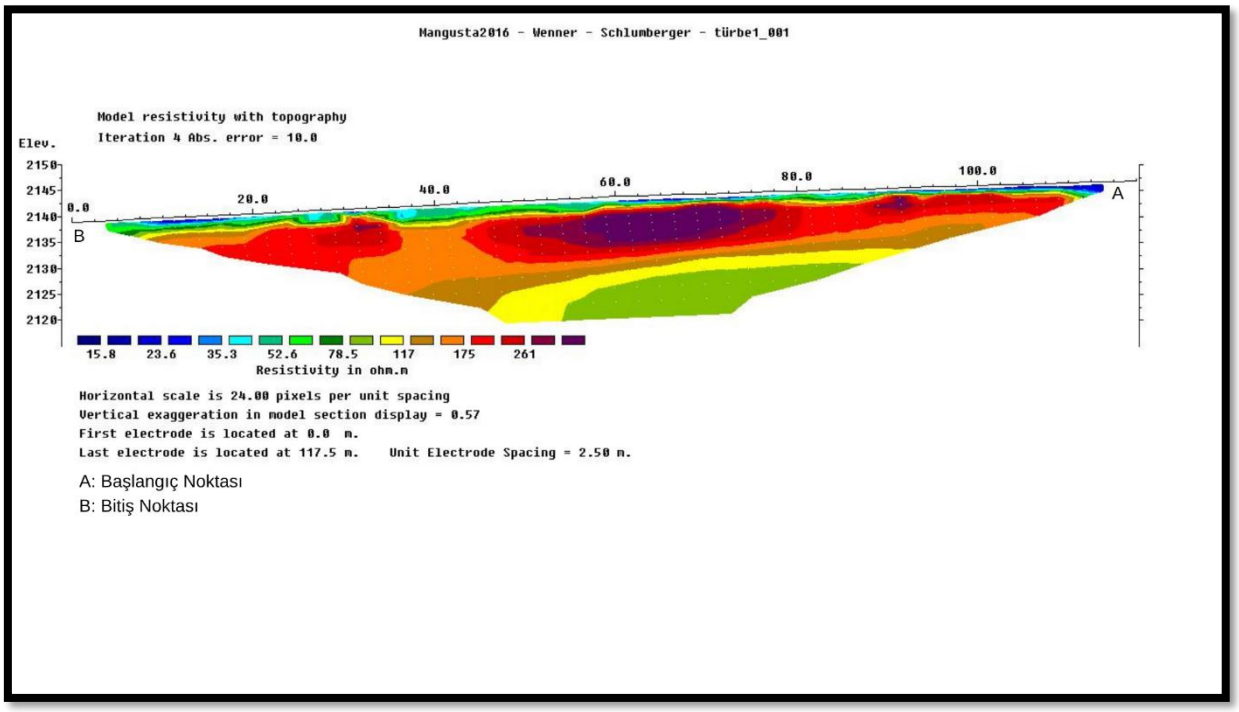
Tablo 15. Elektrik Rezistivite Tomografi (ERT) profillerinin orta noktalarının koordinatları (utm, wgs84, 37zon)

Sıra No	X Koordinat	Y Koordinat
ERT-1	697132	4416963
ERT-2	697594	4416640
ERT-3	697695	4416745
ERT-4	697768	4417066
ERT-5	697674	4416816

Heyelan oluşma potansiyelinin bulunduğu düşünülen beş farklı noktada gerçekleştirilen ERT ölçümlerinde yeraltının iki boyutlu özdirenç dağılımı elde edilmiştir. Elde edilen modeller, zemin ve/veya kaya birimlerinin su içeriği, geçirgenlik, ayrışma derecesi ve düşük özdirençli

zonların konumu hakkında bilgi sağlamaktadır. Böylece, heyelan kütlesinin sınırlarının, olası kayma yüzeylerinin ve yeraltı suyu etkisinin belirlenmesinde ERT yöntemi önemli veriler sunmuştur (Şekil 38-42).

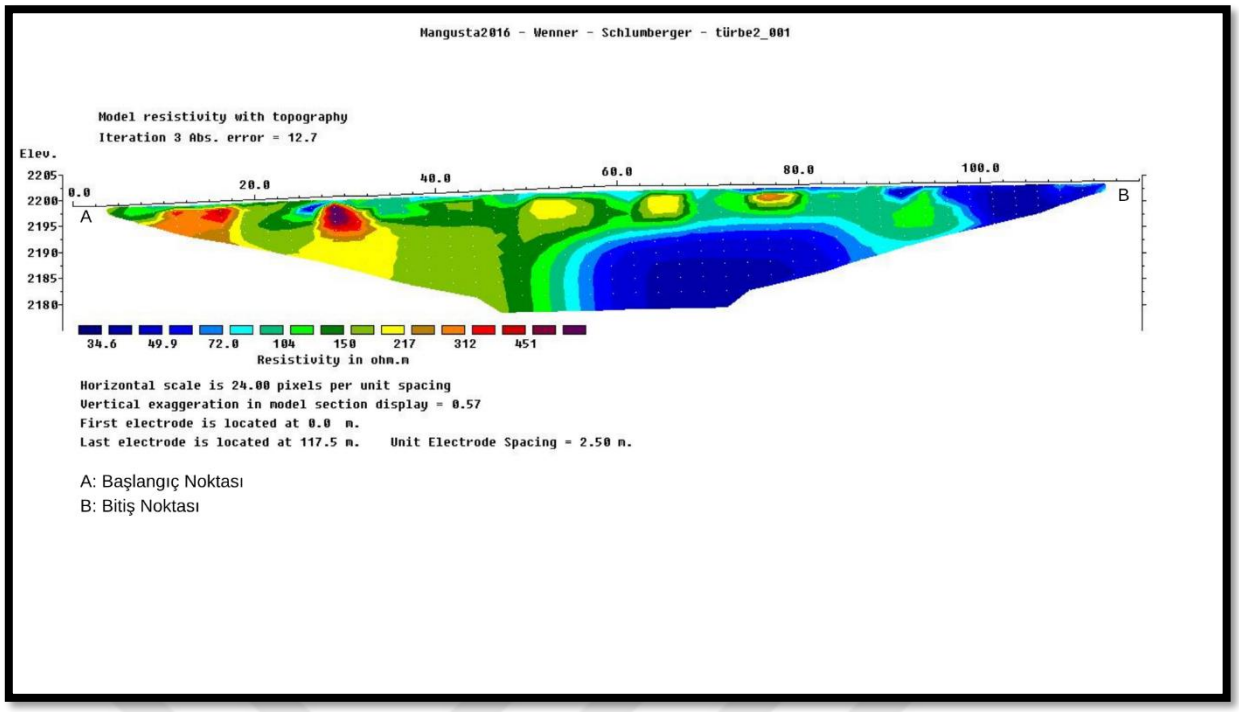
İnceleme alanında ölçülen 1 numaralı ERT kesitine ait ters çözüm modeli Şekil 38'de gösterilmiştir.



Şekil 38. ERT-1 verisine ait ait iki boyutlu yeraltı modeli

Kesitte görülen rezistivite dağılımı, üst seviyelerde düşük rezistivite değerleri (15-52 ohm.m aralığı, mavi-yeşil tonlar) yer almakta olup bu durum, zemin içerisinde suyun olabileceğini, dolayısıyla suya doygun bir tabakanın varlığına işaret etmektedir. Bu tür tabakalar, genellikle kayma yüzeylerinin gelişebileceği zayıf zonlar olarak değerlendirilebilir (Şekil 38). Orta seviyelerde (yaklaşık 30-90 m yatay uzaklıklar arasında) yer alan kırmızı ve mor tonlu yüksek rezistivite değerleri (175-261 ohm.m), su geçirimsiz kayaçların ya da kuru, kompakt zeminlerin varlığını göstermektedir. Bu yüksek dirençli zonlar, heyelan açısından görece daha stabil kısımlardır. Ancak bu sağlam kütlelerin üzerinde yer alan düşük rezistiviteli ve suya doygun tabakalar, zemin içinde bir "kayma düzlemi" gelişmesi için uygun koşullar oluşturabilir.

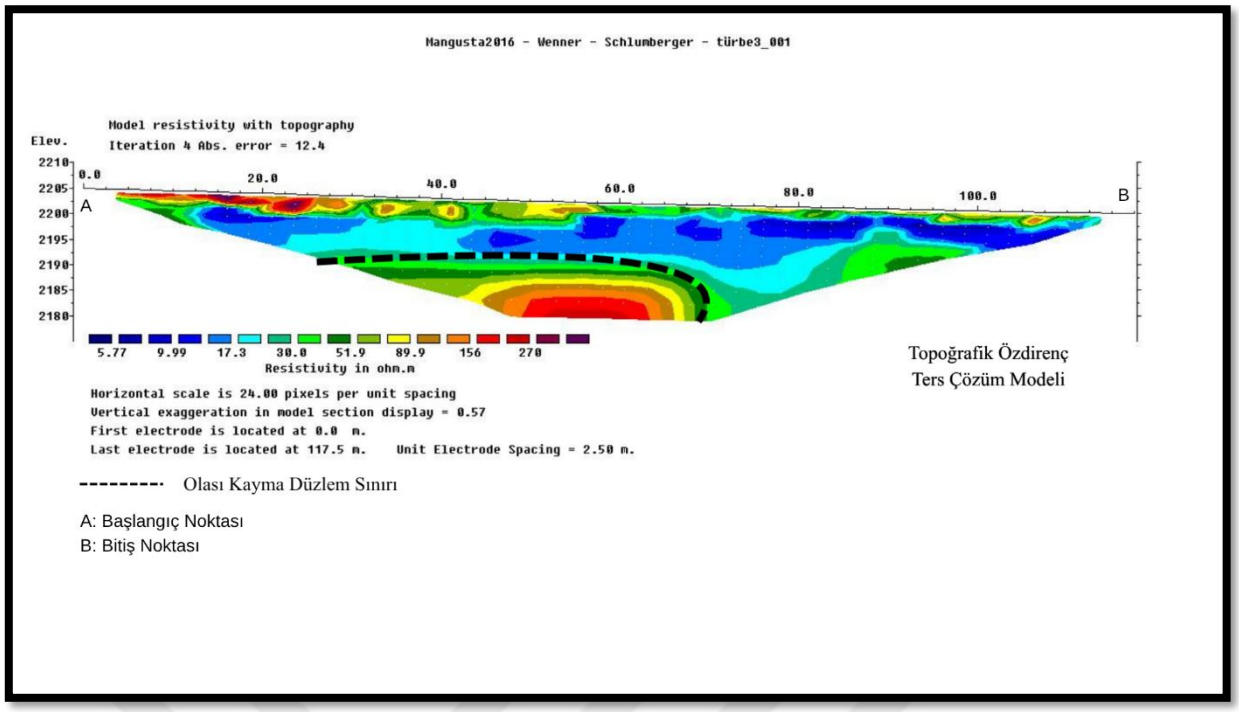
İnceleme alanında ölçülen 2 numaralı ERT kesitine ait ters çözüm modeli Şekil 39'de gösterilmiştir.



Şekil 39. ERT-2 verisine ait ait iki boyutlu yeraltı modeli

Kesitte genel olarak orta ve alt seviyelerde belirgin düşük rezistivite değerleri (yaklaşık 34-72 ohm.m, mavi tonlar) görülmektedir. Bu düşük rezistivite zonları, zemin içerisinde yüksek oranda su bulunduğunu veya ince taneli malzemelerin hâkim olduğunu göstermektedir. Kesitin B tarafında (yaklaşık 60-110 m aralığında) derinlere kadar uzanan mavi tonlu düşük rezistivite zonu, muhtemel bir su birikim alanını, düşük özdirenç zonunu göstermektedir. Bu yapı, özellikle altındaki geçirimsiz tabaka üzerinde bir drenaj engeli oluşturuyorsa, heyelan açısından riskli bir durum yaratabilir. Kesitin A tarafında (0-40 m arası) yer alan yüksek rezistiviteli (217-451 ohm.m) bölge ise nispeten daha rijit bir kütleye karşılık gelmektedir. (Şekil 39)

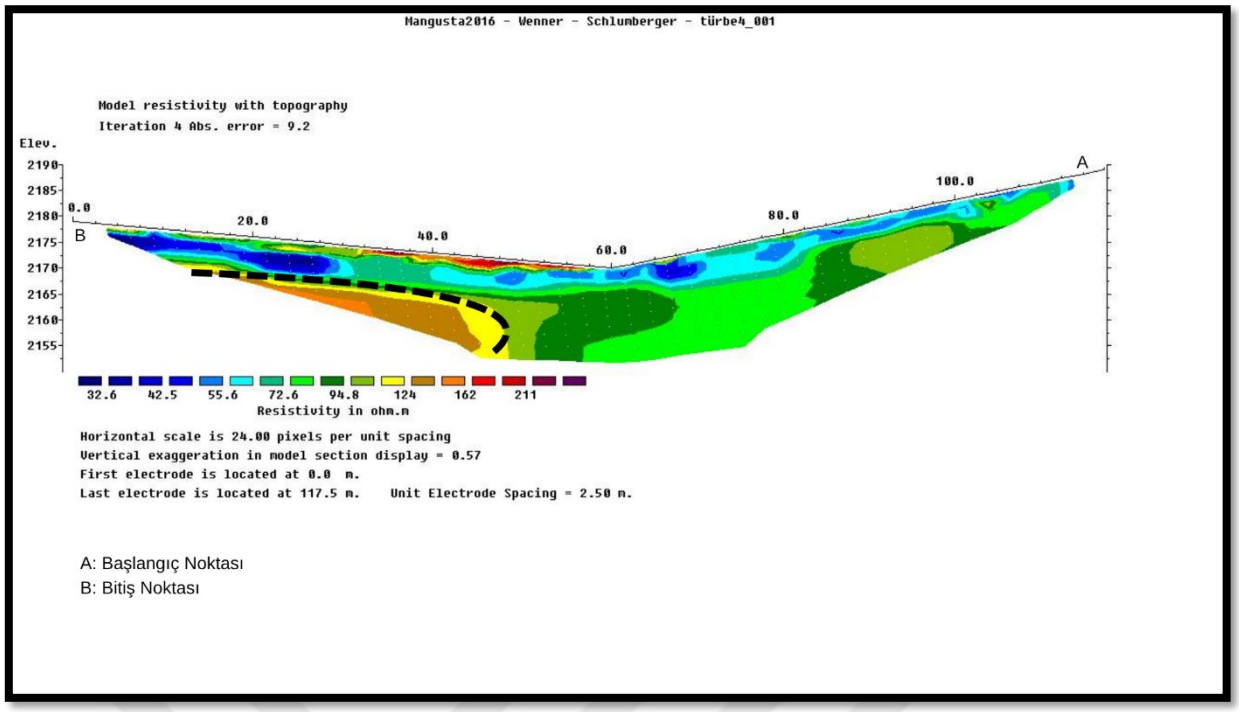
İnceleme alanında ölçülen 3 numaralı ERT kesitine ait ters çözüm modeli Şekil 40'de gösterilmiştir.



Şekil 40. ERT-3 verisine ait iki boyutlu yeraltı modeli (kesikli çizgi olası kayma düzlem sınırını göstermektedir)

Kesitte genel olarak düşük rezistivite değerlerinin (yaklaşık 5-52 ohm.m aralığı, mavi ve açık yeşil tonlar) geniş bir alan boyunca hâkim olduğu görülmektedir. Bu düşük özdirençli zonlar, suya doygun ve/veya ince taneli bir yapının baskın olduğunu göstermektedir. Bu tür ortamlar, özellikle eğimli arazilerde kayma yüzeyi gelişimi açısından yüksek risk taşır. Yüzeyin hemen altında ve yer yer orta derinliklerde gözlenen orta-yüksek rezistivite değerleri (89-156 ohm.m, sarı-turuncu tonlar) ise nispeten daha kuru, kompakt ve geçirimsiz tabakaları temsil etmektedir. Ancak bu tabakaların altında veya çevresinde düşük rezistivite zonlarının yer alması, suyun bu seviyelerde birikmesine neden olabilir. Bu durum, tabaka sınırlarında kayma düzlemi oluşumuna zemin hazırlar. Kesitin merkezinde (yaklaşık 40-70 m yatay uzaklıklar arasında) derine doğru uzanan yüksek rezistivite değerlerine sahip (yaklaşık 156-270 ohm.m) bir zon belirgindir. Bu yapı, sağlam zemin birimini temsil etmektedir. Ancak bu yüksek özdirençli kütlenin üstünde yer alan düşük rezistiviteli ve suya doygun birimlerin varlığı, potansiyel bir kayma yüzeyinin bu geçiş bölgesinde gelişebileceğini düşündürmektedir (Şekil 40).

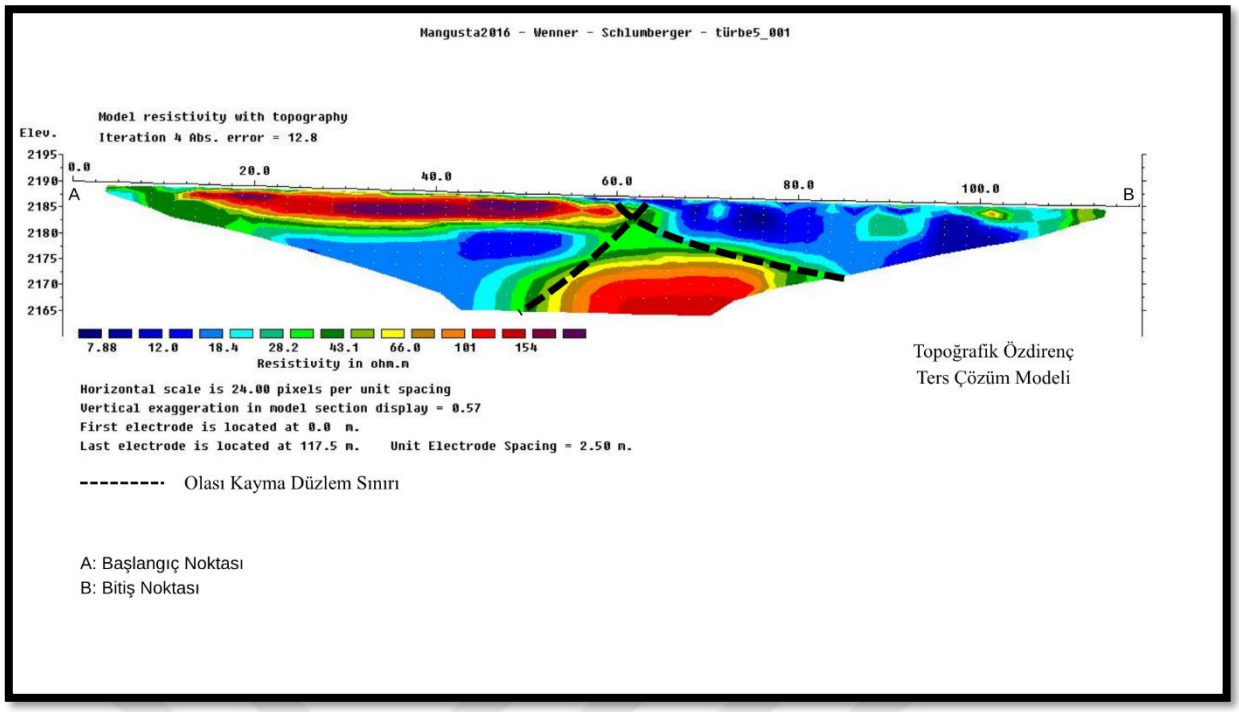
İnceleme alanında ölçülen 4 numaralı ERT kesitine ait ters çözüm modeli Şekil 41'de gösterilmiştir.



Şekil 41. ERT-4 profilinin 2B'lu rezistivite modeli (kesikli çizgi olası kayma düzlem sınırını göstermektedir)

Kesitte elde edilen özdirenç dağılımında, yüzeyden itibaren genel olarak 32.6-72.6 ohm.m aralığında değişen düşük özdirençli bölgelerin yaygın olduğu görülmektedir. Bu değerler, zemin içerisinde suya doygun ince taneli birimler ile ilişkili olduğu düşünülmektedir. Buna karşılık, 94.8-211 ohm.m aralığında değişen orta-yüksek özdirenç değerleri, daha az su içeriğine sahip, iri taneli veya yarı kaya niteliğindeki birimlere karşılık gelmektedir. Kesitte kesikli çizgiyle gösterilen bölge, bu iki farklı zemin grubunu ayıran ve özdirençte ani bir geçişin gözlendiği kesimdir. Bu sınır boyunca direnç değerlerinde 70 ohm.m civarından 120 ohm.m'nin üzerine ani bir artış görülmektedir. Bu durum, yeraltında süreksizlik zonu veya kayma düzlemi niteliği taşıyan bir yüzeyin varlığına işaret etmektedir. Dolayısıyla bu kesikli çizgi ile tanımlanan hat, topoğrafik eğim koşulları da dikkate alındığında olası bir heyelan kayma düzlemi olarak değerlendirilebilir. Yüzeydeki düşük dirençli, suya doygun zeminlerin (yaklaşık 32-70 ohm.m) altında yer alan yüksek dirençli (yaklaşık 120-200 ohm.m) tabaka üzerinde yer alması, kayma riskinin bu sınır boyunca yoğunlaşabileceğini göstermektedir. Ayrıca topoğrafik eğimin bu yönde olması, kaymanın gelişimini kolaylaştırabilecek önemli bir faktör olarak dikkat çekmektedir (Şekil 41).

İnceleme alanında ölçülen 5 numaralı ERT kesitine ait ters çözüm modeli Şekil 42'de gösterilmiştir.



Şekil 42. ERT-5 verisine ait ait iki boyutlu yeraltı modeli (kesikli çizgi olası kayma düzlem sınırını göstermektedir)

Kesitte genel olarak düşük özdirenç değerlerinin (yaklaşık 8-43 ohm.m, mavi ve açık yeşil tonlar) geniş bir alanda hâkim olduğu görülmektedir. Bu düşük rezistiviteli zonlar, zeminde suya doygun birimlerin varlığını göstermektedir. Özellikle kesitin orta ve A kesimlerinde bu değerlerin yoğunlaşması, yeraltı suyu birikimi veya geçirgen bir zemin tabakasının bulunduğunu düşündürmektedir. Yüzeye yakın seviyelerde ve özellikle B kesimde (yaklaşık 0-60 m arası) belirginleşen orta-yüksek rezistivite değerleri (yaklaşık 66-100 ohm.m, sarı ve turuncu tonlar), daha sıkı ve kompakt bir zemin yapısını temsil etmektedir. Kesitin merkezinden derinlere doğru uzanan ve yüksek rezistivite değerleriyle (yaklaşık 100-150 ohm.m, turuncu-kırmızı tonlar) karakterize olan bölge, olasılıkla daha kompakt zemin birimini ifade etmektedir. Bu yüksek özdirençli tabakanın üstünde yer alan düşük özdirençli ve suya doygun tabakalar özellikle bu geçiş zonlarında potansiyel kayma düzlemi gelişimi açısından dikkat çekicidir (Şekil 42).

Uygulanan Jeofizik Metotları ile elde edilen bulguların korelasyonu

Çalışma alanında gerçekleştirilen sismik kırılma, MASW, mikrotremör ve ERT ölçümleri bir arada değerlendirildiğinde, zemin sığ yapısının genel olarak iki tabakalı bir karakter sergilediği görülmektedir. Üst tabaka, düşük P- ve S- dalga hızları, düşük özdirenç değerleri ve yüksek hâkim periyotlarla temsil edilmekte olup; bu özellikler zeminin gevşek dokulu, yer yer suya doygun ve düşük dayanımlı olabileceğine ihtimalini göstermektedir. Buna

karşın, alt tabakada sismik hız ve özdirenç değerlerinin belirgin şekilde artması, daha sıkı ve nispeten sağlam bir zemin birimine geçiş olasılığını düşündürmektedir.

MASW ve mikrotremör verileri karşılaştırıldığında, düşük Vs_{30} değerleri ile yüksek To değerlerinin batı kesimlerde yoğunlaştığı, bu alanlarda zeminin daha gevşek bir yapıda olabileceği görülmektedir. Benzer şekilde ERT ölçümlerinde de düşük özdirençli zonların aynı bölgelerde bulunması, yeraltı suyu varlığının bu durumu destekleyebileceğini göstermektedir. Buna karşılık, doğu ve güneydoğu yönlerinde artan hız ve özdirenç değerleri, zeminin daha rijit ve stabil bir karakter taşıyabileceğini göstermektedir.

Tüm veriler birlikte değerlendirildiğinde, Abdurrahman Gazi Türbesi çevresinde zemin davranışının homojen olmadığı, yer yer lokal zayıflık zonların gelişmiş olabileceği anlaşılmaktadır. Özellikle batı kesimlerdeki gevşek ve suya doygun zeminlerin, uygun koşullar altında yüzeysel kayma veya deformasyon gelişimine yatkın olabileceği değerlendirilmektedir. Ancak bu durum, kesin bir heyelan varlığını değil, belirli koşullarda **oluşma potansiyelini** göstermektedir. Doğu ve güneybatı kesimlerde ise zeminin daha oturmuş bir yapıya sahip olması, bu bölgelerin görece daha stabil nitelikte olabileceğini düşündürmektedir. Bu bulguların detaylandırılması için sondaj ve ayrıntılı jeolojik ve jeoteknik çalışmalar ile desteklenmesi gerekmektedir.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında Abdurrahman Gazi Türbesi ve yakın çevresinin zemin koşulları, farklı jeofizik yöntemlerin birlikte kullanılmasıyla ayrıntılı olarak değerlendirilmiştir. Sismik kırılma, MASW, Tek İstasyon Mikrotremör ve ERT işlemlerinden elde edilen veriler bir araya getirildiğinde, türbe çevresindeki yeraltı yapısının bölgedeki zemin yapısının yapmış olduğumuz çalışmalarda görüntüle bilinen maksimum derinlikte tabaka değişiminin sismik kırılmada iki tabakalı bir karakter sergilediği görülmektedir. Türbenin çevresinde üstte daha gevşek, yer yer suya doygun ve düşük dalga hızlarıyla temsil edilen bir zemin birimi; daha derinlerde ise sismik hız ve özdirenç değerleri artan, daha sıkı bir tabakaya geçiş gözlenmiştir. Bu geçiş özellikle türbenin batı yönüne doğru daha belirgin hale gelmektedir.

MASW ve mikrotremör sonuçlarında türbenin batısında düşük Vs_{30} ve yüksek hâkim periyot değerlerinin yoğunlaşması, bu kesimde zeminin daha yumuşak ve deformasyona açık olabileceğini düşündürmektedir. ERT sonuçları da aynı bölgede düşük özdirençli ve suya doygun olabilecek zonlar göstermiştir. Buna karşılık türbenin doğu ve güneydoğu yönlerinde hız ve özdirenç değerlerinin arttığı, zeminin daha rijit bir yapı gösterdiği görülmüştür. Bu bulgular, kesin bir heyelan varlığını işaret etmese de türbenin özellikle batı tarafında uygun koşullar altında yüzeysel bir hareket veya deformasyon potansiyelinin daha yüksek olabileceğini göstermektedir.

Sahada yapılan çalışmalarla yaklaşık 25-30 metre derinliğe kadar güvenilir veri elde edilebilmiştir. Bu derinlik zemin karakterinin genel görünümünü ortaya koymakla birlikte, olası kayma yüzeylerinin daha kesin şekilde belirlenebilmesi için türbe çevresinde daha derine ulaşabilen jeofizik ve jeoteknik çalışmaların yapılması önerilmektedir. Özellikle daha uzun serimli sismik kırılma profilleri, geniş açıklıklı ERT ölçümleri ve daha sık aralıklı mikrotremör çalışmaları, derin zemin yapısının daha net anlaşılmasına katkı sağlayacaktır. Ayrıca bu bulguların detaylandırılması için sondaj ve ayrıntılı jeolojik çalışmalar ile desteklenmesi gerekmektedir.

Elde edilen tüm veriler birlikte değerlendirildiğinde, türbenin çevresinde zemin özelliklerinin homojen olmadığı, özellikle batı yönünde gevşek dokulu ve suya doygun zeminlerin yer aldığı anlaşılmaktadır. Bu nedenle bu bölgede yüzeysel kayma veya oturma türü deformasyonların gelişme ihtimali dikkate alınmalıdır. Buna karşın türbenin doğu ve

güneydoğu yönleri daha rijit bir zemin yapısına sahip olup, görece stabil nitelikte görünmektedir.

Türbenin tarihi ve kültürel önemi dikkate alındığında, zemindeki değişimlerin belirli aralıklarla izlenmesi, drenaj koşullarının iyileştirilmesi ve gerekli görülen noktalarda koruyucu mühendislik önlemlerinin alınması uygun olacaktır. Ayrıca, bölgedeki jeolojik ve hidrojeolojik süreçlerin zaman içerisinde değişebileceği göz önünde bulundurularak, türbe çevresinde düzenli gözlem ve periyodik ölçümlerin yapılması önerilmektedir.

KAYNAKLAR

Akbulut, S., Budak, A., Arasan, S., Kalkan, E., & Bayraktutan, S. 2004. Aşkale-Erzurum depreminde gözlenen zemin ve yapı problemleri. 10. Ulusal Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Kongresi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.

Akkuş, M. F., 1965, Pasinler (Hasankale) havzasının 1:25 000 ölçekli detay petrol etüdü raporu: MTA Rap., 4037 (yayımlanmamış), Ankara.

Alemdağ, H., Köroğlu, F., Öğretmen Aydın, Z., Şeren, A., Babacan, A. E., & Ersoy, A. F. 2024. Deciphering of karst geomorphology and sinkhole (doline) structures using multiple geophysical and geological methods (Trabzon, NE Türkiye). *Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 83*(286). https://doi.org/10.1007/s10064-024-03779-7

Alonso-Pandavenes, O., Bernal, D., Torrijo, F. J., & Garzón-Roca, J. 2023. A comparative analysis for defining the sliding surface and internal structure in an active landslide using the HVSR passive geophysical technique in Pujilí (Cotopaxi), Ecuador. *Land, 12*(961), 1-29. https://doi.org/10.3390/land12050961

Al-Saigh, N. H., & Al-Dabbagh, T. H. 2010. Identification of landslide slip-surface and its shear strength: A new application for shallow seismic refraction method. Journal of the Geological Society of India, 76(2), 175-180. https://doi.org/10.1007/s12594-010-0092-y

Arpat, E. 1965. Ilıca-Aşkale (Erzurum) arasındaki sahanın ve kuzeyinin genel jeolojisi-petrol imkanları, MTA, Rap. No. 4040, Ankara

Atalay, İ. 1987. Erzurum ve çevresinde heyelanların dağılışı ve topoğrafik özellikleri. *Doğa Türk Coğrafya Dergisi, 12*(1), 45-55.

Aydın, Ö. L., Kuşkapan, E., & Çodur, M. Y. 2020. Erzurum ili hafif raylı sistem güzergahının zemin emniyeti açısından yeterliliğinin araştırılması. *Jeoloji Mühendisliği Dergisi, 45*(1), 41-66. https://doi.org/10.24232/jmd.935837

Ayhan, G. 2019. *Arkeolojik alan incelemelerinde gradyent dizilimler yardımıyla elektrik rezistivite tomografi modelleme çalışmaları* (Yüksek Lisans Tezi). Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.

Bayrak, E., Özer, Ç., & Perk, S. 2020. The ground-motion attenuation comparison: A case study for the 2017/05/11 Aşkale earthquake (Mw4.7). *Brilliant Engineering, 3*(1), 22-26. https://doi.org/10.36937/ben.2020.003.004

Bayrak, E., Üçer, S. B., & Karakoç, B. 2001. Seismic activity and historical earthquakes along the North Anatolian Fault, Turkey. *Bulletin of the Seismological Society of Turkey, 5*(2), 215-228.

Bayraktutan, M. S., Merefield, J. R., Grainger, P., Evans, B. M., Yılmaz, M., & Kalkan, E. 1996. Regional gas geochemistry in an active tectonic zone, Erzurum Basin, eastern Turkey. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 29, 209-218. https://doi.org/10.1144/GEOLOGYSOCIETY_QUARTERLY1996

Beker, Y. 2013. *Mikrotremor araştırma yöntemi kurs notları*. Gümüşhane Üniversitesi Sürekli Eğitim Uygulama ve Araştırma Merkezi, Jeofizik Mühendisliği Eğitimi Sertifika Programı.

Berge, M. A. 2011. *Elektrik özdirenç ters-çözümüyle çok katmanlı arkeolojik yerleşmelerin görüntülendirilmesi* (Doktora tezi). Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir

Berkli, Y. 2007. Erzurum ve Erzincan Çevresinde Görülen Koyun, Koç ve At Biçimli Mezar Taşları ve Sanat Tarihindeki Yeri. [Doktora Tezi], Atatürk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü.

Birinci, S., Kaymaz, Ç. K., & Kızılkan, Y. (Eds.). 2022. Erzurum İlinde Coğrafya Araştırmaları. İstanbul: Kriter Yayınevi.

Bowles, J. E., 1996: Foundation Analysis and Design, 5th ed., The McGraw-Hill Companies, Inc.

Boyd, J., Chambers, J., Wilkinson, P., Peppa, M., Watlet, A., Kirkham, M., Jones, L., Swift, R., Meldrum, P., Uhlemann, S., & Binley, A. 2021. A linked geomorphological and geophysical modelling methodology applied to an active landslide. *Landslides, 18*(12), 2689-2704. https://doi.org/10.1007/s10346-021-01666-w

Candansayar, M. E. 2016. *JFM316 Elektrik Yöntemler Lisans Ders Notu*. Ankara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü. Beşevler-Ankara.

Capizzi, P., & Martorana, R. 2014. Integration of constrained electrical and seismic tomographies to study the landslide affecting the cathedral of Agrigento. *Journal of Geophysics and Engineering*, 11(4), 045009. https://doi.org/10.1088/1742-2132/11/4/045009

Clark, M. 2003. *Optical Illusions and Geophysical Perspectives: Understanding Gravity Hills*.

Colangelo, G., & Perrone, A. 2012. Geoelectrical tomography as an operative tool for emergency management of landslide: An application in Basilicata region, Italy. International Journal of Geophysics, 2012, Article ID 593268, 1-5. https://doi.org/10.1155/2012/593268

Çakıcı, H., Tüdeş, Ş., & Bulut, F. 2012. Kentsel kullanım alanında gelişen heyelanlar ve jeoteknik analizi: Kırkdeğirmenler (Erzurum) örneği. *Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi, 27*(4), 739-751.

Çakır, Z., Sarıtaş, A., Aslan, Ş., Uzkeser, M., & Sarıkaya, S. 2006. Erzurum-Aşkale depremi ve sonuçları. *The Eurasian Journal of Medicine, 38*(Aralık), 81-84

Çatlıoğlu, B. 2015. Heyelan Geometrisinin Jeofizik Yöntemler İle Belirlenmesi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.*

Çelebi, O., Özer, Ç., Bayrak, B., Kılıç, M., & Aydın, A. C. 2023. Earthquake response of historical church within the perspective of structural dynamics: Oltu Russian Church. *Journal of Building Engineering, 75*, 106884. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106884

Çıvgın, B. 2019. *Genel Jeofizik Ders Notu*. Ankara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü. Beşevler-Ankara.

Demirbaş, N. 2008. Jeofizik yöntemler ile heyelan araştırmaları (Yüksek lisans tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi). Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

Demirtaş, R. Yağyemez, B. Penirci, O. & Uğraş, M. 2010. *Erzurum ili Büyük Şehir Belediyesi Yerleşim Alanının 1/5000 ölçekli Nazım İmar Planına Esas Jeolojik-Jeoteknik Etüt Raporu*. Kasım 2010

Drahor, M. G., Göktürkler, G., Berge, M. A., & Kurtulmuş, T. Ö. 2006. Application of electrical resistivity tomography technique for investigation of landslides: A case from Turkey. *Environmental Earth Sciences, 50*(2), 147-155. https://doi.org/10.1007/s00254-006-0194-4

Eichkitz, C. G., Schreilechner, M. G., Amtmann, J., & Schmid, C. 2009. Shallow seismic reflection study of the Gschliefgraben landslide deposition area: Interpretation and three-dimensional modeling. Austrian Journal of Earth Sciences, 102(2), 46-62. https://doi.org/10.1007/s00531-009-0400-y

Ercan, A. 2001. Yer Araştırma Yöntemleri; Bilgiler Kurallar TMMOB Jeofizik Müh. Odası Yayını, 339 sayfa

Erzurum Valiliği.2021. Erzurum İl Afet Risk Azaltma Planı (İRAP). T.C. İçişleri Bakanlığı Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD).

Gelişli, K. 2018. Jeofizik yöntemlerle heyelan araştırmaları. *Uygulamalı Yerbilimleri Dergisi*, 17(2), 115-126. https://doi.org/10.30706/uybd.458107

Geotomo Software, 2001. RES2DINV Software, ver. 3.4 http://www.geoelectrical.com, 15 November 2005

Google Earth. (2025). *Erzurum Abdurrahman Gazi Türbesi – uydu görüntüsü*. Google. https://earth.google.com

Golden Software. 2014. Surfer (Version 13, Trial Version) [Computer software]. Golden Software, LLC

Göktürkler, G., Balkaya, Ç., & Erhan, Z. 2008. Geophysical investigation of a landslide: The Altındağ landslide site, İzmir (western Turkey). Journal of Applied Geophysics, 65(1), 84-96. https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2008.05.008

Güler, T., Kürçer, A., Yıldırgan, M. K., Avcu, İ., & Özalp, S. 2023. Erzurum Fay Zonu'nun Deprem Potansiyeli ve Erzurum Kenti Üzerine Olası Etkileri, Doğu Anadolu, Türkiye [Earthquake Potential of Erzurum Fault Zone and Their Probable Effects on City of Erzurum (East Anatolia, Türkiye)]. *75. Türkiye Jeoloji Kurultayı Bildiri Özleri Kitabı*, 10-14 Nisan 2023, Ankara, Türkiye.

Gürbüz, M. 2003. Jeofiziksel Yöntemlerle Heyelan Araştırması. *Konferans Bildirisi*, Türkiye.

Gürbüz, O. 2016. *Abdurrahman Gazi Kimdir?*. Atatürk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, 20(3), 1155-1171.

Gürel, G. 2024. *Farklı zemin gruplarında MASW ve ReMi teknikleriyle Vs30 hız yapısının belirlenmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.

Harita Genel Müdürlüğü. (t.y.). *Türkiye Mülkî İdare Bölümleri Haritası* [Harita].

Hussain, Y., Hamza, O., Cárdenas-Soto, M., Borges, W. R., Dou, J., Rodriguez Rebolledo, J. F., & Prado, R. L. 2020. Characterization of Sobradinho landslide in fluvial valley using MASW and ERT methods. *REM, International Engineering Journal, 73*(4), 487-497. https://doi.org/10.1590/0370-44672019730109

Işık, N. S., Özer, M., Orhan, M., & Adil, F. 2012. Heyelan etütlerinde elektrik özdirenç ölçümlerinin kullanılmasına yönelik bir uygulama: Yıldırım Beyazıt Parkı (Etimesgut-Ankara). *Yerbilimleri*, 33(3), 283-293.

İskender, A. 2023. Evaluation of Erzurum Magnetic Road within the Scope of Paranormal Tourism. *Current Perspectives in Social Sciences*, 27(2), 143-151. doi:10.5152/JSSI.2022.22394

Jongmans, D., & Garambois, S. 2007. Geophysical investigation of landslides: A review. Bulletin de la Société Géologique de France, 178(2), 101-112. https://doi.org/10.2113/gssgfbull.178.2.101

Kanai, K. and Tanaka, T. 1961 On microtremors VIII, Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo, 39, 97-114.

Kanai, K., T. Tanaka, and K. 1954 Osada, Measurement of microtremor I, Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo, 32, 199-209,

Kanbur, M. Z., Silahtar, A., & Aktan, G. 2020. Local site effects evaluation by surface wave and H/V survey methods in Senirkent (Isparta) region, southwestern Turkey. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 19*(2), 321-333. https://doi.org/10.1007/s11803-020-0564-z

Karaaslan, H., Silahtar, A., & Ramazanoglu, S. 2023. Characterization of an active landslide structure with integrated electrical resistivity tomography and multi-channel analysis of surface waves methods in Değirmendere district, Sakarya (Türkiye). *Earth Surface Processes and Landforms, 48*(15), 3170-3180. https://doi.org/10.1002/esp.5689

Karaca, S., & Bayram, H. 2019. Erzurum Havzası'nda yerleşme ve zemin ilişkisi. *Al-Farabi International Journal on Social Sciences, 3*(2), 80-94.

Karslı, F., & Bayrak, E. 2024. Single-station microtremor surveys for site characterization: A case study in Erzurum city, eastern Turkey. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 23*(3), 563-576. https://doi.org/10.1007/s11803-024-2257-5

Karslı, H., Sayıl, N. L., & Babacan, A. E. 2017. *Samsun, Ordu, Giresun, Trabzon, Rize, Artvin, Gümüşhane ve Bayburt illeri için önerilen katı atık düzenli depolama alanlarının sismik ve depremsellik açıdan incelenmesi* (Proje raporu). Karadeniz Teknik Üniversitesi, DOKAP Bölgesi Yer Tespiti Çalışması.

Keçeli, A., 1990. Sismik Yöntemlerle Müsade Edilebilir Dinamik Zemin Taşıma Kapasitesi ve Oturmasının Saptanması, Jeofizik, 4, p. 83-92.

Keçeli, A., 2009. Uygulamalı Jeofizik. Jeofizik, 9, 28-29, JFMO Eğitim Yayınları, Ankara.

Ketin, İ. 1966. Tectonic Units of Anatolia (Asia Minor). *Bulletin of the Mineral Research and Exploration Institute of Turkey*, 66, 23-37.

Kılıç, A. 2006. Senirkent heyelan alanının rezistivite ve sismik yöntemlerle araştırılması (Yüksek lisans tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi). Süleyman Demirel Üniversitesi Enstitüsü, Isparta.

Koçyiğit, A., & Canoğlu, M. C. 2017. Neotectonics and seismicity of Erzurum pull-apart basin, East Turkey. *Russian Geology and Geophysics, 58*(2), 99-122. https://doi.org/10.1016/j.rgg.2016.09.015

Küçükuğurlu, M. 2024. Görgü Tanıklarına Göre 19. Yüzyıl Erzurum Depremleri. *Turcology Research, 79*, 100-110. https://doi.org/10.5152/JTRI.2023.23277

Kürçer, A. 2024. Erzurum Ve Çevresinin Diri Fayları Ve Deprem Üretme Potansiyelleri. EBB Depreme Dirençli Kentsel Dönüşüm Çalıştayı, Erzurum Büyükşehir Belediyesi,

Louie, J.N., 2001. Faster, better: shear-wave velocity to 100 meters depth from refraction microtremor arrays. Bulletin of the Seismological Society of America, 91(2), 347-364.

M.T.A., 1988 Erzurum-F32 paftası jeoloji haritası, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Ankara

Nakamura, Y. 2019. What is the Nakamura method? *Seismological Research Letters, 90*(4), 1437-1443. https://doi.org/10.1785/0220180376

Nakamura, Y. 1989. A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface, Railway Technical Research Institute, Quarterly Reports, 30(1).

Nogoshi, M.,Igarashi, T. 1971. On the Amplitude Characteristics of Microtremor (Part 2). Zisin (Journal of the Seismological Society of Japan. 2nd ser.), 24(1), 26-40.

Özçep, F., Erol, E., Saraçoğlu, F., & Haliloğlu, M. 2010. Seismic landslide analysis: Gürpınar (Istanbul) as a case history. Environmental Earth Sciences, 66(6), 1617-1630. https://doi.org/10.1007/s12665-010-0853-3

Özer, Ç. 2019. Erzurum ve çevresi yerel zemin etkilerinin SSR ve HVSR yöntemleri kullanılarak araştırılması. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 21*(61), 247-257. https://doi.org/10.21205/deufmd.2019216124

Özer, Ç., Öztürk, S., & Pamuk, E. 2022. Tectonic and structural characteristics of Erzurum and its surroundings (Eastern Turkey): A detailed comparison between different geophysical parameters. *Turkish Journal of Earth Sciences*. https://doi.org/10.3906/yer-2106-18

Özkan, Y. Z., Çağatay, A., Altun, Y., & Acar, E. Ç. 1984. Karadağ (Erzurum-Narman) yöresinin jeolojisi ve yöredeki polimetalik cevherleşmenin kökenine bir yaklaşım. *Jeoloji Mühendisliği Dergisi, Eylül*(1984), 29-32.

Park C. B., Miller R. D., Xia J., Ivanov J., 2007. Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW) - Active and Passive Methods, The Leading Edge, 26(1), 60-64.

Park, C.B., Miller, R.D., Xia, J. 1999. Multi-channel analysis of surface waves. Geophysics, 64(3), 800- 808.

Reynolds, J. M. 2011. An introduction to applied and environmental geophysics (2nd ed.). Wiley-Blackwell.

Saraç, B., & Özer, Ç. 2024. Investigation of the soil features of Atatürk University campus by microtremor method. *Master's Thesis, Atatürk University, Faculty of Engineering, Department of Geological Engineering*.

Sarığül, Ş., & Bayrak, E. 2024. Determination of soil amplification characteristics of Erzurum using microtremor and one-dimensional analysis methods. *Master's Thesis, Atatürk University, Department of Geological Engineering*.

Schmitt, D. R., Ogunsuyi, O. O., Martin, D., Morgan, J., & Froese, C. (2011). Geophysical study of the Peace River landslide. Recovery - CSPG CSEG CWLS Convention Proceedings, 1-4.

SeisImager/SWTM Manual (V.5.15). OYO Coppeation, Geometrics, Inc

Sheriff, R. E., & Geldart, L. P. 1995. *Exploration Seismology*. Cambridge University Press.

Silahtar, A., & Karaaslan, H. 2024. Jeofizik yöntemler ile kütle hareketi modellemesi: Karapürçek, Sakarya örneği. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 29*(2), 567-581. https://doi.org/10.17482/uumfd.1490775

Şengör, A. M. C., & Yılmaz, Y. 1981. Tethyan evolution of Turkey: A plate tectonic approach. *Tectonophysics, 75*(3-4), 181-241

Şengör, A. M. C., Özeren, M. S., Keskin, M., Sakınç, M., Özbakır, A. D., & Kayan, İ. 2008. Eastern Turkish high plateau as a small Turkic-type orogen: Implications for post-collisional crust-forming processes in Turkic-type orogens. *Earth-Science Reviews, 90*(1-4), 1-48. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2008.05.002

Şenkaya, M. 2009. *Seisimager Programı Pickwin ve Plotrefa Modülleri Kullanım Kılavuzu*. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü Sismik Veri İşlem Laboratuvarı.

Şenkaya, M., Babacan, A. E., Karslı, H., & San, B. T. (2022). Origins of diverse present displacements in a paleo-landslide area (Işıklar, Trabzon, northeast Turkey).

Environmental Earth Sciences, 81(245), 1-24. https://doi.org/10.1007/s12665-022-10372-2

Tekebaş, S. 2022. Mikrotremör verisi kullanarak jeotermal alanların araştırılması (Doktora tezi). İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul.

Telford W.M., L.P. Geldart, R.E. Sheriff and D.A. Keys, 1976. Applied Geophysics. Cambridge University Press, Cambridge

Timur, E. 2000. Yesirçöl Dağı (Aşkale, Erzurum) ve Dolayının Stratigrafisi. *İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yerbilimleri Dergisi*, 13(1-2), 85-99.

Tokel, S., 1965, Erzurum-Hasankale bölgesi Erzurum-l46b ; Tortum-II46c3 paftalarına ait jeolojik rapor: MTA Rap., 4118 (yayımlanmamış). Ankara

Tunçel, A. 2014. Jeofizik yöntemlerle zemin-anakaya sınırının belirlenmesi ve dinamik zemin parametrelerinin elde edilmesi: Karşıyaka ve Güzelbahçe (İzmir) örneği (Yayımlanmamış doktora tezi). Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

URL-1: https://erzurum.ktb.gov.tr/TR-56073/turbeler-ve-kumbetler.html

URL-2: https://www.kulturportali.gov.tr/turkiye/erzurum/gezilecekyer/abdurrahman-gazi-hz-turbesi

URL-3: https://yerbilimleri.mta.gov.tr/anasayfa.aspx

URL-4: https://www.expedia.ca/Magnetic-Hill-Moncton.d6131988.Vacation-Attraction

URL-5: https://www.pennlive.com/life/2018/02/gravity_hills_in_pennsylvania.html

URL-6: https://en.wikipedia.org/wiki/Magnetic_Hill_%28India%29

URL-7: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Electric_Brae,_Ayrshire,_Scotland,_September_2012.jpg

URL-8: https://www.mta.gov.tr/v3.0/bilgi-merkezi/turkiye-diri-fay-haritasi-sayisal

Uyanık, O., & Çatlıoğlu, B. 2014. Elektrik özdirenç ve sismik kırılma yöntemlerinden heyelan geometrisinin belirlenmesi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 18(3), 22-29.

Van Nostrand, R. G., Cook, K. L., 1966. Interpretion of Resistivity Data: USGC Prof. Paper 449, Washington, D.C., U.S. Gount. Printig Office.

Wathelet, M., Chatelain, J.L., Cornou, C., Di Giulio, G., Guillier, B., Ohrnberger, M., Savvaidis, A. 2020. Geopsy: A User-Friendly Open-Source Tool Set for Ambient Vibration Processing. Seismological Research Letters 91(3):1878-1889.

Yarbaşı, N. 2015. Oltu (Erzurum) yerleşim alanı ve yakın çevresinin jeoteknik haritalaması. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 22*(6), 538-545. https://doi.org/10.5505/pajes.2015.79037

Yarbaşı, N., & Kalkan, E. 2009. Geotechnical mapping for alluvial fan deposits controlled by active faults: A case study in Erzurum, NE Turkey. *Environmental Geology, 58*(4), 701-714. https://doi.org/10.1007/s00254-008-1544-1

Yarbaşı, N., Bayraktutan, M. S., & Kadırov, A. 2003. Atatürk Üniversitesi-Yenişehir (Erzurum) yerleşim alanı zemini geoteknik özellikleri. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences, 9*(3), 289-298.

Yarbaşı, N., Kadirov, A., & Bayraktutan, M. S. 2004. Erzurum şehir merkezi batı kesimi jeoteknik haritasında kullanılan kriterlerin istatistiksel analizi. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences, 10*(2), 211-219.

Yıldırım, N., & Parlak, O. 2008. Tekman-Pasinler (Erzurum) arasında yüzeyleyen ofiyolitik birimlerin jeolojisi ve petrografik özellikleri. *Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 18*(2), 35-45

Yılmaz, S. ve Narman, C. 2014. Güney Türkiye'deki Burdur bölgesindeki bir sırt boyunca aktif bir heyelanı araştırmak için 2 boyutlu elektriksel direnç görüntüleme. Arabian Journal of Geosciences, 8 (5), 3343-3349

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler		
Adı Soyadı	**:**	Mücahit KARAKÜTÜK
Doğum tarihi	**:**	
Doğum Yeri	**:**	
Uyruğu	**:**	
Adres	**:**	
Tel	**:**	
E-mail	**:**	
Eğitim		
Lise	**:**	Org. Eşref Bitlis Lisesi (YDA)
Lisans	**:**	Cumhuriyet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği
Yüksek lisans	**:**	Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı
Doktora	**:**	
Yabancı Dil Bilgisi		
İngilizce	:	Orta
Üye Olunan Mesleki Kuruluşlar		
TMMOB Jeofizik Mühendisleri Odası		
Tezden Üretilmiş Yayınlar		
Karakütük M., 2025. Erzurum Abdurrahman Gazi Türbesi ve Çevresindeki Zemin Stabilitesinin Tümleşik Jeofizik Yöntemler İle İncelenmesi. 1. Mühendislik Sismolojisi ve Kent Jeofiziği Sempozyumu, 23-24 Ekim. Erzincan		