KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

JEOFİZİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

HİDROJEOFİZİK ÇALIŞMALARLA DOLİNLERİN, KARSTİK BOŞLUKLARIN VE YERALTI SU AKIŞ SİSTEMİNİN ARAŞTIRILMASI, SUYUN HİDROKİMYASAL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ: ŞAHİNKAYA ÜYESİ ÖRNEĞİ, ÇALKÖY/TRABZON/TÜRKİYE

DOKTORA TEZİ

HİLAL ALEMDAĞ

EKİM 2024
TRABZON

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

JEOFİZİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

HİDROJEOFİZİK ÇALIŞMALARLA DOLİNLERİN, KARSTİK BOŞLUKLARIN VE YERALTI SU AKIŞ SİSTEMİNİN ARAŞTIRILMASI, SUYUN HİDROKİMYASAL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ: ŞAHİNKAYA ÜYESİ ÖRNEĞİ, ÇALKÖY/TRABZON/TÜRKİYE

Hilal ALEMDAĞ

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce
"DOKTOR (JEOFİZİK MÜHENDİSLİĞİ)"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 16 / 09 / 2024
Tezin Savunma Tarihi : 11 / 10 / 2024

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Aysel ŞEREN

Trabzon 2024

ÖNSÖZ

"Hidrojeofizik Çalışmalarla Dolinlerin, Karstik Boşlukların ve Yeraltı Su Akış Sisteminin Araştırılması, Suyun Hidrokimyasal Özelliklerinin İncelenmesi: Şahinkaya Üyesi Örneği, Çalköy/Trabzon/Türkiye" isimli bu tez Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalı, Doktora Programı'nda hazırlanmıştır.

TÜBİTAK 1002 Hızlı Destek Programı tarafından 121Y413 numaralı proje ile desteklenen bu çalışmaya vermiş olduğu tüm desteklerden dolayı TÜBİTAK ve onun personellerine teşekkür ederim.

Bu çalışma Karadeniz Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından desteklenmiştir. Proje numarası: 10235'tir. KTÜ BAP'a teşekkür ederim.

Trabzon Büyük Şehir Belediye Başkanlığı Kültür ve Sosyal İşler Daire Başkanlığı'na, Trabzon Orman Müdürlüğü Doğa Koruma ve Milli Parklar Şefliği ile Düzköy İlçe Jandarma Komutanlığı'na arazi verilerinin toplanması için yasal izin belgelerinde göstermiş oldukları kolaylıklardan dolayı, kurumlara ve personellerine müteşekkirim. Ayrıca, Meteorolojik verileri bizlerle paylaşan Meteoroloji 11. Bölge Müdürlüğü'ne de teşekkür ederim.

Tez çalışmam boyunca bilgi, birikim ve desteğini hiçbir zaman esirgemeyen değerli danışman hocam sayın Prof. Dr. Aysel ŞEREN'e teşekkürlerimi borç bilirim. Çalışmalarım süresince öneri, destek ve yardımlarını her zaman gördüğüm, tez izleme komitesi üyeleri Sayın Prof. Dr. Arzu FIRAT ERSOY ve Sayın Doç. Dr. Ali Erden BABACAN'a teşekkürlerimi sunarım. Tez çalışmasının arazi verilerinin toplanması aşamasında yardımlarını esirgemeyen Dr. Zeynep ÖĞRETMEN AYDIN, Dr. Murat KARAHAN, Furkan ALEMDAĞ, Mustafa YEŞİLTAŞ'a ve katkısı olan tüm öğrencilerimize, verilerin değerlendirilmesi aşamasında ise yardımını esirgemeyen Doç. Dr. Mustafa SARIBUDAK'a teşekkürler ediyorum. Çalışma alanının belirlenmesinde ve jeolojisinin değerlendirilmesinde tüm katkıları sağlayan Dr. Fatih KÖROĞLU'na şükranlarımı sunarım.

Hayatım boyunca aldığım tüm kararlarda arkamda duran ve desteklerini esirgemeyen annem, babam ve ablama minnettarlığımı sunarım.

Hilal ALEMDAĞ

Trabzon 2024

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum "Hidrojeofizik Çalışmalarla Dolinlerin, Karstik Boşlukların ve Yeraltı Su Akış Sisteminin Araştırılması, Suyun Hidrokimyasal Özelliklerinin İncelenmesi: Şahinkaya Üyesi Örneği, Çalköy/Trabzon/Türkiye" başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Aysel ŞEREN'in sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 11/10/2024

Hilal ALEMDAĞ

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ IV
İÇİNDEKİLER V
ÖZET VII
SUMMARY VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ IX
TABLOLAR DİZİNİ XVIII
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ XIX
1. GENEL BİLGİLER 1
1.1. Giriş 1
1.2. Literatür Özeti 7
1.3. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı 19
1.4. Çalışma Alanının Konumu ve Coğrafyası 20
1.5. İklim ve Bitki Örtüsü 21
1.6. Çalışma Alanı Jeolojisi 22
1.7. Çalışma Alanının Hidrojeolojik Özellikleri 25
1.8. Kullanılan Yöntemler 27
1.8.1. Elektrik Özdirenç Yöntemi 27
1.8.2. Doğal Potansiyel (*Self Potential/SP*) Yöntemi 31
1.8.3. Sismik Kırılma Tomografi (Seismic Refraction Tomography/*SRT*) Yöntemi 46
1.8.4. Yüzey Dalgalarının Çok Kanallı Analiz Yöntemi (*Multichannel Analysis Surface Waves/MASW*) 49
1.8.5. Yer Radarı (*Ground Penetrating Radar*/*GPR*) Yöntemi 51
1.9. Hidrojeokimya 59
1.9.1. Sularının Fiziksel Parametreleri 59
1.9.2. Yüzey Sularının Kimyasal Özellikleri 60
1.9.3. Suların İz Elementleri 62
1.9.4. Suların Kimyasal Analizlerin Diyagramlarda Gösterilmesi 66
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR 69
2.1. Çalışma Alanlarının Belirlenmesi 69

2.2. Elektrik Özdirenç Tomografi (*ERT*) Verilerinin Toplanması ve Değerlendirilmesi 72
2.3. Doğal Potansiyel *(SP)* Verilerinin Toplanması ve Değerlendirilmesi 76
2.4. Sismik Kırılma *(SRT)* Verilerinin Toplanması ve Değerlendirilmesi 78
2.5. Yüzey Dalgalarının Çok Kanallı Analizi (*MASW*) Verilerinin Toplanması ve Değerlendirilmesi 82
2.6. Yer Radarı *(GPR)* Verilerinin Toplanması ve Değerlendirilmesi 82
2.7. Su Örneklerinin Toplanması ve Değerlendirilmesi 88
3. BULGULAR VE TARTIŞMA 97
4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 206
5. KAYNAKLAR 213
6. EKLER 241
ÖZGEÇMİŞ

Doktora Tezi

ÖZET

HİDROJEOFİZİK ÇALIŞMALARLA DOLİNLERİN, KARSTİK BOŞLUKLARIN VE YERALTI SU AKIŞ SİSTEMİNİN ARAŞTIRILMASI, SUYUN HİDROKİMYASAL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ: ŞAHİNKAYA ÜYESİ ÖRNEĞİ, ÇALKÖY/TRABZON/TÜRKİYE

Hilal ALEMDAĞ

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Aysel ŞEREN
2024, 240 Sayfa, 36 Sayfa Ek

Bu tez kapsamındaki çalışma alanları, Trabzon ili Düzköy ilçesine bağlı Çayırbağı/ Çalköy mahalleleri arasındaki Çal Mağarası ve civarında yüzeyleme veren Şahinkaya Üyesi içinde bulunmaktadır. Şahinkaya Üyesi, neritik kireçtaşlarından oluşmaktadır. Bu kireçtaşlarının zamanla karstlaşmasıyla; bölgede dolinler, karstik boşluklar ve içerisinden yeraltı nehri akan Çal Mağarası oluşmuştur. Yeraltısuları; genellikle yağmur ve yüzeydeki suların, gözeneklerden yeraltına sızması veya karstik oluşumlardan geçerek doygun bölgelere ulaşmasıyla beslenmektedir. Bu tür karstik oluşumların hidrojeolojik ve jeofiziksel yöntemler kullanılarak tespit edilmesi mümkün olabilmektedir. Bu tez çalışmasının amacı da budur. Yüzeyden ve Çal Mağarası içindeki yeraltı nehrinin farklı noktalarından toplanan suların analiz ettirilmesi sonucunda, bu suların aynı üyeden beslendikleri ve Ca-HCO3 su tipinde oldukları belirlenmiştir. Fiziksel parametrelerden; EC, Ph ve DO miktarlarının ortalama değerlerinin sırasıyla, 108.3-338 µS/cm, 7.31-9.11 ve 7.56-9.96 mg/l arasında değiştiği belirlenmiştir. Şahinkaya Üyesi'ni oluşturan kireçtaşları ilk kez jeofiziksel yöntemlerle araştırılmıştır. Bu kapsamda, yüz ölçümü yaklaşık olarak 3.2 km^2 olan üç çalışma alanı belirlenerek; *ERT, SP, SRT, MASW* ve *GPR* verileri toplanarak, kireçtaşları içerisinde bulunan karstik boşluklar, suya doygun bölgeler ve dolinler tespit edilmiştir. Ayrıca, bu veriler üzerinden beş jeofiziksel yöntemin öncelikli ve etkin kullanım sıralamasının tespiti ile sonuçlarının karşılaştırılması yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Dolin, Hidrojeoloji, Jeofizik, Karst, Mağara, Şahinkaya Üyesi

PhD. Thesis

SUMMARY

INVESTIGATION OF DOLINES, KARSTIC VOIDS AND UNDERGROUND WATER FLOW SYSTEM WITH HYDROGEOPHYSICAL STUDIES, AND EXAMINATION OF HYDROCHEMICAL PROPERTIES OF WATER: THE CASE OF ŞAHİNKAYA MEMBER, ÇALKÖY/TRABZON/TÜRKİYE

Hilal ALEMDAĞ

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Geophysical Engineering
Supervisor: Prof. Dr. Aysel ŞEREN
2024, 240 Pages, 36 Pages Appendix

The study areas covered by this thesis are located within the Şahinkaya Member, which outcrops around the Çal Cave and its vicinity, situated between the Çayırbağı/Çalköy neighborhoods in the Düzköy district of Trabzon province. The Şahinkaya Member is composed of neritic limestones. Over time, the karstification of these limestones led to the formation of dolines, karstic cavities, and the Çal Cave, through which an underground river flows. The underground waters are generally fed by rainwater and surface waters seeping underground through pores or passing through karstic formations to reach saturated zones. It is possible to detect such karst formations using hydrogeological and geophysical methods. This is the aim of this thesis. As a result of the analysis of the waters collected from the various points on the surface and from the underground river within the Çal Cave, it was determined that these waters were fed from the same member and were of Ca-HCO3 water type. Among the physical parameters, it was determined that the average values of EC, Ph and DO amounts varied between 108.3-338 µS/cm, 7.31-9.11 and 7.56-9.96 mg/l, respectively. The limestones forming the Şahinkaya Member were investigated for the first time using geophysical methods. In this context, three study areas with a total surface area of approximately 3.2 km² were identified. ERT, SP, SRT, MASW, and GPR data were collected, leading to the identification of karstic cavities, water-saturated zones, and dolines within the limestones. Additionally, the priority and effective usage sequence of the five geophysical methods were determined, and their results were compared based on the collected data.

Key Words: Doline, Hydrogeology, Geophysical, Karst, Cave, Şahinkaya Member

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.1. Karstik alanların (kırmızı renkli alanlar) dünyadaki dağılımı 2

Şekil 1.2. a) Ormanlık karst ortamında "karbondioksit (CO_2) çağlayanı" (B.C. Ministry of Forests, 1997'den değiştirilmiştir), b) Karst sisteminin tipik özellikleri 3

Şekil 1.3. Dolin tipleri. a) Çözünme dolini, b) Çökme dolini, c) Örtü kayası çökme dolini, d) Örtü çökme dolini, e) Örtülmüş dolin, f) Örtü sübsidans dolini 5

Şekil 1.4. Çalışma Alanı yer Bulduru Haritası 20

Şekil 1.5. Trabzon ili ve Düzköy ilçesine ait ortalama sıcaklık ve ortalama yağış grafikleri. a) Trabzon ilinin 1993-2023 yılları arasındaki ortalama sıcaklık grafiği, b) Trabzon ilinin 1983-2023 yılları arasındaki ortalama yağış grafiği, c) Düzköy ilçesine ait 2012-2023 yılları arası ortalama sıcaklık grafiği, d) Düzköy ilçesine ait 2012-2023 yılları arası ortalama yağış grafiği 21

Şekil 1.6. Elektrik özdirenç ölçümünün ilkesi (Knödel vd., 2007'den düzenlenmiştir) 27

Şekil 1.7. Çok-kanallı elektrik özdirenç ölçü sistemi (Griffiths & Barker, 1993'den değiştirilmiştir). a) n = 1 ile n = 6 derinlik seviyelerindeki özdirenç görüntüsü oluşturmak için kullanılan ölçüm sırası, (b) Alansal ölçüm için ölçüm hatlar 29

Şekil 1.8. a) Wenner, b) Wenner-Schlumberger, c) dipol-dipol, d) pol-pol ve e) pol- dipol dizilimlerinde kullanılan elektrotların yüzeydeki dağılımı ve dizilimlere ait geometrik faktör (k) hesabı (Berge, 2011). 30

Şekil 1.9. Yeraltı su seviyesi tarafından kesilen sülfürlü cevherde oluşan doğal gerilim 34

Şekil 1.10. Kaydırma Dizilimi (Kurbağa Atlayışı veya Türev) Ölçü Tekniği 35

Şekil 1.11. Baza İndirgeme (Toplam Alan) Dizilimi/ Ölçü Tekniği 36

Şekil 1.12. Çeşitli temel şekiller için farklı geometrik yapılar. a) küre, b) düşey silindir, c) yatay silindir 39

Şekil 1.13. Yatay silindir modelinden üretilen *SP* anomalisi 41

Şekil 1.14. Şekil 2'de gösterilen *SP* verilerinin yatay ve düşey türevleri 41

Şekil 1.15. Analitik sinyalin (AS) genliği 41

Şekil 1.16. R-parametresinin (R) görüntüsü 42

Şekil 1.17. Tekdüze bir ortamdaki küre modeli. a=Yarıçap, h=Merkeze olan derinlik, O=Merkez noktanın yeryüzündeki iz düşümü, AA'=Polarizasyon ekseni, θ=AA' doğrultusunun x ekseni ile yaptığı

açı, P= Yeryüzündeki ölçü noktası, x= P'nin O noktasına olan uzaklığı, r= P ile merkezi birleştiren doğrultu uzaklığı, α= r ile AA' arasındaki açı, $P_{0=}$ sıfır geriliminin gözlendiği nokta, $x_0=P_0$ ile O noktası arasındaki uzaklıktır 43

Şekil 1.18. Küre ve silindir modeline göre hazırlanmış *SP* anomali değerlendirme Nomogram'ı 45

Şekil 1.19. Sismik kırılma yönteminin dayandığı kuramlar. a) Dalga cephesi ve ışın arasındaki ilişki, b) Huygens prensibine göre düzlem dalga yayınımı (Kara, 2010'dan alınmıştır), c) Fermat kanunu, d) Snell yasası 47

Şekil 1.20. Sismik kırılma tomografi ölçüm alma düzeneği 48

Şekil 1.21. Yeraltı P dalga hızlarının tomografik modeli 49

Şekil 1.22. MASW verisinin değerlendirme aşamaları. a) Ham MASW verisi, b) MASW verisinden elde edilen faz hızı-frekans kesiti, c) Dispersiyon eğrisi, d) 1 boyutlu derinlik-Vs modeli 50

Şekil 1.23. Yer radarı yöntemi ölçü düzeneği ve elde edilen kesit A) Yer radarı yönteminin genel çalışma prensibi, B) 2B'lu *GPR* kesiti 52

Şekil 1.24. Elektrik ve manyetik alanın gösterimi 55

Şekil 1.25. Yer radarı uygulamalarında veri toplama yöntemleri. a) ortak ofset, b) ortak orta nokta, c) geniş açılı yansıma ve kırılma, d) sıfır ofset profili, e) çoklu ofset profili, f) düşey yansıma profili oluşturma yöntemleri 57

Şekil 1.26. Piper diyagramı 67

Şekil 1.27. Schoeller diyagramı 68

Şekil 2.1. Çalışma alanlarının uydudan görünümü 69

Şekil 2.2. Çalışma Alanı 1'den genel görünümler, a) Çalışma Alanı 1'de ölçümlerin alındığı yüzey, b) Çalışma Alanı 1'de yer alan dolinin genel görünümü, c) Çalışma Alanı 1'de bulunan karstik boşlukların görünümü 70

Şekil 2.3. Çalışma Alanı 2'den genel görünümler, a) Çalışma Alanı 2'de ölçümlerin alındığı yüzey, b) Çalışma Alanı 2'de yer alan dolinin genel görünümü, c) Çalışma Alanı 2'de bulunan karstik boşluklar 71

Şekil 2.4. Çalışma Alanı 3'ten genel görünümler, a) Ölçü alınan yüzeyin görünümü, b-c) Çalışma Alanı 3'te yüzeyden gözlemlenen dolinler 72

Şekil 2.5. Çalışma Alanlarında belirlenen *ERT* ölçüm profilleri. A) Çalışma Alanı 1'de belirlenen *ERT* profilleri, B) Çalışma Alanı 2'de belirlenen *ERT* profili, C) Çalışma Alanı 3'te belirlenen *ERT* profilleri 73

Şekil 2.6. Elektrik Özdirenç Tomografi yöntemi ölçü ekipmanı 75

Şekil 2.7. Çalışma Alanlarında belirlenen *SP* ölçüm profilleri. A) Çalışma Alanı 1'de belirlenen *SP* profilleri, B) Çalışma Alanı 2'de belirlenen *SP* profili, C) Çalışma Alanı 3'te belirlenen *SP* profilleri 76

Şekil 2.8. *SP* yöntemi ölçü ekipmanı 78

Şekil 2.9. Çalışma Alanlarında belirlenen *SRT* ölçüm profilleri. A) Çalışma Alanı 1'de belirlenen *SRT* profilleri, B) Çalışma Alanı 2'de belirlenen *SRT* profili, C) Çalışma Alanı 3'te belirlenen *SRT* profilleri 79

Şekil 2.10. Sismik kırılma yöntemi ölçü ekipmanları 81

Şekil 2.11. Çalışma Alanlarında belirlenen *GPR* ölçüm profilleri. A) Çalışma Alanı 1'de belirlenen *GPR* profili, B) Çalışma Alanı 2'de belirlenen *GPR* profilleri, C) Çalışma Alanı 3'te belirlenen *GPR* profilleri 84

Şekil 2.12. Yer radarı yöntemi ölçü ekipmanı 87

Şekil 2.13. Su örnekleme noktalarının konumları. a) Çalköy/Çayırbağı çevresindeki yüzey sularından alınan su örneklerinin konumları, b) Çal Mağarası içerisinden alınan su örneklerinin konumları (Törk vd., 2013'ten değiştirilmiştir), c) 1. su örneği kaynağı, d) 2. su örneği kaynağı, e) 3. su örneği kaynağı, f) 4. su örneği kaynağı, g) 5. su örneği kaynağı, h) 6. su örneği kaynağı, ı) 7. su örneği kaynağı, j) 8. su örneği kaynağı, k) 9. su örneği kaynağı 89

Şekil 2.14. Piper diyagramları. a) 27.04.2022 tarihli analiz sonuçlarına göre hazırlanan Piper diyagramı, b) 19.09.2022 tarihli analiz sonuçlarına göre hazırlanan Piper diyagramı, c) 27.04.2023 tarihli analiz sonuçlarına göre hazırlanan Piper diyagramı 95

Şekil 2.15. Schoeller diyagramları. a) 27.04.2022 tarihli analiz sonuçlarına göre hazırlanan Schoeller diyagramı, b) 19.09.2022 tarihli analiz sonuçlarına göre hazırlanan Schoeller diyagramı, c) 27.04.2023 tarihli analiz sonuçlarına göre hazırlanan Schoeller diyagramı, d) tüm analiz sonuçlarının tek bir Schoeller diyagramında gösterimi 96

Şekil 3.1. Çalışma Alanı 1'den elde edilen 2B *ERT* (ERT1_P1-ERT1_P6) kesitleri. a) ERT1_P1, b) ERT1_P2, c) ERT1_P3, d) ERT1_P4, e) ERT1_P5, f) ERT1_P6 kesitleri, g) ERT1_P1-ERT1_P6 kesitlerinin elde edildiği profiller (kırmızı çizgiler). 100

Şekil 3.2. Çalışma Alanı 1'den elde edilen 2B *ERT* (ERT1_P7-ERT1_P10) kesitleri. a)ERT1_P7, b) ERT1_P8, c) ERT1_P9, d) C) ERT1_P9, e) ERT1_P7-ERT1_P10 kesitlerinin elde edildiği profiller (kırmızı çizgiler) 101

Şekil 3.3. Çalışma Alanı 1, 3B'lu *ERT* görüntüleri ve seviye haritaları, a) Çalışma Alanı 1'den elde edilen 3B'lu *ERT* görüntüsü, b) 3B'lu *ERT* görüntü seviye haritalarının bir aradaki görüntüsünü, c) 3B'lu *ERT* görüntüsünün her 5 m de bir görüntülenen seviye haritaları 103

Şekil 3.4. Çalışma Alanı 1'den elde edilen *ERT* kesitlerinin fence diyagramı 104

Şekil 3.5. Çalışma Alanı 1'den elde edilen *SP* (SP1_P1-SP1_P6) kesitleri. a) SP1_P1, b) SP1_P2, c) SP1_P3, d) SP1_P4, e) SP1_P5, f) SP1_P6 kesitleri, g) SP1_P1-SP1_P6 kesitlerinin elde edildiği profiller (kırmızı çizgiler). 106

Şekil 3.6. Çalışma Alanı 1'den elde edilen *SP* (SP1_P7-SP1_P10) kesitleri. a) SP1_P7, b) SP1_P8, c) SP1_P9, d) SP1_P10 kesitleri, e) SP1_P7-SP1_P10 kesitlerinin elde edildiği profiller (kırmızı çizgiler). 107

Şekil 3.7. Çalışma Alanı 1'den elde edilen *SP* haritası 108
Şekil 3.8. Çalışma Alanı 1'deki *SP* haritasından alınan kesitler 109
Şekil 3.9. Çalışma Alanı 1'deki *SP* haritasındaki kesitlerden elde edilen, gözlenen *SP* anomalisi ve hesaplanan model anomalileri. a) AA' kesiti, b) BB' kesiti, c) CC' kesiti, d) DD' kesiti boyunca gözlenen *SP* anomalileri ve hesaplanan model anomalileri 110
Şekil 3.10. a) AA' kesitinin gözlenen ve hesaplanan *SP* eğrileri, b) *SP* anomalisinin yatay ve düşey türevleri, c) Analitik sinyalin genliği, d) R-parametresinin görüntüsü 111
Şekil 3.11. a) BB' kesitinin gözlenen ve hesaplanan *SP* eğrileri, b) *SP* anomalisinin yatay ve düşey türevleri, c) Analitik sinyalin genliği, d) R-parametresinin görüntüsü 112
Şekil 3.12. a) CC' kesitinin gözlenen ve hesaplanan *SP* eğrileri, b) *SP* anomalisinin yatay ve düşey türevleri, c) Analitik sinyalin genliği, d) R-parametresinin görüntüsü 113
Şekil 3.13. a) DD' kesitinin gözlenen ve hesaplanan *SP* eğrileri, b) *SP* anomalisinin yatay ve düşey türevleri, c) Analitik sinyalin genliği, d) R-parametresinin görüntüsü 114
Şekil 3.14. Çalışma Alanı 1'den elde edilen *SRT* (SRT1_P1-SRT1_P6) kesitleri. a) SRT1_P1, b) SRT1_P2, c) SRT1_P3, d) SRT1_P4, e) SRT1_P5, f) SRT1_P6 kesitleri, g) SRT1_P1-SRT1_P6 kesitlerinin elde edildiği profiller (kırmızı çizgiler) 116
Şekil 3.15. Çalışma Alanı 1, 3B'lu *SRT* görüntüleri ve seviye haritaları a) Çalışma Alanı 1'den elde edilen 3B'lu *SRT* görüntüsü, b) 3B'lu *SRT* görüntü seviye haritalarının bir aradaki görüntüsünü, c) 3B'lu *SRT* görüntüsünün her 5 m de bir görüntülenen seviye haritaları 117
Şekil 3.16. Çalışma Alanı 1, MASW1_P1 verisi, a) MASW1_P1 profilden elde edilen faz hızı-frekans kesiti, b) hesaplanan (siyah) ile gözlenen (kırmızı) dispersiyon eğrilerinin çakışması, c) 1 boyutlu derinlik-Vs modeli 119
Şekil 3.17. Çalışma Alanı 1, MASW1_P2 verisi, a) MASW1_P2 profilden elde edilen faz hızı-frekans kesiti, b) hesaplanan (siyah) ile gözlenen (kırmızı) dispersiyon eğrilerinin çakışması, c) 1 boyutlu derinlik-Vs modeli 119
Şekil 3.18. Çalışma Alanı 1, MASW1_P3 verisi, a) MASW1_P3 profilden elde edilen faz hızı-frekans kesiti, b) hesaplanan (siyah) ile gözlenen (kırmızı) dispersiyon eğrilerinin çakışması, c) 1 boyutlu derinlik-Vs modeli 120
Şekil 3.19. Çalışma Alanı 1, MASW1_P4 verisi, a) MASW1_P4 profilden elde edilen faz hızı-frekans kesiti, b) hesaplanan (siyah) ile gözlenen (kırmızı) dispersiyon eğrilerinin çakışması, c) 1 boyutlu derinlik-Vs modeli 120
Şekil 3.20. Çalışma Alanı 1, MASW1_P5 verisi, a) MASW1_P5 profilden elde edilen faz hızı-frekans kesiti, b) hesaplanan (siyah) ile gözlenen

(kırmızı) dispersiyon eğrilerinin çakışması, c) 1 boyutlu derinlik-Vs modeli 121

Şekil 3.21. Çalışma Alanı 1, MASW1_P6 verisi, a) MASW1_P6 profilden elde edilen faz hızı-frekans kesiti, b) hesaplanan (siyah) ile gözlenen (kırmızı) dispersiyon eğrilerinin çakışması, c) 1 boyutlu derinlik-Vs modeli 121

Şekil 3.22. Çalışma Alanı 1'den elde edilen *GPR* (GPR1_P1-GPR1_P7) kesitleri. a) GPR1_P1, b) GPR1_P2, c) GPR1_P3, d) GPR1_P4, e) GPR1_P5; f) GPR1_P6, g) GPR1_ P7 kesitleri, h) GPR1_P1-GPR1_P7 kesitlerinin elde edildiği profiller (kırmızı çizgiler). 123

Şekil 3.23. Çalışma Alanı 1'den elde edilen *GPR* (GPR1_P8-GPR1_P15) kesitleri. a) GPR1_P8, b) GPR1_P9, c) GPR1_P10, d) GPR1_P11, e) GPR1_P12; f) GPR1_P13, g) GPR1_ P14, h) GPR1_ P15 kesitleri. 125

Şekil 3.24. Çalışma Alanı 1'den elde edilen *GPR* (GPR1_P16-GPR1_P19) kesitleri. a) GPR1_P16, b) GPR1_P17, c) GPR1_P18, d) GPR1_P19, e) GPR1_P16-GPR1_P19 kesitlerinin elde edildiği profiller (kırmızı çizgiler). 126

Şekil 3.25. a) Çalışma Alanı 2'den elde edilen ERT2_P1 kesitinin elde edildiği profili. b) ERT2_P1 profilinden elde edilen ERT2_P1 kesiti..... 128

Şekil 3.26. a) Çalışma Alanı 2'den elde edilen SP2 P1 kesiti, b) SP2_P1 kesitinin elde edildiği profil..... 129

Şekil 3.27. a) Çalışma Alanı 2'den elde edilen SRT2_P1 kesiti, b) SRT2_P1 kesitinin elde edildiği profil..... 130

Şekil 3.28. Çalışma Alanı 2, MASW2_P1 verisi, a) MASW2_P1 profilden elde edilen faz hızı-frekans kesiti, b) hesaplanan (siyah) ile gözlenen (kırmızı) dispersiyon eğrilerinin çakışması, c) 1 boyutlu derinlik-Vs modeli 131

Şekil 3.29. Çalışma Alanı 2'den elde edilen *GPR* kesiti ve profili. a) GPR2_P1 kesiti, b) GPR2_P1 kesitinin elde edildiği profil..... 132

Şekil 3.30. Çalışma Alanı 3'ten elde edilen 2B *ERT* kesitleri (ERT3_P1-ERT3_P6). a) ERT3_P1, b) ERT3_P2, c) ERT3_P3, d) ERT3_P4, e) ERT3_P5, f) ERT3_P6 kesitleri, g) ERT3_P1-ERT3_P6 kesitlerinin elde edildiği profiller (kırmızı çizgiler) 134

Şekil 3.31. Çalışma Alanı 3'ten elde edilen 2B *ERT* kesitleri (ERT3_P7-ERT3_P12). a) ERT3_P7, b) ERT3_P8, c) ERT3_P9, d) ERT3_P10, e) ERT3_P11, f) ERT3_P12 kesitleri, g) ERT3_P7-ERT3_P12 kesitlerinin elde edildiği profiller (kırmızı çizgiler) 136

Şekil 3.32. Çalışma Alanı 3, 3B'lu *ERT* görüntüleri ve seviye haritaları. a) Çalışma Alanı 3'den elde edilen 3B'lu *ERT* görüntüsü, b) 3B'lu *ERT* görüntü seviye haritalarının bir aradaki görüntüsünü, c) 3B'lu *ERT* görüntüsünün her 5 m de bir görüntülenen seviye haritaları 138

Şekil 3.33. Çalışma Alanı 3'ten elde edilen *ERT* kesitlerinin fence diyagramı..... 139

Şekil 3.34. Çalışma Alanı 3'ten elde edilen *SP* (SP3_P1-SP3_P6) grafikleri. a) SP3_P1, b) SP3_P2, c) SP3_P3, d) SP3_P4, e) SP3_P5, f) SP3_P6 grafikleri, g) SP3_P1-SP3_P6 kesitlerinin elde edildiği profiller (kırmızı çizgiler) 141

Şekil 3.35. Çalışma Alanı 3'ten elde edilen *SP* (SP3_P7-SP3_P12) grafikleri. a) SP3_P7, b) SP3_P8, c) SP3_P9, d) SP3_P10, e) SP3_P11, f) SP3_P12 grafikleri, g) SP3_P7-SP3_P12 kesitlerinin elde edildiği profiller (kırmızı çizgiler) 142

Şekil 3.36. Çalışma Alanı 3'ten elde edilen SP haritası 144

Şekil 3.37. Çalışma Alanı 3'deki *SP* haritasından alınan kesitler 145

Şekil 3.38. Çalışma Alanı 3'e ait *SP* haritasında belirtilen kesitlerden elde edilen, gözlenen *SP* anomalisi ve hesaplanan model anomali eğrisi. a) AA', b) BB', c) CC', d) DD', e) EE', f) FF', g) GG', h) HH' kesitleri boyunca gözlenen *SP* anomalileri ve hesaplanan model anomalileri 146

Şekil 3.39. a) AA' kesitinin gözlenen ve hesaplanan SP eğrileri, b) SP anomalisinin yatay ve düşey türevleri, c) Analitik sinyalin genliği, d) R-parametresinin görüntüsü..... 147

Şekil 3 40. a) BB' kesitinin gözlenen ve hesaplanan *SP* eğrileri, b) *SP* anomalisinin yatay ve düşey türevleri, c) Analitik sinyalin genliği, d) R-parametresinin görüntüsü..... 148

Şekil 3.41. a) CC' kesitinin gözlenen ve hesaplanan SP eğrileri, b) SP anomalisinin yatay ve düşey türevleri, c) Analitik sinyalin genliği, d) R-parametresinin görüntüsü..... 149

Şekil 3.42. a) DD' kesitinin gözlenen ve hesaplanan *SP* eğrileri, b) *SP* anomalisinin yatay ve düşey türevleri, c) Analitik sinyalin genliği, d) R-parametresinin görüntüsü..... 150

Şekil 3.43. a) EE' kesitinin gözlenen ve hesaplanan *SP* eğrileri, b) *SP* anomalisinin yatay ve düşey türevleri, c) Analitik sinyalin genliği, d) R-parametresinin görüntüsü..... 151

Şekil 3.44. a) FF' kesitinin gözlenen ve hesaplanan *SP* eğrileri, b) *SP* anomalisinin yatay ve düşey türevleri, c) Analitik sinyalin genliği, d) R-parametresinin görüntüsü..... 152

Şekil 3.45. a) GG' kesitinin gözlenen ve hesaplanan *SP* eğrileri, b) *SP* anomalisinin yatay ve düşey türevleri, c) Analitik sinyalin genliği, d) R-parametresinin görüntüsü..... 153

Şekil 3.46. a) HH' kesitinin gözlenen ve hesaplanan *SP* eğrileri, b) *SP* anomalisinin yatay ve düşey türevleri, c) Analitik sinyalin genliği, d) R-parametresinin görüntüsü..... 154

Şekil 3.47. Çalışma Alanı 3'ten elde edilen *SRT* (SRT3_P1-SRT3_P6) kesitleri. a) SRT3_P1, b) SRT3_P2, c) SRT3_P3, d) SRT3_P4, e) SRT3_P5, f) SRT3_P6 kesitleri, g) SRT3_P1-SRT3_P6 kesitlerinin elde edildiği profiller (kırmızı çizgiler). 156

Şekil 3.48. Çalışma Alanı 3'ten elde edilen *SRT* (SRT3_P7-SRT3_P10) kesitleri. a) SRT3_P7, b) SRT3_P8, c) SRT1_P9, d) SRT3_P10, e) SRT3_P7-SRT3_P10 kesitlerinin elde edildiği profiller (kırmızı çizgiler)..... 157

Şekil 3.49. Çalışma Alanı 3'ten elde edilen *SRT* (SRT3_P11-SRT3_P15) kesitleri. a) SRT3_P11, b) SRT3_P12, c) SRT3_P13, d) SRT3_P14, e) SRT3_P15, f) SRT3_P11-SRT3_P15 kesitlerinin elde edildiği profiller (kırmızı çizgiler). 158

Şekil 3.50. Çalışma Alanı 3, 3B'lu *SRT* görüntüleri ve seviye haritaları, A) Çalışma Alanı 3'ten elde edilen 3B'lu *SRT* görüntüsü, B) 3B'lu *SRT* görüntü seviye haritalarının bir aradaki görüntüsünü, C) 3B'lu *SRT* görüntüsünün her 5 m de bir görüntülenen seviye haritaları 160

Şekil 3.51. Çalışma Alanı 3, MASW3_P1 verisi, a) MASW3_P1 profilden elde edilen faz hızı-frekans kesiti, b) hesaplanan (siyah) ile gözlenen (kırmızı) dispersiyon eğrilerinin çakışması, c) 1 boyutlu derinlik-Vs modeli 163

Şekil 3.52. Çalışma Alanı 3, MASW3_P2 verisi, a) MASW3_P2 profilden elde edilen faz hızı-frekans kesiti, b) hesaplanan (siyah) ile gözlenen (kırmızı) dispersiyon eğrilerinin çakışması, c) 1 boyutlu derinlik-Vs modeli 164

Şekil 3.53. Çalışma Alanı 3, MASW3_P3 verisi, a) MASW3_P3 profilden elde edilen faz hızı-frekans kesiti, b) hesaplanan (siyah) ile gözlenen (kırmızı) dispersiyon eğrilerinin çakışması, c) 1 boyutlu derinlik-Vs modeli 165

Şekil 3.54. Çalışma Alanı 3, MASW3_P4 verisi, a) MASW3_P4 profilden elde edilen faz hızı-frekans kesiti, b) hesaplanan (siyah) ile gözlenen (kırmızı) dispersiyon eğrilerinin çakışması, c) 1 boyutlu derinlik-Vs modeli 166

Şekil 3.55. Çalışma Alanı 3, MASW3_P5 verisi, a) MASW3_P5 profilden elde edilen faz hızı-frekans kesiti, b) hesaplanan (siyah) ile gözlenen (kırmızı) dispersiyon eğrilerinin çakışması, c) 1 boyutlu derinlik-Vs modeli 167

Şekil 3.56. Çalışma Alanı 3, MASW3_P6 verisi, a) MASW3_P6 profilden elde edilen faz hızı-frekans kesiti, b) hesaplanan (siyah) ile gözlenen (kırmızı) dispersiyon eğrilerinin çakışması, c) 1 boyutlu derinlik-Vs modeli. 168

Şekil 3.57. Çalışma Alanı 3, MASW3_P7 verisi, a) MASW3_P7 profilden elde edilen faz hızı-frekans kesiti, b) hesaplanan (siyah) ile gözlenen (kırmızı) dispersiyon eğrilerinin çakışması, c) 1 boyutlu derinlik-Vs modeli 169

Şekil 3.58. Çalışma Alanı 3, MASW3_P8 verisi, a) MASW3_P8 profilden elde edilen faz hızı-frekans kesiti, b) hesaplanan (siyah) ile gözlenen (kırmızı) dispersiyon eğrilerinin çakışması, c) 1 boyutlu derinlik-Vs modeli 170

Şekil 3.59. Çalışma Alanı 3, MASW3_P9 verisi, a) MASW3_P9 profilden elde edilen faz hızı-frekans kesiti, b) hesaplanan (siyah) ile gözlenen (kırmızı) dispersiyon eğrilerinin çakışması, c) 1 boyutlu derinlik-Vs modeli 171

Şekil 3.60. Çalışma Alanı 3, MASW3_P10 verisi, a) MASW3_P10 profilden elde edilen faz hızı-frekans kesiti, b) hesaplanan (siyah) ile gözlenen (kırmızı) dispersiyon eğrilerinin çakışması, c) 1 boyutlu derinlik-Vs modeli. 172

Şekil 3.61. Çalışma Alanı 3, MASW3_P11 verisi, a) MASW3_P11 profilden elde edilen faz hızı-frekans kesiti, b) hesaplanan (siyah) ile gözlenen (kırmızı) dispersiyon eğrilerinin çakışması, c) 1 boyutlu derinlik-Vs modeli 173

Şekil 3.62. Çalışma Alanı 3, MASW3_P12 verisi, a) MASW3_P12 profilden elde edilen faz hızı-frekans kesiti, b) hesaplanan (siyah) ile gözlenen (kırmızı) dispersiyon eğrilerinin çakışması, c) 1 boyutlu derinlik-Vs modeli 174

Şekil 3.63. Çalışma Alanı 3, MASW3_P13 verisi, a) MASW3_P13 profilden elde edilen faz hızı-frekans kesiti, b) hesaplanan (siyah) ile gözlenen (kırmızı) dispersiyon eğrilerinin çakışması, c) 1 boyutlu derinlik-Vs modeli 175

Şekil 3.64. Çalışma Alanı 3, MASW3_P14 verisi, a) MASW3_P14 profilden elde edilen faz hızı-frekans kesiti, b) hesaplanan (siyah) ile gözlenen (kırmızı) dispersiyon eğrilerinin çakışması, c) 1 boyutlu derinlik-Vs modeli 176

Şekil 3.65. Çalışma Alanı 3, MASW3_P15 verisi, a) MASW3_P15 profilden elde edilen faz hızı-frekans kesiti, b) hesaplanan (siyah) ile gözlenen (kırmızı) dispersiyon eğrilerinin çakışması, c) 1 boyutlu derinlik-Vs modeli 177

Şekil 3.66. Çalışma Alanı 3'ten elde edilen *GPR* (GPR3_P1-GPR3_P7) kesitleri. a) GPR3_P1, b) GPR3_P2, c) GPR3_P3, d) GPR3_P4, e) GPR3_P5, f) GPR3_P6, g) GPR3_P7 kesitleri, h) GPR3_P1-GPR3_P7 kesitlerinin elde edildiği profiller (kırmızı çizgiler) 180

Şekil 3.67. Çalışma Alanı 3'ten elde edilen *GPR* (GPR3_P8-GPR3_P12) kesitleri. a) GPR3_P8, b) GPR3_P9, c) GPR3_P10, d) GPR3_P11, e) GPR3_P12 kesitleri, f) GPR3_P8-GPR3_P12 kesitlerinin elde edildiği profiller (kırmızı çizgiler) 181

Şekil 3.68. Çalışma Alanı 3'ten elde edilen *GPR* (GPR3_P13-GPR3_P17) kesitleri. a) GPR3_P13, b) GPR3_P14, c) GPR3_P15, d) GPR3_P16, e) GPR3_P17 kesitleri, f) GPR3_P13-GPR3_P17 kesitlerinin elde edildiği profiller (kırmızı çizgiler) 182

Şekil 3.69. Çalışma Alanı 3'ten elde edilen *GPR* (GPR3_P18-GPR3_P22) kesitleri. a) GPR3_P18, b) GPR3_P19, c) GPR3_P20, d) GPR3_P21, e) GPR3_P22 kesitleri, f) GPR3_P18-GPR3_P22 kesitlerinin elde edildiği profiller (kırmızı çizgiler) 184

Şekil 3.70. Çalışma Alanı 3'ten elde edilen *GPR* (GPR3_P23-GPR3_P24) kesitleri. a) GPR3_P23, b) GPR3_P24, c) GPR3_P23, d) GPR3_P24 kesitlerinin elde edildiği profiller (kırmızı çizgiler) 185

Şekil 3.71. Çalışma Alanı 3'ten elde edilen *GPR* (GPR3_P25-GPR3_P30) kesitleri. a) GPR3_P25, b) GPR3_P26, c) GPR3_P27, d) GPR3_P28, e) GPR3_P29, f) GPR3_P30 kesitleri, g) GPR3_P25-GPR3_P30 kesitlerinin elde edildiği profiller (kırmızı çizgiler) 186

Şekil 3.72. Çalışma Alanı 3'ten elde edilen *GPR* (GPR3_P31-GPR3_P35) kesitleri. a) GPR3_P31, b) GPR3_P32, c) GPR3_P33, d) GPR3_P34, e) GPR3_P35 kesitleri, f) GPR3_P31-GPR3_P35 kesitlerinin elde edildiği profiller (kırmızı çizgiler) 188

Şekil 3.73. Çalışma Alanı 3'ten elde edilen *GPR* (GPR3_P36-GPR3_P39) kesitleri. a) GPR3_P36, b) GPR3_P37, c) GPR3_P38, d) GPR3_P39, e) GPR3_P36-GPR3_P39 kesitlerinin elde edildiği profiller (kırmızı çizgiler) 189

Şekil 3.74. Çalışma Alanı 3'ten elde edilen *GPR* (GPR3_P40-GPR3_P46) kesitleri. a) GPR3_P40, b) GPR3_P41, c) GPR3_P42, d) GPR3_P13-GPR3_P17 kesitlerinin elde edildiği profiller (kırmızı çizgiler), e) GPR3_P43, f) GPR3_P44, g) GPR3_P45 kesitleri, h) GPR3_P46 kesitleri 190

Şekil 3.75. Çalışma Alanı 3'ten elde edilen *GPR* (GPR3_P47-GPR3_P49) kesitleri. a) GPR3_P47, b) GPR3_P48, c) GPR3_P49, d) GPR3_P47-GPR3_P49 kesitlerinin elde edildiği profiller (kırmızı çizgiler) 191

Şekil 3.76. Schoeller diyagramları. a) 27.04.2022 tarihli analiz sonuçlarına göre hazırlanan Schoeller diyagramı, b) 19.09.2022 tarihli analiz sonuçlarına göre hazırlanan Schoeller diyagramı, c) 27.04.2023 tarihli analiz sonuçlarına göre hazırlanan Schoeller diyagramı, d) tüm analiz sonuçlarının tek bir Schoeller diyagramında gösterimi 199

Şekil 3.77. Piper diyagramları. a) 27.04.2022 tarihli analiz sonuçlarına göre hazırlanan Piper diyagramı, b) 19.09.2022 tarihli analiz sonuçlarına göre hazırlanan Piper diyagramı, c) 27.04.2023 tarihli analiz sonuçlarına göre hazırlanan Piper diyagramı 201

Şekil 3.78. Piper diyagramları. a) Ofluoğlu (1993) Eylül ayı analiz sonuçlarından elde edilen piper diyagramı, b) Bu çalışmadaki 19 Eylül 2022 yılı analiz sonuçlarından elde edilen piper diyagramı 204

Şekil 3.79. Schoeller diyagramları. a) Ofluoğlu (1983) Eylül ayı analiz sonuçlarından elde edilen schoeller diyagramı, b) Bu çalışmadaki Eylül ayı analiz sonuçlarından elde edilen schoeller diyagramı 205

Şekil 4.1. Karstik alanlarda Jeofizik yöntemlerin önerilen uygulama akış şeması 210

TABLOLAR DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 1.1. Çeşitli jeolojik malzemeler için göreli dielektrik sabitleri ve radyo dalga hızları tablosu 53
Tablo 1.2. Yer radarı uygulamalarında frekansa göre penetrasyon derinliği 54
Tablo 2.1. *ERT* yöntemi ölçüm profillerinin parametreleri 74
Tablo 2.2. *SP* yöntemi ölçüm profillerinin parametreleri 77
Tablo 2.3. *SRT* ve *MASW* yöntemi ölçüm profillerinin parametreleri 80
Tablo 2.4. *GPR* yöntemi ölçüm profillerinin parametreleri 85
Tablo 2.5. Su örneklerine ait fiziksel özellikler ve majör anyon-katyon içerikleri 91
Tablo 2.6. Su örneklerine ait iz element içerikleri 91
Tablo 2.7. Su örneklerine ait fiziksel özellikler ve majör anyon-katyon içerikleri 92
Tablo 2.8. Su örneklerine ait iz element içerikleri 92
Tablo 2.9. Su örneklerine ait fiziksel özellikler ve majör anyon-katyon içerikleri 93
Tablo 2.10. Su örneklerine ait iz element içerikleri 93
Tablo 3.1. Çalışma Alanı3, Nomogram diyagramı değerleri 109
Tablo 3.2. Çalışma Alanı3, Nomogram diyagramı değerleri 145
Tablo 3.3. Su örneklerine ait fiziksel özellikler ve majör anyon-katyon içerikleri 193
Tablo 3.4. Su örneklerine ait fiziksel özellikler ve majör anyon-katyon içerikleri 193
Tablo 3.5. Su örneklerine ait iz element içerikleri 195
Tablo 3.6. Su örneklerine ait iz element içerikleri 195
Tablo 3.7. Su örneklerine ait fiziksel özellikler ve majör anyon-katyon içerikleri 197
Tablo 3.8. Su örneklerine ait iz element içerikleri 197
Tablo 3.9. Ofluoğlu (1993)'nun Eylül ayında, Çal Mağarası içerisinden elde etmiş olduğu su analizleri sonucu ile bu çalışma kapsamında Eylül ayında elde edilen su analizi sonuçları 202

SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

2B	: İki boyut
3B	: Üç boyut
AGC	: Otomatik kazanç kontrolü
AgCl	: Gümüş klorür
Al	: Alüminyum
As	: Arsenik
AS	: Analitik Sinyal
B	: Bor
B	: Manyetik akı yoğunluğu vektörü
Ba	: Baryum
Be	: Berilyum
C_1, C_2	: Akım elektrotları
Ca	: Kalsiyum
$Ca(HCO_3)_2$	: Kalsiyum bikarbonat
$CaCO_3$	: Kireçtaşı
$CaMg(CO_3)_2$	: Dolomit
Cd	: Kadmiyum
Cl	: Klor
CN	: Siyanür
Co	: Kobalt
CO_2	: Karbondioksit
CO_3	: Karbonat
ÇOT	: Çoklu ofset toplama
Cr	: Krom
Cu	: Bakır
$CuSO_4$	: Bakır sülfat
D	: Elektrik yer değiştirme vektörü
DO	: Doymuş oksijen
DSİ	: Devlet Su İşleri
DYP	: Düşey yansıma profilinde

E : Elektrik alan şiddeti vektörü

EC : Elektrik iletkenlik

EM : Elektromanyetik

ERT : Elektrik Özdirenç Tomografi

ε : Dielektrik Sabit

Fe : Demir

GAYK : Geniş açılı yansıma ve kırılma

GPR : Yer Radarı

H : Manyetik alan yoğunluğu

h : Derinlik

H_2CO_3 : Karbonik asit

H_2O : Su

HCO_3 : Bikarbonat

Hg : Civa

I : Akım

j : Elektrik akım yoğunluğu vektörü

K : Elektrik dipol moment

k : Geometrik Faktör

K^+ : Potasyum

KOI : Kimyasal oksijen ihtiyacı

MASW : Yüzey Dalgalarının Çok Kanallı Analizi

Mg : Magnezyum

Mn : Mangan

Mo : Molibden

mV : milivolt

μ : Manyetik geçirgenlik

Na : Sodyum

NH_4 : Amonyum

Ni : Nikel

NO_2 : Nitrit

NO_3 : Nitrat

Θ : Açı

OO : Ortak ofset

OON : Ortak orta nokta

P_1, P_2 : Potansiyel elektrotlar

Pb : Kurşun

$PbCl_2$: Kurşun Klorür

pH : Hidrojen İyon Konsantrasyonu

q : Şekil Faktörü

R : R parametresi (korelasyon katsayısı)

Rx : Alıcı Anten

Sb : Antimon

Se : Selenyum

SEC : Üssel Kazanç

SO_4 : Sülfat

SOP : Sıfır-ofset profil

SP : Doğal Potansiyel

SRT : Sismik Kırılma Tomografi

TDS : Toplam çözünmüş madde miktarı

Ti : Titanyum

Tx : Verici Anten

V : Vanadyum

V : Hız

WHO : Dünya Sağlık Örgütü

X : Uzaklık

Zn : Çinko

$ZnSO_4$: Çinko Sülfat

ΔP : Basınç farkı

ΔV : Ölçülen gerilim farkı

ξ : Soğurma

ρ : Özdirenç

ρ_a : Görünür Özdirenç

σ : Elektriksel iletkenlik

η : Akışkanın dinamik potansiyelidir.

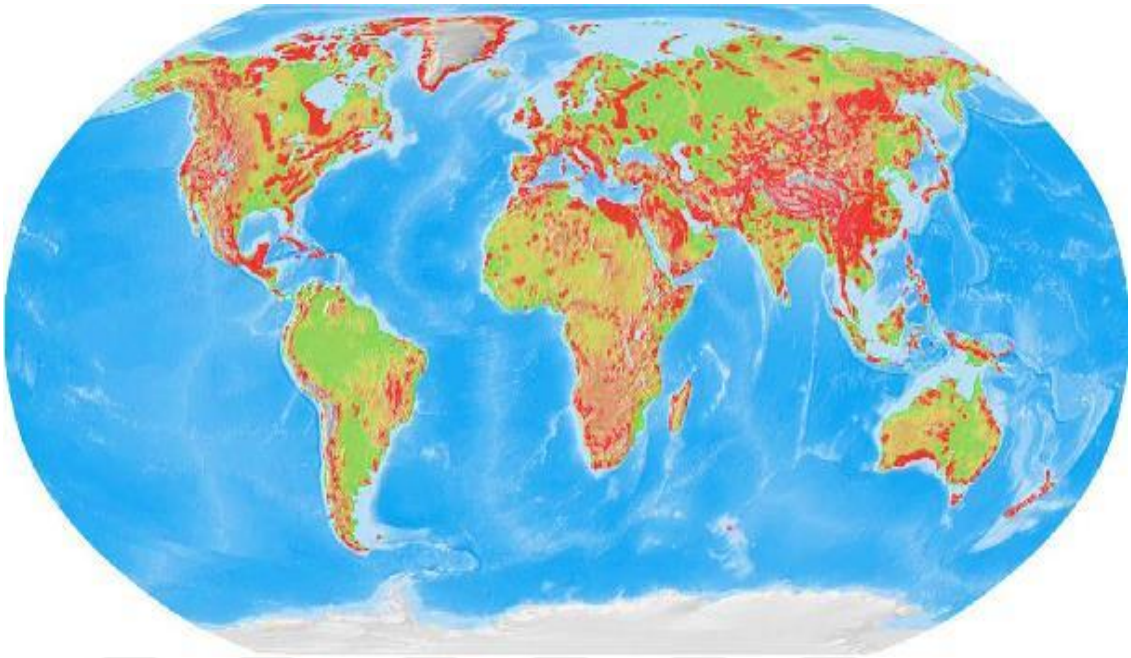
t : Zaman

ρ : Elektrik yük yoğunluğu

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Uluslararası bilimsel terim olan karst: Slovence'de '*Kras*', İtalyanca'da '*Carso*' ve Almanca'da '*Karst*' olarak adlandırılan platonun adından türetilmiştir (Veress, 2016). Jovan Cvijic (1865-1927), Adriyatik kıyıları boyunca uzanan ve Trieste'nin doğusundaki geniş plato alanında oluşan yüzey ve derinlik şekillerini tanımlamak için bu terimi ilk kez kullanılmıştır (Erinç, 2012). Karst; kireçtaşı, dolomit veya jips gibi eriyebilen kayaçlar üzerinde çözünme yoluyla oluşan ve dolinler, mağaralar ve yeraltı drenajı ile karakterize edilen bir oluşum türüdür (Bates & Jackson, 1984). Karst alanları, yüksek kaya çözünürlüğü ve ikincil iyi gelişmiş gözenekliliğin bileşimini içeren, belirli hidrolojik koşullara ve yer şekillerine sahip alanlar olarak tanımlanmaktadır (Ford & Williams, 2007; Öztürk, 2018; De Waele, 2022). Bu alanlar, Dünya'daki kara parçalarının yaklaşık %7-12'sini oluşturmaktadır (Hartmann vd., 2014), (Şekil 1.1). Karstik alanlarda bulunan akiferler, dünya nüfusunun yaklaşık dörtte birinin içme suyunu karşılamaktadır (Ford & Williams, 2007). Karst, tipik olarak kalsit ($CaCO_3$) mineralinden oluşan kireçtaşı veya dolomit ($CaMg(CO_3)_2$) mineralinden oluşan dolomit gibi karbonatlı kayalarda gelişmektedir. Karstik oluşumlar ve akiferler, uzun zaman dilimleri boyunca yoğun su-kaya etkileşiminden oluşmaktadır (Hartmann vd., 2014). Kayaların içinden sızan su, kayaların içindeki çözünebilir mineralleri çözerek küçük çatlaklardan büyük mağaralara kadar değişebilen yeraltı kanalları veya boşluklardan akarak yeraltındaki akiferlerde depolanabilmektedir (White, 2002).



Şekil 1.1. Karstik alanların (kırmızı renkli alanlar) dünyadaki dağılımı (Ford & Williams, 2007'den değiştirilmiştir)

Karstlaşma süreci, yağmur suyu ve diğer yüzey suyu kaynaklarının çözünebilir kayaçlardaki çatlak ve yarıklardan akmasıyla başlamaktadır (Bonacci, 2015). Çatlak ve kırıklardan geçen su, bu açıklıkları kademeli olarak çözerek genişletmektedir (Ford & Williams, 2007; Klimchouk vd., 2017; Veress, 2020). Karstlaşma sürecini yönlendiren birincil kimyasal reaksiyon,

$$H_2O + CO_2 \leftrightarrows H_2CO_3 \quad (1)$$

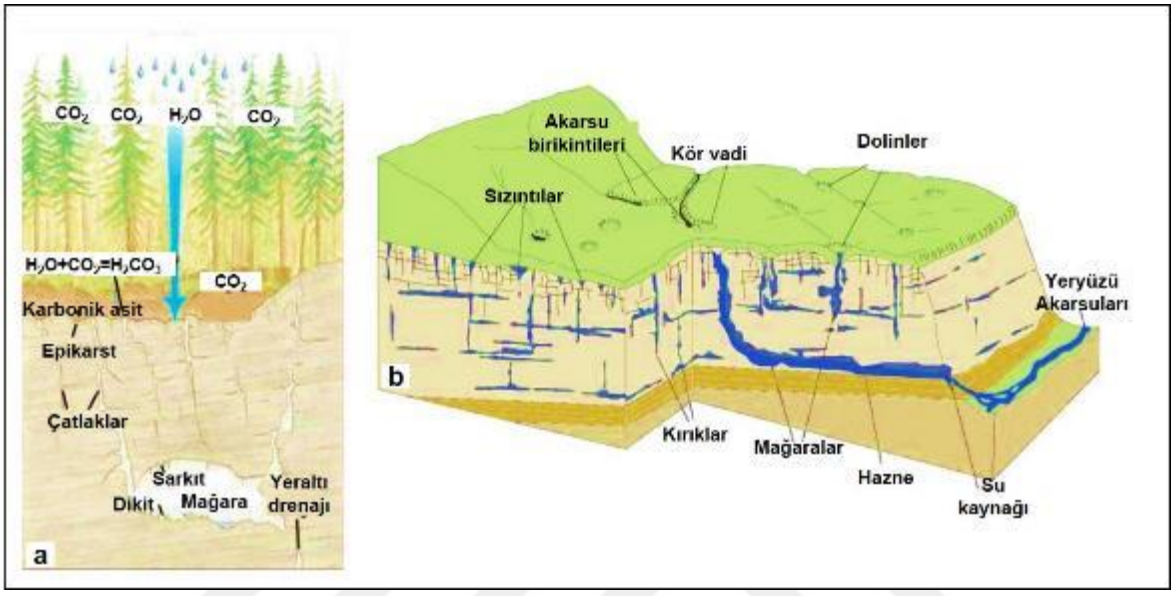
eşitliği ile verilen zayıf bir asit olan karbonik asidi (H_2CO_3) oluşturmak için karbondioksit (CO_2) ve su (H_2O) arasındaki reaksiyondur. Daha sonra;

$$CaCO_3 + H_2CO_3 \leftrightarrows Ca(HCO_3)_2 \quad (2)$$

eşitliğindeki gibi karbonik asit, kireçtaşı ($CaCO_3$) gibi çözünebilir kayalarla reaksiyona girerek çözünebilir bir bileşik olan kalsiyum bikarbonatı [$Ca(HCO_3)_2$] oluşturmaktadır (Auler, 2013; White, 2015).

Bu reaksiyon sonucunda kalsiyum ve bikarbonat iyonları kireçtaşından uzaklaşarak kireçtaşının çözünmesine neden olmaktadır (Şekil 1.2a). Zamanla, kireçtaşı gibi çözünebilir

kayaların çözünmesi, dolinler, mağaralar ve yeraltı drenajları dahil olmak üzere çeşitli karstik yer şekillerinin oluşumuna yol açmaktadır (Şekil 1.2b) (Ford & Williams, 2007; Fairchild ve Baker, 2012; De Waele, 2022). Bu yer şekilleri, genellikle benzersiz jeolojik ve hidrolojik süreçlerle karakterize edilmektedir.

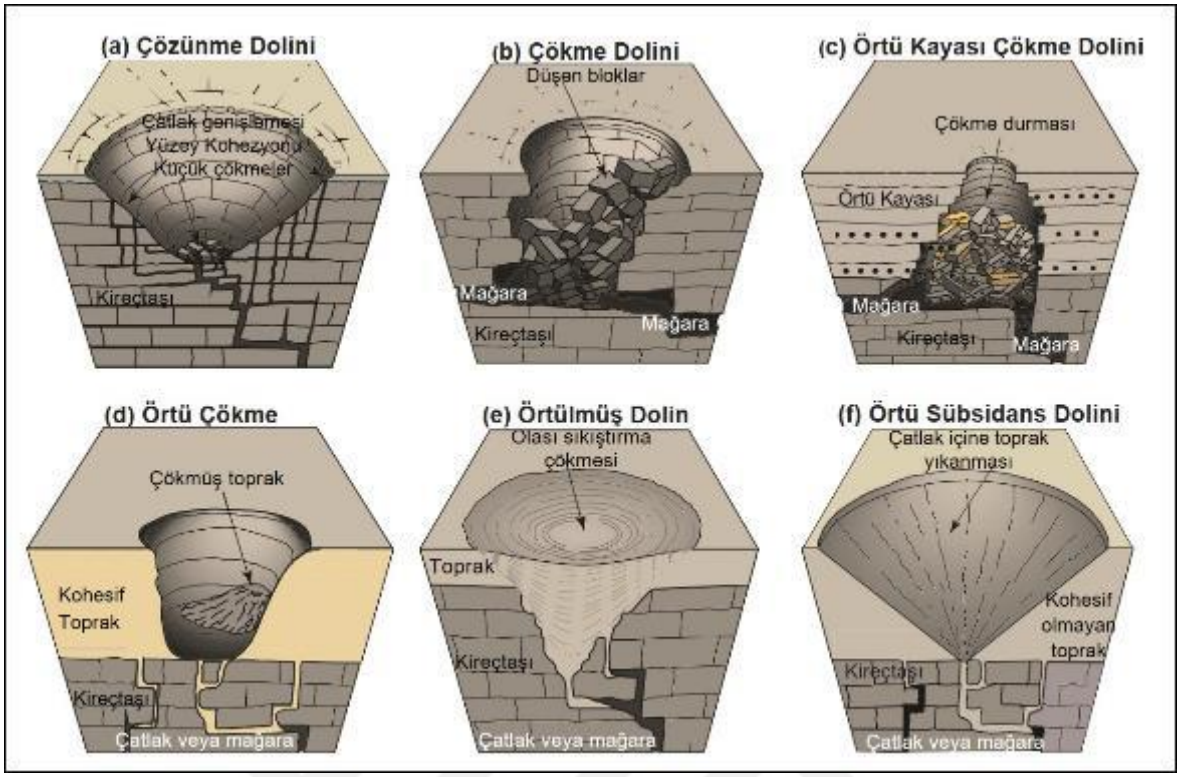


Şekil 1.2. a) Ormanlık karst ortamında "karbondioksit (CO_2) çağlayanı" (B.C. Ministry of Forests, 1997'den değiştirilmiştir), b) Karst sisteminin tipik özellikleri (Runkel vd., 2003'ten değiştirilmiştir).

Dolinler; kireçtaşı, dolomit, jips, anhidrit ve halit gibi çözünebilir kayaçlarda gelişen yüzey çöküntüleridir (Siska vd., 2016). Genellikle dairesel/konik şekilli olan, çapları ve derinlikleri birkaç metreden bir kilometreye kadar değişebilen dolinlere karstik bölgelerde oldukça sık rastlanmaktadır (Veress, 2016; Öztürk, 2018; Listyani & Ridayati, 2022). Dolinlerin oluşumunu; kireçtaşı ana kayası ile yeraltısuyu arasındaki etkileşim nedeniyle oluşan çözünme sonucu meydana gelen büyük deformasyonlar, toprak katmanlarının gevşemesi, kireçtaşı ana kayanın çözünmesi, su çekilmeleri, patlatmalar, topraktaki gerilmeler, kontrolsüz ve açık kanalizasyon ağları ve su boru hatlarındaki sızıntılar gibi tetikleyen, birçok olası neden vardır (Rawal, 2016). Kökenlerine göre dolinler; çözünme, çökme, örtü kayası çökmesi, örtü çökme, örtülmüş ve alüvyal (örtü sübsitans) dolinler olmak üzere farklı sınıflara ayrılmıştır (Doğan, 2004; Waltham & Fookes, 2003; Williams & Ziegler, 2014; Veress, 2016; Kranjc, 2013; Öztürk, 2018) (Şekil 1.3). Çözünme dolinleri (Şekil 1.3a), kireçtaşı ana kayasının yeraltısuları tarafından çözülmesiyle oluşmaktadır. İlk başta küçük çöküntülere ve zamanla tüm toprak-kaya katmanlarının çökmesine neden

olmaktadır. Çökme dolinleri (Şekil 1.3b), büyük veya küçük bir mağaranın üzerindeki kireçtaşı tavanının ani veya aşamalı olarak yıkılması ve çökmesiyle oluşmaktadır (Thomas 1974; Waltham & Fookes, 2003). Örtü kayası çökme dolinleri (Şekil 1.3c), alttaki kireçtaşındaki karstik bir boşluk üzerinde çözünmeyen bir örtü kayasının altının oyulması ve çökmesi ile oluşmaktadır. Bu dolinler yalnızca gömülü kireçtaşı içindeki büyük mağaraların bulunduğu paleokarst veya katmanlar arasındaki karst arazilerinde meydana gelmektedir. Örtü çökme dolinleri (Şekil 1.3d), kohesif (birbirine bağlı) toprak örtüsünde, sızan yağmur suyunun toprağı alttaki kireçtaşındaki sabit çatlaklara ve mağaralara sürüklediği yerlerde oluşmaktadır. Bu toprak, altındaki kireçtaşı çatlaklarına sürüklenirken yavaşça genişleyen ve yukarı doğru duran bir boşluğun tavanının hızlı bir şekilde çökmesine neden olmaktadır. Örtülmüş dolinler (Şekil 1.3e), eski çözünme veya çökme dolinlerinin toprak, moloz veya tortu ile dolduğu yerlerde oluşurlar. Daha sonra toprak dolgusunun sıkışması nedeniyle yüzey çökmesi meydana gelebilir. Alüvyal dolinler (örtü sübsidans) (Şekil 1.3f), kohesif olmayan toprak örtüsünde, süzülen yağmur suyunun toprağı alttaki kireçtaşındaki sabit çatlakları ve mağaraları yıkadığı yerlerde oluşur.

Genellikle çevre, altyapı, insan ve diğer canlıların yaşamı için önemli bir tehdit oluşturan dolinler, potansiyel jeolojik tehlikeler olarak bilinmektedir (Siska vd., 2016; Farfour vd., 2022). Dolayısıyla bu gibi karstik oluşumların yerlerinin ve uzanımlarının önceden belirlenmesi büyük önem arz etmektedir.



Şekil 1.3. Dolin tipleri. a) Çözünme dolini, b) Çökme dolini, c) Örtü kayası çökme dolini, d) Örtü çökme dolini, e) Örtülmüş dolin, f) Örtü sübsidans dolini (Waltham & Fookes, 2003; McCraw & Land, 2016; Öztürk, 2018' ten düzenlenmiştir).

Barındırdığı canlı ve cansız varlıkları ile büyük bir ekosistem oluşturan ve insanların sosyo-ekonomik faaliyetleri ile ilişkili mağara; en az bir insanın sürünerek girebileceği büyüklükteki doğal bir yeraltı açıklığı olarak tanımlanmaktadır (Ford & Williams, 2007). Oluşumları milyonlarca yıl sürebilen bu mağaralar; tektonizma, atmosferik etkiler, suların aşındırması, kimyasal süreçler ve mikroorganizma faaliyetleri gibi çeşitli faktörler sonucunda gelişmektedir (Balkaya vd., 2012). Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde (Culver & White, 2005; Klimchouk vd., 2006; Ford & Williams, 2007; Oberender & Plan, 2013; Bella & Gaal, 2013; Oberender & Plan, 2018; Mylroie, 2019), mağaraların genellikle oluşumlarına, gelişimlerine, fiziko-kimyasal yapılarına, derinliklerini ve örtü kalınlıklarına vb. göre çeşitli sınıflara ayrılmaktadırlar. Mağaralar, yapay ve doğal yollarla oluşabilmektedir. Yapay mağaralar genellikle barınma, korunma, depolama ve maden çıkarmak için insanlar tarafından yapılan mağaralardır (Nazik, 2004; Dönmez, 2006). Doğal mağaralar ise, çözülebilir kayaçların (kireçtaşı, jips, dolomit ve mermer) doğal süreçlere bağlı aşınmalarıyla oluşmaktadır. Bu kayaçlar, yatak düzlemlerinden, faylardan, eklemlerden ve düzensiz geçitlerden sızan yeraltısularındaki doğal asitler tarafından

çözünerek büyük boşluklar meydana getirir ve çözünme mağaralarını oluştururlar (Davies & Morgan, 1990).

Karstik oluşumların gelişim derecesi hakkında bilgi sağlamak için günümüzde jeolojik, hidrolojik ve jeomorfolojik yaklaşımlar kullanılarak yüzeysel çalışmalar yapılmaktadır (Taylor & Greene, 2008). Ancak bu yaklaşımlar, karstik oluşumların iç yapısı hakkında tam anlamıyla bilgi verememekte, aynı zamanda yürütülen çalışmalar esnasında yapılabilecek dolgu, sondaj ve kazı çalışmaları araştırılan ortama zarar verilebilmektedir. Karstik alanlara herhangi bir zarar vermeksizin bu alanların daha iyi anlaşılabilmesi için bu oluşumların yer altındaki konumunu, uzanımını ve yayılımını belirlemek için yüzeyden uygulanan ve hasarsız (non-destructive) jeofiziksel yöntemleri kullanmak başarılı sonuçlar ortaya çıkarmaktadır (Fitterman & Stewart, 1986; Connor & Sandberg, 2001; Gary vd., 2013; Shah vd., 2008; Smith vd., 2005; Blome vd., 2008; Chalikakis, 2011; Saribudak, 2015; Saribudak, 2016; Saribudak & Hauwert, 2017; Drahor, 2019; Farfour vd., 2022).

Karstik aramalarda jeofizik yaklaşımlardan; Elektrik Özdirenç Tomografi [*Electrical Resistivity Tomography (ERT)]*, Doğal Potansiyel [*Self Potential (SP*)], Sismik Kırılma [*Seismic Refraction Tomography (SRT)*], Yüzey Dalgalarının Çok Kanallı Analiz Yöntemi (*Multichannel Analysis Surface Waves (MASW*)] ve Yer Radarı [*Ground Penetrating Radar (GPR)*] vb. gibi yöntemler, etkin bir şekilde kullanılmaktadır (Chalikakis, 2011; Baggett vd., 2020; Farfour vd., 2022). Her jeofizik yöntemin kendine özgü güçlü yönleri ve sınırlamaları bulunmaktadır. Sadece bir jeofizik yöntemle yürütülen çalışmanın yorumlama belirsizliğini azaltmak için karstik özellikleri tespit etmek için birden fazla jeofizik yöntem bir arada kullanılmalıdır. Böylece bütünleşik jeofizik yöntem sonuçları, farklı yöntemlerin tespit derinliğini, doğruluğunu ve belirti (anomaly) tespitini etkili bir şekilde tamamlayabilmektedir. Bütünleşik jeofizik yöntemlerin kullanılmasıyla, her bir yöntemin avantajlarından tam olarak yararlanılabilmekte ve her bir yöntemin eksiklikleri telafi edilmektedir. Bu birleştirme işlemi, yöntem sonuçlarının doğruluğunu ve güvenilirliğini artırmaktadır.

Bu çalışma, Trabzon ili Düzköy ilçesine bağlı Çalköy/Çayırbağı ve Çal Mağarası civarındaki hakim olan Şahinkaya kireçtaşlarında gerçekleştirilmiştir. Şahinkaya kireçtaşlarının jeolojisi, stratigrafisi ve kısmen hidrojeolojik özellikleri günümüze kadar Ofluoğlu (1993), Korkmaz (1993), Ayaz (1995), İnan vd. (1999), Hippolyte vd. (2015), Köroğlu (2018), Türk-Öz & Özyurt (2018), Köroğlu & Kandemir (2019a, b), Consorti & Köroğlu (2019) ve Consorti vd. (2020) tarafından yapılan çalışmalarda açığa çıkarılmıştır.

Ancak bu jeolojik çalışmaların yanında, Şahinkaya kireçtaşlarının iç yapısal özellikleri, dolinleri, karstik boşlukları ve yer altı su varlığını belirlemeye yönelik herhangi bir jeofiziksel çalışma günümüze kadar yapılmamıştır. Bu çalışma ile bütünleşik jeofiziksel yaklaşımlar; *ERT, SP, SRT, MASW* ve *GPR* kullanılarak Şahinkaya Üyesi'nin iç yapısal özellikleri ortaya çıkarılmıştır. Ayrıca, elde edilen tüm jeofiziksel sonuçlar üzerinden, karstik alan araştırmalarında kullanılan farklı jeofiziksel yöntemin öncelik ve etkin kullanım sıralamasının tespiti yapılmıştır. Son olarak Çal Mağarası içinde akmakta olan nehri beslediği düşünülen, beslenme alanı (Törk vd., 2013) üzerinde belirlenen yüzey sularından ve Çal Mağarası içerisinden akmakta olan nehrin farklı yerlerindeki sudan, yağışlı ve kurak dönemlerde su örnekleri toplanarak analiz edilmiştir. Böylelikle suyun fiziko-kimyasal özelliklerine bakılarak suyun kalitesi açığa çıkarılmış, su kimyasındaki değişimler ile suyun geçtiği kayaçlar veya dolin sistemleri arasında nasıl bir etkileşim olduğu belirlenmeye çalışılmıştır. Ayrıca, Ofluoğlu (1993) tarafından Çal Mağarası içerisinden alınan su örneklerine ait analiz sonuçları ile bu tez çalışması kapsamında toplanan su örneklerine ait analiz sonuçlarının korelasyonu ile 29 yıllık değişim ortaya konulmuştur.

1.2. Literatür Özeti

İnceleme alanında hakim olan Şahinkaya kireçtaşları, Bulguroğlu (1991) tarafından ilk kez "Düzköy-Çayırbağı (Trabzon) Yöresinin Jeolojik İncelemesi" başlıklı çalışmasında Şahinkaya formasyonu olarak tanımlanarak; bu formasyonun dağılımı, litolojik, paleontolojik ve mikrofasiyes özellikleri incelenmiştir. Bu çalışmasında Bulguroğlu (1991), Şahinkaya formasyonunu oluşturan kireçtaşlarının, Üst Kretase yaşlı resifal kireçtaşı olduğunu belirtmiştir.

"Tonya-Düzköy (GB Trabzon) Yöresinin Stratigrafisi" başlıklı çalışmasında Korkmaz (1993), Tonya Formasyonu'nu litolojik, paleontolojik ve sedimantolojik özellikleri yönünden inceleyerek, bu formasyonun derin denizel bir ortamda çökeldiğini ancak araştırılan alanının orta kısımlarında kalan bölgede Şahinkaya Üyesi'ni meydana getiren resifal kireçtaşlarından oluştuğunu belirtmiştir. Korkmaz (1993), Şahinkaya Üyesi'nin; masif, yer yer kalın tabakalanmalı, rudistli kireçtaşlarından meydana geldiğini vurgulayarak üyenin tabanının kırmızımsı renkli ve kumlu kireçtaşlarından oluştuğunu ifade etmiştir.

Ofluoğlu (1993), "Çalköy-Alazlı (Düzköy-Trabzon) yöresinin karstlaşma yönünden incelenmesi'' başlıklı yüksek lisans çalışmasında; Çalköy-Alazlı yöresindeki karstlaşmanın,

karstlaşma sonucunda oluşan yapıların özelliklerini ve karstlaşma nedenlerini açığa çıkarmayı amaçlamıştır. Karstik oluşumların yöredeki tektonizmaya bağlı olduğunu belirterek, karstlaşma sonucunda, Şahinkaya Üyesi'nde gelişen, çapları 4-55 m arasında değişen dolinlerin ve karstik boşlukların ve Çal Mağarası içinden akan bir yeraltı nehri olduğunu vurgulamıştır.

Ayaz (1995), "Üst Kretase Yaşlı Şahinkaya Kireçtaşının (Düzköy-Trabzon) Mikrofasiyes İncelemesi'' başlıklı çalışmada, Üst Kretase (Maastrihtiyen) yaşlı Şahinkaya kireçtaşının; yapı-doku, fosil içeriği, yayılımı ve fasiyes özelliklerini inceleyerek bu kireçtaşlarının muhtemelen resif önü bir ortamda çökeldiğini belirtmiştir.

İnan vd. (1999), yaptıkları çalışmada Tonya Formasyonu'nun Şahinkaya Üyesi'nin tip kesit yerinin Korkmaz (1993)'de gösterilen alanda yanlış olduğunu ileri sürerek başka bir ölçülü stratigrafik kesit almışlardır. İnan vd. (1999)'nin çalışmasında birimin litolojik özellikleri benzerlik göstermesine rağmen, yaşı Maastrihtiyen-Tanesiyen olarak belirtilmiştir. Bu çalışmada ayrıca Şahinkaya Üyesi'nin fosil topluluğu ayrıntılı şekilde tanımlanarak, sığ denizel-resifal bir ortamda depolandığı vurgulanmıştır.

"Çal Mağarası (Trabzon, Düzköy) Araştırma Raporu'' çalışmalarında Törk vd. (2013) Trabzon ili Düzköy ilçesine bağlı Çalköy'ün yaklaşık 1 km batısında yer alan Mağaratașı Tepe'nin doğu yamacının 1132 m kotunda yer alan Çal Mağarası'nın toplam uzunluğunun 1010 m olduğunu, kollarının ikiye ayrıldığını, ana kolun girişe göre 42 m yukarıda bulunduğunu ifade etmiştir. Ayrıca mağaranın genel gelişim doğrultusunun KD-GB yönünde olduğunu belirterek Çal Mağarası plan ve kesitini çıkarmıştır.

Köroğlu (2018), "Çayırbağı-Çalköy (Düzköy-Trabzon) Yöresindeki Şahinkaya Üyesi'nin Stratigrafik, Mikropaleontolojik ve Sedimantolojik İncelenmesi'' başlıklı çalışmasında, Çayırbağı-Çalköy yöresinde yer alan neritik karbonatların; yayılım, kalınlık, kayaç türü, çökel yapı-doku ilişkileri, mikro karakteristikleri, fosil içerikleri ile biyostratigrafik verilerini belirlemek amacıyla birimi yansıtacak üç adet ölçülü stratigrafik kesit almıştır. Stratigrafik kesitleri inceleyerek Şahinkaya Üyesi'nin tabandan başlayarak; kalın tabakalı, kumlu, litoklastlı ve biyoklastlı bileşenlerden oluştuğunu ve üyenin kalınlığının yaklaşık 100 m olduğunu vurgulamıştır.

Consorti & Köroğlu (2019), yapmış oldukları çalışmada Çalköy kesitinde gözlemledikleri bazı foraminiferlerin paleoortamsal dağılımını tartışmışlardır. Şahinkaya Üyesi'nin stratigrafisi ve bazı bentik foraminiferlerin paleo-çevresel dağılımının, Doğu

Pontidler'in diğer bölgelerinin aksine, Paleosen çökelmesinin devam ettiğini ancak yine de bölgesel tektonizmadan etkilendiğini göstermişlerdir.

Zhou vd. (2000) Amerika'daki Indiana eyaletinin güneyinde bulunan, kireçtaşının killi toprakla kaplı olduğu bir bölgedeki ana kaya yüzeyini, *ERT* yöntemini ile belirleyebilmek için bir çalışma yürütmüşlerdir. Bu çalışma ile elde edilen *ERT* görüntülerinden ana kaya yüzeyini başarılı bir şekilde tespit etmişlerdir. Ayrıca görüntülerde, kireçtaşı yüzeyinde oluklar gözlemişler ve bu olukların bir dolin havzasını gösterdiğini vurgulamışlardır.

McGrath vd. (2002)'de yapmış oldukları çalışmada; İngiltere, Güney Wales, Bridgend yakınlarındaki Karbonifer Kireçtaşlarında bütünleşik jeofizik yöntemlerden *ERT* ve mikrogravite yöntemlerini kullanarak bölgedeki yeraltı mağara sistemlerini belirlemeyi amaçlamışlardır. McGrath vd. (2002) çalışmaları sonucunda doğal mağara oluşumlarının yerlerini başarılı bir şekilde belirlemişlerdir.

El-Qady vd. (2005) Mısır'ın Kahire ilinin doğusunda bulunan kireçtaşının hakim olduğu bir alanda, kentsel yerleşimler için tehlike oluşturan mağaraların ve dolinlerin yerlerini belirlemek amacıyla yapmış oldukları çalışmada *ERT* ve GPR yöntemi kullanmışlardır. Yapılan bu çalışma sonucunda yaklaşık iki metre derinlik ve 4 m genişlikte bir mağara tespit etmişlerdir. Ayrıca marn ve kırıklı kireçtaşı zonları ve bazı karstik özellikleri başarılı bir şekilde haritalamışlardır.

Kaufmann vd. (2009) Kuzey Almanya'daki Goslar şehri yakınında Jerstedter Bach deresinin yanında yaptıkları çalışmada, 2006 yılında kireçtaşları içerisinde gelişen obruğun büyüklüğünü ve olası evrimini belirlemek amacıyla obruğun çevresinde jeofizik çalışmalar yapmışlardır. Elde edilen jeofizik çalışma sonuçları incelendiğinde, obruk üzerinde negatif Bouguer anomalisinin gözlenmesi aşağı yönde daha fazla boşluk olduğunu, elektrik özdirenç araştırmaları ise küçük derenin yirminci yüzyıldaki kültürel toprak reformu sırasında düzleştirilen eski kıvrımlı güzergahını belirlemeye yardımcı olmuştur.

Andrej vd. (2012) Slovenya Dıvaska mağarasının elektrik özdirenç yöntemiyle görüntülenmesi başlıklı çalışmalarında, mağara geçitlerini belirlemeyi amaçlamışlardır. Bu çalışma sonucunda, tortu ile dolu olmayan mağara geçitlerini *ERT* yöntemiyle tespit edememişlerdir. Çünkü boşluklar ve çok yüksek özdirençli anakaya arasındaki elektrik özdirenç farkı çok küçüktür. Ancak, tortul malzeme ile dolu olan mağara geçitleri daha az özdirençli karbonatlı ana kayalardan açıkça ayırt edilmiştir.

Abdallatif vd. (2014) Suudi Arabistan Krallığı'ndaki kireçtaşlarının hakim olduğu Al-Hassa bölgesindeki yapılar üzerinde tehlikeli etkilere yol açma eğilimine neden olan

kireçtaşı ana kayasındaki boşlukların ve dolinlerin belirlenmesi için bir çalışma yürütmüşlerdir. Bu çalışmada *ERT* ve *GPR* yöntemleri kullanmışlardır. Çalışma sonucunda zemin seviyesinden 4 m aşağıya kadar olan boşluklar *GPR* yöntemi ile iyi bir şekilde tespit edilirken, 4 metreden daha derinde olan boşluklar *ERT* yöntemiyle daha ayrıntılı bir şekilde tespit edilmiştir.

Drahor (2019) Türkiye'nin Sivas ilçesindeki jipsli karstlaşmış alanın genel karakterizasyonun, geometrisi ve sedimanter örtünün belirlenmesi amacıyla *ERT* yöntemini kullanmıştır. *ERT* çalışmaları sonucunda, Hafik ve Zara ilçeleri arasında büyük ve eski karstik yapıların olduğu belirterek, örtü ve anakaya tipi göçme dolinlerin alan boyunca yayılmış olduklarını ve geometrilerinin farklı olduklarını belirlemiştir. Drahor (2019) bu çalışmasıyla bölgedeki jipslerin çeşitli karstlaşma tiplerini net bir şekilde belirleyerek ayrıntılı bir jeolojik modelin oluşturulmasına katkıda bulunmuştur.

Fatma vd. (2020) Cezayir'de karstik bir bölge olan, güneydoğu Setif'in El Ouldja kenti yakınlarında yapmış oldukları *ERT* çalışmalarında, kuvaterner kireçtaşının çözünmesiyle oluşan bir obruğun çevresinde, gözle görülemeyen başka obrukların olup olmadığını araştırmışlardır. Bu çalışmaları sonucunda, inceleme alanında hakim olan Kuvaterner yaşlı alüvyonun altında gelişen karstik boşlukların varlığını ortaya çıkarmışlardır.

Batayneh vd. (2002) Ürdün, Hhor al Haditha bölgesindeki bulunan gömülü obrukların yerlerini tespit etmek için *GPR* yöntemini kullanmışlardır. Doğu Ölü Deniz kıyı şeridi boyunca yapılan *GPR* çalışmaları sonucunda, olası içi dolu dolinleri işaret eden çukur benzeri radar yansıma kesitleri elde etmişlerdir.

Leucci vd. (2006) jeolojik birim olarak karstik bir arazi üzerinde MÖ 1500'lü yılların başlarında inşa edilen Chiesa Matrice kilisenin zayıflayan zemininin güvenliğini sağlamak amacıyla restorasyon çalışması yapmışlardır. Bu çalışma esnasında kilisenin zeminindeki boşlukların ve olası çatlakların varlığını belirlemek amacıyla *GPR* ve *ERT* yöntemlerini kullanmışlardır. Elde edilen GPR kesitlerinde, elektromanyetik enerjinin, zemini dolduran suyun varlığından dolayı zayıflamış olmasına rağmen, boşlukların ve kırıkların yerleri başarılı bir şekilde tespit etmişlerdir. Yapmış oldukları *ERT* çalışmaları sonucunda özdirencin çok düşük olması zemindeki suyun varlığını doğrulamıştır.

Pueyo-Anchuela vd. (2009)'da İspanya Zaragoza şehrini çevreleyen alanlardaki karstik tehlike bölgelerinin yerini tespit etmek amacıyla *GPR* yöntemi kullanmışlardır. Elde ettikleri GPR kesitlerinde bulunan farklı yansıma olaylarının, araştırılan alandaki karstik yapıları gösterdiğini belirtmişlerdir.

Delle Rose & Leucci (2010) yılında İtalya'nın Casalabate şehrinde kentsel bir ortamda çökebilecek ve bir obruk oluşturabilecek boşlukları tespit etmek için sondaj uygulaması, hava fotoğraflarının yorumu, *ERT* ve *GPR* yöntemlerini içeren bir çalışma yapmışlardır. Bu yöntemler sonucunda çalışma alanının altındaki başlıca karstik yapıların yerini belirleyerek, jeolojik tehlike bölgesini belirlemişlerdir.

Şeren vd. (2012) Türkiye'nin kuzeydoğusundaki Gümüşhane ilinin en önemli turizm merkezlerinden biri olan Karaca Mağarası'nın olası uzantılarını belirlemek amacıyla bir çalışma yürütmüşlerdir. Bu çalışmada kireçtaşı içerisinde bulunan mağara sisteminin mekânsal dağılımını ve uzantısını belirlemek için jeofizik yöntemlerden yer radarı, elektrik özdirenç tomografi ve sismik kırılma tomografi çalışmalarını uygulamışlardır. Çalışma sonucunda sismik ve özdirenç tomografi kesitlerinde ana kayaya göre düşük hız ve yüksek özdirenç alanlarının yanı sıra yer radarı kesitlerinde farklı derinlik ve boyutlardaki hiperbolik yansımaların Karaca Mağarası'nın olası uzantılarına işaret edebileceğini belirtmişlerdir.

Rodriguez vd. (2014), İspanya'nın Zaragoza şehrindeki obrukların sınırlarının yer radarı yöntemiyle güvenilebilir bir şekilde haritalanması için yaptıkları çalışma sonucunda, elde ettikleri *GPR* kesitlerindeki yansımalardan; obrukların sınırlarının başarılı bir şekilde haritalanmasını, iç geometrilerinin karakterize edilmesini, çökme mekanizmalarının anlaşılmasını ve çökme büyüklüklerinin tahmin edilmesini sağlamışlardır.

Tuzer (2015), ''Yer radarı ile karstik boşluk araştırmaları'' başlıklı çalışmasında Türkiye, Konya ilinin Ilgın ilçesinde karstik boşlukların araştırılmasına yönelik araştırmalar yapmıştır. 100 MHz' lik merkez frekansa sahip anten kullanarak toplanan veriler yorumlanarak, boşluklu, çatlaklı ve deformasyonlu bölgeler başarılı bir şekilde belirlenmiştir.

Gosar & Ceru (2016) Slovenya'daki Kanin dağında bulunan ve zamanla bir çığ düşmesi sonucunda enkaz altında gömülen mağarayı kazıp kurtarmak için, mağara ağzı konumunun belirlenmesi amacıyla bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada, mağara ağzı girişini belirlemek için yer radarı yöntemini uygulamışlardır. Elde edilen yer radarı kesitlerinde, enkaz altındaki küçük bir çöküntü net bir şekilde görüntülenmiştir. *GPR* kesitlerinin yorumlanması sonucunda kazı için kesin konum belirlenerek, enkazın kalınlığı 6.5-7 m olarak değerlendirilmiştir.

Pandey vd. (2019), Hindistan'ın Hyderabad kentindeki Secunderabad-Patny yolunda oluşan obrukların kanalizasyon borusundaki herhangi bir sızıntıdan kaynaklanıp kaynaklanmadığını belirlemek için *GPR* çalışması yapmışlardır. Üç boyutlu görüntü elde

etmek için GPR profilleri yola paralel ve dik olarak almışlardır. Elde edilen *GPR* kesitlerinde yeraltındaki boşluklar, gevşek toprak ve kanalizasyon boru hattının konumları belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlarda kanalizasyon borusunda herhangi bir sızıntının olmadığı, ancak bir su boru hattının zarar gördüğünü göstermiştir.

Hussain vd. (2020), Brezilya'nın Mambai kentindeki Rio Vermelho mevkisinde karstik sistemler üzerinde yürüttükleri jeofizik çalışmada, bölgedeki karstik boşlukları, obrukları ve su sızma yollarını belirlemeyi amaçlamışlardır. Çalışma alanı, kireçtaşlarının yüzeylenme gösterdiği, sınırlı veya hiç toprak ve bitki örtüsünün olmadığı ve içerisinde sığ mağaraların bulunduğu bir bölgeyi içermektedir. Bu çalışma sonucunda, *ERT* kesitleri incelenerek mağara ve kırıkların yerleri, yer radarı kesitleri incelendiğinde ise farklı kaya birimleri arasındaki ara yüzeyler belirgin bir şekilde belirlenmiştir. Ancak yüksek iletkenliğe sahip toprak örtüsü nedeniyle elektromanyetik dalgalar sönümlendiği için yer radarı kesitlerinden mağaraların varlığı tespit edilememiştir.

Sheehan vd. (2005), Amerika Bileşik Devletleri Oak Ridge Rezervation bölgesi üzerindeki bir alanda, sismik kırılma tomografi yönteminin yeraltı hız yapıları üzerindeki etkinliğini araştırmak ve özellikle yöntemin karstik problemler için uygunluğunu belirlemek amacıyla bir çalışma yürütmüşlerdir. Bu çalışma sonucunda, kırılma tomografisinin uygun koşullar altında karst özelliklerini çözebildiği gösterilmiştir. Üç paralel sismik hat üzerinden elde ettikleri kesitlerde düşük hız bölgelerine rastlanmıştır. Bu bölgelerin benzer derinliklerde yer alması ve jeolojik doğrultuya paralel olması olası bir karst kanalı yorumuna yol açmıştır.

Ugwu & Nwankwoala (2008), Nijerya'nın Calabar eyaletinde yer alan Benin Formasyonu üzerinde sismik kırılma çalışma yapmışlardır. Yapılan sismik kırılma araştırması sonuçlarına göre, akiferli bölgenin Vp hızının 700-800 m/s, akifer olmayan bölgenin ise Vp hızının 400-600 m/s arasında değiştiğini belirlenmiştir. Akiferli bölgedeki hız değerinin daha yüksek olmasının nedeni su taşıyan kumdaki yoğunluk değerinin daha fazla olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Parker vd. (2012), Amerika Birleşik Devletlerinin güneyinde bulunan Georgia şehrinin Albany ilçesinde bulunan karstik bir arazideki anakaya topografyasını haritalamak, toprak örtüsündeki yanal ve düşey heterojenliği tespit etmek için *MASW* yöntemini kullanmışlardır. Yapılan bu çalışma sonucunda ayrışmış anakaya bölgesi haritalanmıştır.

Moustafa vd. (2012), Suudi Arabistan'da bir baraj sahası altındaki yer altı su sızıntısının kaynağını ve yayılımını belirlemek amacıyla sismik kırılma ve elektrik özdirenç

yöntemlerini uygulamışlardır. Elde edilen sismik kırılma kesitlerindeki hız değerleri, yer altının dört farklı sismik katmana ayrıldığını göstermiştir. Bu katmanlar, yüzeyden derine doğru sırasıyla; masif olmayan alüvyon, sıkıştırılmış alüvyon, kırıklı katman, masif ana kayadır. Ayrıca gömülü yapısal kanallar şeklinde uzanan iki çöküntünün faylanmadan kaynaklandığını göstermektedir. Bu çöküntüler, yeraltı su akışı için uygun bir yolu temsil ettiği şeklinde yorumlanmıştır.

Osumeje & Kudamnya (2014), Nijerya'nın Zaria şehrindeki Ahmedu Bello Üniversitesi'nin kampüsü altındaki yeraltısuyu potansiyel yapısını haritalamak için sismik kırılma tomografi yöntemi kullanmışlardır. Elde edilen sonuçlardan, Vp dalga hızındaki değişimler yer altındaki kaya dağılımı hakkında bilgi sağlamıştır. Ayrıca, yeraltısuyunu destekleyebilecek yapıların varlığını ve dolayısıyla yeraltı su potansiyelinin belirlenebileceğini vurgulamışlardır.

Imposa vd. (2018), Güneydoğu Sicilya'da bulunan en önemli arkeolojik alanlardan biri olan Cava Ispica'nın kuzey kesiminde yer alan bir alanda, moloz malzemeleri ile tamamen doldurulmuş antropojenik gömülü boşlukların varlığını araştırmışlardır. Üç boyutlu sismik kırılma tomografi verilerindeki düşük Vp hız alanları (<400 m/s), olası boşlukların varlığını ortaya çıkarmıştır.

Varnavina vd. (2019), Missouri'nin GB'sındaki karstik arazide bulunan bir depolama sahasının genişletilmesinin uygun olup olmadığının belirlenmesi için bir çalışma yürütmüşlerdir. *ERT, MASW* ve sondaj verileri, depolama sahası için potansiyel tehdit oluşturabilecek herhangi bir karstik özelliği belirlemek ve çalışma alanına yakın bir dereye giden yeraltısuyunun olası akış yolunun elde edilmesini sağlamak amacıyla toplanmıştır.

Stevanovic & Dragisic (1998), Doğu Sırbistan'ın Karpat-Balkan silsilesindeki, Jura ve Kretase karbonat kayalarından oluşan Kucaj dağ masifinde bulunan karstik bir akiferin, daha büyük bir bölgenin su temini için düzenlenmesi amacıyla hidrojeolojik araştırmalar gerçekleştirmişlerdir. Bu amaç kapsamında, yeraltı akışlarının aktif sirkülasyonu ile karstlaşmış bölgelerin konumunu tespit etmek için farklı jeofizik yöntemler uygulamışlardır. Özellikle SP yöntemi ile elde edilen grafiklerden sondaj/kuyuların araştırılması ve inşası için iyi sonuçlara ulaşılmıştır.

Lange (1999), Amerika Birleşik Devletleri Arizona eyaletindeki Kartchner Caverns State Park'ı üzerinde yapmış olduğu jeofizik çalışmalarla, parkın alüvyonlu bölümlerinin altındaki yapıyı haritalamak, yeraltısuyunu haritalamak ve kaya alanlarının altındaki diğer olası boşlukları karakterize etmişlerdir. *SP* araştırmaları sonucunda elde edilen *SP*

grafiklerinde, mağara odalarının olduğu yerlerde *SP* anomalileri azalım gösterirken, mağara geçitleri üzerindeki kaya duvarlarıyla ilişkili olduğu düşünülen kısımlarda pozitif yönde artan SP anomalisi başarılı bir şekilde haritalanmıştır.

Jardani (2007), Fransa'nın Normandiya bölgesi, Batı Paris havzasının Üst Kretase kireçtaşında bulunan dolin ve örtülü dolinlerin yerlerini tespit etmek amacıyla *SP* ve EM iletkenlik yöntemlerini kullanmışlardır. Bu araştırmacılar yapmış oldukları bu çalışmada, dolinlerin birkaç milivoltluk negatif doğal potansiyel anomalilerle ilişkili olduğunu ifade etmişlerdir.

Robert vd. (2011), Belçika'nın Valon bölgesi Dinant Synclinorium'un karbonat kayalarında yapmış oldukları çalışmada, hidrojeolojik verinin az olduğu bölgelerde yeni su kuyu yerleri bulmak amacıyla *SP* ve *ERT* araştırmaları yapmışlardır. Yapılan bu çalışmada, *ERT* kesitlerinin eksen uzunluğunun 320 ile 640 m aralığında, yeraltı yüzeyinin ilk 60 m'sinin özdirenç dağılımını görüntülemeye ve daha az dirençli olması beklenen kırık bölgeleri (yön, genişlik ve derinlik açısından) tespit ve karakterize etmeye izin vermiştir. *ERT* profilleri üzerinde yapılan *SP* ölçümleri sonucunda ise, akış yollarıyla ilişkili olduğu düşünülen negatif anomaliler elde etmişlerdir. Yapılan çalışma sonucunda, *SP* anomalileri ile ilişkili düşük özdirenç bölgelerine yerleştirilen tüm kuyuların çok yüksek verim sağladığı görülmüştür.

Artugyan vd. (2015), Romanya'nın Batı Karpatlar, Batı Dağlarının alt biriminde bulunan Anina Dağlarında yapmış oldukları *SP* ölçümleri ile yeraltısuyunun drenaj yönünü belirlemeyi amaçlamışlardır. *SP* ölçümlerinin ilk sonuçları, yeraltısuyu akış yönüne sahip bazı dolinlerin olduğunu ve *SP* değerlerinin yeraltısuyu akışında durgun bir eğilime işaret ettiğini gözlemledikleri karstik çöküntülerin olduğunu göstermişlerdir. Ayrıca bu çalışmada, SP ölçümleri sonuçları, su drenajının; eğimden, tektonik özelliklerden ve düden morfolojisinden etkilendiğini gösterilmektedir.

Susilo vd. (2017) yaptıkları çalışmada, Endonezya'nın Malang bölgesindeki Druju köyünde yer alan bir karst alanının yeraltısuyu akışını haritalamak için elektrik özdirenç ve doğal potansiyel yöntemi kullanmışlardır. Yapılan çalışma sonucunda düşük SP değerlerinin (-1 ile 0 mV) tespit edildiği yerlerde yeraltısuyu olduğu varsayılmıştır. Bu değerlerin elektrik özdirenç kesitindeki değerlerle örtüştüğü ve su akış yönünün güneydoğudan kuzeybatıya doğru olduğu tespit edilmiştir.

Tripathi & Fryar (2016) çalışmalarında, ABD'nin Kentucky eyaletinin Inner Bluegrass bölgesinde, Georgetown şehri için temel su kaynağı olan Royal Spring havzasını besleyen

bir ana geçidi bulmak için elektrik özdirenç ve doğal potansiyel yöntemlerini uygulamışlardır. Çalışma sonucunda, negatif bir *SP* anomalilerinin genellikle düşük bir elektrik özdirenç anomalisine denk geldiği gözlenmiştir. Bu anomalilerin su dolu geçitleri işaret ettiği düşünülmüş, ancak sonradan yapılan sondaj sırasında çamur dolu boşluklarla karşılaşıldığı için, bu anomalilerin ana geçit değil yan kolları ifade ettiği düşünülmüştür.

Saribudak & Hauwert (2017) Teksas'ta yer alan Edwards akiferinde yaptıkları araştırmalarda; jeolojik yapıyı ve stratigrafiyi haritalamak, gömülü dolinlerin ve mağaraların yerlerini tespit etmek için çeşitli jeofizik yöntemler kullanmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda, Austin bölgesindeki Edwards akiferi boyunca farklı sahalarda yürütülen çalışmalar, gömülü mağaraların ve dolinlerin konumları ile bölgedeki fay karakterizasyonlarının iki boyutlu (2B) ve üç boyutlu (3B) özdirenç ve *SP* yöntemlerinin bütünleşik kullanımı ile en iyi şekilde belirlenebileceğini göstermişlerdir.

İncelenen literatür çalışmalarında araştırılan dolin, karstik boşluk, mağara (Balkaya vd., 2012) ve yeraltısuyu akış sistemi gibi oluşumlarda biriken, yüzey/yeraltı sularının kimyasal içeriklerinin bilinmesi her açıdan önemlidir. Bu yüzey ve yeraltı sularında meydana gelen jeokimyasal süreçler su kalitesi üzerinde derin bir etkiye sahiptir. Yeraltı sularının hidrojeokimyasal bileşimi, kaynağının ve suyun temas halinde olduğu yer altı malzemelerinden geçtiğinin göstergesi olabilir. Günümüzde yeraltısuyunun hidrokimyasal karakterlerinin belirlenmesinde birçok çalışma mevcuttur (Ofluoğlu, 1993; Mutlu, 1996; Dayı, 1996; Boran & Sivri, 2001; Gültekin vd., 2005; Verep vd.,2005; Celep, 2009; Ersoy & Karagüllü, 2012; Gültekin vd., 2012; Gültekin vd., 2013; Bastam, 2014; Ersoy & Sönmez, 2014; Zeybek & Kalyoncu, 2016; Ersoy vd., 2021; Ersoy & Temizel, 2022). Bu çalışmalardan Trabzon ili içerisinde yapılanlardan birkaçı aşağıda verilmektedir.

Çalköy-Alazlı yöresindeki karstlaşmanın, karstlaşma sonucunda yapıların özelliklerini ve karstlaşma nedenlerini araştıran Ofluoğlu (1993), bu yöredeki Çal Mağarası içinden akan yeraltı nehrinin farklı noktalarından alınan su örneklerinin hidrokimyasal analizi sonucunda Ca^{+2} ve HCO^{-}_{3} iyonlarının baskın olduğunu belirleyerek suların kalsite doygun olduğunu saptamıştır.

Mutlu (1996), ‘‘Trabzon İli Akarsularındaki Bazı Fiziksel ve Kimyasal Parametrelerin Araştırılması’’ başlıklı çalışmasında, Trabzon sınırları içerisindeki onsekiz derenin denize döküldükleri yerlerden su örnekleri almıştır. Bu örneklerin; T, pH, SO_4^{2-}, NO_2^{-}, NO_3^{-}, PO_4^{3}, Cl, Cu, Pb, Hg ve As gibi fiziksel ve kimyasal parametreleri incelenmiştir. Elde edilen çıktıların ilgili standartlarla karşılaştırılması sonucu, derelerin kalite sınıflandırılması

yapılmış, ayrıca kirlilik haritası çıkarmıştır. Araştırılan parametreler açısından özellikle SO_4^{2-}, PO_4^{3-} ve NO_3^- gibi parametrelerde sürekli bir artış olduğu gözlenmiştir. Sonuç olarak, bu artışların, derelerin III. ve IV. sınıf sular olmasına neden olduğu belirtilmiştir.

Dayı (1996), ‘‘Değirmendere Havzası Yüzey Sularında Bazı İnorganik Kimyasal Parametrelerin Araştırılması’’ adlı çalışmasında, Değirmendere Havzası içindeki yüzey sularının kalitelerinin belirlenmesi için, denizden itibaren Değirmendere’nin farklı noktalarında örnekleme yapmıştır. Alınan örneklerden sıcaklık, pH, iletkenlik, bulanıklık, çözünmüş oksijen, sülfat, nitrat, fosfat ve ağır metal (Hg, Cd, Zn, CN^- ve Pb) tayini yapılmıştır. Bu tayinlerin standartlarla karşılaştırılması neticesinde, akarsuyun kirlilik düzeyinin çok düşük olduğu, fakat denize doğru ilerledikçe sülfat, nitrat, fosfat ve ağır metal değerlerinde bir artışın olduğu gözlenmiştir.

Boran & Sivri (2001), ‘‘Trabzon (Türkiye) İl Sınırları İçerisinde Bulunan Solaklı ve Sürmene Derelerinde Nütrient ve Askıda Katı Madde Yüklerinin Belirlenmesi’’ başlıklı çalışmalarında, ilkbaharda Sürmene ve Solaklı derelerinden örnekleme yaparak, nitrat, nitrit, amonyum, fosfat, oksijen, pH ve askıda katı madde değerlerini ölçmüşlerdir. Su Kirliliği Kontrolü yönetmeliğine göre bu derelerde ölçülen oksijen değerlerinin, Kıta İçi Su Kaynakları yönetmenliğindeki kaynaklarla karşılaştırıldığında, bu akarsuların yüksek kaliteli su oldukları; pH değerlerinin Solaklı Deresi’nin I. kalite, Sürmene Deresi’nin III. kalite su oldukları; nitrat ve fosfat miktarları incelendiğinde derelerin yüksek kaliteli su olduğu; nitrit ve amonyum değerleri bakımından ise bu derelerin III. kalite su sınıfında oldukları tespit edilmiştir.

Gültekin vd. (2005), ‘‘Aşağı Değirmendere (Trabzon) Havzasındaki Suların Kalitesi’’ başlıklı çalışmalarında, Değirmendere vadisindeki yüzey, yeraltı ve mineralli suların hidrokimyasal özelliklerini inceleyerek Türk Standartları ve su kirliliği kontrol yönetmeliğine göre uygun olup olmadıklarını belirlemişlerdir. Elde edilen sonuçlardan, hidrokimyasal fasiyesleri yönünden suların kalsiyum bikarbonatlı sular sınıfında olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca Değirmendere ve kollarından örneklenen suların pH, toplam çözünmüş madde miktarı (TDS), Cl^- ve miktarlarına göre değerlendirildiğinde yüksek kaliteli su sınıfında oldukları, Sümela Deresi’nin NO_2^- değerlerine göre yüksek kaliteli su olduğu, Meryemana, Galyan ve Maçka Derelerinin kirli su oldukları, Değirmendere’nin ise çok kirlenmiş su sınıfında olduğunu saptanmıştır. Son olarak, Değirmendere vadisinde bulunan yeraltı sularının ise pH, TDS, Cl^- ve SO_4^{2-}, NO_2^- değerlerine göre yüksek kaliteli su sınıfında oldukları vurgulanmıştır.

Verep vd. (2005), ‘‘İyidere (Trabzon)'nin Fiziko-Kimyasal Açıdan Su Kalitesinin Belirlenmesi’’ başlıklı çalışmasında Trabzon ve Rize illerine sınır olan İyidere'nin su kalitesini belirlemek amacıyla derenin denize birleştiği nehir ağzından 30 km iç kısımlara kadar dört farklı noktadan su örnekleri toplamışlardır. Elde edilen örneklere ait kimyasal (pH, bikarbonat, karbondioksit, biyokimyasal oksijen ihtiyacı, kalsiyum, magnezyum, toplam sertlik, nitrit, amonyum, fosfat, askıda katı madde ve alkalinite) ve fiziksel özellikler (akış hızı, su sıcaklığı, suda çözünmüş oksijen, suda çözünmüş oksijen doygunluğu, elektriksel iletkenlik ve tuzluluk) ölçüldükten sonra, tüm özelliklerin, Su Kirliliği Mevzuatında bildirilen kıta içi su kalite standartlarına göre değerlendirildiğinde yüksek kaliteli su sınıfında olduğu tespit edilmiştir.

Celep (2009), ‘‘Trabzon İli Yer Altı ve Yerüstü Sularının Hidrojeolojik, Hidrojeokimyasal İncelemesi ve Su Kalitesinin İzlenmesi’’ başlıklı çalışmasında, Trabzon il sınırlarını kapsayan çalışma alanında, mevcut yeraltı ve yerüstü sularının kalitesinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda çalışma alanındaki yeraltı ve yüzey sularının hidrojeolojik, hidrokimyasal özellikleri ve su kalitesi belirlenmiştir. Tüm sular Su Kirliliği Kontrol Yönetmeliğine göre değerlendirildiğinde, I. sınıf sular sınıfında yer alırken, yüzey sularında genellikle Cu, Pb, Ni, Al, Mn, NO_2^-, NH_4^+, PO_4^{3-}, CN^- ve kimyasal oksijen ihtiyacı (KOI) parametreleri, yeraltı sularında ise genellikle Cu. Ni, NO_2^-, PO_4^{3-}, CN^- parametreleri açısından II. Sınıf, III. Sınıf ve IV. Sınıf sular sınıfında bulunduğu belirlenmiştir.

Ersoy & Karagüllü (2012) ‘‘Söğütlü Deresi (Trabzon) Su Kalitesi Parametrelerinin Coğrafi Bilgi Sistemleri Kullanılarak Değerlendirilmesi’’ başlıklı çalışmalarında, Trabzon ili Söğütlü Deresi ve yan kollarında farklı yerlerden su örnekleri alarak, bu suların hidrokimyasal özelliklerini belirlemeyi ve konumsal analiz teknikleri uygulayarak havza su kalitesi parametreleri açısından sınıflandırmayı amaçlamışlardır. Örneklenen tüm suların pH değerlerine bakıldığında, I. Sınıf sular sınıfında olduğu, çözünmüş oksijen (DO) değerlerine bakıldığında Söğütlü deresinin kuzeye yakın kesimlerinde II., III. ve IV. Sınıf sularda olduğu değerlendirilmiştir. Ayrıca su örneklerinin bazılarının yüksek sertlikte olduğu gözlenmiştir. Bu yüksekliğin havzada yer alan kumlu kireçtaşı, kireçtaşı ve marnlarda bulunan Ca^{+2} ve Mg^{+2} iyonlarının çözünmesiyle suya geçmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Su örneklerinin iz element içerikleri açısından ise II., III. ve IV. Sınıf’ta yer aldığı ifade edilmiştir. Son olarak Söğütlü Deresi yüzey suyunda bulunan Fe, Mn, Al ve Pb parametrelerinin Kıta İçi Yüzeysel Su Kaynaklarının Sınıflarında tanımlanan sınır değerleri aştığı ifade edilmiştir.

Gültekin vd. (2012) ‘‘Trabzon İli Akarsularının Yağışlı Dönem Su Kalitesi Parametrelerinin Belirlenmesi’’ başlıklı çalışmalarında, Trabzon il sınırlarını kapsayan; Akhisar, Foldere, İskefiye, Kalanima, Sera, Beşirli, Değirmendere, İkisu, Yomra, Yanbolu, Karadere, Manahoz, Solaklı ve Baltacı Derelerininden örnekler alarak bu suların hidrokimyasal özelliklerini ve su kalitelerini belirlemişlerdir. Örneklenen suların genel olarak karbonatlı ve sülfatlı sular sınıfında ve Ca+Mg>Na+K olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, örneklenen tüm sular Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği ve Kıta İçi Su Kaynakları Kalite Kriterleri’ne göre birçok parametre açısından yüksek kaliteli sular sınıfında yer alırken, çoğunlukla Cu, Pb, Mn, NO_2^-, NH_4^+, PO_4^{3-}, CN^- ve KOI parametreleri açısından az kirlenmiş, kirlenmiş ve çok kirlenmiş su sınıfında oldukları ifade edilmiştir.

Gültekin vd. (2013), yapmış oldukları çalışmada, Solaklı Havzası'ndaki dere suyu ve yeraltısuyu kalitesindeki mekânsal değişiklikleri ve kalite ile kirlilik kaynakları arasındaki ilişkileri belirlemeyi amaçlamışlardır. Buna yönelik olarak ana anyon-katyon, kirlilik parametresi konsantrasyonu ve eser element analizlerini yapmak için yeraltı ve yüzey sularından örnekler toplanmıştır. Yapılan analizler, Türkiye Cumhuriyeti Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği, Kıta İçi Yüzey Suları Sınıflandırma Kriterleri, TS 266 ve Dünya Sağlık Örgütü (WHO) açısından değerlendirildiğinde suyun kirli veya çok kirli (Cu ve NO_2^-) ve PO_4 açısından hafif kirli olduğunu belirlenmiştir. Ayrıca genel olarak Solaklı Nehri'nin su kalitesi II. veya III. sınıf olarak değerlendirilmiştir.

Bastam (2014), ‘‘Değirmendere (Trabzon) Havzası Kaynak Sularında Su-kayaç İlişkisi’’ başlıklı çalışmasında, volkanik kayaçların yüzeylendiği Değirmendere Havzası'nda tektonik hatlarla ilişkili olarak karbondioksit ve iyon içeriği yüksek kaynakların hidrokimyasal özelliklerini ve çevre kayaçlarla olan etkileşimlerini araştırmıştır. Kaynaklar major iyon içeriklerine göre Ca-HCO_3 tipi su sınıfında olduğu belirlenmiştir. Sularda Zn, Br, Sr ve Ba elementlerinin yüksek çıkması, suların andezit, tüf, bazalt ve volkanik breş türü volkanik kayaçlardan geçtiği şeklinde değerlendirilmiştir.

Ersoy & Temizel (2022) ‘‘Karadere Deresi’nin (Araklı-Trabzon) İçme ve Sulama Suyu Amaçlı Kullanım Uygunluğunun İncelenmesi’’ başlıklı çalışmalarında; Karadere Deresi’nin su kalitesinin ortaya çıkarılması için iki dönemi kapsayacak şekilde (Ekim 2020-Nisan 2021), yüzey suyu örneklemesi yaparak bu suların fiziksel parametrelerini, majör anyon-katyon ve iz element içeriklerini belirlemişlerdir. Analizler sonucunda, Karadere yüzey suyunda Ca-HCO3 ve Ca-Na-HCO3 su tipleri tespit edilerek, bu parametreler açısından Karadere suyunun WHO ve TS266 İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkında

yönetmeliğe göre, içme suyuna uygun olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliğine göre, tüm parametrelerin I. ve II. Sınıf sular sınıfında olduğu, kirlilik açısından değerlendirildiğinde ise NO_2 içerikleri açısından IV. Sınıf su sınıfında olduğu belirlenmiştir. Son olarak, iz element içerikleri bakımından yağışlı döneme ait Al ve Fe değerlerinin TS266'da tanımlanan sınır değerlerini aştığı gözlenmiştir.

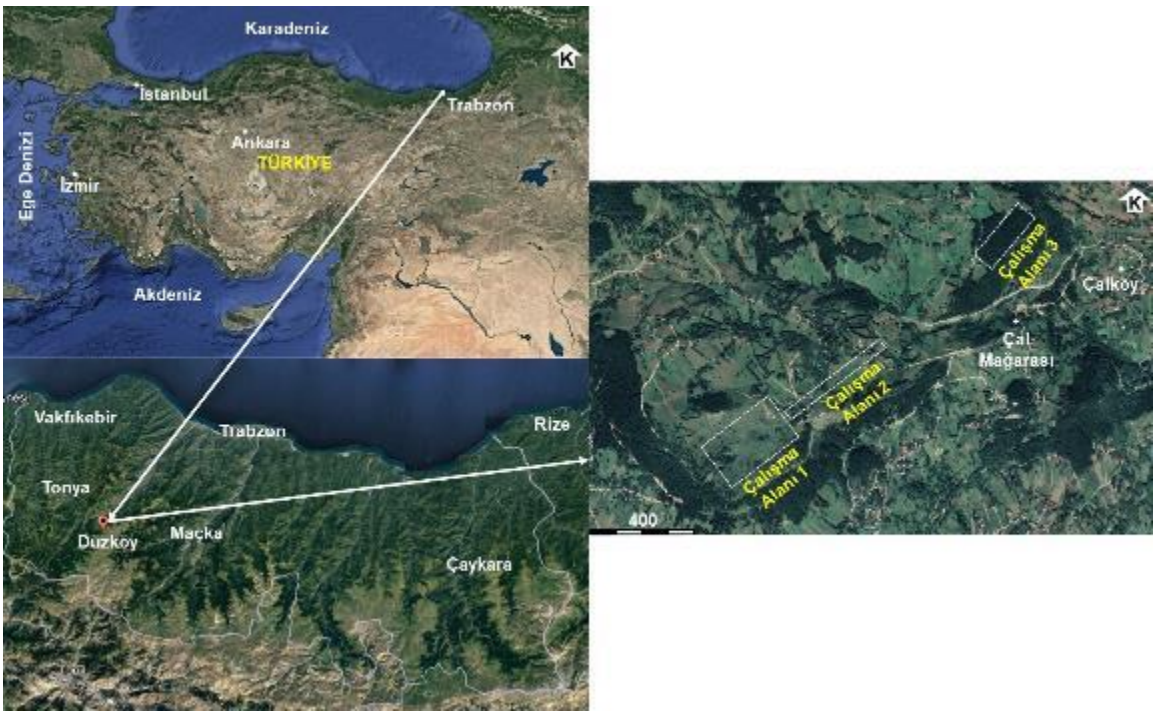
1.3. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Karstik oluşumların (dolin, karstik boşluk, mağara yeraltısuyu akış sistemi vb.) yapısal durumlarının, kuyu veya hendek açma gibi yaklaşımlarla doğru bir şekilde tanımlanması her zaman mümkün olamamaktadır. Yüzeyden herhangi bir açma/delme yapmaksızın, bu tür yapıların yer altındaki konumunu, uzanımını ve yayılımını belirlemek için jeofiziksel yöntemleri kullanmanın başarılı sonuçlar sunduğu bilinmektedir (McGrath vb., 2002; Leucci, 2006; Ugwu & Nwankwoala, 2008; Chalikakis vd., 2011; Moustafa vb., 2012; Rodriguez vd., 2014; Sarıbudak & Hauwert, 2017; Pandey vd., 2019; Farfour vd., 2022; Alemdağ vd., 2024).

Bu tezde, Trabzon ili Düzköy ilçesine bağlı Çalköy ve Çayırbağı mahalleleri arasında kalan Şahinkaya Üyesi'nde hakim olan kireçtaşlarında, farklı fiziksel özelliklere duyarlı jeofiziksel yöntemler ilk kez kullanılarak yürütülen çalışmalarda, bu kireçtaşları içerisindeki dolinler, mağaralar, karstik boşluklar ve bunların içinden geçen yeraltısuyu varlığının ve uzanımlarının belirlenmesi amaçlanmaktadır. Bu amaç doğrultusunda, Şahinkaya Üyesi üzerinde belirlenen üç çalışma alanında jeofizik yöntemlerden *ERT, SP, GPR, SRT* ve *MASW* yöntemleri kullanılarak veriler toplanmıştır. Bu veriler değerlendirilerek, incelenilen alanın 2B ve 3B'lu modelleri oluşturulmuştur. Ayrıca, elde edilen tüm jeofiziksel sonuçlar üzerinden, karstik alan araştırmalarında kullanılan farklı jeofiziksel yöntemlerin öncelik ve etkin kullanım sıralamasının tespiti yapılmıştır. Son olarak, yüzey suları, yer altı suyu ile birleşerek Çal Mağarası içindeki kaynağı beslediği için yüzey sularından ve Çal Mağarası içinden akan yer altı suyunun giriş noktasından ve bu suyun mağaradan çıktığı noktaya kadar geçtiği yol takip edilerek farklı noktalardan su numuneleri toplanmıştır. Bu numuneler analiz ettirilerek fiziko-kimyasal özellikleri belirlenip karşılaştırılmıştır. Su kimyasındaki değişimler ile suyun geçtiği kayaçlar veya dolin sistemleri arasında nasıl bir etkileşim olduğu da değerlendirilmiştir.

1.4. Çalışma Alanının Konumu ve Coğrafyası

Bu doktora çalışması; Türkiye'nin Doğu Karadeniz Bölgesi içerisinde yer alan Trabzon ili'nin Güneybatı'sında kalan Düzköy ilçesine bağlı Çalköy ve Çayırbağı Mahalleleri arasındaki kalan bölgeyi kapsamaktadır**.** Bölgenin Kuzeybatı'sında Tonya ve Vakfıkebir ilçeleri yer alırken, Güneydoğu'sunda Maçka ilçeleri bulunmaktadır (Şekil 1.4).



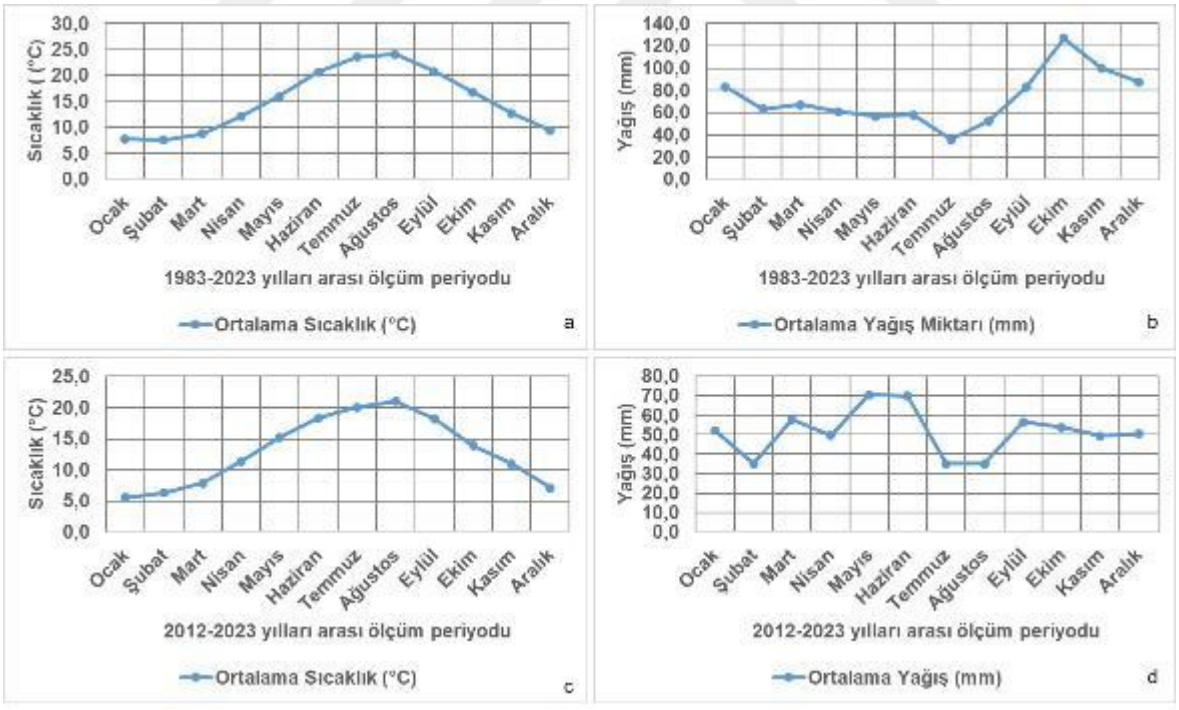
Şekil 1.4. Çalışma Alanı yer Bulduru Haritası (Google Earth'ten alınmıştır)

Akçaabat ile Trabzon arasında kalan ve Akçaabat-Düzköy karayolu kullanılarak ulaşılan çalışma bölgesi, Karadeniz'e yaklaşık 40 km uzaklıkta yer almaktadır. Çalışma alanında bulunan, Çal Mağarası, Şahinkayası ve Çal Camili Tabiat parkı bu bölgenin en önemli turistik merkezlerini oluşturmaktadır. Özellikle bu merkezleri görmek, yemyeşil doğada vakit geçirmek ve tırmanış yapmak için yaz aylarında çok sayıda yerli ve yabancı turist bölgeyi ziyaret ederek bölge ekonomisine katkılar sağlamaktadır.

Engebeli bir morfolojiye sahip bölge; rakımı 1000-1900 m arasında değişen yaylalar ve tepeler arasında yer almaktadır. Bölgede yüksekliği fazla olan yerlerde iğne yapraklı ağaçlar ve orman güllerini barındıran, yüksekliği daha az olan yerlerde ise geniş yapraklı ağaçları barındıran orman örtüsünü görmek mümkündür.

1.5. İklim ve Bitki Örtüsü

Çalışma alanı tipik olarak Doğu Karadeniz iklimi özelliklerini göstermektedir. Yaz ile kış mevsimi arasındaki sıcaklık farkı çok olmamakla beraber yazları nispeten serin, kışları ise kıyı kesimlerde ılık, yüksek kesimlerde karlı ve soğuk geçmektedir. Bölgenin deniz seviyesinden ortalama yüksekliği 1300 metre olup bölgede genellikle her mevsim yağış görülmektedir. Trabzon ili 11. Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden alınan 1983-2023 yıllarına ait aylık ortalama sıcaklık ve ortalama yağış değerleri (2006-2014 yıllarına ait verilere ulaşılamamıştır) Şekil 1.5a, b' de verilen grafikte, 2012-2023 yılı Düzköy ilçesine ait aylık ortalama sıcaklık ve ortalama yağış değerleri ise Şekil 1.5c, d' deki grafikte gösterilmektedir. Şekil 1.5a, c incelendiğinde Haziran, Temmuz, Ağustos, Eylül ve Ekim aylarındaki sıcaklık değerlerinin genel olarak ortalama sıcaklık değerinin üzerinde olduğu, Şekil 1.5b incelendiğinde Eylül, Ekim ve Kasım aylarındaki yağış değerlerinin ortalama yağış miktarının üzerinde iken, Şekil 1.5d incelendiğinde ise Nisan, Mayıs ve Haziran aylarındaki yağış değerlerinin ortalama yağış miktarının üzerinde olduğu görülmektedir.



Şekil 1.5. Trabzon ili ve Düzköy ilçesine ait ortalama sıcaklık ve ortalama yağış grafikleri. a) Trabzon ilinin 1993-2023 yılları arasındaki ortalama sıcaklık grafiği, b) Trabzon ilinin 1983-2023 yılları arasındaki ortalama yağış grafiği, c) Düzköy ilçesine ait 2012-2023 yılları arası ortalama sıcaklık grafiği, d) Düzköy ilçesine ait 2012-2023 yılları arası ortalama yağış grafiği

1.6. Çalışma Alanı Jeolojisi

İlk olarak Hamilton (1842) tarafından adlandırılan "Pontidler", Türkiye'nin en kuzeyinde kalan doğu-batı eğilimli Alp-Himalaya orojenik kuşağının bir parçası olarak bilinmektedir (Ketin 1966; Robinson vd. 1995). Türkiye'nin ana tektonik birimlerinden biri olan Pontidler, Okay (1989) tarafından; Istranca masifi, İstanbul zonu ve Sakarya zonu olmak üzere 3 ana zona ayrılmıştır. Çalışma alanını içerisine alan Sakarya Zonu, Biga Yarımadası'ndan başlayarak Kafkaslara kadar devam eden bir alanı kapsamaktadır (Okay, 1989; Okay, 2000; Okay, 1999; Okay & Göncüoğlu, 2004). Bu çalışmada incelenen alan; Sakarya Zonu'nun kuzeydoğu (Doğu Pontidler) bölümünde bulunan Trabzon ili Düzköy ilçesine bağlı Çalköy ve Çayırbağı Mahallleri arasında kalan Şahinkaya Üyesi'nde yer almaktadır (Ofluoğlu, 1993; Köroğlu, 2018). İlk olarak Bulguroğlu (1991) tarafından 'Şahinkaya Formasyonu' olarak tanımlanan Şahinkaya Üyesi, daha sonra Korkmaz (1993) tarafından 'Şahinkaya Üyesi' olarak adlandırılmıştır.

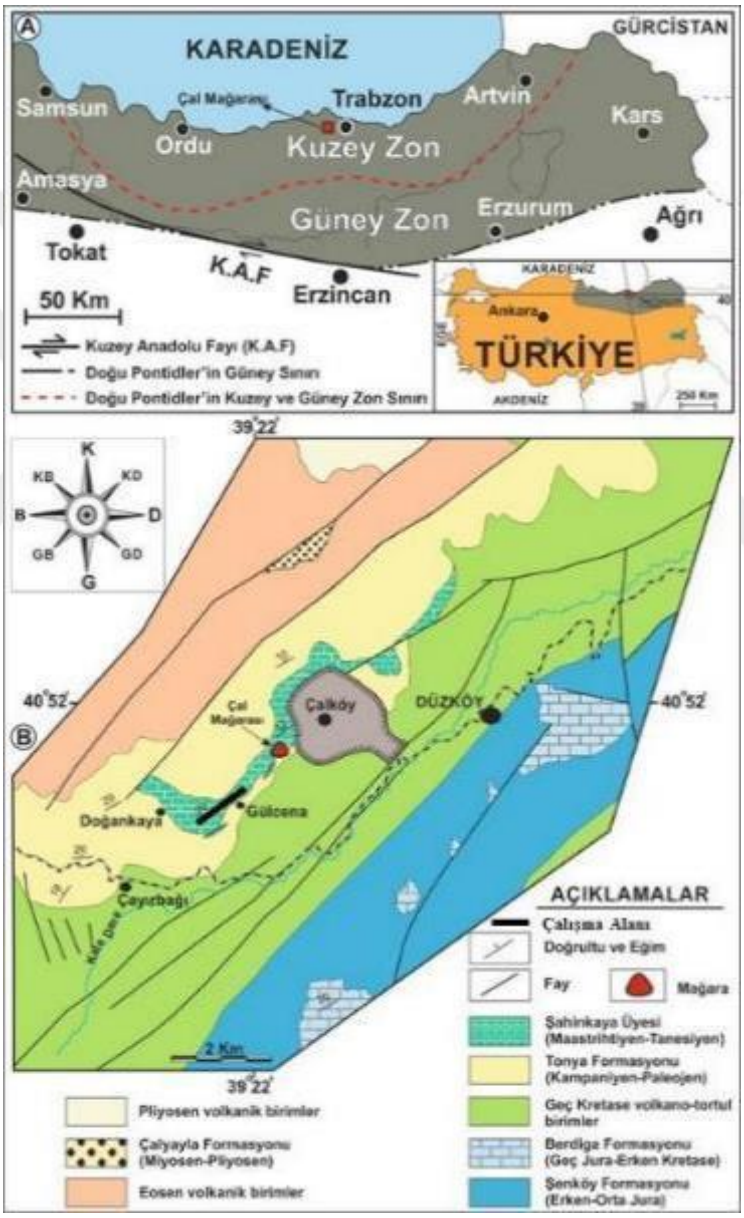
Bu bölgedeki hakim kayaçların, Şenköy Formasyonu'nun Erken-Orta Jura kayaçları olduğu Kandemir (2004) ve Kandemir & Yılmaz (2009) tarafından bilinmektedir. Güven (1993) ve Köroğlu (2018) Şenköy Formasyonu'nun konglomera, kumtaşı, şeyl, bazalt, andezit, bunların piroklastikleri, volkanolojik kırıntılılar ve marnlar içerdiğini belirlemiştir. Bu formasyonun üzerine uyumlu olarak Berdiga Formasyonu gelmektedir (Pelin, 1977). Platform tipi karbonatlarla örtülü Berdiga Formasyonu masif ve orta-kalın tabakalı kumlu kireçtaşı, dolomitik kireçtaşı ve dolomitlerden oluşmaktadır (Güven, 1993; Aydın vd., 2016; Köroğlu, 2018). Berdiga Formasyonu, Geç Kretase yaşlı Çatak Formasyonu tarafından uyumlu bir şekilde örtülmektedir (Pelin, 1977). Çatak Formasyonu kumtaşları, bazaltik-andezitik volkanikler ve bu volkaniklere ait piroklastikler, tüfit ve kırmızı pelajik kireçtaşlarından oluşmaktadır (Güven, 1993; Aydın vd. 2016; Türk-Öz vd., 2016; Köroğlu, 2018). Bu formasyon, Kızılkaya Formasyonu tarafından örtülürken, Kızılkaya Formasyonu Çağlayan Formasyonu tarafından örtülmektedir. Kızılkaya Formasyonu, killi ve kırmızı renkli mikritik kireçtaşı arakatkılı dasitik lavlar ve piroklastik kayaçlardan oluşmaktadır. Çağlayan Formasyonu, başlıca bazaltik-andezitik volkanikler ile bunlara bağlı ara seviyelerde asidik tüf, tüfit, kumtaşı, kiltaşı ve kırmızı renkli mikritik kireçtaşı ve piroklastiklerden oluşmaktadır (Köroğlu, 2018). Çağlayan Formasyonu'nu uyumlu olarak örten Tirebolu Formasyonu, kumtaşı-kiltaşı-kiltaşı ve kırmızı renkli mikritik kireçtaşı ara katmanlarını içeren bazaltik-andezitik volkanikler ve bunların piroklastiklerinden meydana

gelmektedir. Geç Kretase ardalanmasının en üst seviyesi Tonya Formasyonu'dur. Bu formasyon taban seviyelerinde kalsitürbitler, üst seviyelere doğru ise çoğunlukla çamurtaşı ve ince tabakalı kalsirudit ardalanmasından oluşmaktadır (Korkmaz, 1993; Güven, 1993; Aydın vd., 2016; Köroğlu, 2018; Consorti & Köroğlu, 2019). Korkmaz (1993), Tonya Formasyonu'nun litolojik, paleontolojik ve sedimantolojik özelliklerini incelemiş ve bu formasyonun derin denizel bir ortamda çökeldiğini gözlemlemiştir. Ancak Korkmaz (1993), bu formasyonun orta kesiminde sığ ortam koşulları nedeniyle Şahinkaya Üyesi'ni oluşturan resifal kireçtaşlarının oluştuğunu açıklamıştır. Şahinkaya Üyesi orta kalın tabakalı yumrulu kireçtaşı, kalın kabakalı kumlu kireçtaşı ve ince tabakalı kireçtaşından oluşmaktadır (Bulguroğlu, 1991; Korkmaz, 1993; Köroğlu, 2018; Köroğlu & Kandemir, 2019; Consorti & Köroğlu, 2019).

Şahinkaya Üyesi'nin bölgesel jeolojisi ve stratigrafisi ve kısmi hidrojeolojik özellikleri Ofluoğlu (1993), Korkmaz (1993), Ayaz (1995), İnan vd. (1999), Hippolyte vd. (2015), Köroğlu (2018), Türk-Öz & Özyurt (2018), Köroğlu & Kandemir (2019a, b), Consorti & Köroğlu (2019), Consorti vd. (2020) tarafından incelenmiştir. Ofluoğlu (1993) tarafından yapılan ‘’Çalköy-Alazlı (Düzköy, Trabzon) yöresinin karstlaşma yönünden incelenmesi’’ başlıklı yüksek lisans çalışmasında; Çalköy-Alazlı (Düzköy, Trabzon) yöresinde meydana gelen karstlaşma, karstlaşma sonucunda oluşan yapıların özellikleri ve karstlaşmanın nedenleri belirlenmiş, ayrıca yörenin genel jeolojik özellikleri ortaya çıkarılmıştır. Şahinkaya Üyesi'nde gelişen karstlaşma sonucunda, boyutları 4-55 m arasında değişen dolinler ve karstik boşluklar bulunduğu ve Çal Mağarası içinden akan bir yeraltı nehri olduğu belirtilmiştir (Ofluoğlu, 1993; Törk vd., 2013; Köroğlu & Kandemir, 2019a). Köroğlu (2018) tarafından yapılan çalışmada; yörede bulunan neritik karbonatların yayılım, kalınlık, kayaç türü, çökel yapı-doku ilişkileri, mikro karakteristikleri, fosil içerikleri ile biyostratigrafik verilerini ortaya koymak amacıyla yöreden birimi yansıtacak şekilde üç adet ölçülü stratigrafik kesitler almıştır. Bu kesitlerden, Şahinkaya Üyesi’nin ortalama kalınlığı 100 m olarak belirlenmiştir (Köroğlu, 2018). Birimin litolojisine bakıldığında; tabandan başlayarak kalın tabakalı, kumlu, litoklastlı ve biyoklastlı bileşenler ve taban düzeylerinde yer yer kırmızımsı renkli kireçtaşı ve kumlu kireçtaşları yer almaktadır (Korkmaz, 1993; İnan vd. 1999; Köroğlu, 2018; Köroğlu & Kandemir, 2019b). Ölçülü stratigrafik kesitleri alınmış Çayırbağı-Çalköy yöresinde, birim genellikle masif ya da kalın tabakalı, sarıdan griye kadar değişen renkte, yer yer killi, kumlu, dolomitik ve breşik özellikler sunan fosilli (rudistli) kireçtaşlarından oluşmaktadır (Korkmaz, 1993; İnan vd., 1999; Köroğlu, 2018;

Kandemir & Köroğlu 2019a, b). Genellikle sarp tepeleri oluşturan kireçtaşları bol çatlaklı ve erime boşluklu ve yoğun olarak rudist kavkıları içeren birimlerde karstik mağaralar gelişmiştir (Ofluoğlu, 1993; Korkmaz, 1993; Özer vd., 2009; Törk vd., 2013; Köroğlu & Kandemir, 2019b).

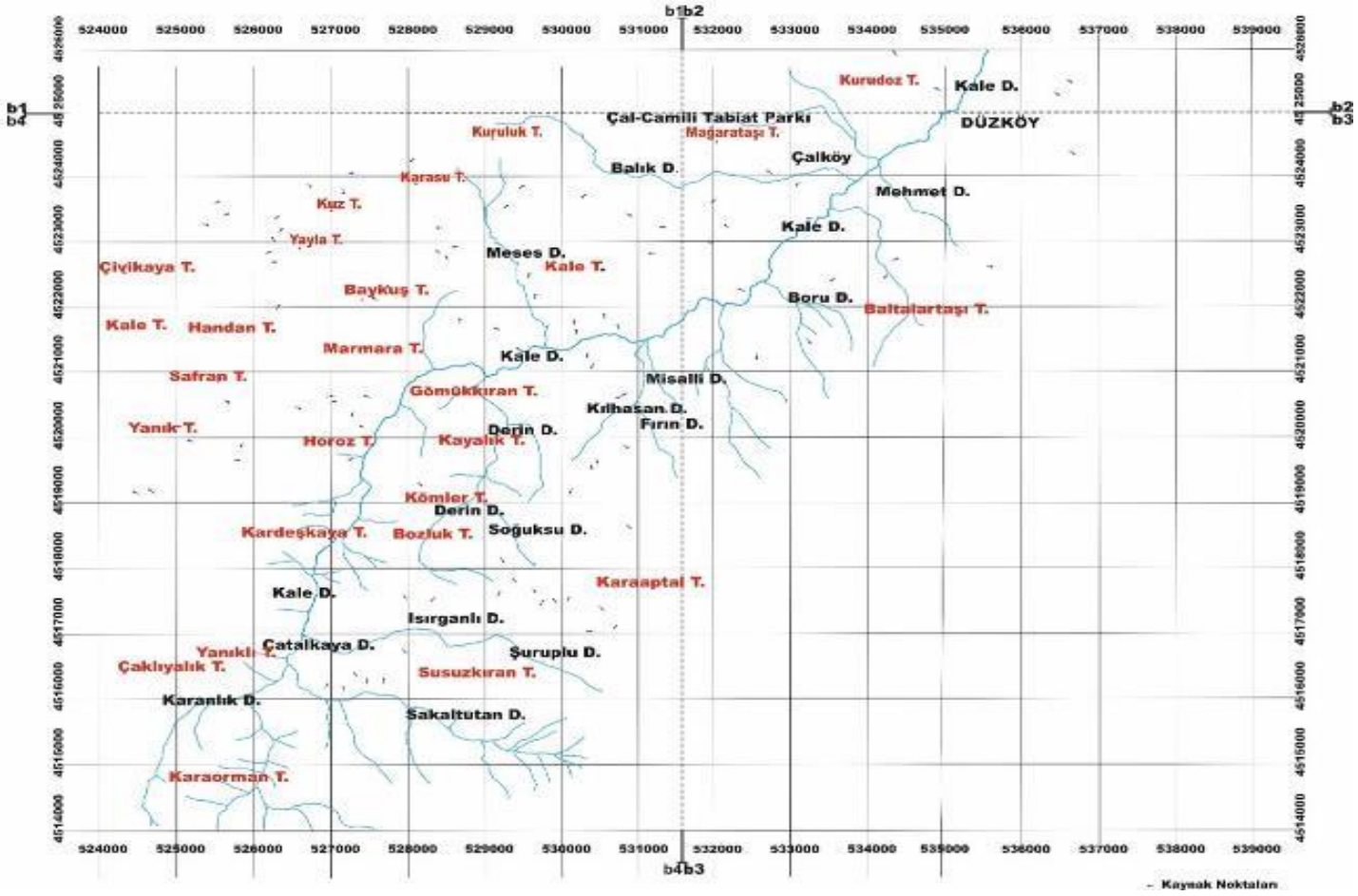
Bu tezdeki çalışma alanlarını içeren Çayırbağı-Çalköy bölgesinin jeoloji haritası ve Çal Mağarası'nın konumu Şekil 1.6'da yer almaktadır.



Şekil 1.6. Çal Mağarası'nın konumu ve jeolojisi (Köroğlu, 2024'den alınmıştır). a) Çalışma alanı Çal Mağarası (kırmızı kare) ile bölgenin Kuzey ve Güney Zon ayrımı (Özsayar vd., 1981'den değiştirilerek); b) Çayırbağı-Çalköy bölgesinin jeoloji haritası ve Çal Mağarası'nın konumu (Köroğlu, 2018; Consorti ve Köroğlu, 2019'dan değiştirilerek)

1.7. Çalışma Alanının Hidrojeolojik Özellikleri

Çal Mağarası'ndan akan nehir ve bu nehri beslediği düşünülen suları içeren Kale Dere Havzası, topografik harita yardımıyla oluşturulmuştur (Şekil 1.7). Kale Dere havzası, çalışma alanındaki Balık Dere, Mehmet Dere, Boru Dere, Misalli Dere, Derin Dere ve Isırganlı Dereleri tarafından beslenmektedir. İçinden yeraltı nehri geçen Çal Mağarası, mağaranın girişinden itibaren GB yönüne doğru devam etmektedir. Bu mağaranın uzanış yönü Balık Dere'nin güneyinde Kayaüstü Mezrası'nın bulunduğu bölgeye doğrudur. Kayaüstü Mezrası üzerinde çeşitli büyüklüklerde dolinler ve çok sayıda küçük dere bulunmaktadır. Yeryüzü sularının yeraltına sızmasını sağlayan dolinlerin ve alandaki derelerin Çal Mağarası'ndan akan nehri beslediği düşünülmektedir. Hidrolojik olarak aktif bir mağara olan Çal Mağarası'nda yeraltısuyu akışı yıl boyunca devam etmektedir. Kayaüstü Mezrası'ndaki dolinler, kırıklar ve boşluklardan yeraltına sızan yüzey ve yağmur suları ile beslendiği düşünülen mağaranın beslenme alanı ile ağzı arasında ~200 m kot farkı bulunmaktadır (Törk, 2013). Bu mesafenin kısa olması nedeniyle ani yağışlar sonucunda mağaradaki su seviyesinde ani yükselmeler meydana gelmektedir.



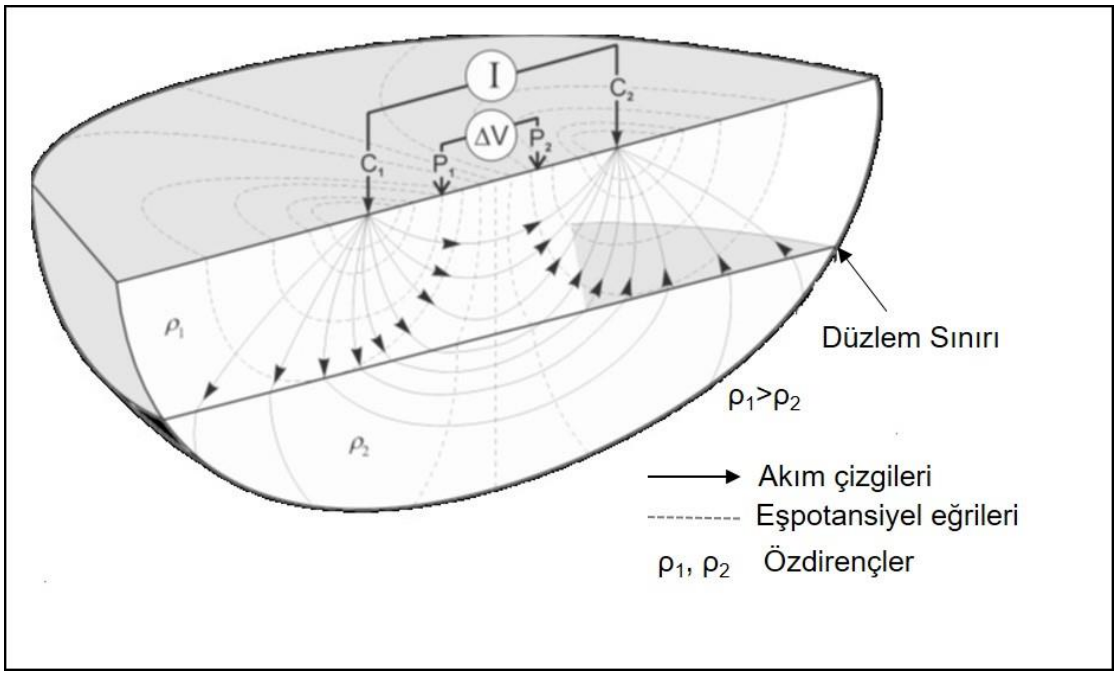
Şekil 1.7. Çalışma alanında bulunan yüzeysuları havza haritası

1.8. Kullanılan Yöntemler

1.8.1. Elektrik Özdirenç Yöntemi

Maden, petrol, arkeolojik, mühendislik amaçlı yapılarının zemin araştırmalarında, jeotermal enerji araştırmalarında ve çevre kirliliği aramalarında etkin bir şekilde kullanılan Elektrik özdirenç yöntemi yer altı suyu ve karstik yapı (boşluk, dolin vb.) araştırmalarında en çok kullanılan jeofiziksel yöntemlerin başında gelmektedir (Kwon vd., 2005; Nyquist vd., 2008; Balakrishna vd., 2014; Park vd., 2014; Abdallatif vd., 2014; Redhaounia vd., 2016; Khaldaoui vd., 2020; Hussain vd., 2020; Gelişli & Babacan, 2021; Alemdağ vd., 2022; Farfour vd., 2022). Ohm yasasına (Gupta vd., 1980; Telford vd., 1990; Ndlovu vd., 2009) dayanan bu yöntemin temel amacı; araştırma alanının jeolojik yapısının, zemin ve kayaçların yanal veya düşey yöndeki elektriksel iletkenlik farklarından yararlanılarak ortaya konulmasıdır (Keçeli, 2012; Özdemir & Palabıyık, 2019).

Yöntem, yapay kaynak vasıtasıyla bir çift akım elektrotu (C_1, C_2) ile zemine verilen akımın, yer içinde yayılırken zemindeki malzemelerin elektrik akımına karşı direnç özelliklerine göre oluşan potansiyel fark değişiminin, bir çift potansiyel elektrotu (P_1, P_2) ile ölçülmesi esasına göre çalışmaktadır (Knödel vd., 2007; Keçeli, 2012) (Şekil 1.8).



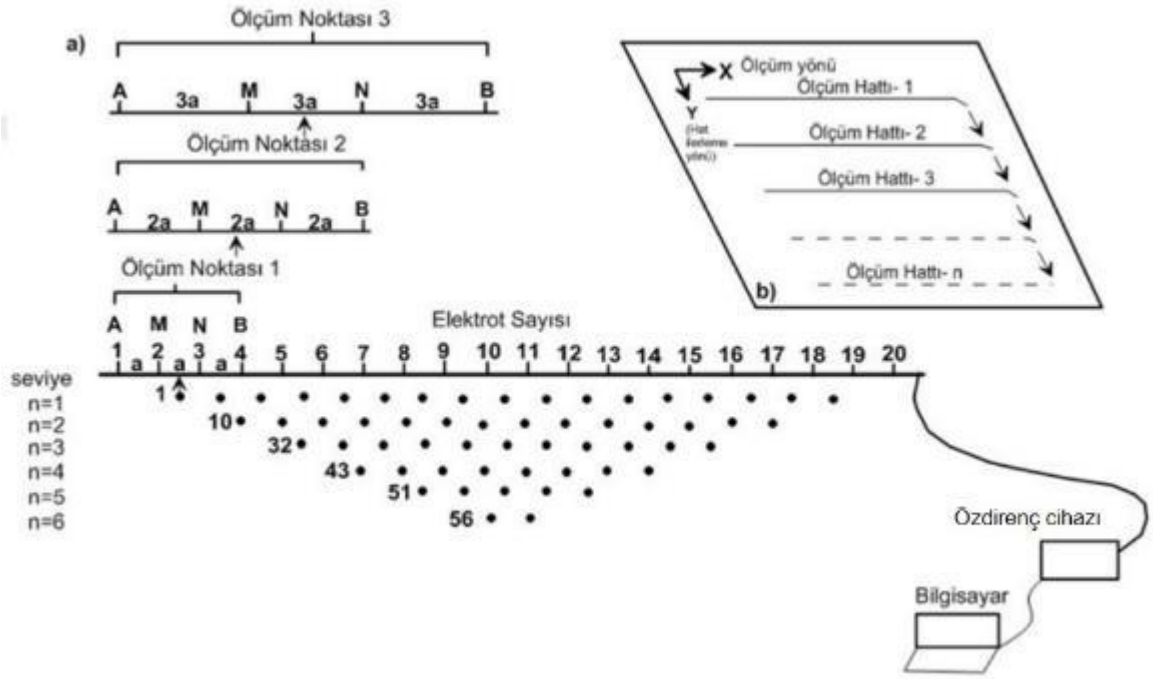
Şekil 1.6. Elektrik özdirenç ölçümünün ilkesi (Knödel vd., 2007'den düzenlenmiştir)

Ölçülen gerilim farkı, elektrotlar arasındaki mesafeye ve ortamın jeolojisine bağlı olarak değişmektedir. Ayrıca bu yöntemin uygulamalarında yere verilen akımın nüfuz derinliği elektrotlar arasındaki mesafeye bağlı olarak değişmektedir. Özdirenç yönteminde ölçülen büyüklük gerilim farkı olmasına rağmen, elde edilen veri değerlendirilirken bu gerilim farkının fiziksel bir büyüklük olan özdirence dönüştürülmesi gerekmektedir. Bu dönüştürme;

$$\rho_{\alpha}=k(\Delta V/ I) \quad (3)$$

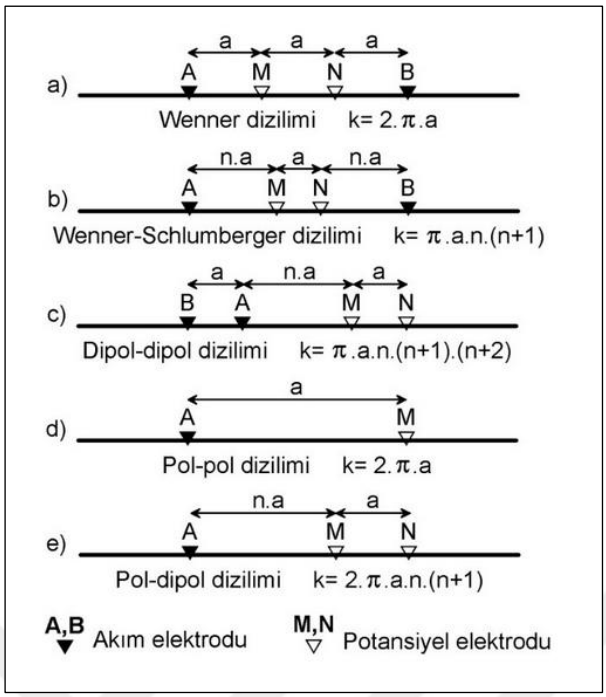
bağıntısı kullanılarak elde edilmektedir. Burada k; geometrik faktör, I; yere verilen akım ve ΔV; ölçülen gerilim farkıdır. Tabakalı ortam için (3) bağıntısından hesaplanan özdirenç, görünür özdirenç (ρa) olarak adlandırılmaktadır (Keçeli, 2012).

Elektrik özdirenç yöntemi arazide; düşey elektrik sondajı, elektrik özdirenç yatay kaydırma ve haritalama teknikleri şeklinde uygulanmaktadır. Son 25 yılda bilgisayar teknolojisi ve ters çözümleme işlemlerindeki ilerlemeler ile bu tekniklere Elektrik Özdirenç Tomografi *(ERT)* de eklenmiştir. Bu tekniklerden *ERT* ölçüm düzeneğinde çok sayıda elektrot çifti kullanılarak gerçekleştirilen ölçümlerle yer altının 2 boyutlu özdirenç değişimi elde edilmektedir. Bu teknik, özellikle yanal ve düşey yöndeki değişimlerin, yeraltı su varlığı ve seviyesinin (Kumari vd., 2021; Alzahrani vd., 2022), nemliliğin (Chambers vd., 2014), tuzlu su girişimlerinin (Alpaslan, 2021) boşlukların (Park vd., 2014) belirlenmesinde ve arkeolojik kazı tasarımında (Akça vd., 2019) çok etkin ve yaygın kullanılmaktadır. *ERT* ölçümlerinde, çoklu bir kablo sistemine bağlı çok sayıda potansiyel ve akım elektrotunun bir kombinasyonunu (Şekil 1.9a) kullanılarak veriler toplanmaktadır. Bu uygulamada elektrotlar, belirlenen bir profil boyunca (Şekil 1.9b) belli aralıklarla zemine yerleştirilmekte ve ölçümler yapılmaktadır.



Şekil 1.7. Çok-kanallı elektrik özdirenç ölçü sistemi (Griffiths & Barker, 1993'den değiştirilmiştir). a) n = 1 ile n = 6 derinlik seviyelerindeki özdirenç görüntüsü oluşturmak için kullanılan ölçüm sırası, (b) Alansal ölçüm için ölçüm hatlar

ERT veri toplama tekniğinde, akım ve gerilim elektrotlarının birbirlerine göre farklı konumlandırması (farklı elektrot dizilimleri) sayesinde ölçümler alınmaktadır. Aynı profil için farklı elektorot dizilimi ile ölçülen gerilim farkları ile görünür özdirenç değerleri de farklı olmaktadır. Elektrik özdirenç çalışmalarda en sık kullanılan dizilim türleri; Wenner, Wenner-Schlumberger, dipol-dipol, pol-pol ve pol-dipol'dür (Berge, 2011). Bu dizilimler, araştırma amacına göre belirlenerek ölçüm alınmaktadır.



Şekil 1.8. a) Wenner, b) Wenner-Schlumberger, c) dipol-dipol, d) pol-pol ve e) pol- dipol dizilimlerinde kullanılan elektrotların yüzeydeki dağılımı ve dizilimlere ait geometrik faktör (k) hesabı (Berge, 2011).

Wenner dizilimi, iki akım ve iki potansiyel elektrodun kullanıldığı simetrik bir dizilimdir (Şekil 1.10a). Bu dizilimde elektrot aralıkları sabit alınarak, ölçülen değerler iki potansiyel elektrodun ortasına atanmaktadır. Wenner diziliminde kullanılan geometrik faktör k=2πa, görünür özdirenç değeri ise (3) bağıntısı ile elde edilmektedir. Bu dizilim genellikle yanal yöndeki değişimlerin saptanmasında daha başarılı sonuçlar vermektedir.

Wenner-Schlumberger diziliminde ölçü alınırken de iki akım ve iki potansiyel elektrot kullanılmaktadır. Elektrot aralıkları belli bir "n" faktörüne göre seçilip, ölçülen değerler iki potansiyel elektrotun orta noktasına atandığı diğer bir simetrik dizilim türüdür (Şekil 1.10b). Bu dizilimde potansiyel elektrotlar arasındaki uzaklık (a), akım elektrotları arasındaki uzaklığına (na) göre daha küçük alınmaktadır. Dizilimde n'nin 1 seçilmesi durumunda Wenner dizilimi elde edilmektedir. Fakat bu dizilim, Wenner dizilimine göre daha derin bir araştırma derinliği sağlamaktadır. Ölçülen görünür özdirenç değerinin dizilimin orta noktasına atandığı elektrot diziliminde, "a" ve "n" değerleri artırılarak derin seviyelerden bilgi alınabilmektedir. Bu dizilim yatay ve düşey süreksizliklere karşı oldukça duyarlıdır. Özellikle düşey süreksizlik durumlarında Wenner-Schlumberger diziliminin oldukça iyi sonuçlar verdiğini bilinmektedir (Berge, 2011). Wenner-Schlumberger diziliminde

kullanılan geometrik faktör k=πan(n+1), görünür özdirenç değeri ise (3) bağıntısı ile elde edilmektedir.

Dipol-dipol dizilimi, "n" faktörüne göre simetrik yerleştirilen akım ve potansiyel elektrotlarının dipol olarak konumlandırıldığı dizilimdir (Şekil 1.10c). Akım ve potansiyel elektrot çiftleri ayrı ayrı yerleştirilir. Akım elektrot çifti ve potansiyel elektrot çifti aralığı "a" iken akım ve potansiyel elektrotlar arası mesafe "na" 'dır. Bu dizilimin araştırma derinliği "a" ve "n" değerlerine göre değişmektedir (Berge, 2011). Dipol-dipol diziliminin görünür özdirenç değeri ise dipol kollarının orta noktasına atanmaktadır. Bu dizilim türü genellikle düşey ve düşeye yakın yöndeki süreksizliklerin belirlenmesinde oldukça duyarlıdır (Keçeli, 2012). Ayrıca arkeolojik alanlarda duvar türü süreksizlikleri belirlerken etkin bir şekilde kullanılmakta olan bu dizilim, yanal süreksizliklerin belirlenmesinde de oldukça başarılı sonuçlar sunmaktadır (Akça vd., 2019; Balkaya vd., 2021).

Bu tez çalışmasında hem yatay hem de düşey süreksizliklere oldukça duyarlı olduğu için Wenner-Schlumberger dizilimi kullanılarak *ERT* verileri toplanmıştır. Bu verilerden elde edilen görünür özdirenç değerleri, yer altının 2B özdirenç modelini belirlemek için Res2Dinv programı (Loke, 2010) kullanılarak değerlendirilmiştir. Bu program, temel olarak en küçük kareler ters çözüm tekniğini kullanarak özdirenç verilerini hesaplamaktadır. Bu veriler hesaplanırken, yeraltı modeli küçük bloklara ayrılmaktadır. Bu bloklara ait görünür ve gerçek özdirenç değerleri arasındaki fark, minumum olana kadar ters çözüm işlemi sürekli yinelenmekte ve böylelikle yeraltının 2B özdirenç-derinlik dağılımı ortaya çıkarılmaktadır (De Groot-Hedlin & Constable, 1990).

1.8.2. Doğal Potansiyel (*Self Potential/SP*) Yöntemi

Doğal kaynaklı bir yöntem olan Doğal Potansiyel (***S**elf /**S**pontaneous **P**otential-**SP***) yöntemi en eski jeoelektrik yöntemlerden biridir (Patelle, 1997). Yer içindeki elektrik yüklerine karşı duyarlı olan *SP* yöntemi, iki nokta arasında oluşan doğal gerilim farkının ölçülmesi esasına dayanmaktadır (Parasnis, 1962). Doğal gerilim farkı, mineraller ve yeraltı sıvıları arasındaki elektrokimyasal olaylarla veya iyonik sıvıların akışını içeren elektrokinetik süreçler sonucunda kendiliğinden oluşmaktadır (Sharma, 2002). İlk olarak 1830'da İngiltere'de yer alan Cornwall bölgesindeki bakır sülfür yataklarının araştırılmasında kullanılan bu yöntem (Fox, 1830), günümüze kadar; fay ve kırık hatlarının belirlenmesi (Di Maio & Patella, 1994), volkanik sahalar (Sasai vd., 1997; Aubert vd., 2000;

Di Maio vd., 1998; Aubert vd., 2000; Finizola vd., 2002, Finizola vd., 2004), jeotermal alanlar (Goldstein vd., 1989; Ishido vd., 2000; Matsushima vd., 2000; Yasukawa vd., 2003; Yasukawa vd., 2005; Ishido vd., 2018; Revil vd., 2023), çevre ve mühendislik çalışmaları (Corwin vd., 1990; Sharma, 1997), barajlardaki sızıntıların belirlenmesi (Black & Corwin, 1984; Panthulu vd., 2001; Mainali vd., 2015; Guireli Netto vd., 2020), arkeolojik çalışmalar (Drahor, 2004; Shevnin vd., 2014; De Giorgi vd., 2018; De Giorgi vd., 2019), maden sahaları (Goldie, 2002; Bhattacharya vd., 2007; Dmitriev, 2012; Fedi & Abbas, 2013; Biswas 2016; Eppelbaum, 2019) gibi bir çok alanda kullanılmaktadır. Ayrıca, doğal potansiyel yöntemi, karstik arazide yeraltısuyu akış alanlarını tespit etmek içinde oldukça yaygın kullanılmaktadır (Stevanovic & Dragisic, 1998; Lange, 1999; Jardani vd, 2006; Jardani vd., 2007; Robert vd., 2011; Artugyan vd., 2015; Saribudak, 2016; Saribudak & Hauwert, 2017). Çünkü elektriksel potansiyel gradyanları, suyun çatlaklar veya kanallar boyunca yatay akışı ve suyun çatlaklara veya sütunlara düşey olarak sızmasıyla oluşmaktadır (Wanfang vd., 1999).

Yerin sığ derinliklerindeki doğal potansiyel gerilimi oluşturan çeşitli elektrik gerilimleri bulunmaktadır. Bu gerilimler Elektrokinetik Potansiyel, Termoelektrik Gerilim, Elektrokimyasal Potansiyel (Difüzyon ve Nernst Potansiyeli) ve Mineralizasyon Potansiyelleridir.

Gözenekli kayaç içerisindeki dar ve kılcal damarlardan veya boşluklu ortamlardan geçmekte olan akışkanlar, akış yolu boyunca elektrik gerilimi yaratabilmektedir. Bu durum akma potansiyeli ya da elektrokinetik potansiyel olarak adlandırılmaktadır (Keçeli, 2012). Bu gerilim farkının, kılcal damarların yan duvarlarında bulunan taneciklerle, akışkanlar içerisinde yer alan iyonların birbiri ile etkileşmesi sonucu oluşmuş olduğu şeklinde düşünülmektedir. Söz konusu oluşan akma ya da elektrokinetik potansiyel (Ogilvy vd., 1969);

$$EK = \xi \, \Delta P \, \varepsilon \, \rho / 4\pi\eta \qquad (4)$$

bağıntısı ile verilmektedir. Eşitlikteki; ρ=Özdirenç, ε=Dielektrik Sabit, ξ=Soğurma, ΔP= Basınç farkı, η=Akışkanın dinamik potansiyelidir.

Akma geriliminin yönü, basınç yönüyle aynı doğrultudadır. Jeofiziksel çalışmalarda bu yönü belirleme, yer altı suyunun akış yönü hakkında bilgi vermektedir. Akma gerilimi birkaç yüz milivolt ile birkaç milivolt arasında değişlik göstermektedir.

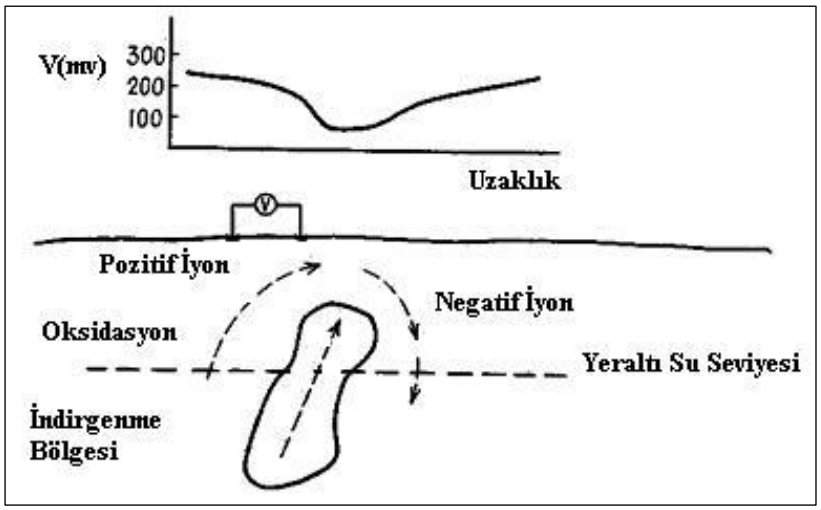
Termoelektrik gerilim farklı sıcaklıktaki çözeltilerden meydana gelmektedir. Sıcaklık değişimi miktarı ile oluşacak gerilim farkı arasında doğru bir oran vardır. Kayaçlar arasında ısı farkı varsa gerilim farkı da oluşmaktadır. Isı ve gerilim farkı oranı "*ThermoelectricCoupling Coefficent (TEC)*" olarak bilinmektedir. Farklı kaya tiplerinde oluşan *TEC* değeri -0.09 ile +1.36 mV/ ^{0}C arasında değişim göstermektedir. Ortalama değer ise 0.27 mV/^{0}C dir (Nourbehecht, 1963). Termoelektrik gerilim genellikle jeotermal alanlarda görünen kaynak türüdür. Jeotermal alanlarda yüksek ısı akısı değeri ölçülen zonlarla, aynı yerde ölçülen doğal potansiyel gerilim değerleri ilişkilendirilebilir.

Elektrokimyasal gerilim, genellikle tatlı ve tuzlu su girişimlerinde veya zemin kirlenmelerinde, iyon yoğunluğu farklı ortamlar arasında veya farklı yoğunluktaki çözeltilerde yer alan anyon (- yükler) ve katyonların (+ yükler) hareketlerinden dolayı oluşmaktadır. Farklı yoğunluktaki çözeltilerde – ve + yük miktarlarının dengeye gelme eğiliminden dolayı çözeltilerin ara yüzeyinde – ve + yüklerin geçişleri olacaktır. Bu şekildeki yük hareketleri ortamda bir difüzyon geriliminin oluşmasına neden olmaktadır (Telford vd.,1990). Oluşan bu gerilim farkından yararlanarak çöp atık alanlarının yer altı suyuna karıştıkları kirlilik alanların belirlenmesi yapılabilmektedir.

Elektriksel gerilim farkının ölçülebilmesi için özdeş elektrotların her biri diğerinden farklı bir yoğunluktaki bir çözeltiye batırılmalıdır. Bu durumda iki elektrot arasında bir gerilim meydana gelmektedir. Bu gerilim mV(milivolt) seviyesinde ölçülmekte ve Nernst gerilimi olarak adlandırılmaktadır (Telford vd., 1990). Fay kırıklarında bulunan sıcak sular, petrol ile su dokunak sınırları bu gerilime örnek olarak verilebilir.

Mineral potansiyelleri çoğunlukla masif sülfürlü cevherler üzerinde gözlendikleri için genellikle sülfit potansiyelleri olarakta adlandırılmaktadır. Mineralleşmeden dolayı oluşan gerilim farkları negatif anomali değerlidir. Anomali oluşturabilen hemen hemen tüm cevher kütleleri iyi elektrik iletkenleridir. Mineralizasyon potansiyelin elektrokimyasal kökeninin araştırılması için Sato ve Mooney (1960), Galvanik yapı ve Asitlilik gibi bazı görüşler açıklanmıştır (Çağlar, 1991).

Bir maden cevheri yatağının üst kısmı oksijence zengin yükseltgenme (oksidasyon) alt kısmı ise oksijence fakir indirgenme (redüksiyon) zonlarında kalırsa, iki kısım arasında oksijen dengesinin kurulması esnasında bir elektriksel akım akışı oluşmaktadır. Bu akımlar yeryüzünde ölçülebilecek doğal bir gerilimin meydana getirmektedir. Bu durumdaki cevher kütleleri, galvanik hücre görünümüne sahip olup basit bir pil gibi davranmaktadır (Şekil 1.11) (Çağlar, 1991).



Şekil 1.9. Yeraltı su seviyesi tarafından kesilen sülfürlü cevherde oluşan doğal gerilim (Dobrin,1986)

Asitlilik görüşüne göre; yeraltının yüzeye yakın bölümlerdeki çözeltilerin asitlilik miktarı (pH değeri) ile derine yakın bölümlerindeki çözeltilerin asitlilik miktarı birbirinden farklıdır. Yeraltındaki bu asitlik farklılığı ortamda önemli bir akım akışını neden olmakta ve önemli bir büyüklüğe ulaşabilen doğal gerilimi oluşturmaktadır (Çağlar, 1991).

Yeraltındaki çeşitli jeolojik ve hidrojeolojik yapıların belirlenmesinde kullanılan doğal potansiyel yönteminde, ölçülen doğal elektriksel potansiyel değerleri; topografya, yeryüzünde yada yeraltına yerleştirilmiş metal borular ve jeolojik koşullardan etkilenebilmektedir (Barutçu, 1981).

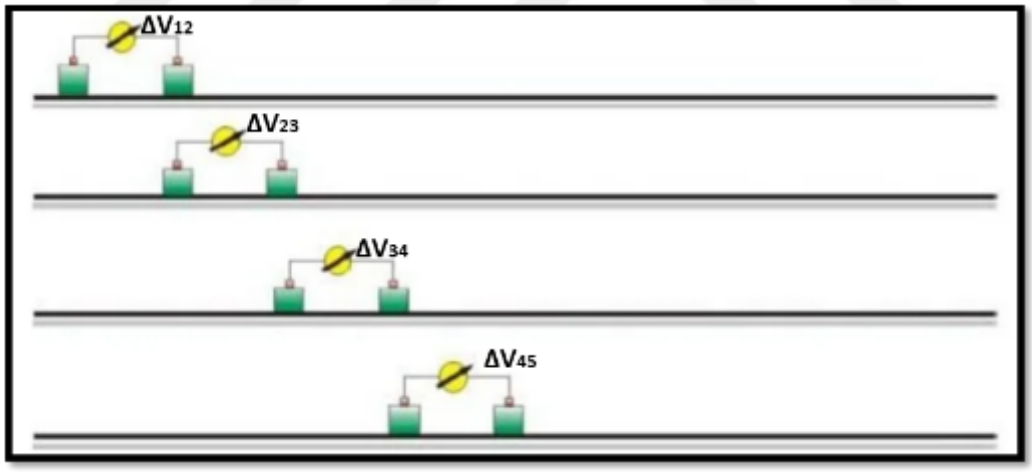
SP ölçümü çalışmalarında; multivoltmetre, iki adet polarize olmayan seramik fincan (pot) elektrod, akım kablosu kazma, metre, su, defter, kalem gibi ekipmanlar kullanılmaktadır.

Paslanmaz çelikten yapılan metal elektrotlar ile *SP* ölçümü alındığında toprak ile metal elektrot arasında özellikle toprağın nemine bağlı olarak değişik kutuplanmalar meydana gelmektedir. Bu kutuplaşma nedeniyle ortaya çıkan *SP* değeri, yer içinde olan *SP* değerinden çok farklı ve büyük genlik değerleri olabilir. Bu sebepten dolayı *SP* ölçümleri esnasında genellikle PVC'den yapılmış kutuplanmayan fincan (pot) elektrotlar kullanılmaktadır (Çağlar, 1991). Bu elektrotların yanları geçirimsiz, altları ise geçirimlidir. İçerisinde ise metal çubuk ve iletken eriyik bulunmaktadır. İletken eriyiğin cinsi, kullanılan metal çubuğa bağlı olarak değişmektedir. Metal çubuk ve eriyik olarak; Ag ile AgCl, Cu ile $CuSO_4$, Pb ile $PbCl_2$, Zn ile $ZnSO_4$ kullanılabilir (Petiau, 2000). En çok kullanılanı bakır (Cu) çubuk batırılmış bakırsülfat çözeltisi ($CuSO_4$) dir.

SP ölçümlerinde araştırma yapılırken kullanılan kablo uzunluğunun 500 metreyi geçmemesi önerilmektedir. Ayrıca kablonun iç direnci oldukça düşük ve iyi yalıtılmış olmalıdır. Multivoltmetre ile yer altında oluşan gerilim farkı mV hassasiyetinde ölçülmektedir. Multivoltmetrenin 1 mV duyarlılıkta olması yeterlidir.

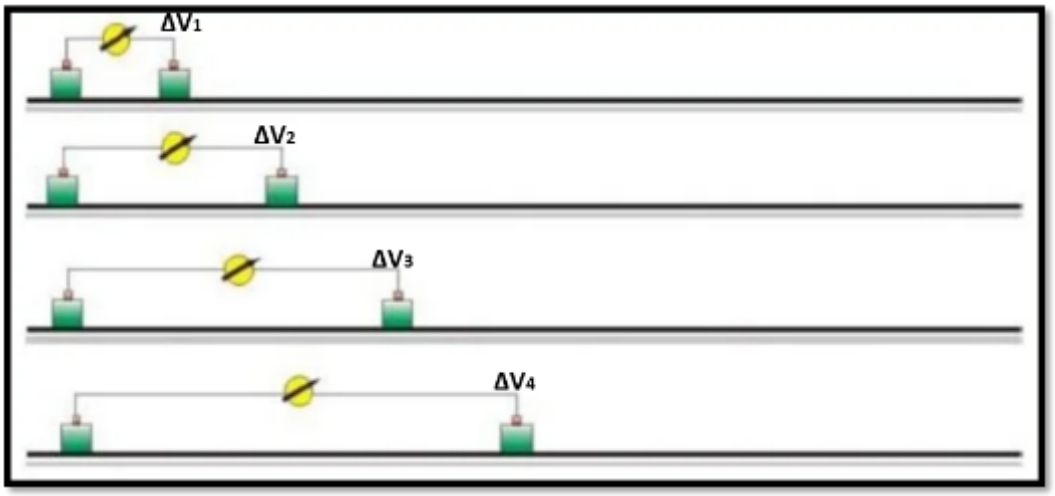
Doğal Potansiyel verilerinin ölçülmesinde, Kaydırma dizilimi (kurbağa atlayışı veya türev) ve Baza indirgeme (toplam alan) dizilimi/ ölçü teknikleri kullanılmaktadır (Çağlar, 1991).

Kaydırma dizilimi (Kurbağa atlayışı veya türev) ölçü tekniğinde bir doğrultu belirlenerek, bu doğrultu boyunca sabit aralıklı birinci ve ikinci noktalara yerleştirilen elektrotlar arasındaki doğal potansiyel gerilim farkı ölçülmektedir. İlk noktaya yerleştirilen elektrot buradan alınarak ikinci elektrodun olduğu noktaya, ikinci elektrot ise yerleştirildiği noktadan alınıp bir önceki aralık korunacak şekilde üçüncü noktaya yerleştirilerek doğal potansiyel gerilim farkı ölçülmektedir. Bu şekilde doğrultu boyunca ilerlenerek doğal potansiyel gerilim farkları ölçülmektedir. Bu dizilimin kullanılması ile ölçülen değerleri iki ölçü noktasının ortasına atanmaktadır Şekil 1.12.



Şekil 1.10. Kaydırma Dizilimi (Kurbağa Atlayışı veya Türev) Ölçü Tekniği

Baza indirgeme ölçü tekniğinde ölçü doğrultusunun başlangıcında bir baz noktası belirlenmektedir. Bu baz noktasına fincan elektrotlardan bir tanesi yerleştirilip bu noktada sabit kalmaktadır. Eldeki uzun kablo ile ölçü doğrultusu üzerindeki her bir nokta ile baz noktası arasındaki gerilim farkları multivoltmetre aracılığıyla kayıt edilmektedir. Ölçülen değerler hareketli elektrodun konulduğu noktaya atanmaktadır (Şekil 1.13).



Şekil 1.11. Baza İndirgeme (Toplam Alan) Dizilimi/ Ölçü Tekniği

Bu tez çalışmasında baza indirgeme ölçü tekniği ile toplanan verilere ilk olarak drift (kayma) düzeltmesi işlemi uygulanmıştır. Doğal potansiyel verilerine drift düzeltmesi yapmanın temel amacı, ölçülen verilerin zaman içinde ortaya çıkan yavaş ve sürekli değişimlerden arındırılmasını sağlamaktır. Drift, genellikle cihaz hassasiyetindeki değişiklikler, çevresel koşullar, sıcaklık değişimleri veya diğer harici faktörler nedeniyle oluşur. Bu tür sapmalar, doğal potansiyel ölçümlerini etkileyerek verilerin güvenilirliğini azaltabilir. Dolayısıyla bu etkinin giderilmesi gerekmektedir. Zamana bağlı kayma, ardışık baz istasyonu okumaları arasındaki sürüklenmenin lineer olduğu varsayılarak;

$$V_{cj}=V_j-[V_{pi}+(T_j-T_{pi})(V_{ni}-V_{pi})/(T_{ni}-T_{pi})+V_0] \quad (5)$$

eşitliği kullanılarak yapılmaktadır. Burada V_{cj}, j hattındaki T_j zamanında ölçülen Vj voltajı için kayma düzeltilmiş SP değeridir; V_0, ilk baz istasyonundaki ilk okuma olan referans SP değeridir; V_{pi} ve V_{ni}, sırasıyla i baz istasyonundaki önceki ve sonraki okumalar olup, bu okumaların zamanları sırasıyla T_{pi} ve T_{ni} 'dir (Wanfang vd., 1999).

Doğal potansiyel (SP) yönteminden elde edilen verilerden derinlik ve geometrik yapıyı hesaplamak için çeşitli yaklaşımlar kullanılmaktadır (Yüngül,1991; Çağlar, 1996; Stoica & Moses, 2005; Iuliano vd., 2002; Srivastava vd., 2014). Bu yaklaşımlar genel olarak; grafiksel teknikler, spektral analiz teknikleri, tomografik teknikler, sayısal çözümler ve küresel optimizasyon teknikleri olarak sınıflandırılmaktadır. Bu tekniklerden;

Grafiksel teknikler en eski yöntemler olup, çoğunlukla nomogramların ve karakteristik eğrilerin kullanımına dayanmaktadır (Yüngül, 1950; Rao vd., 1970; Bhattacharya & Roy, 1981; Atchuta Rao & Ram Babu, 1983; Agarwal, 1984; Sundararajan & Srinivas, 1996; Çağlar, 1991; Albora, 2019).

Spektral analiz tekniklerinden; Periodogram Yöntemi (PM), frekans alanında enerji dağılımını analiz ederek anomali kaynaklarının derinliğini tahmin etmektedir (Cooley & Tukey, 1965; Stoica ve Moses, 2005). Multi Taper Yöntemi (MTM) spektral tahminlerin varyansını azaltmak için birden fazla taper (veya spektral pencere) seti kullanan bir yöntemdir. Her pencere, veri segmentlerinin farklı şekillerde ağırlıklandırılmasıyla hesaplanarak farklı spektral tahminler elde edilmekte olup bu tahminlerinde ortalaması alınarak daha güvenilir bir spektral yoğunluk elde edilmektedir (Thomson, 1982; Percival & Walden, 1993). Maksimum Entropi Yöntemi (MEM) ise spektrumun maksimum entropi tahminini kullanarak, yüksek çözünürlüklü derinlik tahminleri yapar (Burg, 1975; Ulrych & Bishop, 1975; Kay & Marple, 1981; Dimri, 1992).

Tomografik Tekniklerinden; yer altı yük oluşum olasılığı fonksiyonu (COP), SP verilerini çapraz ilişki yöntemiyle analiz edilerek, yer altındaki elektrik yüklerinin olasılık dağılımını belirlemektedir (Di Maio & Patella, 1994; Patella, 1997). Elektrik dipol oluşum olasılığı (DOP) fonksiyonu ise COP yaklaşımına benzer şekilde, SP verilerinin çapraz korelasyon yöntemiyle sentetik elektrik alan verileri ile karşılaştırılması yoluyla hesaplanan DOP fonksiyonu, yer altındaki dipol oluşumlarının olasılıklarını belirlenmektedir (Iuliano vd., 2001; Revil vd., 2001; Iuliano vd., 2002).

Sayısal Çözümler tekniklerinden, spektral analiz tekniği, SP verilerinin spektral özelliklerini inceleyerek, kaynak derinliğini belirlenmektedir (Atchuta Rao vd., 1982; Rao & Mohan, 1984; Asfahani vd., 2001; Das & Agarwal, 2012). Fark denklemleri çözümleri tekniği ise, çeşitli sayısal yöntemler kullanılarak çözülmektedir. Bu olay genellikle bilgisayar tabanlı algoritmalar yardımıyla gerçekleştirilmektedir. Fark denklemleri çözümleri, SP verilerinin elektriksel özelliklere dönüştürülmesini sağlayarak yeraltı yapılarının anomali kaynaklarının derinliğini tahmin etmektedir (Jardani vd, 2006; Agarwal & Srivastava, 2009; Li & Yin, 2012).

Küresel Optimizasyon Tekniklerinden; en küçük kareler ters çözüm, anomali verilerinin en küçük kareler yöntemi ile analiz edilmesine dayanmaktadır (Abdelrahman vd, 2006a, 2006b; Essa vd, 2008; Essa, 2011). Genetik algoritmalar**,** SP verilerini optimize ederek, anomali kaynak parametrelerini tahmin etmektedir (Göktürkler & Balkaya, 2012).

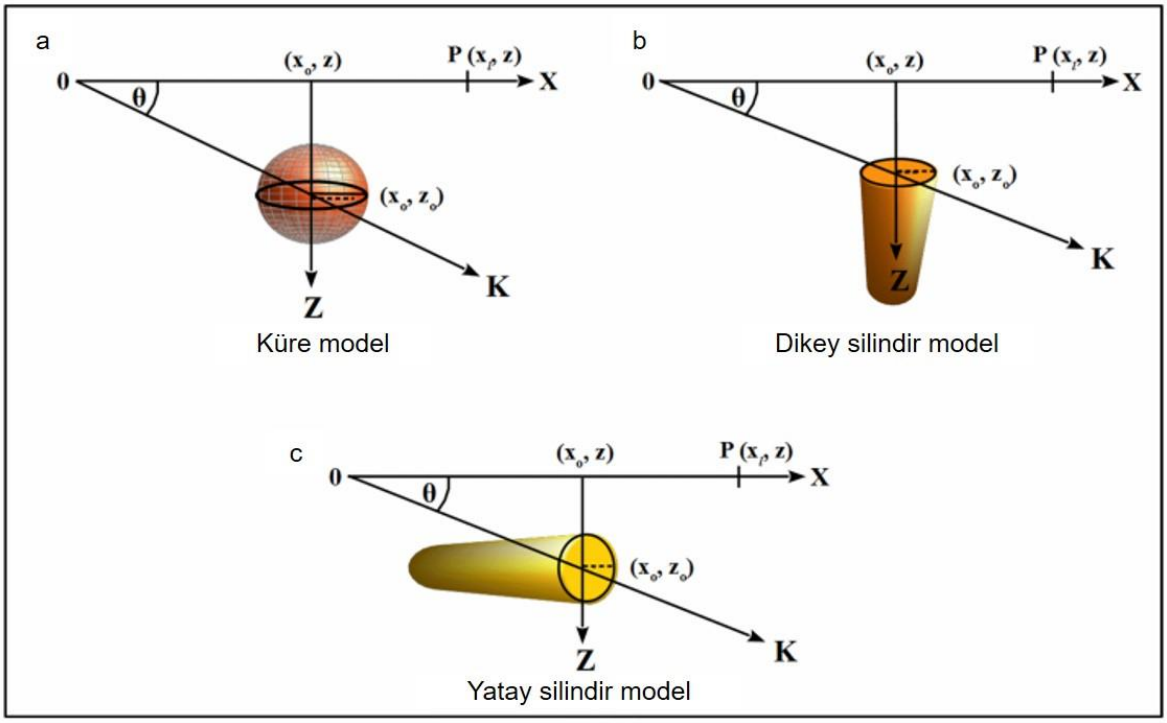
Parçacık sürü (swarm) optimizasyonu, bir parçacık sürüsü kullanarak, kaynak parametrelerinin tahminini yapmaktadır (Monteiro Santos, 2010; Pekşen vd., 2011). Benzetimli tavlama (Simulated Annealing), küresel optimizasyonu kullanarak, anomali kaynaklarının en iyi tahminlerini bulmaktadır (Biswas & Sharma, 2014). Karınca kolonisi optimizasyonu (ant colony optimization), karıncaların hareketlerini simüle ederek, en iyi çözümü aramaktadır (Gupta vd., 2012).

Bu çalışmada, yer altının yorumlabilir modelini ortaya çıkarmak için; geometrisi bilinen basit cisimlerin (küreler ve silindirler) doğal potansiyel verilerinin yorumlanması için bir görüntüleme yaklaşımı (Mehanee vd., 2023) sunulmaktadır. Bu yaklaşımın amacı, doğal potansiyel profilinin başlangıç noktasının yanı sıra anomali veren cismin derinliğini, polarizasyon açısını ve şekil indeksini elde etmektir. Yaklaşım, gözlemlenen doğal potansiyel verilerinin analitik sinyali ile varsayılan bir açıklayıcı modelin hesaplanan doğal potansiyel tepkisinin analitik sinyali arasındaki korelasyon katsayısını (R-parametresi) tahmin etmektedir. Tercih edilen açıklayıcı model, maksimum korelasyon katsayısına ulaşan modeldir. Yorumlayıcı model için görüntüleme yaklaşımından çıkarmayı amaçladığımız, derinlik, elektrik dipol momenti, polarizasyon açısı ve merkez parametrelerdir. Bu parametreler korelasyon katsayısının en yüksek değeriyle ilişkilidir (Mehanee vd., 2023).

Şekil 1.14 boyunca bir gözlem noktasında (x_j, z) bazı basit geometrik kaynakların doğal potansiyel belirtisi (anomalisi) Yüngül (1950) ve Mehanee (2014) tarafından;

$$V(x_j, x_0, z, z_0, q, \theta, K) = K\frac{(X_J - X_0)\cos\theta + (z_0 - z)\sin\theta}{[(x_j - x_0)^2 + (z_0 - z)^2]^q},\ j = 1,2,3,\ldots\ldots,n \qquad (6)$$

eşitliği ile verilmektedir. Bu eşitlikteki x_j (m), Şekil 1.14'te görülen ölçüm istasyonunun koordinatı, j ölçüm istasyonunun indeksi, x_0 (m) doğal potansiyel profilinin başlangıç noktası, z_0 ve z (m) sırası ile gömülü cismin ve gözlem istasyonunun koordinatları, θ (derece) polarizasyon açısı, q (boyutsuz) şekil faktörü (küre için q= 1.5, yatay silindir ve yarı sonsuz dikey silindir için 1 ve 0.5), n veri noktası sayısı ve K elektrik dipol momentidir. K biriminin (mVm^{2q-1}), şekil faktörünün (q) fonksiyonu (Abdelrahman vd., 2006) olduğu, θ'nın saat yönünde ölçüldüğü (Şekil 1.14) bilinmektedir (Mehanee, 2022).



Şekil 1.12. Çeşitli temel şekiller için farklı geometrik yapılar. a) küre, b) düşey silindir, c) yatay silindir (Albora, 2019'dan alınmıştır)

Yaklaşımda kullanılan Analitik Sinyal (AS) ifadesi;

$$A_s(x_j, z) = \frac{\partial V}{\partial x_j} - i\frac{\partial V}{\partial z}, \quad i = \sqrt{-1} \tag{7}$$

eşitliğiyle verilmektedir (Nabighian, 1972). Burada $\partial V/\partial z$ ve $\partial V/\partial x_j$ doğal potansiyel anomalinin düşey ve yatay türevleridir. Doğal potansiyel anomalinin analitik sinyal genliği $|A_s(x_j, z)|$) Nabighian (1972) tarafından;

$$\left|A_S(x_j, z)\right| = \sqrt{(\frac{\partial V}{\partial x_J})^2 + (\frac{\partial V}{\partial z})^2} \tag{8}$$

eşitliği ile ifade edilmektedir.

Eşitlik (6)'in düşey ve yatay türevlerini alınıp, elde edilen sonuçlar eşitlik (8)'te yerine yazılarak;

$$|A_s(x_j, z)| = |K| \frac{\sqrt{((x_j - x_0)^2 + (z_0 - z)^2)[((x_j - x_0)^2 + (z_0 - z)^2 + 4q(q-1)((x_j - x_0)\cos(\theta) + (z_0 - z)\sin\theta)^2]}}{[(x_j - x_0)^2 + (z_0 - z)^2]^{q+1}} \quad (9)$$

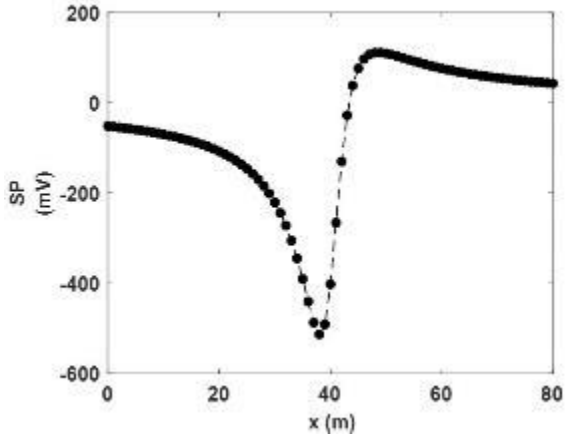
eşitliği elde edilmektedir (Mehanee vd., 2023).

R-parametresi (korelasyon katsayısı); hem profil boyunca gözlemlenen gerçek doğal potansiyel verilerinin analitik sinyal genliğine (A_{so}) hem de varsayılan bir kaynak (örneğin bir küre) tarafından üretilen hesaplanmış (teorik) doğal potansiyel verilerinin (A_{st}) analitik sinyal genliğine bağlı olarak;

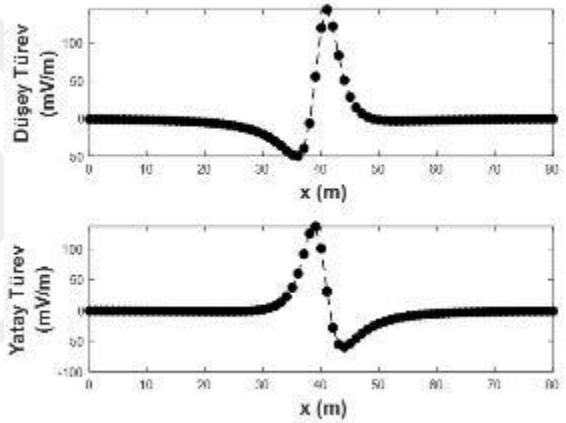
$$R = \frac{\sum_{j=1}^{n} [A_{so}]_j [A_{st}]_j}{\sqrt{\sum_{j=1}^{n} [A_{so}]_j^{\,2} + \sum_{j=1}^{n} [A_{st}]_j^{\,2}}} \quad (10)$$

eşitliği ile hesaplanmaktadır. Analitik sinyal (A_{so}), eşitlik (8) kullanılarak sayısal olarak değerlendirilirken (Barde-Cabusson, 2021), varsayılan bir kaynağın analitik sinyali (A_{st}) eşitlik (9) kullanılarak hesaplanmaktadır (Fedi ve Abbas, 2013).

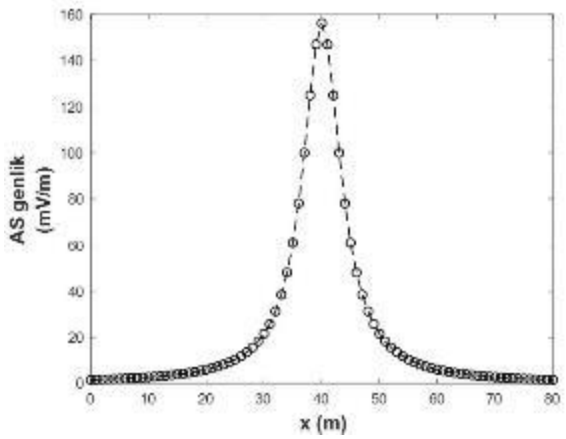
Burada önerilen yaklaşım (Mehanee vd., 2023), silindir kaynak modelinin ürettiği sentetik doğal potansiyel veriler üzerinde test edilmiştir. İlk olarak, yatay silindir şeklindeki idealize edilmiş bir cismin (K= 2500 mVm^{2q-1}, z_o=4 m, θ= -40◦, x_o= 40 m ve profil uzunluğu= 80 m) doğal potansiyel anomalisi (Şekil 1.15), eşitlik (6)'dan hesaplanmıştır. Daha sonra Şekil 1.15'deki doğal potansiyel anomalinin potansiyel türevleri (yatay ve dikey) eşitlik (7) kullanılarak oluşturmuştur (Şekil 1.16). Ardından, eşitlik (8) bağıntısı kullanılarak analitik sinyal genliği (Şekil 1.17) hesaplanmıştır. Daha sonra, seçilen başlangıç değerleri kullanılarak eşitlik (9) bağıntısıyla, hesaplanan analitik sinyal bulunmuştur. Son olarak eşitlik (10)'da, gözlemlenen gerçek doğal potansiyel verilerinin analitik sinyal genliği (A_{so}) ve hesaplanmış doğal potansiyel verilerinin analitik sinyal genliği (A_{st}) yerine yazılıp, R-parametresi hesaplanarak, R parametresinin görüntüsünü Şekil 1.18'de sunulmaktadır. R parametresinin maksimum değeri, gömülü yapının gerçek model parametrelerini gösteren siyah nokta ile işaretlenmiştir.



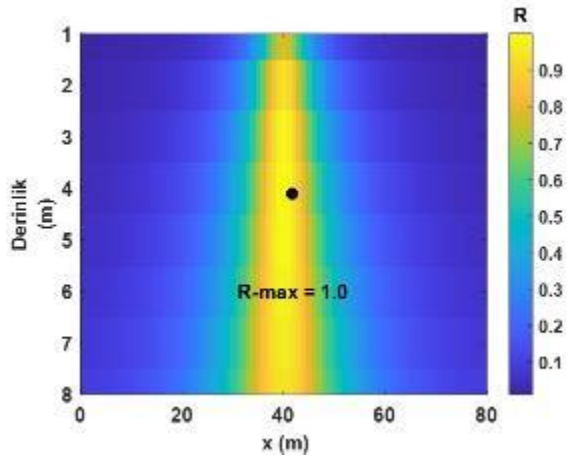
Şekil 1.13. Yatay silindir modelinden üretilen *SP* anomalisi



Şekil 1.14. Şekil 2'de gösterilen *SP* verilerinin yatay ve düşey türevleri



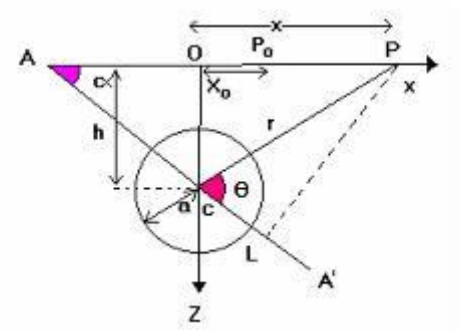
Şekil 1.15. Analitik sinyalin (AS) genliği



Şekil 1.16. R-parametresinin (R) görüntüsü

Bu çalışmada gerçek arazi verilerinin, önerilen yaklaşımla değerlendirilmesine geçilmeden önce grafiksel yöntem olan nomogram yöntemi (Çağlar, 1991) kullanılarak, *SP* haritası boyunca özellikle *SP* ve *ERT* verilerinin profillerinin üzerinden geçtiği kapanım gösteren alanlanlardan alınan kesitlerden elde edilen anomalilerin; derinlik ve θ parametreleri hesaplanmıştır. Bu parametrelerin nomogram yönteminden elde edilmesinin amacı, uygulanacak yaklaşımda bu verileri kullanarak, gözlemlenen veriye en yakın hesaplanan veriyi oluşturmaktır.

SP verileri yapısının basit geometrik şekiller olduğu varsayılarak modelleme çalışmaları yapılmaktadır. Bu modellemeler yapılırken, öncelikle anomali veren kaynağın geometrik şekline (nokta kaynak, küre, silindir, plaka vb.) karar verilmektedir (Çağlar, 1991). Ardından, seçilen şekle bağlı olarak matematiksel teori geliştirilerek teorik belirtiler elde edilmektedir. Daha sonra bu teorik eğriler ile sahadan elde edilen anomaliler arasında bir benzerlik aranmaktadır. Böylece elde edilen teorik modelin parametreleri, aranan yeraltı kütlesinin parametrelerini belirlenmesine yardımcı olmaktadır (Albora, 2019).



Şekil 1.17. Tekdüze bir ortamdaki küre modeli. a=Yarıçap, h=Merkeze olan derinlik, O=Merkez noktanın yeryüzündeki iz düşümü, AA'=Polarizasyon ekseni, θ=AA' doğrultusunun x ekseni ile yaptığı açı, P= Yeryüzündeki ölçü noktası, x= P'nin O noktasına olan uzaklığı, r= P ile merkezi birleştiren doğrultu uzaklığı, α= r ile AA' arasındaki açı, $P_{0=}$ sıfır geriliminin gözlendiği nokta, $x_0=P_0$ ile O noktası arasındaki uzaklıktır (Çağlar, 1991)

Tekdüze bir yeraltı ortamında dik koordinat sisteminde yer alan küre (Şekil 1.19) ve silindirik jeolojik yapının yeryüzündeki P (x, 0, 0) noktasında oluşacağı *SP* gerilmeleri (Bhattacharya & Roy, 1981);

$$V(x,0,0) = M\frac{xcos\theta - hsin\theta}{(x^2+h^2)^{3/2}} \qquad \text{(küre)} \tag{11}$$

$$V(x,0,0) = M\frac{xcos\theta - hsin\theta}{x^2 + h^2} \qquad \text{(silindir)} \tag{12}$$

gibidir. Bu ilişkilerden yararlanarak, her iki model için;

$\frac{|V_{min}|}{V_{max}} = F(\theta) \longrightarrow$ (küre model)

$\frac{|V_{min}|}{V_{max}} = F_1(\theta) \longrightarrow$ (silindir model)

ilişkilerinin açık yazılımı yapılmıştır (Rajan vd., 1986). Öte yandan, *SP* anomalisinin minumum ve maksimum gerilimi gözlenen noktaların absis değerleri sırasıyla x_1 ve x_2 olarak verilip, bunların arasındaki uzaklık d ile tanımlandığında;

$$h = \frac{2d}{3}\frac{1}{(tan^2\,\theta - 8/9)^{1/2}} = f(\theta, d) \quad \text{küre} \tag{13}$$

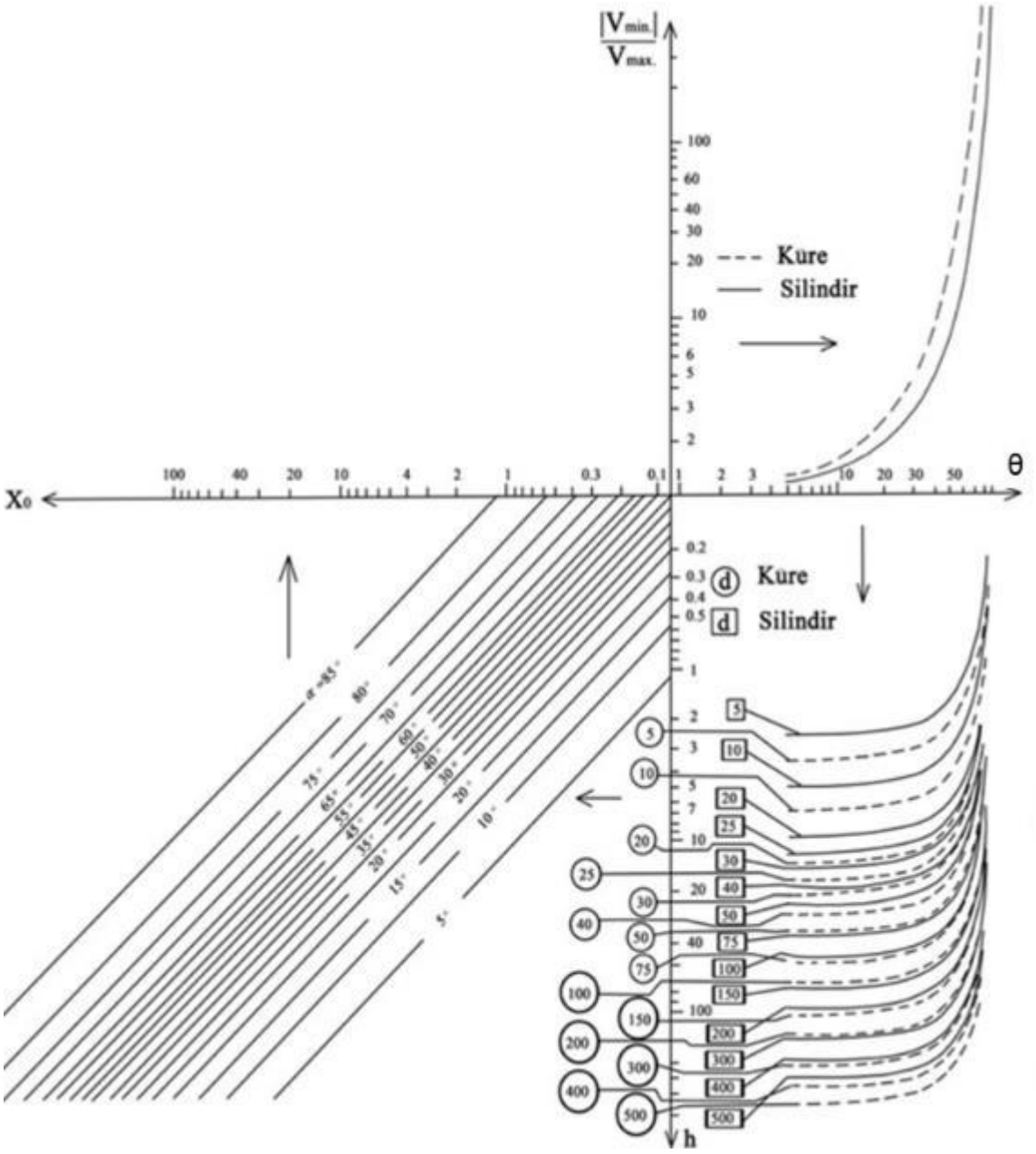
$$h = \frac{d}{2}cos\alpha = f_1(\theta, d) \quad \text{silindir} \tag{14}$$

ilişkileri elde edilmektedir. V(x,0,0) bağıntıları sıfıra eşitlenip x yerine x_0 yazıldığında küre ve silindir için;

$$h = x_0 \cot\theta = \phi(x_0, \theta) \tag{15}$$

bağıntısı elde edilmektedir.

Yukarıda geliştirilen bağıntıların, θ polarizasyon açısının fonksiyonu olarak değerlendirilmelerine dayandırılarak çizilen nomogram, Şekil 1.20'de sunulmaktadır. Bu nomogram için kullanılan eksenler logaritmik olarak seçilmiştir. Nomogramın, değerlendirme sırasındaki kullanma yönü ok işaretleri ile gösterilmiştir.



Şekil 1.18. Küre ve silindir modeline göre hazırlanmış *SP* anomali değerlendirme Nomogram'ı (Çağlar, 1991)

Nomogram yönteminde sırası ile aşağıdaki aşamalar uygulanmaktadır.

1. İlk olarak elimizdeki SP kontur haritasından farklı doğrultular boyunca kesit alınarak SP anomalileri elde edilmektedir.
2. Bu anomalilerden Vmin, Vmax ve d değerleri okunarak, |Vmin|/Vmax değeri elde edilmektedir. Değerlerin max ve min olduğu uzaklıklar arasındaki farktan d hesaplanmaktadır.

3. Nomogram'ın |Vmin|/Vmax ekseninde belirlenen değerinden θ yatay eksenine paralel olarak çizilen doğrultunun küre (kesikli çizgi) veya silindir (sürekli çizgi) eğrisini kestiği noktadan θ eksenine inilen dikme ile θ açısı bulunmaktadır. Bu açı aranan polarizasyon açısıdır.
4. θ eksenini kesen doğrultu Nomogram'ın sağ alt kısmına doğru uzatılarak d değerine ve küreye/silindire ait eğri kestirildikten sonra h eksenine dik olan yeni bir doğrultu çizilerek h değeri elde edilmektedir.
5. Doğrultu polarizasyon eğrisi kestirilerek tekrar x_0 eksenine dik yeni bir doğrultu çizilerek x_0 bulunmaktadır.

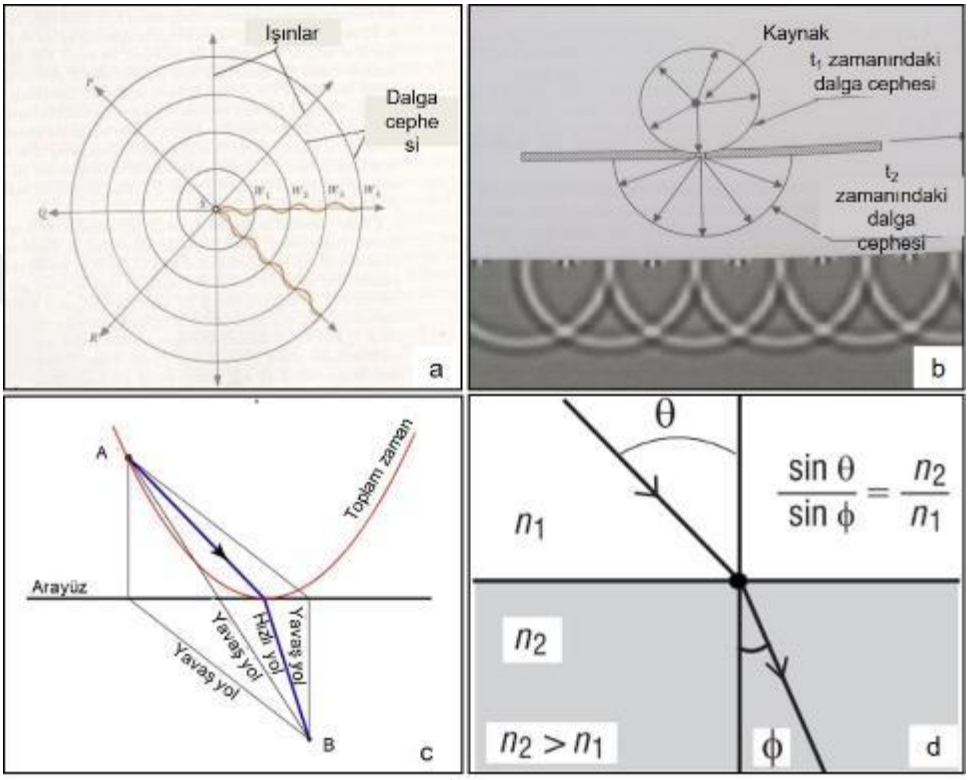
1.8.3. Sismik Kırılma Tomografi (Seismic Refraction Tomography/*SRT*) Yöntemi

Sismik kırılma yöntemi, zemin ve kayaların fiziksel özelliklerini belirlemek için sıklıkla kullanılan jeofizik tekniklerden biridir (Ugwu & Nwankwoala, 2008; Ayolabi vd., 2009). Bu yöntem, mühendislik uygulaması için kaya kalitesini, ana kaya derinliğinin, kabuksal yapının ve tektoniğin belirlenmesi gibi alanlarda kullanılmanın (Asokhai vd., 2008; Chiemeke & Aboh, 2012; Anomohanran, 2013) yanı sıra, fay zonları, karstik alanlar (Carpenter vd., 2003; Hiltunen & Cramer, 2008; Chalikakis, 2011; Imposa vd., 2018; Cueto vd., 2018), su toplayan katmanlar (akifer), ayrışmış tabaka kalınlığı, olası çatlak bölgeler ve yeraltı jeolojisini belirlemede de (Young vd.,1998; Narwold & Owen, 2002; Ugwu & Nwankwoala, 2008; Demirci vd., 2008; Sayed vd., 2012; Orojah vd., 2014; Cueto vd., 2018) yaygın olarak kullanılmaktadır.

Sismik kırılma yöntemi, farklı hızlardaki yeraltı katmanları arasındaki ara yüzeylerde kırılan sismik dalgaların seyahat süresinin ölçülmesi esasına dayanmaktadır (Ayolabi vd., 2009). Dalganın izlediği yol bilgileri ve seyahat zamanı kullanılarak tabakaların hızı belirlenmekte, bu hız bilgileride kullanılarak tabakaların kalınlıkları hesaplanmaktadır. Bu yöntemin kuramsal esasları Huygens (Longhurst, 1973), Fermat (Moser, 1991; Perlict, 2000) ve Snell (Bryant, 1958; Hanyga & Seredynska 2000) kanunlarına dayanmaktadır.

Kaynaktan yayılan dalgalar, suya atılan taşın oluşturduğu dalgalara benzer şekilde genişleyen daireler biçiminde yayılmaktadır. Bu dalgalar yer içerisinde küresel olarak yayılmaktadır. Küreyi oluşturan yüzeyler dalga cephesi olarak adlandırılmaktadır (Şekil 1.21a). Huygens kanununa göre, dalga cephesi üzerinde bulunan her bir nokta, kendi başına yeni bir dalga kaynağı gibi davranmaktadır. Böylece her bir nokta, uzayda küresel dalga

yayan kaynak olmaktadır (Şekil 1.21b). Fermat prensibi, dalga cephesine dik ışın yollarının geometrisi ile ilişkilidir. Bunun anlamı, bir ışının, iki nokta arasını en kısa zamanda gideceği en kısa yolu izlemesidir (Şekil 1.21c). Snell kanunu, farklı yayılma hızına sahip ortamlardaki ışınların kırılmasını, açılar ve hızlar arasındaki ilişki ile açıklanmaktadır (Telford vd., 1990) (Şekil 1.21d).



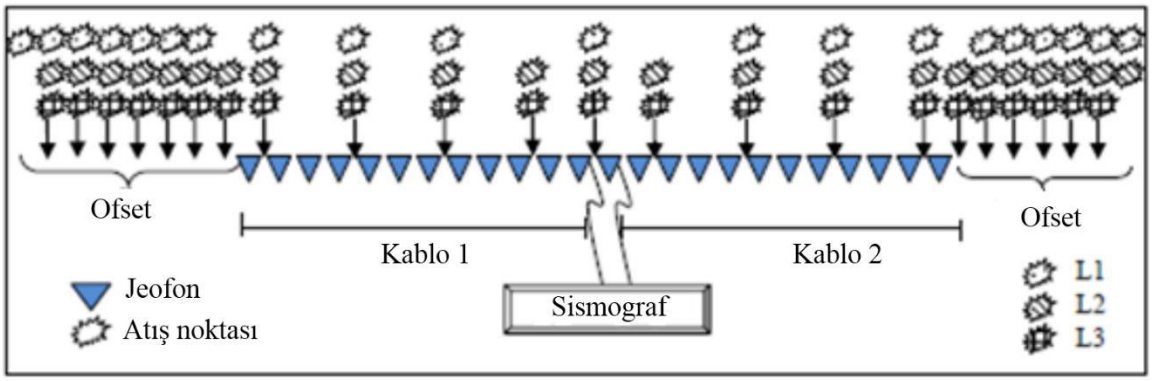
Şekil 1.19. Sismik kırılma yönteminin dayandığı kuramlar. a) Dalga cephesi ve ışın arasındaki ilişki, b) Huygens prensibine göre düzlem dalga yayınımı (Kara, 2010'dan alınmıştır), c) Fermat kanunu (Nolte, 2018'den değiştirilmiştir), d) Snell yasası (Vandergriff, 2008'den alınmıştır)

Bu yöntemde, yer yüzeyinde yapay bir kaynak (balyoz, ağırlık düşürme, kalas ve dinamit vb.) tarafından oluşturulan boyuna (P-dalgaları) ve enine (S-dalgaları) dalgaların bir kısmı, yer içinde elastik empedans değişimi olan yüzeylerden kırılarak ya da doğrudan seyahat ederek yüzeydeki alıcılar (jeofonlar) tarafından zamanın fonksiyonu olarak kayıt edilmektedir. Kayıt edilen verilerin, ilk varış zamanları analiz edilerek, yeraltının yapısal özellikleri, yer içine ait P ve S dalga hızları ve bu hızlara bağlı olarak yerin bazı mühendislik parametreleri hesaplanarak yeraltı yapısı değerlendirilmektedir (Telford vd., 1990).

Elde edilen sismik veriler üzerindeki ilk varış zamanları okunarak, bu zaman değerleri uzaklığın fonksiyonu olan uzaklık (X) – zaman (T) grafiği olarak çizilmektedir. X-T grafiğinden elde edilen doğru eğimlerinin tersi alınarak araştırılan ortamın hız değerleri elde edilmekte ve bu hız değerleri kullanılarak P dalga hız dağılımı ortaya çıkarılmaktadır.

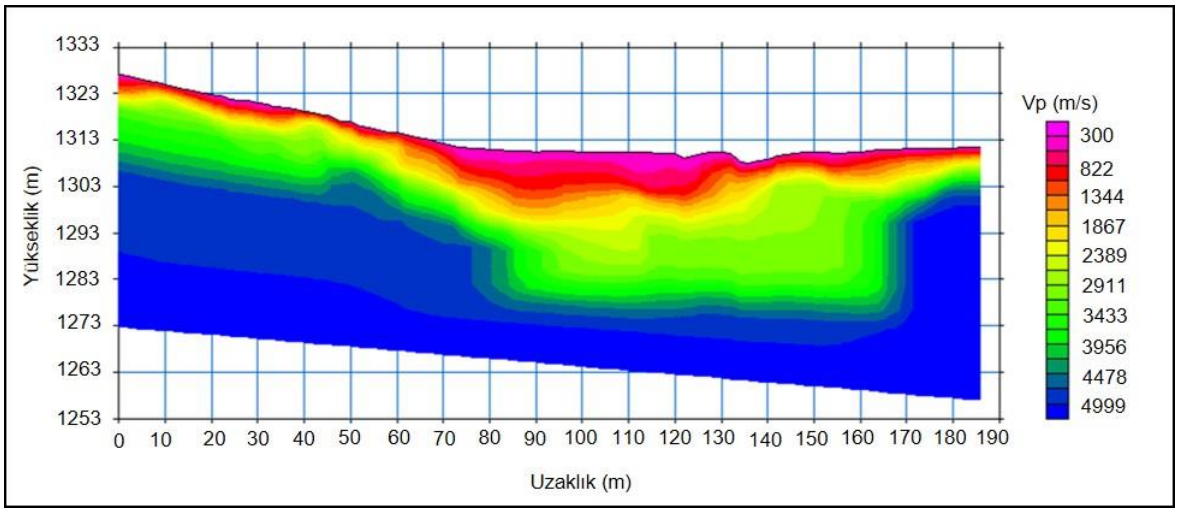
Sismik kırılma verilerinin değerlendirilmesinde; gecikme zamanı, genelleştirilmiş karşılıklı yöntem ve sismik kırılma tomografi gibi yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden sismik kırılma tomografi yöntemi son yıllarda gelişen bilgisayar teknolojisi sayesinde, diğer yöntemlere nazaran daha etkin kullanılmaya başlanmıştır.

Kırılma verilerinin değerlendirilmesinde kullanılan tomografi yöntemi; yeraltının yanal ve düşey yöndeki hız değişimlerini etkin bir şekilde belirleyebilmektedir (Sheehan vd., 2005). Bir profil üzerinden *SRT* yöntemini ile veri toplanırken kullanılan kaynak ve jeofonların düzeneği ve kaynak ölçüm noktaları Şekil 1.22'de gösterilmektedir.



Şekil 1.20. Sismik kırılma tomografi ölçüm alma düzeneği (Azwin vd., 2013)

Bu tez çalışmasında elde edilen sismik kırılma verileri *SeisImager (Geometrics)* programı kullanılarak değerlendirilmiştir (SeisImager/2D, 2005). Bu programın temeli, doğrusal olmayan en küçük kareler yöntemine dayanmaktadır. Programda ilk olarak her bir jeofonda kayıt edilen sismik izler üzerindeki ilk varış zamanları piklenerek, X-T grafikleri elde edilmektedir. Tomografik çözümde başlangıç modeli olarak oluşturulan yer altı modeli kullanılmaktadır. Bu modelin eş zamanlı yinelemeli çözüm tekniği ile çözümlenmesinden yer altına ait P dalgası hız dağılımı elde edilmektedir. Daha sonra ışın izleme yöntemi kullanılarak hesaplanan eğriler ile gözlenen eğrilerin çakıştırılması sağlanmaktadır. Bu aşamada çakışma, beklenen hata oranıyla sağlandıysa işleme son verilmektedir. Böylece araştırılan yer altı yapısı Vp hız dağılımı elde edilmektedir (Şekil 1.23).



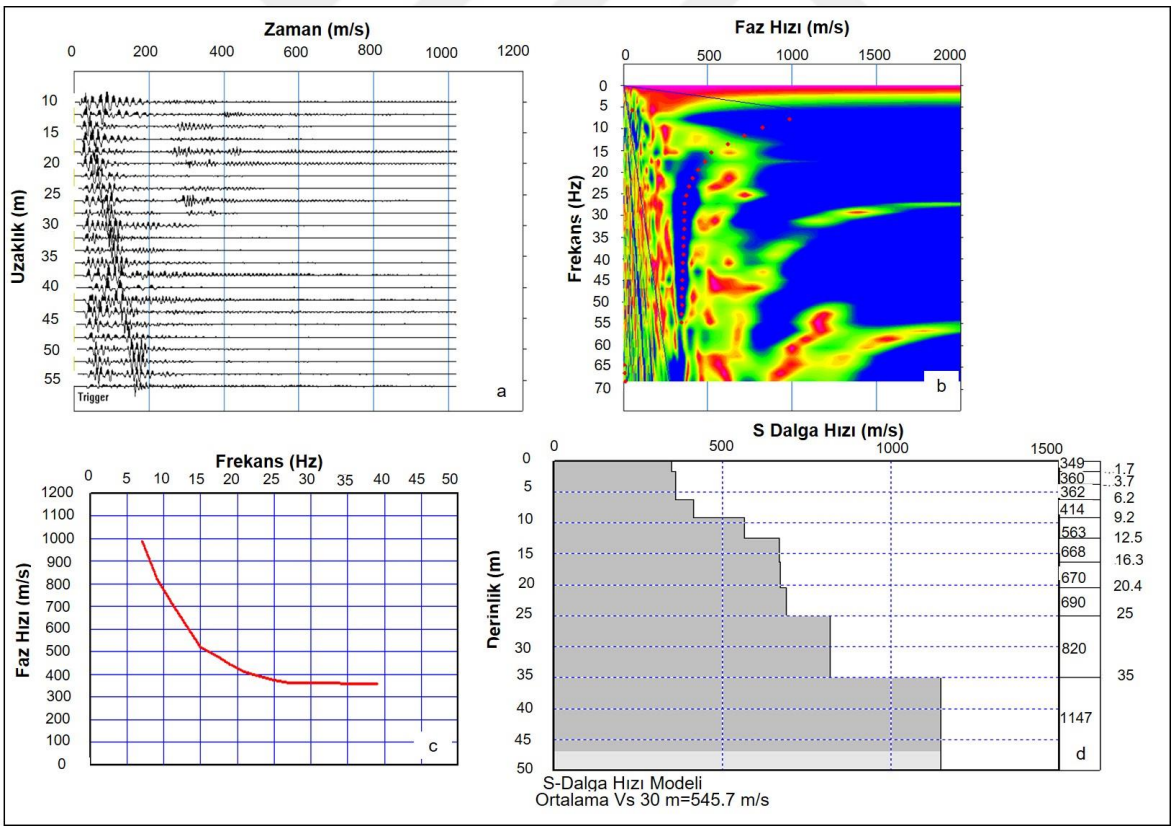
Şekil 1.21. Yeraltı P dalga hızlarının tomografik modeli

1.8.4. Yüzey Dalgalarının Çok Kanallı Analiz Yöntemi (*Multichannel Analysis Surface Waves/MASW*)

Yüzeye yakın araştırmalar için kullanılan geleneksel sismik yaklaşımlar genellikle birkaç metreden yüzlerce metre derinliğe kadar görüntüleme yapabilen, yüksek çözünürlüklü yansıma veya kırılma araştırmalarıdır. Bu araştırmalardan elde edilen sismik sinyaller, 50 Hz' den daha yüksek frekanslara sahip dalgacıklardan oluşmaktadır. Yüzey dalgalarının çok kanallı analizi (*Multichannel Analysis Surface Waves/MASW*) yöntemi ise daha düşük frekanslardaki (örneğin; 1-30 Hz) yüzey dalgalarıyla ilgilenmekte ve çok daha sığ derinlik bilgisi (birkaç metreden onlarca metre) sağlamaktadır (Park vd., 2007). Bu yöntemin temeli, tabakalı ortamlarda yayılan Rayleigh dalgaları kullanılarak kayma dalga hızının elde edilmesi esasına dayanmaktadır (Xia vd., 1999). Bu dalgalar, dispersiyon özelliğine sahiptir. Bu özellik, farklı frekansların farklı yayılım hızına ait olması anlamına gelmektedir. *MASW* yönteminde, araştırma profili boyunca çok sayıda alıcı, hedef derinliğine göre belirli aralıklarla yerleştirilerek veriler toplanmaktadır. Bu yöntemde kaynak olarak genellikle balyoz kullanımı tercih edilmektedir. Veriler araştırma profili boyunca genellikle düşük frekanslı alıcılar kullanılarak elde edilmektedir (Park vd., 2002).

MASW verisi değerlendirilerek, S dalga (Vs) hız yapısının ortaya çıkarılması üç aşamada gerçekleştirilmektedir. Birinci aşamada, jeofonlar araştırma profilinin üzerine belli aralıklarla yerleştirilerek *MASW* verisi toplanmaktadır (Şekil 1.24a). İkinci aşamada, elde edilen veriden dispersiyon eğrisi elde edilmektedir (Şekil 1.24, c). Dispersiyon eğrisi elde edilirken birkaç farklı yöntem (Fourier, Radon ve faz kayması) kullanılmaktadır (Yılmaz,

1987; Park vd., 1998; Luo vd., 2008). Bu yöntemlerden genellikle en yaygın kullanılan yöntem faz kayması yöntemidir. Bu yöntemde araziden toplanan yüzey dalgası kayıtları, 'Hızlı Fourier Dönüşümü' (Park vd., 1998) yoluyla ayrı frekans bileşenine ayrıştırılmaktadır. Daha sonra, belirli bir faz hızı için, belirli bir ofsete karşılık gelen zaman gecikmesini telafi etmek adına faz kayma miktarı belirlenmekte ve bu her bir bileşene uygulanmaktadır. Bileşenlerin hepsi bu frekanstaki bir hız fazına karşılık gelen toplanmış bir genlik oluşturmak için toplanmaktadır (Eker, 2009). Üçüncü aşamada ise elde edilen dispersiyon eğrisine yinelemeli bir çözüm uygulanmaktadır. Bu çözümde öncelikle düz çözüm işlemi ile bir başlangıç modeli belirlenmektedir. Bu model, dispersiyon eğrisinin genel karakteristiğinden ve atış kaydı üzerindeki yüzey dalgası paketinin görünür hızları dikkate alınarak oluşturulmaktadır. Daha sonra bu başlangıç modeline, doğrusal olmayan en küçük kareler yöntemini temel alan ters çözüm yöntemi uygulamasıyla bir boyutlu Vs dalgası hız derinlik modeli elde edilmektedir (Şekil 1.24d).



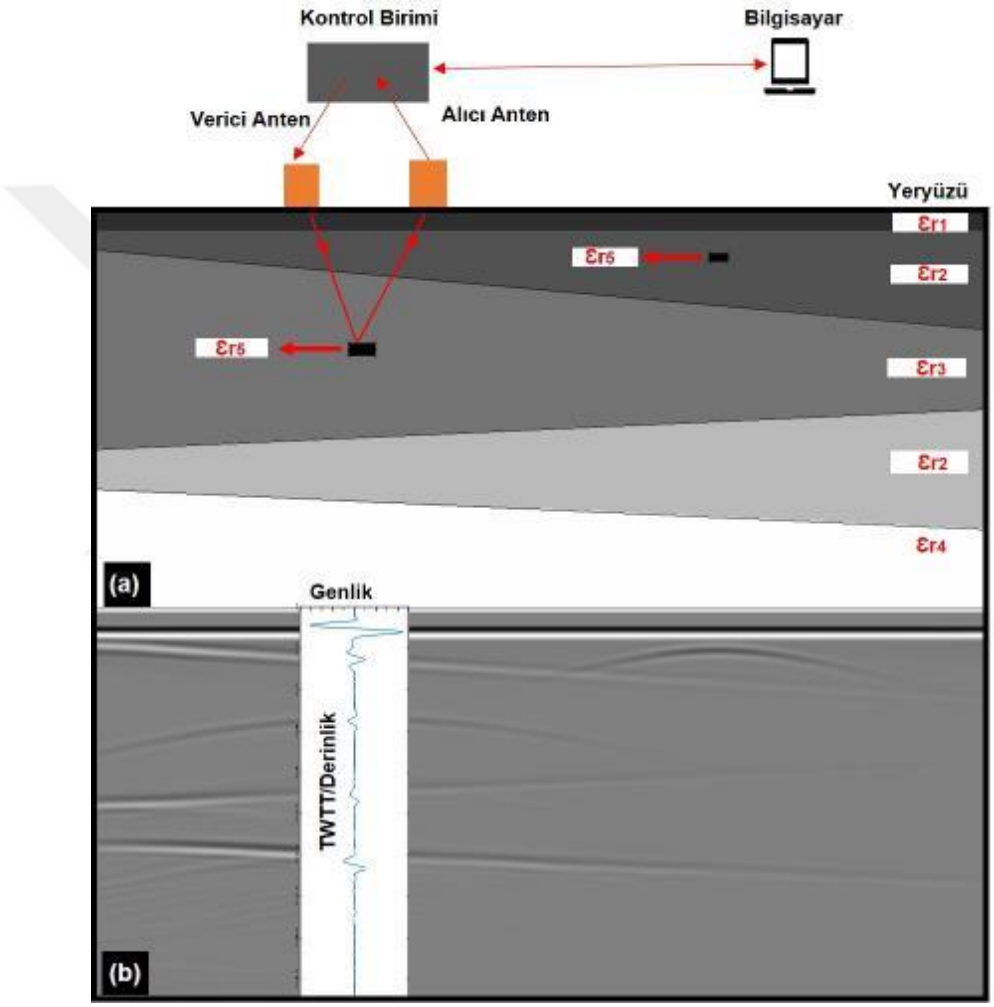
Şekil 1.22. MASW verisinin değerlendirme aşamaları. a) Ham MASW verisi, b) MASW verisinden elde edilen faz hızı-frekans kesiti, c) Dispersiyon eğrisi, d) 1 boyutlu derinlik-Vs modeli

1.8.5. Yer Radarı (*Ground Penetrating Radar*/*GPR*) Yöntemi

Yer Radarı (***G****round* ***P****enetrating* ***R****adar/GPR*) yöntemi, yüksek frekanslı elektromanyetik (*EM*) dalgalar kullanılarak, araştırılan ortamların sığ derinliklerini, yüksek çözünürlükte görüntüleyebilen, veri kazanımının hızlı ve kolay olduğu jeofizik yöntemlerinden biridir (Annan, 2003; Daniels, 2004; Jol, 2009). İlk kez 20. yüzyılın başlarında, özellikle Hulsmeyer'in 1904 yılında Alman patentinde yer alan EM sinyalleri kullanarak uzaktaki gömülü nesneleri bulma fikri ile geliştirilen GPR yöntemi, günümüze kadar donmuş toprak kalınlığının belirlenmesi (Hinkel vd., 2001; Gusmeroli vd., 2016; Sudakova vd., 2021), arkeolojik çalışmalar (Goodman & Woods, 1995; Daniels, 2007; Şeren vd., 2008; Papadopoulos & Sarris, 2016; Conyers, 2023), yapısal araştırmalar (Davis & Annan,1989; Daniels, 2004; Zhao vd., 2021), mühendislik problemlerin çözümü (Grandjean vd., 2000; Alani vd., 2013; Benedetto & Pajewski, 2015; Uncuoğlu vd., 2022), çevre uygulamaları (Knight, 2001; Hubbard, 2005; Sonkamble, 2021), zemin ve tünel araştırmaları (Cardarelli vd., 2003; Xiang vd., 2013; Ye & Ye., 2019; Liu vd., 2023), mermer ve traverten ocakları (Pazzi ve Donati, 2002; Diotallevi, 2007; Öğretmen & Şeren, 2014; Aydın & Başokur, 2018; Alsafa & Shah; 2019), tarım alanları (Hubbard vd., 2005; Liu vd., 2016; Allred vd., 2016; Ruan vd., 2023) ve adli olaylar (Hammon vd., 2000; Barone, 2019) vb. gibi alanlardaki çeşitli problemlere çözüm getirmek için kullanılmaktadır. Bu yöntem ayrıca, karstik boşluklar ve sığ yeraltısuyu aramalarında da kullanılan yüksek çözünürlüklü bir tekniktir (Kowalczyk vd., 2018; Hussain vd., 2020). Karstik boşlukların yerlerinin belirlenmesi için literatürdeki çalışmalara bakıldığında; Doolittle & Collins (1998), Batayneh vd. (2002), Kruse vd. (2006), Barba vd. (2009), Delle Rose & Leucci (2010), Valois vd. (2011), Chalikakis vd. (2011), Şeren vd. (2012), Gomez-Ortiz & Martin-Crespo (2012), Rodriguez vd. (2014), Martinez-Moreno vd. (2014), Tuzer (2015), Pueyo-Anchuela vd. (2015), Gosar & Ceru (2016), Margiotta vd. (2016), Sarıbudak & Hauwert (2017), Hussain vd. (2020) tarafından yapılan çalışmalar ön plana çıkmaktadır. Yeraltı su tablasının derinliğinin tahmin edilmesinde ise; Johnson (1992), Nakashima vd. (2001), Gloaguen vd. (2001), Doolittle vd. (2006), Gomez-Ortiz vd. (2009), Idi vd. (2011), Mahmoudzadeh vd. (2012), Hengari vd. (2013), Dhakate vd. (2015) ve Kowalczyk vd. (2018) tarafından yapılan çalışmaların başarılı sonuçları literatürde yer almaktadır.

Bu yöntemin temelleri elektromanyetik (*EM*) teoriye dayanmaktadır (Annan, 2009). Şekil 1.25a' da gösterilen verici anten tarafından üretilen elektromanyetik bir sinyal,

araştırılan ortam boyunca dalga halinde ilerlerken, dielektriksel özellikleri (manyetik geçirgenlik, dielektrik sabit, elektriksel iletkenlik) farklı ara yüzeylerle karşılaştığında; dalganın bir kısmı geri yansımakta, diğer kısımları saçılabilmekte yâda daha derin ortamlara doğru yayılabilmektedir. Geri yansıyan dalganın genliği ve çift yol seyahat zamanı (nanosaniye cinsinden), yüzeyde bulunan alıcı anten tarafından alınarak, kontrol biriminde kaydedilmektedir (Davis & Annan, 1989).



Şekil 1.23. Yer radarı yöntemi ölçü düzeneği ve elde edilen kesit A) Yer radarı yönteminin genel çalışma prensibi, B) 2B'lu *GPR* kesiti (Alemdağ vd., 2022'den düzenlenmiştir)

GPR sinyali yayılmasında en önemli üç parametre; manyetik geçirgenlik (μ), elektriksel iletkenlik (σ) ve dielektrik sabit (ε)'tir. Bu parametrelerin hepsi karmaşık, yani hem gerçek hem de sanal bir bileşene sahip olabilmektedir (Annan, 2003). Toprak ve metalik olmayan malzemelerin birçoğu manyetik özelliğe sahip değildir. Bu durumda μ'nin değerinin yaklaşık olarak boş alanın manyetik geçirgenliğine (μ_o) eşit olduğu

varsayılabilmektedir (Annan, 2003). İletkenlik (σ), bir ortamın akım akışına izin verme yeteneği ve akımın ne kadar emildiğinin bir ölçüsüdür. Özdirencin tersi olan iletkenlik, GPR sinyalinin zayıflamasında etkilidir (Laurens vd., 2002; Conyers, 2004). Yüksek iletkenliğe sahip malzemeler, zayıf *GPR* verisi oluşturmakta ve penetrasyon derinliğini azaltmaktadır. GPR uygulamalarında iletkenlik; genellikle, ortamın su içeriğine bağlıdır (Topp vd., 1980; Annan, 2003). Dielektrik sabit (ε), EM dalganın yayılması ve yorumlamasında en önemli faktör olup sinyalin hızı ile doğrudan ilişkilidir ve bu nedenle çift yol seyahat zamanından derinlik bilgisi elde etmek için gereklidir. Dielektrik sabit, bir ortamın elektromanyetik enerjiyi depolama ve serbest bırakma yeteneğini tanımlamaktadır (Annan, 2003; Reynolds, 2011). Bağıl dielektrik sabiti, malzemenin mutlak dielektrik sabiti ile boşluğun dielektrik sabiti arasındaki orandır. Bu oran; kayaçlar, çoğu kuru topraklar ve yapı malzemeleri için çoğunlukla 1-88 aralığında olup hava için yaklaşık 1, su için ise 81'dir (Annan, 2003; Conyers, 2016, Reynolds, 2011). Bu malzemelerin herhangi birindeki nem içeriğinin artması, dielektrik sabit ve iletkenliği artırırken, elektromanyetik dalgaların hızını azaltmaktadır (Laurens vd., 2002; Conyers, 2016). Tablo 1.1' de bazı jeolojik malzemelere ait dielektrik sabit, yayılma hızı ve iletkenlik değerleri verilmektedir (Reynolds, 2011).

Tablo 1.1. Çeşitli jeolojik malzemeler için göreli dielektrik sabitleri ve radyo dalga hızları tablosu (Reynolds'den (2011) değiştirilmiştir)

Malzeme	Dielektrik Sabit	Yayılma Hızı (mm/ns)	İletkenlik (mS/m)
Hava	1	100	0
Su (tatlı)	81	33	0.5
Su (tuzlu)	81-88	33	3000
Kum (kuru)	3-6	122-173	10^{-4}-1
Kum (ıslak)	10-32	53-95	0,1-10
Silt (doymamış)	2.5-5	134-190	1-100
Silt (doymuş)	22-30	55-64	≤100
Kil (kuru)	2-5	134-212	2-100
Kil (ıslak)	8-40	47-106	20-1000
Toprak (ince taneli)	41-49	43-47	40
Ortalama Toprak	16	75	5
Granit	5-8	106-120	10^{-3}-10^{-5}
Kireçtaşı (kuru)	4-8	100-113	
Kireçtaşı (ıslak)	6-15	77-122	10-100
Dolomit	6.8-8	106-115	
Bazalt	8	106	

Tablo 1.1'in devamı

Malzeme	Dielektrik Sabit	Yayılma Hızı (mm/ns)	İletkenlik (mS/m)
Şeyl (ıslak)	6-9	100-122	10-100
Kumtaşı (kuru)	4-7	113-150	10^{-3}-10^{-7}
Kumtaşı (ıslak)	6	122	10^{-2}-10^{-3}

Tablodaki veriler Allred vd. (2005), Berthling & Melvold (2009), Cassidy (2009), Johnson vd., (1979), McCann vd., (1988), Kovacs vd., (1995), Morey (1974), Neal (2004), Reynolds (1985), Rutschlin vd., (2007) referanslarından yararlanılarak oluşturulmuştur.

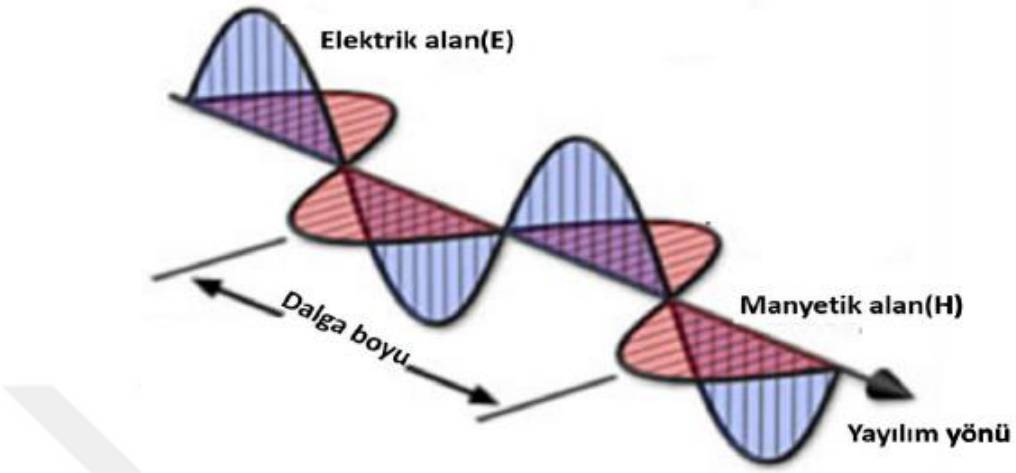
GPR yöntemde ulaşılabilen penetrasyon derinliği ve radar sinyalinin ayrımlılık gücü, araştırılan ortamdaki malzemenin dielektrik özelliklerinin yanı sıra, kullanılan anten frekansına da bağlıdır (Sarı, 2012). Bu yöntemde kullanılan frekans aralığı, 10 MHz-birkaç GHz arasında değişmektedir (Forte vd., 2014). Kullanılan anten frekansı arttıkça; ulaşılabilen derinlik seviyesi azalmakta, ancak çözünürlülük artmaktadır (Davis & Annan, 1989). Dolayısıyla, yüksek frekanslı antenler küçük nesnelerin veya detayların daha iyi görüntülemesine yardımcı olabilirler. Düşük frekanslı antenler ise daha derinlere nüfuz edebilmekte, ancak bu derinlikle birlikte çözünürlülük kaybı meydana gelebilmektedir. Bu nedenle *GPR* araştırmalarında, araştırmanın amacına ve hedefine bağlı olarak uygun anten frekansının seçilmesi önemlidir. Daha derinlerdeki hedef belirlenirken, düşük frekanslı antenlerin kullanılması tercih edilebilirken, yüzeydeki ayrıntıları gözlemlemek için daha yüksek frekanslı antenler tercih edilebilir. Farklı anten frekanslarına göre elde edilen penetrasyon derinliği ve çözünürlük değerleri Tablo 1.2' de gösterilmektedir.

Tablo 1.2. Yer radarı uygulamalarında frekansa göre penetrasyon derinliği.

Frekans (MHz)	Çözünürlük	Toprak (m)	Kaya Ortamı (m)
25	1	35-40	50-60
50	0.5	20-25	30-40
100	0.25	10-12	20-25
250	0.1	4-6	12-15
500	0.05	3.5-4	5-7
800	0.03	1-2	3
1200	0.02	1	2

Homejen ve izotropik bir ortamda *GPR* sinyallerindeki değişken zamanlı elektromanyetik alanlar, elektrik ve manyetik alanların bileşenlerinden meydana

gelmektedir (Şekil 1.26). Bu alanlar, yer altındaki unsurların elektriksel özelliklerinin değişiminin gözlenmesine olanak sağlamaktadır (Robert & Daniels,1996; Annan, 2003).



Şekil 1.24. Elektrik ve manyetik alanın gösterimi (Annan, 2004)

EM enerjiyi matematiksel olarak tanımlamak için Maxwell denklemleri ve katkı eşitliklerinin birlikte kullanılması gerekmektedir. Bunların birleştirilmesi, *GPR* sinyallerinin niceliksel tanımının temelini oluşturmaktadır (Jol, 2009).

Maxwell denklemleri aşağıdaki eşitliklerdeki gibidir;

$$\nabla \times \mathrm{E} = -\partial \mathrm{B} / \partial t \tag{16}$$

$$\nabla \times \mathrm{H} = \mathrm{j} + (\partial \mathrm{D} / \partial t) \tag{17}$$

$$\nabla \cdot \mathrm{D} = \rho \tag{18}$$

$$\nabla \cdot \mathrm{B} = 0 \tag{19}$$

Burada E, elektrik alan şiddeti vektörünü (V/m); B, manyetik akı yoğunluğu vektörünü (T); D, elektrik yer değiştirme vektörünü (C/m²); H, manyetik alan yoğunluğunu (A/m); j, elektrik akım yoğunluğu vektörünü (A/m²); ρ, elektrik yük yoğunluğunu (C/m²) ve t, zamanı (s) göstermektedir.

Katkı eşitlikleri, malzemelerin özelliklerini ölçmek için kullanılmaktadır. Burada katkı eşitlikleri malzeme fiziğini, EM enerjisiyle ilişkilendirmek için kullanılmıştır. Bilindiği gibi,

elektrik iletkenlik (σ), dielektrik sabit (ε_r) ve manyetik geçirgenlik (μ) olarak adlandırılan malzeme özellikleri, elektromagnetik enerjiyi anlamak için kullanılmaktadır. Katkı eşitlikleri;

$$j = \sigma E \tag{20}$$

$$D = \varepsilon E \tag{21}$$

$$B = \mu H \tag{22}$$

şeklinde tanımlanmaktadır (Benter, 2014).

Elektrik iletkenliği, bir elektrik alan bulunduğunda serbest yükler tarafından nasıl bir akımın oluşturulduğunu; dielektrik sabit, bir elektrik alanın etkisi altında kısıtlanmış yüklerin nasıl yer değiştirdiğini; manyetik geçirgenlik ise bir manyetik alanın varlığında, moleküler ve atomik manyetik momentlerin nasıl tepki verdiğini açıklamaktadır (Karczewski vd, 2011).

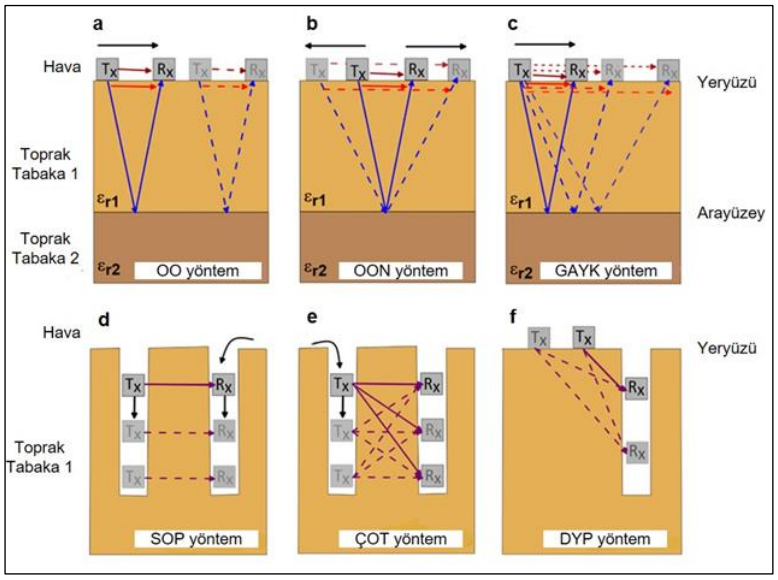
Maxwell denklemlerinden oluşan elektromanyetik dalga denklemi, zaman ortamında manyetik ve elektrik alan açısından iki farklı şekilde türetilebilir. Zaman ortamında elektrik alan ve manyetik alan dalga denklemlerini bulmak için Maxwell denklemleri ve katkı eşitlikleri birlikte kullanılmaktadır. Zaman ortamında elektrik alan dalga denklemi (23) manyetik alan dalga denklemi ise (24) bağıntılarıyla ifade edilmektedir (Salon & Chari, 1999).

$$\nabla^2 E = \mu\sigma\left(\frac{\overrightarrow{\partial E}}{\overrightarrow{\partial t}}\right) + \mu\varepsilon\left(\frac{\partial 2E}{\partial t2}\right) \tag{23}$$

$$\nabla^2 H = \mu\sigma\left(\frac{\overrightarrow{\partial H}}{\overrightarrow{\partial t}}\right) + \mu\varepsilon\left(\frac{\partial 2H}{\partial t2}\right) \tag{24}$$

GPR uygulamaları üç ana veri toplama moduna sahiptir. Bunlar; (1) yansıma profili, (2) çoklu ofset sistemleri (ortak orta nokta (OON) veya geniş açılı yansıma ve kırılma (GAYK)) ve (3) kuyu radarı'dır (Davis & Annan, 1989; Baker vd., 2007; Pathirana vd., 2023). Yansıma profili yönteminde, verici (Tx) ve alıcı (Rx) antenler; sabit bir anten ayrımlılığı, yönelimi ve istasyon aralığında tutularak, her iki anten de araştırma yönü boyunca hareket ettirilmektedir (Baker vd., 2007). Ortak ofset (OO) yöntemi veya sabit

ofset yöntemi olarakta adlandırılan bu yöntem, yeraltı yansımalarının düşey 2B görüntüsünü üretmektedir (Şekil 1.27a) (Galagedara vd., 2003; Annan, 2005). GPR verilerinde derinlik dönüşümü yapabilmek için ortamın elektromanyetik dalga hız bilgisine, genellikle çoklu ofset sistemleri kullanılarak ulaşılabilmektedir. Bu sistemlerden, OON yönteminde, iki anten arasındaki orta nokta sabit tutularak Tx ve Rx eşit miktarda birbirinden uzaklaştırılarak veri toplanmaktadır (Şekil 1.27b). GAYK yönteminde ise antenlerden biri (örneğin Tx) sabit bir konumda tutulurken, diğeri (Rx) anten ofseti artırılarak uzaklaştırılmaktadır (Şekil 1.27c). Çoklu ofset sistemlerinin amacı, farklı anten uzaklıkları için çift yol seyahat zamanlarını ölçerek ve daha sonra bu seyahat zamanı ile anten uzaklığı arasındaki ilişkinin eğimini bularak, hızı tahmin etmektir (Annan, 2005; Baker vd., 2007). Kuyu radarı yönteminde Tx ve Rx ortamın karşıt taraflarına yerleştirilmektedir. Bu yöntem içeriğindeki, sıfır-ofset profil (SOP) yönteminde, Tx ve Rx, önceden belirlenmiş bir istasyondan diğerine eşit aralıklarla taşınılarak veriler toplanmaktadır (Şekil 1.27d). Çoklu ofset toplama (ÇOT) modunda, bir anten (Tx) sabit tutulurken, diğer anten (Rx) tomografik görüntüleme üretmek için birden fazla konuma taşınmaktadır (Şekil 1.27e). Düşey yansıma profilinde (DYP), Tx yüzeye, Rx ise kuyu içerisine yerleştirilmektedir (Şekil 1.27f) (Davis & Annan, 1989; Galagedara vd., 2003; Baker vd., 2007; Wijewardana & Galagedara, 2010; Pathirana vd., 2023). Her bir araştırmada seçilen veri toplama yöntemi, uygulama gereksinimlerine ve saha koşullarına göre belirlenmektedir.



Şekil 1.25. Yer radarı uygulamalarında veri toplama yöntemleri. a) ortak ofset, b) ortak orta nokta, c) geniş açılı yansıma ve kırılma, d) sıfır ofset profili, e) çoklu ofset profili, f) düşey yansıma profili oluşturma yöntemleri (Pathirana vd., 2023'den değiştirilmiştir)

GPR yöntemi ile elde edilen ham *GPR* verilerden, araştırılan ortamın yapısal durumunu incelemek ve yorumlamak zordur. Bu verilerin daha anlaşılır görselleştirilebilmesi ve yorumlanabilmesi için bir takım veri işlem adımı uygulanarak işlenmesi gerekmektedir. Veri işlem adımları, temel ve ileri veri işlem adımları şeklinde değerlendirilerek ham *GPR* verilerine uygulanmaktadır. Ham *GPR* verilerine sırası ile uygulanan temel veri işlem adımları; düşük frekanslı izlerin giderilmesi (dewow), kazanç işlemi (gain), Ringing etkisinin giderilmesi (background removal) ve sıfır kayma zaman düzeltmesi (move time)'dir.

Verici ve alıcı antenlerinin yakın konumlandırılmasından dolayı, vericinin yakınındaki alanlar elektrostatik ve indüktif alanlarla ilişkilendirilen düşük frekanslı enerji içermektedir. Bu düşük frekanslı enerji, alınan sinyalin temel seviyesinden yukarı veya aşağıya doğru kaymasına neden olmaktadır. Bu durum, yer radarı teknolojisinde 'wow' etkisi olarak bilinmektedir (Jol, 2009). Dewow süzgeci, her ize bir çalışan ortalama filtre uygulayarak, verilerde görülen düşük frekanslı bileşenleri ortadan kaldırmak ve EM indüksiyonunun neden olduğu sinyalin uzun dalgalı bir kısmını ortadan kaldırmak için kullanılmaktadır (Jol, 2009; Sheriff, 2010). Bu süzgeç, verileri ortalama sıfır seviyesine indirgediği için önemlidir. Dewow süzgeçlemede, her bir izin her bir değeri için hareketli ortalama değer hesaplanmakta ve bu değer merkez noktasından çıkarılmaktadır. Bu değer hesaplanırken süzgeç parametresi olarak bir zaman aralığı girilmelidir (Jol, 2009).

Yer radarı sinyalleri araştırılan ortamın derinliklerine doğru ilerlerken zamanla hızlı sönümlenmektedir. Dolayısıyla, yüzeye yakın bölgelerdeki sinyalin genliği derinlerden gelen genlik bilgisine göre daha güçlüdür (Jol, 2009). Derinlerden gelen sinyallerin genliklerini güçlendirerek, bütün sinyal genliklerini eşitlemek için veriye kazanç (gain) işlemi uygulanması gerekmektedir (Mertzanides vd., 2014). Kazanç fonksiyonunda; sabit kazanç, üssel kazanç (SEC) ve otomatik kazanç kontrolü (AGC) gibi çeşitli yaklaşımlar kullanılmaktadır (Jol, 2009). Kazanç fonksiyonu yorumcuya göre farklılık göstersede, benzer bir şekilde tüm kazanç fonksiyonları, zaman ortamında izin ardışık bölgeleri için bazı çarpım faktörleri uygulanarak elde edilmektedir.

Yer radarı verilerinde istenilen verilerin büyük ölçüde geri planda kalmasına yol açan 'ringing' adı verilen yatay veya yataya yakın gürültüler bulunmaktadır. Bu gürültüler uyumlu gürültülerin yaygın bir türüdür. Veriler içerisinde bu gürültüler güçlü olduğunda daha derinlerdeki yapıları tamamen örtebilirler. Gerçek yansıma olaylarından bu gürültüleri

ayırt etmek güçtür. Radargramlarda yanyana sıralanmış tüm izlerin herbir zaman adımındaki genliklerin ortalamasının her bir izden çıkarılması işlemi ile bu gürültüler veriden uzaklaştırılmaktadır (Kim vd., 2007).

GPR verilerindeki sıfır zamanında, ölçüm esnasında kullanılan ölçüm aleti ile hava sıcaklığı yada hasar görmüş kablolar arasında oluşan sıcaklık değişimlerinden dolayı kayma gözlenebilmektedir. Dolayısıyla ölçüm alınan profil boyunca doğru derinliklerden emin olabilmek için veriye sıfır kayma düzeltmesi yapılarak, profil boyuncaki tüm izler için sıfır süresinin yeniden konumlandırılması gerekmektedir (Kirsch, 2006). Genellikle sıfır zamanı konumlandırılması; ilk kırılma, ilk pozitif veya negatif pik noktaları, ilk pozitif ve negatif pik arasındaki sıfır genlik noktası, pozitif ve negatif pikler arasındaki ortalama genlik noktası değerlerinden biri referans seçilerek yapılabilmektedir (Benedetto vd., 2017; Yelf, 2004).

1.9. Hidrojeokimya

Hidrolojik çalışmaların bir bölümü olan hidrojeokimya, yeraltı sularının; kökenlerinin araştırılması, kimyasal özelliklerinin ve kalitelerinin tespit edilmesi, yüzey/yağış suları ile bağlantılarının anlaşılması, su-kayaç arasındaki etkileşimin belirlenmesi ve yeraltı sularının kirlenmesi gibi araştırmaları kapsamaktadır (Tarcan vd., 1999).

1.9.1. Sularının Fiziksel Parametreleri

Suların sıcaklığı; mevsim, iklim, yükseklik, su tablasının derinliği, enlem, etkin volkanizma ve bazı durumlarda günün saatine bağlı olarak değişiklik göstermektedir (Şahinci, 1991; Christ & Wernli, 2013). Erguvanlı & Yüzer (1987). Suları sıcaklıklarına göre; soğuk sular (< 20 C°), ılık sular (20 C°-37 C°), sıcak sular (37 C°-42 C°), çok sıcak sular (>42 C°) olarak dört grupta sınıflandırmıştır.

Suyun elektriği iletebilme yeteneği olarak tanımlanan elektriksel iletkenlik (EC); suda çözünmüş olarak bulunan iyonların cinsine, konsantrasyonuna ve sıcaklığına bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Suların iyon konsantrasyonları ve sıcaklık değerleri arttıkça, elektriksel iletkenlikleride artma yönünde eğilim göstermektedir (Day & Nightingale, 1984; Hem, 1985). EC değeri, Yerüstü Su Kalitesi Yönetmeliği (YSK) (2021)'e göre; I. sınıf (çok iyi) <400 µS/cm, II. sınıf (iyi)=1000 µS/cm ve III. sınıf (orta) >1000 µS/cm olmak üzere üç su kalite sınıfa ayrılırken, içme sularında bu değer, İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkındaki Yönetmelik (2005)'e göre en yüksek 2500 µS/cm olarak kabul edilmektedir.

Sularda yaşayan canlıların yaşamlarının temelini oluşturan çözünmüş oksijen (Dissolved Oxygene= DO), suda serbest olarak bulunan oksijen seviyesi olarak bilinmektedir (Nacar vd., 2022). DO, su ile hava temasının bir sonucu olarak sıcaklığında etkisi ile suda bir miktar oksijenin çözünmesiyle açığa çıkmaktadır. Ayrıca, suda gerçekleşen fotosentez olayları sonucunda da su ortamı, oksijence doygun hale gelmektedir (Yalçın & Gürü, 2010). Ortamın sıcaklığı, ortamdaki alg faaliyetleri, suların tuzluluğu, atmosferik basınç, su sirkülasyonu değişiklikleri ve sudaki canlıların solunum olayları DO konsantrasyonunun değişiminde etkisi olan parametrelerdir (Göksu, 2015). DO, Yerüstü Su Kalitesi (YSK, 2021) Yönetmeliği kapsamında (I. sınıf (çok iyi)> 8 mg/L; II. sınıf (iyi)= 6 mg/L, III. sınıf (orta)< 6 mg/L) üç sınıfa ayrılmaktadır.

Hidrojen İyon Konsantrasyonu (pH), sudaki hidrojen iyonlarının (H^+) konsantrasyonunun bir ölçüsüdür. pH ölçeği 0-14 arasında değişmektedir. pH'ı 7 olan sular nötr, pH'ı 7'den düşük sular asidik ve pH 7'den yüksek sular alkali (bazik) suları ifade etmektedir (Sengupta, 2013). Doğal suların pH değeri, çözünmüş minerallerin varlığı, organik madde miktarı ve karbondioksit gibi atmosferik gazların konsantrasyonu gibi çeşitli faktörlere bağlı olarak değişiklik göstermektektedir (Dewangan vd., 2023). Suların pH değeri, sularda meydana gelen kimyasal ve biyolojik süreçleri etkilediği için su kalitesinin değerlendirilmesinde önemli bir parametredir (Hossain vd., 2019). Örneğin pH, suda yaşayan organizmalar için besin ve minerallerin çözünürlüğünü ve kullanılabilirliğini etkileyebilir. pH değeri, Yerüstü Su Kalitesi Yönetmeliği (YSK) (2021)'e göre; I. sınıf (çok iyi), II. sınıf (iyi) ve III.sınıf (orta) olmak üzere üç sınıfa ayrılmaktadır. Üç sınıf içinde pH değeri 6-9 aralığındadır. İçme sularında pH değeri, İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkındaki Yönetmelik (2005)'e göre 6.5-9.5 arasında standartlara uygun olarak kabul edilmektedir.

1.9.2. Yüzey Sularının Kimyasal Özellikleri

Yeraltısuyu kalitesini etkileyen birincil faktörler arasında besleme suyunun kaynağı ve kimyasal bileşimi, jeolojik birimin litolojik ve hidrolojik özellikleri, jeolojik birim içinde meydana gelen çeşitli kimyasal süreçler ve suyun jeolojik birim ile temas halinde kaldığı süre yer almaktadır. Bütün bu faktörler yeraltısuyundaki çözünmüş bileşenlerin türünü ve miktarını etkileyebilmektedir. Sudaki en yüksek konsantrasyona sahip iyonlar, majör iyonlar olarak adlandırılmaktadır. Bu iyonlar katyonlar (pozitif yüklü) ve anyonlar (negatif yüklü) olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Sularda en çok bulunan katyonlar; kalsiyum (Ca^{+2}),

magnezyum (Mg^{+2}), sodyum (Na^{+}) ve potasyumdur (K^{+}) iken en çok bulunan anyonlar ise bikarbonat (HCO_3^{-}), klorür (Cl^{-}), florür (F^{-}) ve sülfattır (SO_4^{-2}). Yeraltısuyu örneklerinde bu iyonların konsantrasyonlarının ölçülmesiyle suyun iyonik bileşimi belirlenerek, suyun kimyasal kalitesi karakterize edilebilmektedir (Yüksel, 2007).

Doğal sularda başlıca bulunan katyon Ca^{+2}'dur. Doğadaki bulunan en yaygın Ca^{+2} kaynakları; karbonatlar, aragonit, dolomit, jips, anhidrit ve apatit mineralleridir. Ayrıca, Ca^{+2} sudaki sertliğin ana nedenlerinden biridir. Kalsiyumca zengin sularda, CO_3^{-2} ve SO_4^{-2} bulunması durumunda, $CaCO_3$ ve $CaSO_4$ çökmesi ile kabuk oluşmaktadır. Bu durum da suların sertliğini artırmaktadır (Şahinci, 1991).

Suların sertliğin üzerinde etkili olan diğer bir iyon Mg^{+2}'dur. Bu iyon, magnezyum karbonat ($MgCO_3$) veya magnezyum sülfat ($MgSO_4$) gibi bileşikler oluşturarak suyun sertliğini artırabilmektedir. Tatlı sular ve yerkabuğunda en çok bulunan elementler arasında Mg^{2+}, sekizinci sırada yer almaktadır. Doğal sular içerisindeki başlıca Mg^{2+} kaynakları; dolomitler, magmatik kaya mineralleri (olivin, ojit, horblend, biotit), evaporitler ve metamorfik kaya mineralleridir (serpantin, talk, diyopsit, tremolit) (Şahinci, 1991).

Yerkabuğunda en çok bulunan elementlerden biri sodyumdur. Na^{+} iyonları, sudaki tuzluluğun ana bileşenlerinden biridir. Deniz suyu gibi tuzlu sular, sodyum klorür (NaCl) tuzunu oluştururlar. Bu nedenle, sodyum iyonları, suyun tuzluluk seviyesini belirleyen önemli bir faktördür. Sulardaki sodyumun fazlalığı, genellikle; evsel ve endüstriyel atıklar sonucu oluşan kirlenme, toprağın yapısı ve deniz katkılarından kaynaklanmaktadır (Şahinci, 1991).

Yerkabuğunda en çok bulunan yedinci element potasyum'dur. Doğada çok fazla bulunmasına rağmen doğal sular genellikle birkaç mg/l düzeyinde K^{+} içermektedir. K^{+}, bazı jeokimyasal süreçler ve absorbsiyondan dolayı toprakta kalarak suya çok fazla geçemez. Potasyumun, sularda bazen yoğun konsantrasyonda bulunmasının sebebi ortamın jeolojisine bağlıdır. Potasyumun kaynağı genellikle sedimanter kayaçlar olarak bilinmektedir (Şahinci, 1991; Güven, 2013).

Tüm doğal sularda bulunan Cl^{-}, suyun tadını etkileyen en önemli iyondur. Cl^{-} tuzlarının çözünürlüğü fazla olduğundan sularda en çok bulunan iyonlardan biridir. Yüzey sularında Cl^{-} konsantrasyonu genel olarak 100 mg/l'nin altında olmaktadır. Ancak, genellikle tuzlu su girişimleri olan yeraltı sularında, Cl^{-} yüksek konsantrasyonlarda bulunabilmektedir (Oğuz, 2015). İçeriğinde çok az Cl^{-} bulunan yağmur suları, zemin içerisine doğru süzülürken, geçtikleri kayaçların bileşimindeki klorür tuzlarının çözerek bünyesine katmakta ve Cl^{-}

bakımından zengin hale gelmektedirler (Şahinci, 1991; Öztekin Okan, 2004). Cl^- bakımından zengin sular; buharlaşma ve terlemeye bağlı olarak su barındıran ana kayanın üst seviyelerinde fazlalaşmaktadır. Doğal sulardaki CI^- iyonunun kaynağı, yağış suları ile metamorfik kayaçların bünyesinde var olan CI^- açısından zengin minerallerin çözünmesinden kaynaklanmaktadır.

Yeraltı suları içerisinde yer alan sülfat iyonlarının başlıca kaynakları, jipsler ve anhidritlerdir. Bu kaynakların yanında, volkanik patlamalar, organik maddeler, magmatik kayaçların bozunumu, endüstriyel/evsel atıkların depolandıkları alandaki suların toprağa karışması, fosil yakıtların yanması sonucu açığa çıkan sülfür gazları ve asit yağmurları SO_4^{-2} miktarını etkileyen kaynaklardandır. Su içerisindeki SO_4^{-2} iyonu, metamorfik kayaçların bünyesindeki piritin oksidasyonu ile oluşan $FeSO_4$ ile ilişkilidir.

Yeraltı sularında bulunan CO_3^{-2} ve HCO_3^- iyonları genellikle toprak ve atmosferdeki CO_2'den ve karbonatlı kayaçların erimesinden kaynaklanmaktadır. Ayrıca, HCO_3^- iyonları suyun pH'ına bağlı olarak değişmektedir. Sulardaki pH değerinin 6-10 arasında olduğu durumda, bu sularda HCO_3^- baskındır (Yerüstü Su Kalitesi Yönetmeliği (YSK) (2021)' vd., 1973).

1.9.3. Suların İz Elementleri

Major iyonlar dışında, doğal sularda eser miktarda bulunan bazı maddeler minör bileşenler olarak bilinmektedir. Su içerisindeki demir hariç ağır metaller 1 ppm'den daha düşük konsantrasyonlarda bulunmaktadır (Freze & Cherry, 1979). Ağır metaller, evsel ve endüstriyel atık suları, tarım ilaçları ve madencilik atıklarının bir sonucu olarak bazen doğal sulara karışabilmektedir. Ayrıca, suyun geçtiği litolojik birimlerin mineralojik yapısı, sudaki ağır metal içeriğinin bir nedenidir. Bu tez kapsamında çalışma alanından elde edilen su örneklerinde iz elementlerlerden; Alüminyum (Al), Arsenik (As), Bakır (Cu), Baryum (Ba), Berilyum (Be), Bor (B), Çinko (Zn), Antimon (Sb), Demir (Fe), Gümüş (Ag), Kadmiyum (Cd), Kobalt (Co), Krom (Cr), Kurşun (Pb), Nikel (Ni), Titanyum (Ti), Selenyum (Se), Vanadyum (V), Mangan (Mn) ve Molibden (Mo) analizleri yaptırılmıştır.

Gümüş, kayaçları meydana getiren başlıca minerallerin esas elementlerinden değildir. Genellikle, çok az miktarda tüm silikat minerallerinde görülmektedir. Gümüş yer kabuğunda 0.02 ppm değerinde iken; şeyl, kumtaşı ve kireçtaşlarında bu değer 10 ppm ve daha fazladır.

Yerkabuğunda en fazla bulunan üçüncü element alüminyum olmasına rağmen, az çözündüğü için yeraltısuyunda çok az miktarda miktarda bulunmaktadır. Genellikle, pH'ın 5-9 arasında olan suların alüminyum miktarı 1 ppm 'den azdır. Bu değer yeraltı sularında çoğunlukla 0.005-0.3 ppm arasında olmaktadır. Asitli sularda ise bu değer 100 ppm'e ulaşabilmektedir (Şahinci, 1991). İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkındaki Yönetmelik (2005)'e göre Al değeri en fazla 0.2 mg/l olarak belirtilmiştir.

Arsenik, doğal dengeyi bozan bir kirleticidir. Doğada serbest olarak bulunmakta ve çeşitli toksik etkileri nedeniyle hem insan hem de hayvan sağlığı için hayati önem taşımaktadır. Arsenik çok zehirlidir ve içme sularının içeriğinde 0.05 ppm'den fazla olmamalıdır (Şahinci, 1991). Arseniğin insan vücuduna yüksek miktarda alınması; kansere neden olmanın yanında, toksik etkisi nedeniyle, felç ve sinir sistemi bozukluklarının ortaya çıkmasına da neden olmaktadır (Brown, 2002).

Su içerisinde doğal olarak mevcut olmayan bakır, genellikle suya bakır minerallerinden karışmaktadır. Yerkabuğundaki kayaçlarda bakır, doğal Cu veya Cu içeren karbonat ve sülfür mineralleri halinde bulunmaktadır. Ayrıca, Cu minerallerinin çözünürlükleri çok az olduğu için, sularda bulunan bakırın çok düşük bir miktarı doğal kökenli olmaktadır (Hem, 1985). Bakır; olivin, biyotit, plajyoklaz, piroksen, amfibol, magnetit gibi minerallerde oldukça fazla bulunmaktadır (Şahinci, 1991). Bakır, insan vücudundaki temel elementlerdendir. Vücuttaki bakır eksikliği; kansızlık, kemik yapısı bozukluğu ve anemi gibi hastalıklara yol açmaktadır. Vücuda fazla miktarlarda alınması ise; damar, karaciğer, böbrek ve sinirsel hastalıkların yanında mukoza iltihaplanmasına neden olmaktadır (Güler & Çobanoğlu, 1997). İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkındaki Yönetmelik (2005), bakır için en büyük değer 2 mg/l olarak belirlenmiştir.

Barit ($BaSO_4$) ve witherit ($BaCO_3$) mineralleri halinde doğada bulunan Baryum, boya sanayileri, dericilik işletmeleri ve patlayıcı madde üretiminde kullanılan baryum tuzları endüstriyel atık sularıyla suya karışmaktadır. İnsan vücuduna alındığında, kaslara, kalp adelelerine, damarlara ve sinir sistemine zarar vermektedir (Güler & Çobanoğlu, 1997).

Yer kabuğunda ender ve dağınık halde bulunan berilyumun ortalama değeri 2.8 ppm kadardır. Berilyum alkali kayaçlarda oldukça fazla olmakla birlikte pegmatit minerallerini oluşmaktadır.

Peryodik tabloda üçüncü gurubun en hafif elementi olan bor, doğada Ca, Na ve Mg'un tuzları şeklinde bulunmaktadır. Bor, su ortamında genellikle borik asit ve kısmen de borat tuzları formlarında bulunmaktadır. Endüstriyel ve evsel atıkların yüzey sularına karışması

su içerisindeki bor miktarının artışına neden olmaktadır. Bor Türkiye'deki içme ve sulama sularını en çok kirleten toksik elementlerin başında yer almaktadır. Dolayısıyla, bor giderimi insan sağlığı açısından önemlidir (Başkan & Atalay, 2013). İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkındaki Yönetmelik (2005)'e göre borun derişim değeri en fazla 1 mg/l olmalıdır.

Çinko doğal sularda çok az bulunmaktadır. Suya genellikle, suyun temasta bulunduğu kayaçlardan, endüstriyel atıklardan, tarımda kullanılan gübrelerden ve atmosferden karışabilmektedir. Magmatik kayalarda, ortalama 70 ppm bulunan çinko, genellikle ultrabazik ve bazik kayalarda daha fazla bulunmaktadır (Şahinci, 1991). Çinkonun 25 ppm'ye kadar insan sağlığına zararlı olmadığı gözlenmiştir (Mcneely vd. 1979).

Yerkabuğu yoğun miktarda demir içerdiği için, yeraltı sularında bol miktarda demir bileşiklerine rastlanmaktadır. Yeraltı sularında demir konsantrasyonunun 0.3 mg/l'den fazla olması istenmeyen bir durumdur. Fazla miktarda demir, suyun tadını ve görünümünü bozabilmekle birlikte bu durum sağlık için zararlı değildir. Havayla temas ettiğinde demir oksitler kırmızımsı kahverengiye dönüşürler ve suyun rengini değiştirirler (Sargın, 2010). Karbonatlı kayaçlardan geçen sularda çok fazla demir iyonları görülebilmektedir. Dolayısıyla, dolomit ve kireçtaşı gibi karbonatlı kayalardan gelen suların pH'ı 7'den fazla olduğu için bu sular fazla demir iyonu içermektedir (Hem, 1985). İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkındaki Yönetmelik (2005)'e göre demir için en büyük değer 0.2 mg/l olmalıdır.

Toksik bir madde olan kadmiyum; metal kaplama, pil üretimi, boya ve plastik endüstriyel atıklardan ve kadmiyum içeren tarım ilaçlarından dolayı yüzey ve yeraltı sularına karışabilmektedir. Vücuda alınan kansenonojik yapıda olan kadmiyum ve bileşikleri vücuda alındığında ve birçok sağlık sorununu (susuzluk hissi, boğazın kurulması, agresiflik, öksürük ve anemi) neden olabilir (Güler & Çobanoğlu, 1997). Cd sınır değeri İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkındaki Yönetmelik (2005)'e göre en fazla 0.005 mg/l olarak belirtilmiştir.

Kobalt, volkanik patlamaların oluşturduğu kayalarda bulunmaktadır. Kobaltın vücuda alınması, kan şekeri, kolesterol, akciğer ve kalpte işlev bozuklukları ve kansere neden olmaktadır (Atabey, 2005).

Doğal sulardaki derişimi genellikle 0.01 ppm'in altında bulunan Cr, suyun temas ettiği kayacın bileşimiyle ilişkili olarak derişimini 0.2 ppm'e kadar çıkartabilmektedir (Hem, 1985). Krom, sularda Cr^{+3} ve Cr^{+6} iyonları halinde bulunabilmektedir. Kanseronojik özellikli Cr^{+6} insanlar için zararlı iken, Cr^{+3} daha az zehirleyici etkisi olan, lokal veya yaygın sistemik bir etkiye sebep olmayan, hatta insan vücudu için gerekli olan Cr'dur. İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkındaki Yönetmelik (2005), krom için önerilen sınır değer 0.05 mg/l'dir.

Kayaçları oluşturan çoğu mineralin (galen, olivin, amfiboller, kuvars vb.) (Şahinci, 1991) temel bileşeninde bulunan kurşun çevre kirliliği (endüstriyel atıklar, kurşundan yapılan boruların bozunması ve kurşunlu benzinin yanması) nedenleri ile sulara karışmaktadır. Çeşitli yollarla vücuda alınan kurşun insan vücudu için toksik bir maddedir. Canlı vücuduna yüksek miktarda alındığında zehirleyici etki yapmaktadır. Ayrıca iştahsızlık isteğine, yorgunluk hissine, karın ağrısına, kurşun felcine, duyu organı bozukluğuna ve zihinsel bozukluklara sebebiyet vermektedir (Güler & Çobanoğlu, 1997). Pb sınır değeri, İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkındaki Yönetmelik (2005)'e göre en fazla 0.01 mg/l olarak belirtilmiştir.

Nikel bileşikleri pratik olarak suda çözünmemektedir. Nikel içeren suda çözünebilir tuzlar; sülfat, klorür ve nitrattır. Bu tuzlar endüstriyel atıklarla sulara karışmaktadır. Toksik olmayan bir madde olduğu için sağlık üzerinde çok fazla olumsuz etkileri olmamaktadır (Güler & Çobanoğlu, 1997). Nikel'in sınır değeri, İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkındaki Yönetmelik (2005)'e göre en fazla 0.02 mg/l olarak belirtilmiştir.

Titanyum genellikle +4 değerinde oksitleşmektedir. Titanyum içeren oksidler başlıca titanatlar ve silikatlardır. Titanyum deniz suyunda 0.001 ppm, Ti^{++}, Ti $(OH)_4$ iyon ve molekülleri şeklinde kendini göstermektedir. Deniz suyuna oranla tatlı sularda daha fazla Titanyum miktarı bulunmaktadır (Şahinci, 1991).

Selenyum doğal sularda genellikle bulunmaz yada çok az miktarda bulunmaktadır. Selenyumca zengin suların kaynağı endüstriyel atık sulardan olabilir. Genellikle, sularda selenit ve selenate halinde var olmaktadır (Güler & Çobanoğlu, 1997). Selenyum, genellikle kil mineralleri ve oksitleyici ortamda daha çok bulunmaktadır (Şahinci, 1991). İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkındaki Yönetmelik (2005)'e göre Selenyum için en büyük değer 0.01 mg/l olarak önerilmektedir.

Yer kabuğunda, ortalama 135 ppm miktarında bulunan vanadyum, genellikle ultrabazik ve bazik kaya mineralleri olarak bilinmektedir. +2, +3, +5 değerliklerinde bulunan vadanyumda daha çok +3 değerlikleri hakimdir. V^{+3} değerindeki bileşikler suda çok az çözünmektedir. Oksitleyici ortamlarda meydana gelen laterid ve boksitlerde yoğun miktarda bulunmaktadır. Tortul kayalardan kumtaşlarında ve karbonatlı kayaçlarda vanadyum değeri 20 ppm iken, şeyllerde bu değer 130 ppm'dir (Şahinci, 1991).

Mangan yeraltı sularına, mangan içeren jeolojik formasyonlardan ve suni gübrelerden bulaşmaktadır. Genel olarak mangan, metamorfik ve magmatic kayaçlardaki; olivine, piroksen ve amfibol minerallerinde bulunmaktadır (Hem, 1985). Demiri fazla olan sularda,

çok defa mangana rastlanmaktadır. Yeraltı suları içeriğinde bulunan mangan, bulunduğu ortamda oksijenin olmayışı nedeniyle iki değerliğe sahiptir. Manganın sularda fazla bulunması da demirde olduğu gibi suyun tadını olumsuz yönde etkilemektedir. Ayrıca, mangan suda bazı bakterilerin çoğalmasına ve boruların tıkanmasına neden olmaktadır (Güler & Çobanoğlu, 1997). İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkındaki Yönetmelik (2005)'te mangan için 0.05 mg/l olarak belirtilmiştir.

Yer kabuğundaki molibden miktarı 1.5 ppm iken, nemli tropikal bölgelerde bu değer 1-5 ppm arasında değişmektedir (Şahinci, 1991). Molibdenin doğada gözlenmesine neden olan iki sülfid minerali; tungsttenit ve molibdenittir. Molibdenin fazlası canlılar için zehirleyici etkiye sahiptir. İçme sularında molibden değeri 0.01 mg/l'den az olmalıdır (Şahinci, 1991).

1.9.4. Suların Kimyasal Analizlerin Diyagramlarda Gösterilmesi

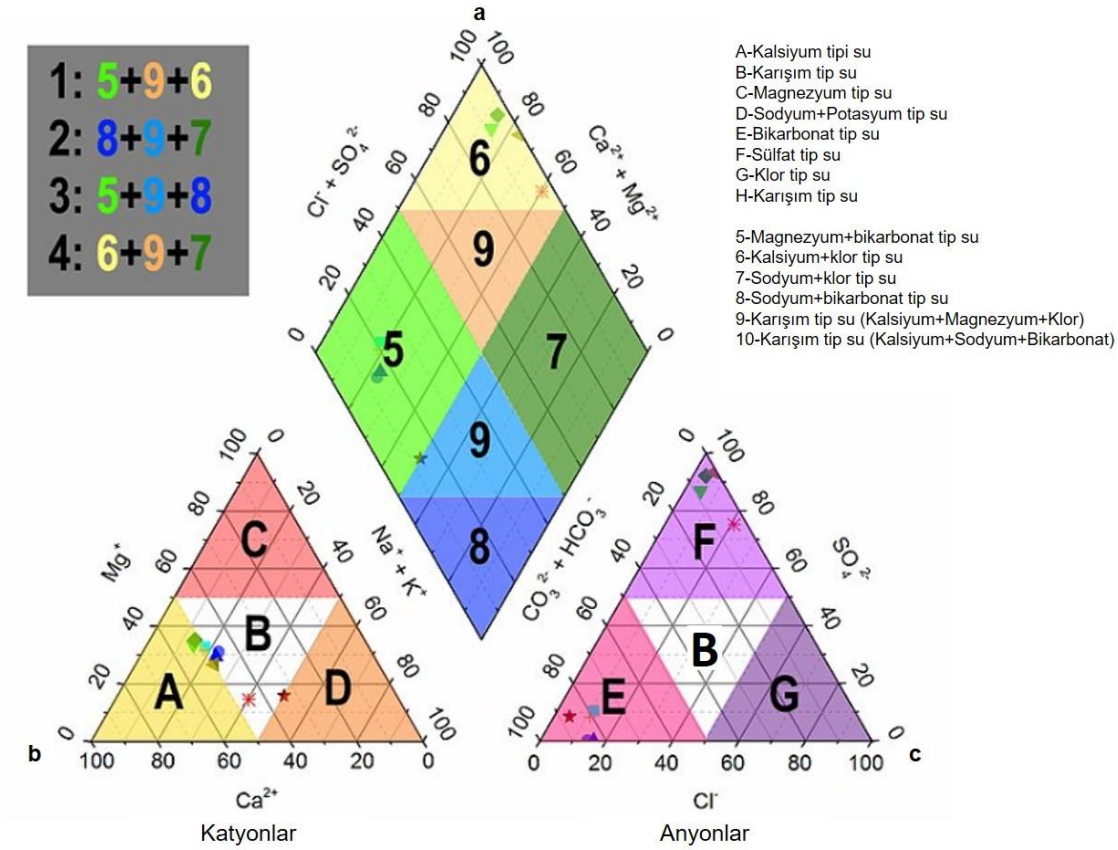
Farklı kaynaklardan elde edilen su örneklerinin; yüzeyden yeraltı sularına geçene kadar izlediği güzergah boyunca meydana gelen hidrokimyasal değişimlerin incelenmesinde, hidrojeokimyasal açıdan yeraltı sularının kökeninin belirlenmesinde, farklı yeraltısuyu numunelerinin birbirleri ile olan ilişkilerin tespit edilmesinde, çeşitli diyagramlar kullanılmaktadır (Mohammed, 2015). Bunlardan en sık kullanılanı Piper (1944) ve Schoeller (1965) diyagramlardır.

Hidrojeolojide, su analizlerinin Piper (1944) ve Schoeller (1965) diyagramları gibi grafiksel gösterimi hem hidrokimyasal süreçlerin yorumlanmasına hem de farklı kaynaklardan alınan örneklerin karşılaştırılmasına olanak sağlamaktadır.

• Piper Diyagramı

Piper diyagramı (Piper, 1944), suyun anyonlarını ve katyonlarını meq/L cinsinden gösteren iki üçgen ve tüm iyonları birleştiren bir eşkenar dörtgenden oluşan bir diyagramdır (Şekil 1.28). Eşkenar üçgenlerin birinde esas katyonlar (Ca^{2+}, Mg^{2+} ve Na^{+}+K^{+}), diğerinde ise esas anyonlar (SO_4^{2-}, CO_3^{2-}-HCO_3^{-} ve Cl^{-}) bulunmaktadır. Her üçgenin alanı dört ayrı bölgeye ayrılmıştır. Bu bölgelerden ortadaki karışık bir bölgeyi, diğerleri ise tek bir iyonun çoğunlukta olduğu üç bölgeyi ifade etmektedir. Katyonları gösteren üçgen; kalsiyum (A) tip, karışım (B) tip, magnezyum (C) tip, sodyum+potasyum (D) tip suları, anyonları gösteren üçgen; bikarbonatlı (E) tip, sülfatlı (F) tip, klorlu (G) tip, ve karışım (H) tip suları göstermektedir. Bu üçgenler üzerinde, aynı kökenli suların aynı iyonları gruplar halinde

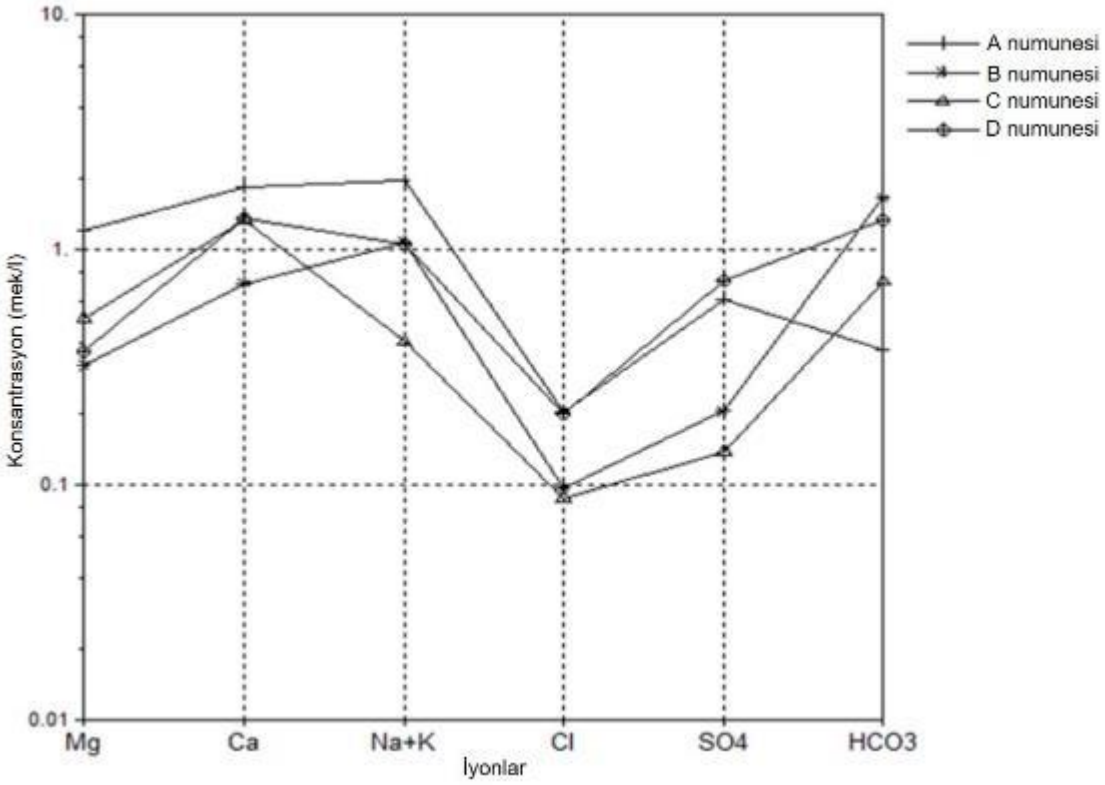
bulunmaktadır. Eşkenar dörtgen ise suların sınıflandırılmasında kullanılmaktadır. Eşkenar dörtgendeki her bir bölge farklı sınıfı (5-Magnezyum+bikarbonat tip su, 6-Kalsiyum+klor tip su, 7-Sodyum+klor tip su, 8-Sodyum+bikarbonat tip su, 9-Karışım tip su (Kalsiyum+Magnezyum+Klor), 10-Karışım tip su (Kalsiyum+Sodyum+Bikarbonat) ifade etmektedir.



Şekil 1.26. Piper diyagramı (Piper, 1944 ve URL-1, 2024'ten değiştirilmiştir)

• Schoeller diyagramı

Schoeller diyagramı, su numunelerindeki ana iyonların (Mg^{2+}, Ca^{2+}, Na^{+}, K^{+}, Cl^{-}, CO_3^{-} HCO_3^{-}, SO_4^{2-}) konsantrasyon değişikliklerini ve hidrokimyasal eğilimlerini analiz ederek iyonların kökensel yorumlamaları hakkında bilgi almak için birden fazla ana iyonik bileşenin aynı diyagramda temsil edilmesini sağlayan bir diyagramdır (Schoeller, 1965; Yang vd., 2018). Diyagram oluşturulurken, her bir iyonun mek/l değerleri logaritmik düşey eksene işaretlenerek, bu değerler birleştirilir. Birleştirilen iyonlar kırık çizgileri şeklinde görülmektedir. Diyagramdaki bu kırık çizgilerinin birbirine paralel olduğu sular genellikle aynı formasyonlardan gelen suları göstermektedir (Şekil 1.29).

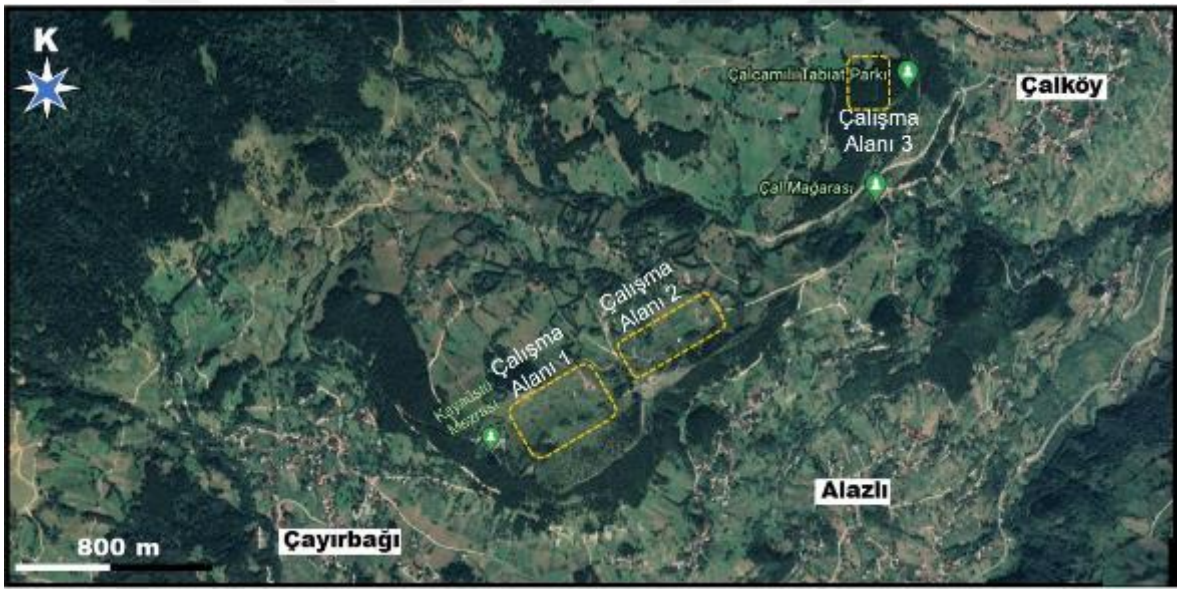


Şekil 1.27. Schoeller diyagramı (Mohammed, 2015'ten değiştirilmiştir)

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

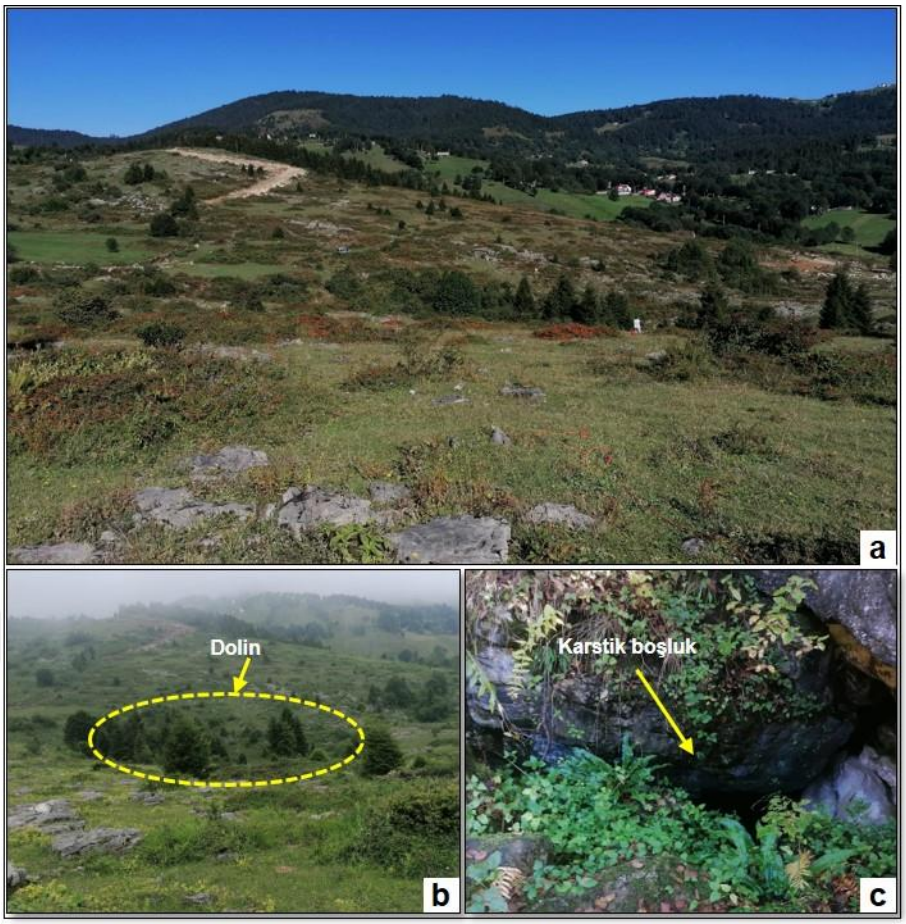
2.1. Çalışma Alanlarının Belirlenmesi

Bu tez çalışmasında, Trabzon ili Düzköy ilçesi sınırları içerisindeki Çayırbağı ile Çalköy mahalleleri arasında yer alan Şahinkaya kireçtaşlarını içeren bölge çalışma alanı olarak belirlenmiştir. Bölgede yapılan ön çalışmalarda; bu arazide karstlaşma sonucunda oluşan dolinlerin, karstik boşlukların ve Çal Mağarası'nın içinde bulunduğu üç farklı arazi (Çalışma Alanı 1, Çalışma Alanı 2 ve Çalışma Alanı 3), çalışma alanı olarak seçilmiştir (Şekil 2.1).



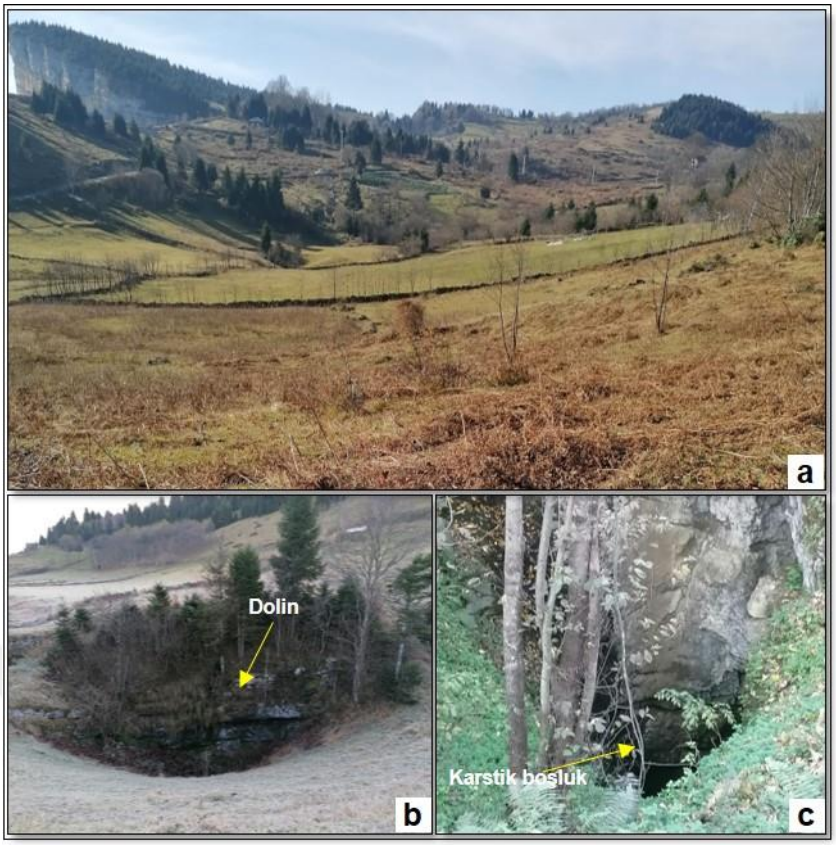
Şekil 2.1. Çalışma alanlarının uydudan görünümü (Google Earth alınmıştır)

Çalışma alanlarından, Kayaüstü mevkisinde yer alan Çalışma Alanı 1, yaklaşık 300 m x 400 m yüzey ölçümüne sahiptir. Bu mevkinin Çalışma Alanı 1 olarak seçilmesinin nedeni, içerisinde yüzeyden gözlemlenen geniş çaplı çöküntülerin yer almasıdır (Şekil 2.2).



Şekil 2.2. Çalışma Alanı 1'den genel görünümler, a) Çalışma Alanı 1'de ölçümlerin alındığı yüzey, b) Çalışma Alanı 1'de yer alan dolinin genel görünümü, c) Çalışma Alanı 1'de bulunan karstik boşlukların görünümü

İki tepe arasında bulunan ve tepelerden sızan yağmur sularını barındırdığı için oldukça ıslak bir zemine sahip Çalışma Alanı 2'nin genel görünümü Şekil 2.3'te görülmektedir. Yüzeyden gözle görülebilen ve çapları değişkenlik gösteren dolinleri de içerisinde barındıran bu çalışma alanının, Çal Mağarası'nın kol uzantılarını içerdiği düşünülmektedir (Törk, 2013).



Şekil 2.3. Çalışma Alanı 2'den genel görünümler, a) Çalışma Alanı 2'de ölçümlerin alındığı yüzey, b) Çalışma Alanı 2'de yer alan dolinin genel görünümü, c) Çalışma Alanı 2'de bulunan karstik boşluklar

Çalışma Alanı 3 ise yaklaşık 200 m x 400 m'lik bir yüzey ölçümüne sahip olup Çal Camili Tabiat Parkı sınırları içerisinde yer almaktadır. Bu kısmın Çalışma Alanı 3 olarak seçilmesinin nedeni, park içerisinde bulunan çapları yaklaşık 4-10 m aralığında olan ve oldukça derinlere kadar uzanan dolinlerin yer almasıdır (Şekil 2.4).

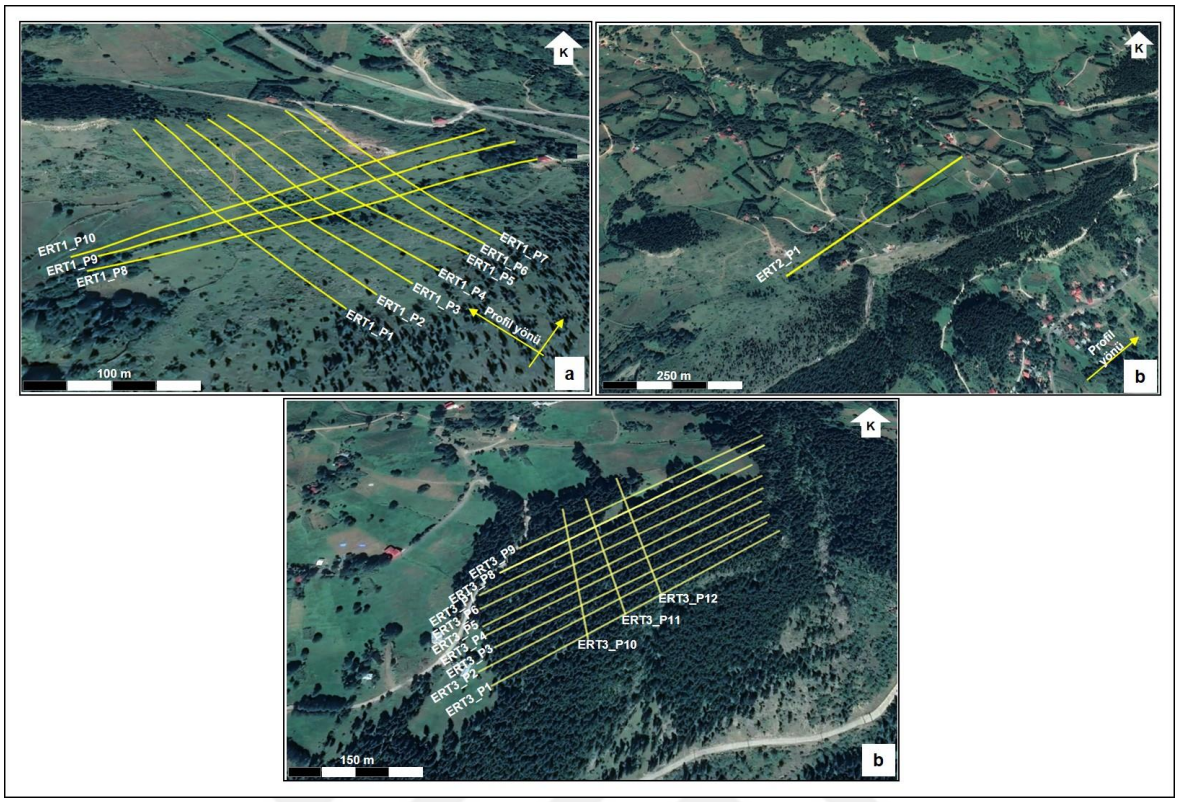


Şekil 2.4. Çalışma Alanı 3'ten genel görünümler, a) Ölçü alınan yüzeyin görünümü, b-c) Çalışma Alanı 3'te yüzeyden gözlemlenen dolinler

Belirlenen üç çalışma alanında, tezin amacına yönelik olarak jeofizik yöntemlerle veriler toplanarak, yapılan değerlendirmeler sonucunda, bu alanların iç yapısal özellikleri açığa çıkarılmıştır.

2.2. Elektrik Özdirenç Tomografi (*ERT*) Verilerinin Toplanması ve Değerlendirilmesi

Kayaüstü mevkisinde bulunan ve iki tepenin yamaçlarının birleştiği alanı içeren Çalışma Alanı 1'de, bölgede hakim olan karstik kayaçların suyla etkileşime girerek çözünmesi sonucunda oluştuğu düşünülen geniş çaplı çöküntüler ve karstik boşluklar yer almaktadır (Şekil 2.2). Bu çanak şeklindeki çöküntüler dikkate alınarak, geniş boyutlu çöküntü merkezde olacak şekilde, çöküntünün uzanım ekseni boyunca 3 (KD-GB yönlü) ve uzanım eksenine dik kesecek şekilde ise 7 profil (KB-GD yönlü) olmak üzere, toplam 10 *ERT* ölçüm profili belirlenmiştir (Şekil 2.5a). Profiller arası mesafeler; yüzey koşullarına bağlı olarak eşit seçilemeyip 15-35 m aralığında değişmektedir.



Şekil 2.5. Çalışma Alanlarında belirlenen *ERT* ölçüm profilleri. A) Çalışma Alanı 1'de belirlenen *ERT* profilleri, B) Çalışma Alanı 2'de belirlenen *ERT* profili, C) Çalışma Alanı 3'te belirlenen *ERT* profilleri

Çalışma Alanı 2 olarak tercih edilen araştırma alanında, Çal Mağarası'nın kol uzantılarının uzanım yönünü dik kesecek şekilde KD-GB yönünde, 600 m uzunluğunda bir adet profil belirlenebilmiştir (Şekil 2.5b). Çalışma Alanı 2' de daha fazla profilde ölçü alımına mülk sahibi izin vermediği için, bu alanda toplanan veriler bir profilde sınırlı kalmıştır.

Çalışma alanı 3, ladin ağaçları ile kaplı ormanlık bir alanı içermektedir. Bu alanda, çapları değişkenlik gösteren ve oldukça derinlere uzanan dolinler yer almaktadır (Şekil 2.4). Bu dolinlerin uzanım eksenlerini dik kesecek şekilde, KB-GD yönünde toplam 9 adet, KD-GB yönünde ise 3 adet olmak üzere toplam 12 adet *ERT* profili belirlenmiştir (Şekil 2.5c).

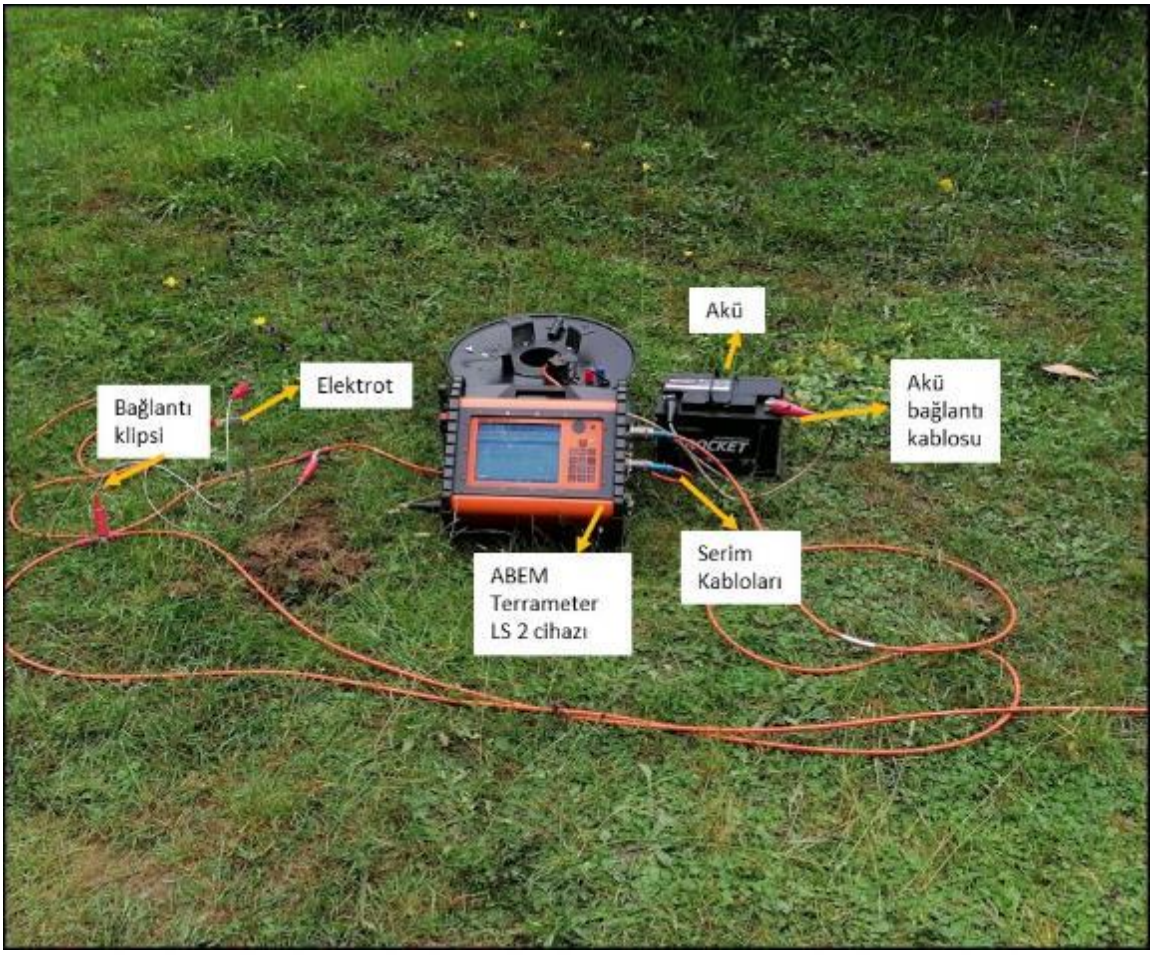
Tüm çalışma alanlarında belirlenen profillerin uzunlukları, elektrot aralıkları, başlangıç ve bitiş noktalarının koordinatları Tablo 2.1'de verilmektedir.

Tablo 2.1. *ERT* yöntemi ölçüm profillerinin parametreleri

	Profil İsmi ve Yönü	Profil Uzunluğu	Elektrot Sayısı	Elektrot Aralığı	Başlangıç Koordinatı	Bitiş Koordinatı
Çalışma Alanı 1	ERT1_P1 (KB-GD)	300 m	41	7.5 m	530772.588 4524664.107	530587.932 4524894.165
	ERT1_P2 (KB-GD)	300 m	41	7.5 m	530789.733 4524676.338	530603.529 4524907.259
	ERT1_P3 (KB-GD)	300 m	41	7.5 m	530812.504 4524.687.158	530628.628 4524912.851
	ERT1_P4 (KB-GD)	300 m	41	7.5 m	530832.156 4524701.792	530647.095 4524929.944
	ERT1_P5 (KB-GD)	300 m	41	7.5 m	530854.022 4524718.138	530664.605 4524938.615
	ERT1_P6 (KB-GD)	300 m	41	7.5 m	530866.818 4524732.688	530713.949 4524972.763
	ERT1_P7 (KB-GD)	300 m	41	7.5 m	530880.357 4524739.269	530723.742 4524981.222
	ERT1_P8 (KD-GB)	400 m	61	5 m	530603.745 4524699.634	530938.837 4524892.191
	ERT1_P9 (KD-GB)	400 m	61	5 m	530605.016 4524717.086	530926.003 4524924.621
	ERT1_P10 (KD-GB)	400 m	61	5 m	530588.036 4524714.328	530909.818 4524947.086
Çalışma Alanı 2	ERT2_P11 (KD-GB)	600 m	61	7.5 m	530822.181 4524834.970	531213.970 4525283.768
Çalışma Alanı 3	ERT3_P1 (KD-GB)	400 m	61	5 m	531804.04 4524052.52	532080.83 4524334.68
	ERT3_P2 (KD-GB)	400 m	61	5 m	531787.22 4524350.27	532066.61 4524350.27
	ERT3_P3 (KD-GB)	400 m	61	5 m	531794.40 4524098.88	532074.82 4524379.94
	ERT3_P4 (KD-GB)	400 m	61	5 m	531780.44 4524113.69	532062.02 4524396.65
	ERT3_P5 (KD-GB)	400 m	61	5 m	531772.20 4524129.09	532055.04 4524413.38
	ERT3_P6 (KD-GB)	400 m	61	5 m	531763.50 4524152.36	532054.43 4524437.36
	ERT3_P7 (KD-GB)	400 m	61	5 m	531756.26 4524171.31	532042.92 4524448.85
	ERT3_P8 (KD-GB)	400 m	61	5 m	531770.17 4524209.00	532051.31 4524475.53
	ERT3_P9 (KD-GB)	400 m	61	5 m	531782.88 4524250.02	532061.10 4524511.21
	ERT3_P10 (KB-GD)	200 m	41	5 m	531889.50 4524130.26	531824.13 4524318.03
	ERT3_P11 (KB-GD)	200 m	41	5 m	531923.27 4524173.25	531842.71 4524348.74
	ERT3_P12 (KB-GD)	200 m	41	5 m	531950.82 4524214.11	531873.44 4524394.06

Şekil 2.5'te gösterilen profiller üzerinde *ERT* verilerini toplamak için, KTÜ Jeofizik Mühendisliği Bölümü Uygulamalı Jeofizik Laboratuvarı 1'e ait Şekil 2.6'da görülen ABEM Terrameter LS 2 çok kanallı elektrik özdirenç cihazı, serim kabloları, elektrotlar, bağlantı kabloları ve 12 V'luk akü kullanılmıştır.

Bu çalışmada, hem yanal hemde düşey ayrımlılığı daha iyi görebilmemizi sağlayacak Wenner-Schlumberger dizilimi kullanılarak *ERT* verileri toplanmıştır.



Şekil 2.6. Elektrik Özdirenç Tomografi yöntemi ölçü ekipmanı

Elde edilen görünür özdirenç değerleri, yer altının 2B gerçek özdirenç modelini belirlemek için Res2Dinv programı (Loke, 2010) kullanılarak değerlendirilmiştir. Bu programda, temel olarak en küçük kareler ters çözüm tekniğini kullanılmaktadır (De Groot-Hedlin ve Constable, 1990). Res2Dinv programına okutulan verilere ters çözüm işlemi uygulanarak çalışma alanlarının 2B özdirenç-derinlik dağılımı (Ek 1-5) belirlenmiştir. Çalışma alanının özdirenç değişimlerinin yanal ve düşey yöndeki devamlılığının izlenebilmesi için 2B'lu kesitlerden 3B'lu yeraltı görüntüleri (EK 6,7) ve fence diyagramları (EK 8) oluşturulmuştur.

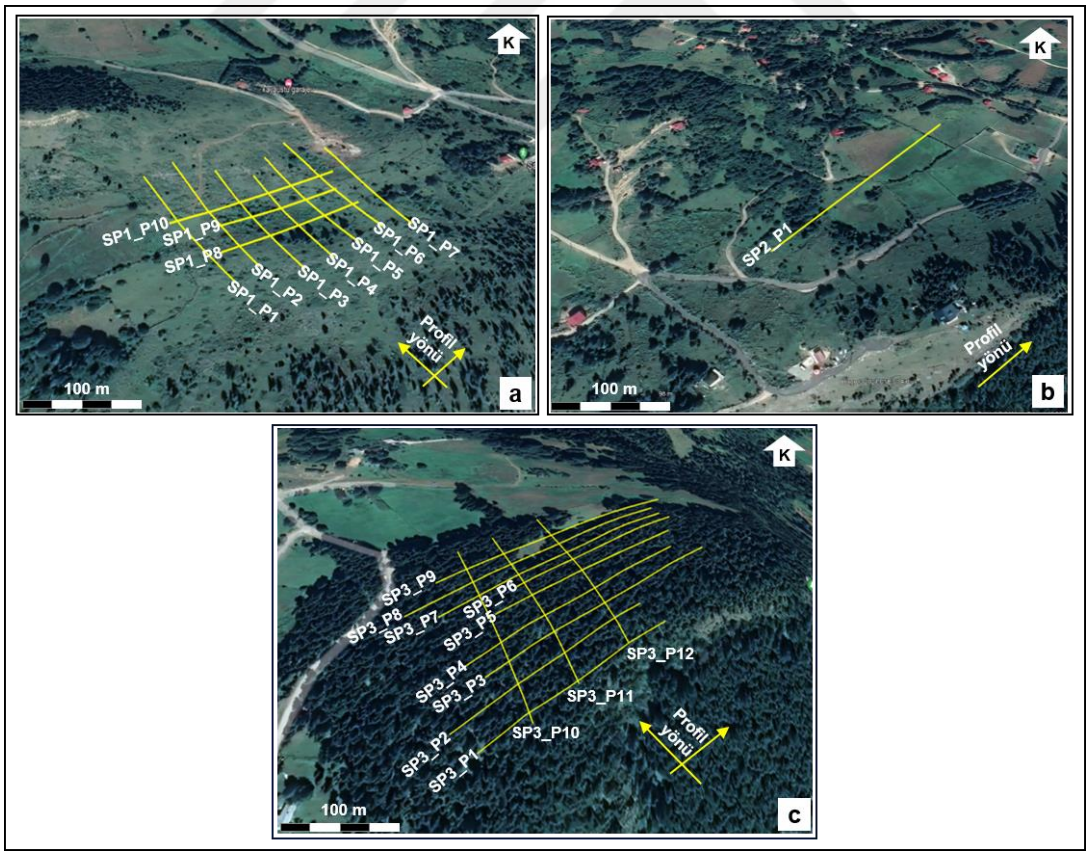
Çalışma Alanı 1'den elde edilen 2B elektrik özdirenç-derinlik kesitleri incelendiğinde uzaklık ekseninin 300-400 m arasında, özdirenç dağılımlarının ise 10-7318 ohm.m arasında değiştiği görülmektedir (Ek 1,2).

Ek 3'te Çalışma Alanı 2'den elde edilen ERT2_P1 kesitinin uzunluğunun 600 m olduğu, elde edilen özdirenç değişiminin ise 19.7-4449 ohm.m arasında değiştiği dikkat çekmektedir.

Çalışma Alanı 3'ten elde edilen 2B elektrik özdirenç-derinlik kesitleri incelendiğinde ise uzaklık ekseninin 200-400 m arasında, özdirenç dağılımlarının ise 20-5839 ohm.m arasında değiştiği görülmektedir (Ek 4,5).

2.3. Doğal Potansiyel *(SP)* Verilerinin Toplanması ve Değerlendirilmesi

Doğal Potansiyel yöntemi ile, belirlenen çalışma alanlarında *SP* verisi toplamak için ilk olarak ölçüm profilleri belirlenmiştir. *SP* ölçüm profilleri, tüm çalışma alanlarındaki *ERT* profillerinden elde edilen *ERT* kesitlerinin anomali veren kısımlar dikkate alınarak sınırlandırılmıştır. Çalışma Alanı 1'de KB-GD yönünde 7 adet, KD-GB yönünde 3 adet profil; Çalışma Alanı 2'de KD-GB yönünde 1 adet; Çalışma Alanı 3'te ise KB-GD yönünde 9 adet ve KD-GB yönünde 3 adet profil olmak üzere toplamda 23 adet *SP* ölçüm profili belirlenmiştir (Şekil 2.7). Bu profillerin uzunlukları, *pot* aralıkları, atış sayıları ve başlangıç ve bitiş noktalarının koordinatları Tablo 2.2'de verilmektedir.



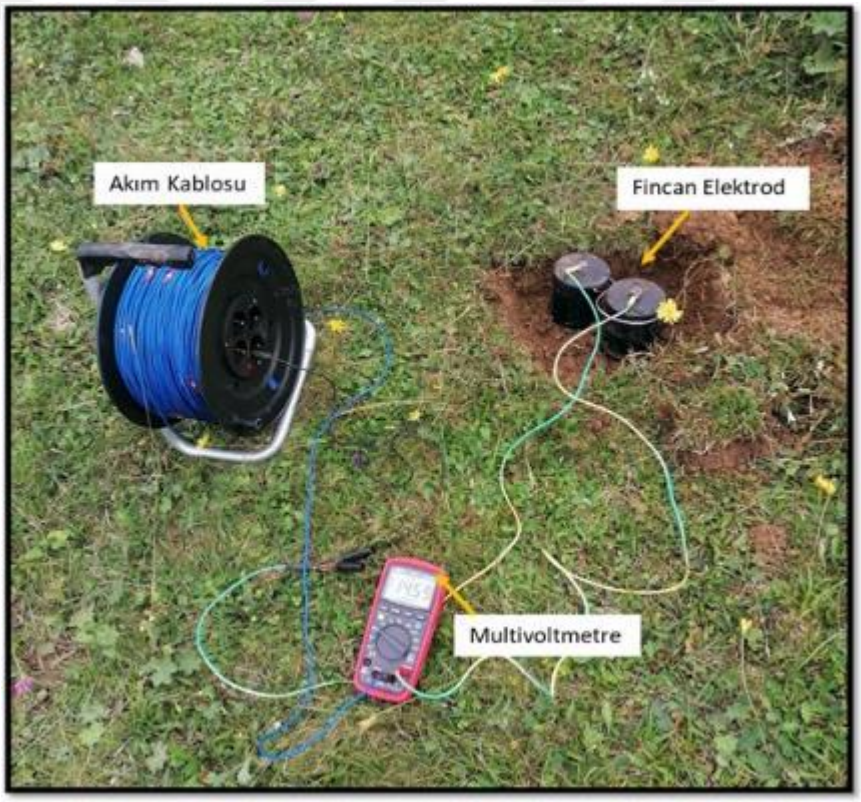
Şekil 2.7. Çalışma Alanlarında belirlenen *SP* ölçüm profilleri. A) Çalışma Alanı 1'de belirlenen *SP* profilleri, B) Çalışma Alanı 2'de belirlenen *SP* profili, C) Çalışma Alanı 3'te belirlenen *SP* profilleri

Tablo 2.2. *SP* yöntemi ölçüm profillerinin parametreleri

	Profil İsmi ve Yönü	Profil Uzunluğu	Elektrot Aralığı	Başlangıç Koordinatı	Bitiş Koordinatı
Çalışma Alanı 1	SP1_P1 (KB-GD)	155 m	5 m	530723.60 4524727.46	530638.091 4524829.623
	SP1_P2 (KB-GD))	140 m	5 m	530727.84 4522929.76	530641.44 4523032.75
	SP1_P3 (KB-GD)	160 m	5 m	530759.12 4522928.34	530680.36 4523039.13
	SP1_P4 (KB-GD)	120 m	5 m	530779.20 4522943.07	530712.48 4523036.93
	SP1_P5 (KB-GD)	150 m	5 m	530800.80 4522957.93	530716.03 4523055.15
	SP1_P6 (KB-GD)	185 m	5 m	530819.26 4522977.54	530735.09 4523091.42
	SP1_P7 (KB-GD)	160 m	5 m	530841.36 4522972.97	530775.20 4523093.03
	SP1_P8 (KD-GB)	145 m	5 m	530699.12 4522944.85	530800.23 4523012.88
	SP1_P9 (KD-GB)	115 m	5 m	530693.04 4522967.36	530782.33 4523021.57
	SP1_P10 (KD-GB)	125 m	5 m	530657.14 4522968.10	530780.09 4523052.64
Çalışma Alanı 2	SP2_P1 (KD-GB)	600 m	5 m	531000.62 4523222.97	531164.95 4523426.47
Çalışma Alanı 3	SP3_P1 (KD-GB)	175 m	5 m	531864.13 4524110.61	531975.66 4524238.75
	SP3_P2 (KD-GB)	175 m	5 m	531848.06 4524123.86	531960.43 4524252.01
	SP3_P3 (KD-GB)	220 m	5 m	531864.72 4524168.34	532010.67 4524326.60
	SP3_P4 (KD-GB)	200 m	5 m	531851.18 4524181.60	531983.70 4524326.49
	SP3_P5 (KD-GB)	200 m	5 m	531863.61 4524231.61	531986.96 4524352.03
	SP3_P6 (KD-GB)	165 m	5 m	531874.40 4524270.51	531987.65 4524388.67
	SP3_P7 (KD-GB)	230 m	5 m	531823.13 4524238.09	531975.79 4524401.94
	SP3_P8 (KD-GB)	195 m	5 m	531801.22 4524239.11	531970.75 4524398.59
	SP3_P9 (KD-GB)	195 m	5 m	531817.88 4524282.48	531982.38 4524437.49
	SP3_P10 (KB-GD)	200 m	5 m	531889.50 4524130.26	531824.13 4524318.03
	SP3_P11 (KB-GD)	200 m	5 m	531923.27 4524173.25	531842.71 4524348.74
	SP3_P12 (KB-GD)	200 m	5 m	531950.82 4524214.11	531873.44 4524394.06

SP ölçüm çalışmalarında, KTÜ Jeofizik Mühendisliği Bölümü Uygulamalı Jeofizik laboratuvarı 1 ekipmanlarından; multivoltmetre, iki adet polarize olmayan seramik fincan (pot) elektrod, akım kablosu, kazma ve metre gibi ekipmanlar kullanılmıştır (Şekil 2.8). Belirlenen profiller üzerinde baza indirgenme ölçü tekniği kullanılarak veriler toplanmıştır. Bunun için ilk olarak, profiller boyunca 5'er metre ara ile yaklaşık 50 cm genişliğinde 5-6 cm derinliğinde çukurlar açılmıştır. Çukurların içi su ile birlikte çamurlaştırılarak,

elektrotlardan biri başlangıç noktasında sabit tutulurken, diğer elektrot her 5 m'de bir hareket ettirilerek, her noktadaki doğal potansiyel değerleri ve değerlerin ölçüldüğü zamanlar okunmuştur. Ayrıca ölçüye başlamadan önce profilin başında ve sonunda baz okumaları yapılmıştır. Özellikle sabit elektrotun bulunduğu çukurun nem içeriğinin sabit kalması ve güneşten etkilenmemesi için bu elektrot olabildiğince dış ortamdan izole edilmiştir. Daha sonra elde edilen *SP* verilerinde oluşabilecek zamansal kaymayı ortadan kaldırmak için verilere drift düzeltmesi yapılıp, *SP* grafikleri çizdirilerek (Ek 9-13) bu grafiklerden *SP* haritaları (Ek 14,15) oluşturulmuştur. Ayrıca *SP* haritalarında kapanım gösteren anomaliler üzerinden kesitler alınarak, nomogram tekniği kullanılarak yaklaşık derinlik ve açı değerleri bulunmuştur. Daha sonra bu değerler *SP* anomalilerinin gerçek derinliğini bulabilmek için R-max yaklaşımında yerine yazılarak anomali veren cismin derinliği belirlenmiştir.

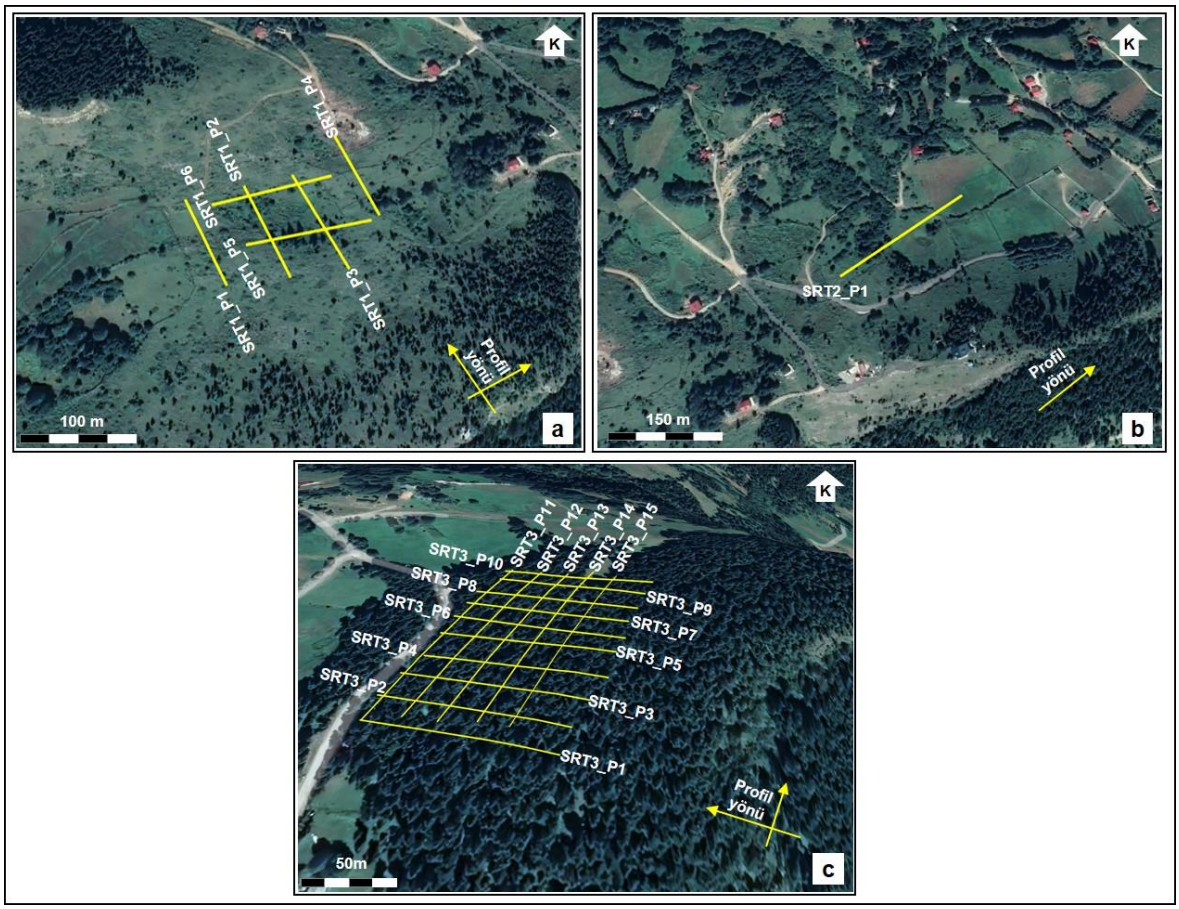


Şekil 2.8. *SP* yöntemi ölçü ekipmanı

2.4. Sismik Kırılma *(SRT)* Verilerinin Toplanması ve Değerlendirilmesi

Çalışma alanlarının tamamında sismik kırılma tomografi ölçümü yapılmıştır. Ölçümlere başlamadan önce çalışma alanlarında sismik ölçüm profilleri seçilmiştir (Şekil 2.9a-c). Bu profiller Çalışma Alanı 1 ve Çalışma Alanı 2'den alınan *ERT* kesitlerindeki

anomaliler dikkate alınarak, Çalışma Alanı 1'de KB-GD yönünde 4 profil ve KD-GB yönünde 2 profil olmak üzere toplamda 6 adet *SRT* profili, Çalışma Alanı 2'de ise KD-GB yönünde 1 adet *SRT* profili belirlenmiştir. Çalışma alanı 3'te ise bu alandan elde edilen *ERT* sonuçları incelendiğinde dolinlerin uzanım yönlerinin ve su akış yönünün gözlendiği bölge sınırlandırılarak bu alanda KB-GD yönünde, aralarındaki uzaklık 20 m olan 5 profil, KD-GB yönünde ise aralarındaki uzaklık 20 m olan 10 profil olmak üzere toplamda 15 adet sismik profil tayin edilmiştir. Tüm ölçüm profil uzunlukları, alıcı aralıkları, atış sayıları ve başlangıç ve bitiş noktalarının koordinatları Tablo 2.3'te verilmektedir.



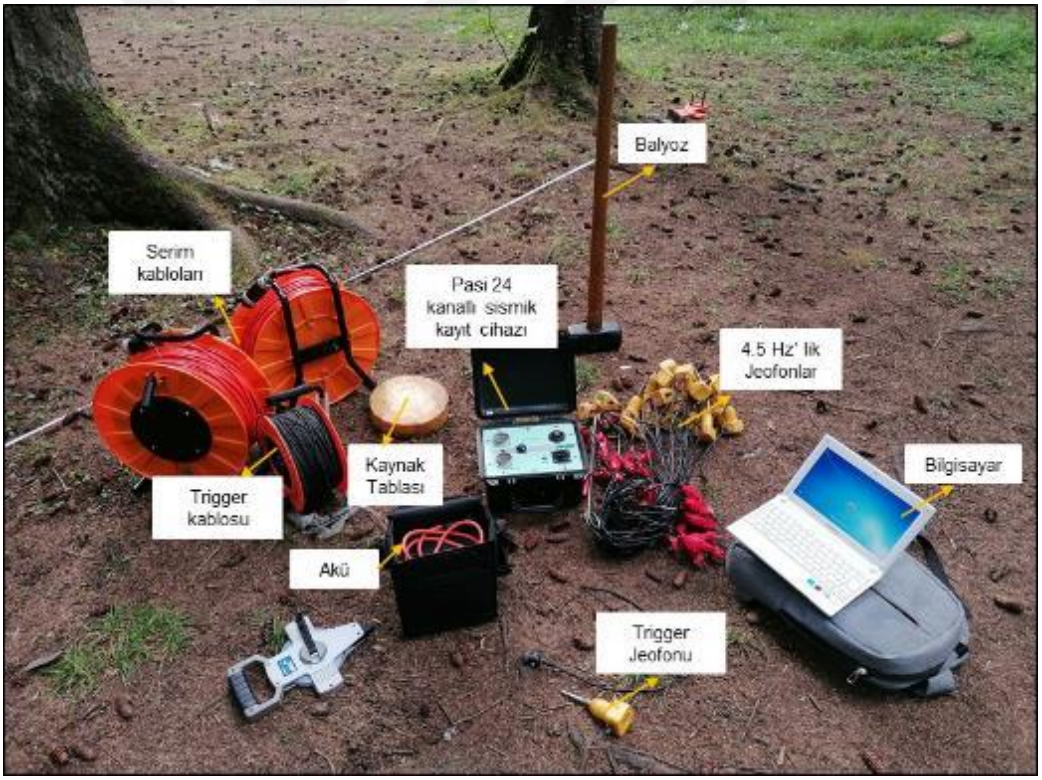
Şekil 2.9. Çalışma Alanlarında belirlenen *SRT* ölçüm profilleri. A) Çalışma Alanı 1'de belirlenen *SRT* profilleri, B) Çalışma Alanı 2'de belirlenen *SRT* profili, C) Çalışma Alanı 3'te belirlenen *SRT* profilleri

Tablo 2.3. *SRT* ve *MASW* yöntemi ölçüm profillerinin parametreleri

	Profil İsmi ve Yönü	Profil Uzunluğu	Jeofon Aralıkları	Atış Sayıları	Başlangıç Koordinatı	Bitiş Koordinatı
Çalışma Alanı 1	MASW1_P3 (KB-GD)	56 m	2 m	1	530808.17 4522949.19	
	SRT1_P4 (KB-GD)	106 m	2 m	14	530824.22 4523000.21	530773.61 4523091.36
	MASW1_P4 (KB-GD)	56 m	2 m	1	530824.22 4523000.21	
	SRT1_P5 (KD-GB)	106 m	2 m	14	530819.05 4522988.31	530717.61 4522957.80
	MASW1_P5 (KB-GD)	56 m	2 m	1	530819.05 4522988.31	
	SRT1_P6 (KD-GB)	106 m	2 m	14	530682.32 4522991.96	530776.36 4523037.53
	MASW1_P6 (KB-GD)	56 m	2 m	1	530682.32 4522991.96	
Çalışma Alanı 2	SRT2_P1 (KD-GB)	186 m	2 m	28	531013.478 4525033.195	531126.868 4525174.634
	MASW2_P2 (KD-GB)	56 m	2 m	1	531013.478 4525033.195	
Çalışma Alanı 3	SRT3_P1 (KD-GB)	106 m	2 m	14	531859.71 4524140.01	531758.97 4524167.66
	MASW3_P1 (KD-GB)	56 m	2 m	1	531859.71 4524140.01	
	SRT3_P2 (KD-GB)	106 m	2 m	14	531863.76 4524157.90	531764.36 4524188.44
	MASW3_P2 (KD-GB)	56 m	2 m	1	531863.76 4524157.90	
	SRT3_P3 (KD-GB)	106 m	2 m	14	531872.27 4524176.36	531773.81 4524204.02
	MASW3_P3 (KD-GB)	56 m	2 m	1	531872.27 4524176.36	
	SRT3_P4 (KD-GB)	106 m	2 m	14	531773.81 4524204.02	531983.70 4524326.49
	MASW3_P4 (KD-GB)	56 m	2 m	1	531773.81 4524204.02	
	SRT3_P5 (KD-GB)	106 m	2 m	14	531885.68 4524213.61	531788.88 4524246.94
	MASW3_P5 (KD-GB)	56 m	2 m	1	531885.68 4524213.61	
	SRT3_P6 (KD-GB)	106 m	2 m	14	531890.93 4524228.62	531803.072 4526079.479
	MASW3_P6 (KD-GB)	56 m	2 m	1	531890.93 4524228.62	
	SRT3_P7 (KD-GB)	106 m	2 m	14	531888.71 4524252.92	531791.93 4524281.36
	MASW3_P7 (KD-GB)	56 m	2 m	1	531888.71 4524252.92	
	SRT3_P8 (KD-GB)	106 m	2 m	14	531902.20 4524270.96	531799.58 4524305.82
	MASW3_P8 (KD-GB)	56 m	2 m	1	531902.20 4524270.96	
	SRT3_P9 (KD-GB)	106 m	2 m	14	531905.09 4524284.74	531806.59 4524320.95
	MASW3_P9 (KD-GB)	56 m	2 m	1	531905.09 4524284.74	
	SRT3_P10 (KD-GB)	106 m	2 m	14	531913.27 4524302.65	531831.603 4526231.000
	MASW3_P10 (KD-GB)	56 m	2 m	1	531913.27 4524302.65	

SRT verilerinin toplanmasında Karadeniz Teknik Üniversitesi Jeofizik Mühendisliği Bölümü Uygulamalı Jeofizik laboratuvarı 1'deki Pasi 24 kanallı sismik cihazı, 2 adet serim kablosu, 24 adet 4.5 Hz'lik jeofon, trigger kablosu, trigger jeofonu, balyoz, kaynak tablası, akü ve bilgisayar kullanılmıştır. Şenkaya & Karslı (2021) çalışmalarında, farklı frekanslı jeofonlar kullanılarak kaydedilen sismik kırılma verilerindeki ilk varış okumalarında, kullanılan jeofonların merkez frekanslarının farklı seçilmesinin bir etkisinin olmadığını tespit etmişlerdir. Dolayısıyla bu çalışmada, hem SRT yöntemi hem de MASW yönteminde 4.5 Hz'lik jeofonların kullanılması tercih edilmiştir.

Balyoz ve kaynak tablası enerji kaynağı olarak kullanılmıştır (Şekil 2.10). Tüm profillerdeki alıcı aralıkları 2 m olarak seçilmiştir. Alınan ölçümlerde profil uzunluklarına bağlı olarak profil boyunca en az 7 noktada atış yapılmıştır. Veriler toplanırken kayıt süresi 0.5 sn, örnekleme zamanı ise 0.25 ms seçilmiştir.



Şekil 2.10. Sismik kırılma yöntemi ölçü ekipmanları

Sismik kırılma tomografi ve yüzey dalgalarının çok kanallı analizi yöntemi verilerinin çözümü, *SeisImager* (Geometrics Inc, 2009) yazılımına ait alt modüllerden; *Pickwin 5.2.1.3, Plotrefa 3.2.0.5 ve WaveEq 4.0.1.0* modülleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Bunun için ilk olarak, SRT verilerinin ilk varış zamanları piklenerek bilgisayar ortamında ters çözüm

işlemine tabi tutulmuş ve böylece sığ yeraltı yapısının 2B sismik hız-derinlik modeli (Ek 16-20) oluşturulmuştur. Ayrıca elde edilen sismik hız-derinlik modellerinden 3B yeraltı modelleri (Ek 21, 22) elde edilmiştir.

2.5. Yüzey Dalgalarının Çok Kanallı Analizi (*MASW*) Verilerinin Toplanması ve Değerlendirilmesi

Bu çalışma kapsamında alınan *MASW* ölçümleri sismik kırılma tomografi profillerinde alınmıştır. Tüm profillerdeki alıcı aralıkları mesafesi 2 m ve kaynak ofseti 10 metre olarak belirlenmiştir. *MASW* verileri toplanırken kayıt süresi 1 sn, örnekleme zamanı ise 0.5 ms seçilmiştir. Her profilde 3 yığma olacak şekilde düz atış yapılarak veriler toplanmıştır. Bu verilerin toplanmasında, *SRT* verilerinin toplanmasındaki aynı jeofonlar (4.5 Hz) kullanılmıştır (Şekil 2.10). Genellikle MASW yönteminde 4.5 Hz lik jeofonlar kullanılarak ölçümler yapılmaktadır (Xia vd., 1999; Park vd., 1999; Park vd., 2002; Kanbur, 2014).

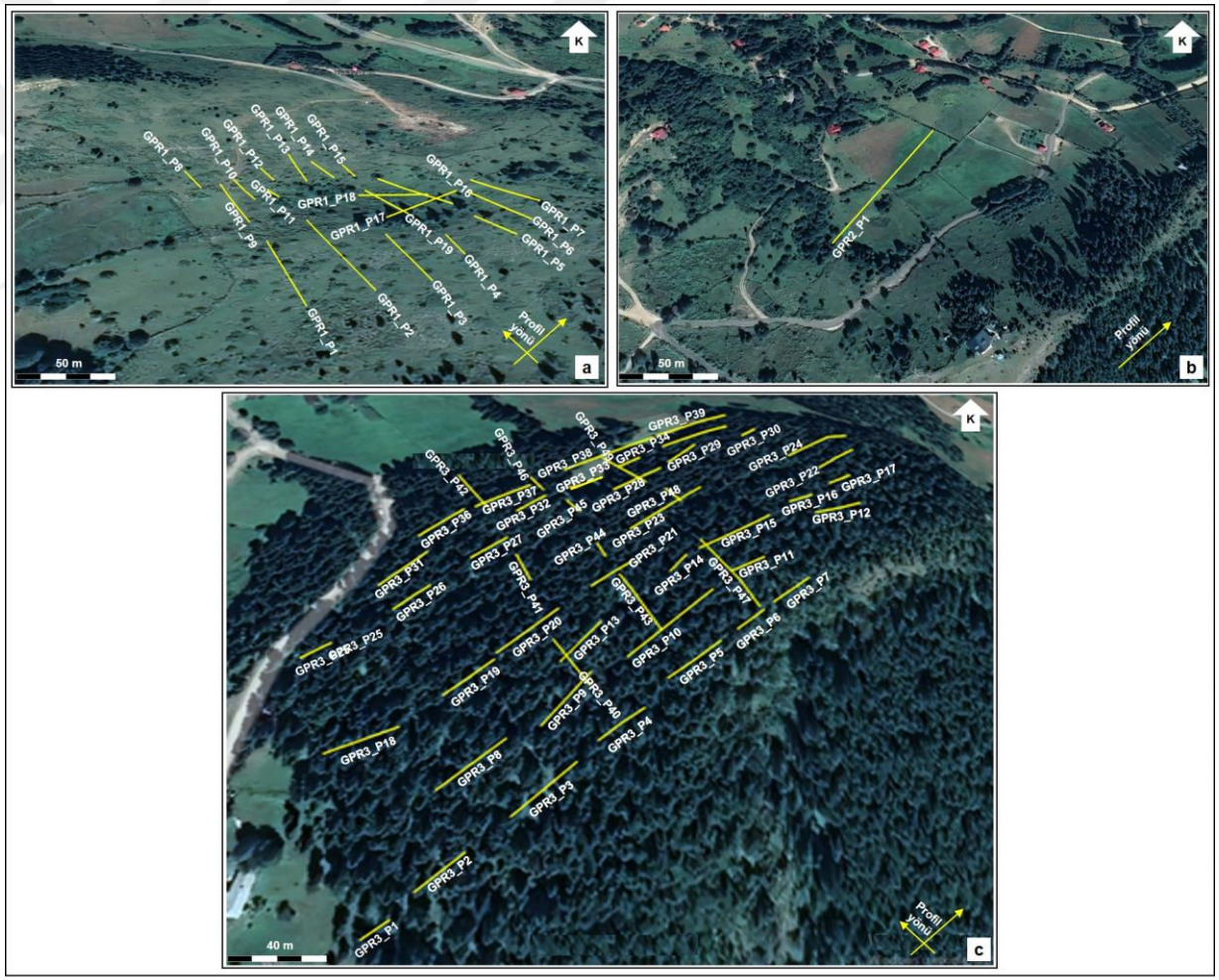
Çalışma Alanı 1'de 6 profil, Çalışma Alanı 2'de 1 profil ve Çalışma Alanı 3'te 15 profil olmak üzere toplamda 22 profil boyunca *MASW* ölçüleri alınmıştır. *MASW* yönteminin ölçüm parametreleri ve başlangıç koordinatları Tablo 2.3'te verilmektedir.

Sismik kırılma tomografi verilerindeki gibi, yüzey dalgalarının çok kanallı analizi verilerinin çözümü de, *SeisImager* (Geometrics Inc, 2009) yazılımına ait alt modüllerden; *Pickwin 5.2.1.3* ve *WaveEq 4.0.1.0* modülleri kullanılarak değerlendirilmiştir. *MASW* analizleri ise, öncelikle frekans-dalga sayısı analizine tabi tutularak faz hızı-dispersiyon eğrileri oluşturulmuştur. Daha sonra bu eğriler ters çözüm teknikleri aracılığıyla değerlendirilerek, profile ait bir boyutlu S dalga hız-derinlik değişimleri elde edilmiştir.

2.6. Yer Radarı *(GPR)* Verilerinin Toplanması ve Değerlendirilmesi

Bu tez kapsamında belirlenen çalışma alanlarının her birinde yer radarı yöntemi ile veri toplamak için ilk olarak profiller belirlenmiştir. Bu profiller belirlenirken, çalışma alanlarında yer yer yüzeylenme gösteren kayaçlar ve yoğun bitki örtüsü gibi yüzey koşulları dikkate alınmak zorunluluğu olmuştur. Bu kapsamda Çalışma Alanı 1'de KD-GB yönünde 17 adet, KB-GD yönünde ise 2 adet olmak üzere toplamda 19 adet (Şekil 2.11a); Çalışma Alanı 2'de KD-GB yönünde 1 adet (Şekil 2.11b); Çalışma Alanı 3'te ise KD-GB yönünde 41 adet (Şekil 2.11c), KB-GD yönünde ise 8 adet *GPR* profili belirlenmiştir. Profiller üzerinde genel ofset veri toplama tekniği kullanılarak *GPR* verileri elde edilmiştir. Ayrıca,

profillerin uzunlukları, iz aralığı parametreleri ve profillerin başlangıç-bitiş koordinatları Tablo 2.4'te verilmiştir.



Şekil 2.11. Çalışma Alanlarında belirlenen *GPR* ölçüm profilleri. A) Çalışma Alanı 1'de belirlenen *GPR* profili, B) Çalışma Alanı 2'de belirlenen *GPR* profilleri, C) Çalışma Alanı 3'te belirlenen *GPR* profilleri

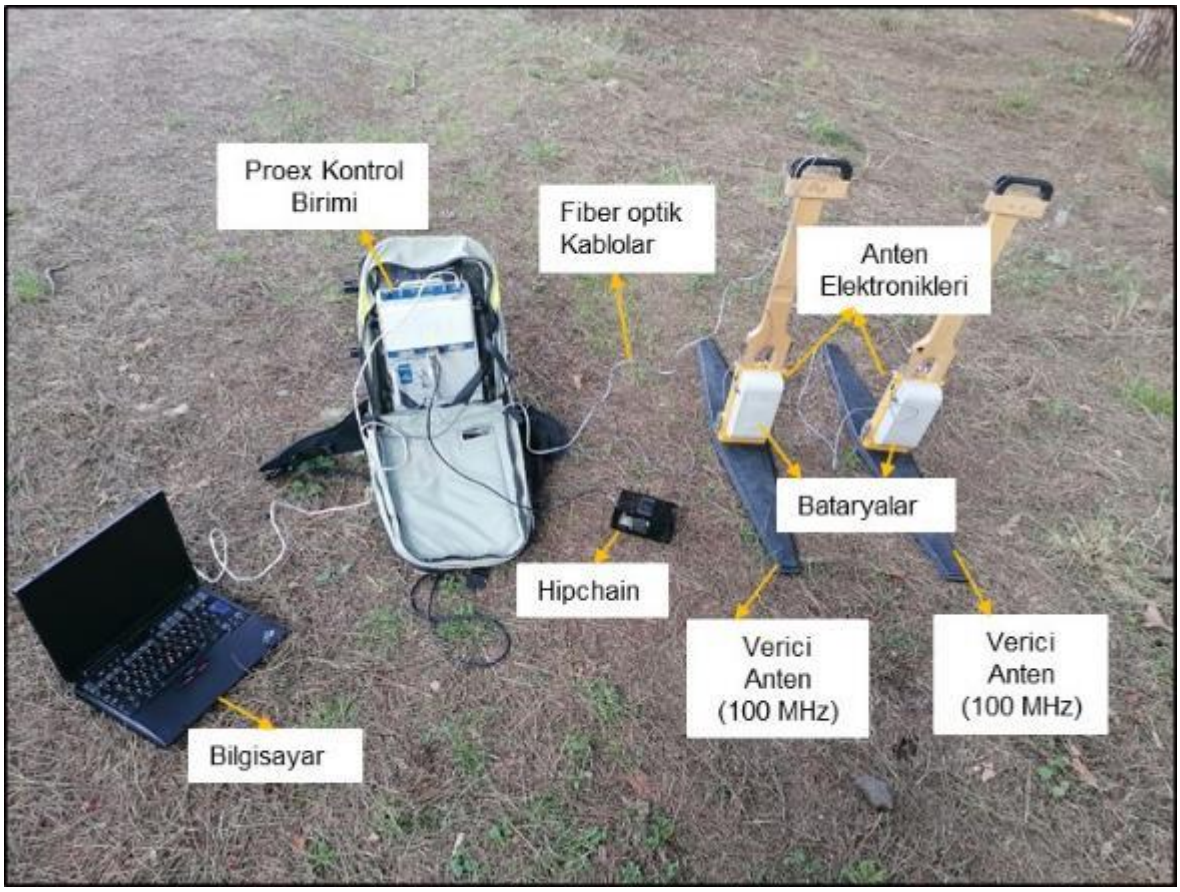
Tablo 2.4. *GPR* yöntemi ölçüm profillerinin parametreleri

	Profil Noktaları ve Yönü	Profil Uzunluğu	İz Aralıkları	Başlangıç Koordinatı	Bitiş Koordinatı
Çalışma Alanı 1	GPR1_P1 (KB-GD)	70 m	0.025 m	530715.63 4522893.12	530694.08 4522944.34
	GPR1_P2 (KB-GD)	80 m	0.025 m	530743.37 4522904.00	530711.44 4522963.49
	GPR1_P3 (KB-GD)	58 m	0.025 m	530766.79 4522910.81	530749.44 4522950.07
	GPR1_P4 (KB-GD)	31 m	0.025 m	530824.22 4523000.21	530773.61 4523091.36
	GPR1_P5 (KB-GD)	32 m	0.025 m	530783.72 4522931.14	530776.77 4522950.54
	GPR1_P6 (KB-GD)	46 m	0.025 m	530808.47 4522948.38	530792.98 4522969.13
	GPR1_P7 (KB-GD)	49 m	0.025 m	530819.80 4522964.23	530793.34 4522999.97
	GPR1_P8 (KB-GD)	18 m	0.025 m	530827.94 4522986.22	530796.31 4523012.34
	GPR1_P9 (KB-GD)	46 m	0.025 m	530655.25 4522987.88	530645.50 4523001.07
	GPR1_P10 (KB-GD)	23 m	0.025 m	530683.79 4522984.35	530669.00 4523004.00
	GPR1_P11 (KB-GD)	11 m	0.025 m	530694.90 4522985.13	530688.12 4522992.81
	GPR1_P12 (KB-GD)	13 m	0.025 m	530690.51 4523002.70	530683.40 4523013.14
	GPR1_P13 (KB-GD)	30 m	0.025 m	530708.12 4523004.86	530696.52 4523031.33
	GPR1_P14 (KB-GD)	23 m	0.025 m	530722.45 4523014.31	530708.59 4523031.07
	GPR1_P15 (KB-GD)	15.5 m	0.025 m	530733.35 4523017.21	530726.24 4523030.00
	GPR1_P16 (KB-GD)	50 m	0.025 m	530715.63 4522893.12	530694.08 4522944.34
	GPR1_P17 (KD-GB)	32 m	0.025 m	530743.37 4522904.00	530711.44 4522963.49
	GPR1_P18 (KD-GB)	38 m	0.025 m	530766.79 4522910.81	530749.44 4522950.07
	GPR1_P19 (KD-GB)	54 m	0.025 m	530824.22 4523000.21	530773.61 4523091.36
Çalışma Alanı 2	GPR2_P1 (KD-GB)	180 m	0.025 m	531030.91 4523328.00	530792.98 4522969.13
	GPR3_P1 (KD-GB)	17 m	0.025 m	531813.14 4524053.78	531821.28 4524061.58
	GPR3_P2 (KD-GB)	28 m	0.025 m	531827.00 4524069.00	531842.41 4524086.65
	GPR3_P3 (KD-GB)	26 m	0.025 m	530683.79 4522984.35	530669.00 4523004.00
	GPR3_P4 (KD-GB)	24 m	0.025 m	531884.67 4524135.68	531902.88 4524153.74
	GPR3_P5 (KD-GB)	26 m	0.025 m	531911.92 4524168.21	531934.06 4524192.17
	GPR3_P6 (KD-GB)	18 m	0.025 m	531941.95 4524200.75	531954.27 4524214.57
	GPR3_P7 (KD-GB)	26 m	0.025 m	531958.21 4524219.92	531977.17 4524240.54
	GPR3_P8 (KD-GB)	36 m	0.025 m	531864.85 4524139.81	531882.00 4524171.00
	GPR3_P9 (KD-GB)	35 m	0.025 m	531864.00 4524139.00	531882.00 4524171.00
	GPR3_P10 (KD-GB)	60 m	0.025 m	531942.98 44524235.28	531958.10 4524245.67
	GPR3_P11 (KD-GB)	18 m	0.025 m	531986.84 4524284.54	532008.12 4524291.96
	GPR3_P12 (KD-GB)	20 m	0.025 m	531986.00 4524284.00	532008.00 4524291.00
	GPR3_P13 (KD-GB)	28 m	0.025 m	531869.76 4524173.36	531885.58 4524198.62
	GPR3_P14 (KD-GB)	18 m	0.025 m	531916.79 4524229.06	531924.23 4524243.97
	GPR3_P15 (KD-GB)	46 m	0.025 m	531928.16 4524250.87	531964.18 4524280.44

Tablo 2.4'ün devamı

	Profil Noktaları ve Yönü	Profil Uzunluğu	İz Aralıkları	Başlangıç Koordinatı	Bitiş Koordinatı
Çalışma Alanı 3	GPR3_P16 (KD-GB)	14 m	0.025 m	531975.58 4524296.26	531986.93 4524300.64
	GPR3_P17 (KD-GB)	16 m	0.025 m	531997.16 4524314.44	532010.25 4524327.27
	GPR3_P18 (KD-GB)	29 m	0.025 m	531786.00 4524129.00	531812.00 4524140.00
	GPR3_P19 (KD-GB)	32 m	0.025 m	531825.17 4524156.29	531844.63 4524177.80
	GPR3_P20 (KD-GB)	30 m	0.025 m	531844.00 4524181.00	531868.00 4524208.00
	GPR3_P21 (KD-GB)	26 m	0.025 m	531881.43 4524222.47	531899.54 4524242.75
	GPR3_P22 (KD-GB)	16 m	0.025 m	531996.56 4524334.20	532019.88 4524360.61
	GPR3_P23 (KD-GB)	55 m	0.025 m	531898.67 4524270.50	531934.56 4524311.07
	GPR3_P24 (KD-GB)	55 m	0.025 m	531982.43 4524348.02	532021.86 4524387.82
	GPR3_P25 (KD-GB)	19 m	0.025 m	531765.05 4524183.23	531776.97 4524193.71
	GPR3_P26 (KD-GB)	29 m	0.025 m	531797.62 4524213.23	531811.28 4524230.83
	GPR3_P27 (KD-GB)	19 m	0.025 m	531826.18 4524253.21	531842.37 4524271.15
	GPR3_P28 (KD-GB)	34 m	0.025 m	531891.30 4524316.43	531916.31 4524341.07
	GPR3_P29 (KD-GB)	30 m	0.025 m	531920.92 4524347.75	531936.31 4524372.79
	GPR3_P30 (KD-GB)	20 m	0.025 m	531962.00 4524383.00	531972.86 4524399.15
	GPR3_P31 (KD-GB)	30 m	0.025 m	531788.00 4524232.00	531806.35 4524260.22
	GPR3_P32 (KD-GB)	24 m	0.025 m	531844.46 4524295.13	531858.11 4524314.07
	GPR3_P33 (KD-GB)	32 m	0.025 m	531869.54 4524322.55	531873.33 4524321.90
	GPR3_P34 (KD-GB)	16 m	0.025 m	531893.53 4524347.63	531906.37 4524359.90
	GPR3_P35 (KD-GB)	32 m	0.025 m	531918.03 4524372.71	531956.65 4524405.63
	GPR3_P36 (KD-GB)	34 m	0.025 m	531799.79 4524275.74	531818.65 4524301.24
	GPR3_P37 (KD-GB)	36 m	0.025 m	531823.69 4524303.81	531849.63 4524328.02
	GPR3_P38 (KD-GB)	64 m	0.025 m	531865.64 4524347.07	531915.58 4524393.13
	GPR3_P39 (KD-GB)	57 m	0.025 m	531914.99 4524393.46	531958.72 4524432.17
	GPR3_P40 (KB-GD)	38 m	0.025 m	531881.00 4524161.00	531866.57 4524188.77
	GPR3_P41 (KB-GD)	11 m	0.025 m	531855.10 4524231.35	531847.92 4524254.74
	GPR3_P42 (KB-GD)	53 m	0.025 m	531829.26 4524302.06	531810.45 4524345.28
	GPR3_P43 (KB-GD)	9.5 m	0.025 m	531910.20 4524194.18	531893.44 4524231.74
	GPR3_P44 (KB-GD)	16 m	0.025 m	531887.48 4524245.03	531883.72 4524258.67
	GPR3_P45 (KB-GD)	35 m	0.025 m	531875.23 4524291.83	531868.60 4524305.34
	GPR3_P46 (KB-GD)	24 m	0.025 m	531856.15 4524320.50	531848.99 4524339.56
	GPR3_P47 (KB-GD)	48 m	0.025 m	531952.76 4524214.57	531930.14 4524260.76
	GPR3_P48 KB-GD)	15 m	0.025 m	531924.76 4524297.48	531917.61 4524313.21
	GPR3_P49 KB-GD)	54 m	0.025 m	530694.90 4522985.13	531886.98 4524362.70

GPR verilerinin toplanmasında Mala firmasına ait 100 MHz'lik korumasız anten, Proex kontrol birimi, hipchain, bataryalar, fiberoptik kablolar ve bilgisayar kullanılmıştır (Şekil 2.12).



Şekil 2.12. Yer radarı yöntemi ölçü ekipmanı

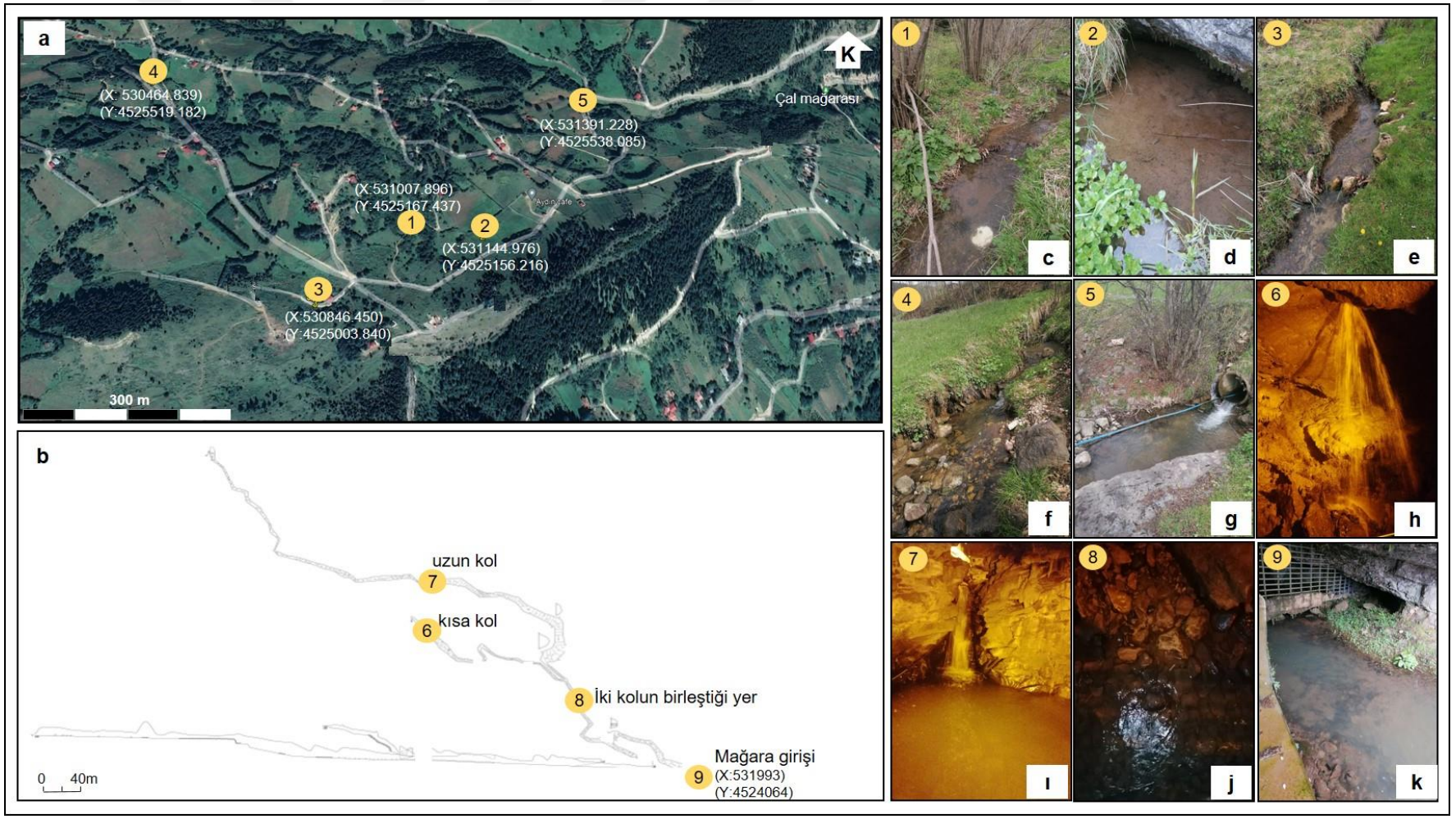
Yer Radarı verileri ReflexW (Sandmeier, 2016) programı kullanılarak değerlendirilmiştir. Bu programda ham *GPR* verilerine temel veri işlem adımlarından; dewow, energy decay ve background removal işlemleri uygulanarak 2B'lu veriler (Ek 23-36) yorumlanabilir hale getirilmiştir. Temel veri işlem adımları uygulanmasına rağmen, veri görüntü kalitesi yeterince iyi olmayan verilere ise, genlik spektrumlarındaki görünüme bağlı olarak ileri veri işlem adımlarından band geçişli süzgeçleme işlemleri uygulanmıştır. Band geçişli süzgeç uygulanan veriler ve uygulanan süzgecin köşe frekansları sırası ile; GPR1_P4(20-36-200-300 MHz), GPR1_P6(16-20-180-250 MHz), GPR1_P17(30-40-175-230 MHz), GPR3_P2(15-30-178-200 MHz), GPR3_P6(14-20-210-290 MHz), GPR3_P16(21-45-135-190 MHz), GPR3_P20(15-36-205-300 MHz), GPR3_P20(30-60-150-230 MHz) ve GPR3_P49(18-26-214-314 MHz)'dir. Ayrıca Köroğlu (2018) tarafından

yapılan çalışma incelendiğinde, araştırılan ortamın ayrıntılı jeolojik bilgilerinden, alanın kireçtaşlarından oluşmuş olduğu dikkate alınarak, zaman-derinlik dönüşümü için kireçtaşının EM dalga hızı 0.12 m/ns (Robinson vd., 2013) kullanılmıştır.

2.7. Su Örneklerinin Toplanması ve Değerlendirilmesi

Bu tez kapsamında, ayrıca Trabzon ili Düzköy ilçesine bağlı Çalköy/Çayırbağı mevkiinde yer alan Çal Mağarası içerisinden geçmekte olan yeraltı nehri ve bu nehri besleyen yüzey sularının mevsimsel olarak fiziko-kimyasal özelliklerin incelenerek, su kimyasındaki değişimler ile suyun geçtiği kayaçlar veya karstik sistemler arasında nasıl bir etkileşim olduğunun belirlenmesi amaçlanmaktadır. Bu amaca yönelik olarak; öncelikle Çal Mağarasının içerisinde yer aldığı Kale deresine ait hidrolojik havza sınırları belirlenmiştir. Bu kapsamda Kale deresi ve onun yan kollarını oluşturan dereler kullanılarak hidrojeolojik havza haritası hazırlanmıştır (Şekil 1.6).

Kurak (19.09.2022) ve yağışlı (27.04.2022-27.04.2023) olmak üzere iki dönemi temsil eden zamanlarda, çalışma alanını beslediği düşünülen yüzey sularındaki (Şekil 2.13a) ve Çal Mağarası içerisinden akmakta olan nehir sularından (Şekil 2.13b) toplam 9 noktadan su örneklemesi yapılarak, verilerin fiziko-kimyasal analizleri, majör anyon-katyon ve iz element analizleri yapılmıştır.



Şekil 2.13. Su örnekleme noktalarının konumları. a) Çalköy/Çayırbağı çevresindeki yüzey sularından alınan su örneklerinin konumları, b) Çal Mağarası içerisinden alınan su örneklerinin konumları (Törk vd., 2013'ten değiştirilmiştir), c) 1. su örneği kaynağı, d) 2. su örneği kaynağı, e) 3. su örneği kaynağı, f) 4. su örneği kaynağı, g) 5. su örneği kaynağı, h) 6. su örneği kaynağı, ı) 7. su örneği kaynağı, j) 8. su örneği kaynağı, k) 9. su örneği kaynağı

Şekil 2.13'teki örnekleme noktalarından her iki dönemde de 9 adet su örneği, anlık numune alma işlemi şeklinde gerçekleştirilmiştir. Su örneklerinin alındığı yerlerde HQ Series Multi cihazı kullanılarak suyun fiziksel parametreleri (sıcaklık, pH, iletkenlik ve çözünmüş oksijen miktarı) ölçülmüştür. Ağır metal analizi ve majör anyon-katyon analizleri için her bir noktadan iki ayrı şişede örnek toplamak için 0.25 ve 1000 litrelik polipropilen şişeler kullanılmıştır. Su numunesi almaya başlamadan önce şişeler saf su ile dezenfekte edilerek aynı noktadan iki şişe su örneği alınmıştır. Alınan örnekler kimyasal koruma uygulanarak soğuk zincir sistemi ile DSİ 22. Bölge Müdürlüğü Kalite ve Kontrol Laboratuvarı ve Trabzon Su Ürünleri Merkez Araştırma Enstitüsü Su Analiz Laboratuvarına ulaştırılmıştır.

Araştırma sahasından 19.09.2022 (kurak dönem)'de alınan su örneklerinin fiziksel özellikleri ve majör anyon/katyon analiz sonuçları ile iz element sonuçları sırası ile Tablo 2.5 ve Tablo 2.6'da, 27.04.2023 (yağışlı dönem)'de alınan su örneklerinin fiziksel özellikleri ve majör anyon/katyon analiz sonuçları ile iz element sonuçları Tablo 2.7 ve Tablo 2.8' de, 27.04.2023 (yağışlı dönem)'de alınan su örneklerinin fiziksel özellikleri ve majör anyon/katyon analiz sonuçları ile iz element sonuçları ise Tablo 2.9 ve Tablo 2.10'da gösterilmektedir.

Tablo 2.5. Su örneklerine ait fiziksel özellikler ve majör anyon-katyon içerikleri (19.09.2022 tarihli analiz sonuçları)

Örnek No	Örnek Türü	DO (mg/l)	pH	EC (µS/cm)	Sıcaklık (C⁰)	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)	Na (mg/l)	K (mg/l)	HCO_3 (mg/l)	SO_4 (mg/l)	Cl (mg/l)	F (mg/l)	NO_2 (mg/l)	NO_3 (mg/l)
1	Yüzey Suyu	5,44	-	199,3	17,4	60,83	8,30	13,52	8,90	198,75	14,08	19,11	0,12	0,162	1,782
2	Yüzey Suyu	8,23	-	230	15,4	84,80	7,75	9,77	0,96	227,59	28,23	14,13	0,13	0,150	4,342
3	Yüzey Suyu	7,66	-	277	15,7	94,67	5,93	17,23	9,58	251,72	29,74	23,85	0,11	0,201	15,303
4	Yüzey Suyu	7,96	-	162,1	16,9	51,76	6,93	13,24	3,22	155,47	22,23	15,84	0,10	0,148	7,463
5	Yüzey Suyu	8,00	-	178,5	18,6	44,50	16,52	15,50	0,98	174,63	34,50	10,64	0,10	0,150	5,236
6	Çal Mağ. Nehri(sifon)	9,24	-	181,3	13,8	48,87	15,80	13,60	0,96	182,47	28,41	11,48	0,10	0,147	6,198
7	Çal Mağ. Nehri(uzun kol)	9,44	-	165.9	11,6	46,07	11,36	14,08	2,10	155,90	22,87	13,65	0,10	0,144	10,000
8	Çal Mağ. Nehri(iki kol kesişim)	9,38	-	172,4	11,2	47,94	12,38	12,90	1,68	167,23	24,62	11,72	0,10	0,142	8,623
9	Çal Mağ. Nehri(giriş havuzu)	9,49	-	171,8	10,7	47,80	12,30	13,17	1,73	68,07	24,26	12,09	0,10	0,140	8,814
TS266	**En Yüksek Değer**		**6,5-9,5**	**2500**				**200**			**250**	**250**	**1,5**	**0,5**	**50**
YSK		**>8 I(çok iyi) 6 II(iyi) <6 III(orta)**	**6-9 (I.,II., III.sınıf)**	**<400 I(çok iyi) 1000 II(iyi) >1000 III(orta)**									**≤1 I(çok iyi) 1,5 II(iyi) >1,5 III(orta)**		

Tablo 2.6. Su örneklerine ait iz element içerikleri (19.09.2022 tarihli analiz sonuçları)

Örnek No		Sb (mg/l)	Ag (mg/l)	Al (mg/l)	As (mg/l)	Cu (mg/l)	Ba (mg/l)	Be (mg/l)	B (mg/l)	Zn (mg/l)	Fe (mg/l)	Cd (mg/l)	Co (mg/l)	Cr (mg/l)	Pb (mg/l)	Ni (mg/l)	Ti (mg/l)	Se (mg/l)	V (mg/l)	Mn (mg/l)	Mo (mg/l)
1		0,33	<0.1	43,03	1,53	3,54	249,78	<0.1	41,88	50,76	44,17	0,13	0,48	0,60	<0.1	2,39	2,21	2,48	1,65	307,98	0,66
2		0,21	<0.1	<0.1	0,38	<0.1	5,09	<0.1	<0.1	5,73	9,49	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	1,51	<0.1	6,24	0,30
3		0,22	<0.1	<0.1	0,37	<0.1	0,55	<0.1	<0.1	5,59	22,35	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0,30	1,41	<0.1	<0.1	0,29
4		0,28	<0.1	14,32	0,96	1,05	55,73	<0.1	20,40	12,32	50,40	<0.1	0,11	1,72	0,35	0,73	1,22	2,90	1,52	5,03	0,56
5		0,22	<0.1	<0.1	0,51	<0.1	19,54	<0.1	1,85	9,36	28,84	<0.1	<0.1	<0.1	0,26	<0.1	0,11	1,70	0,37	5,33	0,33
6		0,26	<0.1	11,35	1,01	1,05	65,98	<0.1	30,86	20,53	16,39	<0.1	<0.1	1,67	0,67	0,54	1,41	1,39	3,75	4,62	0,63
7		0,27	<0.1	16,57	0,82	0,94	36,86	<0.1	18,06	14,27	14,69	<0.1	<0.1	1,97	0,93	0,51	0,82	2,39	3,58	1,58	0,51
8		0,27	<0.1	19,03	0,87	0,92	29,69	<0.1	19,85	11,26	15,22	<0.1	<0.1	1,91	1,10	0,42	0,77	2,65	3,57	1,47	0,56
9		0,22	<0.1	<0.1	0,47	<0.1	1,30	<0.1	<0.1	5,62	21,23	<0.1	<0.1	<0.1	0,79	<0.1	0,13	<0.1	0,11	<0.1	0,30
TS266	**En Yüksek Değer**	5		**200**	**10**	**2000**			**1000**		**200**	**5**		**50**	**10**	**20**	**-**	**10**		**50**	
YSK																		**≤10 I(çok iyi) 15 II(iyi) >15 III(orta)**		**≤100 I(çok iyi) 500 II(iyi) >500 III(orta)**	

Tablo 2.7. Su örneklerine ait fiziksel özellikler ve majör anyon-katyon içerikleri (27.04.2022 tarihli analiz sonuçları)

	Örnek Türü	DO (mg/l)	pH	EC (µS/cm)	Sıcaklık (C⁰)	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)	Na (mg/l)	K (mg/l)	HCO_3 (mg/l)	SO_4 (mg/l)	Cl (mg/l)	F (mg/l)	NO_2 (mg/l)	NO_3 (mg/l)
1	Yüzey Suyu	8,57	8,19	137,8	14,5	24,54	4,01	6,47	1	77,96	11,23	3,71	0,06	<0,063	3,903
2	Yüzey Suyu	7,56	7,31	249	14,9	51,9	6,34	6,03	0,54	147,09	21,3	7,88	0,09	<0,126	1,686
3	Yüzey Suyu	9,25	8,14	338	15,7	73,46	4,3	7,05	1,88	181,21	35,68	9,48	0,07	<0,127	10,735
4	Yüzey Suyu	8,16	7,61	115.9	16,0	21,07	3,12	6,71	0,93	68,95	9,98	3,65	0,05	<0,062	3,121
5	Yüzey Suyu	8,37	7,69	110.2	15,0	18,38	4,36	7,54	0,6	64,14	9,77	3,15	0,05	<0,063	3,238
6	Çal Mağ. Nehri(sifon)	9,50	7,32	108.3	10,6	19,96	4,77	7,41	0,56	70,17	10,45	3,16	0,05	<0,062	3,63
7	Çal Mağ. Nehri(uzun kol)	9,94	8,01	165.0	8,7	36,97	5,76	6,60	0,97	109,2	17,20	9,3	0,07	<0,126	6,17
8	Çal Mağ. Nehri(iki kol kesişim)	9,74	7,82	137,6	9,5	29,43	4,87	7,91	0,83	90,65	12,23	2,88	0,05	<0,067	4,64
9	Çal Mağ. Nehri(giriş havuzu)	9,71	7,48	127,4	9,6	26,51	5,00	7,72	0,95	68,07	12,34	4,14	0,05	<0,067	4,383
TS266	**En Yüksek Değer**		**6,5-9,5**	**2500**							**250**	**250**	**1,5**	**0,5**	**50**
YSK		**>8 I(çok iyi) 6 II(iyi) <6 III(orta)**	**6-9 (I.,II., III.sınıf)**	**<400 I(çok iyi) 1000 II(iyi) >1000 III(orta)**									**≤1 I(çok iyi) 1,5 II(iyi) >1,5 III(orta)**		

Tablo 2.8. Su örneklerine ait iz element içerikleri (27.04.2022 tarihli analiz sonuçları)

Örnek No		Sb (µg/l)	Ag (µg/l)	Al (µg/l)	As (µg/l)	Cu (µg/l)	Ba (µg/l)	Be (µg/l)	B (µg/l)	Zn (µg/l)	Fe (µg/l)	Cd (µg/l)	Co (µg/l)	Cr (µg/l)	Pb (µg/l)	Ni (µg/l)	Ti (µg/l)	Se (µg/l)	V (µg/l)	Mn (µg/l)	Mo (µg/l)
1		<0,01	<0.1	19,612	0,513	0,621	12,172	<0.1	3,260	7,100	19,313	<0.1	0,061	0,984	<0.1	0,548	0,745	<0.1	1,326	0,298	**<0.1**
2		<0.1	<0.1	38,935	0,184	1,225	13,003	0,622	3,277	81,709	19,333	0,491	0,433	2,814	0,552	1,275	2,447	<0.1	1,420	0,988	**<0.1**
3		<0.1	<0.1	6,865	0,371	0,382	38,246	<0.1	2,772	10,154	3,814	<0.1	0,095	2,284	<0.1	0,694	0,289	<0.1	0,761	0,725	**<0.1**
4		<0.1	<0.1	29,644	0,383	0,782	10,598	0,333	3,985	40,652	57,181	0,196	0,211	1,607	0,111	0,675	1,398	<0.1	1,905	0,511	**<0.1**
5		<0.1	<0.1	17,987	0,244	0,628	3,125	0,247	5,655	29,787	14,990	0,124	0,152	1,616	0,011	0,460	1,036	<0.1	2,597	0,407	**<0.1**
6		<0.1	<0.1	27,574	0,336	0,684	3,589	0,191	5,358	21,650	14,123	<0.1	0,125	1,582	<0.1	0,465	0,946	<0.1	2,331	0,497	**<0.1**
7		<0.1	<0.1	14,879	0,501	0,792	12,561	0,584	3,811	78,518	18,613	0,446	0,387	2,439	<0.1	0,831	1,008	<0.1	1,812	0,667	**<0.1**
8		<0.1	<0.1	13,578	0,343	0,678	8,348	0,222	4,076	30,166	17,034	0,132	0,161	1,910	<0.1	0,572	0,667	<0.1	2,097	0,335	**<0.1**
9		<0.1	<0.1	16,210	0,274	0,871	6,559	0,514	4,669	67,405	17,675	0,383	0,331	2,159	0,333	0,760	1,329	<0.1	2,248	0,688	**<0.1**
TS266	**En Yüksek Değer**	5		**200**	**10**	**2000**			**1000**		**200**	**5**		**50**	**10**	**20**	**-**	**10**		**50**	
YSK																		**≤10 I(çok iyi) 15 II(iyi) >15 III(orta)**		**≤100 I(çok iyi) 500II(iyi) >500 III(orta)**	

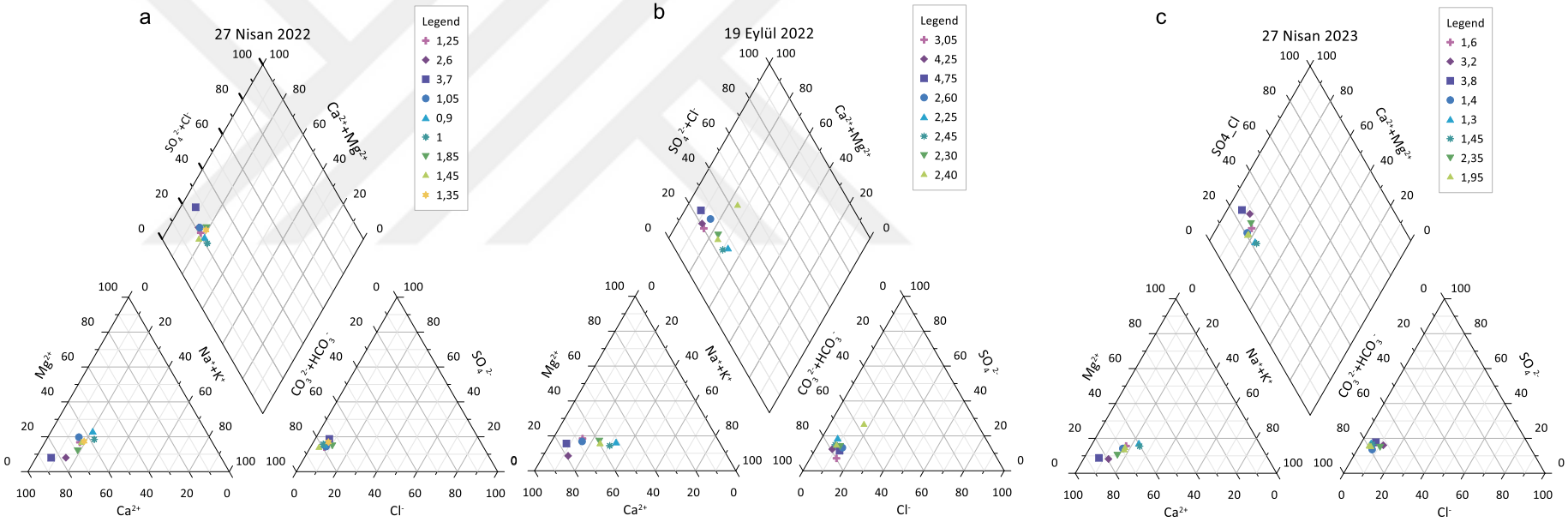
Tablo 2.9. Su örneklerine ait fiziksel özellikler ve majör anyon-katyon içerikleri (27.04.2023 tarihli analiz sonuçları)

Örnek No	Örnek Türü	DO (mg/l)	pH	EC (µS/cm)	Sıcaklık (C^0)	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)	Na (mg/l)	K (mg/l)	HCO_3 (mg/l)	SO_4 (mg/l)	Cl (mg/l)	F (mg/l)	NO_2 (mg/l)	NO_3 (mg/l)
1	Yüzey Suyu	9,47	8,98	152,4	9	31,82	5,20	7,94	1,31	93,45	16,91	5,24	0,07	<0,063	6,586
2	Yüzey Suyu	8,85	8,50	272	9,3	63,74	5,88	7,48	0,80	159,6	27,96	14,88	0,10	n,d,	5,970
3	Yüzey Suyu	8,40	8,62	283	9,4	76,48	4,38	7,70	2,02	181,9	34,44	10,37	0,01	n,d,	9,610
4	Yüzey Suyu	9,25	8,87	124,8	9	27,90	3,96	6,20	1,13	74,29	9,98	3,73	0,07	0,062	6,082
5	Yüzey Suyu	9,53	8,97	125,9	9	25,60	6,16	7,60	0,62	79,63	14,30	3,40	0,07	0,062	6,170
6	Çal Mağ, Nehri(sifon)	9,52	8,65	138,3	8,7	28,64	6,51	8,00	0,80	89,10	14,92	3,78	0,07	n,d,	5,802
7	Çal Mağ, Nehri(uzun kol)	9,96	9,11	197,7	9	47,42	5,92	7,28	1,40	133,3	20,60	10,56	0,09	0,126	8,094
8	Çal Mağ, Nehri(iki kol kesişim)	9,56	9,02	169,8	8,8	39,30	5,73	8,60	1,03	111,6	17,07	4,02	0,08	n,d,	6,860
9	Çal Mağ, Nehri(giriş havuzu)	9,33	9,10	169,3	9,1	39,40	5,66	8,03	1,00	112,5	17,44	5,10	0,06	n,d,	6,400
TS266	**En Yüksek Değer**		**6,5-9,5**	**2500**							**250**	**250**	**1,5**	**0,5**	**50**
YSK		**>8 I(çok iyi) 6 II(iyi) <6 III(orta)**	**6-9 (I,,II,, III,sınıf)**	**<400 I(çok iyi) 1000 II(iyi) >1000 III(orta)**									**≤1 I(çok iyi) 1,5 II(iyi) >1,5 III(orta)**		

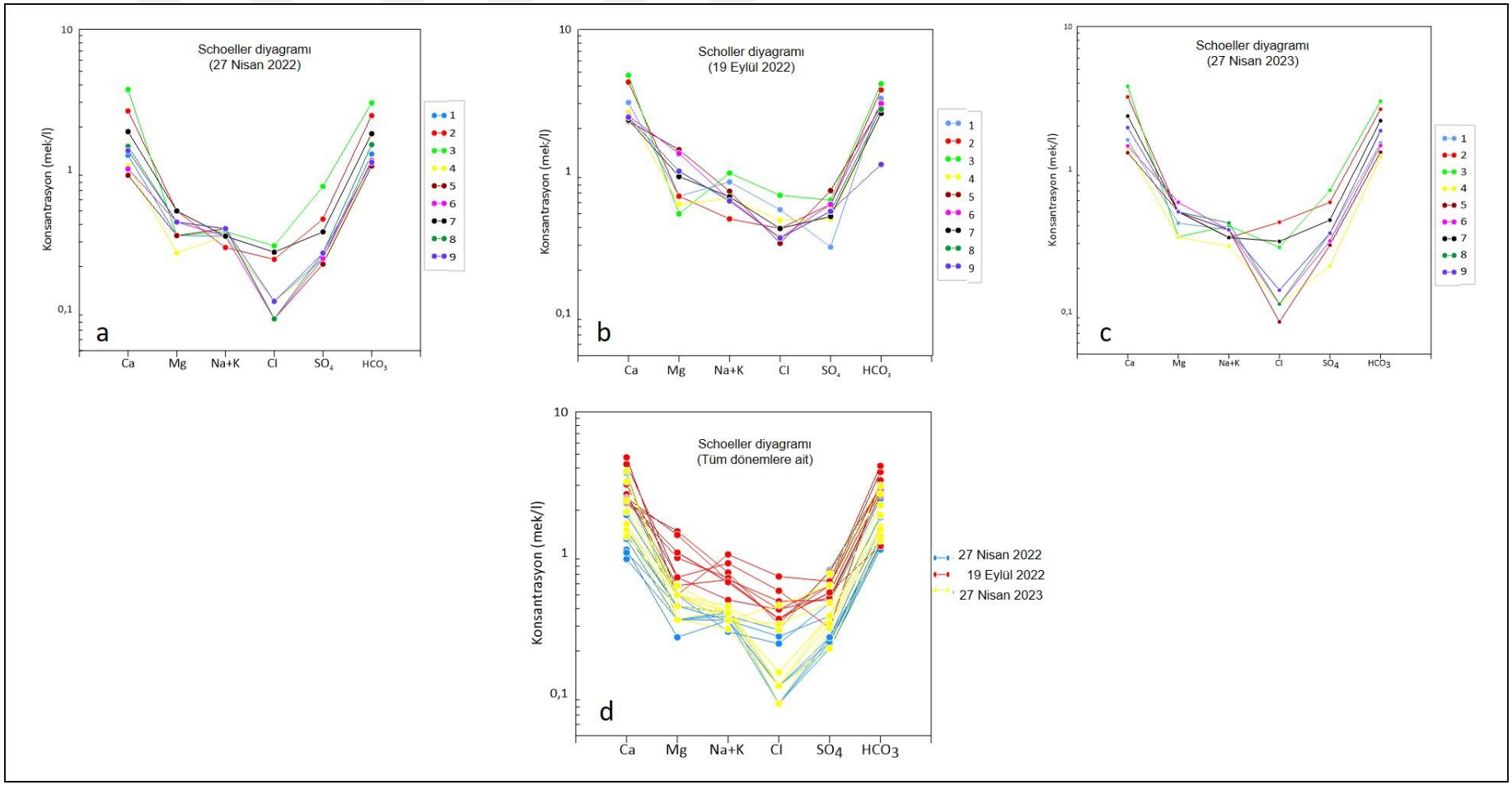
Tablo 2.10. Su örneklerine ait iz element içerikleri (27.04.2023 tarihli analiz sonuçları)

Örnek No		Sb (µg/l)	Ag (µg/l)	Al (µg/l)	As (µg/l)	Cu (µg/l)	Ba (µg/l)	Be (µg/l)	B (µg/l)	Zn (µg/l)	Fe (µg/l)	Cd (µg/l)	Co (µg/l)	Cr (µg/l)	Pb (µg/l)	Ni (µg/l)	Ti (µg/l)	Se (µg/l)	V (µg/l)	Mn (µg/l)	Mo (µg/l)
1		<0,1	0,01	126,98	0,75	2,51	111,74	-	19,90	42,57	159,49	<0,1	<0,1	<0,1	0,18	1,22	4,41	1,31	1,59	8,95	<0,1
2		<0,1	<0,1	90,86	0,80	2,06	109,49	-	15,05	48,12	95,78	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	1,82	5,87	1,47	0,81	9,70	<0,1
3		<0,1	0,10	31,69	0,94	1,11	127,41	-	15,48	46,87	35,22	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	1,64	0,82	0,98	0,30	7,78	<0,1
4		<0,1	<0,1	131,77	0,74	2,26	107,47	-	14,31	44,78	217,82	<0,1	<0,1	<0,1	0,14	0,99	3,50	1,64	1,98	22,55	<0,1
5		<0,1	<0,1	130,47	0,77	2,71	104,82	-	18,66	44,30	170,31	<0,1	<0,1	<0,1	0,12	0,82	5,47	1,54	2,71	9,96	<0,1
6		<0,1	0,10	142,21	0,84	3,25	129,94	-	22,10	56,15	208,56	<0,1	<0,1	0,16	0,24	1,00	5,65	1,37	2,95	8,59	<0,1
7		<0,1	<0,1	60,10	0,78	2,15	126,30	-	17,50	49,72	74,814	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	1,33	2,14	1,40	1,56	2,06	<0,1
8		<0,1	<0,1	99,31	0,79	1,76	132,67	-	18,45	47,20	139,81	<0,1	<0,1	0,16	0,10	1,13	4,15	1,70	2,18	3,52	<0,1
9		<0,1	<0,1	78,64	0,77	1,90	125,27	-	18,63	48,72	88,933	<0,1	<0,1	0,13	<0,1	1,08	2,82	1,41	1,98	2,65	<0,1
TS266	**En Yüksek Değer**	5		**200**	**10**	**2000**			**1000**		**200**	**5**		**50**	**10**	**20**	**-**	**10**		**50**	
YSK																		**≤10 I(çok iyi) 15II(iyi) >15 III(orta)**		**≤100 I(çok iyi) 500 II(iyi) >500 III(orta)**	

Her iki dönemden elde edilen analiz sonuçları İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkındaki Yönetmelik (2005) ve Yerüstü Su Kalitesi Yönetmeliği (Resmi Gazete, 2021)'ne göre değerlendirilmiştir. Ayrıca, yağışlı ve kurak dönemlerdeki analiz sonuçlarına ait Piper (Şekil 2.14) ve Schoeller (Şekil 2.15) diyagramları hazırlanmıştır.



Şekil 2.14. Piper diyagramları. a) 27.04.2022 tarihli analiz sonuçlarına göre hazırlanan Piper diyagramı, b) 19.09.2022 tarihli analiz sonuçlarına göre hazırlanan Piper diyagramı, c) 27.04.2023 tarihli analiz sonuçlarına göre hazırlanan Piper diyagramı



Şekil 2.15. Schoeller diyagramları. a) 27.04.2022 tarihli analiz sonuçlarına göre hazırlanan Schoeller diyagramı, b) 19.09.2022 tarihli analiz sonuçlarına göre hazırlanan Schoeller diyagramı, c) 27.04.2023 tarihli analiz sonuçlarına göre hazırlanan Schoeller diyagramı, d) tüm analiz sonuçlarının tek bir Schoeller diyagramında gösterimi

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu tez çalışmasında, çalışma alanlarından toplanan *ERT, SP, SRT, MASW* ve *GPR* verilerinin değerlendirilmesi sonucunda elde edilen bulgular, her çalışma alanı için sırasıyla aşağıda verilmektedir.

Çalışma Alanı 1'den elde edilen 2B'lu elektrik özdirenç kesitleri Şekil 3.1 ve Şekil 3.2' de görülmektedir. Şekil 3.1 (ERT1_P1-ERT1_P6) ve Şekil 3.2a (ERT1_P7)'deki kesitler incelendiğinde yaklaşık 60 m derinlikten, Şekil 3.2c-d'deki ERT1_P8-ERT1_P10 kesitleri incelendiğinde ise yaklaşık 87 m derinlikten bilgi alınabildiği tespit edilmiştir. Şekil 3.1 ve Şekil 3.2'deki özdirenç dağılımı 10-7963 ohm.m arasında değişmektedir.

ERT1_P1 kesiti incelendiğinde yüzeye yakın 312 ohm.m özdirenç değerine sahip göreceli düşük özdirençli bölgenin kesitin uzaklık ekseninin 142.5-195 m'leri arasında derinleşerek 20 m derinliklerde darlaştığı ve tekrardan genişleyerek 60 m derinliği kadar devam ettiği görülmektedir. Aynı kesitin eksen uzunluğunun 180-242.5 m arasında 20 m derinlikte siyah çizgiyle çizilen elips şeklinde kapanım gösteren 2015.5 ohm.m özdirencine sahip daha yüksek özdirençli bölge ve 0-157.5 m uzaklık ekseni altında da bu bölgenin yayılım gösterdiği belirlenmiştir.

ERT1_P2 kesiti incelendiğinde, ERT1_P1 kesitinde görülen yüzeye yakın 312 ohm.m değerindeki düşük özdirençli bölgenin bu kesitte de devam ederek, eksen uzunluğunun 130-180 m'leri arasında derinleştiği ve 60 m derinliği kadar uzandığı gözlenmektedir. Bu kesitin eksen uzunluğunun 225-245 m'leri altında kesikli siyah çizgili eğimli elips şeklinde 2015.5 ohm.m özdirencine sahip daha yüksek özdirençli bölge dikkat çekmektedir. Ayrıca eksen uzunluğunun 0-135 m'leri arasında 2015.5 ohm.m özdirençli bir bölgenin varlığı görülmektedir.

Şekil 3.1c'deki ERT1_P3 kesitinde de diğer tüm kesitlerde olduğu gibi düşük özdirençli bölgenin (312 ohm.m) tüm uzaklık ekseni boyunca devam ettiği görülmektedir. Bu bölgenin uzaklık ekseninin 125-175 m'leri arasında KB yönüne doğru derinleşerek darlaştığı ve daha sonra genişleyerek maksimum derinliği kadar devam ettiği belirlenmiştir. Aynı kesitin uzaklık ekseninin 157.5-225 m'leri arasında, yüzeyden itibaren yaklaşık 5 m derinlikte başlayan ve 20 m derinliği kadar devam eden, elips şeklinde 3033 ohm.m özdirencine sahip daha yüksek özdirençli bölge bulunmaktadır. Ayrıca uzaklık ekseninin 0-105 m'leri arasında 2015.5 ohm.m özdirençli bir bölgenin varlığı dikkat çekmektedir.

Şekil 3.1d'deki ERT1_P4 kesitine bakıldığında, yüzeyin hemen altından başlayan düşük özdirençli bölge görülmektedir. Kesitin uzaklık ekseninin 97.5-140 m'leri arasında yüzeyde görülen düşük özdirençli bölgedeki özdirenç değerinin, yaklaşık 5 m derinliğe kadar devam ettiği, bu değerin 5 m derinlikten sonra 30 m derinliğe kadar bir miktar arttığı belirlenmiştir. 30 m'den sonra ise özdirenç değerinin, kesitin maksimum derinliğine kadar yeniden düştüğü görülmektedir. Bu aralıktaki bölgenin KB yönüne doğru eğimlendiği dikkat çekmektedir. Kesitin uzaklık ekseninin 135-232.5 arasında yüzeyden yaklaşık 10 m derinlikte başlayan ve 20 m derinliği kadar devam eden elips şeklinde 2015.5 ohm.m özdirençli bölge bulunmaktadır. Ayrıca uzaklık ekseninin 60-127.5 m'leri arasında derinlere doğru belirginleşen 3033 ohm.m özdirençli bir bölgenin varlığı dikkat çekmektedir.

ERT1_P5 kesiti incelendiğinde yüzeye yakın 312 ohm.m özdirenç değerine sahip düşük özdirençli bölgenin varlığı bu kesitte de kendini göstermektedir. Bu bölgenin uzaklık ekseninin 90-150 m'leri arasında derinleşerek 20 m derinliklerde daraldığı ve tekrardan genişleyerek 60 m derinliği kadar devam ettiği görülmektedir. Aynı kesitin uzaklık ekseninin 150-205 m'leri arasında, 5 m derinlikte siyah çizgiyle çizilen elips şeklinde kapanım gösteren 3033 ohm.m özdirencine sahip daha yüksek özdirençli bölge ve 0-120 m uzaklık ekseninin altında bu bölgenin yayılım gösterdiği belirlenmiştir.

ERT1_P6 kesitinde, ERT1_P1-ERT2_P5 kesitlerinde olduğu gibi yüzeye yakın alanlarda 312 ohm.m değerindeki düşük özdirençli bölgenin varlığı devam etmektedir. Bu bölgenin uzaklık ekseninin 82.5-165 m'leri arasında derinleşerek KB yönüne doğru eğimlendiği görülmektedir. Ayrıca bu kesitin uzaklık ekseninin 172.5-205 m'leri arasında yaklaşık 5 m derinlikten başlayan, elips şeklinde 1178 ohm.m özdirencine sahip başka bir bölge dikkat çekmektedir. Aynı kesitin uzaklık ekseninin 0-120 m'leri arasında 3033 ohm.m özdirençli bir bölgenin varlığı görülmektedir.

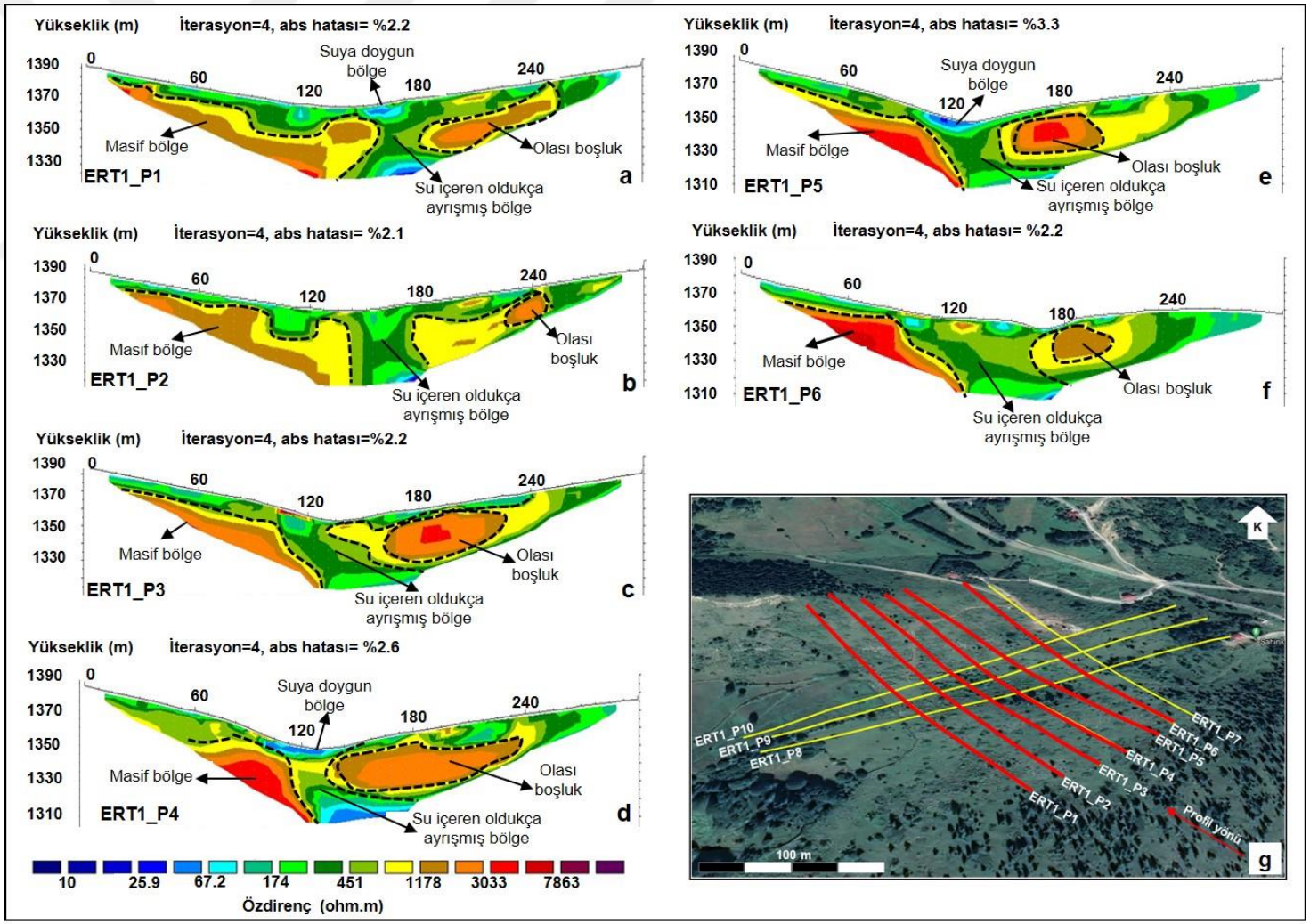
ERT1_P7 kesiti incelendiğinde, yüzeye yakın 312 ohm.m özdirenç değerine sahip düşük özdirençli bölge bu kesitte de kendini göstermektedir. Düşük özdirençli bu bölge uzaklık ekseninin 67.5-120 m'leri arasında derinleşerek kesitin maksimum derinliğine kadar varlığını sürdürmektedir. Aynı kesitin uzaklık ekseninin 150-195 m'leri arasında 10 m derinlikte siyahlı çizgiyle çizilen elips şeklinde 2015.5 ohm.m özdirencine sahip daha yüksek özdirençli bölge dikkat çekmektedir. Ayrıca ERT1_P5 ve ERT1_P6 kesitlerinde uzaklık ekseninin 0-120 m'leri altındaki yüksek özdirençli bölgenin ERT1_P7 kesitinde de kendini gösterdiği belirlenmiştir.

Şekil 3.2b'deki GB-KD yönlü ERT1_P8 kesiti incelendiğinde kesitin yüzeyinde düşük özdirençli bir bölge görülmektedir. Kesitin uzaklık ekseninin 130-270 m'leri arasında bu düşük özdirençli bölgenin derinlere doğru özdirenç değerini artırarak devam ettiği dikkat çekmektedir. Kesitin uzaklık ekseninin 75-120 m'leri ve 265-345 m'lerinde, yüzeyden yaklaşık 5 m derinlikte başlayan elips şeklinde 3033 ohm.m özdirençli bölgeler bulunmaktadır.

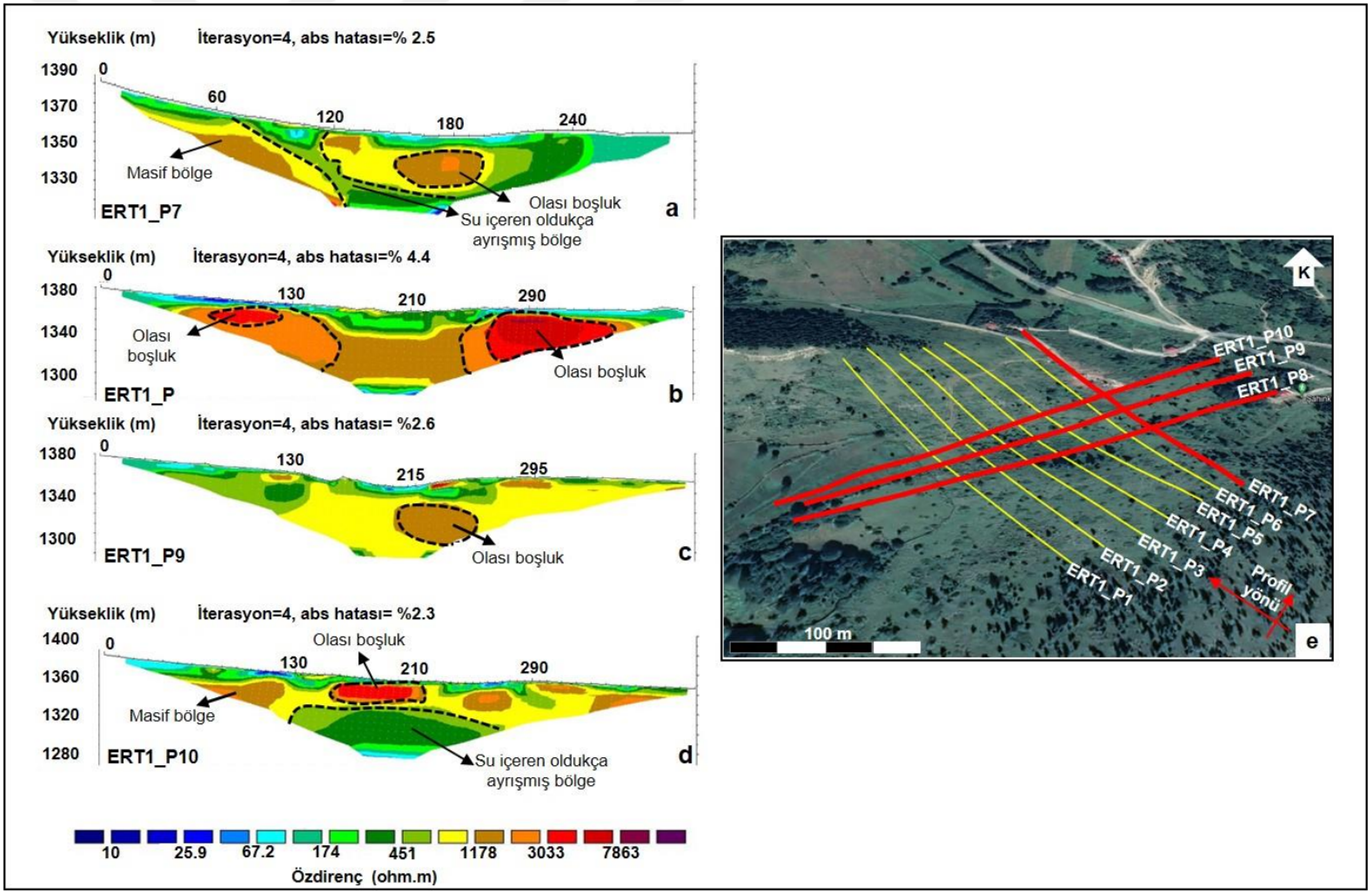
Şekil 3.2c'deki ERT1_P9 özdirenç kesitinin tamamında yaklaşık 230 ohm.m'lik özdirenç değerinin hakim olduğu dikkat çekmektedir. Kesitin uzaklık ekseninin 200-250m'leri arasında yaklaşık 25 m derinliklerde başlayan elips şekilli daha yüksek özdirençli (1178 ohm.m) bölgenin varlığı görülmektedir.

Şekil 3.2d'deki ERT1_P10 kesitinin tüm uzaklık ekseni boyunca yüzeye yakın ve bu eksenin 125-265 m'leri arasında yüzeyden 30 m derinlikte düşük özdirençli bölge görülmektedir. Aynı kesitin uzaklık ekseninin 155-215 m'leri arasında 13 m derinlikten başlayarak 28 m derinliği kadar varlığını sürdüren elips şekilli yüksek özdirençli (3033 ohm.m) bölgenin varlığı tespit edilmiştir. Ayrıca bu yüksek özdirençli bölgenin sağında ve solunda 2015.5 ohm.m özdirenç değerine sahip bölgeler bulunmaktadır.

KB-GD yönlü tüm kesitler (Şekil 3.1a-f ve Şekil 3.2a) incelendiğinde; uzunluk eksenlerinin belli kısımları arasında başlayan ve genellikle 30 m derinlere doğru gittikçe daralan ve sonradan tekrar genişleme gösteren düşük özdirençli bölgenin tüm kesitlerde görüldüğü tespit edilmiştir. Bu bölgenin birbirine paralel profillerde KD yönüne doğru uzanım gösterdiği görülmektedir. Bu zonun sağ ve sol taraflarında yüksek özdirençli daha masif bölgelerin olduğu ve sol tarafında ise daha ayrışmış seviyelerde yine yüksek özdirenç değeri gösteren bir bölge görülmektedir.



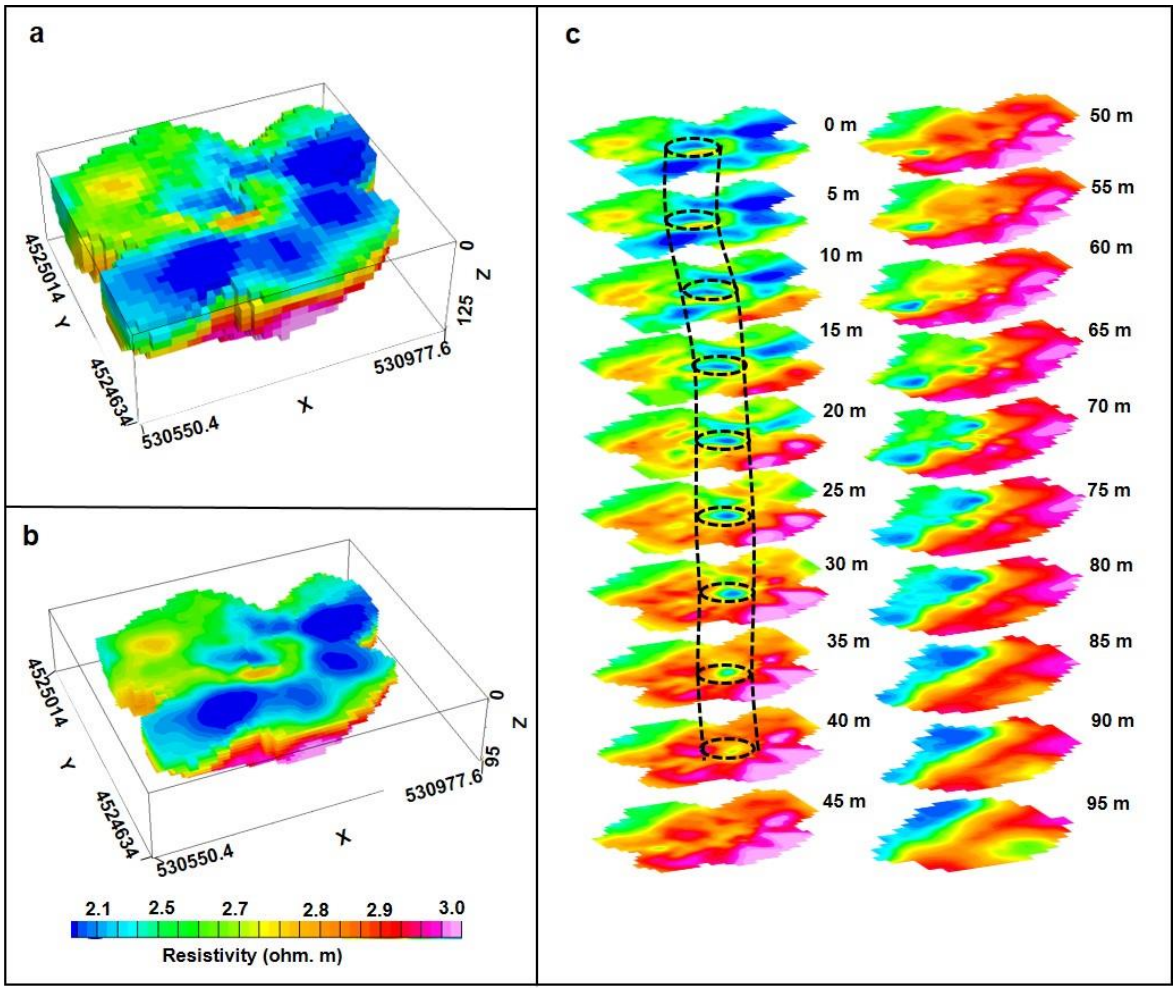
Şekil 3.1. Çalışma Alanı 1'den elde edilen 2B *ERT* (ERT1_P1-ERT1_P6) kesitleri. a) ERT1_P1, b) ERT1_P2, c) ERT1_P3, d) ERT1_P4, e) ERT1_P5, f) ERT1_P6 kesitleri, g) ERT1_P1-ERT1_P6 kesitlerinin elde edildiği profiller (kırmızı çizgiler).



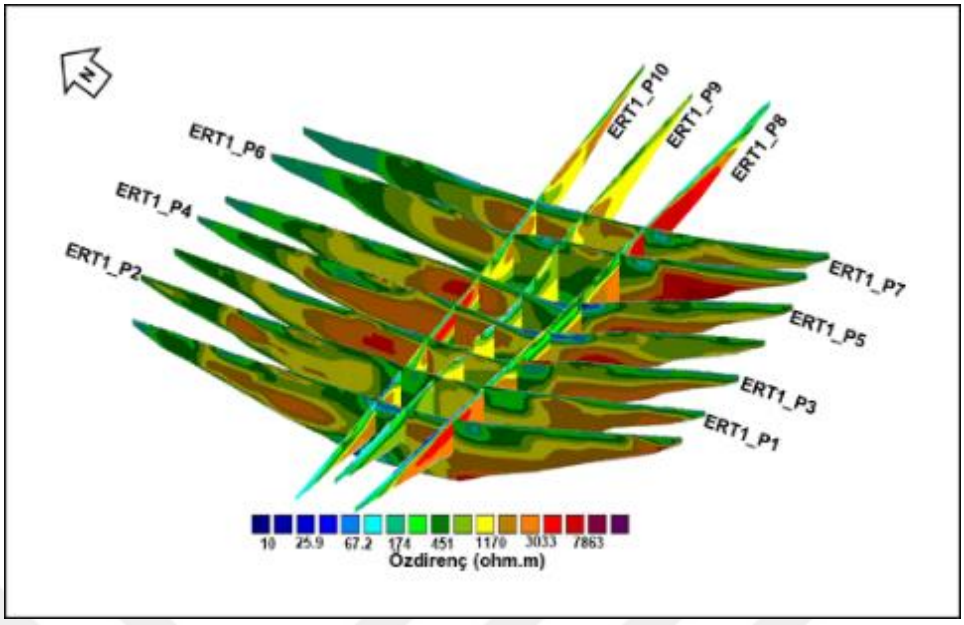
Şekil 3.2. Çalışma Alanı 1'den elde edilen 2B *ERT* (ERT1_P7-ERT1_P10) kesitleri. a)ERT1_P7, b) ERT1_P8, c) ERT1_P9, d) C) ERT1_P9, e) ERT1_P7-ERT1_P10 kesitlerinin elde edildiği profiller (kırmızı çizgiler)

Çalışma Alanı 1 içerisinde elde edilen 2B'lu *ERT* kesitlerinden, 3B'lu *ERT* görünümü Şekil 3.3'te oluşturulmuştur. Şekil 3.3a; Çalışma Alanı 1'den elde edilen 3B'lu *ERT* görüntüsünü, Şekil 3.3b 3B'lu *ERT* görüntüsünün seviye haritalarının birlikte görüntüsünü, Şekil 3.3c ise 3B'lu *ERT* görünümünde yüzeyden derine doğru 5 m de bir görüntülenen seviye haritalarını göstermektedir. Şekil 3.3b'deki seviye haritaları incelendiğinde, yüzey seviyesinin olduğu yerden, 40 m derinlik seviyesine kadar uzanan ve derinlere doğru gidildikçe çapı küçülen, düşük özdirençli bölgenin (kesikli siyahlı çizgilerle gösterilen) varlığı dikkat çekmektedir. Bu düşük özdirençli bölgenin dolinlerin yer altındaki uzanımını (KD-GB yönlü) gösterdiği şeklinde yorumlanmaktadır. Ayrıca yüzeyden itibaren 10 m derinlik seviyesinden, 95 m derinlik seviyesine kadar GD yönünde yoğunlaşan yüksek özdirenç değerleri gözlenmiştir. Bu bölgenin masif kireçtaşlarını, kireçtaşları içerisinde bulunan çok yüksek özdirençli bölgelerin de karstik boşlukları temsil ettiği düşünülmektedir.

Çalışma Alanı 1'deki tüm profiller boyunca elde edilen 2B *ERT* görüntüleri kullanılarak oluşturulan fence diyagramı Şekil 3.4'da gösterilmektedir. Bu diyagram düşük ve yüksek özdirenç bölgelerini etkili bir şekilde açığa çıkarmaktadır. Bu görseldeki düşük özdirençli (<451 ohm.m) kısımların suya doygun olduğu alanları gösterdiği düşünülmektedir. Ayrıca bu diyagramdaki yanal sürekliliği olan kapanım gösteren yüksek özdirençli (~2100 ohm.m) bölgelerin olası boşlukları ifade ettiği, güneydeki yüksek özdirençli bölgelerin ise masif zonları temsil ettiği şeklinde yorumlanmıştır. Fence diyagramı detaylı incelendiğinde ERT1_P7 ile ERT1_P8 kesitlerinin kesişim noktasında süreksizliğin bozulduğu yani kesişimin olduğu noktada ERT1_P7 kesitinde düşük özdirenç değerleri gözlenirken, ERT1_P8 kesitinde yüksek özdirenç değerleri görülmektedir. Bu farklılığın sebebinin bu *ERT* verilerin farklı mevsimlerde toplanmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 3.3. Çalışma Alanı 1, 3B'lu *ERT* görüntüleri ve seviye haritaları, a) Çalışma Alanı 1'den elde edilen 3B'lu *ERT* görüntüsü, b) 3B'lu *ERT* görüntü seviye haritalarının bir aradaki görüntüsünü, c) 3B'lu *ERT* görüntüsünün her 5 m de bir görüntülenen seviye haritaları



Şekil 3.4. Çalışma Alanı 1'den elde edilen *ERT* kesitlerinin fence diyagramı

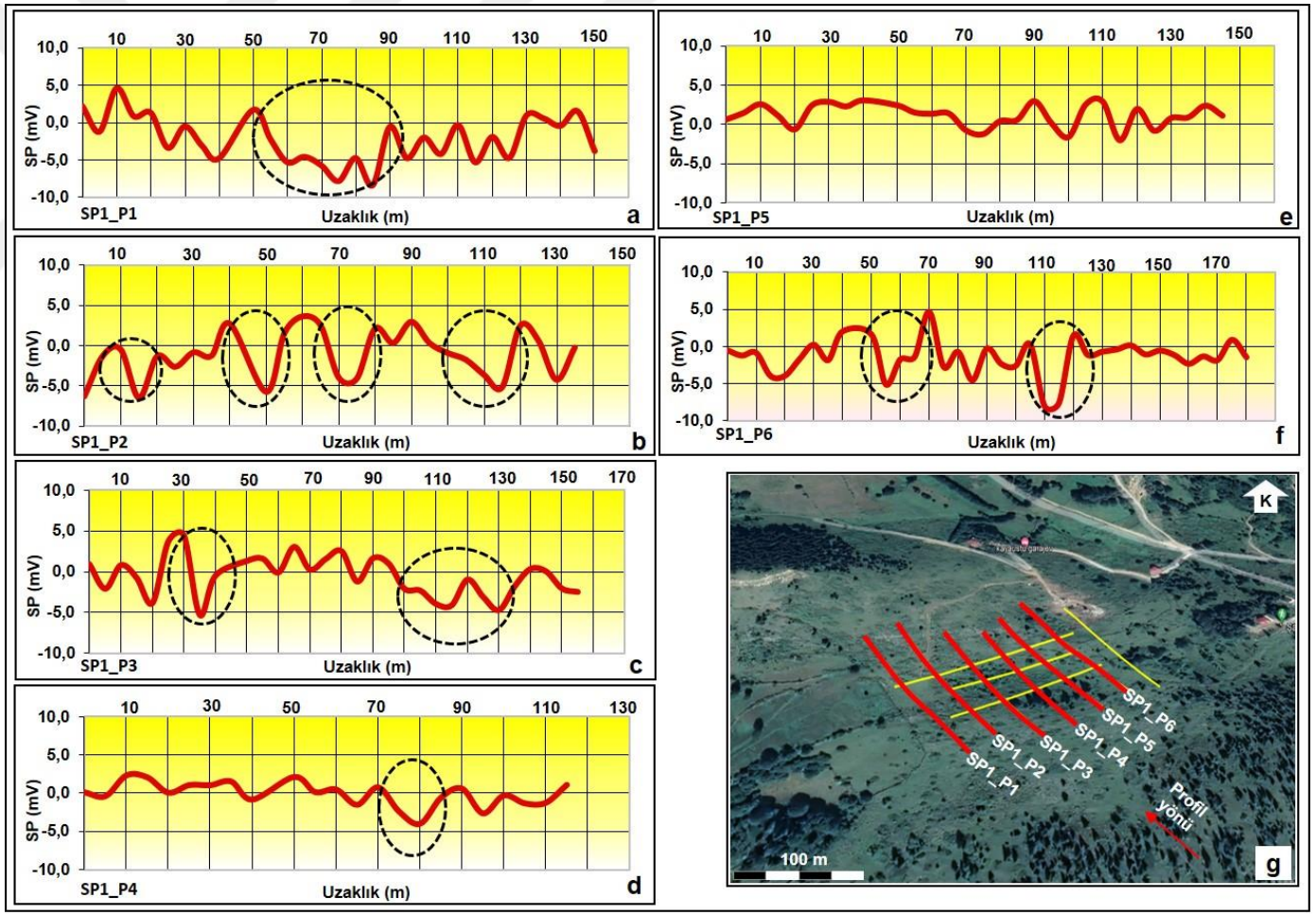
Bu tez çalışması kapsamında Çalışma Alanı 1'den elde edilen *SP* verilerinden elde edilen *SP* grafikleri, Şekil 3.5 ve Şekil 3.6'da gösterilmektedir. Şekil 3.5a-f ve Şekil 3.6a Çalışma Alanı 1'den elde edilen KB-GD yönlü SP1_P1-SP1_P7 grafiklerini, Şekil 3.6b-d aynı çalışma alanından elde edilen KD-GB yönlü SP1_P8-SP1_P10 grafiklerini, Şekil 3.5g ve 6e ise bu grafiklerin elde edildiği profilleri temsil etmektedir. Birbirine paralel ve aralarındaki mesafe 15-35 m'leri arasında değişiklik gösteren SP1_P1-SP1_P7 grafiklerinin uzunluk eksenleri 120-185 m arasında, bu profilleri dik kesecek şekilde elde edilen SP1_P8-SP1_P10 grafiklerinin uzunluk eksenleri ise 115-145 m aralığında değişmektedir.

Şekil 3.5a'daki GB-KD yönlü SP1_P1 grafiği incelendiğinde uzaklık ekseninin 50-90 m'leri arasında potansiyel fark değerlerinde negatif yönde bir düşüşün olduğu dikkat çekmektedir. Bu düşüşün olduğu bölgelerin; aynı yönlü SP1_P2 grafiğinde uzaklık ekseninde sırası ile 10-20 m, 40-70 m, 65-75 m ve 95-115 m aralıklarına, SP1_P3 grafiğinde uzaklık ekseninin 30-35 m ve 100-130 m'leri aralıklarına, SP1_P4 grafiğinde uzaklık ekseninin 70-85 m'leri arasına ve SP1_P6 grafiğinde ise eksen uzaklığının 50-70 m ve 105-120 m'leri aralıklarına karşılık geldiği görülmektedir. Benzer doğal potansiyel fark değerlerindeki negatif yöndeki düşüşün, GD-KB yönlü Şekil 3.6b-d'deki SP1_P8 grafiğinde uzaklık ekseninin 15-35 m ve 110-135 m aralıklarına, SP1_P9 grafiğinde ise uzaklık ekseninin 45-90 m aralığına denk geldiği belirlenmiştir. Literatürde yapılan çalışmalar (Robert, 2011) incelendiğinde su akışının olduğu bölgelerdeki doğal potansiyel fark değerlerinin, negatif yönde düşüş gösterdiği bilinmektedir. Dolayısıyla bu grafikler

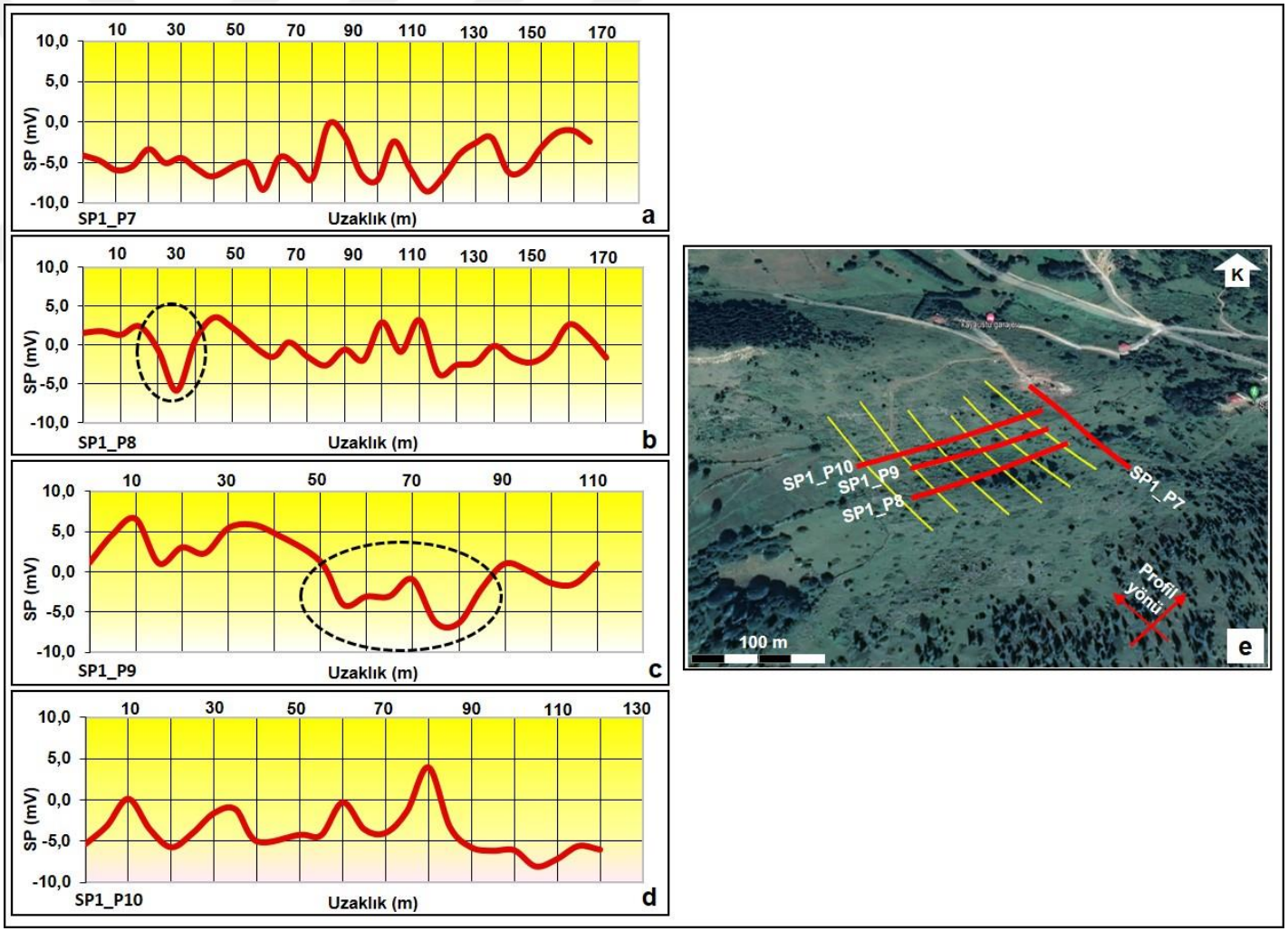
üzerindeki düşük doğal poatansiyel fark değeri içeren bu bölgelerin, su içeren bölgeleri temsil ettiği düşünülmektedir.

Şekil 3.1'deki *ERT* kesitleri ile Şekil 3.5'teki *SP* grafikleri karşılaştırıldığında; Şekil 3.1a'daki ERT1_P1 kesitinin uzaklık eksenindeki 105-145 m'leri arasındaki 120.6 ohm.m özdirencine sahip bölgenin, Şekil 3.5a'daki SP1_P1 grafiğindeki uzaklık ekseninin 50-90 m'leri arasında bulunan, doğal potansiyel fark değerinin negatif yönde artış gösterdiği bölgeye denk geldiği düşünülmektedir. ERT1_P2 kesitindeki (Şekil 3.1b) uzaklık eksenin 150-175 m'leri aralığında, yüzeyin hemen altında kalan düşük özdirençli bölgenin (312.5 ohm.m), SP1_P2 grafiğinin (Şekil 3.3b) 65-80 m'leri arasındaki negatif yönde artış gösteren bölgeyi gösterdiği şeklinde değerlendirilmiştir. Şekil 3.5c'deki SP1_P3 grafiğindeki uzaklık ekseninin 100-135 m'leri arasında kalan, negatif yönde artış gösteren doğal potansiyel değerlerinin, ERT1_P3 kesitindeki uzaklık ekseninin 157-187.5 m'leri arasında yüzeyin hemen altında kalan düşük özdirençli (174 ohm.m) bölgeyi temsil ettiği düşünülmektedir. Şekil 3.1e' de gösterilen ERT1_P5 kesitinin 105-142.5 m uzaklık ekseni aralığına denk gelen 46.55 ohm.m'lik özdirençli bölgenin, Şekil 3.5e'de sunulan SP1_P5 grafiğinde uzaklık ekseninin 60-90 m'leri arasında negatif yönde düşüş gösteren kısma karşılık geldiği şeklinde değerlendirilmiştir. Ayrıca, Şekil 3.1f'deki ERT1_P6 kesitinin 90-112.5 m'leri altında kalan bölgenin SP1_P6 (Şekil 3.5f) grafiğinin 50-70 m'leri arasına karşılık geldiği, aynı ERT kesitinin 135-175.5 m'lerine denk gelen, yüzeyin hemen altındaki düşük özdirençli bölgenin ise SP1_P6 grafiğinin uzaklık ekseninin 95-120 m'leri aralığında negatif yönde düşüş gösteren kısma denk geldiği düşünülmektedir.

Çalışma Alanı 1'den KD-GB yönünde elde edilen Şekil 3.2'deki *ERT* ve Şekil 3.6'daki *SP* grafikleri karşılaştırıldığında; Şekil 3.2b'deki ERT1_P8 kesitinin 50-80 m uzaklık ekseni aralığında görülen yüzeydeki düşük özdirençli bölgenin (67.2 ohm.m) SP1_P8 grafiğinde uzaklık ekseninin 15-40 m arasındaki düşüş gösteren doğal potansiyel değerlerine karşılık geldiği düşünülmektedir. ERT1_P9 kesitinin uzaklık ekseninin 175-215 m aralığında yüzeyin hemen altında çok düşük özdirençli bölgenin SP1_P9 grafiği üzerindeki uzaklık ekseninin 50-90 m'leri arasında negatif yönde düşüş gösteren doğal potansiyel değer aralığına karşılık geldiği şeklinde yorumlanmıştır. Şekil 3.2d'deki ERT1_P10 kesiti incelendiğinde uzaklık ekseninin 195 m'si altında yaklaşık 10 m derinlikte yüksek özdirençli (5448 ohm.m) özdirencine sahip bölge, Şekil 3.6d'da bulunan SP1_P10 profilinin 70-90 m'leri arasında doğal potansiyel farkın pozitif yönde artış gösteren kısma denk geldiği düşünülmektedir.

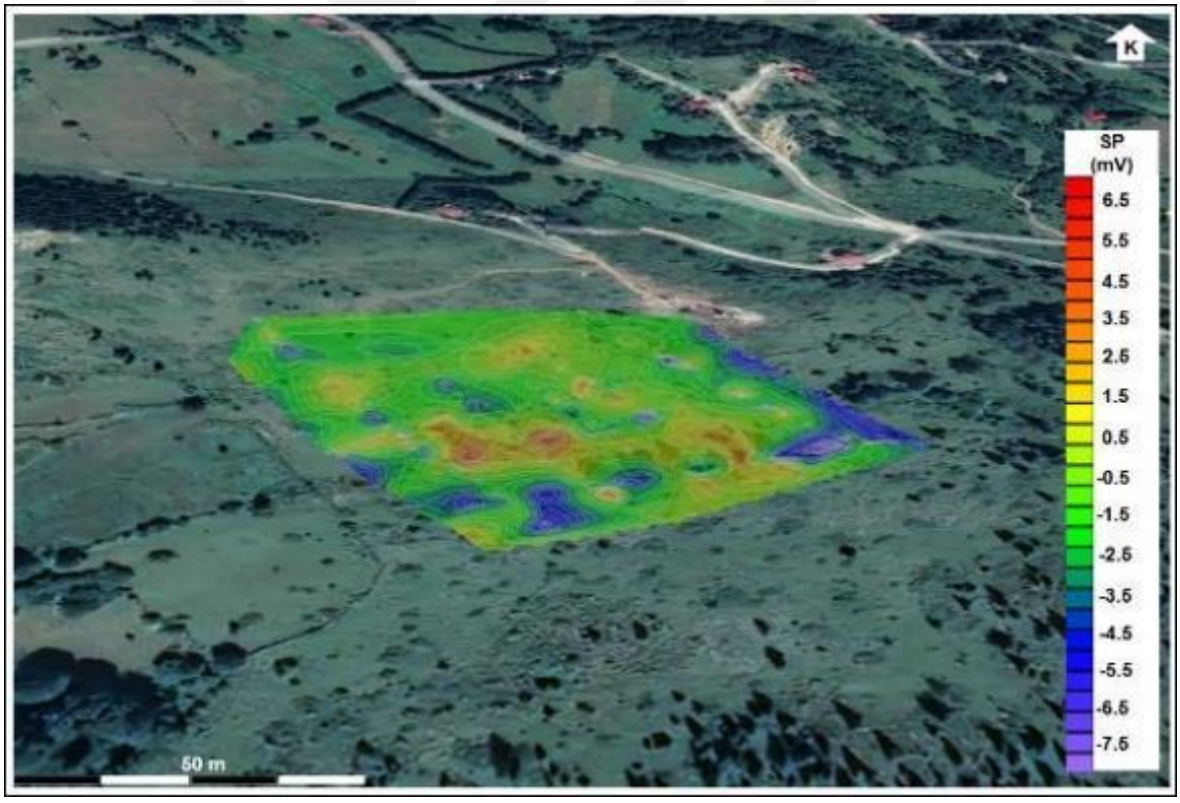


Şekil 3.5. Çalışma Alanı 1'den elde edilen *SP* (SP1_P1-SP1_P6) kesitleri. a) SP1_P1, b) SP1_P2, c) SP1_P3, d) SP1_P4, e) SP1_P5, f) SP1_P6 kesitleri, g) SP1_P1-SP1_P6 kesitlerinin elde edildiği profiller (kırmızı çizgiler).



Şekil 3.6. Çalışma Alanı 1'den elde edilen *SP* (SP1_P7-SP1_P10) kesitleri. a) SP1_P7, b) SP1_P8, c) SP1_P9, d) SP1_P10 kesitleri, e) SP1_P7-SP1_P10 kesitlerinin elde edildiği profiller (kırmızı çizgiler).

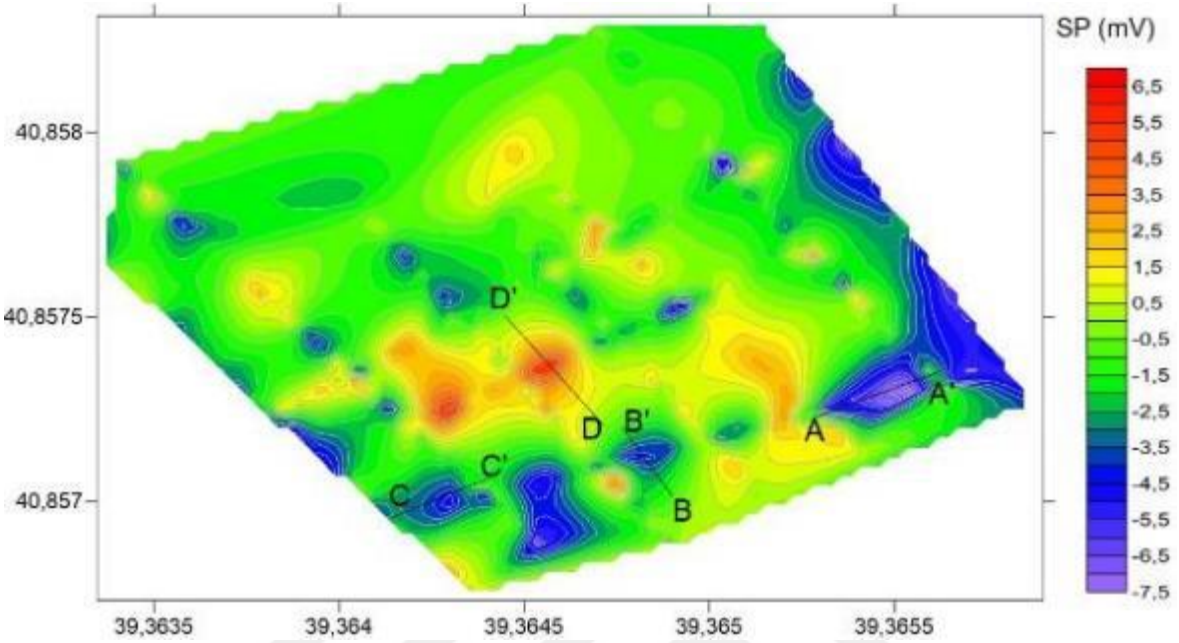
Şekil 3.5 ve Şekil 3.6'daki Çalışma Alanı 1'deki tüm *SP* grafiklerinden Şekil 3.7'deki SP haritası oluşturulmuştur. Bu *SP* haritası incelendiğinde, *SP* değerlerinin (-3 mV ile -7.5 mV arasında) çok düşük olduğu alanlarda gözlenen farklı genişlik ve uzanımlı kapanımların olduğu kısımlar, yer altı su hareketliliğinin göstergesi şeklinde yorumlanabilmektedir. Özellikle SP1_P1, SP1_P2, SP1_P6 ve SP1_P7 profillerinin geçtiği bölgelerde KB-GD yönlü negatif *SP* değerlerinin yoğunlaştığı tespit edilmiştir. Aynı haritada nispeten yüksek *SP* değerleri (kırmızı renkle temsil edilen) etrafında oluşan kapanımlar dikkat çekmektedir. Bu kapanımların çalışma alanı içerisindeki küçük boyutlu mağaralara (bkz. Sarıbudak, 2015, Şekil 9, 11, 12) karşılık geldiği düşünülmektedir. Ayrıca, *SP* haritasında görülen bu yüksek değerler, *ERT* kesitlerinin bazı kısımlarında olası boşluk olarak tanımlanan yüksek özdirenç değerlerine karşılık gelmektedir. Böylece her iki yöntemle elde edilen sonuçların birbirini desteklediği belirlenmiştir.



Şekil 3.7. Çalışma Alanı 1'den elde edilen *SP* haritası

Şekil 3.7'daki *SP* haritası üzerinde özellikle *ERT* kesitlerinin alındığı ve geçtiği yönde, kapanım gösteren yerlerden Şekil 3.8'deki kesitler alınarak, bu kesitlerden *SP* anomalileri elde edilmiştir (Şekil 3.9). Bu anomaliler, Nomogram yöntemi ile değerlendirilerek;

anomalilerin h (merkeze olan derinlik) ve θ (AA’ doğrultusunun x ekseni ile yaptığı açı) değerleri elde edilmiştir.

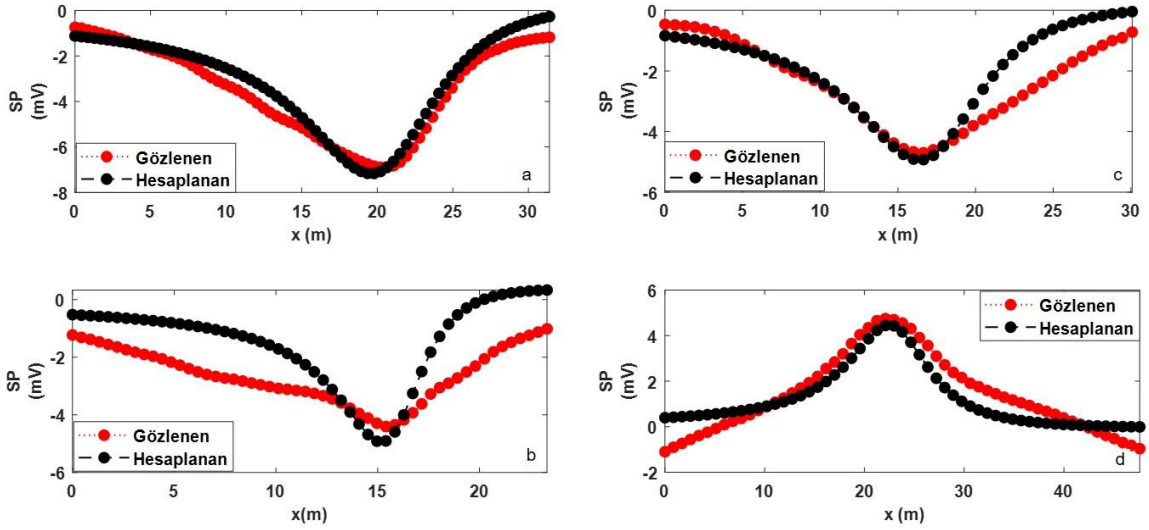


Şekil 3.8. Çalışma Alanı 1’deki *SP* haritasından alınan kesitler

Tablo 3.1. Çalışma Alanı3, Nomogram diyagramı değerleri

Kesit	Vmin/Vmax	θ	h
AA’	9.36	-68	5.4
BB’	4.53	-60	2.5
CC’	10.31	-70	5
DD’	4.87	-78	5

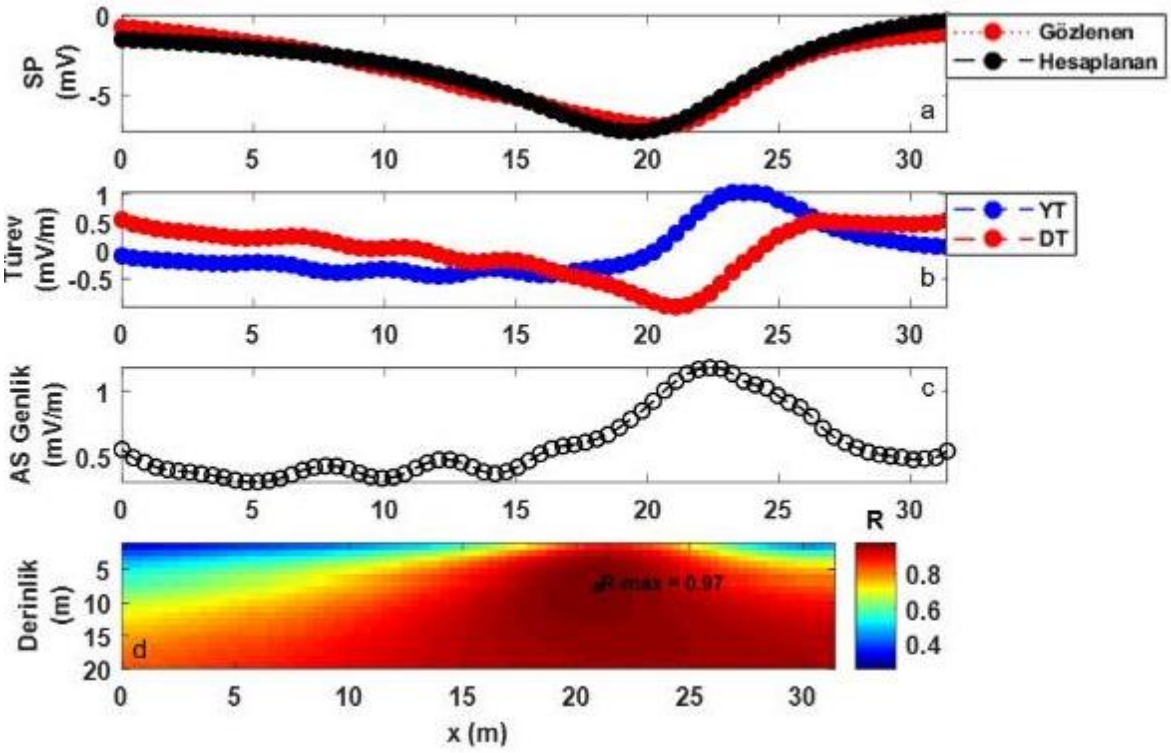
Şekil 3.8’deki Çalışma Alanı 1’in *SP* haritasından elde edilen AA’, BB’, CC’ ve DD’ kesitleri boyunca elde edilen *SP* anomalileri Şekil 3.9a-d’de gösterilmektedir. Bu anomaliler dikkate alınarak; Tablo 3.1’deki |Vmin|/Vmax değerleri nomogram’da işaretlenerek θ ve h (Tablo 3.1) hesaplanmıştır. Nomogramdan elde edilen parametreler; küre ve silindir için yazılan V(x,0,0) bağıntısında yerine yazılarak yapılan hesaplamalar sonunda elde edilen model anomalileri Şekil 3.9a-d’da görülmektedir. Gözlemlenen (kırmızı kesikli çizgi) ile hesaplanan anomalinin (siyah kesikli çizgi) iyi uyum sağladığı görülmektedir (Şekil 3.9).



Şekil 3.9. Çalışma Alanı 1'deki *SP* haritasındaki kesitlerden elde edilen, gözlenen *SP* anomalisi ve hesaplanan model anomalileri. a) AA' kesiti, b) BB' kesiti, c) CC' kesiti, d) DD' kesiti boyunca gözlenen *SP* anomalileri ve hesaplanan model anomalileri

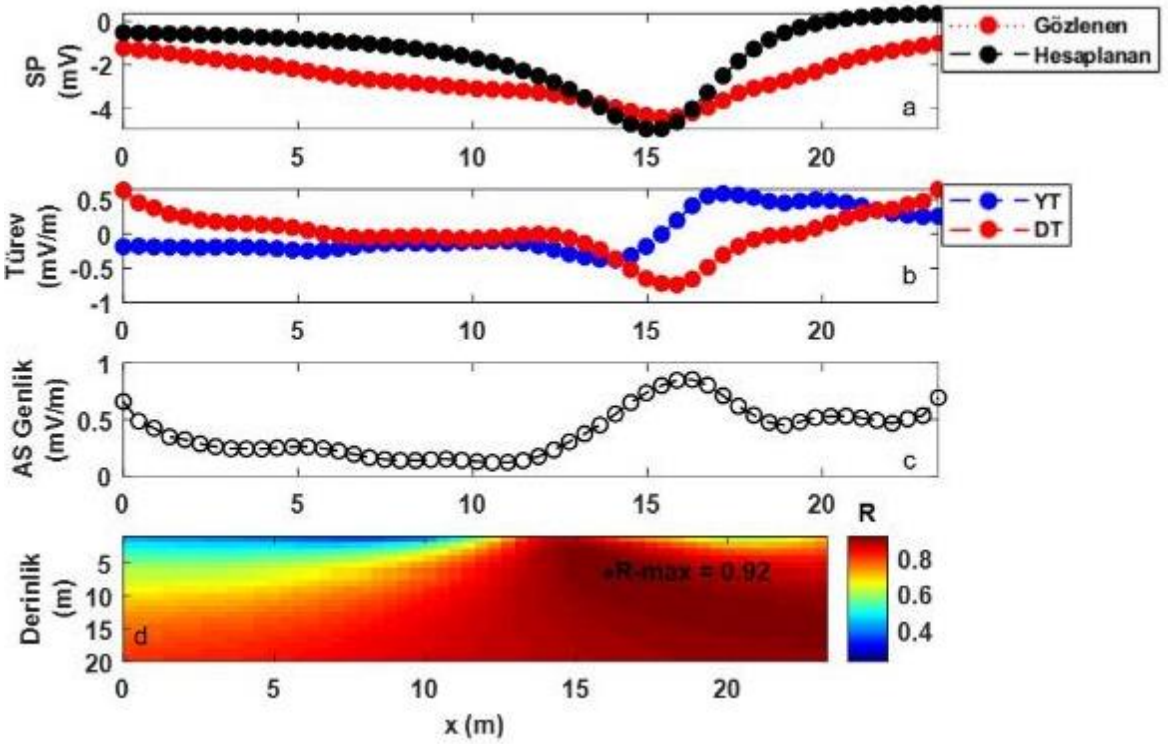
Nomogram eğrileri sonucunda elde edilen parametreler; gerçek arazi verilerine uygulanacak R-max yaklaşımda (Mehanee, 2023) kullanılarak gözlemlenen veriye en yakın hesaplanan veriler oluşturulmuştur.

Çalışma Alanı 1'den elde edilen *SP* haritasından alınan 31.39 m uzunluğundaki AA' kesitinin anomalisindeki *SP* değerlerinin örnekleme aralığı 0.43 metredir (Şekil 3.10a). Bu anomali R-parametre görüntüleme tekniği kullanılarak yorumlanmıştır. Şekil 3.10b-d, karşılık gelen türevleri, AS genliğini ve 0.97'lik bir R-max değeri ortaya koyan görüntülemeyi tasvir etmektedir. Yorumlamadan ortaya çıkan parametreler K= 1000 mVm^{2q-1}, z_o= 5.5 m, θ= −68◦, x_o= 20.64 m ve q= 0.9'dir (Şekil 3.10a-d). (Şekil 3.10a-d). Gözlenen ve hesaplanan doğal potansiyel verileri Şekil 3.10a'da sunulmuştur. SP'den elde edilen derinlik bilgisini *ERT* kesitleri ile karşılaştırma yapabilmek için bakıldığında, AA' kesitinin alındığı yön boyunca *ERT* kesiti geçmemektedir. Ancak AA' kesitinin merkezini dik yönde kesen ERT1_P6 kesiti bulunmaktadır. Bu kesitinin uzaklık ekseninin 95 m'sinin hemen altında kalan yaklaşık 25.9 ohm.m özdirence sahip bölgeye SP'den elde edilen derinlik bilgisinin denk geldiği görülmektedir.



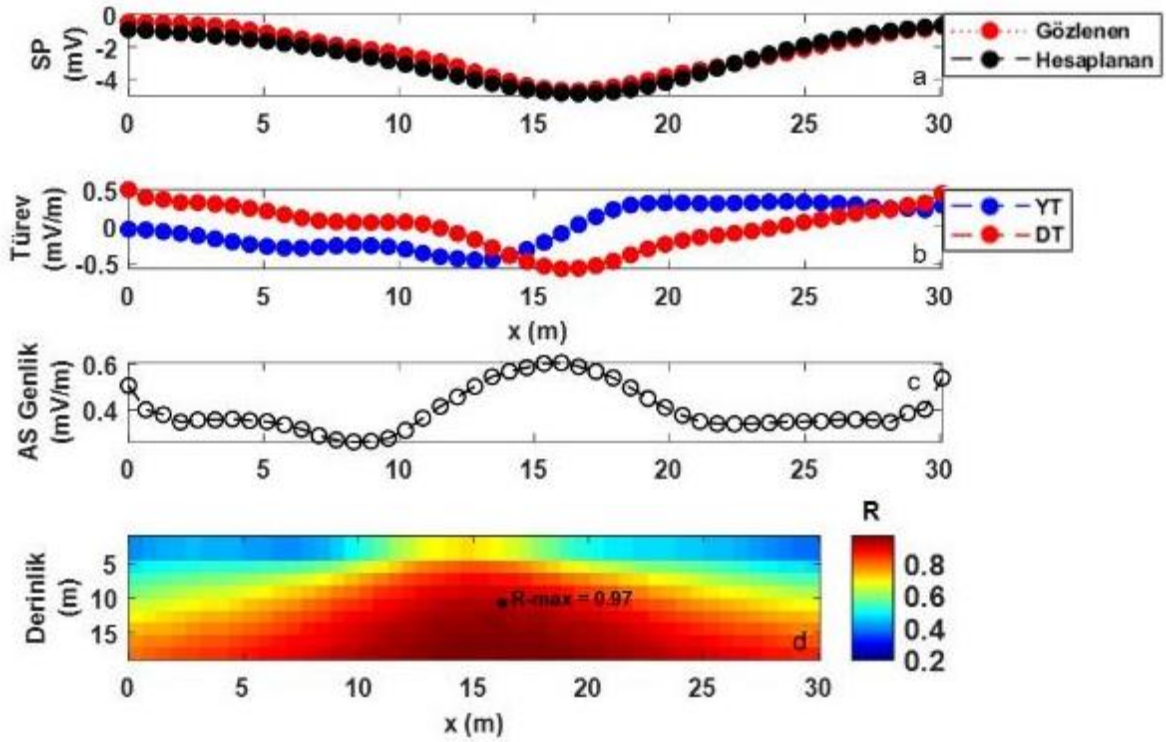
Şekil 3.10. a) AA' kesitinin gözlenen ve hesaplanan *SP* eğrileri, b) *SP* anomalisinin yatay ve düşey türevleri, c) Analitik sinyalin genliği, d) R-parametresinin görüntüsü

Çalışma Alanı 1'den elde edilen *SP* haritasından alınan 23.32 m uzunluğundaki BB' kesiti anomalisindeki *SP* değerlerinin örnekleme aralığı 0.44 metredir (Şekil 3.11a). Bu anomali R-parametre görüntüleme tekniği kullanılarak yorumlanmıştır. Şekil 3.11b-d, karşılık gelen türevleri, AS genliğini ve 0.92'lik bir R-max değeri ortaya koyan görüntülemeyi tasvir etmektedir. Yorumlamadan ortaya çıkan parametreler K= 1200 mVm^{2q-1}, z_o = 2.5 m, θ= −60◦, x_o= 15.84 m ve q=1'dir (Şekil 3.11a-d). Gözlenen ve hesaplanan doğal potansiyel verileri Şekil 3.11a'da sunulmuştur. ERT1_P3 kesitinin uzaklık ekseninin 96 m'sinin hemen altında kalan yaklaşık 174.4 ohm.m özdirence sahip bölgeye denk geldiği görülmektedir.



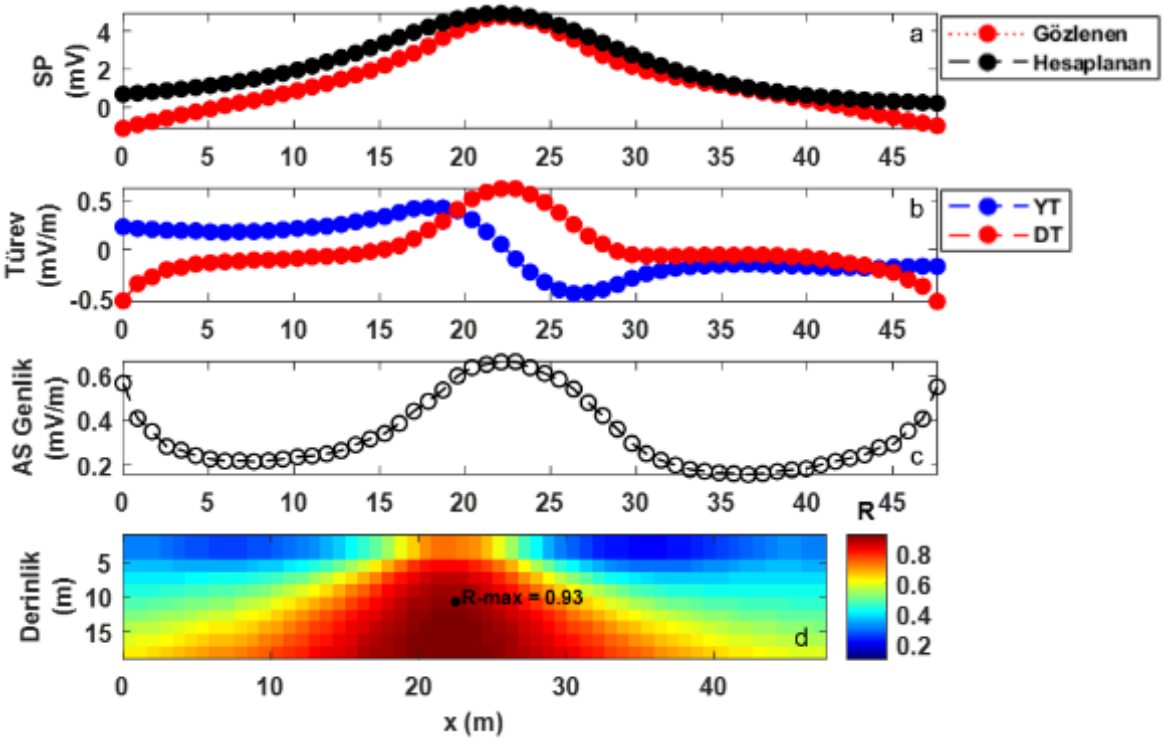
Şekil 3.11. a) BB' kesitinin gözlenen ve hesaplanan *SP* eğrileri, b) *SP* anomalisinin yatay ve düşey türevleri, c) Analitik sinyalin genliği, d) R-parametresinin görüntüsü

Çalışma Alanı 1'den elde edilen *SP* haritasından alınan 30.08 m uzunluğundaki CC' kesiti anomalisindeki *SP* değerlerinin örnekleme aralığı 0.64 metredir (Şekil 3.12a). Bu anomali R-parametre görüntüleme tekniği kullanılarak yorumlanmıştır. Şekil 3.12b-d, karşılık gelen türevleri, AS genliğini ve 0.97'lik bir R-max değeri ortaya koyan görüntülemeyi tasvir etmektedir. Yorumlamadan ortaya çıkan parametreler K= 1200 mVm^{2q-1}, z_o= 10 m, θ= −70◦, x_o= 17.86 m ve q=1.5'dir (Şekil 3.12a-d). Gözlenen ve hesaplanan doğal potansiyel verileri Şekil 3.12a'da sunulmuştur. ERT1_P8 kesitinin uzaklık ekseninin 135 m'sinin hemen altında kalan yaklaşık 25.9 ohm.m özdirence sahip bölgeye denk geldiği görülmektedir.



Şekil 3.12. a) CC' kesitinin gözlenen ve hesaplanan *SP* eğrileri, b) *SP* anomalisinin yatay ve düşey türevleri, c) Analitik sinyalin genliği, d) R-parametresinin görüntüsü

Çalışma Alanı 1'den elde edilen *SP* haritasından alınan 47.60 m uzunluğundaki DD' kesiti anomalisindeki *SP* değerlerinin örnekleme aralığı 0.85 metredir (Şekil 3.13a). Bu anomali R-parametre görüntüleme tekniği kullanılarak yorumlanmıştır. Şekil 3.13b-d, karşılık gelen türevleri, AS genliğini ve 0.93'lük bir R-max değeri ortaya koyan görüntülemeyi tasvir etmektedir. Yorumlamadan ortaya çıkan parametreler K= 1000 mVm^{2q-1}, z_o= 12 m, θ= −78◦, x_o= 22.75 m ve q=1.5'dir (Şekil 3.13a-d). Gözlenen ve hesaplanan doğal potansiyel verileri Şekil 3.13a'da sunulmuştur. ERT1_P3 kesitinin uzaklık ekseninin 115 m'sinin hemen altında kalan yaklaşık 25.9 ohm.m özdirence sahip bölgeye denk geldiği görülmektedir.



Şekil 3.13. a) DD' kesitinin gözlenen ve hesaplanan *SP* eğrileri, b) *SP* anomalisinin yatay ve düşey türevleri, c) Analitik sinyalin genliği, d) R-parametresinin görüntüsü

Bu tez çalışması kapsamında Çalışma Alanı 1'den elde edilen KB-GD yönlü sismik kırılma tomografi kesitleri (SRT1_P1-SRT1_P4) Şekil 3.14a-b'de, KD-GB yönlü sismik kırılma tomografi kesitler (SRT1_P5-SRT1_P6) ise Şekil 3.14e-f'de gösterilmektedir. Kesitlerde her ne kadar yaklaşık 30 m derinlik için Vp hız dağılımı gösterilsede veriler değerlendirilirken ışın yolları çizdirildiğinde yalnızca 20 m ye kadar bilgi alınabilmiştir.

İnceleme alanında kireçtaşları hakim olduğu için, literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde genelde kireçtaşının Vp hız aralığının 2800-7000 m/s (Lavergne, 1986) aralığında olduğu bilinmektedir. SRT1 P1 kesiti incelendiğinde Vp hız değeri derine doğru gittikçe artmakta olan dört tabakalı bir ortam görülmektedir. Bu kesitin en üst seviyesinde minimum 1.5 m derinlik seviyelerinde başlayan ve kesitin belli kısımlarında (özellikle uzaklık ekseninin 40 m ve 80 m) derinleşen ortalama 820 m/s Vp hızına sahip bir tabaka görülmektedir. Bu tabakanın, araştırılan ortamdaki örtü tabakasını temsil ettiği düşünülmektedir. Hemen altında Vp hızı ortalama 2130 m/s olan ikinci bir tabaka bulunmaktadır. Bu tabakanın kalınlığı kesitin farklı kısımlarında 2 ila 10 m arasında değişmektedir. Bu tabakanın altında yaklaşık 4-20 m kalınlık aralığında değişen ve ortalama

Vp hızı 3200 m/s olan üçüncü bir tabaka ve kesitlerin en alt kısmında yaklaşık 4750 m/s Vp hızına ulaşan oldukça masif bir tabaka olduğu görülmektedir.

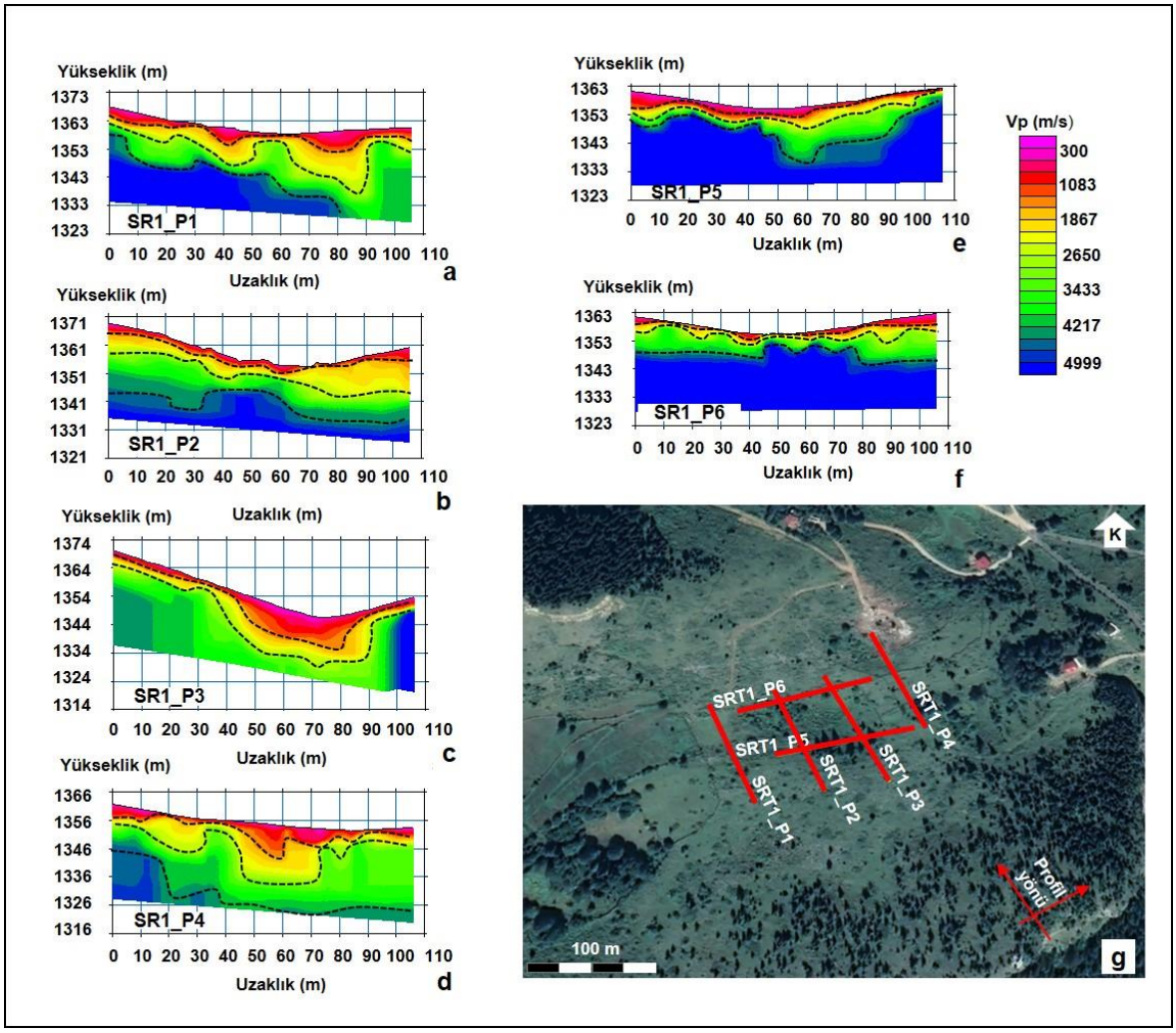
Dört tabakalı ortamın varlığı SRT1_P2 kesitinde (Şekil 3.14b) de kendini göstermektedir. Tabakaların kalınlıkları uzaklık eksenleri boyunca farklılık göstermekte olup, ortalama Vp hız değerleri en üst tabakadan en alt tabakaya doğru sırası ile 820 m/s, 2130 m/s, 3200 m/s ve 4750 m/sn'dir.

KD-GB yönlü olan Şekil 3.14c'deki SRT1_P3 kesiti incelendiğinde diğer kesitlerden farklı olarak 3 tabakalı bir ortamdan oluştuğu dikkat çekmektedir. Değişkenlik gösteren tabakaların kalınlıklarının, özellikle kesitin eksen uzunluğunun 40 m-80 m'leri arasında oldukça kalınlaştığı görülmektedir. Tabakaların ortalama Vp hız değerleri yüzeyden derine doğru 820 m/s, 2130 m/s ve 3200 m/s'dir.

SRT1 P4 kesiti (Şekil 3.14d), 4 tabakalı bir ortamdan oluşmaktadır. Tabakaların kalınlıkları kesit boyunca kendi aralarında farklılık göstermektedir. Derine doğru gittikçe artan Vp değerleri sırası ile 820 m/s, 2130 m/s, 3200 m/s ve 4750 m/s olarak belirlenmiştir.

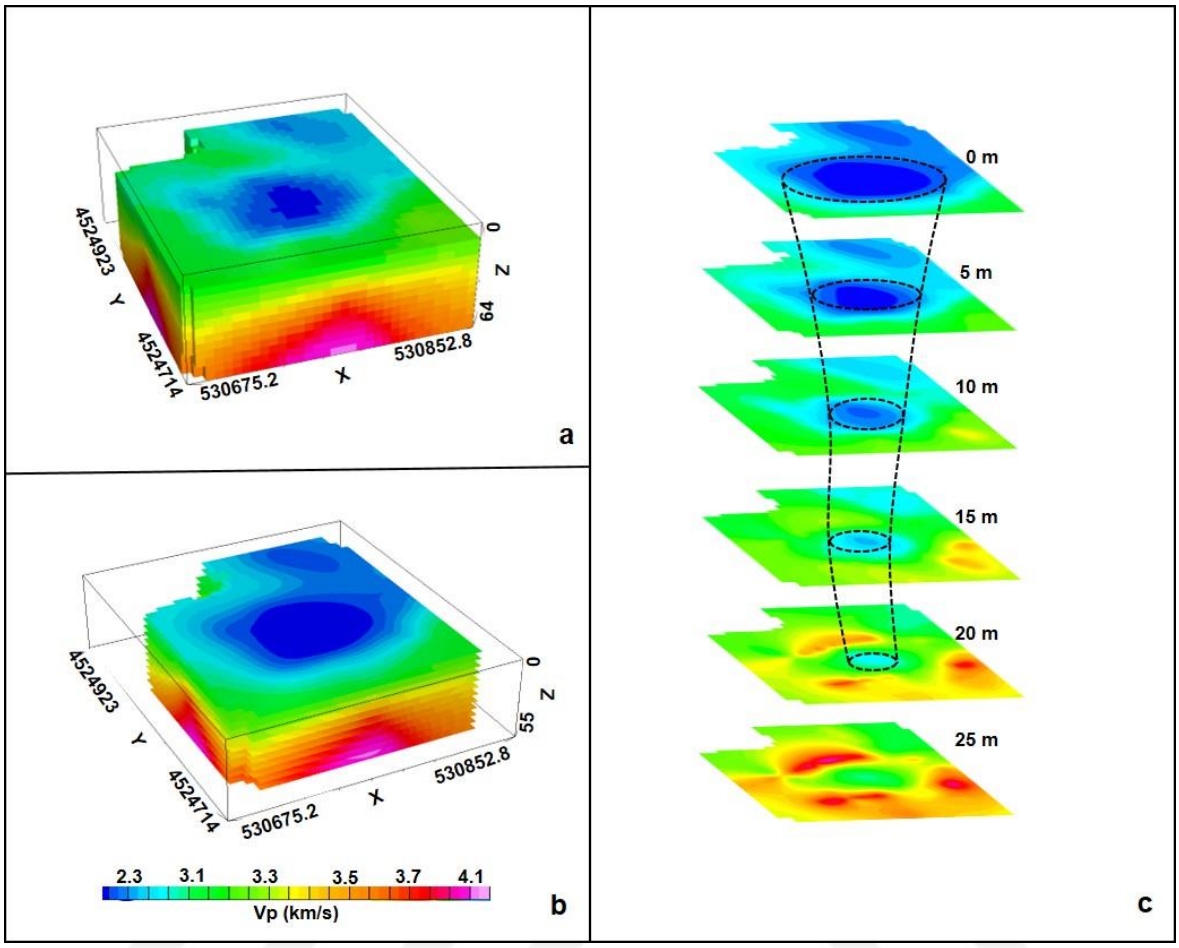
KD-GB yönünde elde edilen Şekil 3.14a'daki SRT1_P5 ve SRT1_P6 kesitlerine bakıldığında KB-GB yönündeki kesitlerde olduğu gibi 4 tabakalı bir ortamın varlığı görülmektedir. Derinlere doğru tabakaların Vp hız değerleri sırası ile 820 m/s, 2130 m/s, 3200 m/s ve 4750 m/s oldukları tespit edilmiştir.

Şekil 3.14a-d'deki KB-GD yönlü profiller incelendiğinde topografik eğimin gittikçe azaldığı görülmektedir. SRT1_P1, SRT1_P3 ve SRT1_P4 kesitlerinin uzaklık eksenlerinde sırasıyla 60-90 m, 40-95 m, 40-75 m'leri arasında çanak şeklinde derinlere doğru bir uzanımın olduğu görülmektedir. Çanak şeklindeki bu yapı Şekil 3.14e'deki KD-GB yönlü profilin 45-100 m uzunluk ekseni aralığında da kendini göstermektedir. Bu bölgelerin dolini temsil ettiği düşünülmektedir (Jabrane vd., 2023). Şekil 3.14g ise, Çalışma Alanı 1'den elde edilen sismik kırılma kesitlerinin toplandığı profilleri göstermektedir.



Şekil 3.14. Çalışma Alanı 1'den elde edilen *SRT* (SRT1_P1-SRT1_P6) kesitleri. a) SRT1_P1, b) SRT1_P2, c) SRT1_P3, d) SRT1_P4, e) SRT1_P5, f) SRT1_P6 kesitleri, g) SRT1_P1-SRT1_P6 kesitlerinin elde edildiği profiller (kırmızı çizgiler)

Şekil 3.15a, Çalışma Alanı 1'den elde edilen 3B'lu *SRT* görüntüsünü, Şekil 3.15b, 3B'lu *SRT* görüntüsünün seviye haritalarının birlikte görüntüsünü, Şekil 3.15c ise 3B'lu *SRT* görüntüsünün her 5 m de bir elde edilen seviye haritalarını görülmektedir. Şekil 3.15'teki seviye kat haritaları incelendiğinde yüzey seviyesinden 30 m derinlik seviyesine kadar uzanan ve derinlere doğru gidildikçe çapı küçülen, düşük Vp hızı gösteren (kesikli siyahlı çizgilerle gösterilen) bölge dikkat çekmektedir. Bu bölge *ERT* kesitlerinde, siyah kesikli çizgilerle gösterilen düşük özdirençli bölgeye (dolin olduğu düşünülen) denk gelmektedir. Ayrıca yüzeyden derinlere doğru inildikçe Vp hız değerlerinin arttığı görülmektedir. Vp hız değerinin yüksek olduğu bölgenin jeolojisi de dikkate alınınca masif kireçtaşını temsil ettiği şeklinde yorumlanabilmektedir.



Şekil 3.15. Çalışma Alanı 1, 3B'lu *SRT* görüntüleri ve seviye haritaları a) Çalışma Alanı 1'den elde edilen 3B'lu *SRT* görüntüsü, b) 3B'lu *SRT* görüntü seviye haritalarının bir aradaki görüntüsünü, c) 3B'lu *SRT* görüntüsünün her 5 m de bir görüntülenen seviye haritaları

Çalışma Alanı 1, MASW1 P1-MASW1_P6 profili için *MASW* yönteminden 1B Vs hızı-derinlik kesitinin elde edilme aşamaları görülmektedir. Tüm Vs kesitlerinde üç tabakalı bir ortam tespit edilmiştir. Çalışma alanında yer yer yüzeylenme veren kayaçların varlığı bilinmektedir. Ölçüm yapılan bu alanda toprak örtüsü oldukça az olup saha gözlemleri hem de jeolojik çalışmalara göre bölge kireçtaşından oluşmaktadır (Köroğlu, 2018). Kireçtaşının hem Vp hızı hem de Vs hızı genel olarak oldukça yüksektir. Vs kesitinden de görüldüğü gibi hız değerleri oldukça yüksek olup, bu koşullardaki çalışma alanının masif ya da az ayrışmış kireçtaşından oluştuğunu işaret etmektedir. Vs kesitinde su içeriği ya da boşlukla ilgili bir belirti gözlenememiştir.

Şekil 3.16'daki MASW1_P1 kesitinde tespit edilen üç tabakalı ortamın birinci tabakasının ortalama hızı, yaklaşık 405.5 m/s olup 7 m'ye kadar devam etmektedir. 7 m'den

24 m'ye kadar devam eden ikinci tabakanın hızı 738.3 m/sn'dir. 24 m derinlikten başlayan üçüncü tabakanın hızı ise 955.3 m/s'dir. Ortalama Vs30 hızı ise 638.2.6 m/s'dir.

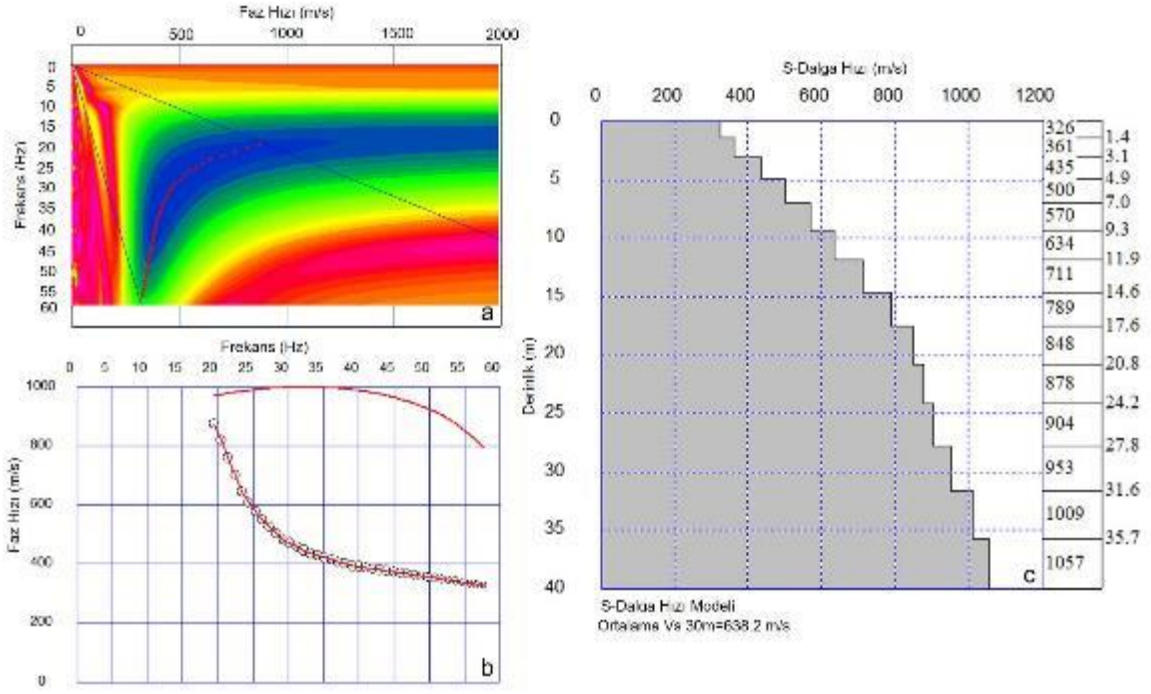
MASW1_P2 kesitindeki (Şekil 3.17) ilk tabakanın ortalama hızı yaklaşık 387.4 m/s ve tabaka kalınlığı 7 m'dir. İkinci tabakanın hızı 707.3 m/s olmakla birlikte, kalınlığı 7 m'den 21 arasındadır. 25 m derinlikten başlayan üçüncü tabakanın hızı ise 940.7 m/s'dir. Vs30 hızı ise 613.1 m/s'dir.

MASW1_P3 kesitinde (Şekil 3.18) de derinliğe kadar devam eden birinci tabakanın ortalama hızı yaklaşık ortalama 378.6 m/s'dir. Aynı kesitte ikinci tabakanın hızı 709.8 m/sn, üçüncü tabakanın hızı ise 1074.5 m/s'dir. Birinci tabakanın kalınlığı 5 m'den 24 m'ye kadar, üçüncü tabakanın kalınlığı ise 24 m'den 35 m'ye kadar devam etmektedir. Bu kesitin ortalama Vs30 hızı ise 747.2 m/s'dir.

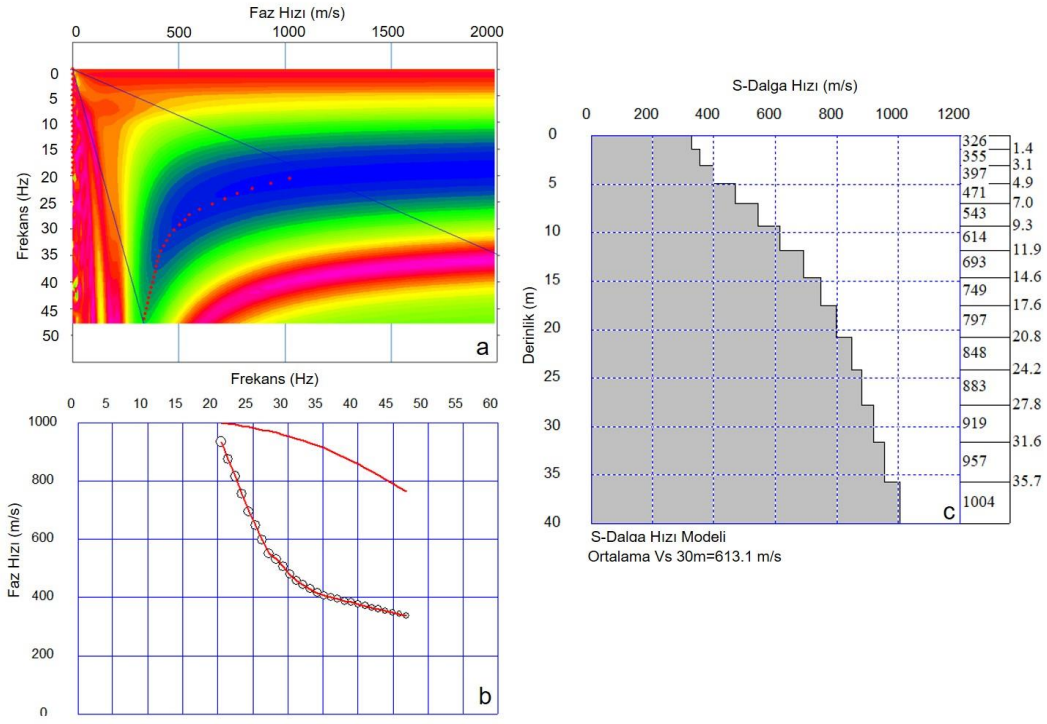
Şekil 3.19'deki MASW1_P4 kesitindeki birinci tabakanın ortalama hızı yaklaşık ortalama 417.5 m/s, kalınlığı ise 7 m'dir. İkinci tabakanın hızı 847.6 m/sn olup, 7 m'den 24 m'ye kadar devam ettiği görülmektedir. Üçüncü tabakanın hızı ise 1142 m/s olup 24 m'den daha derinlere kadar inmektedir. Hesaplanan ortalama Vs30 hızı ise 726.2 m/s'dir.

MASW1_P5 kesitinde de (Şekil 3.20) araştırılan ortamın üç tabakalı olduğu görülmektedir. Tabakaların ortalama hızı sırasıyla; 417.5, 656 ve 934.5 m/s'dir. Birinci tabaka m'ye, ikinci tabaka7 m'den 15 m'ye, üçüncü tabaka ise 15 m'den daha derinlere inmektedir. Bu ortamın ortalama Vs30 hızı ise 664.7 m/s'dir.

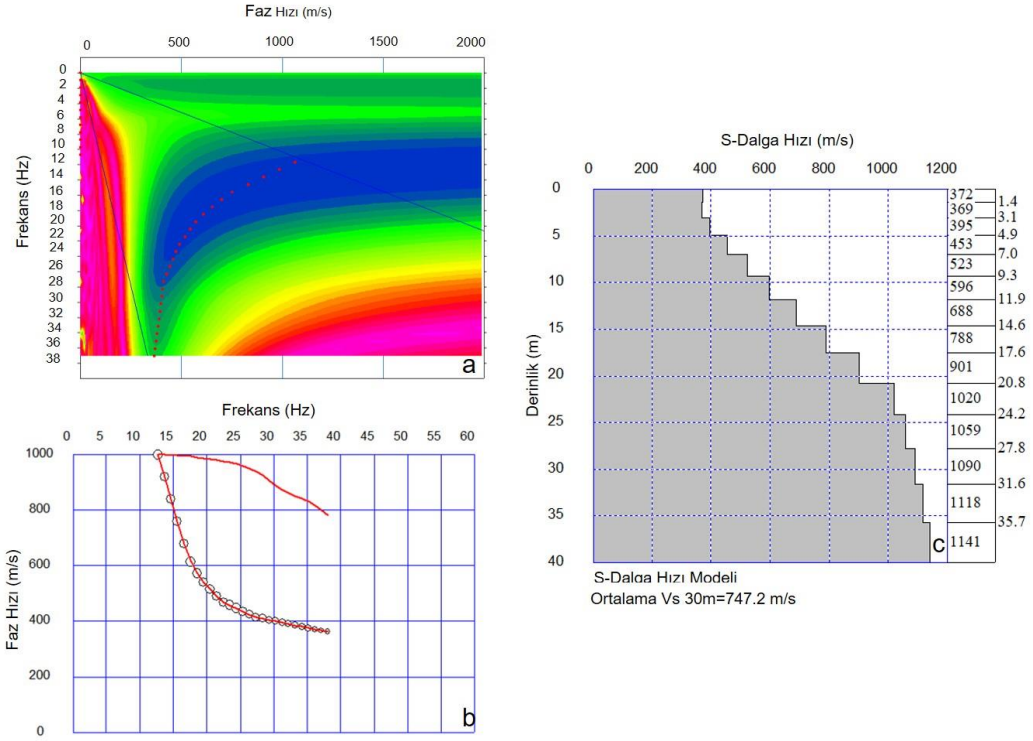
Şekil 3.21'deki MASW1_P6 kesitinde de araştırılan ortamın üç tabakalı olduğu görülmektedir. Birinci tabakanın ortalama hızı yaklaşık ortalama 494 m/s olup 5 m'ye kadar, ikinci tabakanın hızı 647 m/sn olup, 5 m'den 24 m'ye kadar, üçüncü tabakanın hızı ise 1009 m/s olup 24 m'den daha derinlere kadar inmektedir. Ortalama Vs30 hızı ise 684.2 m/s'dir.



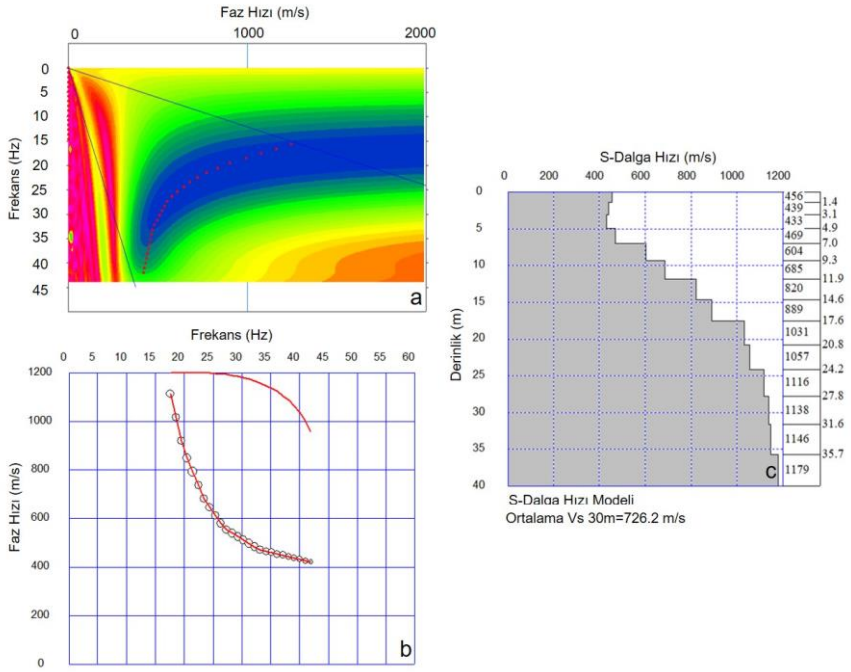
Şekil 3.16. Çalışma Alanı 1, MASW1_P1 verisi, a) MASW1_P1 profilden elde edilen faz hızı-frekans kesiti, b) hesaplanan (siyah) ile gözlenen (kırmızı) dispersiyon eğrilerinin çakışması, c) 1 boyutlu derinlik-Vs modeli



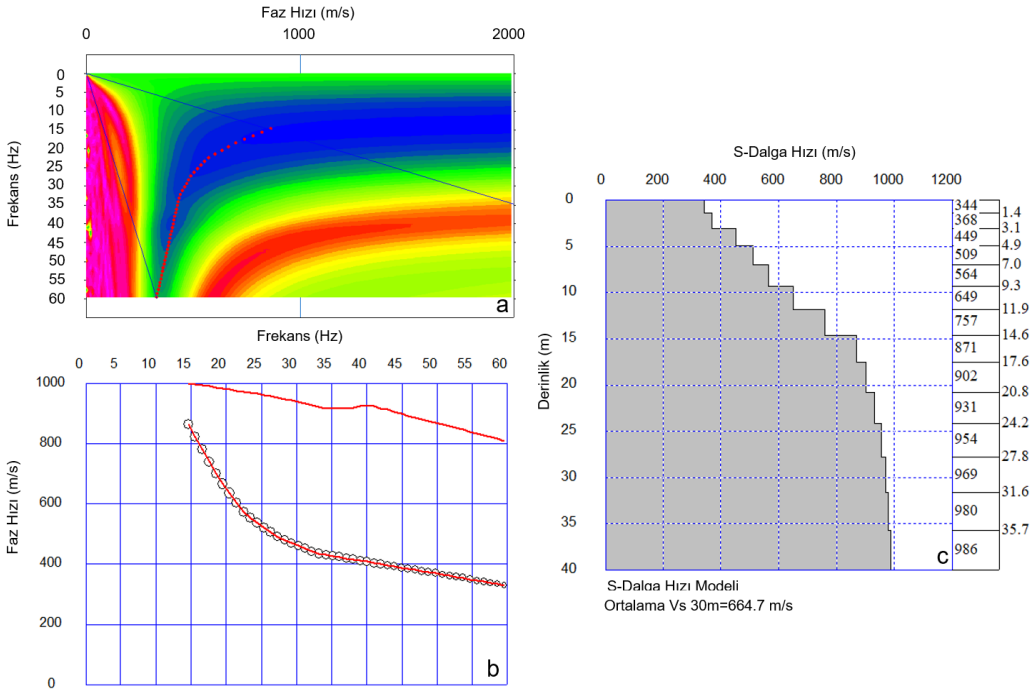
Şekil 3.17. Çalışma Alanı 1, MASW1_P2 verisi, a) MASW1_P2 profilden elde edilen faz hızı-frekans kesiti, b) hesaplanan (siyah) ile gözlenen (kırmızı) dispersiyon eğrilerinin çakışması, c) 1 boyutlu derinlik-Vs modeli



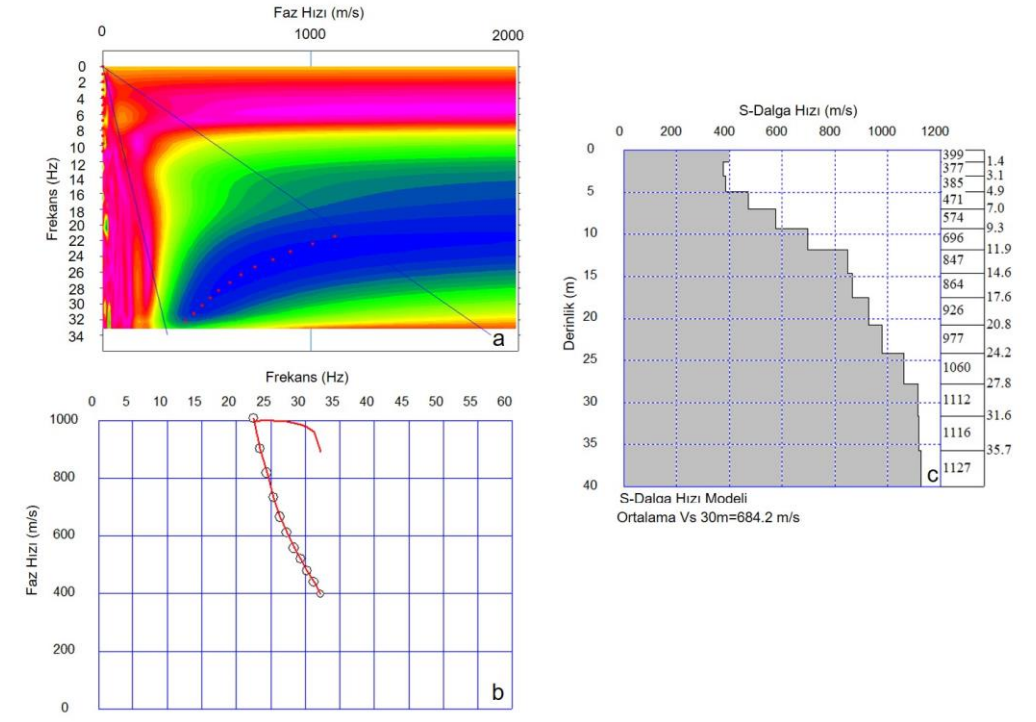
Şekil 3.18. Çalışma Alanı 1, MASW1_P3 verisi, a) MASW1_P3 profilden elde edilen faz hızı-frekans kesiti, b) hesaplanan (siyah) ile gözlenen (kırmızı) dispersiyon eğrilerinin çakışması, c) 1 boyutlu derinlik-Vs modeli



Şekil 3.19. Çalışma Alanı 1, MASW1_P4 verisi, a) MASW1_P4 profilden elde edilen faz hızı-frekans kesiti, b) hesaplanan (siyah) ile gözlenen (kırmızı) dispersiyon eğrilerinin çakışması, c) 1 boyutlu derinlik-Vs modeli

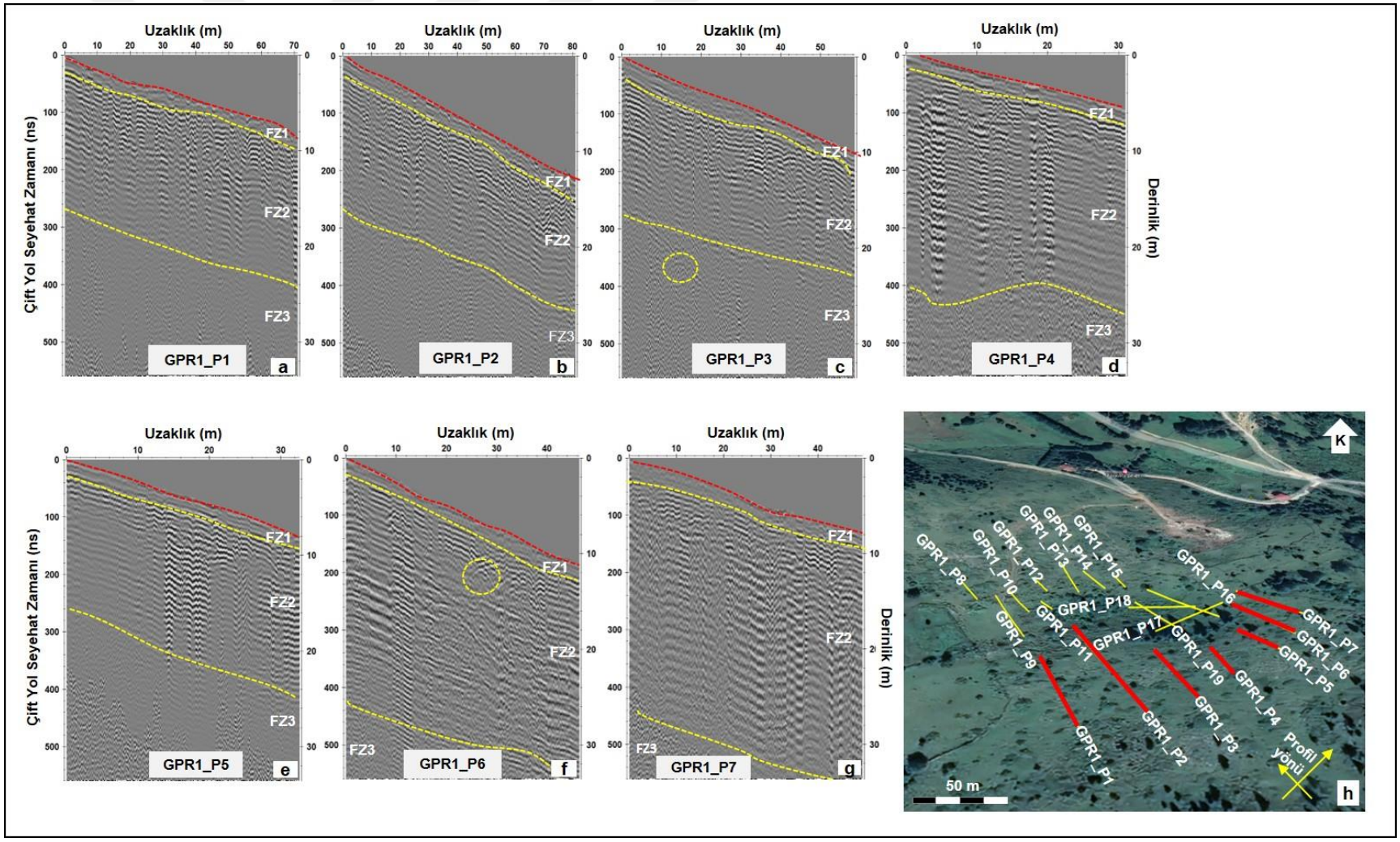


Şekil 3.20. Çalışma Alanı 1, MASW1_P5 verisi, a) MASW1_P5 profilden elde edilen faz hızı-frekans kesiti, b) hesaplanan (siyah) ile gözlenen (kırmızı) dispersiyon eğrilerinin çakışması, c) 1 boyutlu derinlik-Vs modeli



Şekil 3.21. Çalışma Alanı 1, MASW1_P6 verisi, a) MASW1_P6 profilden elde edilen faz hızı-frekans kesiti, b) hesaplanan (siyah) ile gözlenen (kırmızı) dispersiyon eğrilerinin çakışması, c) 1 boyutlu derinlik-Vs modeli

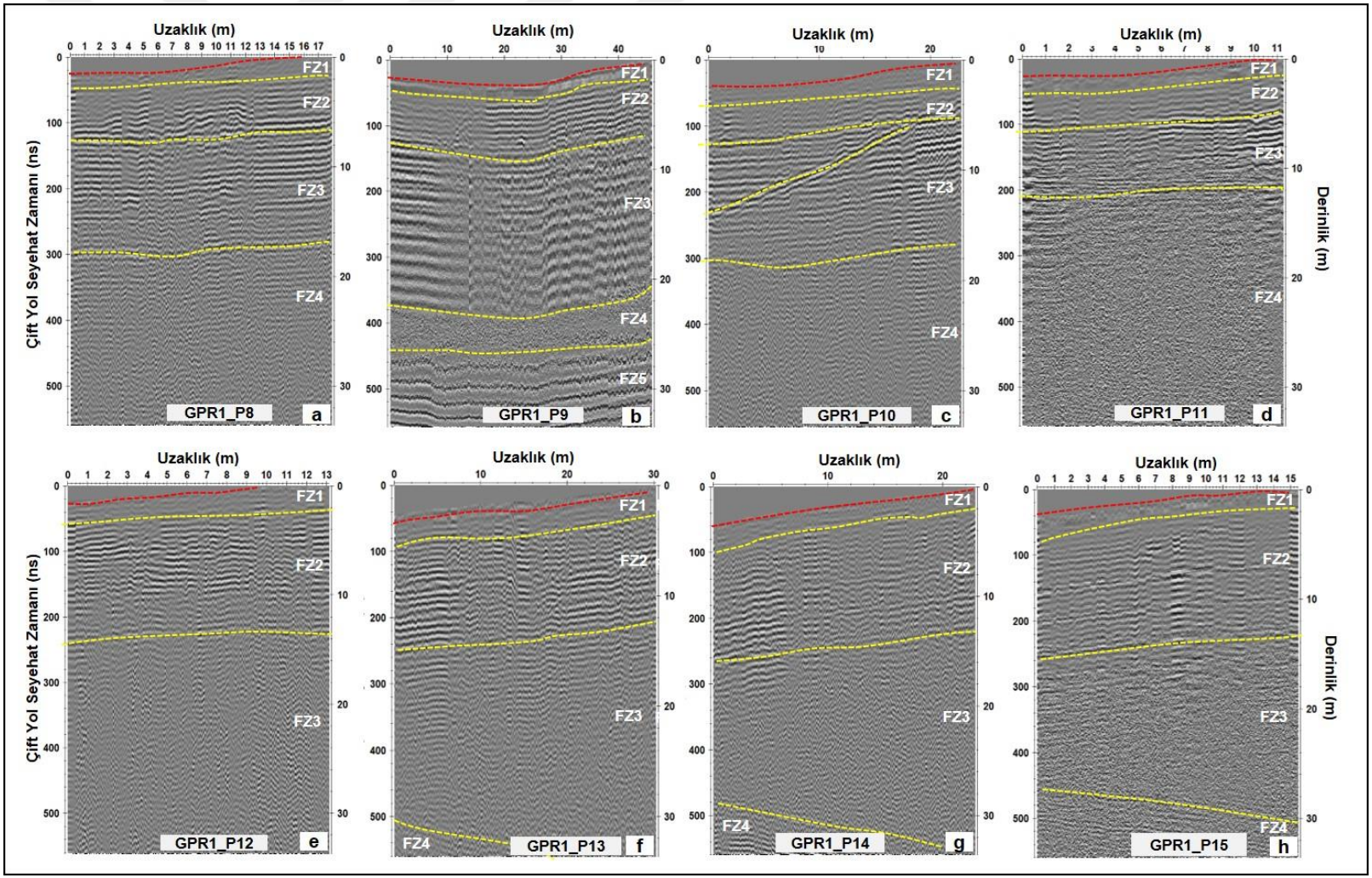
Çalışma Alanı 1'den elde edilen *GPR* kesitleri Şekil 3.22-24'te görülmektedir. Şekil 3.22a'da Çalışma Alanı 1 de yer alan KB-GD yönlü 7 profile ait *GPR* kesitleri yer almaktadır. Ölçü hat uzunlukları 30-80 m arasında değişiklik gösteren bu kesitlerin (GPR1_P1-GPR1_P7) yaklaşık 30 m derinlikten bilgi aldığı görülmektedir. Kesitlerin geneli incelendiğinde yüksek genlikli iki yansıtıcı yüzeyin (kesikli sarı çizgi) varlığı dikkat çekmekte ve kesitlerin bazı kısımlarında düşey yönde kendini gösteren yüksek genlikli yansıma yüzeylerinin olduğu gözlenmektedir. Literatürde (Honings, 2013; De Castro vd., 2024) yapılan çalışmalar dikkate alındığında düşey yöndeki bu yansıma yüzeylerinin kireçtaşı içerisinde yeni oluşmaya başlamış çok küçük ayrışma yüzeylerini göstergesi olarak varsayılmaktadır. GPR1_P1-GPR1_P7 kesitlerinde ilk iki yansıtıcı yüzey arasında kalan yaklaşık 2 m kalınlığındaki tabakanın, bir fasiyes zonunu (FZ1) gösterdiği düşünülmektedir. Fasiyes zonları (FZ), şelf-eğim-havza kesitleri boyunca sedimantolojik ve biyolojik kriterlerin değişimine göre farklılaşan kuşaklardır (Flügel, 2010). Bu çalışmadaki fasiyes zonu Flügel (2010)'daki şekilde değil, yapılan jeofizik yöntemlerdeki sınırlar arasında kalan kireçtaşlarını hem jeofiziksel hem de jeolojik olarak ifade etmek için kullanılmıştır. FZ1'in altında kalan ve kalınlığı yaklaşık 14-18 m arasında değişen birimin ikinci bir fasiyesi zonu (FZ2) ve en altta kalan tabakanın ise üçüncü bir fasiyes zonunu (FZ3) temsil ettiği düşünülmektedir. Ayrıca Şekil 3.22c ve Şekil 3.22f'de kesikli sarı daireler içerisinde hiberbol şeklinde yansıtıcı yüzeyler gözlenmektedir. Bu yansıma yüzeylerinin kireçtaşı içerisindeki olası boşlukları temsil edebileceği şeklinde yorumlanabilmektedir.



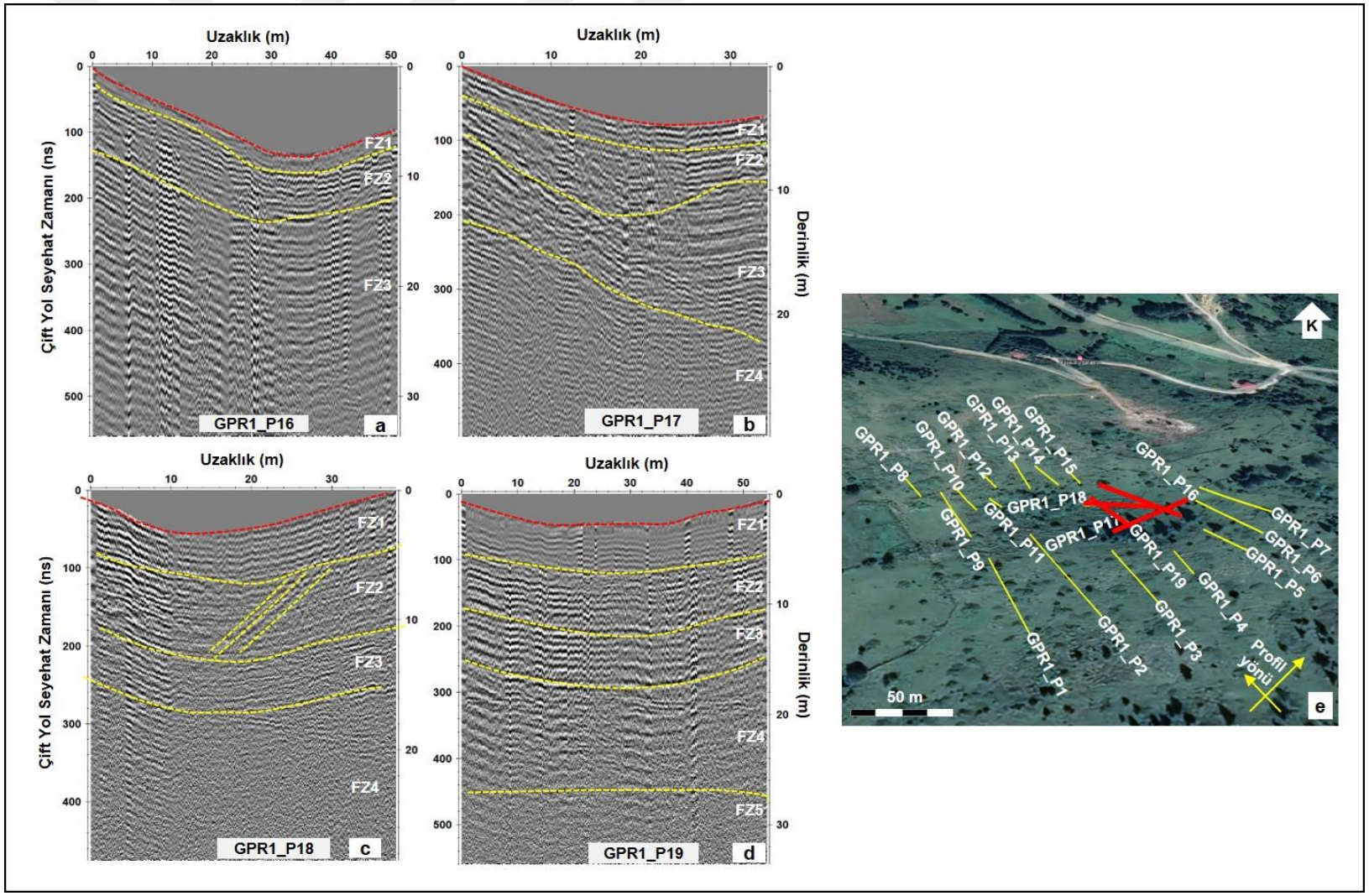
Şekil 3.22. Çalışma Alanı 1'den elde edilen *GPR* (GPR1_P1-GPR1_P7) kesitleri. a) GPR1_P1, b) GPR1_P2, c) GPR1_P3, d) GPR1_P4, e) GPR1_P5; f) GPR1_P6, g) GPR1_ P7 kesitleri, h) GPR1_P1-GPR1_P7 kesitlerinin elde edildiği profiller (kırmızı çizgiler).

Çalışma Alanı 1 de yer alan, KB-GD yönlü 8 profile (GPR1_P8-GPR1_P15) ait *GPR* kesitleri Şekil 3.23'de gösterilmektedir. Ölçü hat uzunlukları 11-45 m arasında değişiklik gösteren bu kesitlerin yaklaşık 30 m derinlikten bilgi aldığı görülmektedir. Kesitler genel olarak değerlendirildiğinde, aralarındaki tabaka kalınlıkları değişiklik gösteren yüksek genlikli 3-4 yansıtıcı yüzeyin varlığı dikkat çekmektedir. Bu yansıtıcılar arasında kalan kısımlarında Şekil 3.22'daki GPR1_P1-GPR1_P7 kesitlerinde olduğu gibi farklı fasiyes zonunu (FZ1, FZ2, FZ3, FZ4 ve FZ5) temsil ettiği düşünülmektedir. FZ1'in kalınlığı yaklaşık 2 m'dir. FZ2'nin kalınlığı kesitlerde farklılık göstermekle birlikte GPR1_P12-GPR1_P15 kesitleri boyunca benzerlik göstermekte ve yaklaşık 10 m'dir. Şekil 3.23a-h kesitlerinin bazı kısımlarında düşey yönde kendini gösteren yüksek genlikli yansıma yüzeylerinin olduğu gözlenmektedir.

Şekil 3.24'te Çalışma Alanı 1 de yer alan KB-GD yönlü 4 (GPR1_P16-GPR1_P19) profile ait *GPR* kesitleri görülmektedir. Bu kesitler çalışma alanı içerisinde yüzeyde direk gözlenen dolin üzerinde alınmıştır. Profil uzunlukları 32-55 m arasında değişiklik gösteren kesitlerden, yaklaşık 30 m derinlikten bilgi alınmıştır. Kesitlerin geneli incelendiğinde aralarındaki tabaka kalınlıkları değişiklik gösteren yüksek genlikli 2-4 yansıtıcı yüzeyin varlığı dikkat çekmekte ve kesitlerin bazı kısımlarında düşey yönde kendini gösteren yüksek genlikli yansıma yüzeylerinin olduğu gözlenmektedir. Burada da GPR1_P16-GPR1_P19 kesitlerindeki yansıma yüzeyleri arasında kalan üç ile beş arasında değişiklik gösteren birimlerin farklı fasiyes zonlarını temsil ettiği düşünülmektedir.

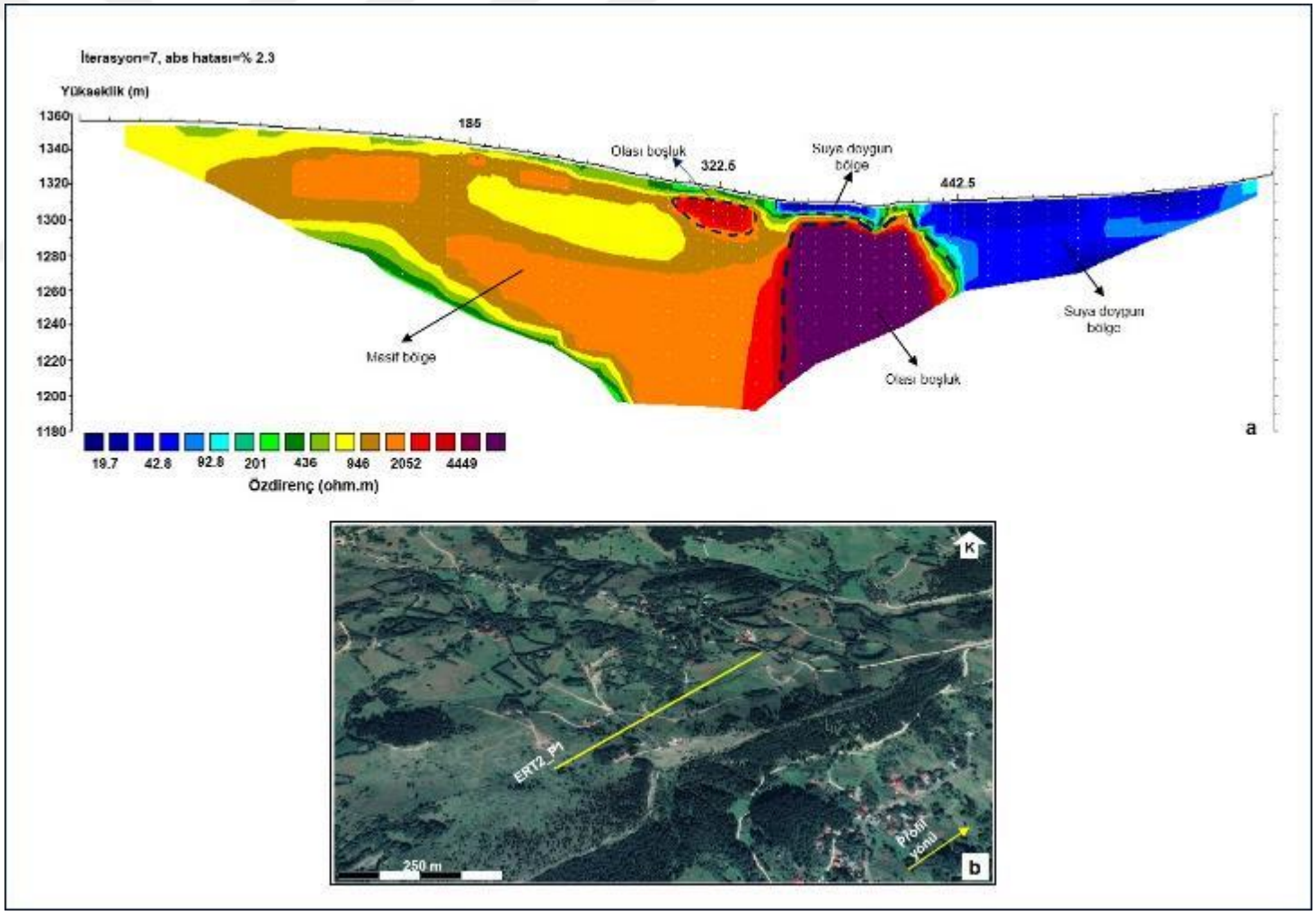


Şekil 3.23. Çalışma Alanı 1'den elde edilen *GPR* (GPR1_P8-GPR1_P15) kesitleri. a) GPR1_P8, b) GPR1_P9, c) GPR1_P10, d) GPR1_P11, e) GPR1_P12; f) GPR1_P13, g) GPR1_ P14, h) GPR1_ P15 kesitleri.



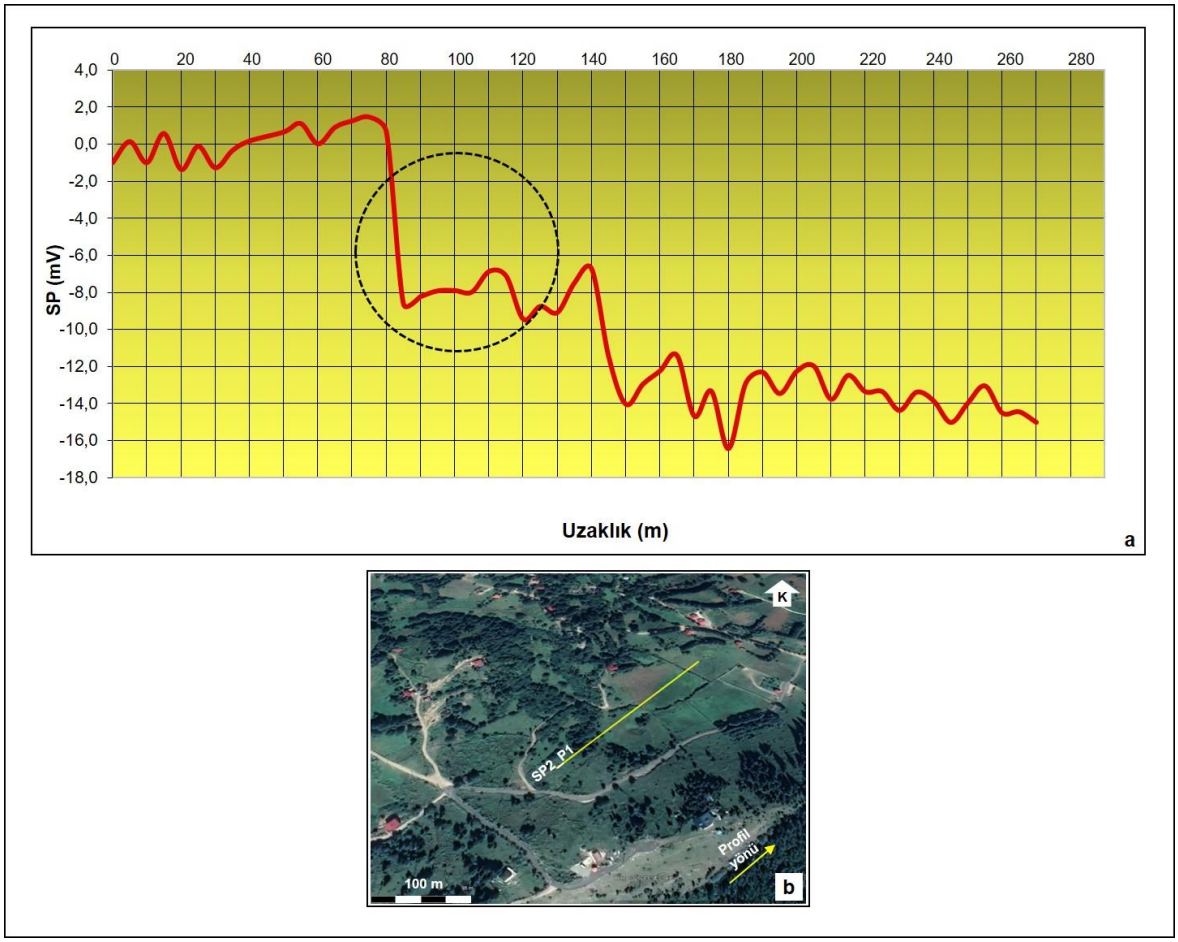
Şekil 3.24. Çalışma Alanı 1'den elde edilen *GPR* (GPR1_P16-GPR1_P19) kesitleri. a) GPR1_P16, b) GPR1_P17, c) GPR1_P18, d) GPR1_P19, e) GPR1_P16-GPR1_P19 kesitlerinin elde edildiği profiller (kırmızı çizgiler).

Çalışma Alanı 2'den elde edilen ERT2_P1 kesiti Şekil 3.25'te görülmektedir. Şekil 3.25a'da gösterilen ERT2_P1 ölçü profilleri içeren bölgeden, iki kola ayrıldığı bilinen Çal Mağarası'nın kol uzantılarının geçtiği düşünülmektedir (Törk vd., 2013). ERT2_P1 kesiti incelendiğinde kesitin eksen uzunluğunun 600 m olduğu, ulaşılan maksimum derinliğin ise 120 m olduğu görülmektedir. Kesitteki özdirenç değerleri 19.7-4449 ohm.m arasında dağılımı göstermektedir. Bu kesitin uzaklık ekseninin 360-420 m'sinin 9-90 m derinlik aralığında, oldukça yüksek özdirenç değerine (4449 ohm.m) sahip bir bölge dikkat çekmektedir. Bu bölgenin etrafına göre yüksek özdirenç değerlerine sahip olması, burada karstik boşluklu bir yapı olduğu şeklinde düşünülmektedir (Abdeltawab, 2013; Abdallatif vd., 2014). Aynı kesitin uzaklık ekseninin 420-600 m aralığında çok düşük özdirenç (51.7 ohm.m) değerleri gözlenmektedir. Bu bölgenin suya oldukça doygun bir bölgeyi temsil edebileceği yorumlanmıştır. Ayrıca kesitin uzaklık ekseninin 0-360 m aralığındaki yaklaşık 1499 ohm.m özdirencine sahip bölgenin ise masif kireçtaşını temsil ettiği düşünülmektedir.



Şekil 3.25. a) Çalışma Alanı 2'den elde edilen ERT2_P1 kesitinin elde edildiği profili. b) ERT2_P1 profilinden elde edilen ERT2_P1 kesiti.

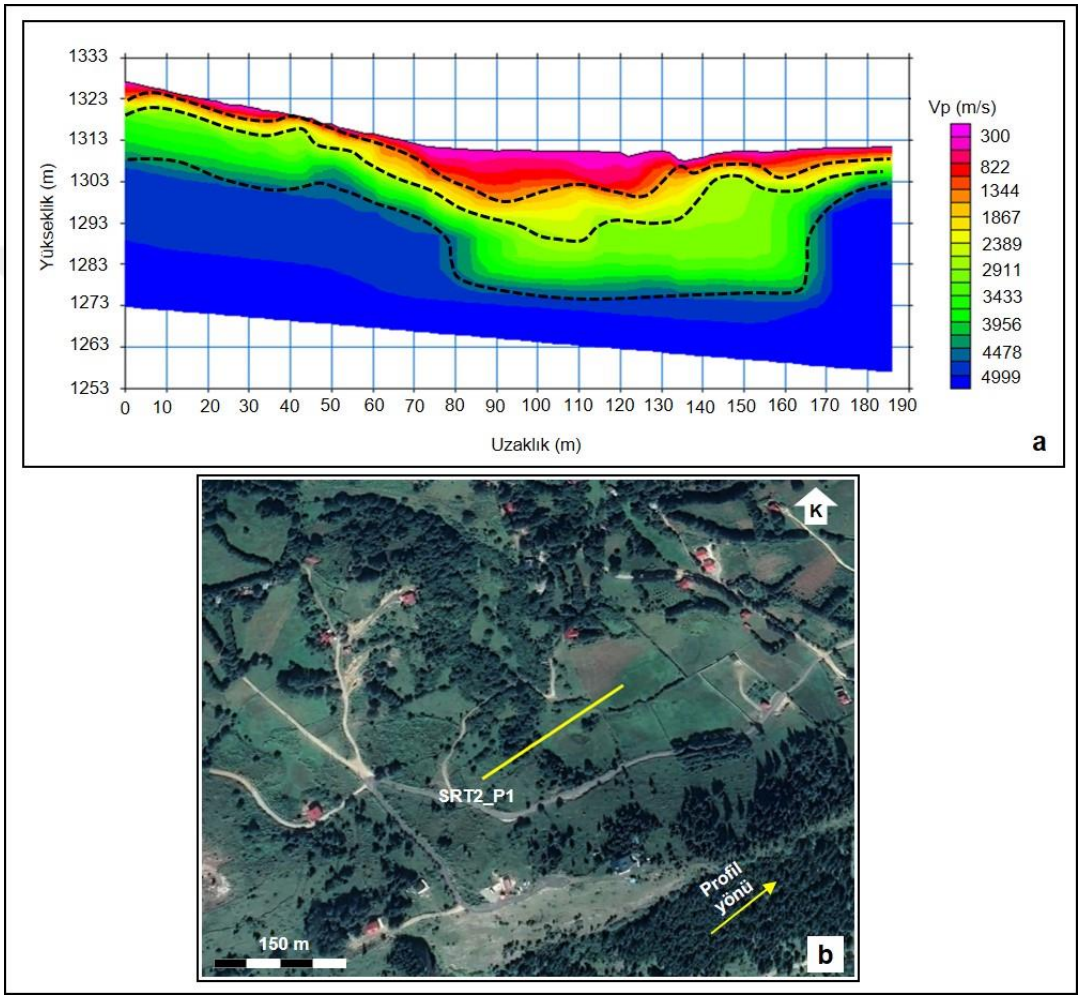
Çalışma Alanı 2'den elde edilen SP2_P1 grafiğinin ölçü profili (Şekil 3.26b), ERT2_P1 profilinin (Şekil 3.25a) uzaklık ekseninin 277.5- 525 m aralığına denk gelmektedir. 270 m uzaklık eksenine sahip bu grafiğin doğal potansiyel fark aralığının -18 mV ile +4 mV aralığında değiştiği görülmektedir. SP2_P2 kesiti incelendiğinde eksen uzaklığının yaklaşık 80-140 m aralığında doğal potansiyel fark değerinin ani bir şekilde -2 mV'dan -8 mV'a, 140-270 m aralığında ise -8 mV'dan -16 mV'a düştüğü görülmektedir. İlk düşüşün olduğu kısmın ERT2_P1'kesitinde boşluk olduğu düşünülen yüksek özdirençli bölgeye, ikinci ani düşüşün olduğu bölgenin ise yine ERT2_P1 suya doygun bir bölgeyi işaret ettiği düşünülen düşük özdirençli bölgeye denk geldiği belirlenmiştir.



Şekil 3.26. a) Çalışma Alanı 2'den elde edilen SP2 P1 kesiti, b) SP2_P1 kesitinin elde edildiği profil

Şekil 3.27'de gösterilen SRT2_P1 kesiti, aynı alandaki ERT2_P1 profilinin uzaklık ekseninin 277.5-457.5 m aralığında belirlenen SRT2_P1 profilinden elde edilmiştir. Bu kesit incelendiğinde alanın 4 tabakalı bir ortamdan oluştuğu tespit edilmiştir. Yüzeyden derine

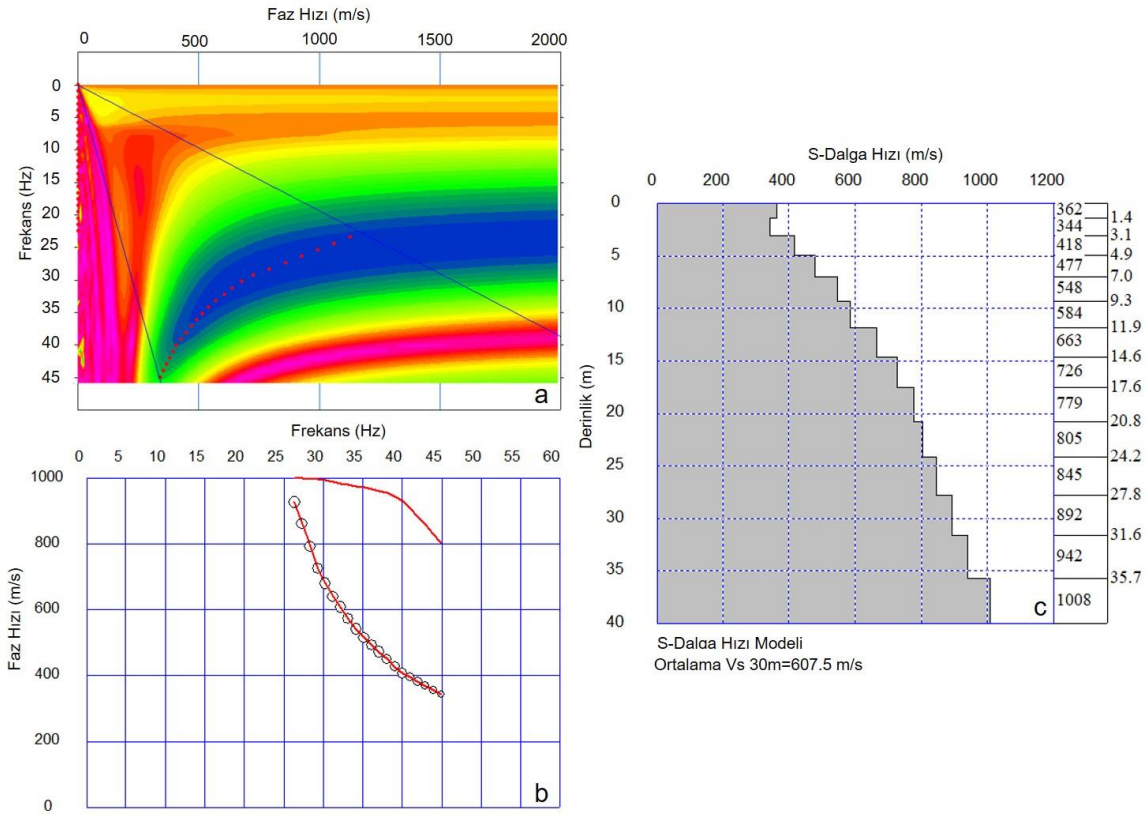
doğru bu tabakaların Vp hız değerlerinin sırasıyla; 822 m/s, 2128 m/s, 3433 m/s ve 4738.5 m/s olduğu belirlenmiştir. Bu kesitin eksen uzunluğunun 80-140 m'leri arasındaki düşük Vp hız değeri ERT2_P1 kesitinde çok yüksek özdirenç değeri gösteren, SP2_P1 kesitinde ise doğal potansiyel fark değerinin -2 mV'dan -8 mV'a düştüğü yere karşılık geldiği belirlenmiştir.



Şekil 3.27. a) Çalışma Alanı 2'den elde edilen SRT2_P1 kesiti, b) SRT2_P1 kesitinin elde edildiği profil

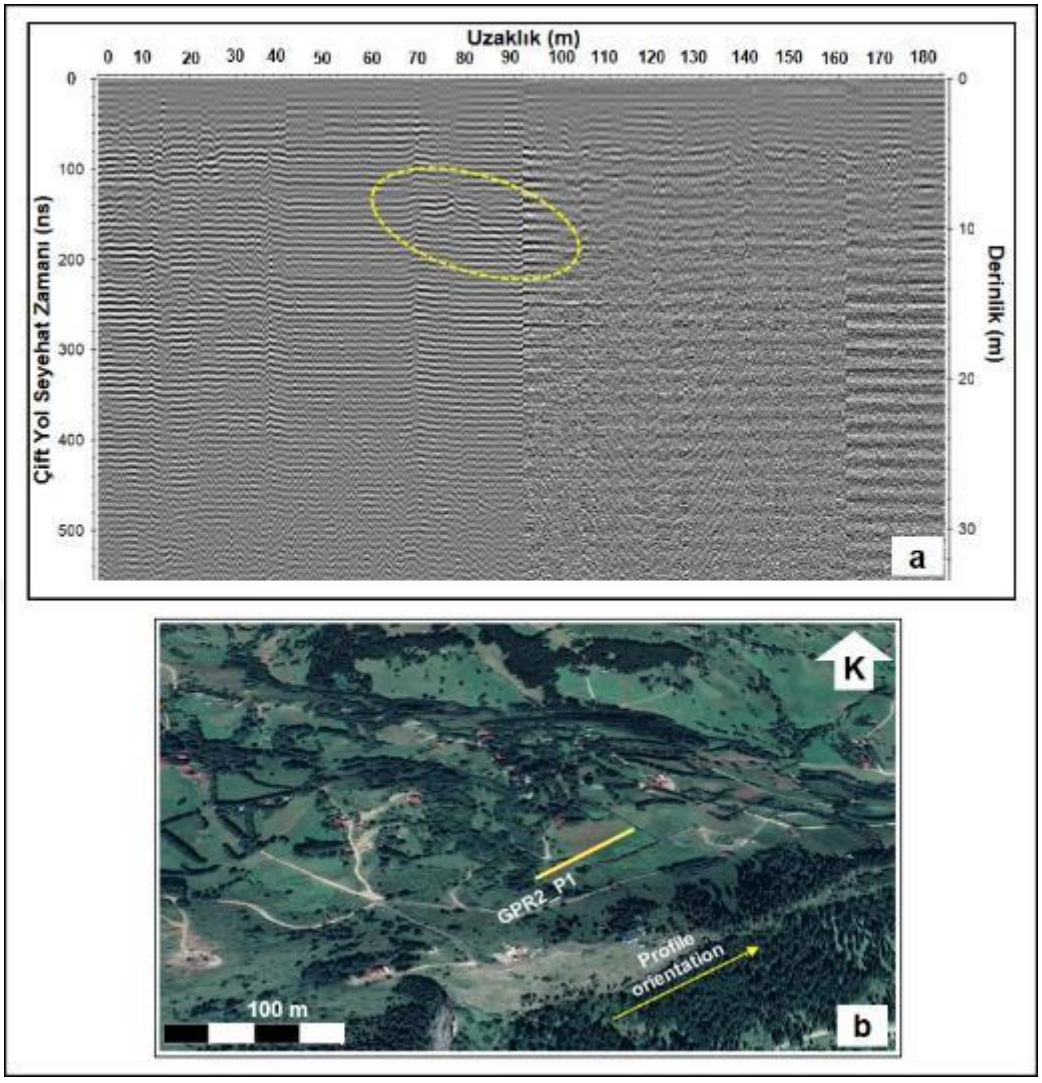
Şekil 3.28'de Çalışma Alanı 2'deki *SRT* profili üzerinden *MASW* yönteminden elde edilen Vs kesitinin belirlenme aşamaları görülmektedir. Şekil 3.28c'deki Vs kesitlerinde üç tabakalı bir ortam gözlenmekte, ilk tabakanın ortalama hızı yaklaşık ortalama 429.8 m/s olup 9 m'ye kadar inmektedir, ikinci tabakanın hızı 711.4 m/sn olup, 9 m'den 25 m'ye kadar, üçüncü tabakanın hızı ise 921.6 m/s dir. Buradaki Vs30 hızı 607.5 m/s'dir. Bu çalışma alanındaki yapı olarak ilk çalışma alanına benzemekle birlikte, hızlar nispeten daha düşüktür.

Bununla birlikte özellikle uzaklık ekseninin 25-30 m'lerinden sonra masif bir ortamın varlığı söz konusudur.



Şekil 3.28. Çalışma Alanı 2, MASW2_P1 verisi, a) MASW2_P1 profilden elde edilen faz hızı-frekans kesiti, b) hesaplanan (siyah) ile gözlenen (kırmızı) dispersiyon eğrilerinin çakışması, c) 1 boyutlu derinlik-Vs modeli

Şekil 3.29'daki GPR2_P1 kesiti ERT2_P1 profilinin 355-540 m aralığına (Şekil 3.25) denk gelmektedir. Bu kesitin eksen uzunluğunun 180 m olduğu ve maksimum 35 m derinlikten bilgi aldığı görülmektedir. GPR2_P1 kesininin eksen uzaklığının 70-90 m'leri arasında, 9 m derinlikten başlayan hiperbolik yansımanın varlığı ilgi çekmektedir. Bu hiperbolik yansımanın diğer tüm kesitlerde gözlemlenen boşluklu yapıya karşılık geldiği düşünülmektedir. Ayrıca aynı kesitin eksen uzunluğunun 90 m'sinden sonrasında yansımaların zayıfladığı görülmektedir. Bu kısmın, şekil 3.25'teki ERT2_P1 kesitindeki suya doygun olduğu düşünülen bölgeye denk geldiği tespit edilmiştir.

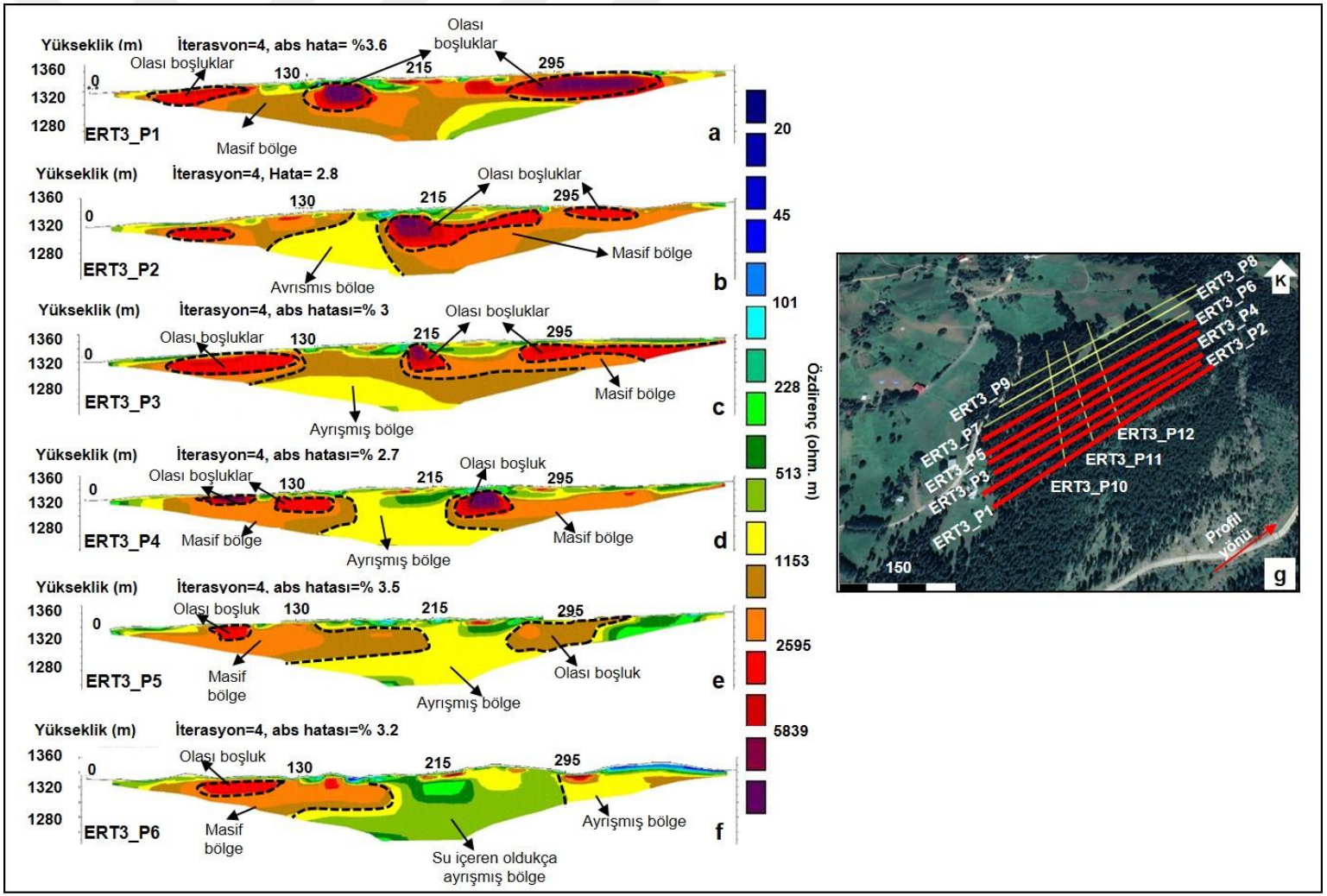


Şekil 3.29. Çalışma Alanı 2'den elde edilen *GPR* kesiti ve profili. a) GPR2_P1 kesiti, b) GPR2_P1 kesitinin elde edildiği profil

Çalışma Alanı 3'ten elde edilen 2B'lu elektrik özdirenç kesitleri Şekil 3.30 ve Şekil 3.31'de görülmektedir. Şekil 3.30 (ERT3_P1-ERT3_P6) ve Şekil 3.31a-c (ERT1_P7-ERT1_P9)'deki kesitler incelendiğinde, yaklaşık 80 m derinlikten, Şekil 3.31d-f'deki ERT3_P10-ERT3_P12 kesitleri incelendiğinde ise yaklaşık 40 m derinlikten bilgi alınabildiği tespit edilmiştir. Şekil 3.30 ve Şekil 3.31'deki özdirenç dağılımı 20-5839 ohm.m arasında değişmektedir.

ERT3_P1 kesiti (Şekil 3.30a) incelendiğinde, uzaklık eksenin 100-290 m aralığında, özdirencin 1153-2595 ohm.m arasında değiştiği bir bölgenin hakim olduğu görülmektedir. Bu bölgenin masif kireçtaşını ifade ettiği düşünülmektedir. Ayrıca kesitin uzunluk ekseni boyunca farklı kısımlarda ve yüzeye çok yakın (yaklaşık 5m) derinliklerde başlayan, özdirenci yüksek (>5839) bölgeler bulunmaktadır. Özdirenci oldukça yüksek olan bu

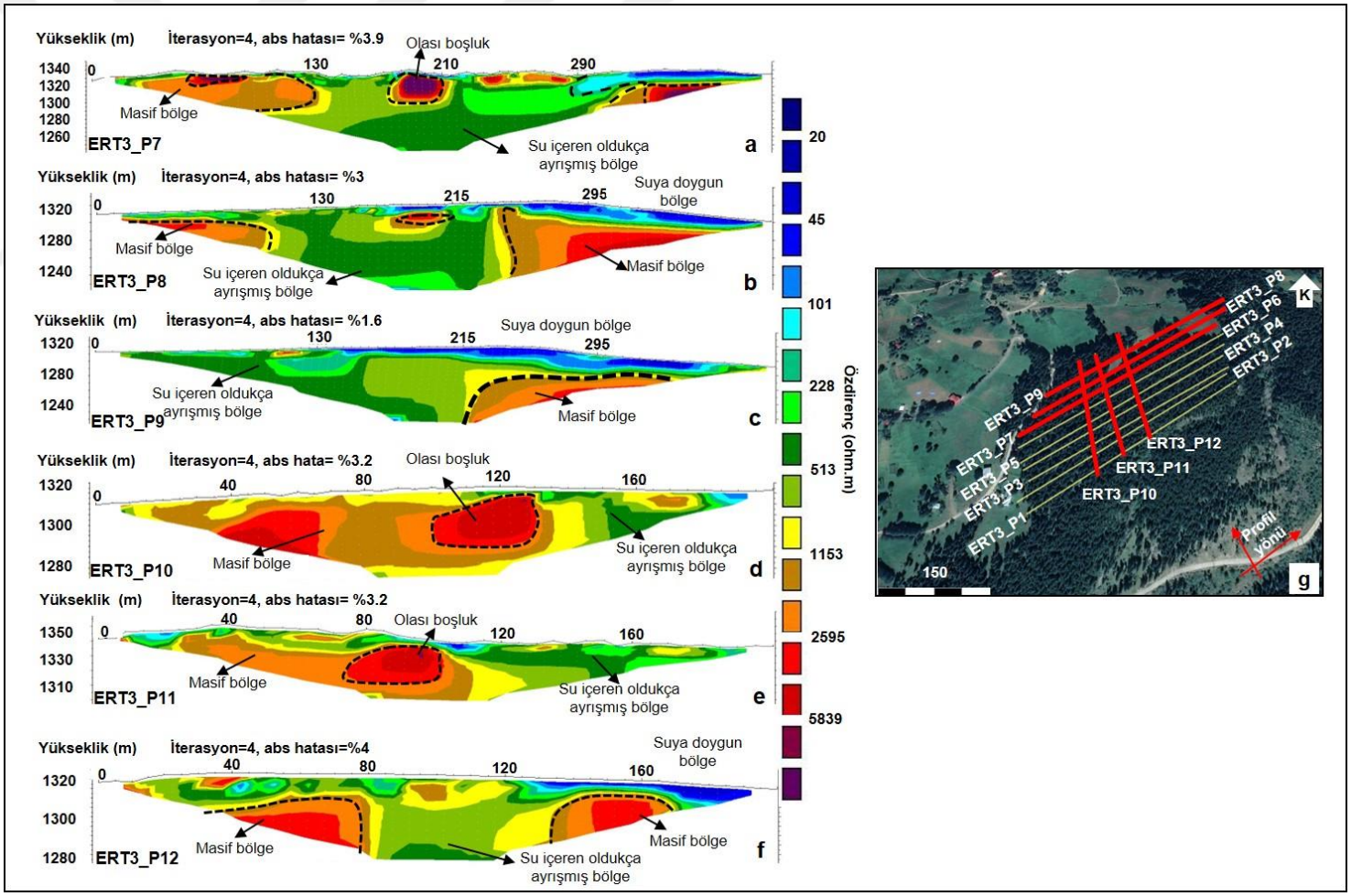
kısımların ise olası boşlukları ifade edebileceği şeklinde yorumlanabilir. ERT3_2-ERT3_8 kesitleri incelendiğinde sırasıyla; 165-190 m, 130-210 m, 140-235 m, 140-270 m, 160-290 m, 110-220 m, 80-230 m uzaklık eksenleri aralığında başlayan, yaklaşık 40 m derinliklerde daralan ve daha sonra genişleyerek 80 m derinliğe kadar uzanan göreceli düşük özdirençli (1153 ohm.m) bir bölgenin hâkimiyeti söz konusudur. Şekil 3.30f ve Şekil 3.31a,b'deki ERT3_6-ERT3_8 kesitlerindeki bu bölgenin özdirencinin diğer kesitlere göre daha da düşük olduğu tespit edilmiştir. Bu düşük özdirençli bölgenin sağ ve sol kısımlarında daha yüksek özdirençli bölgeler görülmektedir. Özdirencin yüksek olduğu bu bölgelerin masif kireçtaşlarını temsil ettiği düşünülmektedir. Ayrıca Şekil 3.30a'daki ERT3_P1 kesitinde olduğu gibi Şekil 3.30b-f ve Şekil 3.31a-c kesitlerinin eksen uzunlukları boyunca farklı kısımlarda ve yüzeye oldukça yakın, özdirenci yüksek (>5839) bölgeler bulunmaktadır. Özdirenci oldukça yüksek (4217 ohm.m) olan bu kısımların ise olası boşluklu yapılara karşılık geldiği düşünülmektedir.



Şekil 3.30. Çalışma Alanı 3'ten elde edilen 2B *ERT* kesitleri (ERT3_P1-ERT3_P6). a) ERT3_P1, b) ERT3_P2, c) ERT3_P3, d) ERT3_P4, e) ERT3_P5, f) ERT3_P6 kesitleri, g) ERT3_P1-ERT3_P6 kesitlerinin elde edildiği profiller (kırmızı çizgiler)

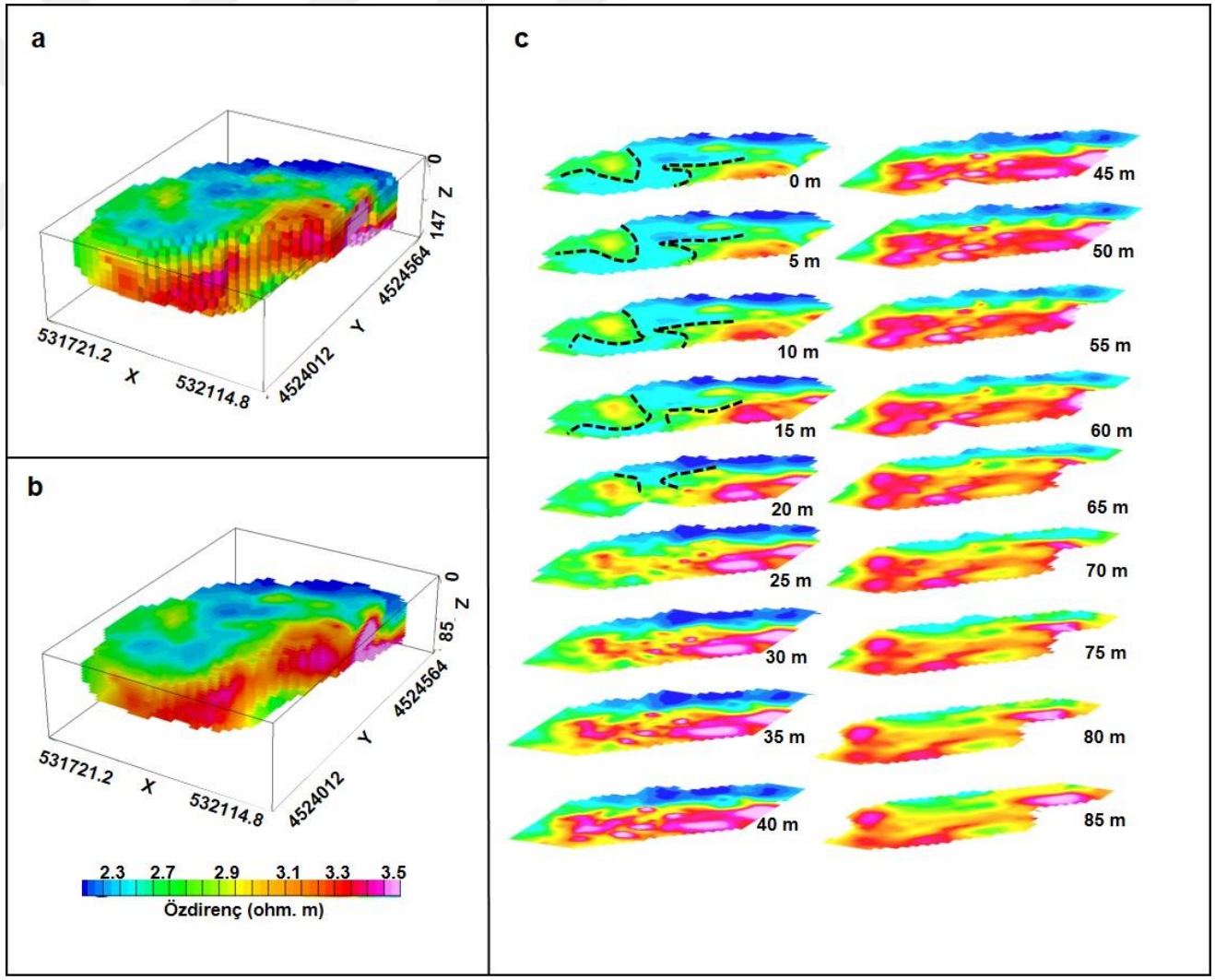
Şekil 3.31d-f Çalışma Alanı 3'ten elde edilen KB-GD yönlü ERT3_P10-ERT3_P12 kesitlerini, Şekil 3.31g ise bu kesitlerin elde edildiği profilleri göstermektedir. Uzunluk eksenleri 200 m'yi bulan bu kesitlerin yaklaşık 40 m derinlikten bilgi alabildikleri tespit edilmiştir.

ERT3_P10 kesiti (Şekil 3.31d) incelendiğinde, kesitin uzunluk eksenin 0-140 m arasında, özdirencinin 1153-2595 ohm.m arasında değişen bir bölgenin hakim olduğu görülmektedir. Bu bölgenin masif kireçtaşlarını ifade ettiği düşünülmektedir. Bu bölge içerisinde uzunluk ekseninin 110-130 m arasında yüzeyden itibaren yaklaşık 6 m derinlikte derinlere doğru devam eden dairesel şekilli özdirenci yüksek (4217 ohm.m) bir bölge dikkat çekmektedir. Bu bölgenin olası boşluk içeren bir kısmı gösterdiği şeklinde yorumlanabilir. Ayrıca kesitin 140-200 m uzunluk aralığında kalan ve derinlere doğru uzanan düşük özdirençli (833 ohm.m) bir bölge görülmektedir. Bu bölgenin su içeren oldukça ayrışmış bir bölge olduğu varsayılmaktadır. Bu bölge, paralelinden elde edilen Şekil 3.31e'deki ERT3_P11 kesitinde de 105-200 m uzaklık ekseni arasında da görülmektedir. Ayrıca, ERT3_P11 kesiti incelendiğinde uzaklık ekseninin 100 m'sinden başlayarak sonuna kadar devam eden kesit boyunca ve 0-100 m'ler arasında yüzeye oldukça yakın düşük özdirençli (370 ohm.m) bir alanın hakimiyeti söz konusudur. Aynı kesitin 70-100 m uzaklık eksenin aralığında yaklaşık 10 m derinlikte bulunan ve çember şeklinde kapanım gösteren yüksek özdirençli (4127 ohm.m) bir bölge gözlenmektedir. ERT3_P12 kesiti (Şekil 3.31f) incelendiğinde, ERT3_P10-ERT3-11 kesitlerinde görülen düşük özdirençli bölgenin bu kesitin geneline hakim olduğu görülmektedir. Ayrıca ERT3_P12 kesitinin 40-80 m ve 130-170 m uzunluk eksenleri arasında, yüzeyden itibaren 4 m ve 4 m derinlikten başlayarak derinlere doğru devam eden yüksek özdirençli bölgeler izlenmektedir. Bu bölgelerin masif kireçtaşlarını ifade ettikleri düşünülmektedir.



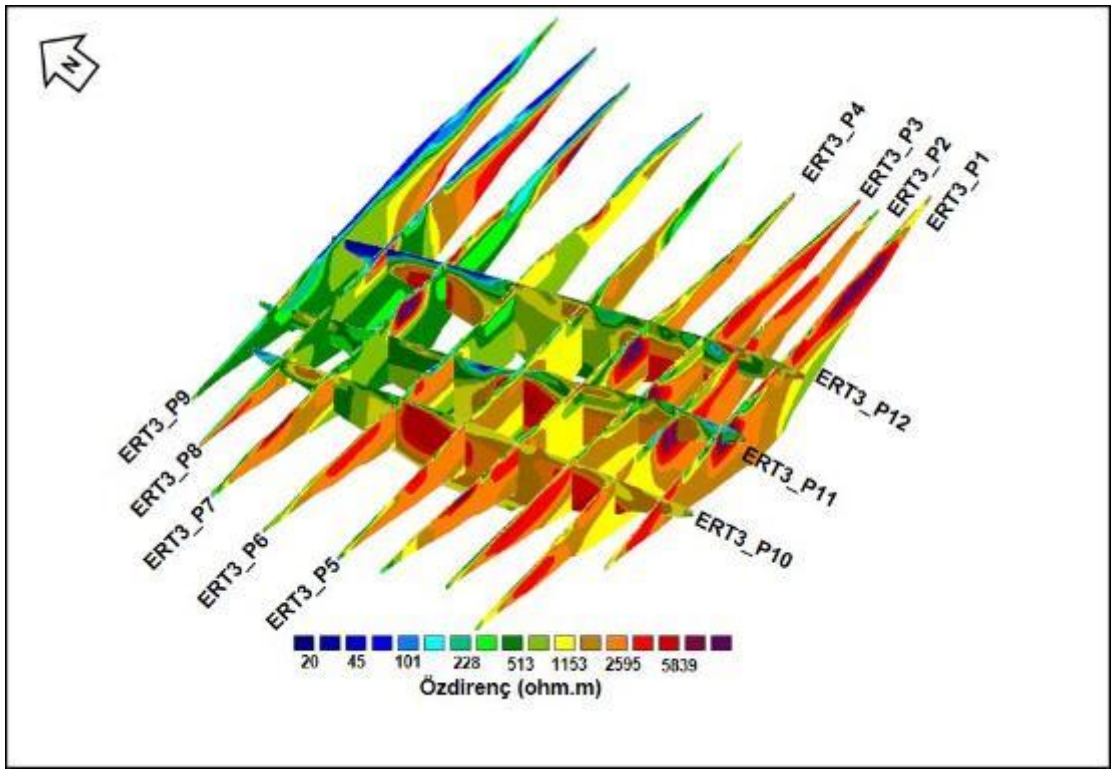
Şekil 3.31. Çalışma Alanı 3'ten elde edilen 2B *ERT* kesitleri (ERT3_P7-ERT3_P12). a) ERT3_P7, b) ERT3_P8, c) ERT3_P9, d) ERT3_P10, e) ERT3_P11, f) ERT3_P12 kesitleri, g) ERT3_P7-ERT3_P12 kesitlerinin elde edildiği profiller (kırmızı çizgiler)

Çalışma Alanı 3'ten elde edilen 2B'lu *ERT* kesitlerinden belirlenen 3B'lu *ERT* görünümü, Şekil 3.32'de verilmektedir. Şekil 3.32a; bu alanın 3B'lu *ERT* görüntüsünü, Şekil 3.32b, seviye haritalarının birlikte görünümü, Şekil 3.32c yüzeyden derine doğru 5 m de bir görüntülenen seviye haritalarını göstermektedir. Şekil 3.32a ve b' de yüzeyde kesik siyah çizgilerle gösterilen düşük özdirençli bölgenin KD-GB yönüne doğru ilerlediği görülmektedir. Düşük özdirençli bu bölgelerin, çalışma alanında bulunan dolinlerin uzanım yönlerini gösterdiği düşünülmektedir. Bu yapının yüzeyden derine doğru yaklaşık 22 m derinliğe (yüzeyden derine 1345 m yükseklik seviyesine kadar) kadar kendini gösterdiği görülmektedir. Seviye haritalarında derinlik seviyesi arttıkça özdirenç değerleri artmaktadır. Bu bölgeler çalışma alanının jeolojisi de dikkate alındığında masif kireçtaşlarını temsil etmektedir.



Şekil 3.32. Çalışma Alanı 3, 3B'lu *ERT* görüntüleri ve seviye haritaları. a) Çalışma Alanı 3'den elde edilen 3B'lu *ERT* görüntüsü, b) 3B'lu *ERT* görüntü seviye haritalarının bir aradaki görüntüsünü, c) 3B'lu *ERT* görüntüsünün her 5 m de bir görüntülenen seviye haritaları

Şekil 3.33'deki fence diyagramında ERT3_P7-P9 ve ERT3_P10-12 kesitlerinin kesişim alanında düşük özdirenç (yaklaşık 307 ohm.m) değerlerine sahiptir. Bu alan suya doygun alan olarak değerlendirilmektedir. Ayrıca, Şekil 3.33'de özdirenç değeri ~2995 ohm.m olan bölgelerin masif kireçtaşlarını, yüksek özdirenç değerine sahip (~5838 ohm.m) bölgelerin ise masif kireçtaşları içerisinde bulunan olası karstik boşlukları temsil ettiği düşünülmektedir.



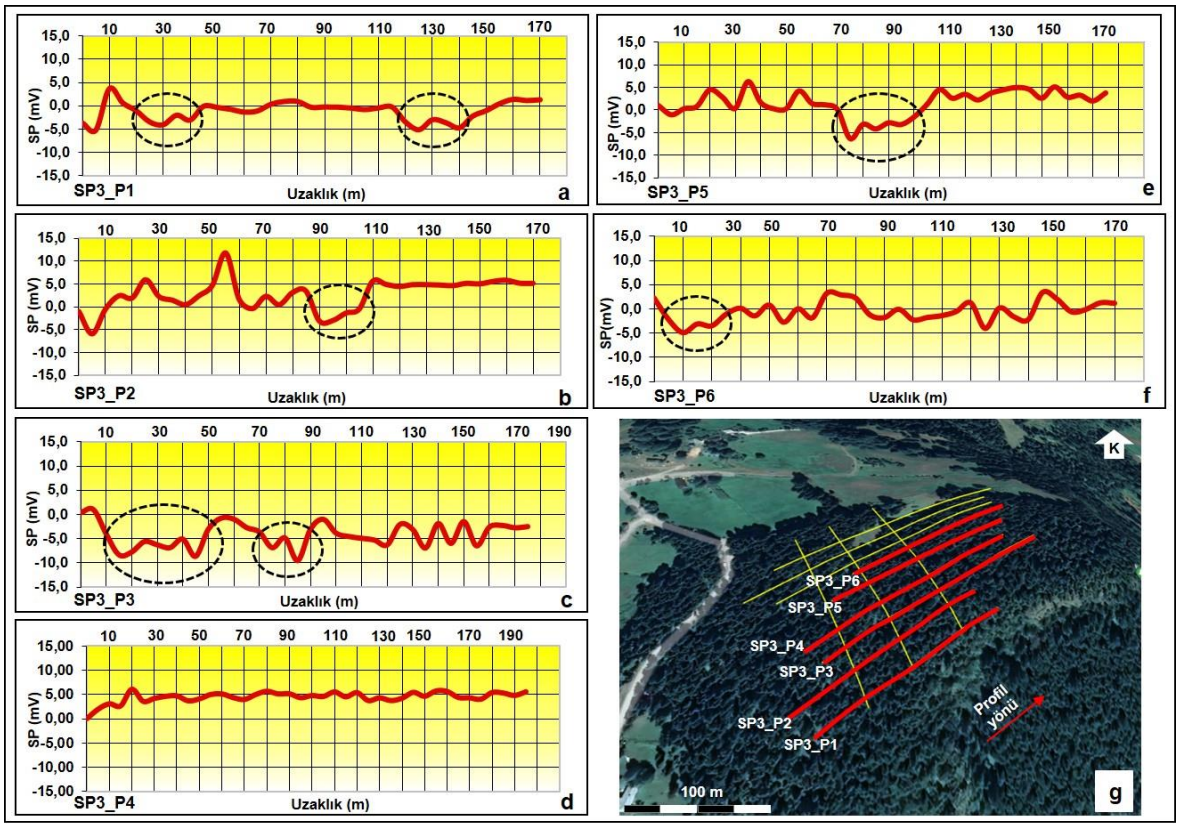
Şekil 3.33. Çalışma Alanı 3'ten elde edilen *ERT* kesitlerinin fence diyagramı

Bu tez çalışması kapsamında Çalışma Alanı 3'den elde edilen *SP* verilerinden elde edilen *SP* grafikleri Şekil 3.34 ve Şekil 3.35'de gösterilmektedir. Şekil 3.34a-f ve şekil 3.35a-c Çalışma Alanı 3'ten elde edilen KD-GB yönlü SP3_P1-SP3_P9 grafiklerini, Şekil 3.35d-f aynı çalışma alanından elde edilen KB-GD yönlü SP3_P10-SP3_P12 grafiklerini, Şekil 3.34g ve 3.35g ise bu grafiklerin elde edildiği profilleri temsil etmektedir. Birbirine paralel ve aralarındaki mesafe 20 m olan SP3_P1-SP3_P9 grafiklerinin uzaklık eksenleri 165-225 m arasında değişirken, bu profilleri dik kesecek şekilde elde edilen SP3_P10-SP3_P12 grafiklerinin uzunluk eksenleri ise 195 m'dir.

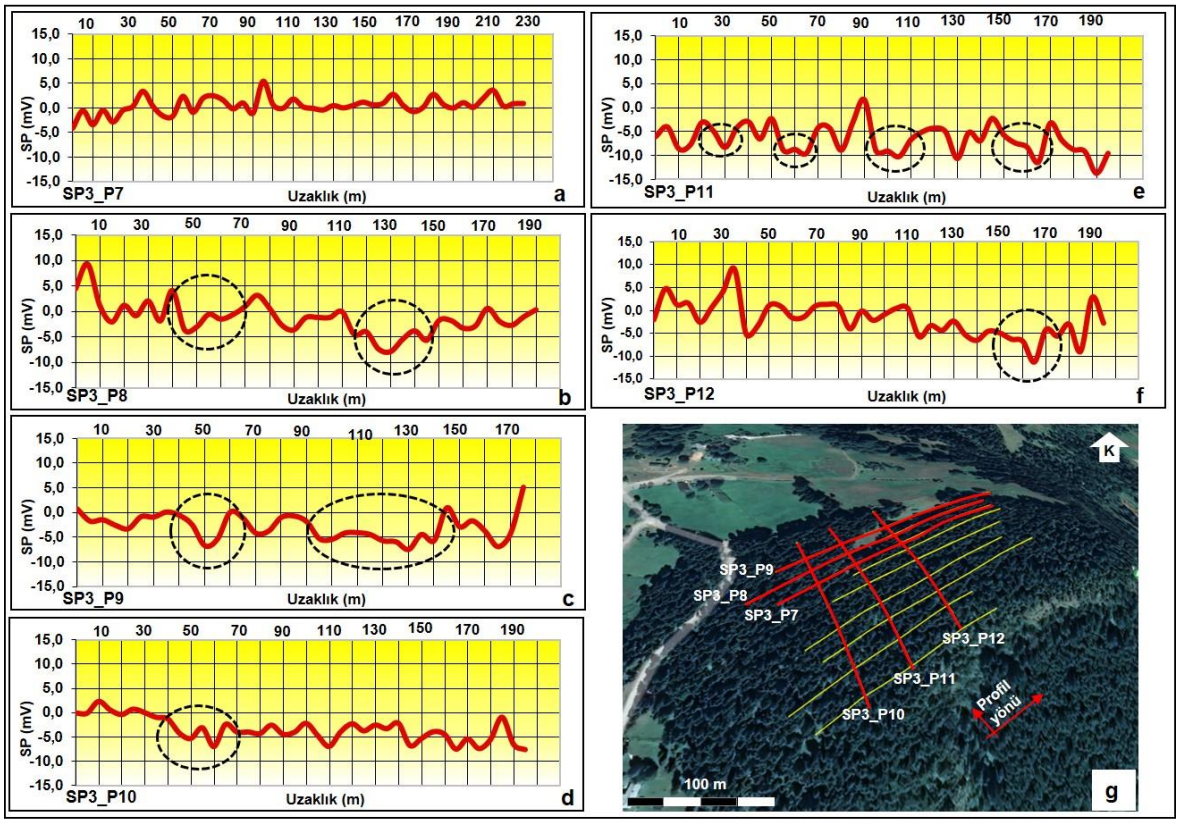
Şekil 3.34a'daki KD-GB yönlü SP3_P1 grafiği incelendiğinde uzaklık ekseninin 20-45 m ve 115-145 m'leri arasında potansiyel fark değerlerinde negatif yönde bir düşüşün

olduğu dikkat çekmektedir. Bu düşüşün olduğu bölgelerin; aynı yönlü SP3_P2 grafiğinde (Şekil 3.34b) uzaklık ekseninde 85-110 m aralığına, SP3_P3 grafiğinde (Şekil 3.34c) uzaklık ekseninin 10-50 m ve 70-90 m'leri aralıklarına, SP3_P5 (Şekil 3.34e) grafiğinde uzaklık ekseninin 70-110 m'leri arasına ve SP3_P6 grafiğinde (Şekil 3.34f) ise eksen uzaklığının 5-25 m aralığına, SP3_P8 grafiğinde (Şekil 3.35b) uzaklık ekseninin 40-70 m ve 110-150 m'leri aralıklarına, SP3_P9 grafiğinde (Şekil 3.35c) uzaklık ekseninin 40-60 m ve 90-145 m'leri arasına karşılık geldiği görülmektedir. Benzer doğal potansiyel fark değerlerindeki negatif yöndeki düşüşün, KB-GD yönlü Şekil 3.35d'deki SP3_P10 grafiğinde uzaklık ekseninin 35-70 m ve 110-135 m aralıklarına, SP3_P11 grafiğinde (Şekil 3.35e) ise uzaklık ekseninin 20-35 m, 50-70 m, 90-115 m, 145-170 m aralıklarına, SP3_P12 grafiğinin (Şekil 3.35f) uzaklık ekseninin 150-175 m aralığına denk geldiği belirlenmiştir. Literatürde yapılan çalışmalar (Wanfang vd., 1999; Robert, 2011, Nordiana vd., 2018) incelendiğinde su akışının olduğu bölgelerdeki doğal potansiyel fark değerlerinin, negatif yönde düşüş gösterdiği bilinmektedir. Dolayısıyla bu grafikler üzerindeki düşük doğal potansiyel fark değeri içeren bu bölgelerin, su içeren bölgeleri işaret ettiği düşünülmektedir.

Şekil 3.30'daki *ERT* kesitleri ile Şekil 3.34'teki *SP* grafiklerinin kesiştiği yerler karşılaştırıldığında; Şekil 3.30b' deki ERT3_P2 kesitinin uzaklık eksenindeki 75-90 m'leri arasındaki yaklaşık 161 ohm.m özdirencine sahip bölgenin, Şekil 3.34b'deki SP3_P2 grafiğindeki uzaklık ekseninin 85-110 m'leri arasındaki negatif yönde düşüş gösteren kısma denk geldiği, ERT3_P4 kesitindeki (Şekil 3.30c) uzaklık eksenin 205 m'si altında kalan yaklaşık 10 m derinliğindeki yüksek özdirençli (5839 ohm.m) bölgenin, SP3_P3 grafiğinin (Şekil 3.34c) 90-95 m'leri arasındaki pozitif yönde artış gösteren bölgeyi gösterdiği, aynı kesitin 185-200 m arasında kalan yaklaşık 513 ohm.m'lik özdirence sahip bölgenin ise SP3_P3 grafiğinin uzaklık ekseninin 70-90 m'leri arasında doğal potansiyel değerinin negatif yönde azalım gösterdiği bölgeye denk geldiği düşünülmektedir. Şekil 3.30e'de gösterilen ERT3_P5 kesitindeki uzaklık ekseninin 210-235 m'leri arasında, yüzeyin hemen altında bulunan 101 ohm.m'lik özdirençli bölgenin, SP3_P5 grafiğinin uzaklık ekseninin 70-95 m'leri arasında negatif yönde düşüş gösteren kısma karşılık geldiği değerlendirilmiştir. Ayrıca, Şekil 3.30f'deki ERT3_P6 kesitinin 160-175 m'leri altında kalan yaklaşık 5 m derinliğindeki düşük özdirençli bölgenin SP3_P6 (Şekil 3.34f) grafiğinin 5-20 m'leri arasında negatif yönde düşüş gösteren doğal potansiyel değerlerini ifade ettiği düşünülmektedir.



Şekil 3.34. Çalışma Alanı 3'ten elde edilen *SP* (SP3_P1-SP3_P6) grafikleri. a) SP3_P1, b) SP3_P2, c) SP3_P3, d) SP3_P4, e) SP3_P5, f) SP3_P6 grafikleri, g) SP3_P1-SP3_P6 kesitlerinin elde edildiği profiller (kırmızı çizgiler)

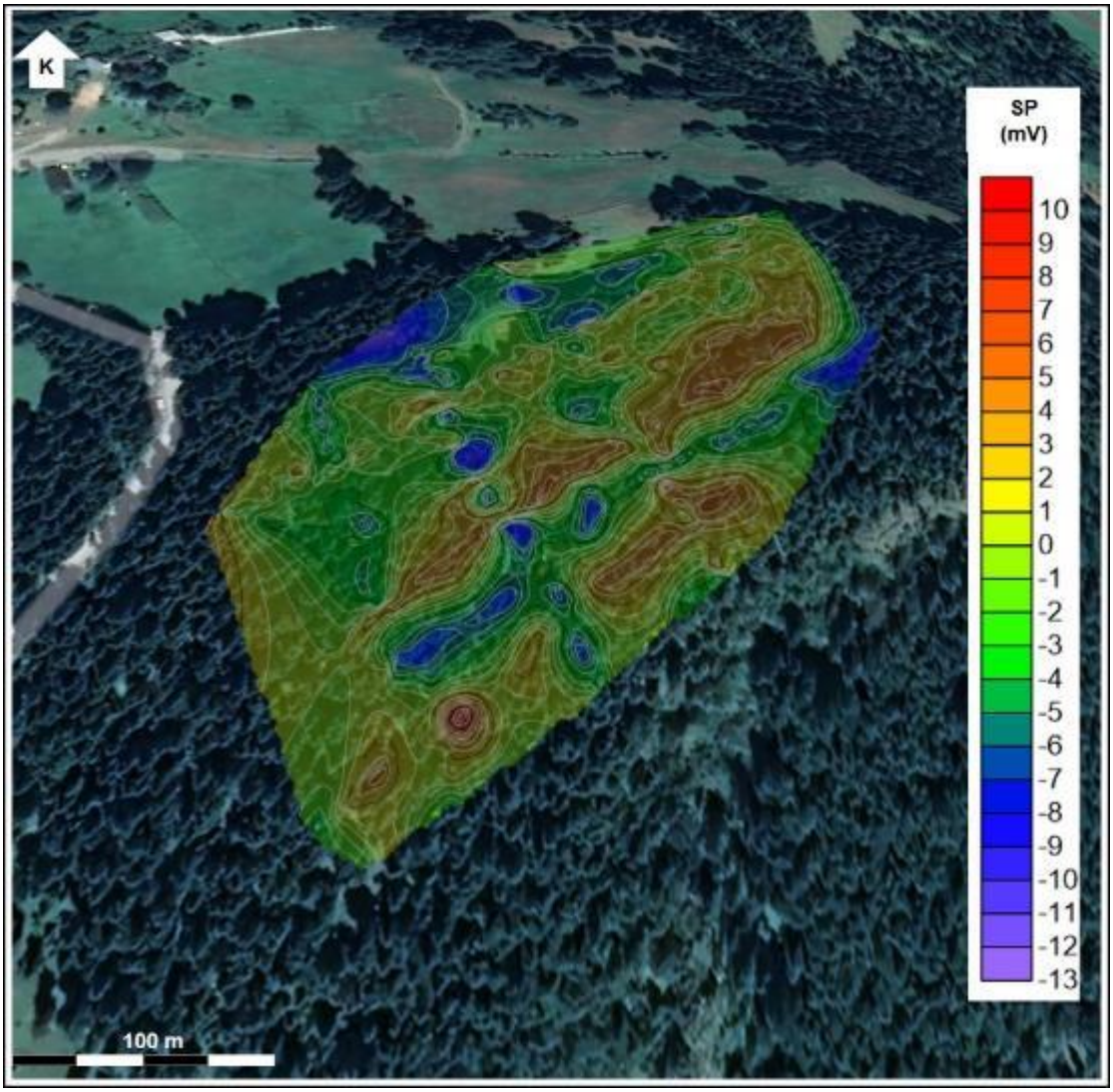


Şekil 3.35. Çalışma Alanı 3'ten elde edilen *SP* (SP3_P7-SP3_P12) grafikleri. a) SP3_P7, b) SP3_P8, c) SP3_P9, d) SP3_P10, e) SP3_P11, f) SP3_P12 grafikleri, g) SP3_P7-SP3_P12 kesitlerinin elde edildiği profiller (kırmızı çizgiler)

Şekil 3.31'deki *ERT* kesitleri ile Şekil 3.35'teki *SP* grafikleri karşılaştırıldığında; Şekil 3.31a' daki ERT3_P7 kesitinin uzaklık eksenindeki 180-210 m'leri arasındaki 5839 ohm.m özdirencine sahip bölgenin, Şekil 3.35a'daki SP3_P7 grafiğindeki uzaklık ekseninin 90-110 m'leri arasında bulunan, doğal potansiyel fark değerinin pozitif yönde artış gösterdiği bölgeye denk geldiği düşünülmektedir. ERT3_P8 kesitindeki (Şekil 3.31b) uzaklık eksenin 190-225 m'leri aralığında, yüzeyin hemen altında kalan düşük özdirençli bölgenin, SP3_P8 grafiğinin (Şekil 3.35b) 120-145 m'leri arasındaki negatif yönde artış gösteren bölgeyi gösterdiği belirlenmiştir. Şekil 3.35c'deki SP3_P9 grafiğindeki uzaklık ekseninin 90-150 m'leri arasında kalan, doğal potansiyel değerin azaldığı bölgenin ERT3_P9 kesitindeki uzaklık ekseninin 170-245 m'leri arasında yüzeyin hemen altında kalan düşük özdirençli (101 ohm.m) bölgeyi temsil ettiği düşünülmektedir. Şekil 3.31e' de gösterilen ERT3_P11 kesitinin 95-120 m uzaklık ekseni aralığına denk gelen 73 ohm.m'lik özdirençli bölgenin, Şekil 3.35e'de sunulan SP3_P11 grafiğinde uzaklık ekseninin 90-110 m'leri arasında negatif yönde düşüş gösteren kısma karşılık geldiği şeklinde değerlendirilmiştir. Ayrıca, Şekil 3.31f'deki ERT3_P12 kesitinin 30-40 m'leri altında kalan yaklaşık 5 m derinliğindeki 5339

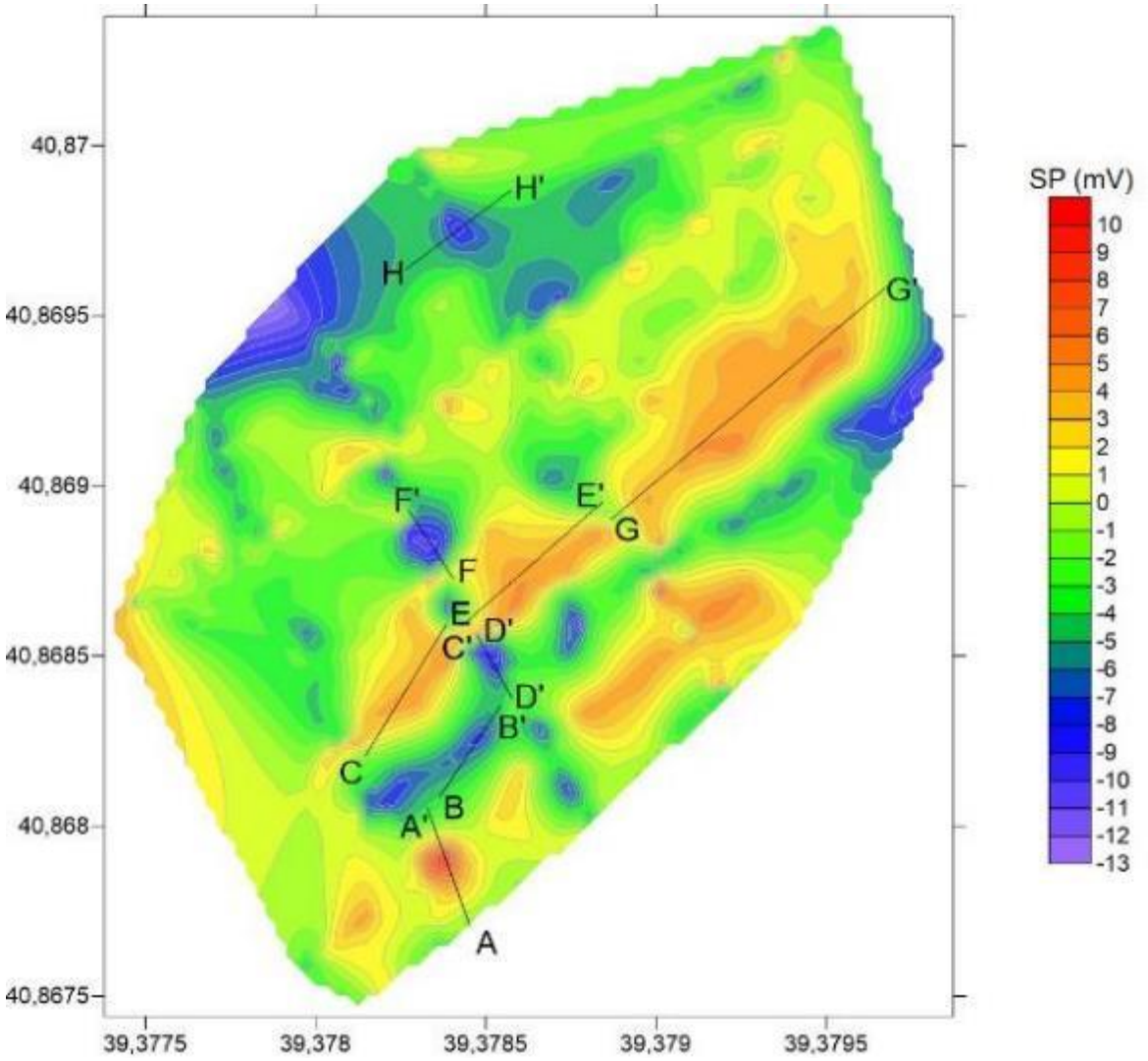
ohm.m özdirençli bölgenin SP3_P11 (Şekil 3.35f) grafiğinin 15-35 m'leri arasında pozitif yönde artış gösteren doğal potansiyel değerlerine sahip bölgeyi ifade ettiği, aynı ERT kesitinin 160 m'lerine denk gelen, yüzeyin hemen altındaki düşük özdirençli bölgenin ise SP3_P11 grafiğinin uzaklık ekseninin150-170 m'leri aralığında negatif yönde düşüş gösteren kısma denk geldiği düşünülmektedir.

Şekil 3.34 ve Şekil 3.35'deki Çalışma Alanı 3'deki tüm *SP* grafiklerinden Şekil 3.36'daki *SP* haritası oluşturulmuştur. Bu harita incelendiğinde, *SP* değerlerinin (-6 mV ile -13 mV arasında) düşük (mavi renkle temsil edilen) olduğu alanlarda kapanımlar şeklinde değişimler sergilendiği gözlenmektedir. Bu kısımlar, inceleme alanındaki yer altı su akış hareketliliğinin göstergesi olabilir. Aynı haritada nispeten yüksek *SP* değerleri (kırmızı renkle temsil edilen) etrafında oluşan kapanımlar ilginç görünümdedir. Bu kapanımların çalışma alanı içerisindeki küçük boyutlu mağaralara (bkz. Sarıbudak, 2015, Şekil 9, 11, 12) karşılık geldiği düşünülmektedir. Ayrıca, *SP* haritasında görülen bu yüksek değerler, *ERT* kesitlerinin bazı kısımlarında olası boşluk olarak tanımlanan yüksek özdirenç değerlerine karşılık gelmektedir.



Şekil 3.36. Çalışma Alanı 3'ten elde edilen SP haritası

Şekil 3.36'daki *SP* haritasından, özellikle üzerinden *ERT* kesitlerinin geçtiği kapanım gösteren bölgelerden Şekil 3.37'deki kesitler alınarak, bu kesitlerden *SP* anomalileri elde edilmiştir (Şekil 3.38). Belirlenen bu anomaliler, Nomogram yöntemi ile değerlendirilerek; anomalilerin h ve θ değerleri hesaplanmıştır.

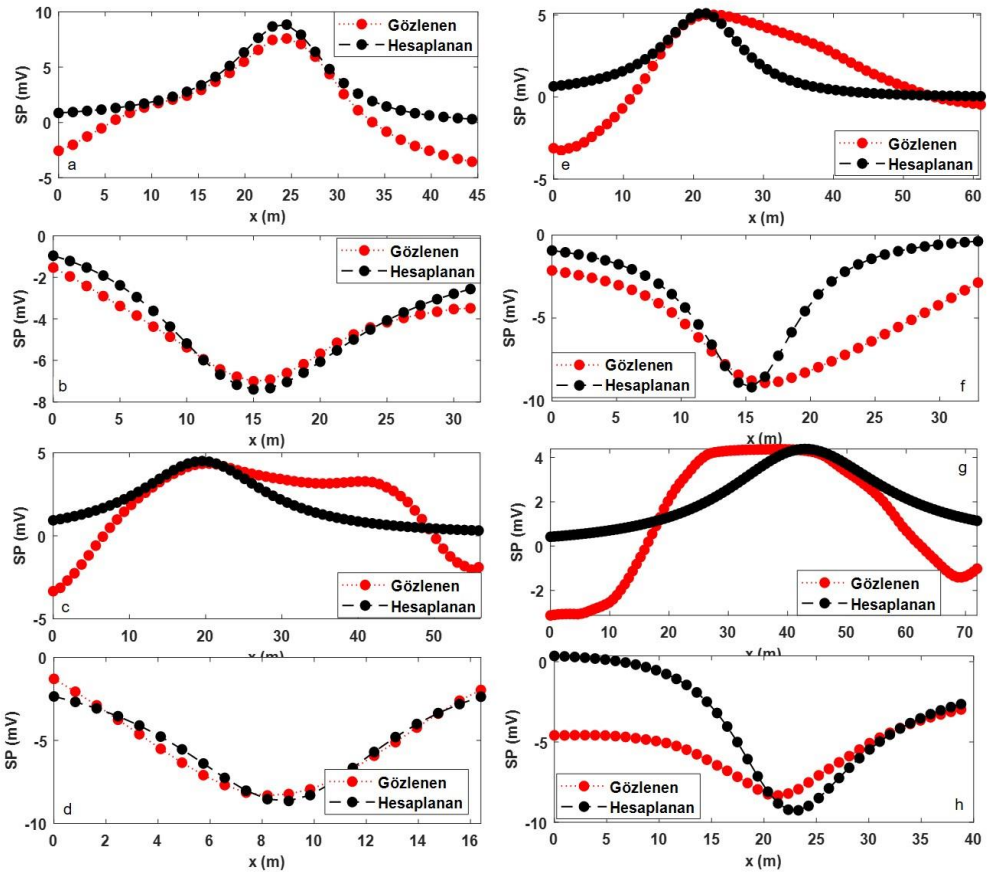


Şekil 3.37. Çalışma Alanı 3'deki *SP* haritasından alınan kesitler

Tablo 3.2. Çalışma Alanı3, Nomogram diyagramı değerleri

Kesit	Vmin/Vmax	θ	h
AA'	8.84	-80	11
BB'	-4.488	-60	7
CC'	0.74	-85	7
DD'	6.69	-40	4.5
EE'	0.6	-83	7
FF'	-4.29	-60	6
GG'	-0.71	-85	16
HH'	-2.96	65	8

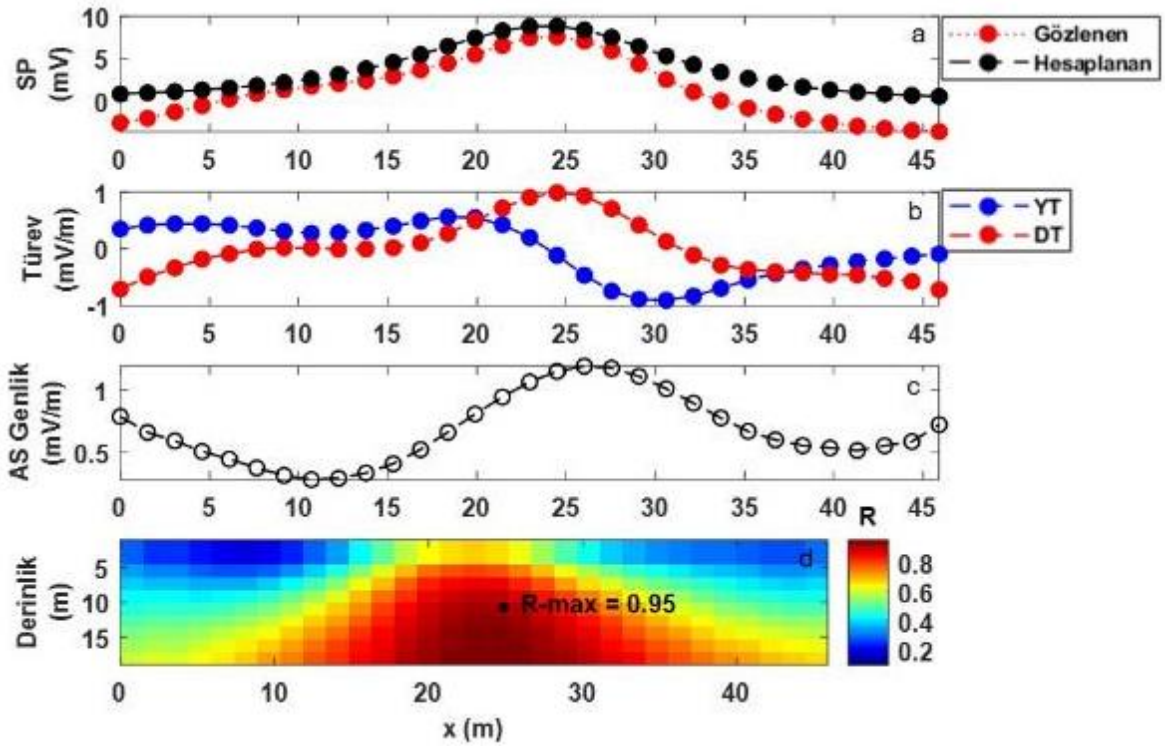
Şekil 3.37'deki Çalışma Alanı 3'ün *SP* haritasından elde edilen AA', BB', CC', DD', EE', FF', GG' ve HH' kesitleri boyunca elde edilen *SP* anomalileri Şekil 3.38a'da gösterilmektedir. Bu anomaliler dikkate alınarak; Tablo 3.2' deki |Vmin|/Vmax değerleri nomogram'da işaretlenerek θ ve h (Tablo 3.2) hesaplanmıştır. Nomogramdan elde edilen parametreler; küre ve silindir için yazılan V(x,0,0) bağıntısında yerine yazılarak yapılan hesaplamalar sonunda elde edilen model anomalileri Şekil 3.38a-h'da görülmektedir. Gözlemlenen (kırmızı kesikli çizgi) ile hesaplanan anomalinin (siyah kesikli çizgi) iyi uyum sağladığı görülmektedir (Şekil 3.38).



Şekil 3.38. Çalışma Alanı 3'e ait *SP* haritasında belirtilen kesitlerden elde edilen, gözlenen *SP* anomalisi ve hesaplanan model anomali eğrisi. a) AA', b) BB', c) CC', d) DD', e) EE', f) FF', g) GG', h) HH' kesitleri boyunca gözlenen *SP* anomalileri ve hesaplanan model anomalileri

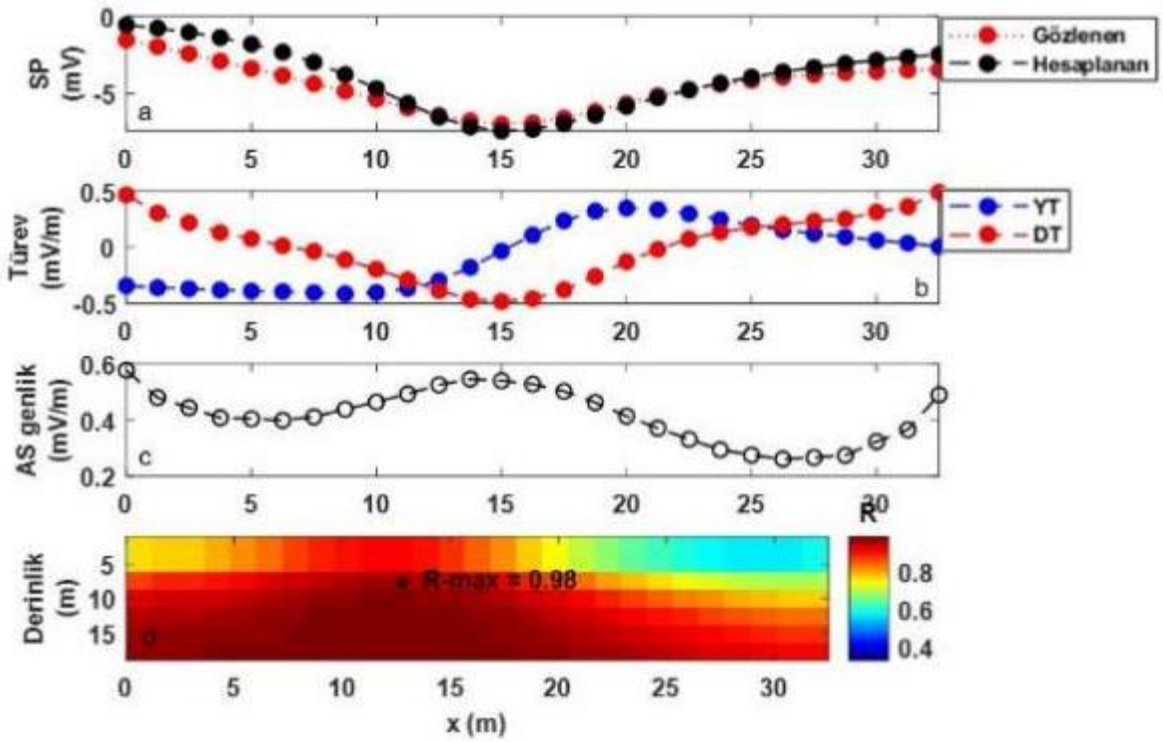
Nomogram yöntemi ile elde edilen değerlendirmeler sonucunda elde edilen parametreler; gerçek arazi verilerine uygulanacak R-max yaklaşımında (Mehanee, 2023) kullanılarak gözlemlenen veriye en yakın hesaplanan veriler oluşturulmuştur.

Çalışma Alanı 3'ten elde edilen *SP* haritasından alınan 44.37 m uzunluğundaki AA' kesiti anomalisindeki *SP* değerlerinin örnekleme aralığı 1.53 metredir (Şekil 3.39a). Şekil 3.39b-d, karşılık gelen türevleri, AS genliğini ve 0.95'lik bir R-max değeri ortaya koyan görüntülemeyi tasvir etmektedir. Yorumlamadan ortaya çıkan parametreler K=1200 mVm^{2q-1}, z_o= 11 m, θ= −80◦, x_o= 24.48 m ve q=1.5'dir (Şekil 3.39a-d). Gözlenen ve hesaplanan doğal potansiyel verileri Şekil 3.39a'da sunulmuştur.



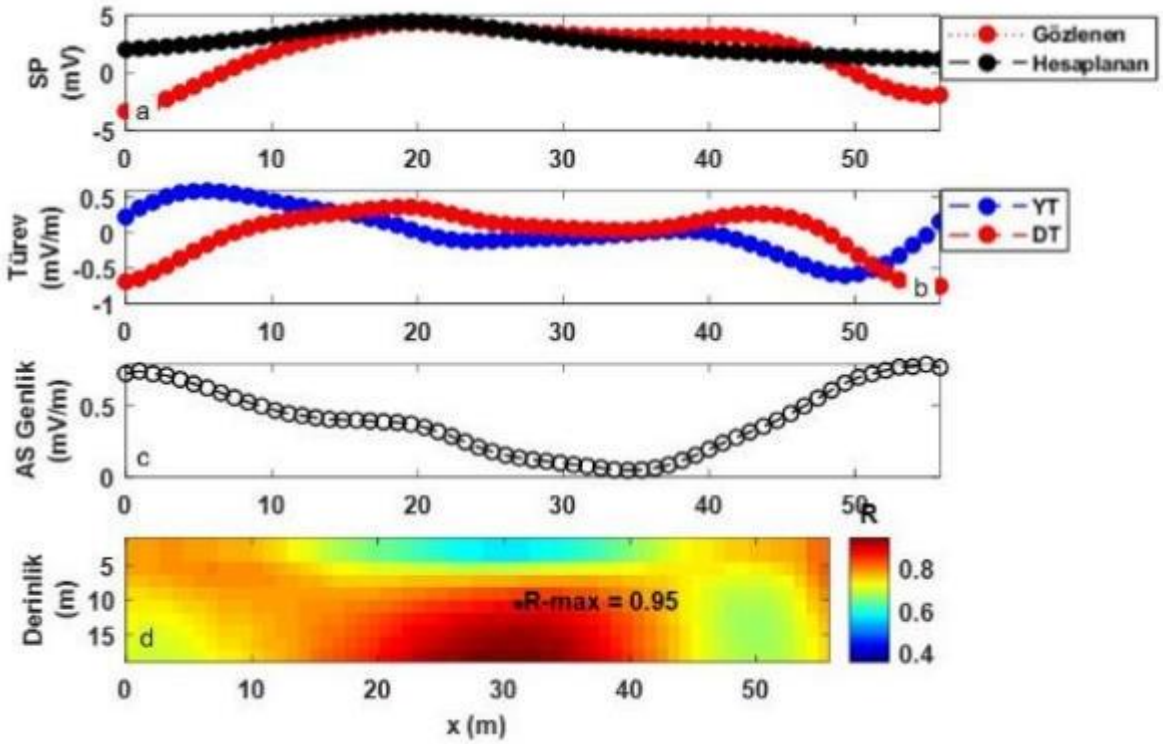
Şekil 3.39. a) AA' kesitinin gözlenen ve hesaplanan SP eğrileri, b) SP anomalisinin yatay ve düşey türevleri, c) Analitik sinyalin genliği, d) R-parametresinin görüntüsü

Şekil 3.37'de ki 31.25 m uzunluğundaki BB' kesiti anomalisindeki *SP* değerlerinin örnekleme aralığı 1.25 metredir (Şekil 3.40a). Şekil 3.40b-d, karşılık gelen türevleri, AS genliğini ve 0.98'lik bir R-max değeri ortaya koyan görüntülemeyi betimlemektedir. Yorumlamadan ortaya çıkan parametreler K=1200 mVm^{2q-1}, z_o= 7 m, θ= 70◦, x_o=13.75 m ve q=0.9'dur (Şekil 3.40a-d). Gözlenen ve hesaplanan doğal potansiyel verileri Şekil 3.40a'da görülmektedir. ERT3_P3 kesitinin (Şekil 3.30c) uzaklık ekseninin 135 m'sinin hemen altında kalan yaklaşık 228 ohm.m özdirence sahip bölgeye denk geldiği görülmektedir.



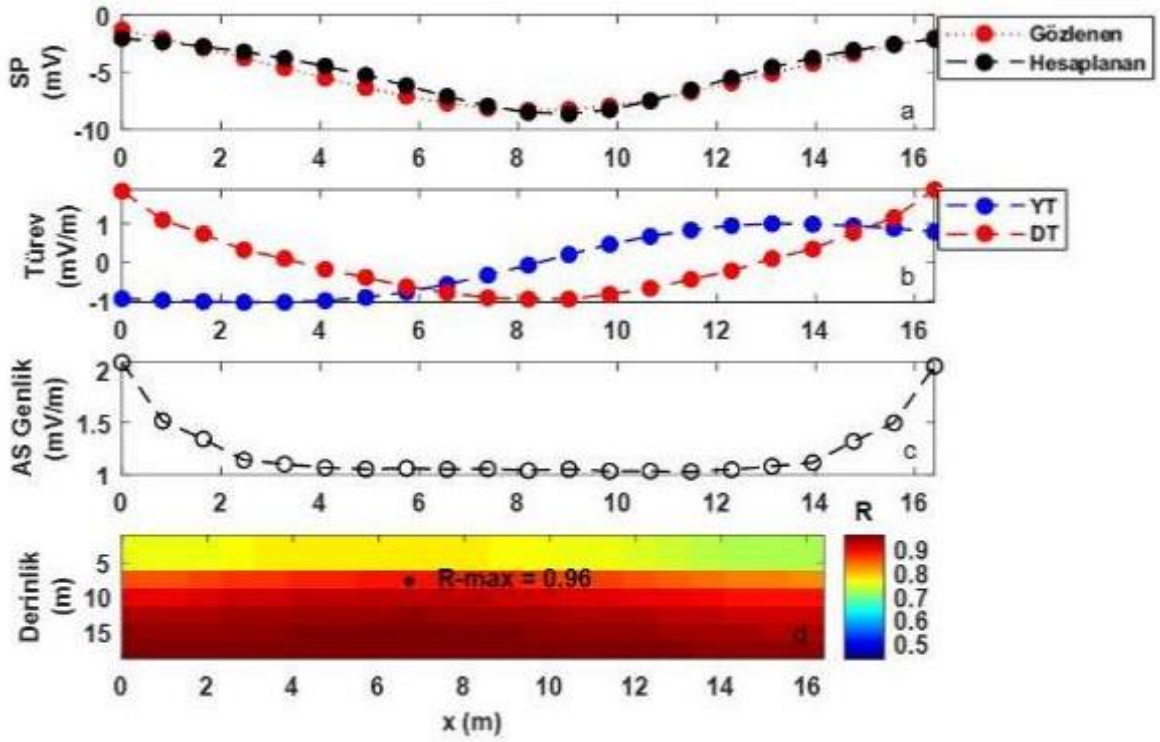
Şekil 3 40. a) BB' kesitinin gözlenen ve hesaplanan *SP* eğrileri, b) *SP* anomalisinin yatay ve düşey türevleri, c) Analitik sinyalin genliği, d) R-parametresinin görüntüsü

Çalışma Alanı 3'ten elde edilen *SP* haritasından alınan 55.8 m uzunluğundaki CC' kesiti anomalisindeki *SP* değerlerinin örnekleme aralığı 0.93 metredir (Şekil 3.41a). Şekil 3.41b-d, karşılık gelen türevleri, AS genliğini ve 0.95'lik bir R-max değeri ortaya koyan görüntülemeyi göstermektedir. R-yaklaşımından ortaya çıkan parametreler K=1200 mVm^{2q-1}, z_o= 10 m, θ= -90◦, x_o= 19.53 m ve q=0.5'dur (Şekil 3.41a-d). Gözlenen ve hesaplanan doğal potansiyel verileri Şekil 3.41a'da gözlenmektedir. ERT3_P4 kesitinin (Şekil 3.30d) uzaklık ekseninin 140 m'sinin hemen altında kalan yaklaşık 2595 ohm.m özdirence sahip bölgeye denk geldiği görülmektedir.



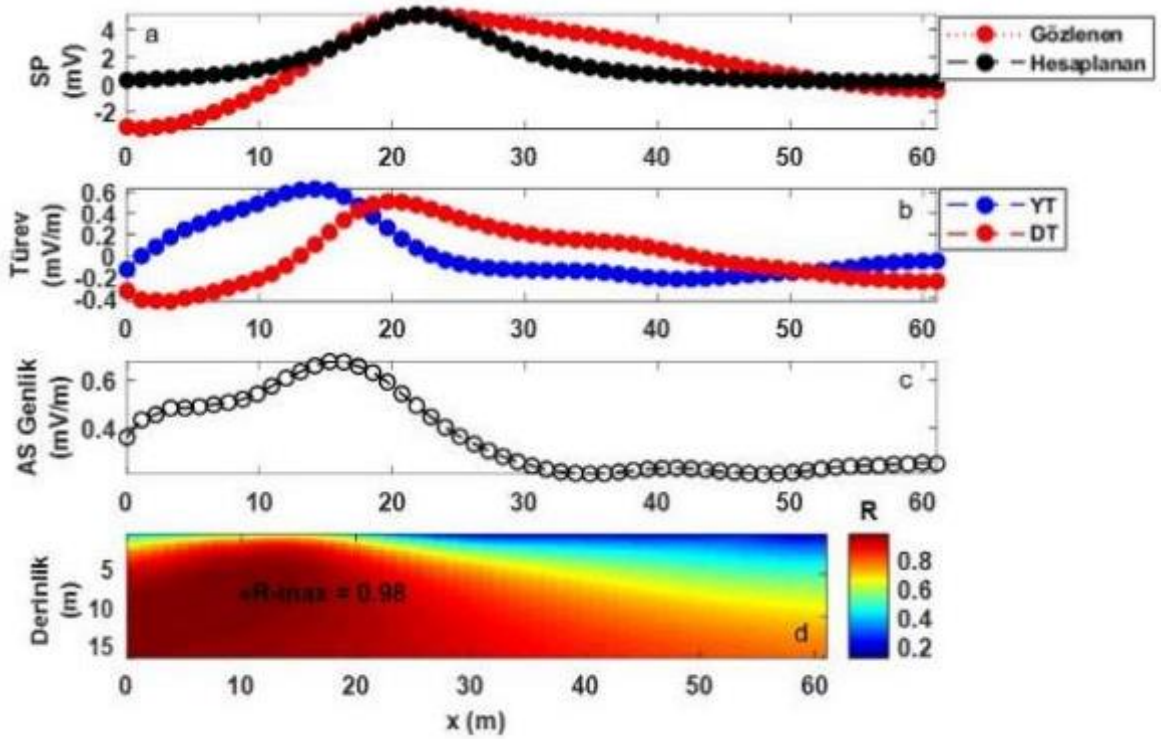
Şekil 3.41. a) CC' kesitinin gözlenen ve hesaplanan SP eğrileri, b) SP anomalisinin yatay ve düşey türevleri, c) Analitik sinyalin genliği, d) R-parametresinin görüntüsü

Şekil 3.37'deki Çalışma alanı 3'ten elde edilen *SP* haritasındaki 16.4 m uzunluğundaki DD' kesiti anomalisindeki *SP* değerlerinin örnekleme aralığı 0.82 metredir (Şekil 3.42a). Şekil 3.42b-d, karşılık gelen türevleri, AS genliğini ve 0.96'lik bir R-max değeri ortaya koyan görüntülemeyi sunmaktadır. Yorumlamadan ortaya çıkan parametreler K=1300 mVm^{2q-1}, z_o= 5 m, θ= -85◦, x_o= 9.02 m ve q=1.1'dur (Şekil 3.42a-d). Gözlenen ve hesaplanan doğal potansiyel verileri Şekil 3.42a'da sunulmuştur. ERT3_P11 (Şekil 3.31e) kesitinin uzaklık ekseninin 65 m'sinin hemen altında kalan yaklaşık 1874 ohm.m özdirence sahip bölgeye denk geldiği görülmektedir.



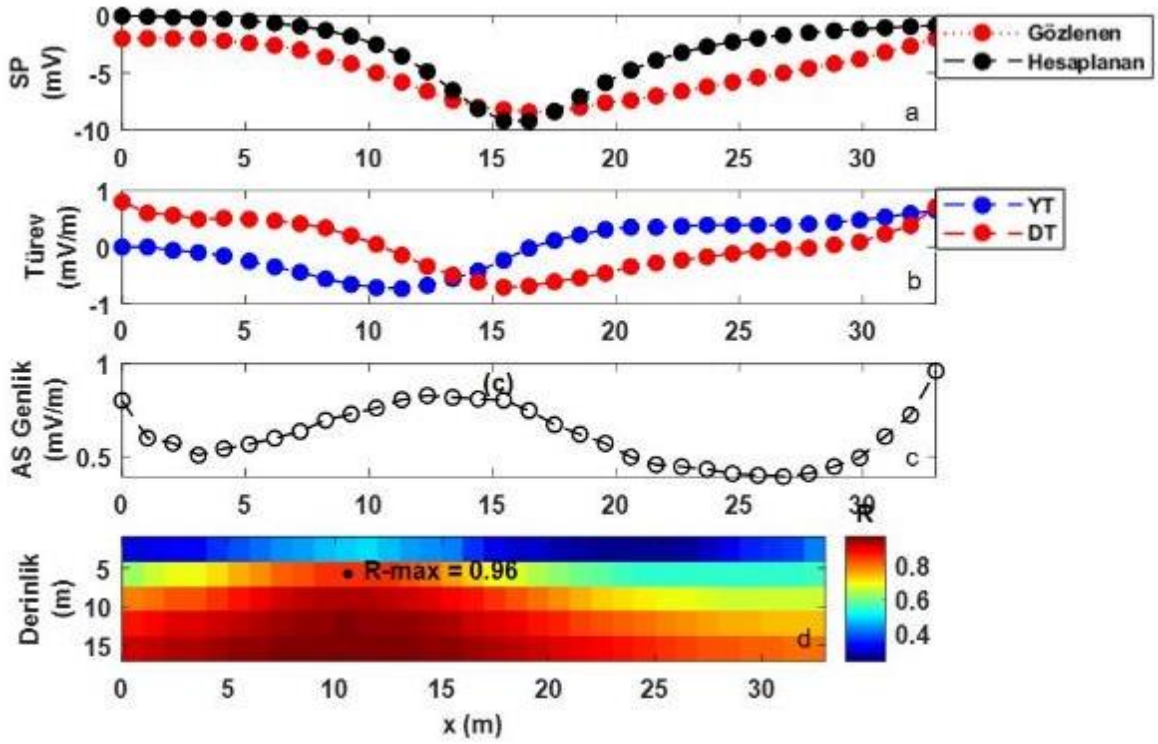
Şekil 3.42. a) DD' kesitinin gözlenen ve hesaplanan *SP* eğrileri, b) *SP* anomalisinin yatay ve düşey türevleri, c) Analitik sinyalin genliği, d) R-parametresinin görüntüsü.

Çalışma Alanı 3'ten elde edilen *SP* haritasında belirlenen 61.04 m uzunluğundaki EE' kesiti anomalisindeki *SP* değerlerinin örnekleme aralığı 1.09 metredir (Şekil 3.43a). Şekil 3.43b-d, karşılık gelen türevleri, AS genliğini ve 0.96'lik bir R-max değeri ortaya koyan görüntülemeyi tasvir etmektedir. Yorumlamadan ortaya çıkan parametreler K= 1300 mVm^{2q-1}, z_o= 8 m, θ= 85◦, x_o= 21.8 m ve q=1.2'dur (Şekil 3.43a-d). Gözlenen ve hesaplanan doğal potansiyel verileri Şekil 3.43a'da sunulmuştur. ERT3_P4 kesitinin (Şekil 3.30d) uzaklık ekseninin 200 m'sinin hemen altında kalan yaklaşık 2595 ohm.m özdirence sahip bölgeye denk geldiği görülmektedir.



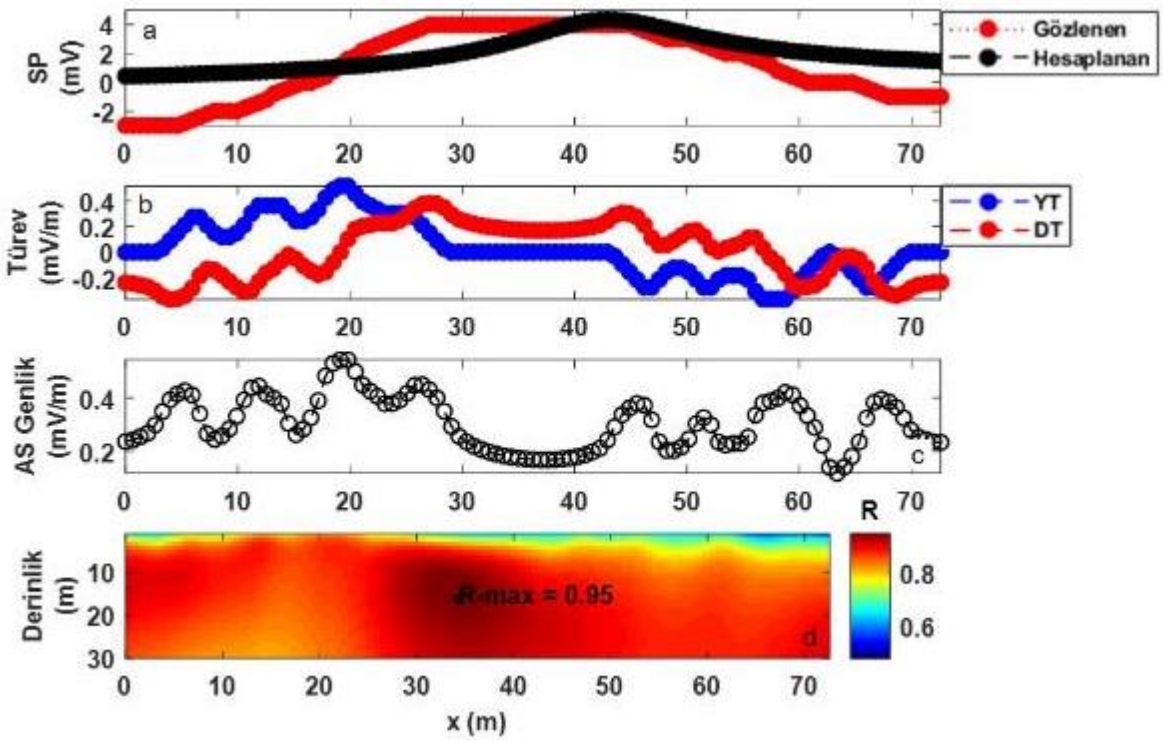
Şekil 3.43. a) EE' kesitinin gözlenen ve hesaplanan *SP* eğrileri, b) *SP* anomalisinin yatay ve düşey türevleri, c) Analitik sinyalin genliği, d) R-parametresinin görüntüsü.

Şekil 3.37'de ki *SP* haritasından alınan 32.96 m uzunluğundaki FF' kesiti anomalisindeki *SP* değerlerinin örnekleme aralığı 1.03 metredir (Şekil 3.44a). Şekil 3.44b-d, karşılık gelen türevleri, AS genliğini ve 0.96'lik bir R-max değeri ortaya koyan görüntülemeyi tasvir etmektedir. Yorumlamadan ortaya çıkan parametreler K= 1220 mVm^{2q-1}, z_o= 6 m, θ= 75◦, x_o= 15.45 m ve q=1.1'dur (Şekil 3.44a-d). Gözlenen ve hesaplanan doğal potansiyel verileri Şekil 3.44a'da sunulmuştur. ERT3_P11 kesitinin (Şekil 3.31e) uzaklık ekseninin 110 m'sinin hemen altında kalan yaklaşık 45 ohm.m özdirence sahip bölgeye denk geldiği görülmektedir.



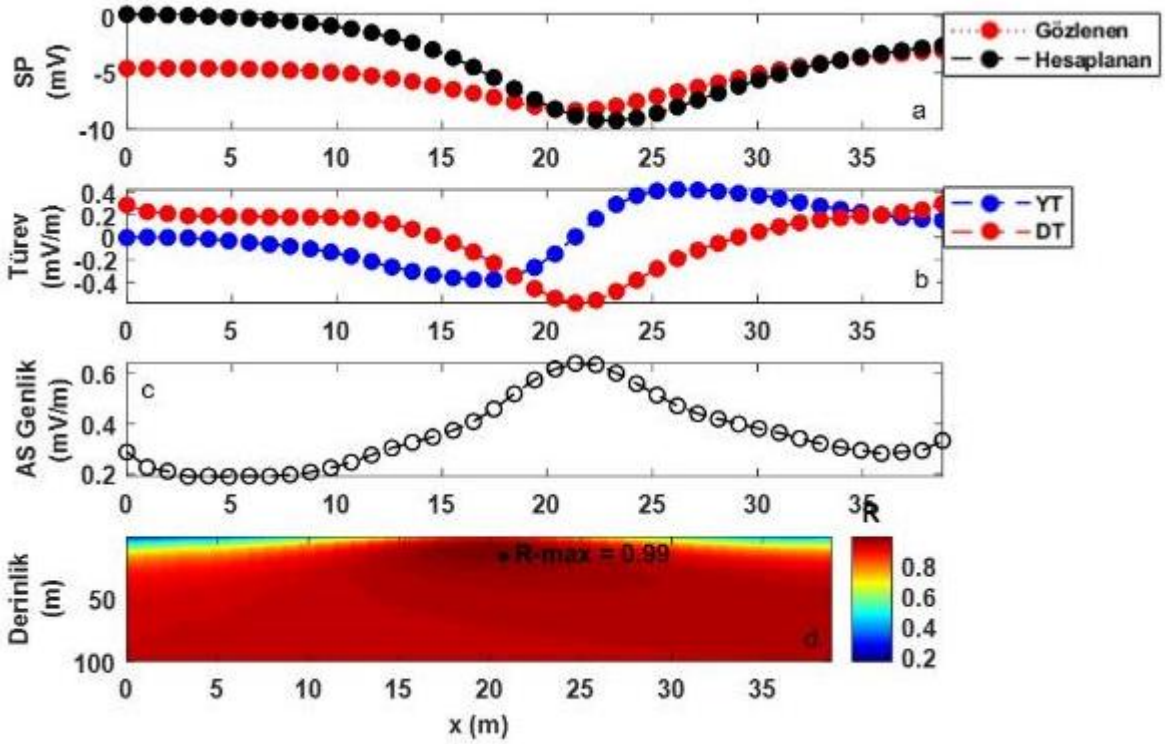
Şekil 3.44. a) FF' kesitinin gözlenen ve hesaplanan *SP* eğrileri, b) *SP* anomalisinin yatay ve düşey türevleri, c) Analitik sinyalin genliği, d) R-parametresinin görüntüsü

Şekil 3.37'de, 71.94 m uzunluğundaki GG' kesiti anomalisindeki *SP* değerlerinin örnekleme aralığı 0.66 metredir (Şekil 3.45a). Şekil 3.45b-d, karşılık gelen türevleri, AS genliğini ve 0.95'lik bir R-max değeri ortaya koyan görüntülemeyi göstermektedir. Yorumlamadan ortaya çıkan parametreler K=1300 mVm^{2q-1}, z_o =16 m, θ= 85◦, x_o= 42.24 m ve q=0.5'dir (Şekil 3.45a-d). Gözlenen ve hesaplanan doğal potansiyel verileri Şekil 3.45a'de sunulmuştur. ERT3_P4 kesitinin (Şekil 3.30d) uzaklık ekseninin 250 m'sinin hemen altında kalan yaklaşık 5839 ohm.m özdirence sahip bölgeye denk geldiği görülmektedir.



Şekil 3.45. a) GG' kesitinin gözlenen ve hesaplanan *SP* eğrileri, b) *SP* anomalisinin yatay ve düşey türevleri, c) Analitik sinyalin genliği, d) R-parametresinin görüntüsü.

Çalışma Alanı 3'ten elde edilen *SP* haritasında ki 38.80 m uzunluğundaki HH' kesiti anomalisindeki *SP* değerlerinin örnekleme aralığı 0.97 metredir (Şekil 3.46a). Şekil 3.46b-d, karşılık gelen türevleri, AS genliğini ve 0.99'luk bir R-max değeri ortaya koyan görüntülemeyi tasvir etmektedir. Yorumlamadan ortaya çıkan parametreler K= 1300 mVm^{2q-1}, z_o= 8 m, θ= 65◦, x_o= 21.34 m ve q=1.1'dur (Şekil 3.46a-d). Gözlenen ve hesaplanan doğal potansiyel verileri Şekil 3.46a'da sunulmuştur. ERT3_P9 kesitinin (Şekil 3.31c) uzaklık ekseninin 220 m'sinin hemen altında kalan yaklaşık 55.3 ohm.m özdirence sahip bölgeye denk geldiği görülmektedir.

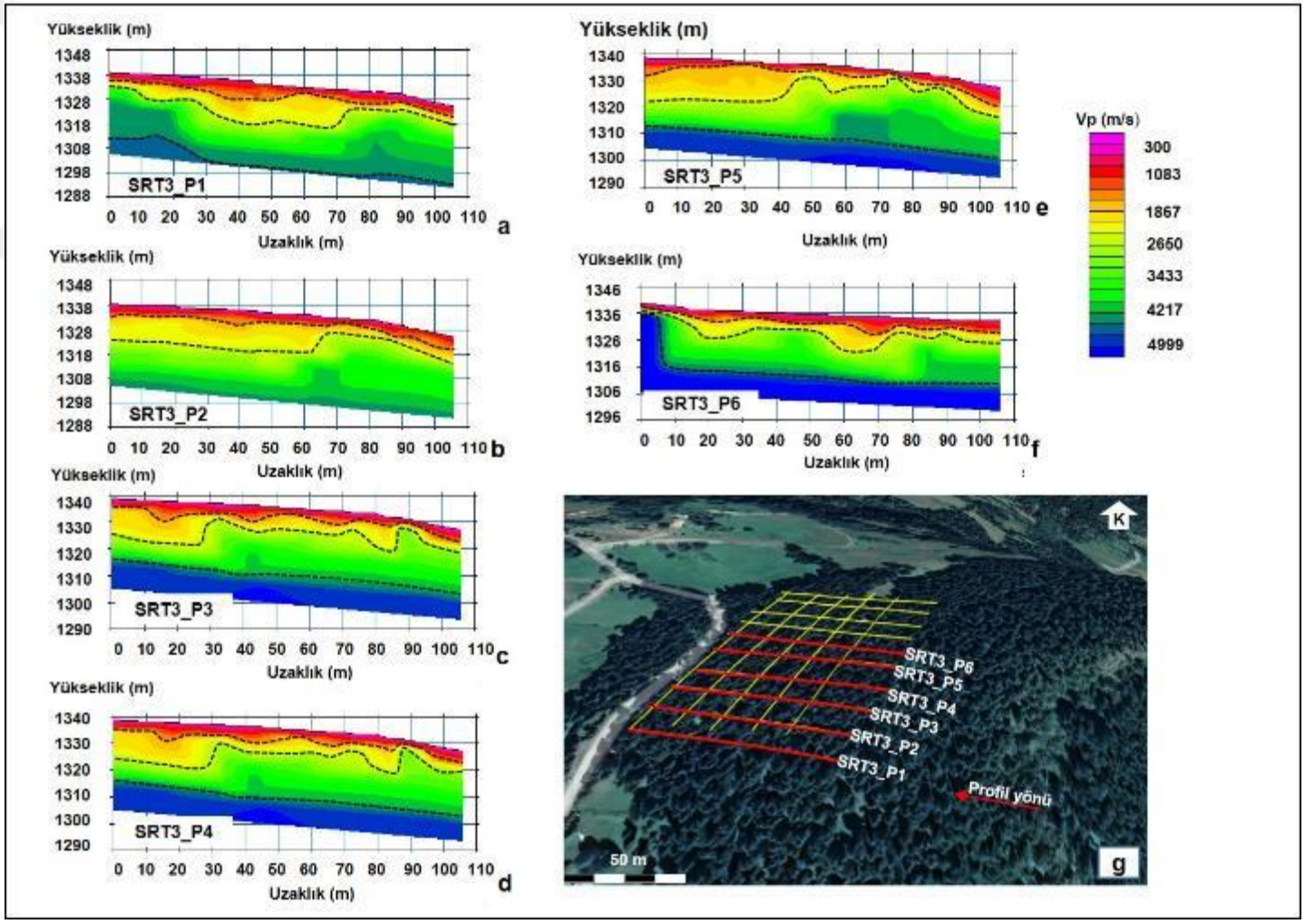


Şekil 3.46. a) HH' kesitinin gözlenen ve hesaplanan *SP* eğrileri, b) *SP* anomalisinin yatay ve düşey türevleri, c) Analitik sinyalin genliği, d) R-parametresinin görüntüsü

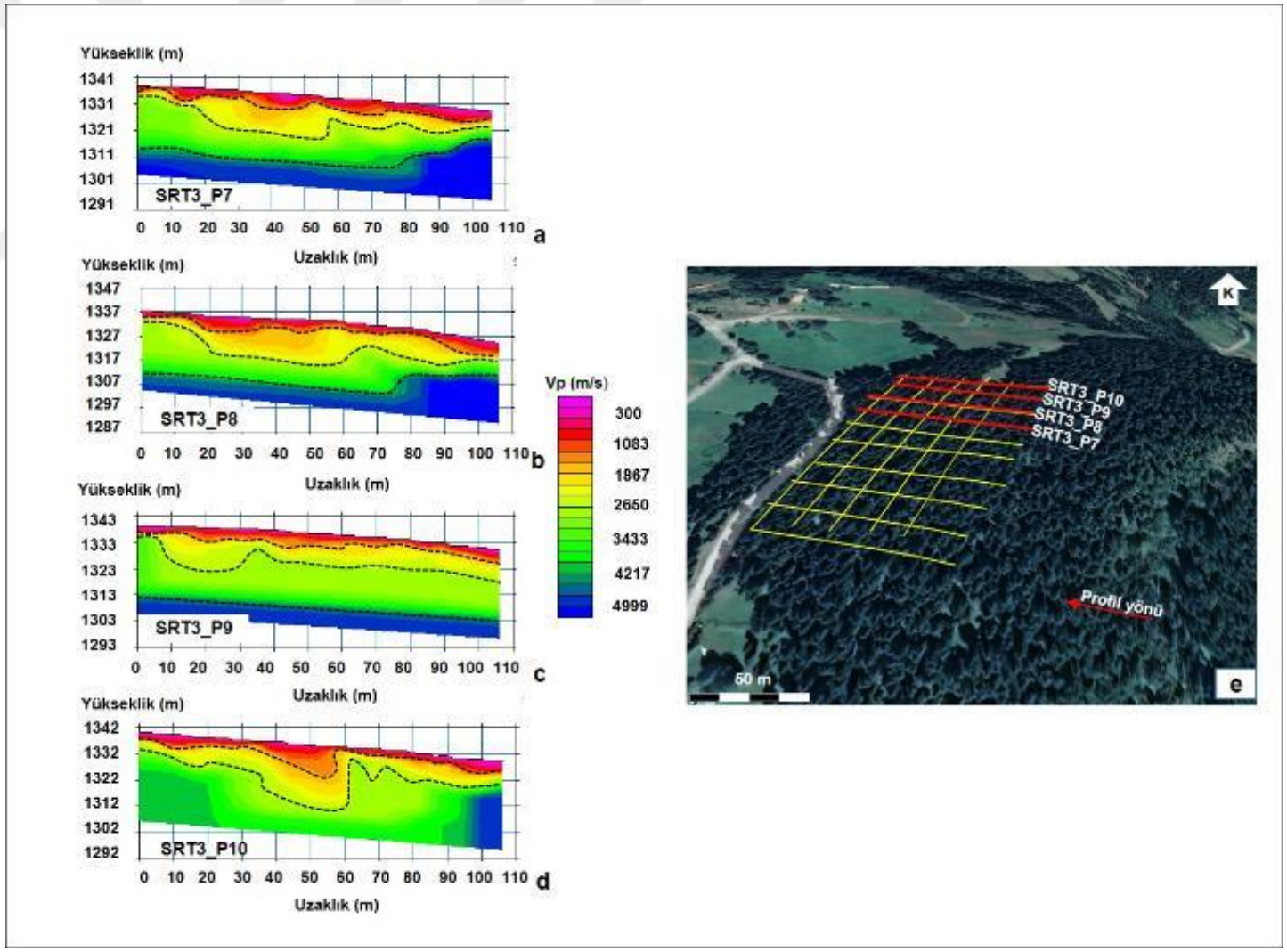
Şekil 3.47a-f ve Şekil 3.48a-d Vp hız kesitleri Çalışma Alanı 3'ten elde edilen KB-GD yönlü SRT3_P1-SRT3_P10 kesitlerini, Şekil 3.47g ise bu kesitlerin profillerini göstermektedir. Kesitlerden yaklaşık 30 m derinlik için hız bölgesi gösterilmekte olup, veriler değerlendirilirken ışın yolları çizdirildiğinde yalnızca 20 m kadar bilgi alınabildiği görülmüştür. SRT3_P1-SRT3_P6 (Şekil 3.47) ve SRT3_P7-SRT3_P10 (Şekil 3.48a-d) kesitleri incelendiğinde Vp hız aralıklarının dört farklı ortam sunduğu görülmektedir. İnceleme alanında kireçtaşları hakim olduğu için, literatürde yeralan çalışmalar incelendiğinde kireçtaşının Vp hız aralığının 2800-7000 m/sn (Lavergne, 1986) aralığında olduğu bilinmektedir. Tüm kesitler incelendiğinde ortalama 4 m derinlik seviyelerinde başlayan ve kesitlerin belli kısımlarında daha da derinleşen ortalama 820 m/sn sahip olan bir tabaka görülmektedir. İncelenen alan ormanlık bitki örtüsüne sahip olduğu için bu düşük Vp hız değerli ortamın örtü tabakasını temsil edebileceği şeklinde yorumlanmıştır. Bu tabakanın hemen altında Vp hız aralığı ortalama 2130 m/sn olan ikinci bir tabaka dikkat çekmektedir. Bu tabakanın kalınlığı kesitlerin farklı kısımlarında 2 ile 10 m arasında değişmektedir. Bu tabakanın altında yaklaşık 4-20 m kalınlık aralığında değişen ve ortalama Vp hızı 3200 m/sn ve kesitlerin en alt kısmında yaklaşık 4750 m/sn ye ulaşan oldukça masif bir ortama geçildiği

görülmektedir. Çalışılan alan kireçtaşlarından oluştuğu için bu tabakaların kireçtaşının ifade ettiği, derinlere doğru inildikçe hızlarındaki artan değişimin olması ise kireçtaşının daha çok masifleştiğini göstermektedir.

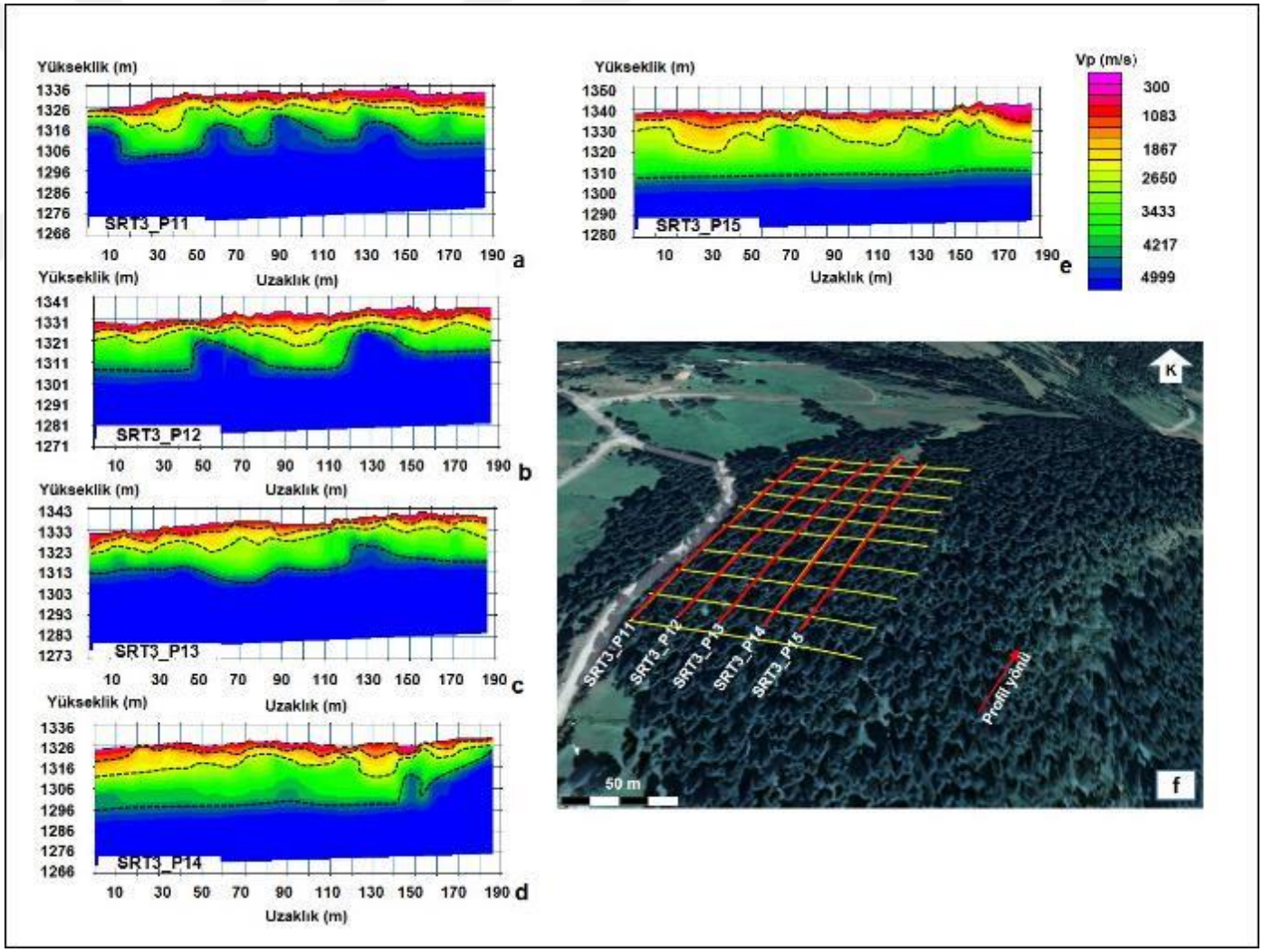
Çalışma Alanı 3'ten elde edilen KD-GB yönlü SRT3_P11-SRT3_P15 kesitleri Şekil 3.49a-e'de, bu kesitlerin profilleri ise Şekil 3.49g'de görülmektedir. Bu kesitler, incelenen ortamın Vp hız dağılımını göstermektedir. Kesitlerden yaklaşık 30 m derinlik bilgisine ulaşılabildiği görülmektedir. Ancak verilerin ışın yolları maksimum 20 m'ye kadar ulaşabildiği bilinmektedir. Bu kesitler Şekil 3.47 ve Şekil 3.48'deki profillere dik olacak şekilde elde edilmiştir. Şekil 3.47 ve Şekil 3.48'de yüzeyden itibaren yaklaşık 4 m kalınlıkta bulunan ve ortalama hız değeri 820 m/sn olan örtü tabakanın varlığı ve Vp hızları derine doğru sırasıyla 2130, 3200 ve 4750 m/sn olan tabakaların varlığı Şekil 3.49a-e'de bulunan SRT3_P11-SR3T_P12 kesitlerinde de görülmektedir.



Şekil 3.47. Çalışma Alanı 3'ten elde edilen *SRT* (SRT3_P1-SRT3_P6) kesitleri. a) SRT3_P1, b) SRT3_P2, c) SRT3_P3, d) SRT3_P4, e) SRT3_P5, f) SRT3_P6 kesitleri, g) SRT3_P1-SRT3_P6 kesitlerinin elde edildiği profiller (kırmızı çizgiler).

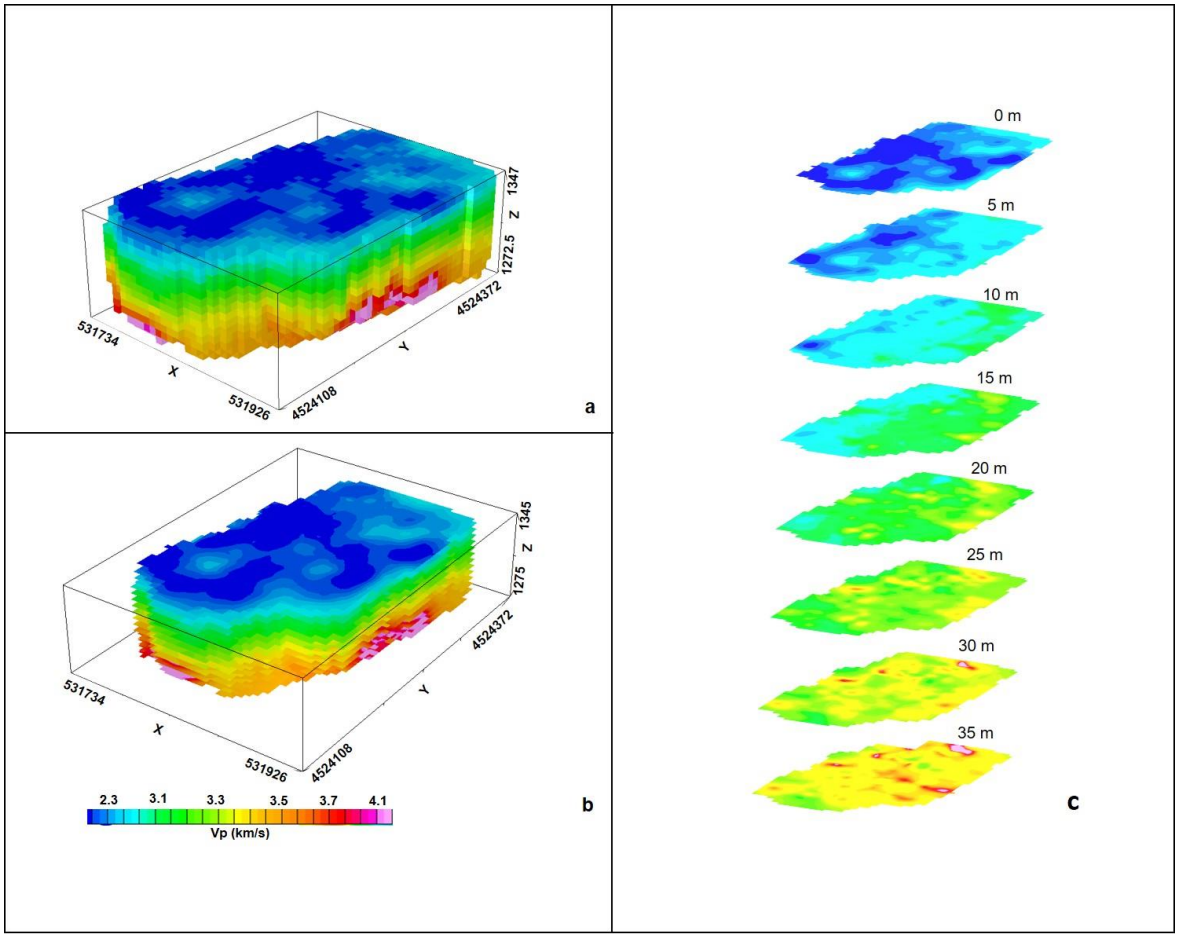


Şekil 3.48. Çalışma Alanı 3'ten elde edilen *SRT* (SRT3_P7-SRT3_P10) kesitleri. a) SRT3_P7, b) SRT3_P8, c) SRT1_P9, d) SRT3_P10, e) SRT3_P7-SRT3_P10 kesitlerinin elde edildiği profiller (kırmızı çizgiler).



Şekil 3.49. Çalışma Alanı 3'ten elde edilen *SRT* (SRT3_P11-SRT3_P15) kesitleri. a) SRT3_P11, b) SRT3_P12, c) SRT3_P13, d) SRT3_P14, e) SRT3_P15, f) SRT3_P11-SRT3_P15 kesitlerinin elde edildiği profiller (kırmızı çizgiler).

Şekil 3.50a; Çalışma Alanı 3'den elde edilen 3B'lu *SRT* yeraltı modeli, Şekil 3.50b; 3B'lu SRT görüntüsünün seviye haritalarının birlikte görünümü, Şekil 3.50c ise 3B'lu *SRT* görüntüsünün her 5 m de bir oluşturulan seviye haritalarını göstermektedir. Yüzeyden derine doğru gidildikçe dört farklı Vp hızı değerlerindeki değişim, farklı tabakaları temsil etmektedir. Çalışma Alanı 3'ten toplanan *SRT* verileri, Şekil 3.50'teki 3B'lu *ERT* yeraltı modelindeki, dolinin uzanımı olarak düşünülen bölgenin üzerinden elde edildiği için, Şekil 3.50c'de gösterilen 1345 m ve 1340 m yükseklik seviyelerindeki çok düşük Vp hız değerlerinin dolinin yayılımını gösterdiği düşünülmektedir.



Şekil 3.50. Çalışma Alanı 3, 3B'lu *SRT* görüntüleri ve seviye haritaları, A) Çalışma Alanı 3'ten elde edilen 3B'lu *SRT* görüntüsü, B) 3B'lu *SRT* görüntü seviye haritalarının bir aradaki görüntüsünü, C) 3B'lu *SRT* görüntüsünün her 5 m de bir görüntülenen seviye haritaları

Şekil 3.50-3.65'de Çalışma Alanı 3'teki *MASW* yönteminden elde edilen MASW3_P1-P15 verilerinden Vs kesitlerinin elde edilme aşamaları görülmektedir.

MASW3_P1 kesitinde üç tabakalı bir ortam görülmekte olup; ilk tabakanın ortalama hızı yaklaşık ortalama 430.5 m/s olup 7 m'ye kadar, ikinci tabakanın hızı 811.6 m/sn olup, 7 m'den 21 m'ye kadar, üçüncü tabakanın hızı ise 1236.2 m/s olup 21 m'den yaklaşık 35 m'ye kadar devam etmektedir. Burada belirlenen Vs30 hızı ise 729.8 m/s'dir.

Şekil 3.51'deki MASW3_P2 kesitinde de araştırılan ortamın üç tabakalı olduğu görülmektedir. Birinci tabakanın ortalama hızı yaklaşık ortalama 501.3 m/s olup 7 m'ye kadar, ikinci tabakanın hızı 735 m/sn olup 7 m'den 20 m'ye kadar, üçüncü tabakanın hızı ise 1044 m/s olup 21 m'den daha derinlere kadar inmektedir. Hesaplanan Ortalama Vs 30 hızı ise 742.6 m/s'dir.

Üç tabakalı bir yeraltı yapısını gösteren MASW3_P3 kesiti (Şekil 3.52) incelendiğinde, birinci tabakanın ortalama hızı yaklaşık ortalama 487.7 m/s olduğu görülmektedir. Bu tabakanın kalınlığı 9 m'dir. İkinci tabakanın hızı 855.2 m/sn ve kalınlığı 7-26 m arasında, üçüncü tabakanın hızı ise 1072 m/s olup 26 m'den daha derinlere kadar inmektedir. İnceleme alanının ortalama Vs 30 hızı ise 712.7 m/s'dir.

Şekil 3.54'deki MASW3_P4 kesitinden araştırılan ortamın hızlarının sırasıyla; 462, 846, 1139 m/s olduğu tespit edilmiştir. Tabakanın kalınlıklarının ise sırasıyla ortalama; 9, 7-19, 19-35 m arasında olduğu belirlenmiştir. Hesaplanan ortalama Vs30 hızı ise 729.8 m/s'dir.

Üç tabakalı ortam görülen MASW3_P5 kesitinde (Şekil 3.55) birinci tabakanın ortalama hızı yaklaşık ortalama 506 m/s olup 9 m'ye kadar, ikinci tabakanın hızı 894 m/sn olup, 7 m'den 26 m'ye kadar, üçüncü tabakanın hızı ise 1116.5 m/s olup 26 m'den daha derinlere kadar inmektedir. Bu yeraltı modelinin ortalama Vs 30 hızı ise 744.6 m/s'dir.

Şekil 3.56'daki MASW3_P6 kesitinde de araştırılan ortamın üç tabakalı olduğu görülmektedir. Birinci tabakanın ortalama hızı yaklaşık ortalama 494 m/s olup 9 m'ye kadar, ikinci tabakanın hızı 964 m/sn olup, 9 m'den 26 m'ye kadar, üçüncü tabakanın hızı ise 1229 m/s olup 19 m'den daha derinlere kadar inmektedir. Ortalama Vs 30 hızı ise 764.3 m/s'dir.

MASW3_P7 kesitinde (Şekil 3.57) de araştırılan ortamın üç tabakalı olduğu görülmektedir. Birinci tabakanın ortalama hızı yaklaşık ortalama 492 m/s olup 9 m'ye kadar, ikinci tabakanın hızı 920.5 m/sn olup,9 m'den 22 m'ye kadar, üçüncü tabakanın hızı ise 1069.3 m/s olup 26 m'den daha derinlere kadar inmektedir. Ortalama Vs30 hızı ise 752.9 m/s'dir.

Şekil 3.58'deki MASW3_P8 kesitinde görülen ilk tabakanın ortalama hızı yaklaşık ortalama 456.5 m/s, ikinci tabakanın hızı 955.6 m/sn, üçüncü tabakanın hızı ise 1298 m/s'dir. Tabaka kalınlıkları ise sırasıyla yaklaşık; 9, 9-26 ve 26-35 m'dir. Hesaplanan ortalama Vs30 hızı ise 739.7 m/s'dir.

Ortalama Vs30 hızı 744.6 m/s olarak tespit edilen MASW3_P9 kesitindeki (Şekil 3.59) birinci tabakanın ortalama hızı yaklaşık ortalama 496.25 m/s olup 9 m'ye kadar, ikinci tabakanın hızı 910.75 m/sn olup, 9 m'den 22 m'ye kadar, üçüncü tabakanın hızı ise 1108 m/s olup 22 m'den daha derinlere kadar ilerlediği tespit edilmiştir.

Şekil 3.60'daki MASW3_P10 kesitinde görülen üç tabakanın hızları sırasıyla; 505 m/s, 940 m/s ve 1167.5 m/s'dir. Ortalama Vs30 hızı 793.7 m/s olarak hesaplanmıştır. Birinci

tabaka 9 m'ye kadar, ikinci tabaka 9 m'den 22 m'ye kadar, üçüncü tabaka ise 22 m'den daha derinlere kadar inmektedir.

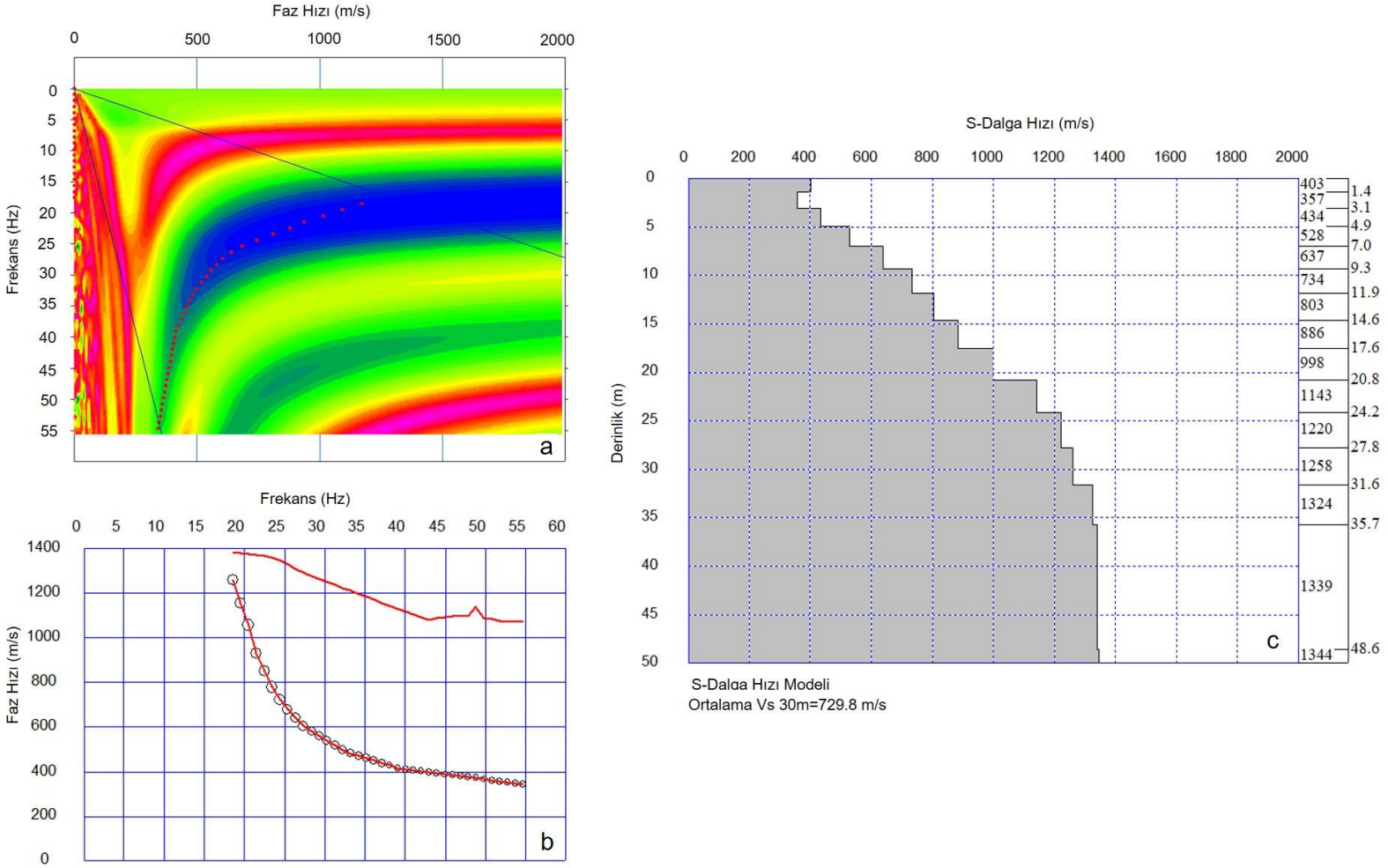
Ortalama Vs30 hızı 791.7 m/s olarak hesaplanan MASW3_P11 kesitinde (Şekil 3.61) birinci tabakanın ortalama hızı yaklaşık ortalama379.5 m/s olup 4 m'ye kadar, ikinci tabakanın hızı 802.6 m/sn olup, 4 m'den 15 m'ye kadar, üçüncü tabakanın hızı ise 1158.8 m/s olup 15 m'den daha derinlere kadar devam ettiği görülmektedir.

Şekil 3.62'daki MASW3_P12 kesitindeki tabakalardan birinci tabakanın ortalama hızı yaklaşık ortalama 421.5 m/s, ikinci tabakanın hızı 527.2 m/s, üçüncü tabakanın hızı ise 829.4 m/s olarak belirlenmiştir. Tabakaların kalınlıkları ise sırasıyla, 4 m'ye, 4 m'den 15 m'ye ve 15 m'den daha derinlere devam etmektedir. Araştırılan ortamın ortalama Vs30 hızı ise 630.7 m/s'dir.

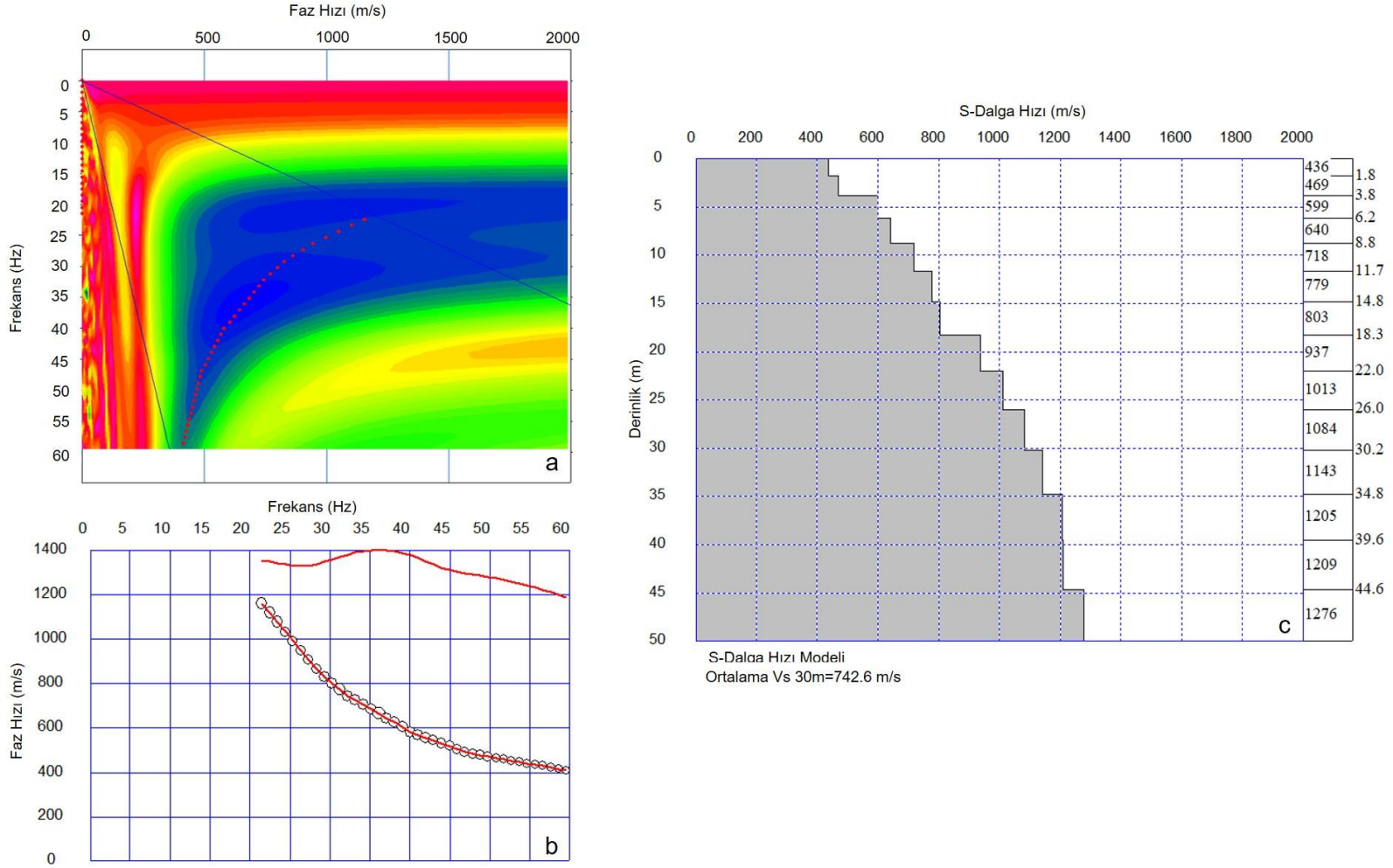
MASW3_P13 kesitinde (Şekil 3.63) araştırılan ortamdaki üç birinci tabakanın ortalama hızı yaklaşık ortalama 356.5 m/s olup 4 m'ye kadar, ikinci tabakanın hızı 662.25 m/sn olup, 4 m'den 15 m'ye kadar, üçüncü tabakanın hızı ise 1019.2 m/s olup 15 m'den daha derinlere kadar inmektedir. Hesaplanan ortalama Vs30 hızı ise 703.5 m/s'dir.

Şekil 3.64'daki MASW3_P14 kesitindeki birinci tabakanın ortalama hızı yaklaşık ortalama 388.5 m/s, ikinci tabakanın hızı 582 m/sn, üçüncü tabakanın hızı ise 900 m/s'dir. Tabakaların derinlikleri sırasıyla; 4 m'ye, 4 m'den 15 m'ye ve 15 m'den daha derinlere kadar inmektedir. Araştırılan ortamın ortalama Vs30 hızı ise 651.3 m/s'dir.

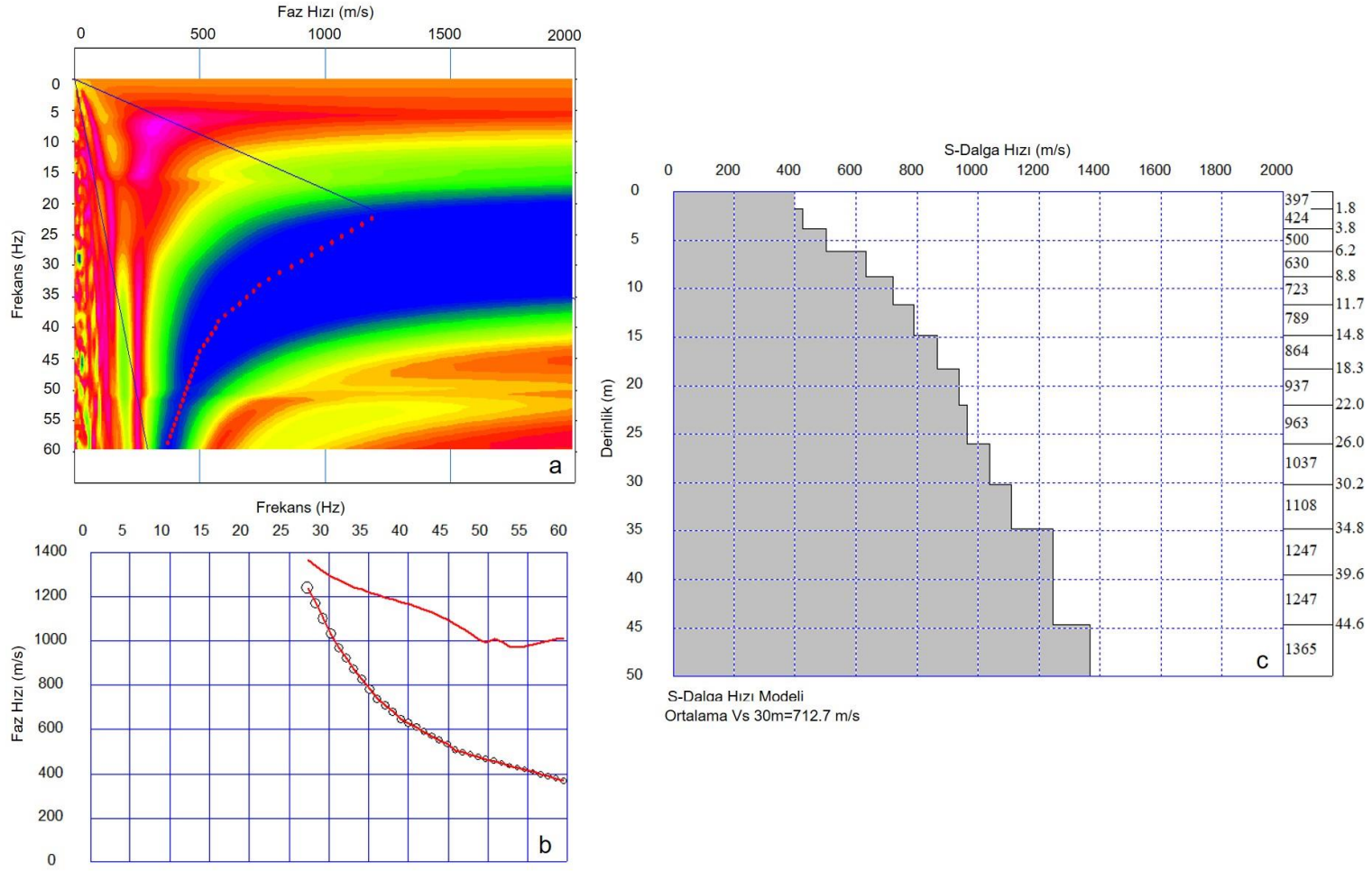
Hesaplanan Vs30 hızı 643.5 m/s olan MASW3_P15 kesitindeki (Şekil 3.62) birinci tabakanın ortalama hızı yaklaşık ortalama 371 m/s olup 4 m'ye kadar, ikinci tabakanın hızı 545.5 m/sn olup, 4 m'den 15 m'ye kadar, üçüncü tabakanın hızı ise 971.4 m/s olup 15 m'den daha derinlere kadar inmektedir.



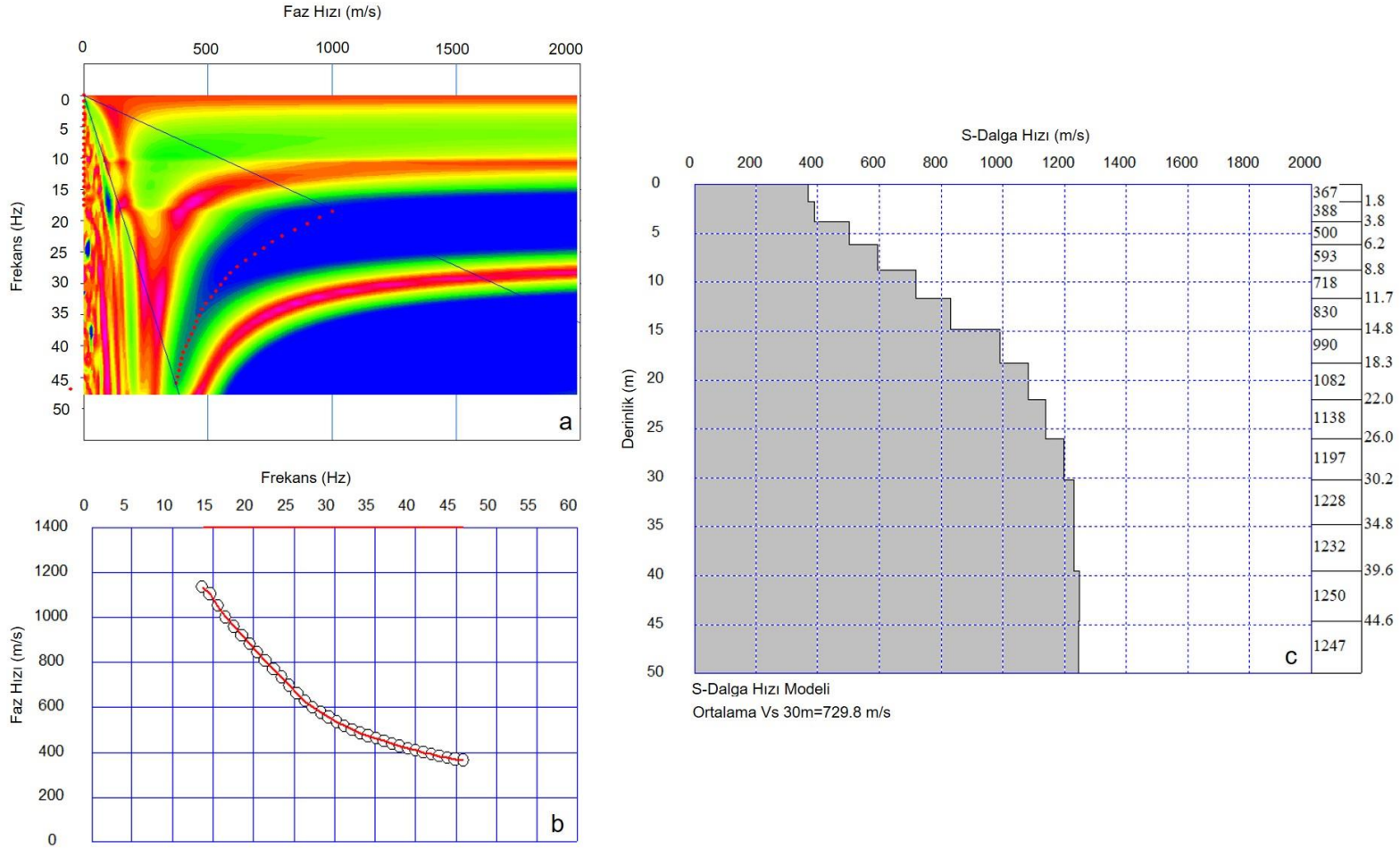
Şekil 3.51. Çalışma Alanı 3, MASW3_P1 verisi, a) MASW3_P1 profilden elde edilen faz hızı-frekans kesiti, b) hesaplanan (siyah) ile gözlenen (kırmızı) dispersiyon eğrilerinin çakışması, c) 1 boyutlu derinlik-Vs modeli



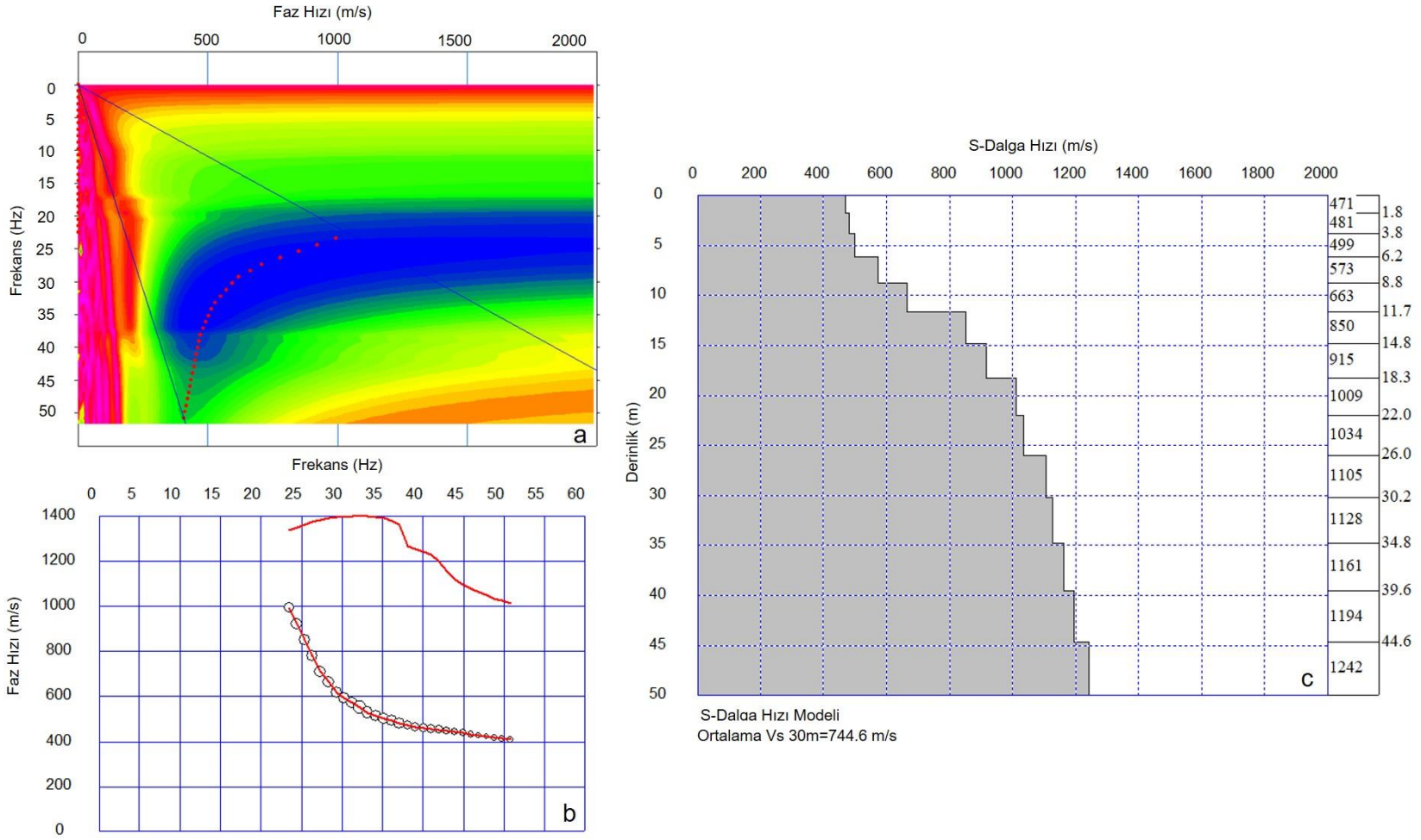
Şekil 3.52. Çalışma Alanı 3, MASW3_P2 verisi, a) MASW3_P2 profilden elde edilen faz hızı-frekans kesiti, b) hesaplanan (siyah) ile gözlenen (kırmızı) dispersiyon eğrilerinin çakışması, c) 1 boyutlu derinlik-Vs modeli



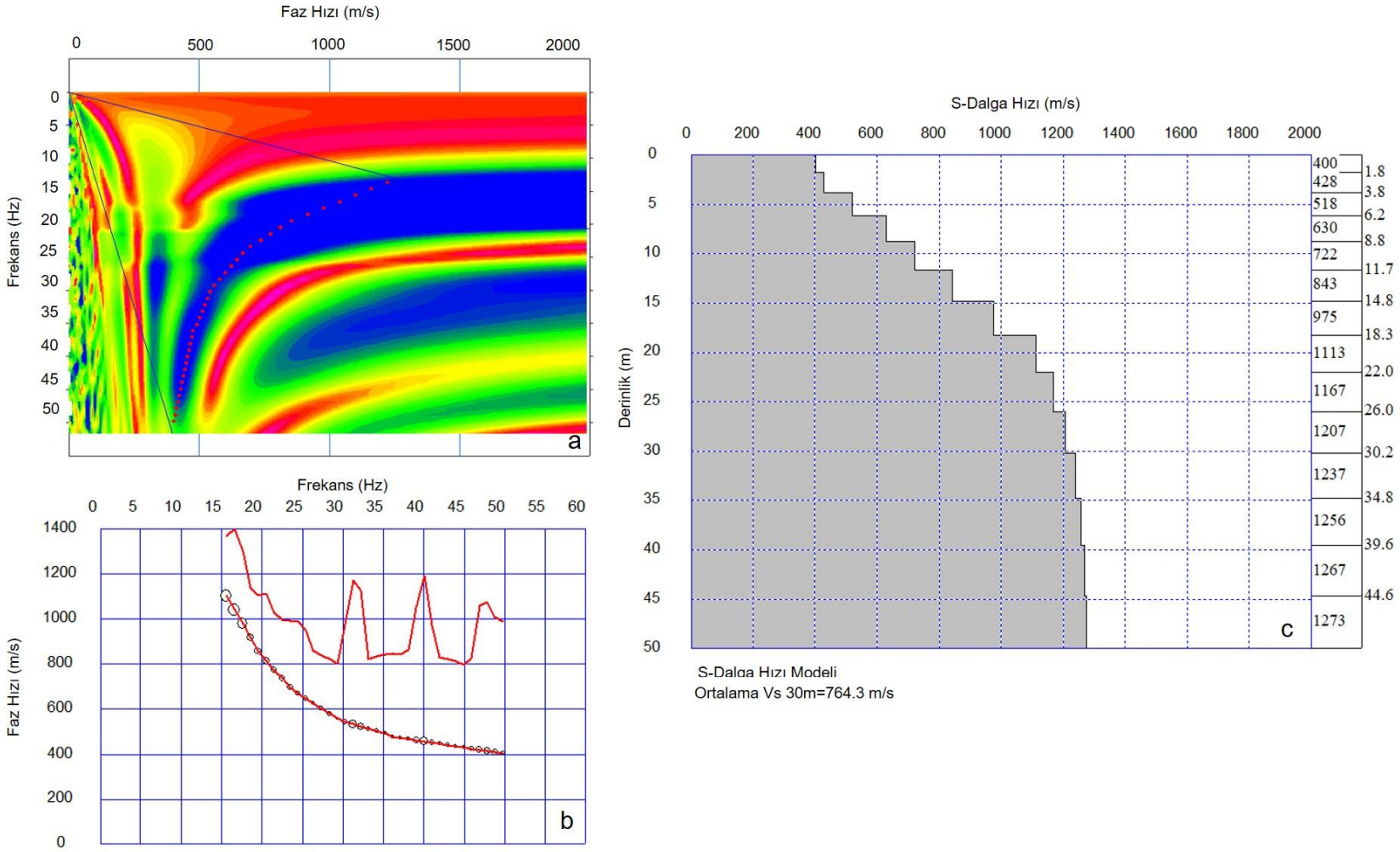
Şekil 3.53. Çalışma Alanı 3, MASW3_P3 verisi, a) MASW3_P3 profilden elde edilen faz hızı-frekans kesiti, b) hesaplanan (siyah) ile gözlenen (kırmızı) dispersiyon eğrilerinin çakışması, c) 1 boyutlu derinlik-Vs modeli



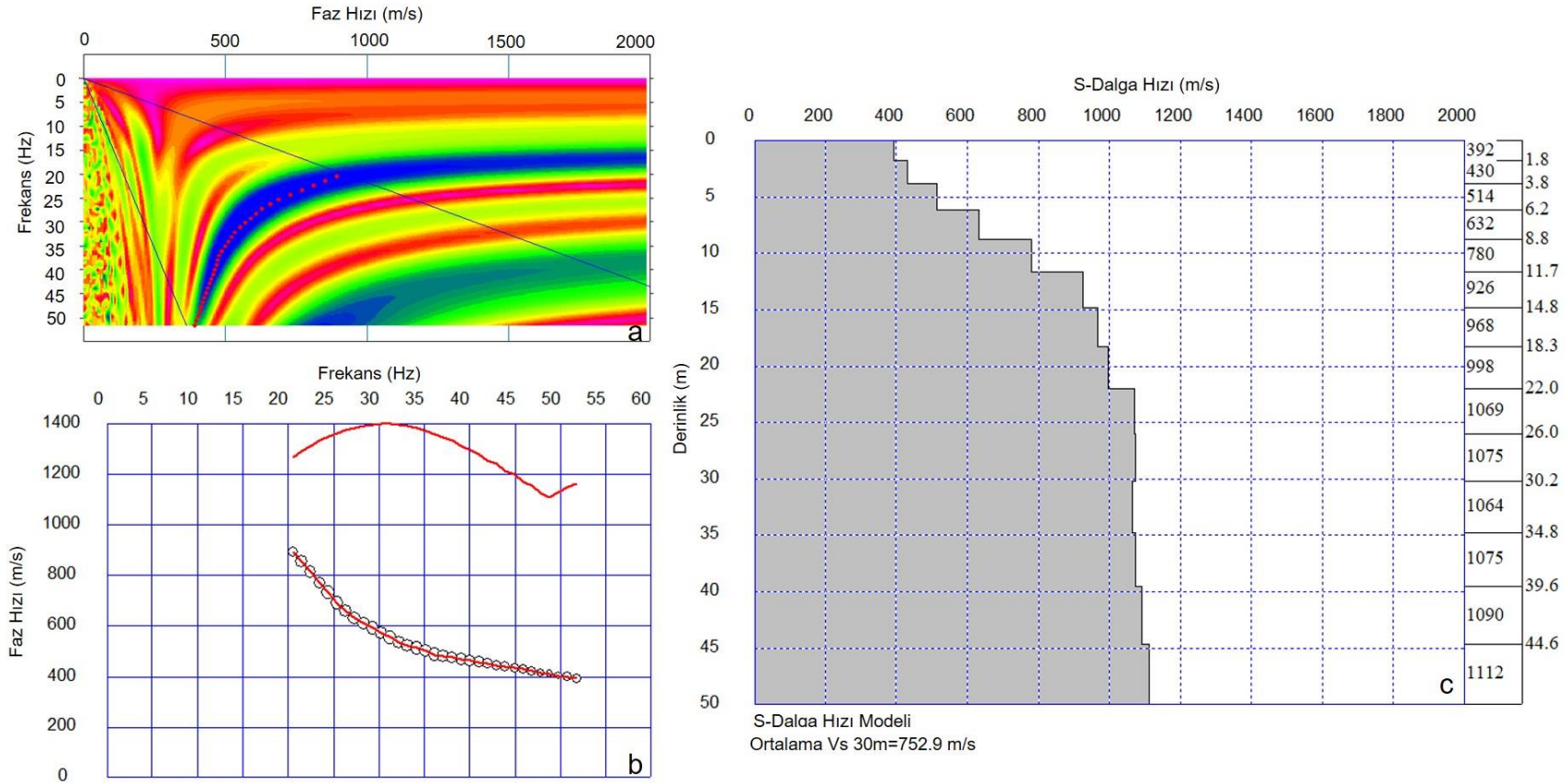
Şekil 3.54. Çalışma Alanı 3, MASW3_P4 verisi, a) MASW3_P4 profilden elde edilen faz hızı-frekans kesiti, b) hesaplanan (siyah) ile gözlenen (kırmızı) dispersiyon eğrilerinin çakışması, c) 1 boyutlu derinlik-Vs modeli



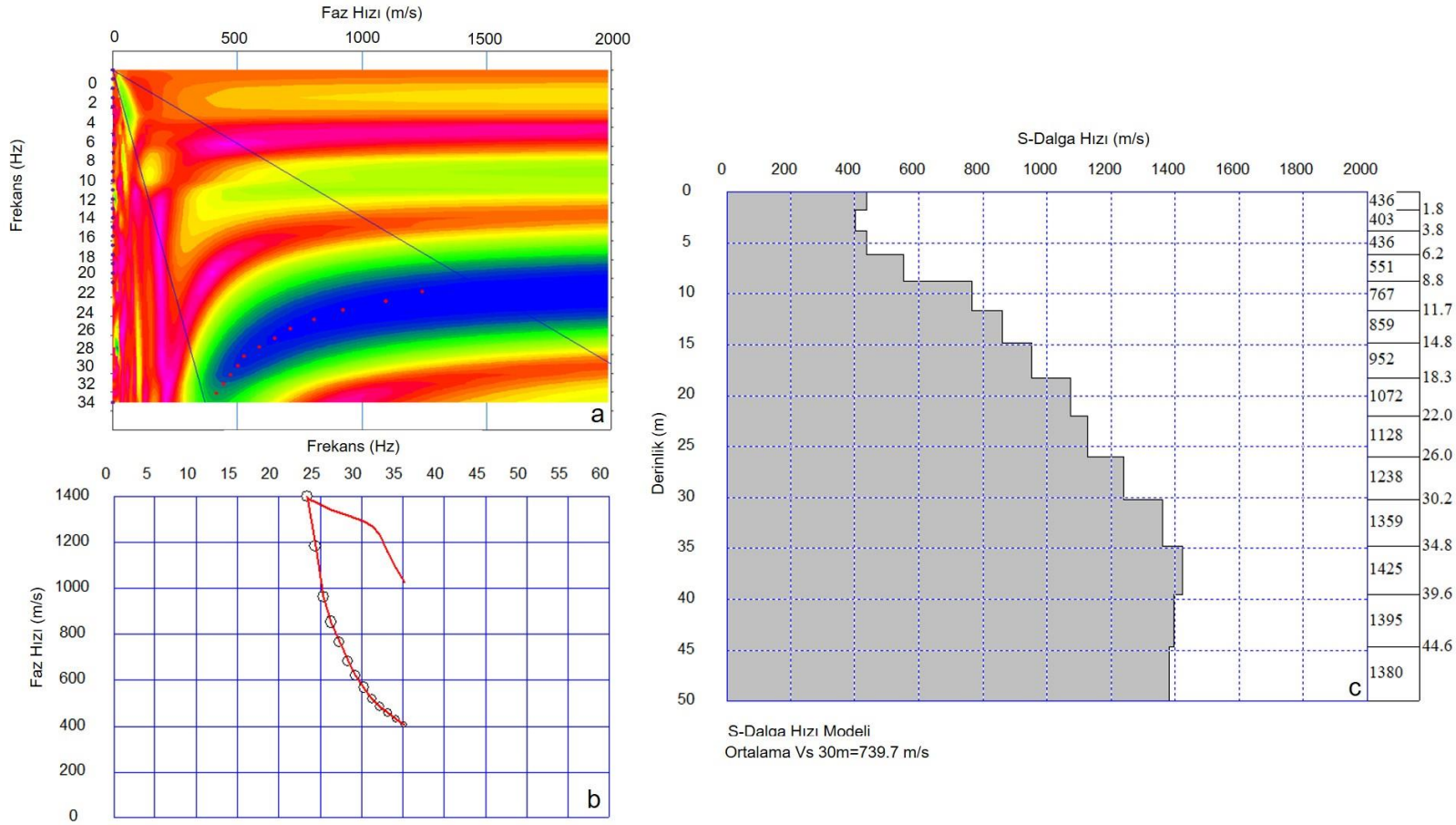
Şekil 3.55. Çalışma Alanı 3, MASW3_P5 verisi, a) MASW3_P5 profilden elde edilen faz hızı-frekans kesiti, b) hesaplanan (siyah) ile gözlenen (kırmızı) dispersiyon eğrilerinin çakışması, c) 1 boyutlu derinlik-Vs modeli



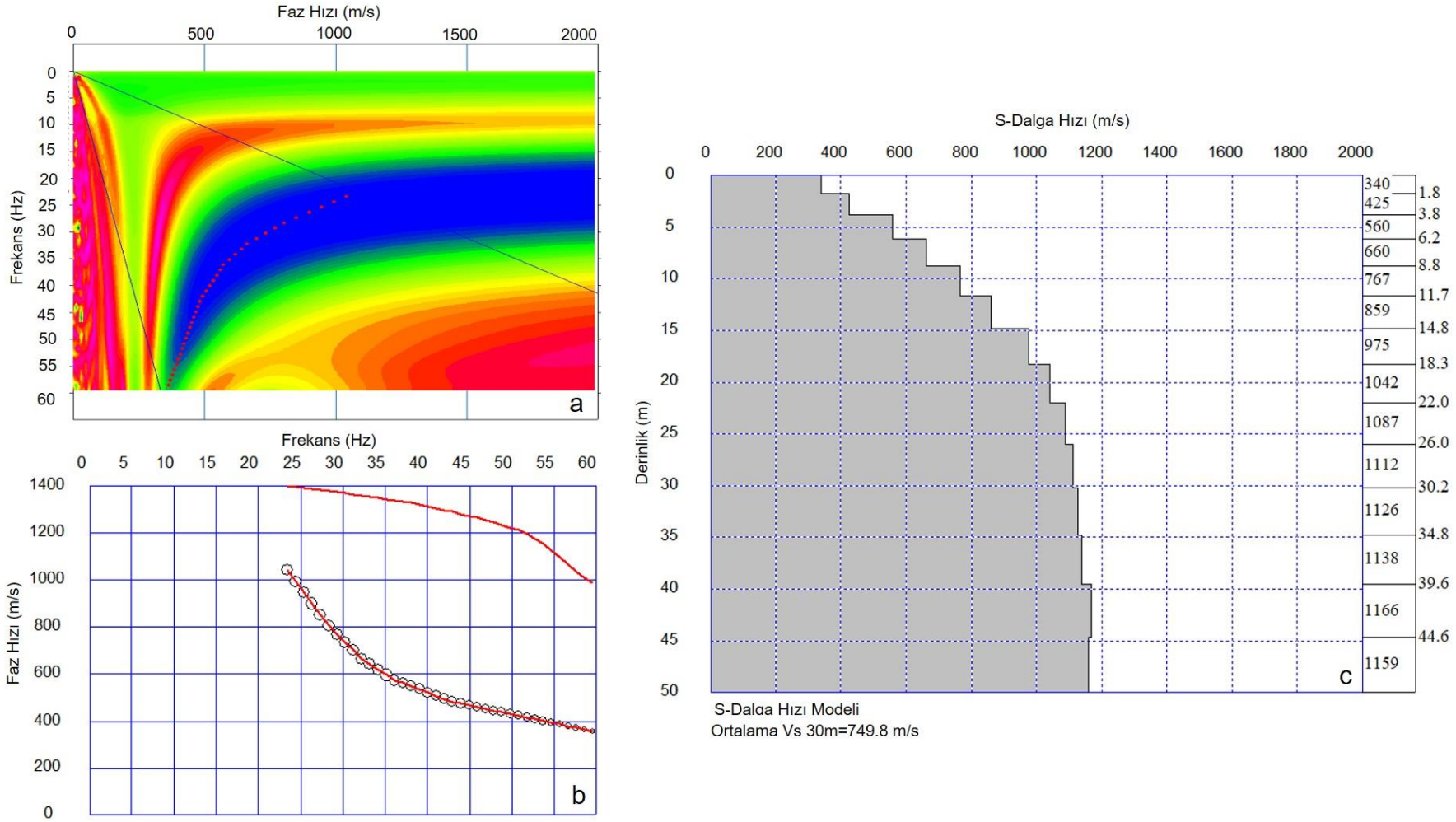
Şekil 3.56. Çalışma Alanı 3, MASW3_P6 verisi, a) MASW3_P6 profilden elde edilen faz hızı-frekans kesiti, b) hesaplanan (siyah) ile gözlenen (kırmızı) dispersiyon eğrilerinin çakışması, c) 1 boyutlu derinlik-Vs modeli.



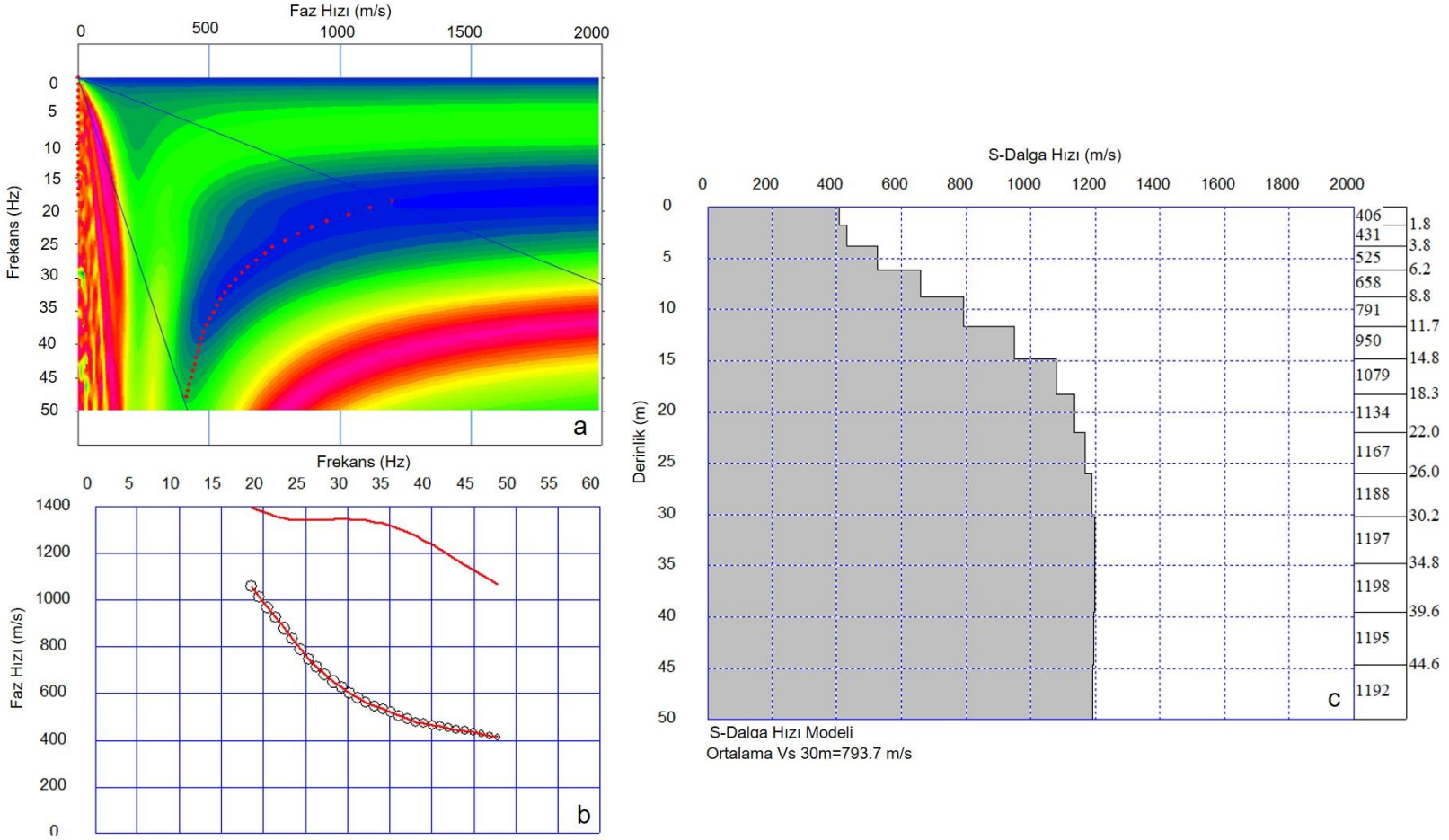
Şekil 3.57. Çalışma Alanı 3, MASW3_P7 verisi, a) MASW3_P7 profilden elde edilen faz hızı-frekans kesiti, b) hesaplanan (siyah) ile gözlenen (kırmızı) dispersiyon eğrilerinin çakışması, c) 1 boyutlu derinlik-Vs modeli



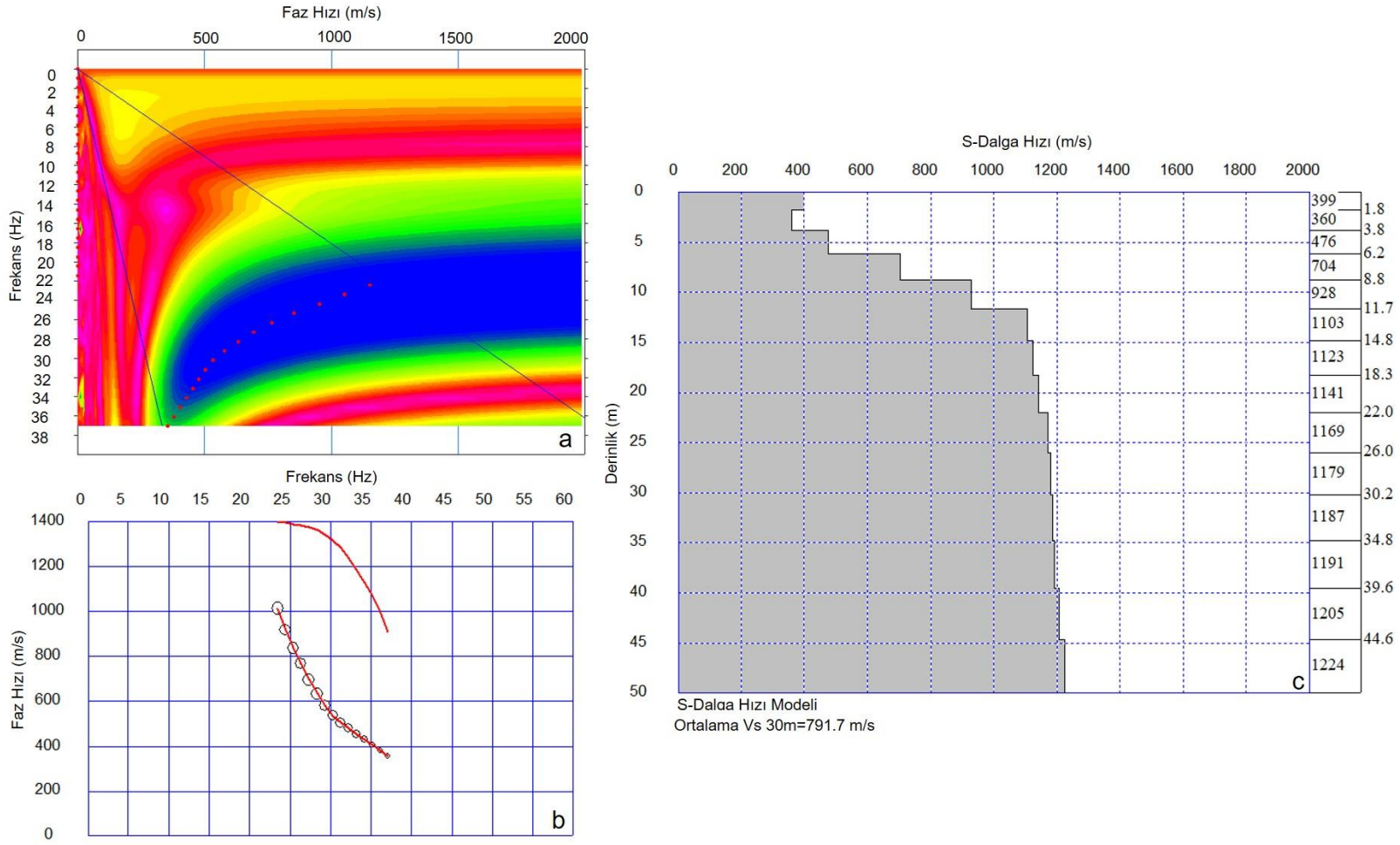
Şekil 3.58. Çalışma Alanı 3, MASW3_P8 verisi, a) MASW3_P8 profilden elde edilen faz hızı-frekans kesiti, b) hesaplanan (siyah) ile gözlenen (kırmızı) dispersiyon eğrilerinin çakışması, c) 1 boyutlu derinlik-Vs modeli



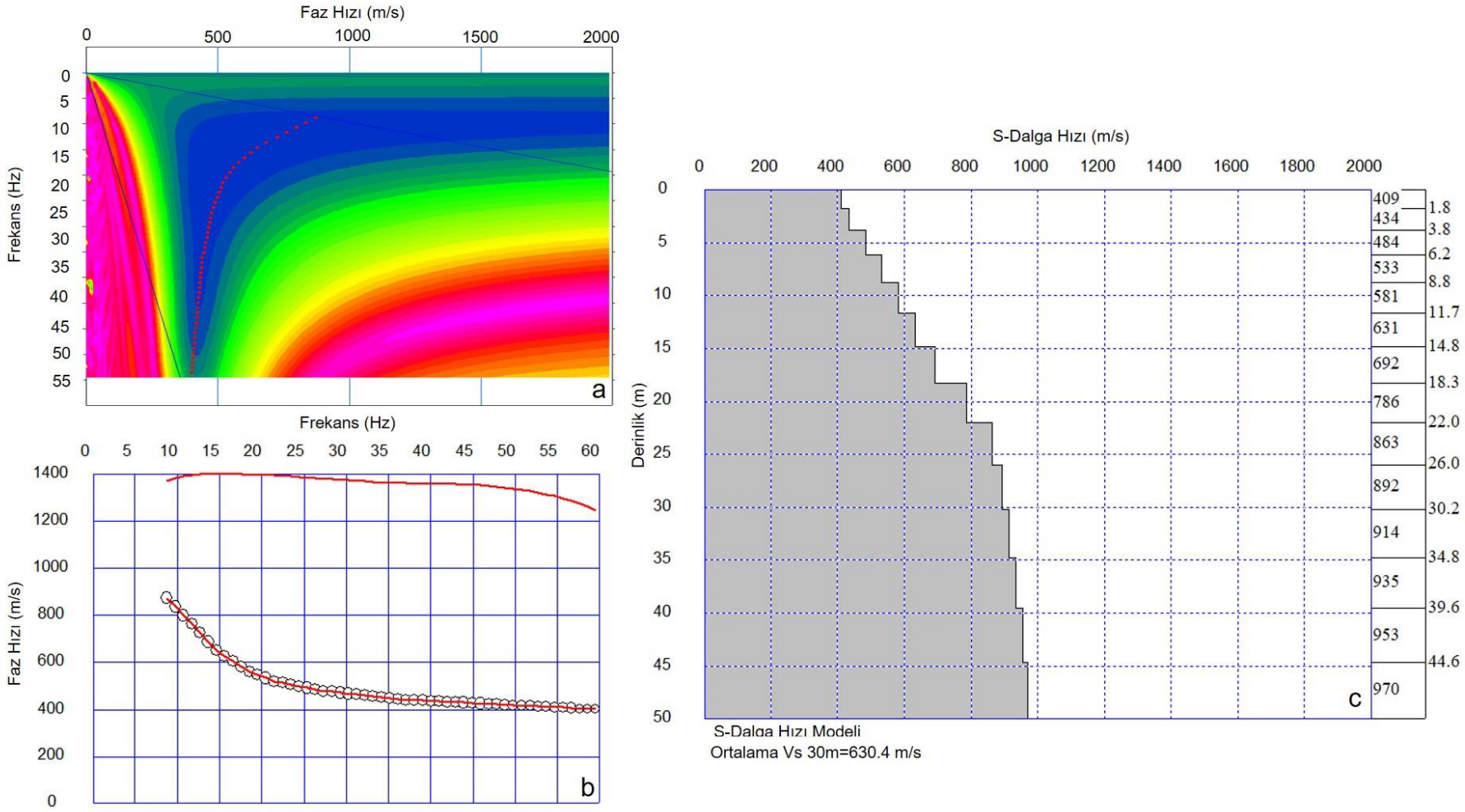
Şekil 3.59. Çalışma Alanı 3, MASW3_P9 verisi, a) MASW3_P9 profilden elde edilen faz hızı-frekans kesiti, b) hesaplanan (siyah) ile gözlenen (kırmızı) dispersiyon eğrilerinin çakışması, c) 1 boyutlu derinlik-Vs modeli



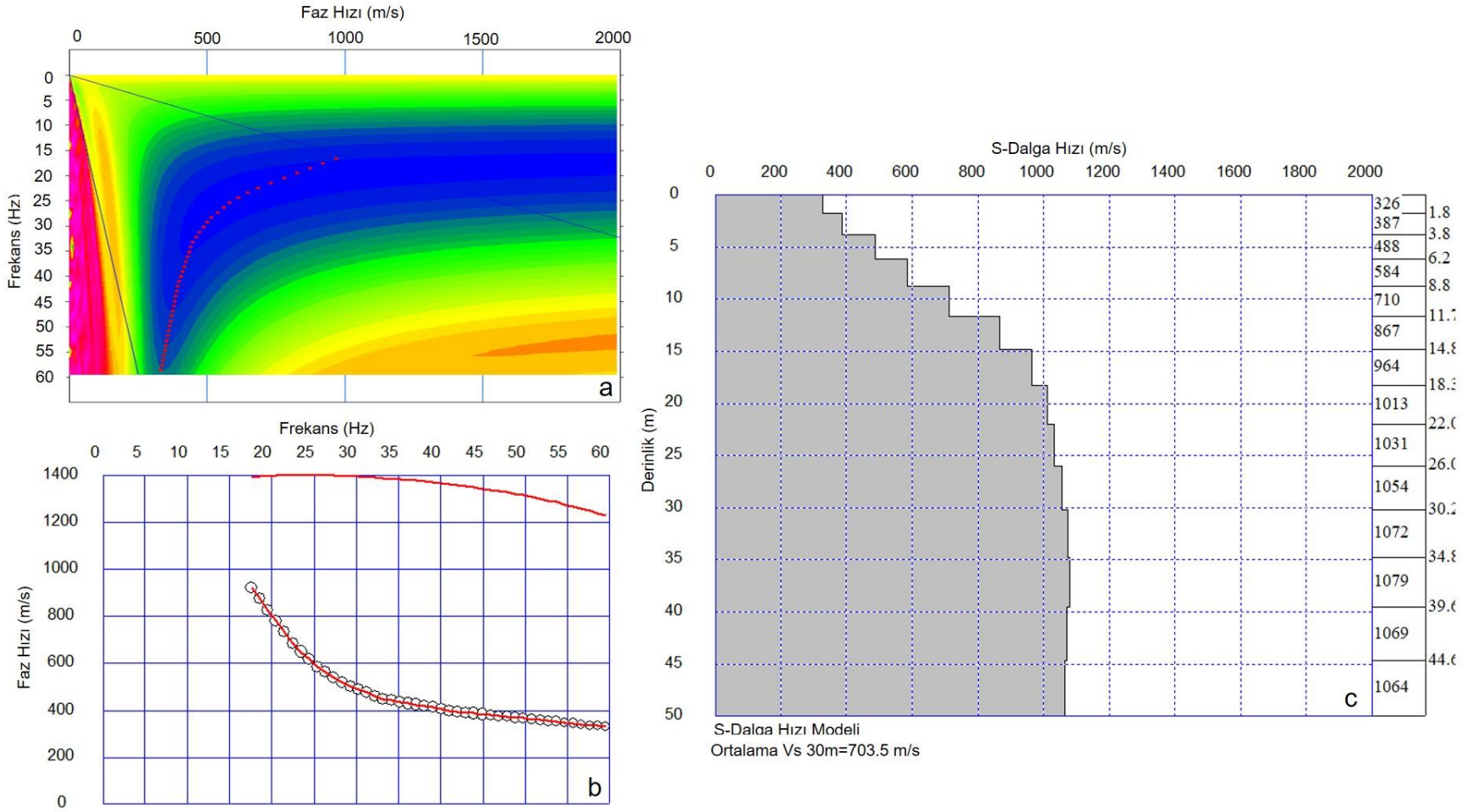
Şekil 3.60. Çalışma Alanı 3, MASW3_P10 verisi, a) MASW3_P10 profilden elde edilen faz hızı-frekans kesiti, b) hesaplanan (siyah) ile gözlenen (kırmızı) dispersiyon eğrilerinin çakışması, c) 1 boyutlu derinlik-Vs modeli.



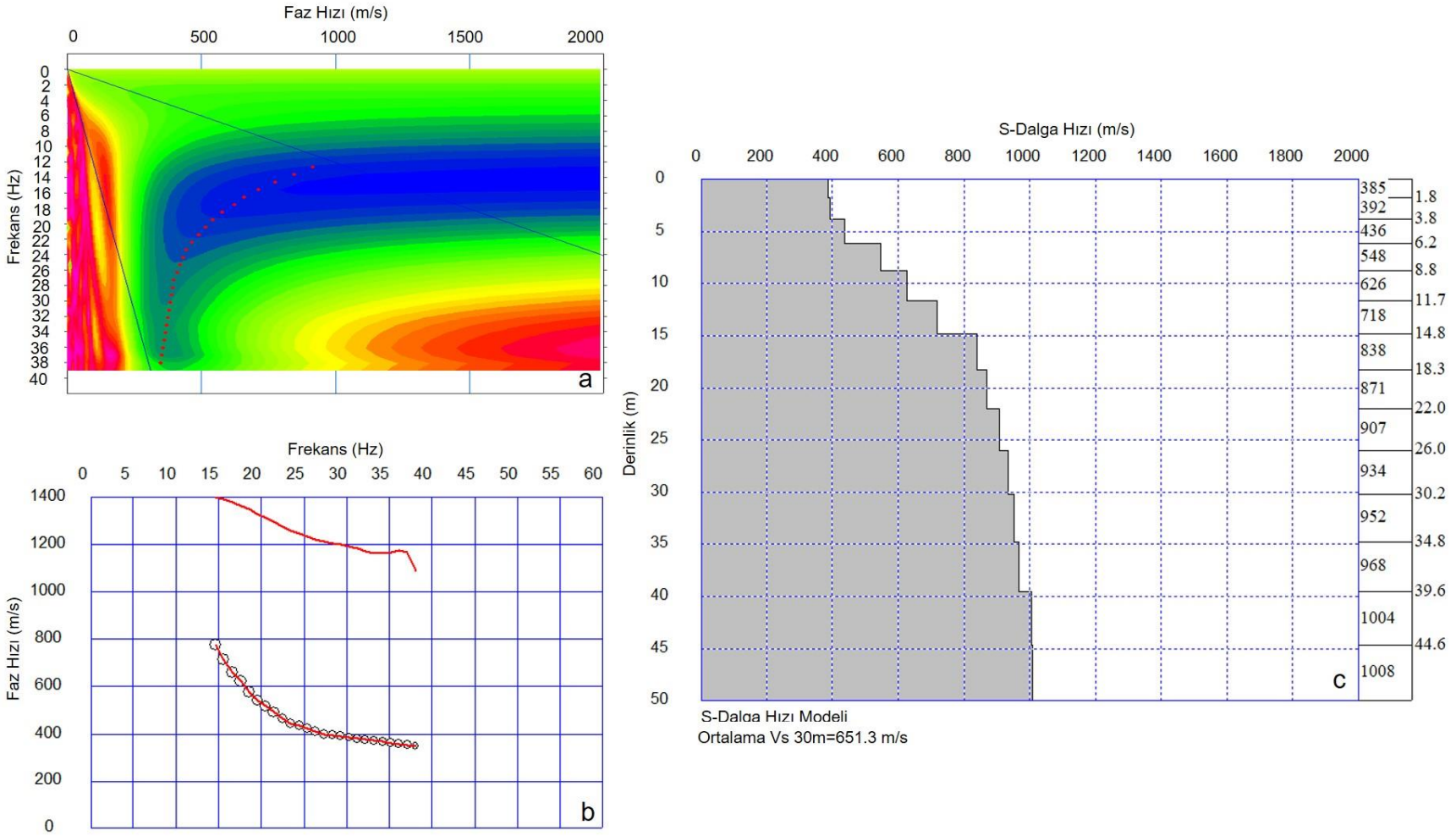
Şekil 3.61. Çalışma Alanı 3, MASW3_P11 verisi, a) MASW3_P11 profilden elde edilen faz hızı-frekans kesiti, b) hesaplanan (siyah) ile gözlenen (kırmızı) dispersiyon eğrilerinin çakışması, c) 1 boyutlu derinlik-Vs modeli



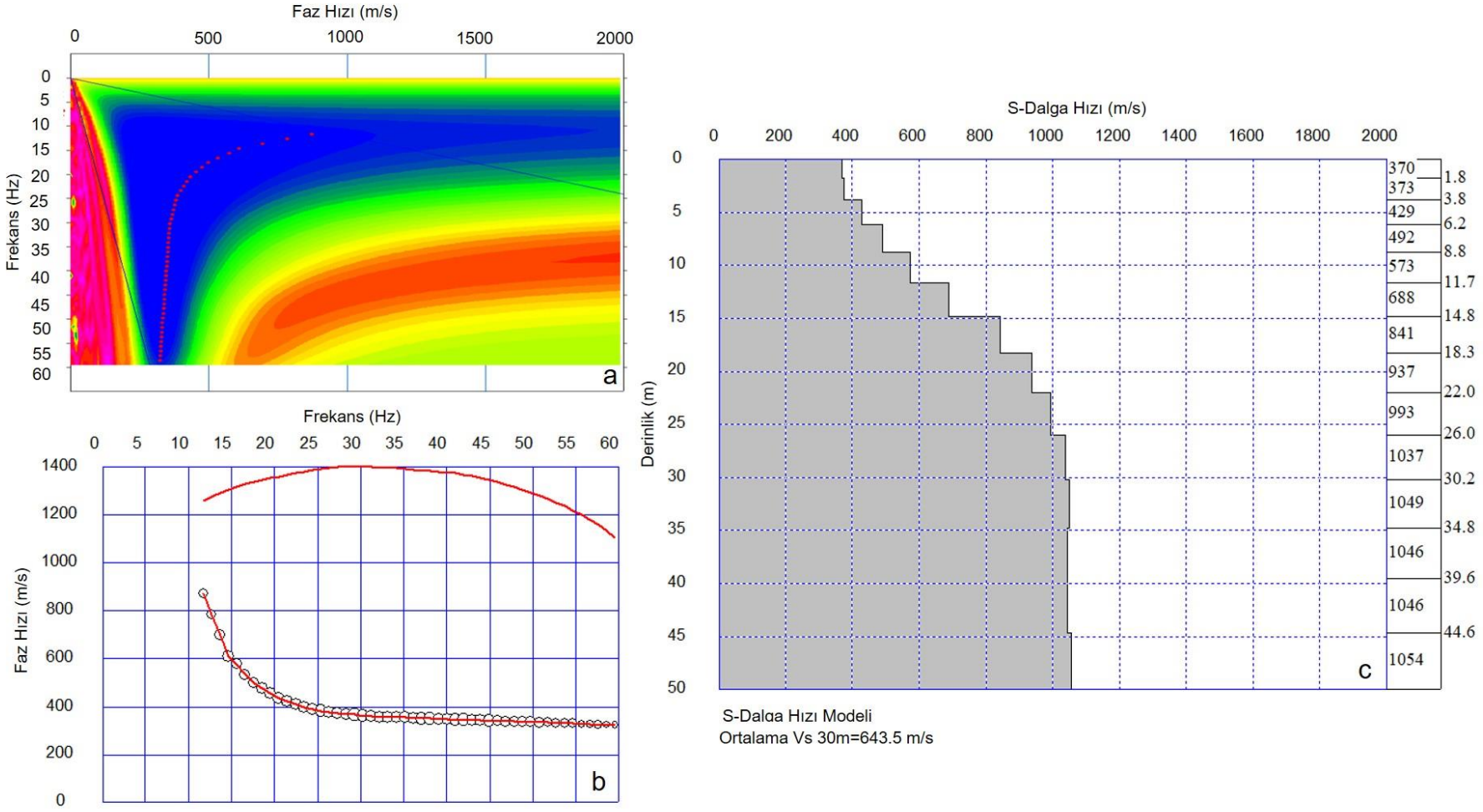
Şekil 3.62. Çalışma Alanı 3, MASW3_P12 verisi, a) MASW3_P12 profilden elde edilen faz hızı-frekans kesiti, b) hesaplanan (siyah) ile gözlenen (kırmızı) dispersiyon eğrilerinin çakışması, c) 1 boyutlu derinlik-Vs modeli



Şekil 3.63. Çalışma Alanı 3, MASW3_P13 verisi, a) MASW3_P13 profilden elde edilen faz hızı-frekans kesiti, b) hesaplanan (siyah) ile gözlenen (kırmızı) dispersiyon eğrilerinin çakışması, c) 1 boyutlu derinlik-Vs modeli



Şekil 3.64. Çalışma Alanı 3, MASW3_P14 verisi, a) MASW3_P14 profilden elde edilen faz hızı-frekans kesiti, b) hesaplanan (siyah) ile gözlenen (kırmızı) dispersiyon eğrilerinin çakışması, c) 1 boyutlu derinlik-Vs modeli

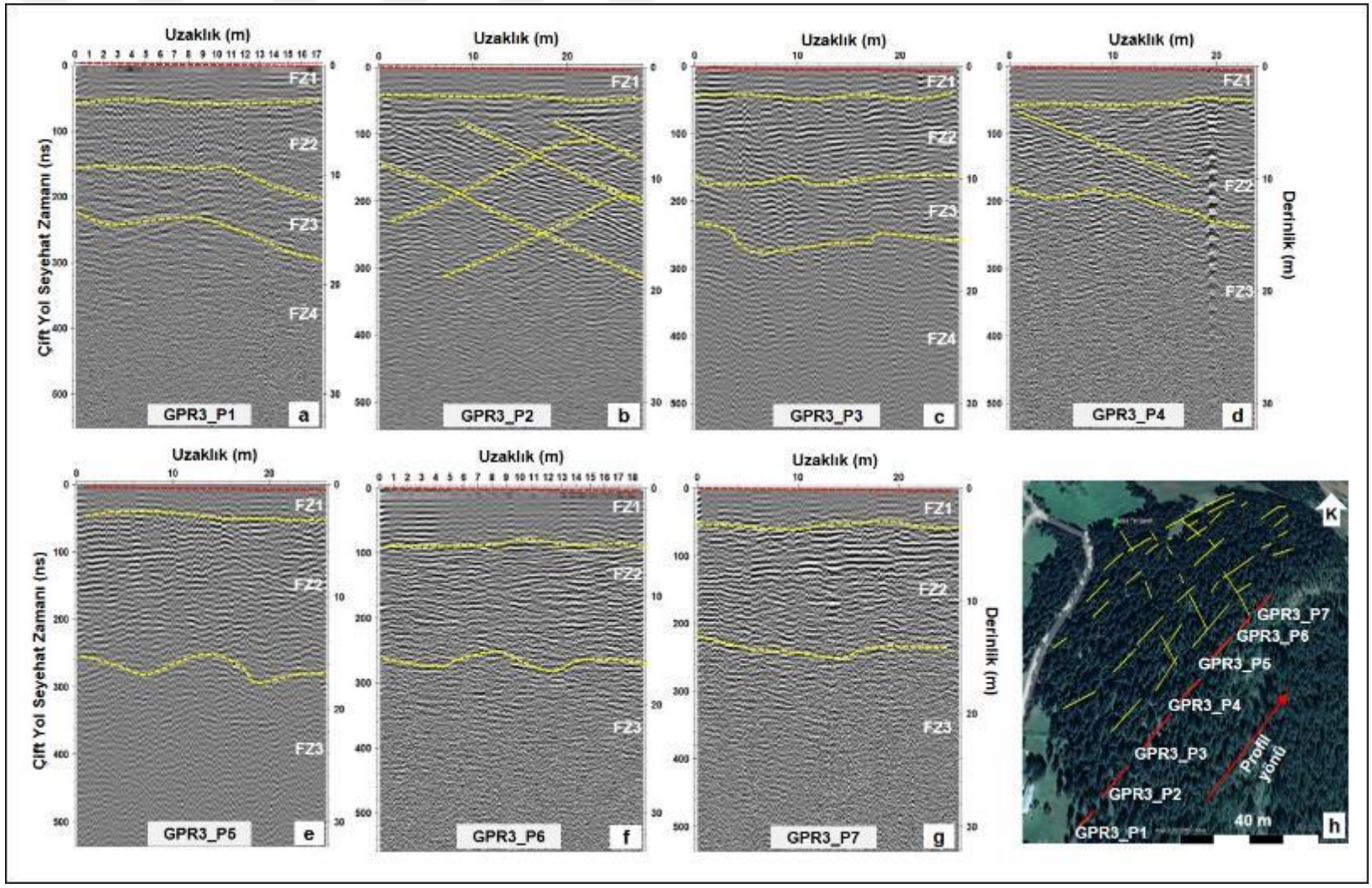


Şekil 3.65. Çalışma Alanı 3, MASW3_P15 verisi, a) MASW3_P15 profilden elde edilen faz hızı-frekans kesiti, b) hesaplanan (siyah) ile gözlenen (kırmızı) dispersiyon eğrilerinin çakışması, c) 1 boyutlu derinlik-Vs modeli

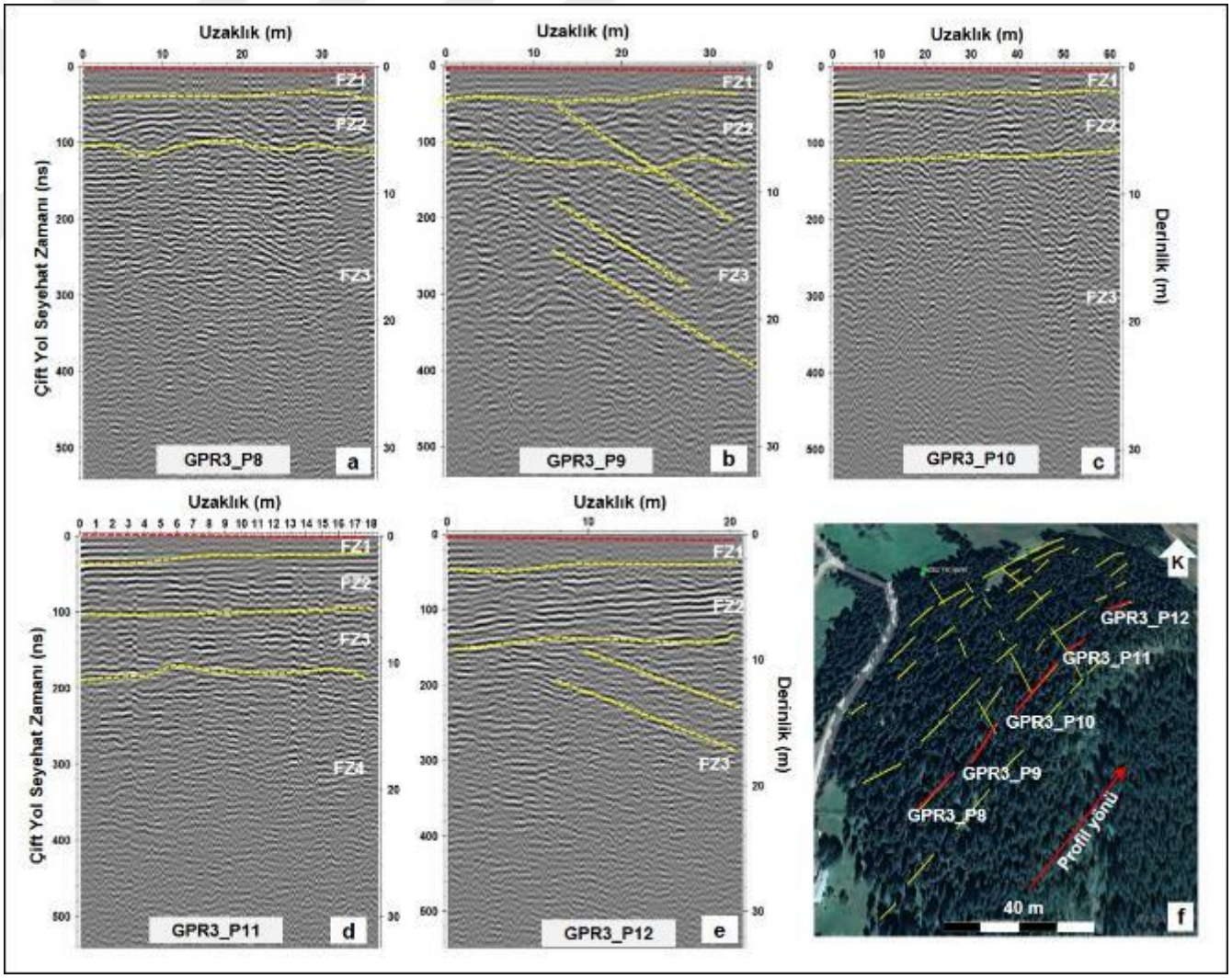
Bu tez çalışması kapsamında, Çalışma Alanı 3'ten elde edilen *GPR* kesitlerinin (GPR3_P1-GPR3_P49) tamamında yaklaşık 32 m derinlikten bilgi alınabildiği görülmektedir. Şekil 3.66, hemen hemen aynı doğrultu üzerinden alınan 7 adet *GPR* kesitini göstermektedir. Bu kesitler Şekil 3.30'da gösterilen ERT3_P1 profili üzerinden elde edilmiştir. *GPR* kesitlerinin tek bir doğrultu üzerinden parça parça alınmalarının nedeni, Çalışma Alanı 3'ün ormanlık bir alan olmasından kaynaklanmaktadır. Şekil 3.66'daki *GPR* kesit uzunlukları 17-30 m arasında değişmektedir. Şekil 3.66c kesitlerine bakıldığında, 2-3m arasında çok güçlü ana yansıma sınırlarının varlığı dikkat çekmektedir. Bu güçlü yansıma sınırları arasında kalan alanların fasiyes zonlarının (FZ1, FZ2, FZ3, FZ4) sınırlarına karşılık gelmiş olabileceği şeklinde yorumlanabilir. Şekil 3.66a ve şekil 3.66c'de gösterilen ara yüzeyler arasındaki kalınlıklar birbirine çok benzer olup, bu kalınlıklar yüzeyden derine doğru sırasıyla, 4, 10, 6 ve 16 m'dir. Şekil 3.66d ve Şekil 3.66g'de bulunan ara yüzeyler arasında görülen kalınlıklar ise yüzeyden derine doğru sırasıyla yaklaşık olarak 4, 10-14, 16-20 m'dir. Şekil 3.66b ve şekil 3.66d farklı yönlerde uzanım göstermekte olan yansıma sınırı mevcuttur. Bu yansıtıcı sınırların kireçtaşları içerisinde meydana gelen kırık/çatlakları temsil ettiği tahmin edilmektedir. Ayrıca şekil 3.66d'de uzanım eksenine dik olacak şekilde düşey yönde uzanım gösteren, başlangıcı uzunluk ekseninin 20 m'si ve derinlik ekseninin 7 m'sinde yüksek genlikli yansıtıcı yüzey gözlenmektedir. Bu yansıtıcı yüzeyin yeni oluşum göstermekte olan dolinleri temsil ettiği düşünülmektedir.

Yaklaşık olarak aynı doğrultu üzerinden alınan beş adet GPR3_P8-GPR3_P12 kesitleri Şekil 3.67'de gösterilmektedir. Bu kesitler yaklaşık olarak Şekil 3.30'da gösterilen ERT3_P2 profillerinin anomali gösteren bölgeleri üzerinden elde edilmiştir. Şekil 3.67'de sunulan bu *GPR* kesitlerinin uzaklık eksenlerinin 18-62 m arasında değiştiği gözlenmektedir. Şekil 3.67a-e kesitlerine bakıldığında belirgin iki yansıma sınırının varlığı dikkat çekmektedir. Bu yansıma sınırları arasındaki alanlar farklı fasiyes zonlarını (FZ1, FZ2, FZ3, FZ3) temsil ettiği düşünülmektedir. Şekil 3.67'deki kesitlerin tamamındaki ara yüzeyler benzerlik göstermekte olup ara yüzeyler arasındaki FZ kalınlıkları, yüzeyden derine doğru sırasıyla 2, 4-6 ve 24-28 m'dir. Bu ara yüzeyler arasında kalan her bir alanın farklı jeolojik fasiyes birimlerini göstermektedir. Şekil 3.67b ve Şekil 3.67c'deki kesitler incelendiğinde, kesitlerin faklı kısımlarında eğimli yansıtıcı ara yüzeylerin varlığı görülmektedir. Bu yansıtıcı yüzeylerin kireçtaşları içerisindeki kırıklara karşılık geldiği düşünülmektedir.

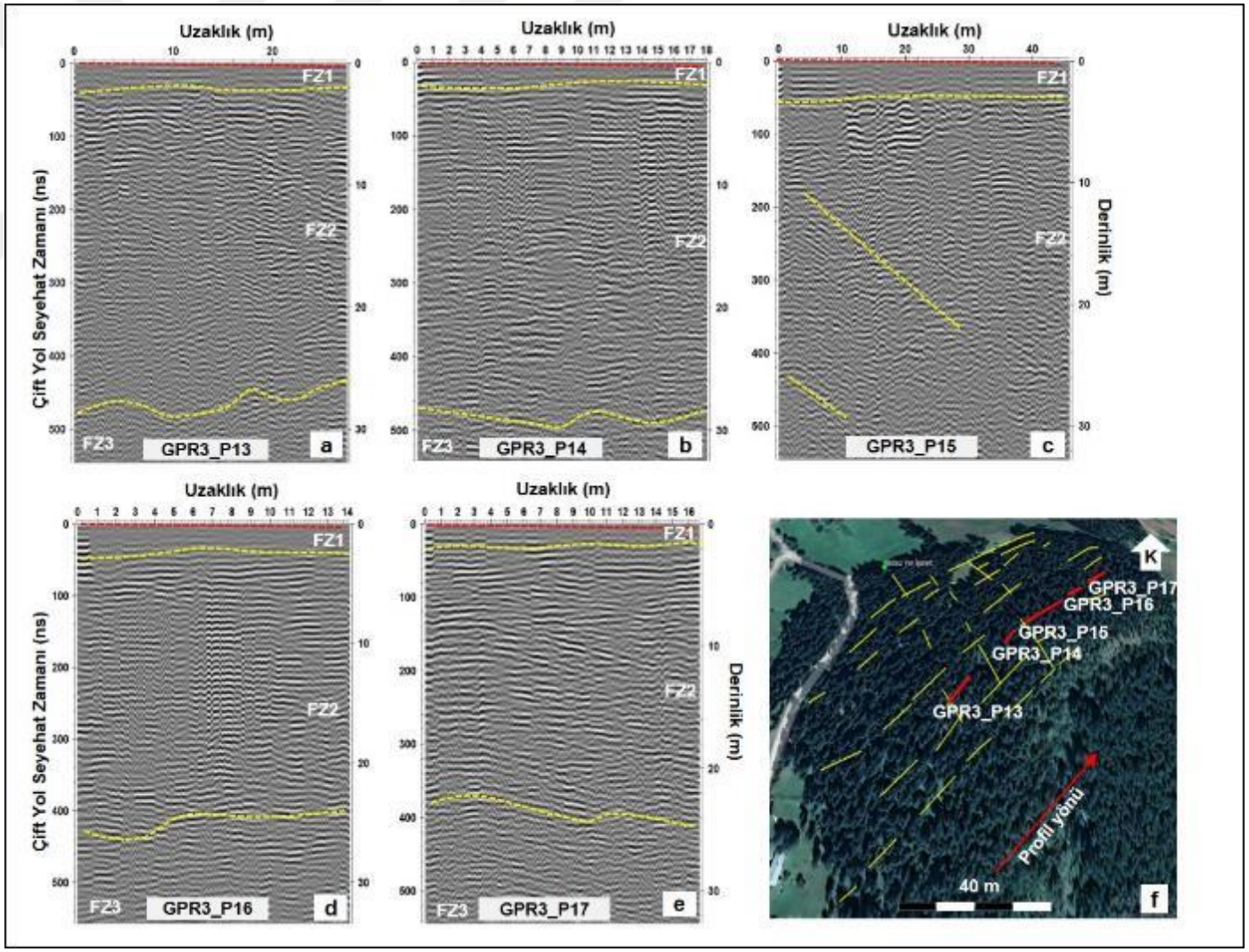
Şekil 3.68 yaklaşık olarak Şekil 3.30'da gösterilen ERT3_P3 profilinin farklı kısımları üzerinden, aynı doğrultuda alınan GPR3_P13-P17 kesiti yer almaktadır. Şekil 3.68'de gösterilen GPR kesitlerinin uzunluklarının 14-46 m arasında değiştiği görülmektedir. Şekil 3.68a-e kesitlerine bakıldığında, belirgin iki adet yansıma sınırının varlığı dikkat çekmektedir. Şekil 3.68'deki kesitlerde belirgin olarak görülen fasiyes zonları benzerlik göstermekte olup, bu zonların kalınlıkları yüzeyden derine doğru sırasıyla yaklaşık 2, 22-28 ve 4-10 m'dir. Şekil 3.68c'deki GPR3_P15 kesiti incelendiğinde, bu kesitin belli kısımlarında 2 eğimli yansıtıcı ara yüzey dikkat çekmektedir.



Şekil 3.66. Çalışma Alanı 3'ten elde edilen *GPR* (GPR3_P1-GPR3_P7) kesitleri. a) GPR3_P1, b) GPR3_P2, c) GPR3_P3, d) GPR3_P4, e) GPR3_P5, f) GPR3_P6, g) GPR3_P7 kesitleri, h) GPR3_P1-GPR3_P7 kesitlerinin elde edildiği profiller (kırmızı çizgiler)



Şekil 3.67. Çalışma Alanı 3'ten elde edilen *GPR* (GPR3_P8-GPR3_P12) kesitleri. a) GPR3_P8, b) GPR3_P9, c) GPR3_P10, d) GPR3_P11, e) GPR3_P12 kesitleri, f) GPR3_P8-GPR3_P12 kesitlerinin elde edildiği profiller (kırmızı çizgiler)

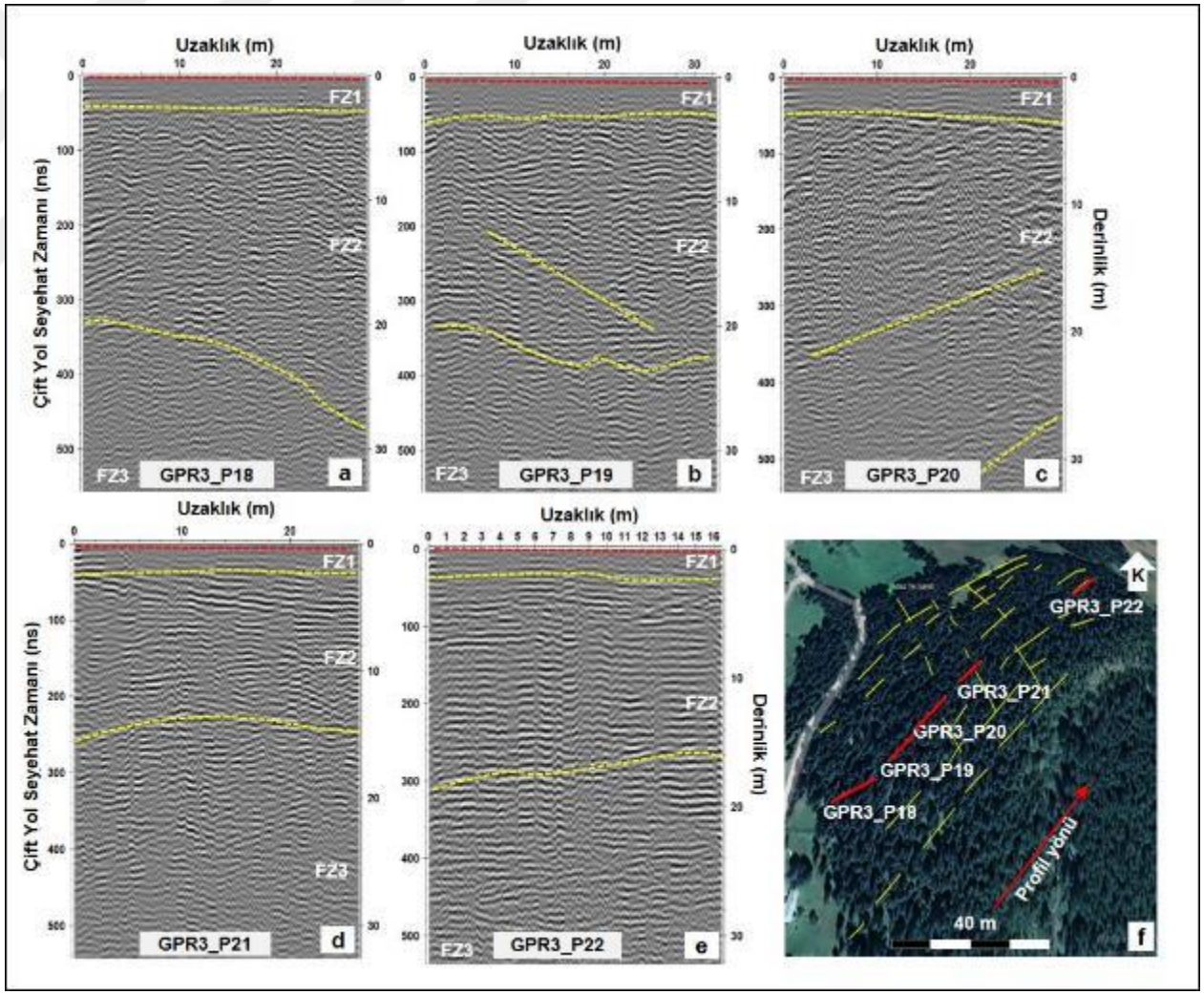


Şekil 3.68. Çalışma Alanı 3'ten elde edilen *GPR* (GPR3_P13-GPR3_P17) kesitleri. a) GPR3_P13, b) GPR3_P14, c) GPR3_P15, d) GPR3_P16, e) GPR3_P17 kesitleri, f) GPR3_P13-GPR3_P17 kesitlerinin elde edildiği profiller (kırmızı çizgiler)

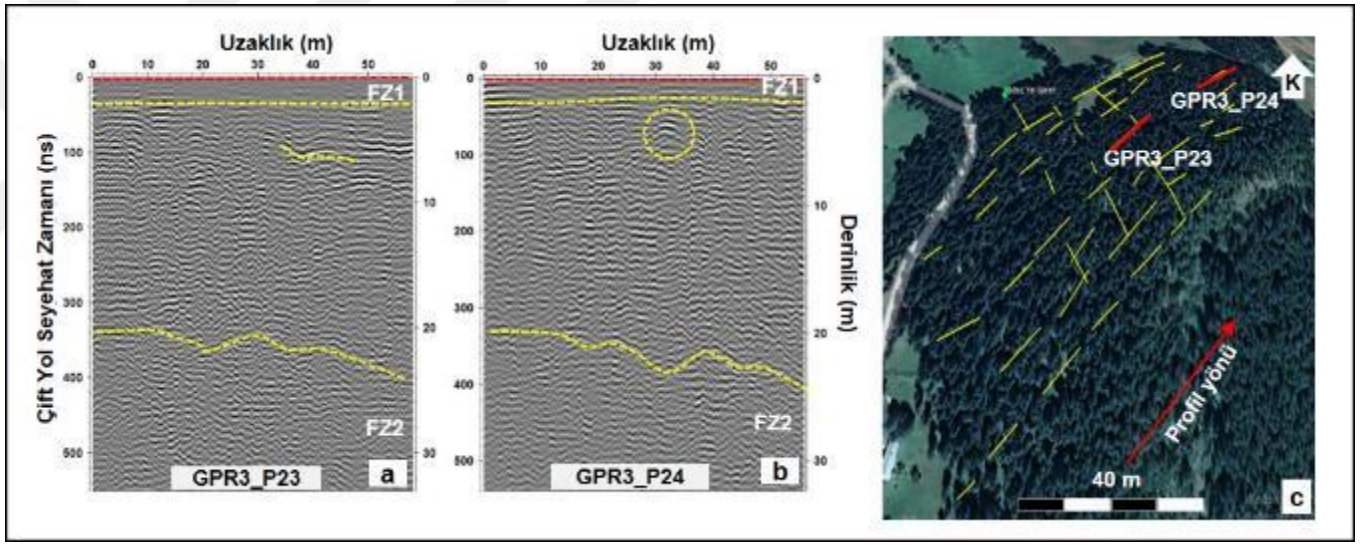
Çalışma Alanı 3 de yer alan KB-GD yönlü 5 adet (GPR3_P18-GPR3_P22) profile ait *GPR* kesitleri Şekil 4'te gösterilmektedir. Bu kesitlerin boyları 16-32 m arasında değişmektedir. Şekil 3.69'daki *GPR* kesitlerinin geneline bakıldığında aralarındaki tabaka kalınlıkları değişiklik gösteren yüksek genlikli 2 yansıtıcı ara yüzeyin varlığı dikkat çekmektedir. Bu ara yüzeyler arasında kalan yüzeylerin FZ1, FZ2 ve FZ3'nı yansıttığı düşünülmektedir. GPR3_P19-GPR3_P20 kesitleri incelendiğinde ise faklı yönlerde eğimli yansıtıcı ara yüzeylerin olduğu görülmektedir.

Çalışma Alanı 3 de GPR3_P23 ve GPR3_P24 profillerine ait *GPR* kesitleri, Şekil 3.70'te gösterilmektedir. Bu kesitlerin uzunlukları yaklaşık 58 m'dir. Şekil 3.70a ve b'de iki yüksek genlikli yansıma yüzeylerinin varlığı görülmektedir. Bu yüzeyden derine doğru sırası ile fasiyes zonlarının kalınlıkları; yaklaşık 2, 22 ve 8 m'dir. Ayrıca Şekil 3.70b'de tepe noktası uzunluk ekseninin 32 m sine, derinlik ekseninin ise 3 m sine denk gelen hiperbol şeklinde bir yansıma yüzeyinin varlığı görülmektedir.

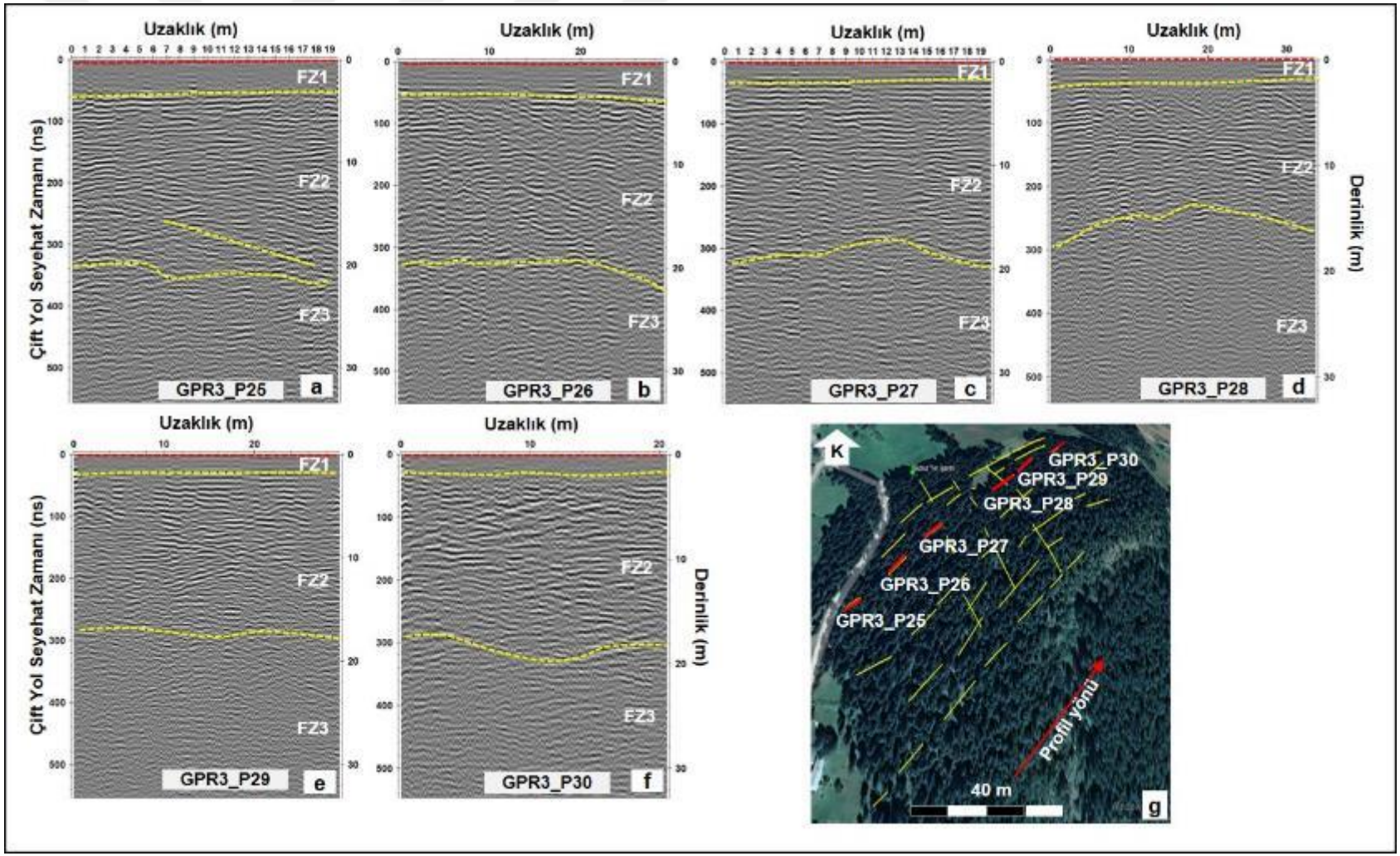
Çalışma Alanı 3 den elde edilen GPR3_P25-GPR3_P30 kesitleri, Şekil 3.71'de gösterilmektedir. Bu kesitlerin boyları yaklaşık 19-35 m arasında değişmektedir. Ayrıca kesitlerin tamamında, 2 yüksek genlikli yansıma yüzeyi gözlenmektedir. Bu yansıma yüzeylerinin (FZ1, FZ2 ve FZ3) derinlikleri; yüzeyden derine doğru sırası ile yaklaşık 2, 18 ve 14 m'dir. Ayrıca Şekil 3.71a'da eğimli bir yansıtıcı yüzeyin varlığı görülmektedir.



Şekil 3.69. Çalışma Alanı 3'ten elde edilen *GPR* (GPR3_P18-GPR3_P22) kesitleri. a) GPR3_P18, b) GPR3_P19, c) GPR3_P20, d) GPR3_P21, e) GPR3_P22 kesitleri, f) GPR3_P18-GPR3_P22 kesitlerinin elde edildiği profiller (kırmızı çizgiler)



Şekil 3.70. Çalışma Alanı 3'ten elde edilen *GPR* (GPR3_P23-GPR3_P24) kesitleri. a) GPR3_P23, b) GPR3_P24, c) GPR3_P23, d) GPR3_P24 kesitlerinin elde edildiği profiller (kırmızı çizgiler)



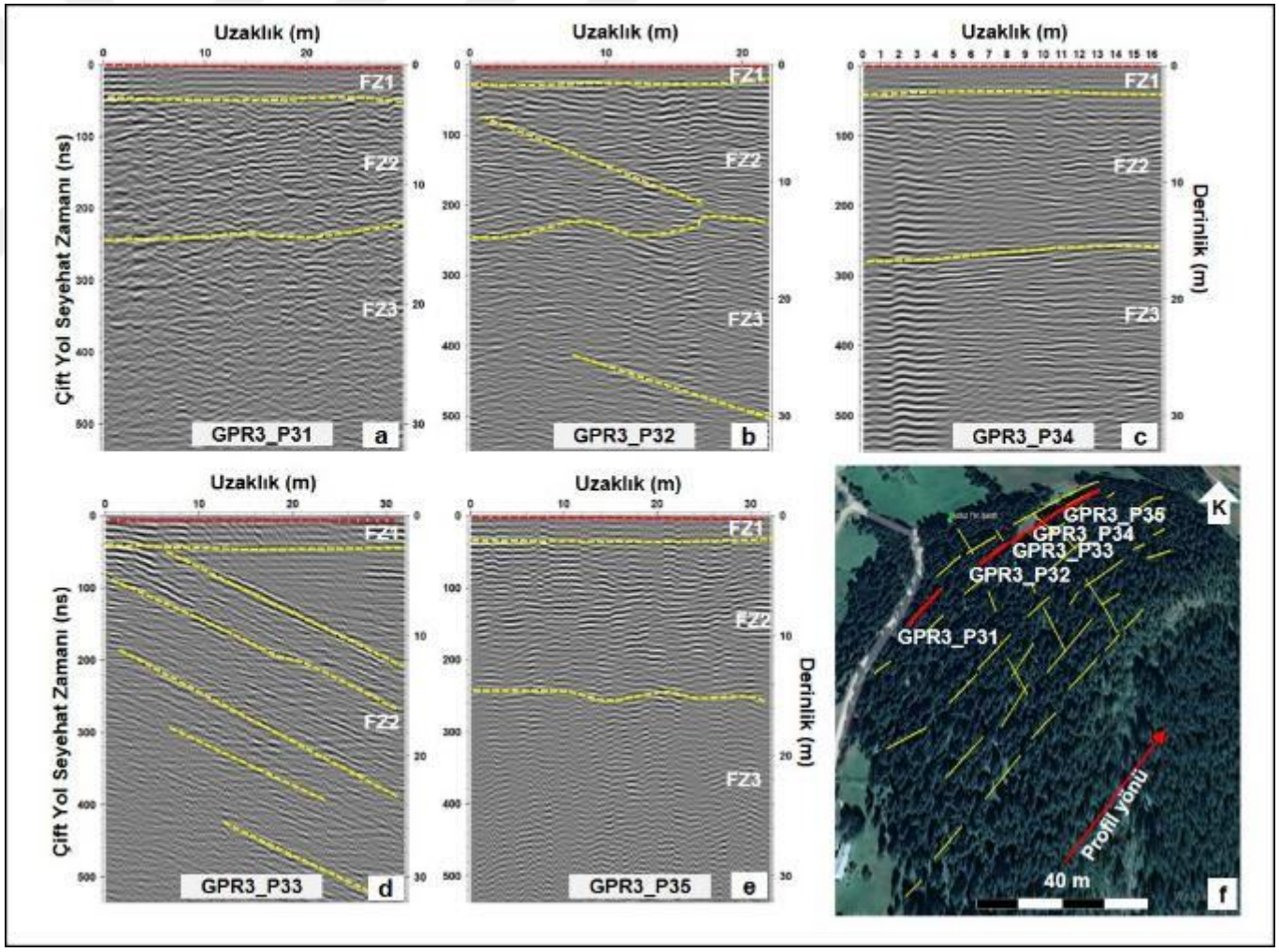
Şekil 3.71. Çalışma Alanı 3'ten elde edilen *GPR* (GPR3_P25-GPR3_P30) kesitleri. a) GPR3_P25, b) GPR3_P26, c) GPR3_P27, d) GPR3_P28, e) GPR3_P29, f) GPR3_P30 kesitleri, g) GPR3_P25-GPR3_P30 kesitlerinin elde edildiği profiller (kırmızı çizgiler)

Çalışma Alanı 3 de yer alan GPR3_P31-GPR3_P35 profillerine ait *GPR* kesitleri Şekil 3.72'de sunulmuştur. Bu kesitlerin uzunlukları yaklaşık 16-32 m arasında değişiklik göstermektedir. Bu kesitler incelendiğinde, yaklaşık 32 m derinlik bilgisine ulaşıldığı görülmektedir. Şekil 3.72'de yer alan *GPR* kesitlerinin hepsinde yaklaşık 2 yüksek genlikli yansıma yüzeyi gözlenmektedir. Bu yansıma arasında kalan alanların üç farklı fasiyes zonunu (FZ1, FZ2 ve FZ3) temsil ettiği düşünülmektedir. Fasiyes zonlarının kalınlıkları, yüzeyden derine doğru sırası ile yaklaşık 3, 14 ve 24 m'dir. Şekil 3.72b ve Şekil 3.72c'deki GPR3_P32 ve GPR3_P33 kesitlerinde eğimli ara yüzeylerin varlığı görülmektedir.

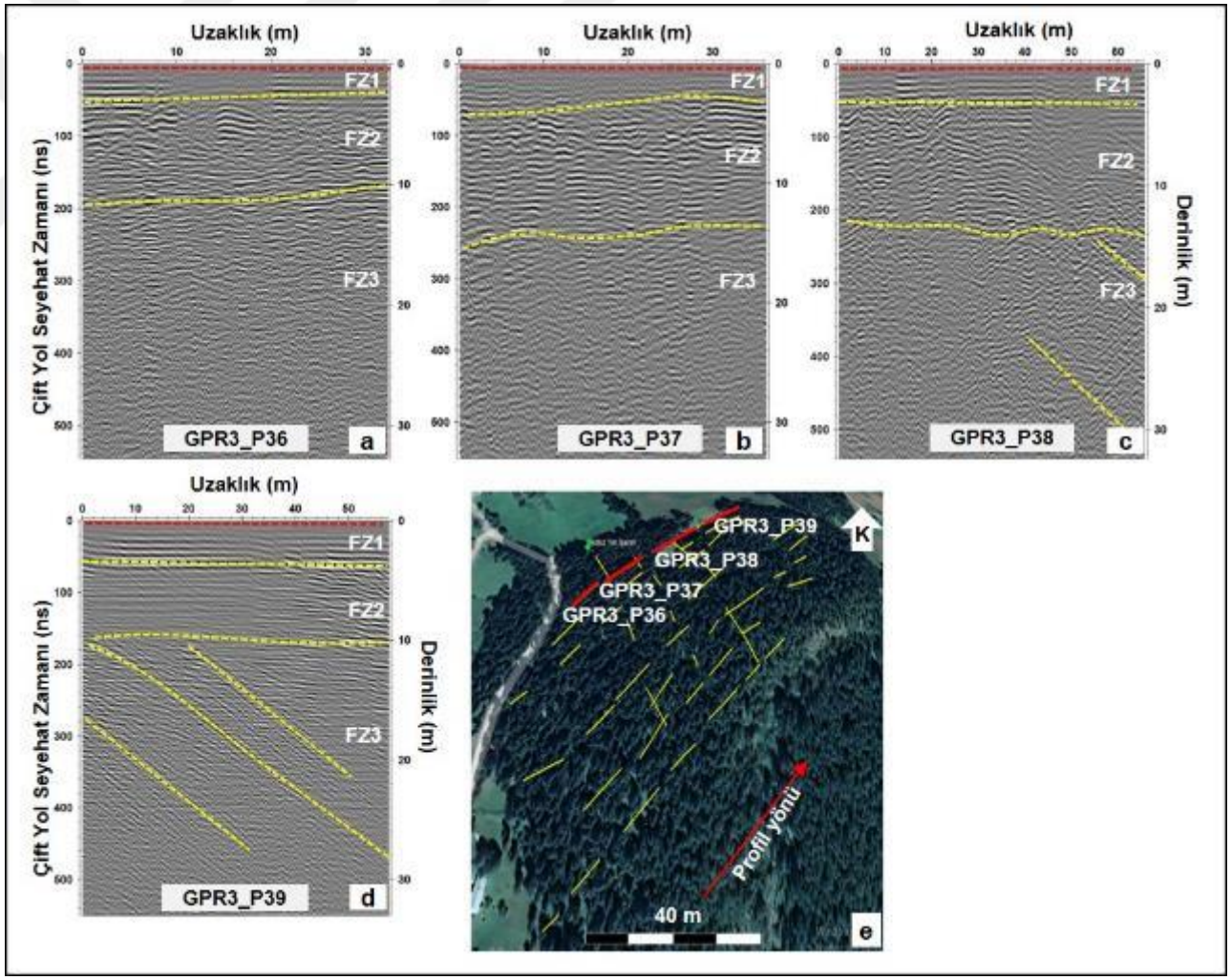
Şekil 3.73'de Çalışma Alanı 3'e ait GPR3_P36-GPR3_P39 kesitleri gösterilmektedir. Bu kesitlerin boyları yaklaşık 32-64 m arasında değişiklik göstermektedir. Şekil 3.73a-d'de yer alan *GPR* kesitlerinin hepsinde yaklaşık 2 yüksek genlikli yansıma yüzeyleri gözlenmektedir. Bu yansıma yüzeylerinin kalınlıkları yüzeyden derine doğru sırası ile yaklaşık 4, 12 ve 24 m'dir. Şekil 3.73c ve Şekil 3.73d'deki GPR3_P38 ve GPR3_P39 kesitlerinde bakıldığında faklı eğimli yansıma sınırlarının varlığı görülmektedir.

Çalışma Alanı 3'te KB-GD yönünde elde edilen GPR3_P40-GPR3_P46 kesitleri Şekil 3.74'de gösterilmektedir. Bu kesitlerin boyları yaklaşık 32-52 m arasında değişiklik göstermektedir. Şekil 3.74a, b, c'de yer alan *GPR* kesitlerinin tümünde 2 yüksek genlikli yansıma sınırı gözlenmektedir. Bu yansıma sınırları arasında kalan ara yüzeylerin kalınlıkları yüzeyden derine doğru sırası ile yaklaşık 4, 12 ve 24 m'dir. Şekil 3.74a-h'de bir adet güçlü yansıma sınırı gözlenmektedir. Yüzey ile bu yansıma sınırı arasında kalan bölgenin kalınlığı, Şekil 3.74e ve f'de yaklaşık 4 m iken Şekil 3.74g ve h'de 2 m civarındadır. Kesitlerde kendini gösteren bu yansıma sınırının üst kısmında kalan bölge jeolojik bir fasiyesi (FZ1), alt kısmında kalan bölgenin ise başka bir jeolojik fasiyesi (FZ2) temsil ettiği düşünülmektedir.

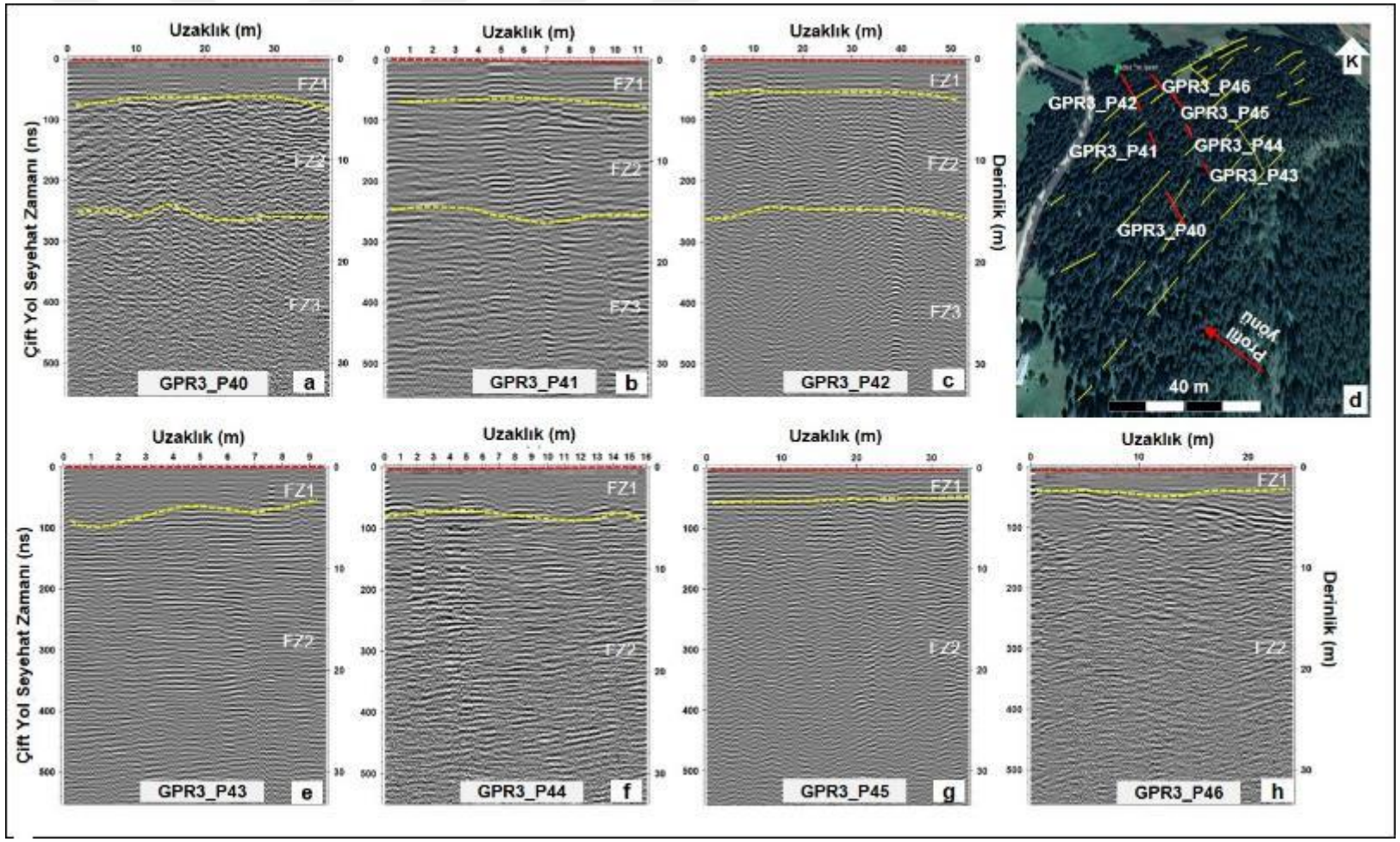
Şekil 3.75'te Çalışma Alanı 3'e ait dört *GPR* kesiti gösterilmektedir. Bu kesitlerin boyları yaklaşık 15-52 m arasında değişiklik göstermektedir. Şekil 3.75a-c'deki *GPR* kesitlerinde bir adet yüksek genlikli yansıma yüzeyi gözlenmektedir. Bu yansıma sınırının üst kısmında kalan bölge jeolojik bir fasiyesi (FZ1), alt kısmında kalan bölgenin ise başka bir jeolojik fasiyesi (FZ2) temsil ettiği düşünülmektedir. Ayrıca Şekil 3.75c kesiti üzerinde hiperbolik ve eğimli yansıtıcı yüzeylerin varlığı dikkat çekmektedir.



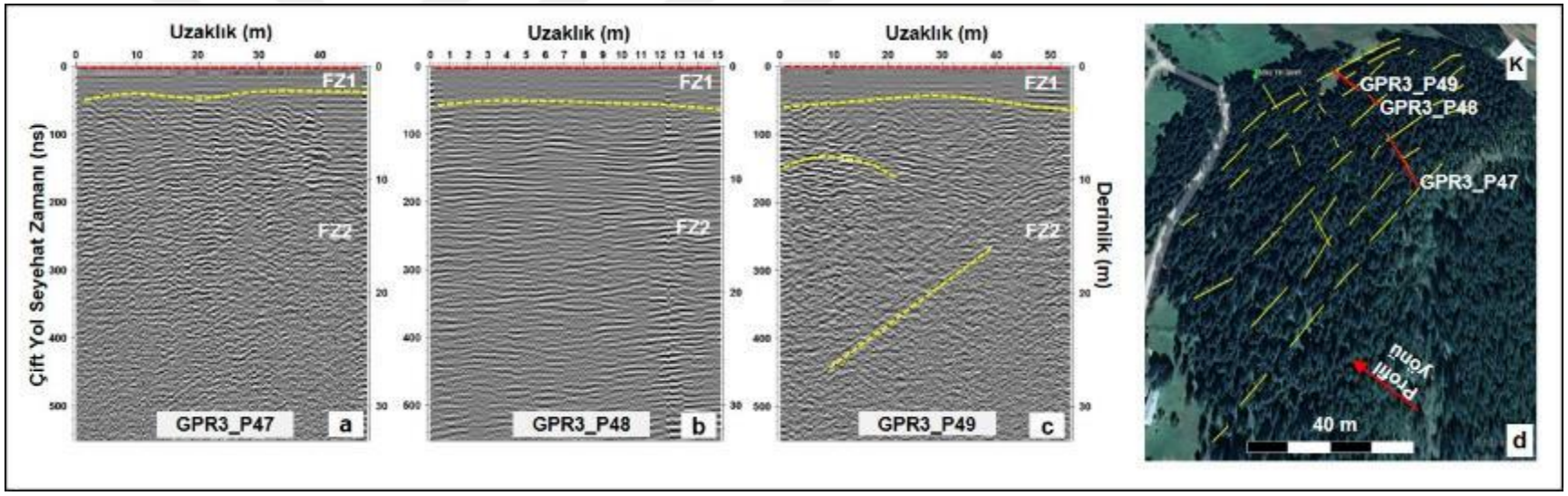
Şekil 3.72. Çalışma Alanı 3'ten elde edilen *GPR* (GPR3_P31-GPR3_P35) kesitleri. a) GPR3_P31, b) GPR3_P32, c) GPR3_P33, d) GPR3_P34, e) GPR3_P35 kesitleri, f) GPR3_P31-GPR3_P35 kesitlerinin elde edildiği profiller (kırmızı çizgiler)



Şekil 3.73. Çalışma Alanı 3'ten elde edilen *GPR* (GPR3_P36-GPR3_P39) kesitleri. a) GPR3_P36, b) GPR3_P37, c) GPR3_P38, d) GPR3_P39, e) GPR3_P36-GPR3_P39 kesitlerinin elde edildiği profiller (kırmızı çizgiler)



Şekil 3.74. Çalışma Alanı 3'ten elde edilen *GPR* (GPR3_P40-GPR3_P46) kesitleri. a) GPR3_P40, b) GPR3_P41, c) GPR3_P42, d) GPR3_P13-GPR3_P17 kesitlerinin elde edildiği profiller (kırmızı çizgiler), e) GPR3_P43, f) GPR3_P44, g) GPR3_P45 kesitleri, h) GPR3_P46 kesitleri



Şekil 3.75. Çalışma Alanı 3'ten elde edilen *GPR* (GPR3_P47-GPR3_P49) kesitleri. a) GPR3_P47, b) GPR3_P48, c) GPR3_P49, d) GPR3_P47-GPR3_P49 kesitlerinin elde edildiği profiller (kırmızı çizgiler)

Bu tez çalışmasında ayrıca suların hidrojeokimyasal özelliklerinin belirlenmesi başlığı adı altında yapılan çalışmalar incelendiğinde, yağışlı dönemi temsil eden 27.04.2022 ve 27.04.2023 tarihlerinde yapılan su örnekleri analiz sonuçları verilen Tablo 3.3 ve Tablo 3.4 incelendiğinde, su örneklerinin Çözünmüş Oksijen (DO) değerlerinin 7.56 ile 9.96 mg/l arasında ve pH değerlerinin 7.31 ile 9.11 arasında değiştiği görülmektedir. En düşük pH değeri 27.04.2022 tarihinde ikinci örnekleme noktasından elde edilen yüzey suyunda 7.31 olarak ölçülmüştür. Su örneklerine ait EC değerlerinin 108.3-338 µS/cm arasında ve sıcaklık değerlerinin 8.7-16 mg/l arasında değiştiği gözlenmektedir. En yüksek EC değerleri 2. ve 3. örnekleme noktalarından alınan yüzey suyu kaynaklarından elde edilmiştir.

Tablo 3.3 ve 3.4'deki tüm su örneklerindeki EC, pH, DO ve F değerlerine bakıldığında suların 1. Sınıf (çok iyi su) olduğu tespit edilmiştir. Fiziksel parametreler ve majör anyon-katyon analizleri açısından su örnekleri İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkında Yönetmelik (2016) ve Yerüstü Su Kalitesi Yönetmeliği (2021)'ne göre değerlendirildiğinde tüm parametrelerin standartta belirtilen sınır değerler içerisinde kaldığı belirlenmiştir.

Tablo 3.3. Su örneklerine ait fiziksel özellikler ve majör anyon-katyon içerikleri (27.04.2022 tarihli analiz sonuçları)

Örnek No	Örnek Türü	DO (mg/l)	pH	EC (µS/cm)	Sıcaklık (C^0)	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)	Na (mg/l)	K (mg/l)	HCO_3 (mg/l)	SO_4 (mg/l)	Cl (mg/l)	F (mg/l)	NO_2 (mg/l)	NO_3 (mg/l)
1	Yüzey Suyu	8,57	8,19	137,8	14,5	24,54	4,01	6,47	1	77,96	11,23	3,71	0,06	<0,063	3,903
2	Yüzey Suyu	7,56	7,31	249	14,9	51,9	6,34	6,03	0,54	147,09	21,3	7,88	0,09	<0,126	1,686
3	Yüzey Suyu	9,25	8,14	338	15,7	73,46	4,3	7,05	1,88	181,21	35,68	9,48	0,07	<0,127	10,735
4	Yüzey Suyu	8,16	7,61	115.9	16,0	21,07	3,12	6,71	0,93	68,95	9,98	3,65	0,05	<0,062	3,121
5	Yüzey Suyu	8,37	7,69	110.2	15,0	18,38	4,36	7,54	0,6	64,14	9,77	3,15	0,05	<0,063	3,238
6	Çal Mağ. nehri(sifon)	9,50	7,32	108.3	10,6	19,96	4,77	7,41	0,56	70,17	10,45	3,16	0,05	<0,062	3,63
7	Çal Mağ. Nehri(uzun kol)	9,94	8,01	165.0	8,7	36,97	5,76	6,60	0,97	109,2	17,20	9,3	0,07	<0,126	6,17
8	Çal Mağ. Nehri(iki kol kesişim)	9,74	7,82	137,6	9,5	29,43	4,87	7,91	0,83	90,65	12,23	2,88	0,05	<0,067	4,64
9	Çal Mağ. Nehri(giriş havuzu)	9,71	7,48	127,4	9,6	26,51	5,00	7,72	0,95	68,07	12,34	4,14	0,05	<0,067	4,383
TS266	**En Yüksek Değer**		**6,5-9,5**	**2500**							**250**	**250**	**1,5**	**0,5**	**50**
YSK		**>8 I(çok iyi) 6 II(iyi) <6 III(orta)**	**6-9 (I.,II., III.sınıf)**	**<400 I(çok iyi) 1000 II(iyi) >1000 III(orta)**									**≤1 I(çok iyi) 1,5 II(iyi) >1,5 III(orta)**		

Tablo 3.4. Su örneklerine ait fiziksel özellikler ve majör anyon-katyon içerikleri (27.04.2023 tarihli analiz sonuçları)

Örnek No	Örnek Türü	DO (mg/l)	pH	EC (µS/cm)	Sıcaklık (C^0)	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)	Na (mg/l)	K (mg/l)	HCO_3 (mg/l)	SO_4 (mg/l)	Cl (mg/l)	F (mg/l)	NO_2 (mg/l)	NO_3 (mg/l)
1	Yüzey Suyu	9,47	8,98	152,4	9	31,82	5,20	7,94	1,31	93,45	16,91	5,24	0,07	<0,063	6,586
2	Yüzey Suyu	8,85	8,50	272	9,3	63,74	5,88	7,48	0,80	159,6	27,96	14,88	0,10	n,d,	5,970
3	Yüzey Suyu	8,40	8,62	283	9,4	76,48	4,38	7,70	2,02	181,9	34,44	10,37	0,01	n,d,	9,610
4	Yüzey Suyu	9,25	8,87	124,8	9	27,90	3,96	6,20	1,13	74,29	9,98	3,73	0,07	0,062	6,082
5	Yüzey Suyu	9,53	8,97	125,9	9	25,60	6,16	7,60	0,62	79,63	14,30	3,40	0,07	0,062	6,170
6	Çal Mağ, nehri(sifon)	9,52	8,65	138,3	8,7	28,64	6,51	8,00	0,80	89,10	14,92	3,78	0,07	n,d,	5,802
7	Çal Mağ, Nehri(uzun kol)	9,96	9,11	197,7	9	47,42	5,92	7,28	1,40	133,3	20,60	10,56	0,09	0,126	8,094
8	Çal Mağ, Nehri(iki kol kesişim)	9,56	9,02	169,8	8,8	39,30	5,73	8,60	1,03	111,6	17,07	4,02	0,08	n,d,	6,860
9	Çal Mağ, Nehri(giriş havuzu)	9,33	9,10	169,3	9,1	39,40	5,66	8,03	1,00	112,5	17,44	5,10	0,06	n,d,	6,400
TS266	**En Yüksek Değer**		**6,5-9,5**	**2500**							**250**	**250**	**1,5**	**0,5**	**50**
YSK		**>8 I(çok iyi) 6 II(iyi) <6 III(orta)**	**6-9 (I.,II., III,sınıf)**	**<400 I(çok iyi) 1000 II(iyi) >1000 III(orta)**									**≤1 I(çok iyi) 1,5 II(iyi) >1,5 III(orta)**		

27.04.2022 ve 27.04.2023 tarihlerinde yapılan analiz sonuçlarına göre hazırlanan iz element analiz sonuçları Tablo 3.5 ve tablo 3.6'te gösterilmektedir. Tablo 3.5 ve Tablo 3.6 incelendiğinde, su örneklerinin tüm değerlerinin İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkındaki Yönetmelik (2005)'te tanımlanan sınır değerleri içerisinde yer aldığı görülmektedir.

Yerüstü Su Kalitesi Yönetmeliği (2021) suların kullanım amaçlarına göre kalite sınıflandırmalarını yapmaktadır. Yönetmelik suları kalite yönünden 3 sınıfa ayırmaktadır. Bunlar; Sınıf I: Yüksek kaliteli su (çok iyi su), Sınıf II: Az kirlenmiş su (iyi su), Sınıf III: Kirlenmiş su (orta su)'dur. Tablo 3.5 ve tablo 3.6 Yerüstü Su Kalitesi Yönetmeliği (2021)'ne göre değerlendirildiğinde, su örneklerinin tümünde Se ve Mn değerlerinin yönetmelikte belirtilen sınır değerleri içerisinde yer aldığı ve bu değerlere bakıldığında suların 1. sınıf (çok iyi) su olduğu görülmektedir.

Tablo 3.5. Su örneklerine ait iz element içerikleri (27.04.2022 tarihli analiz sonuçları)

Örnek No		Sb (µg/l)	Ag (µg/l)	Al (µg/l)	As (µg/l)	Cu (µg/l)	Ba (µg/l)	Be (µg/l)	B (µg/l)	Zn (µg/l)	Fe (µg/l)	Cd (µg/l)	Co (µg/l)	Cr (µg/l)	Pb (µg/l)	Ni (µg/l)	Ti (µg/l)	Se (µg/l)	V (µg/l)	Mn (µg/l)	Mo (µg/l)
1		<0,01	<0.1	19,612	0,513	0,621	12,172	<0.1	3,260	7,100	19,313	<0.1	0,061	0,984	<0.1	0,548	0,745	<0.1	1,326	0,298	**<0.1**
2		<0.1	<0.1	38,935	0,184	1,225	13,003	0,622	3,277	81,709	19,333	0,491	0,433	2,814	0,552	1,275	2,447	<0.1	1,420	0,988	**<0.1**
3		<0.1	<0.1	6,865	0,371	0,382	38,246	<0.1	2,772	10,154	3,814	<0.1	0,095	2,284	<0.1	0,694	0,289	<0.1	0,761	0,725	**<0.1**
4		<0.1	<0.1	29,644	0,383	0,782	10,598	0,333	3,985	40,652	57,181	0,196	0,211	1,607	0,111	0,675	1,398	<0.1	1,905	0,511	**<0.1**
5		<0.1	<0.1	17,987	0,244	0,628	3,125	0,247	5,655	29,787	14,990	0,124	0,152	1,616	0,011	0,460	1,036	<0.1	2,597	0,407	**<0.1**
6		<0.1	<0.1	27,574	0,336	0,684	3,589	0,191	5,358	21,650	14,123	<0.1	0,125	1,582	<0.1	0,465	0,946	<0.1	2,331	0,497	**<0.1**
7		<0.1	<0.1	14,879	0,501	0,792	12,561	0,584	3,811	78,518	18,613	0,446	0,387	2,439	<0.1	0,831	1,008	<0.1	1,812	0,667	**<0.1**
8		<0.1	<0.1	13,578	0,343	0,678	8,348	0,222	4,076	30,166	17,034	0,132	0,161	1,910	<0.1	0,572	0,667	<0.1	2,097	0,335	**<0.1**
9		<0.1	<0.1	16,210	0,274	0,871	6,559	0,514	4,669	67,405	17,675	0,383	0,331	2,159	0,333	0,760	1,329	<0.1	2,248	0,688	**<0.1**
TS266	**En Yüksek Değer**	5		**200**	**10**	**2000**			**1000**		**200**	**5**		**50**	**10**	**20**	-	**10**		**50**	
YSK																		**≤10 I(çok iyi) 15 II(iyi) >15 III(orta)**		**≤100 I(çok iyi) 500II(iyi) >500 III(orta)**	

Tablo 3.6. Su örneklerine ait iz element içerikleri (27.04.2023 tarihli analiz sonuçları)

Örnek No		Sb (µg/l)	Ag (µg/l)	Al (µg/l)	As (µg/l)	Cu (µg/l)	Ba (µg/l)	Be (µg/l)	B (µg/l)	Zn (µg/l)	Fe (µg/l)	Cd (µg/l)	Co (µg/l)	Cr (µg/l)	Pb (µg/l)	Ni (µg/l)	Ti (µg/l)	Se (µg/l)	V (µg/l)	Mn (µg/l)	Mo (µg/l)
1		<0,1	0,01	126,98	0,75	2,51	111,74	-	19,90	42,57	159,49	<0,1	<0,1	<0,1	0,18	1,22	4,41	1,31	1,59	8,95	<0,1
2		<0,1	<0,1	90,86	0,80	2,06	109,49	-	15,05	48,12	95,78	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	1,82	5,87	1,47	0,81	9,70	<0,1
3		<0,1	0,10	31,69	0,94	1,11	127,41	-	15,48	46,87	35,22	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	1,64	0,82	0,98	0,30	7,78	<0,1
4		<0,1	<0,1	131,77	0,74	2,26	107,47	-	14,31	44,78	217,82	<0,1	<0,1	<0,1	0,14	0,99	3,50	1,64	1,98	22,55	<0,1
5		<0,1	<0,1	130,47	0,77	2,71	104,82	-	18,66	44,30	170,31	<0,1	<0,1	<0,1	0,12	0,82	5,47	1,54	2,71	9,96	<0,1
6		<0,1	0,10	142,21	0,84	3,25	129,94	-	22,10	56,15	208,56	<0,1	<0,1	0,16	0,24	1,00	5,65	1,37	2,95	8,59	<0,1
7		<0,1	<0,1	60,10	0,78	2,15	126,30	-	17,50	49,72	74,814	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	1,33	2,14	1,40	1,56	2,06	<0,1
8		<0,1	<0,1	99,31	0,79	1,76	132,67	-	18,45	47,20	139,81	<0,1	<0,1	0,16	0,10	1,13	4,15	1,70	2,18	3,52	<0,1
9		<0,1	<0,1	78,64	0,77	1,90	125,27	-	18,63	48,72	88,933	<0,1	<0,1	0,13	<0,1	1,08	2,82	1,41	1,98	2,65	<0,1
TS266	**En Yüksek Değer**	5		**200**	**10**	**2000**			**1000**		**200**	**5**		**50**	**10**	**20**	-	**10**		**50**	
YSK																		**≤10 I(çok iyi) 15II(iyi) >15 III(orta)**		**≤100 I(çok iyi) 500 II(iyi) >500 III(orta)**	

Tablo 3.7'deki kurak dönemi temsil eden 19.09.2022 tarihinde yapılan analiz sonuçları incelendiğinde, DO değerlerinin 5.44-9.49 mg/l arasında, EC değerlerinin 162.1-277 µS/cm arasında ve sıcaklık değerlerinin ise 10.7-18.6 ^{0}C arasında değiştiği gözlenmektedir. En yüksek EC değerleri 2. ve 3. örnekleme noktalarından alınan yüzey suyu kaynaklarından elde edilmiştir. Yerüstü Su Kalitesi Yönetmeliği (2021)'ne göre, 1. su örneği hariç diğer tüm örneklerin DO değerlerine bakıldığında suların 1. sınıf (çok iyi su) olduğu, 1. örnekleme noktasındaki suyun ise 3. Sınıf (orta) olduğu belirlenmiştir. Fiziksel parametreler ve majör anyon-katyon analizleri açısından su örnekleri, İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkında Yönetmelik (2005)' e göre değerlendirildiğinde ise tüm parametrelerin standartta belirtilen sınır değerleri içerisinde kaldığı belirlenmiştir.

Kurak dönem (19.09.2022)'de iz element analiz sonuçlarını gösteren Tablo 3.8 incelendiğinde, tüm örnekleme değerlerinin İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkında Yönetmelik (2005)'te tanımlanan sınır değerlerinin içerisinde olduğu belirlenmiştir. Tablo 3.8, Yerüstü Su Kalitesi Yönetmeliği (2021)'ne göre değerlendirildiğinde; dokuz farklı noktadan alınan su örneklerinin tümünde Se ve Mn değerlerinin bu yönetmelikte belirtilen sınır değerlerinin içerisinde yer aldığı ve bu değerlere bakıldığında suların 1. sınıf (orta) su olduğu görülmektedir.

Tablo 3.7. Su örneklerine ait fiziksel özellikler ve majör anyon-katyon içerikleri (19.09.2022 tarihli analiz sonuçları)

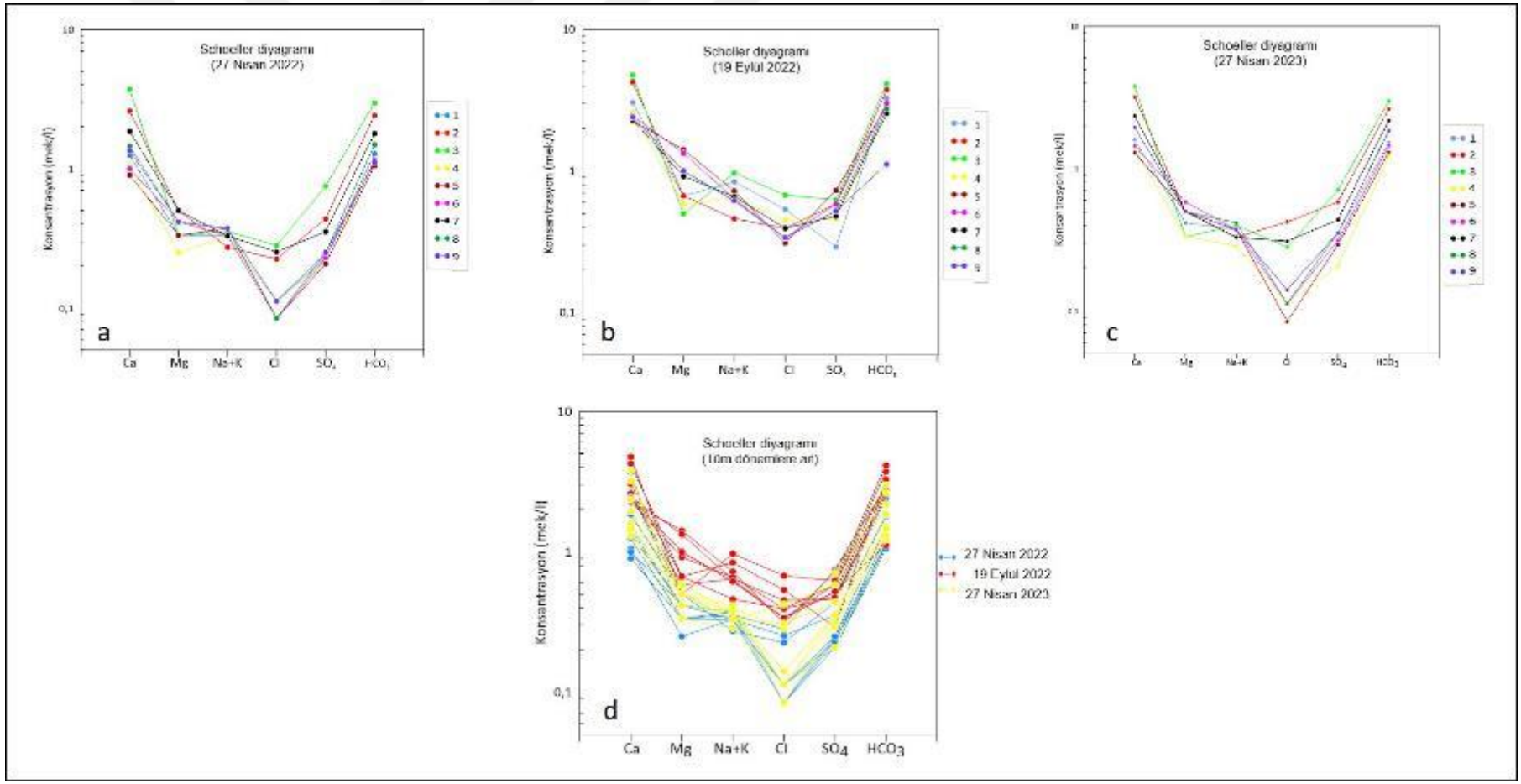
Örnek No	Örnek Türü	DO (mg/l)	pH	EC (µS/cm)	Sıcaklık (C^0)	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)	Na (mg/l)	K (mg/l)	HCO_3 (mg/l)	SO_4 (mg/l)	Cl (mg/l)	F (mg/l)	NO_2 (mg/l)	NO_3 (mg/l)
1	Yüzey Suyu	5,44	-	199,3	17,4	60,83	8,30	13,52	8,90	198,75	14,08	19,11	0,12	0,162	1,782
2	Yüzey Suyu	8,23	-	230	15,4	84,80	7,75	9,77	0,96	227,59	28,23	14,13	0,13	0,150	4,342
3	Yüzey Suyu	7,66	-	277	15,7	94,67	5,93	17,23	9,58	251,72	29,74	23,85	0,11	0,201	15,303
4	Yüzey Suyu	7,96	-	162,1	16,9	51,76	6,93	13,24	3,22	155,47	22,23	15,84	0,10	0,148	7,463
5	Yüzey Suyu	8,00	-	178,5	18,6	44,50	16,52	15,50	0,98	174,63	34,50	10,64	0,10	0,150	5,236
6	Çal Mağ. nehri(sifon)	9,24	-	181,3	13,8	48,87	15,80	13,60	0,96	182,47	28,41	11,48	0,10	0,147	6,198
7	Çal Mağ. Nehri(uzun kol)	9,44	-	165.9	11,6	46,07	11,36	14,08	2,10	155,90	22,87	13,65	0,10	0,144	10,000
8	Çal Mağ. Nehri(iki kol kesişim)	9,38	-	172,4	11,2	47,94	12,38	12,90	1,68	167,23	24,62	11,72	0,10	0,142	8,623
9	Çal Mağ. Nehri(giriş havuzu)	9,49	-	171,8	10,7	47,80	12,30	13,17	1,73	68,07	24,26	12,09	0,10	0,140	8,814
TS266	**En Yüksek Değer**		**6,5-9,5**	**2500**				**200**			**250**	**250**	**1,5**	**0,5**	**50**
YSK		**>8 I(çok iyi) 6 II(iyi) <6 III(orta)**	**6-9 (I.,II., III.sınıf)**	**<400 I(çok iyi) 1000 II(iyi) >1000 III(orta)**									**≤1 I(çok iyi) 1,5 II(iyi) >1,5 III(orta)**		

Tablo 3.8. Su örneklerine ait iz element içerikleri (19.09.2022 tarihli analiz sonuçları)

Örnek No		Sb (mg/l)	Ag (mg/l)	Al (mg/l)	As (mg/l)	Cu (mg/l)	Ba (mg/l)	Be (mg/l)	B (mg/l)	Zn (mg/l)	Fe (mg/l)	Cd (mg/l)	Co (mg/l)	Cr (mg/l)	Pb (mg/l)	Ni (mg/l)	Ti (mg/l)	Se (mg/l)	V (mg/l)	Mn (mg/l)	Mo (mg/l)
1		0,33	<0.1	43,03	1,53	3,54	249,78	<0.1	41,88	50,76	44,17	0,13	0,48	0,60	<0.1	2,39	2,21	2,48	1,65	307,98	0,66
2		0,21	<0.1	<0.1	0,38	<0.1	5,09	<0.1	<0.1	5,73	9,49	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	1,51	<0.1	6,24	0,30
3		0,22	<0.1	<0.1	0,37	<0.1	0,55	<0.1	<0.1	5,59	22,35	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0,30	1,41	<0.1	<0.1	0,29
4		0,28	<0.1	14,32	0,96	1,05	55,73	<0.1	20,40	12,32	50,40	<0.1	0,11	1,72	0,35	0,73	1,22	2,90	1,52	5,03	0,56
5		0,22	<0.1	<0.1	0,51	<0.1	19,54	<0.1	1,85	9,36	28,84	<0.1	<0.1	<0.1	0,26	<0.1	0,11	1,70	0,37	5,33	0,33
6		0,26	<0.1	11,35	1,01	1,05	65,98	<0.1	30,86	20,53	16,39	<0.1	<0.1	1,67	0,67	0,54	1,41	1,39	3,75	4,62	0,63
7		0,27	<0.1	16,57	0,82	0,94	36,86	<0.1	18,06	14,27	14,69	<0.1	<0.1	1,97	0,93	0,51	0,82	2,39	3,58	1,58	0,51
8		0,27	<0.1	19,03	0,87	0,92	29,69	<0.1	19,85	11,26	15,22	<0.1	<0.1	1,91	1,10	0,42	0,77	2,65	3,57	1,47	0,56
9		0,22	<0.1	<0.1	0,47	<0.1	1,30	<0.1	<0.1	5,62	21,23	<0.1	<0.1	<0.1	0,79	<0.1	0,13	<0.1	0,11	<0.1	0,30
TS266	**En Yüksek Değer**	5		**200**	**10**	**2000**			**1000**		**200**	**5**		**50**	**10**	**20**	-	**10**		**50**	
YSK																		**≤10 I(çok iyi) 15 II(iyi) >15 III(orta)**		**≤100 I(çok iyi) 500 II(iyi) >500 III(orta)**	

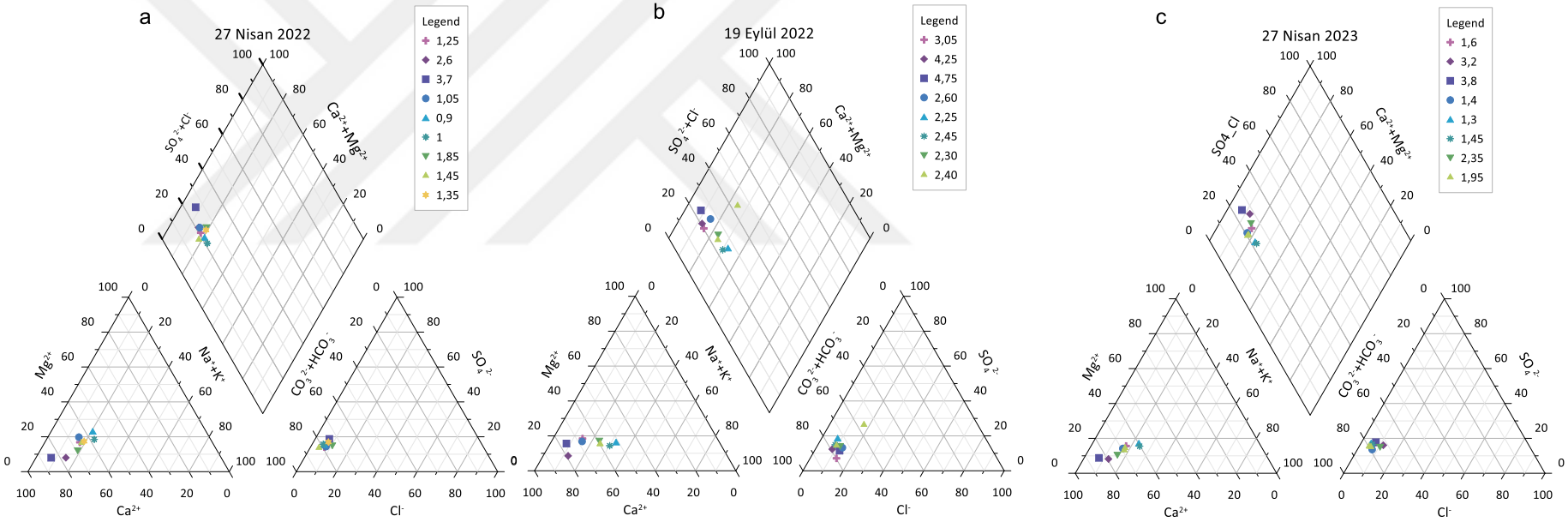
Bu tez kapsamında 27.04.2022/27.04.2023 (yağışlı dönem) ve 19.09.2022 (kurak dönem) su numunelerinin analizi sonucunda, fiziksel özellikleri ve majör anyon-katyon içerikleri karşılaştırıldığında; DO değer ortalamasının çok fazla değişmediği, yağışlı ve kurak dönemde sırası ile 7.98 mg/l ve 8.98 mg/l olduğu görülmektedir. Yağışlı dönemde elde edilen ortalama pH değeri 8.3 iken, bu değer kurak dönemde, alet kalibrasyonu iyi yapılamadığı için ölçülememiştir. EC yağışlı dönemde ortalama 173.46 µS/cm değerine sahipken, kurak dönemde 193.14 µS/cm değerine yükselmiştir. Bu yükselişin nedeninin, kurak dönemde, su miktarının azalmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Ortalama katyon (Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^{+} ve K^{+}) içerikleri yağışlı dönemde sırasıyla, 33.58, 4.73, 7.34 ve 1.02 mg/l iken, kurak dönemde artarak sırasıyla 58.58, 10.81, 3.35 ve 10.81 mg/l değerlerine ulaşmıştır. Ortalama anyon değeri (Cl^{-}, F^{-}, SO_4^{-2}, NO_2^{-} ve NO_3^{-}) içerikleri yağışlı dönemde sırasıyla; 6.02, 0.06, 17.43, 0.08 ve 6.72 mg/l iken, bu değerler kurak dönemde sırasıyla 14.72, 0.11, 25.44, 0.15 ve 7.53 mg/l değerlerine ulaşmıştır. Su analizlerinde HCO_3 içeriğinin yağışlı dönemde ortalama 106.26 mg/l iken, bu değer kurak dönemde yaklaşık iki kat artış göstererek 175.76 mg/l değerine ulaşmıştır.

27.04.2022/27.04.2023 (yağışlı dönem) ve 19.09.2022 (kurak dönem) analiz sonuçlarına ait Schoeller ve Piper diyagramları Şekil 3.76 ve Şekil 3.77'de gösterilmektedir. Şekil 3.76'daki tüm dönemlere ait Schoeller grafikleri incelendiğinde, iyonların mek/l değerlerini birleştiren doğruların birbirine yaklaşık paralel olduğu görülmektedir. Analiz sonuçlarını birleştiren bu doğruların birbirine yaklaşık paralellik göstermesi suların aynı jeolojik formasyonlardan beslendiğini göstermektedir. Ayrıca Ca^{2+} içeriklerinin Mg^{2+}, Na^{+} ve K^{+} içeriklerinden daha yüksek ve HCO_3 içeriklerinin de Cl^{-} ve SO_4^{2-} içeriklerinden daha yüksek olduğu belirlenmiştir.



Şekil 3.76. Schoeller diyagramları. a) 27.04.2022 tarihli analiz sonuçlarına göre hazırlanan Schoeller diyagramı, b) 19.09.2022 tarihli analiz sonuçlarına göre hazırlanan Schoeller diyagramı, c) 27.04.2023 tarihli analiz sonuçlarına göre hazırlanan Schoeller diyagramı, d) tüm analiz sonuçlarının tek bir Schoeller diyagramında gösterimi

Şekil 3.77'de tüm dönemlere ait analiz sonuçlarına göre hazırlanan Piper Diyagramları görülmektedir. Eşkenar üçgenler dikkate alındığında su örneklerinin Ca-HCO3 su tipinde olduğu görülmektedir. Su örneklerinde baskın katyonlar Ca iken baskın anyon HCO3'tür, ayrıca Cl ve SO4 içerikleri oldukça düşük değerlerdedir. Eşkenar dörtgen dikkate alındığında su örneklerinde Ca+Mg > Na+K içeriği olduğu dikkat çekmektedir. Su örneklerinin karbonat sertliğinin %50'den fazla olduğu yani yüksek sertlikte sular olduğu belirlenmiştir. Bu tip sular CaCO3 ve MgCO3 tipinde sular olarak tanımlanmaktadır.



Şekil 3.77. Piper diyagramları. a) 27.04.2022 tarihli analiz sonuçlarına göre hazırlanan Piper diyagramı, b) 19.09.2022 tarihli analiz sonuçlarına göre hazırlanan Piper diyagramı, c) 27.04.2023 tarihli analiz sonuçlarına göre hazırlanan Piper diyagramı

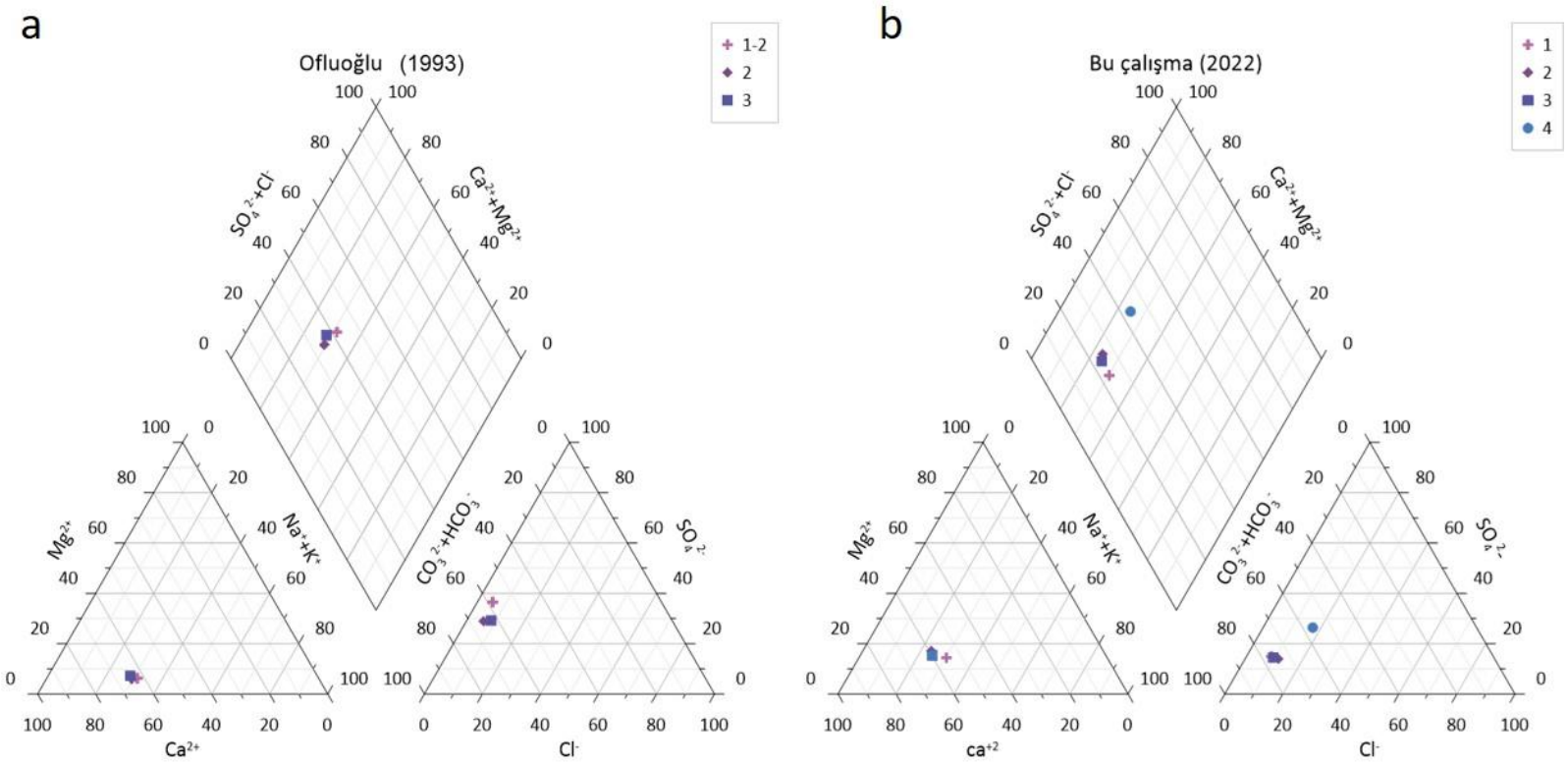
Ofluoğlu (1993)'nun Eylül ayında, Çal Mağarası içerisinden elde etmiş olduğu su analizleri sonucu ile bu tez kapsamında Eylül ayında elde edilen su analizi sonuçları, Tablo 3.9'da verilmiştir. Ofluoğlu (1993) analiz edilen su numunelerindeki Na^+ değeri ortalama 3.795 mg/l iken, 29 yıllık sürecin ardından bu çalışma kapsamında elde edilen Na^+ değerinin artarak, ortalama değerin 13.438 mg/l 'ye yükseldiği görülmektedir. İki analiz sonucu karşılaştırıldığında, ortalama K^+ değerinin 1.9 mg/l'den 1.61'e düştüğü saptanmıştır. Ca^{2+} ve Mg^{2+} ortalama değerleri Ofluoğlu (1993)'te sırasıyla ortalama 86 mg/l ve 24.6 mg/l iken, bu çalışma kapsamında yaklaşık yarı değerleri olan ortalama 47.67 mg/l ve 12.96 mg/l değerlerine düşmüştür. SO_4^{2-} değerleri 29 yıl önce ortalama 426.17 mg/l civarında iken, günümüzde 17 kat azalarak 25.04 mg/l olduğu belirlenmiştir. K^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}, SO_4^{2-} ve Cl- ve EC değerlerinin aradan geçen 29 yıllık süreçte azalmasının nedenin, mağarayı besleyen yüzey suyu girişlerinin arttığının düşünülmesidir. Yüzey sularının iyon konsantrasyonu çok düşük olduğu için mağara suyundaki iyonların konsantrasyonunu düşürmüştür.

Tablo 3.9. Ofluoğlu (1993)'nun Eylül ayında, Çal Mağarası içerisinden elde etmiş olduğu su analizleri sonucu ile bu çalışma kapsamında Eylül ayında elde edilen su analizi sonuçları

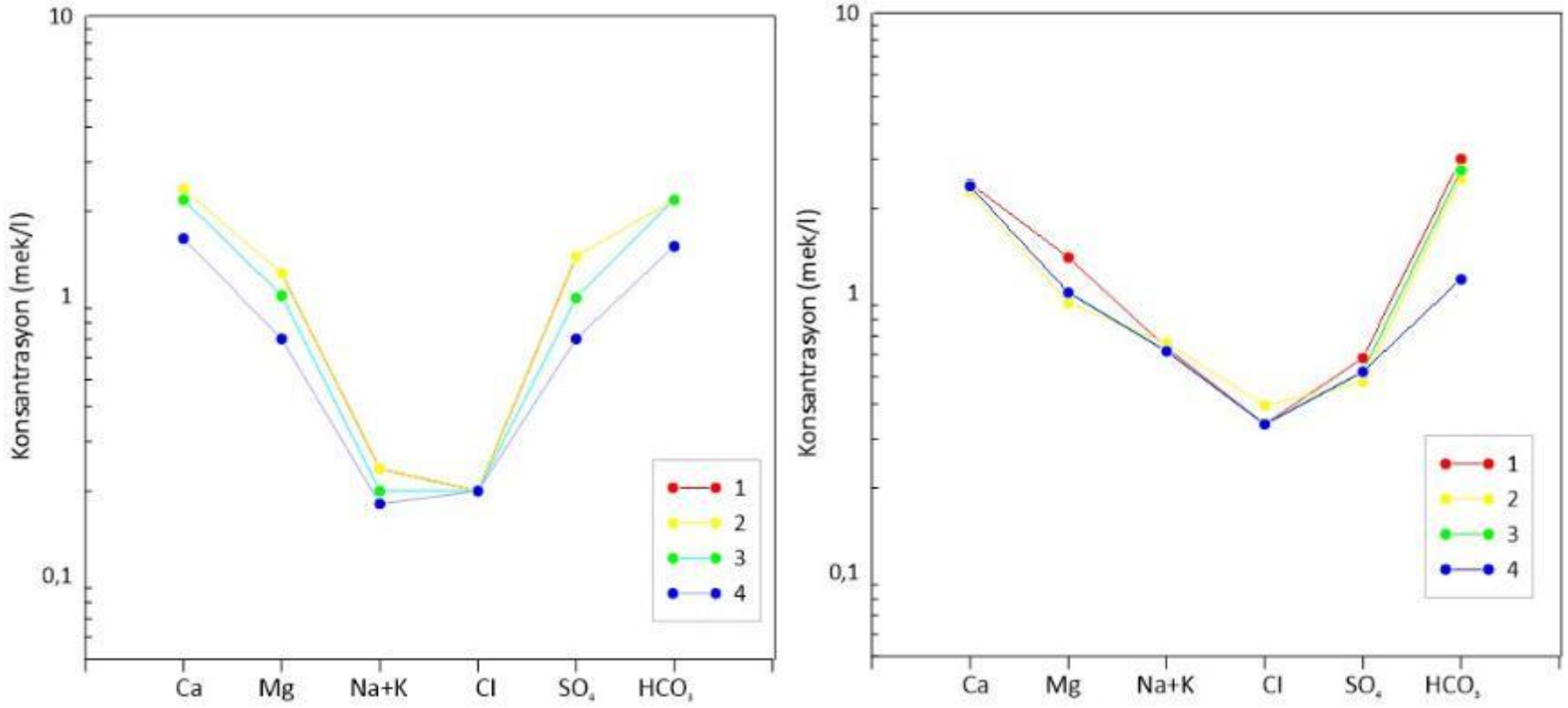
	Çal Mağarası nehrinin sifonu		Çal Mağarası nehrinin Uzun kolu		Mağaranın kollarının kesiştiği yer		Mağara girişindeki havuz	
	Ofluoğlu (1993)	Bu Çalışma (2022)	Ofluoğlu (1993)	Bu Çalışma (2022)	Ofluoğlu (1993)	Bu Çalışma (2022)	Ofluoğlu (1993)	Bu Çalışma (2022)
Na (mg/l)	4.14	13.60	4.14	14.08	4.14	12.90	2.76	13.17
K (mg/l)	2.34	0.96	2.34	2.10	0.78	1.68	2.14	1.73
Ca (mg/l)	96	48.87	96.00	46.07	88.00	47.94	64.00	47.80
Mg (mg/l)	28.80	15.80	28.80	11.36	24.00	12.38	16.80	12.30
SO4 (mg/l)	132.48	28.41	132.48	22.87	94.01	24.62	67.20	24.26
Cl(mg/l)	7.10	11.48	7.10	13.65	7.10	11.72	7.10	12.09
EC	270.00	181.30	270.00	165.9	260.00	172.40	180	171.80

Şekil 3.78a'da gösterilen Ofluoğlu (1993) piper diyagramı incelendiğinde; yeraltı nehrinden alınan su numuneleri analizi sonucu, baskın iyon çiftinin Ca^{+2} ve HCO_3 olduğu sonucuna varılmıştır. Bu çalışma kapsamındaki numunelerden elde edilen Şekil 3.78'deki piper diyagramı sonucunda da su numunelerinde baskın katyonlar Ca^{+2} iken baskın anyonun HCO_3 olduğu görülmektedir. Ofluoğlu (1993)' nun yarı Schoeller Diyagramı'ndaki (Şekil 3.79a) su numunelerinin kimyasal analiz sonuçlarının birbirine benzerlik gösterdikleri ve grafikteki noktaları birleştiren doğruların paralellik gösterdiği belirtilmiştir. Bu tez kapsamında Eylül ayında alınan analiz sonuçlarına göre hazırlanan Schoeller Grafiği (Şekil

3.79b) incelendiğinde, grafikteki noktaları birleştiren doğruların birbirine yaklaşık paralel olduğu saptanmıştır.



Şekil 3.78. Piper diyagramları. a) Ofluoğlu (1993) Eylül ayı analiz sonuçlarından elde edilen piper diyagramı, b) Bu çalışmadaki 19 Eylül 2022 yılı analiz sonuçlarından elde edilen piper diyagramı



Şekil 3.79. Schoeller diyagramları. a) Ofluoğlu (1993) Eylül ayı analiz sonuçlarından elde edilen schoeller diyagramı, b) Bu çalışmadaki Eylül ayı analiz sonuçlarından elde edilen schoeller diyagramı

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

1. Bu tez çalışması kapsamında üç farklı çalışma alanından alınan *ERT, GPR, SRT, MASW* ve *SP* verilerinden elde edilen bulgular incelendiğinde, karstik oluşumların yerleri ve su içeriği fazla olan bölgeleri *ERT* yöntemi, diğer dört yönteme (*SP, SRT, MASW* ve *GPR*) kıyasla daha belirgin (derinlik, çözünürlük, şekil vb.) şekilde açığa çıkarmıştır. Tüm çalışma alanlarında maksimum araştırma derinliği bilgisine *ERT* kesitlerinden ulaşılarak, Çalışma Alanı 2 deki 600 m uzaklık eksenine sahip ERT2_P1 (Şekil 3.25) kesitinden maksimum derinlik (~120 m) bilgisi elde edilmiştir.
2. Çalışma alanlarından elde edilen *SP* verilerinden oluşturulan *SP* haritaları (Şekil 3.7 ve Şekil 3.36) incelendiğinde, *SP* değerlerinin düşük olduğu (mavi renkle temsil edilen) kapanımlar şeklinde değişimler gösteren alanlar, yeraltı su hareketliliğinin göstergesi olarak değerlendirilmiştir. Ayrıca bu haritalarda nispeten yüksek *SP* değerleri (kırmızı renkle temsil edilen) etrafında oluşan kapanımların ise çalışma sahası içerisindeki küçük boyutlu boşluklara veya mağaralara karşılık gelebileceği düşünülmektedir.
3. *SRT* kesitleri ile çalışma alanlarının Vp hız dağılımları elde edilmiştir. Bu Vp hız dağılımları dikkate alınarak, çalışma alanlarının tamamında dört tabakalı bir yer modeli tespit edilmiştir. Yüzeyden derine doğru bu tabaka hızları; sırasıyla 820, 2130, 3200 ve 4730 m/sn olarak belirlenmiştir. Bu ortamların tabaka kalınlıkları kendi içerisinde değişiklik göstermektedir. *SRT* kesitlerinden elde edilen hız değerleri yüzeyden derine doğru artış gösterdiği için, yüzeydeki tabakanın çok ayrışmış, daha alttaki tabakaların ise az ayrışmış ya da masif kayadan oluşmuş olabileceği düşünülmektedir. Ayrıca, *SRT* kesitlerinden elde edilen 3B lu görüntülerde, dolinlerin yeraltındaki yayılımları da tespit edilmiştir (Şekil 3.15 ve Şekil 3.50).
4. Üç farklı çalışma alanlarındaki *MASW* ölçülerinin çözümlemesi sonuçlarından elde edilen Vs hızlarındaki değişimler belirlenerek, araştırılan ortamların genel olarak 3 tabakalı bir yeraltı modelinden oluştuğu tespit edilmiştir. Vp hız dağılımlarında dört tabakalı bir model gözlemlenirken, Vs hız dağılımlarında üç tabakalı bir model belirlenme nedeni; *SRT* kesitlerindeki birinci tabakanın çok

ince ve Vp hızının çok düşük olması sebebiyle, birinci ve ikinci tabakanın *MASW* kesitlerinde tek tabaka şeklinde gözlenmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Vs hızlarından da çalışma alanlarındaki yeraltı yapısının, az ayrışmış veya masif kaya niteliğine sahip özellikte olabileceği yorumu yapılmaktadır. *MASW* yöntemi ile yapılan çalışmalarda boşluğa yönelik herhangi bir belirti tespit edilememiştir. Bunun sebebinin, elde edilen 1B'lu hız eğrilerinin, araştırılan alanda herhangi bir boşluğun üzerine denk gelmeyişinden kaynaklanmış olabileceği düşünülmektedir.

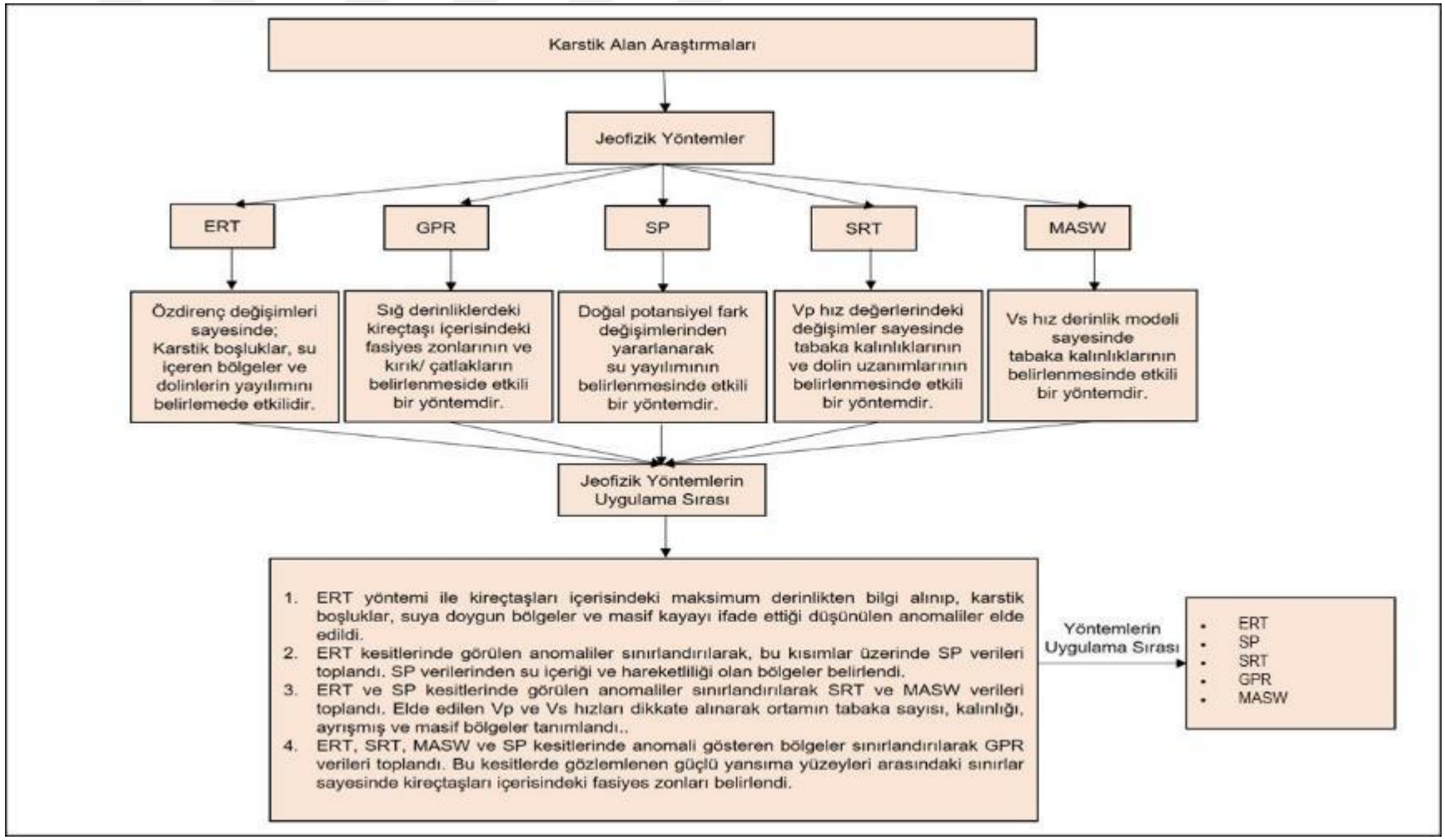
5. *GPR* yöntemi ile farklı litolojik tabaka sınırlarından yüksek genlikli yansıma sinyalleri kayıt edilmiştir. Elde edilen yer radarı kesitlerinde, Şahinkaya kireçtaşları içerisinde yüzeyden 32 m'lik derinliğe ulaşılan, farklı derinlik seviyelerindeki fasiyes zon (FZ) sınırlarından belirgin yansımalar gözlenmiştir (Şekil 3.22-3.24, Şekil 3.29 ve Şekil 3.66-3.75). Ayrıca *GPR* kesitlerinin bazılarında tespit edilen eğimli yansımalar; kireçtaşı içerisindeki kırıklı/çatlaklı kısımlara karşılık gelebileceği şeklinde yorumlanmıştır.
6. Çalışma Alanı 1 (300 x 400 m) içindeki *ERT* ve *SRT* sonuçları incelendiğinde; yüzeyde gözlenen dolinlerin yer altındaki uzanımlarının KD-GB yönüne doğru devam ettiği, ayrıca aynı alandaki *SP* haritalarında (Şekil 41) görülen düşük SP değer (-3 mV ile -7.5 mV arasında) kapanımı gösteren bölgelerinde aynı doğrultuda (KD-GB) yoğunlaştığı tespit edilmiştir. Törk vd. (2013) tarafından yapılan çalışmada, Çal Mağarası'nın içindeki yer altı nehri ve mağaranın kol uzantılarının yönelimi, bu tez kapsamında yürütülen jeofizik çalışmalar sonucunda elde edilen mağaranın uzanımı ile aynı doğrultuda olduğu tespit edilmiştir. Dolinler; yüzey sularının yeraltına kaçış noktaları oldukları için, Çalışma Alanı 1 içinde bulunan dolinlerin yönelimi, aynı doğrultu üzerinde bulunan Çal Mağarası içerisinden akan yer altı nehrini besleyen kaynaklardan biri olduğu şekilde değerlendirilme yapılabilir. Ayrıca bu alandan elde edilen *GPR* kesitleri, yüzeyden itibaren yaklaşık 2 m kalınlığındaki FZ1, ortalama 2-10 m derinliğinde FZ2 ve FZ3 ile devam etmektedir. Bu alanda elde edilen *SRT* kesitlerindeki ölçülen Vp hızları, FZ farklılıklarına işaret etmektedir. Ayrıca GPR1_P3 ve GPR1_P6 kesitlerinde (Şekil 3.22a,f) görülen hiperbolik yansımaların karstik boşlukları, GPR1_P10 ve GPR1_P18 kesitlerindeki eğimli yansımaların ise kireçtaşı içerisindeki kırık ve çatlakları temsil ettiği şeklinde yorumlanmaktadır. SRT kesitlerindeki birinci tabakanın çok ince ve Vp hızının

çok düşük olması sebebiyle, birinci ve ikinci tabaka *MASW* kesitlerinde tek tabaka şeklinde görülmektedir.

7. Çalışma Alanı 2 deki KD-GB yönünde belirlenen 600 m uzunluğundaki profilden elde edilen bütünleşik jeofizik verilerin sonuçları incelendiğinde; *ERT* kesitinde görülen ve yaklaşık 9 m derinlikten başlayan, çok yüksek özdirençli (4449 ohm.m) bölgenin, *SRT* ve *MASW* kesitlerinde Vp (1344 m/s) ve Vs (607.5 m/s) değerlerinin oldukça düşük olduğu, *SP* grafiğinde doğal potansiyel farkının aniden düşüş (0 mv'dan -8 mv'a) gösterdiği ve *GPR* kesitindeki uzunluk ekseninin 80-100 m aralığında ve 9 m derinliğinde gözlenen yansıma sınırının bu bölgelere denk geldiği tespit edilmiştir. Bu kısmın derinlik ve genişlik bilgisi, *ERT* kesitinde 60 m genişlik ve ~110 m derinlik olarak belirlenmiştir. Çalışma alanındaki hakim yapı Şahinkaya kireçtaşları kalınlığının ~100 m olduğu bilgisi, Köroğlu (2018) nun çalışmasındaki stratigrafik kesitlerden belirlenmiştir. Bu bilgiye göre, bütünleşik jeofizik kesitlerde anomali gösteren ortak bölgenin; farklı bir kayaç türünü temsil etmesinden ziyade, yapısal şekli de dikkate alındığında, Şahinkaya kireçtaşı içerisinde oldukça geniş boyutlu karstik boşluğun göstergesi olabileceği şeklinde yorumlanmıştır. Ayrıca Törk vd. (2013)'nin yaptığı çalışma sonucunda, mağaranın giriş ağzı 1132 m ve en yüksek noktası da (kısa kolun sonlandığı kısım) giriş kotundan itibaren KD-GB doğrultusunda 52 m yukarıda olduğu tespit edilmiştir. Dolayısıyla 1184 m'deki seviye, mağaranın taban kısmını temsil etmektedir. *ERT* kesiti incelendiğinde, karstik boşluk olduğu düşünülen yüksek özdirençli bölgenin en derin kısmının ise 1180 metrelere kadar indiği gözlenmiştir. Dolayısıyla karstik boşluk olduğu düşünülen bölgenin mağaranın kısa kolu olduğu sonucuna varılmıştır.
8. Çalışma Alanı 3 (200 x 400 m boyutlarında) olarak seçilen Çal Camili Tabiat parkında yapılan bütünleşik jeofizik çalışmalar sonucunda; yer altında bulunan karstik boşlukların yerleri ve dolinlerin uzanım doğrultuları tespit edilmiştir. Diğer alanlarda olduğu gibi bu alan içerisinde de maksimum derinliğe (80 m), *ERT* yöntemi kullanılarak ulaşılmıştır. 2B ve 3B'lu *ERT* kesitleri (Şekil 3.30, Şekil 3.31 ve Şekil 3.32) incelendiğinde, dolinleri temsil ettiği düşünülen düşük özdirençli ayrışmış bölgenin (~631 ohm.m) uzanım yönünün KD-GB yönüne doğru olduğu gözlemlenmiştir. Dolinlerin uzanım yönünün sağında ve solunda kalan daha yüksek özdirençli (~2595 ohm.m) bölgelerin ise masif kireçtaşlarını

temsil ettiği, bu kireçtaşları içerisinde bulunan çok yüksek özdirençli (5839 ohm.m) bölgelerin ise şekilsel yapıları da göz önüne alınarak, karstik boşlukları işaret ettikleri düşünülmektedir. Aynı görüntülerde bazı karstik boşlukların yüzeye çok yakın (~2m ve ~10 m derinlikte) olduğu tespit edilmiştir. 2B ve 3B'lu *SRT* sonuçları incelendiğinde (Şekil 3.47-3.48 ve Şekil 3.50); *ERT* kesitlerinde olduğu gibi dolinlerin uzanım yönünün KD-GB yönüne doğru uzandığı görülmüştür. *SRT*, *MASW* ve *GPR* kesitleri incelendiğinde yüzeyden itibaren 4 m derinliğinde bir tabakanın olduğu, bu tabakanın da örtü tabakasını temsil ettiği düşünülmektedir. *SP* haritaları incelendiğinde düşük *SP* değerlerinin (-6 mv ile -13 mv arasında) KB-GD yönüne doğru yoğunlaştığı görülmektedir. Yüzeysel gözlemlerde koruma altına alınmış dolinlerin bu yönde olduğu belirlenmiştir. Ayrıca bu alandan elde edilen *GPR* kesitlerinde yüzeyden itibaren, farklı kalınlıklarda fasiyes zonları (FZ) tespit edilmiştir. Bazı *GPR* kesitlerinde (GPR3_P2, GPR3_P4, GPR3_P9, GPR3_P12, GPR3_P15, GPR3_P19, GPR3_P20, GPR3_P25, GPR3_P32, GPR3_P35, GPR3_P38, GPR3_P39 ve GPR3_P49) bulunan, farklı yönlerdeki eğimli yansıtıcı yüzeylerin kireçtaşı içerisindeki kırıklı/çatlaklı yapıları gösterdiği sonucuna varılmıştır.

9. Bu tez kapsamındaki çalışma alanlarının tamamından elde edilen bütünleşik jeofizik verilerin (*ERT, SP, SRT, MASW, GPR)* sonuçları dikkate alındığında, bu tez kapsamındaki karstik çalışma alanları içerisindeki karstik boşluklar ve su içeriği fazla olan bölgelerin araştırılmasında jeofizik yöntemlerin uygulama sırasının Şekil 4.1'deki akış şemasına göre yapılması önerilmektedir.



Şekil 4.1. Karstik alanlarda Jeofizik yöntemlerin önerilen uygulama akış şeması

10. Yapılan bu çalışma ile jeofizik yöntemlerin, karstik oluşumların yeraltındaki yerlerini ve uzanımlarını başarılı bir şekilde tespit ettiği bir kez daha belirlenmiştir. Dolayısıyla karstik alanlardaki bu oluşumların yerlerinin önceden tespit edilebilmesi için jeofizik yöntemlerin daha fazla kullanılması gerektiği düşünülmektedir.
11. Çalışma alanları yerel halk, turistler ve hayvanlar bakımından oldukça aktif kullanıldığı için bu alanındaki dolinlerin bulunduğu alanlar düzenli olarak izlenerek, çökme riskinin artıp artmadığına dair sürekli güncellemeler yapılmalıdır.
12. Yerel halk ve bölgeyi ziyaret edenler karstik oluşumların yaratabileceği tehlikeler konusunda bilinçlendirilmelidir.
13. Karstik bölgeler genellikle suya doygun bölgeler olduğu için, bu suya doygun bölgelerin yerlerini belirlemek için jeofizik yöntemler kullanılabilir. Böylece su kaynaklarının sürdürülebilir bir şekilde yönetilmesi sağlanabilir.
14. Yağışlı dönemde yapılan analiz sonuçlarına göre hazırlanan iz element analiz değerleri (Tablo 3.5-3.6) incelendiğinde, su örneklerinin tamamında TS266 İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkında Yönetmelik'te tanımlanan sınır değerleri içerisinde bulunduğu belirlenmiştir. Tablo 3.5-3.6, Yerüstü Su Kalitesi Yönetmeliği (2021)'ne göre değerlendirildiğinde, su örneklerinin tümünde Se ve Mn değerlerinin yönetmelikte belirtilen sınır değerleri içerisinde yer aldığı ve bu değerlere bakıldığında suların, yüksek kaliteli su olduğu tayin edilmiştir.

Kurak dönemde yapılan analizler sonucunda elde edilen tüm değerlerin, TS266 İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkında Yönetmelik'te tanımlanan sınır değerleri içerisinde yer aldığı belirlenmiştir. Tablo 3.8, Yerüstü Su Kalitesi Yönetmeliği (2021)'ne göre değerlendirildiğinde ise su örneklerinin tamamında Se ve Mn değerlerinin yönetmelikte belirtilen sınır değerlerini içerisinde olduğu ve bu suların yüksek kaliteli su olduğu tespit edilmiştir.

Her iki dönem için çizdirilen Schoeller Diyagramı yarı logaritmik diyagramlardaki analiz sonuçlarını birleştiren doğruların birbirine yaklaşık paralellik göstermesi suların aynı jeolojik formasyonlardan beslendiğini göstermiştir. Ayrıca sular içerisinde Ca ve HCO3 içeriklerinin yüksek olduğu belirlenmiştir. Yağışlı ve kurak dönemler için çizdirilen piper diyagramlarındaki analiz sonuçlarında, su örneklerinin karbonat sertliğinin %50'den fazla

olduğu yani yüksek sertlikte sular olduğu tespit edilmiştir. Bu tip sular CaCO3 ve MgCO3 tipinde sular olarak tanımlanmıştır.

Ofluoğlu (1993)'nun Eylül ayında, Çal Mağarası içerisinden elde etmiş olduğu su analizleri sonucu ile bu tez kapsamında Eylül ayında elde edilen su analizi sonuçları (Tablo 3.9) karşılaştırıldığında, sular içerisinde Ca, Mg, K, Cl ve SO4 değerlerinde düşüş olduğu tespit edilmiştir. Bu değerlerin 29 yıllık zaman süresince azalmasının nedeninin mağarayı besleyen yüzey sularındaki artıştan kaynaklandığı düşünülmektedir. Son olarak, Ofluoğlu (1993)'nun piper diyagramı ve bu tez kapsamında elde edilen piper diyagramları sonuçlarının benzerlik gösterdiği, yeraltı nehrinden alınan su numuneleri analiz sonucu, baskın iyon çiftinin Ca ve HCO3 olduğu sonucuna varılmıştır. Ofluoğlu'nun yarı Schoeller Diyagramı'ndaki su numunelerinin kimyasal analiz sonuçlarının birbirine benzerlik gösterdikleri ve grafikteki noktaları birleştiren doğruların paralellik gösterdiği belirtilmiştir. Bu tez kapsamında Eylül ayında alınan analiz sonuçlarına göre hazırlanan Schoeller Grafiği incelendiğinde, grafikteki noktaları birleştiren doğruların birbirine yaklaşık paralel olduğu görülmüştür. Bu durum suların aynı jeolojik formasyondan beslendiğinin göstergesidir.

5. KAYNAKLAR

Abdallatif, T., Khafagy, A. S. A., & Khozym, A. (2014). Geophysical investigation to delineate hazardous cavities in Al-Hassa karstic region, Kingdom of Saudi Arabia. In *Engineering Geology for Society and Territory-Volume 5: Urban Geology, Sustainable Planning and Landscape Exploitation* (pp. 507-514). Cham: Springer International Publishing.

Abdeltawab, S. (2013). Karst limestone foundation geotechnical problems, detection and treatment: Case studies from Egypt and Saudi Arabia. *Int J Sci Eng Res*, 4(5), 376-387.

Abdelrahman, E.M., Essa, K. S., Abo-Ezz, E.R., Soliman, K.S., 2006a. Self-potential data interpretation using standard deviation of depths computed from moving-average residual anomalies. Geophysical Prospecting 54, 409-423.

Abdelrahman, E.M., Essa, K.S., Abo-Ezz, E.R., Soliman, K.S., 2006b. A least-squares depth-horizontal position curves method to interpret residual SP anomaly profiles. Journal of Geophysics and Engineering 3, 252-259.

Agarwal, B.N.P., 1984. Quantitative interpretation of self-potential anomalies. In: Expanded Abstract Volume of the 54th SEG Annual Meeting and Exposition. Atlanta, pp. 154–157.

Agarwal, B.N.P., Srivastava, S., 2009. Analyses of self-potential anomalies by conventional and extended Euler deconvolution techniques. Computer & Geosciences 35, 2231-2238.

Akca, İ., Balkaya, Ç., Pülz, A., Alanyalı, H. S., & Kaya, M. A. (2019). Integrated geophysical investigations to reconstruct the archaeological features in the episcopal district of Side (Antalya, Southern Turkey). *Journal of Applied Geophysics*, *163*, 22-30.

Alani, A. M., Aboutalebi, M. & Kilic, G. (2013). Applications of ground penetrating radar (GPR) in bridge deck monitoring and assessment. *Journal of applied geophysics*, *97*, 45-54.

Albora, A.M. (2019). Modeling of Copper Mine in Istanbul (Turkey) by using Self Potential (SP) Method, Journal of Scientific and Engineering Research, 2019, 6(11):121-129.

Alemdağ, H., Şeren, A., & Karslı, H. (2022). Combining ground-penetrating radar sections with different antenna frequencies including time-frequency domain noise suppression filters. *Geophysics*, *87*(4), WB41-WB54.

Alemdağ, H., Köroğlu, F., Aydın, Z. Ö., 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*(7), 286.

Allred, B.J., Redman, J.D., Mccoy, E.L. & Taylor, R.S. (2005) Golf course applications of near-surface geophysical methods: a case study. Journal of Environmental & Engineering Geophysics, 10: 1–19

Allred, B., Freeland, R., Grote, K., McCoy, E., Martinez, L., Gamble, D., ... & Eigenberg, R. (2016). Agricultural geophysics. In *Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems 2015* (pp. 1-4). Society of Exploration Geophysicists and Environment and Engineering Geophysical Society.

Alpaslan, N. (2021). Determination of borehole locations and saline-water intrusion for groundwater in Central Anatolia Region, Turkey using electrical tomography (ERT) method. *Environmental Earth Sciences*, *80*(24), 810.

Alsafa, H. M., & Shah, S. N. (2019). Non-destructive assessment of deterioration in marbles of the Raithu Monastery using ground-penetrating radar (GPR). *Engineering Geology*, *255*, 17-27.

Alzahrani, H., Abdelrahman, K., & Hazaea, S. A. (2022). Use of geoelectrical resistivity method for detecting near-surface groundwater potential zones at Riyadh city, Saudi Arabia. *Journal of King Saud University-Science*, *34*(7), 102253.

Andrej, M., & Uros, S. (2012). Electrical Resistivity imaging of Cave Dıvasˇka Jama, Slovenıa, Journal of Cave and Karst Studies, v. 74, no. 3.

Annan, A. P. (2003). Ground Penetrating Radar Principles, Procedures and Applications. *Sensors and software*, 278.

Annan, A. P. (2004). Ground Penetrating Radar Principles, Procedures & Applications, Sensors& Software Inc, Mississauga, on Canada.

Annan, A. P., & Butler, D. K. (2005). Near-surface geophysics.

Annan, A.P. (2009). Ground Penetrating Radar Theory and Applications || Electromagnetic Principles of Ground Penetrating Radar, 1–40.

Anomohanran, O. (2012). Geophysical interpretation of seismic reflection data obtained from Umureute and Amiynaibo area of Delta state. Nigeria. *Nigerian J. Sci. Environ*, *11*, 148-153.

Artugyan, L., Ardelean, A.C., & Urdea, P. (2015). Characterızatıon Of Karst Terrain Usıng Geophysıcal Methods Based On Sınkhole Analysıs: A Case Study Of The Anına Karstıc Regıon (Banat Mountaıns, Romanıa), 14th Sınkhole Conference Nckrı Symposıum 5. National Cave and Karst Research Institute 400-1 Cascades Avenue Carlsbad, New Mexico 88220 USA.

Asfahani, J., Tlas, M.J., Hammadi, M., 2001. Fourier analysis for quantitative interpretation of Self-potential anomalies caused by horizontal cylinder and sphere. Journal of King Abdulaziz University, Earth Sciences 13, 41-54.

Asokhai, M. B., Egbai, J. C., & Okolie, E. C. (2008). Using shallow reflection seismology for mapping bedrocks. *Nigeria J. Sci. Environ*, *7*, 66-72.

Atabey E (2005) Tıbbi Jeoloji. TMMO Jeoloji Mühendisleri Odası Yayınları, Ankara.

Atchuta Rao, D., Ram Babu, H.V., 1983. Quantitative interpretation of self-potential anomalies due to two-dimensional sheet-like bodies. Geophysics 48(12), 1659-1664.

Atchuta Rao, D., Ram Babu, H.V., Sivakumar Sinha, G.D.J., 1982. A Fourier transform method for the interpretation of self-potential anomalies due to two-dimensional inclined sheets of finite depth exent, Pure and Applied Geophysics 120, 365-374.

Aubert, M., Dana, I. N., & Gourgaud, A. (2000). Internal structure of the Merapi summit from self-potential measurements. *Journal of volcanology and geothermal research*, *100*(1-4), 337-343.

Auler, A. (2013). 6.3 Sources of Water Aggressiveness–The Driving Force of Karstification.

Ayaz, F. (1995). Üst Kretase Yaşlı Şahinkaya Kireçtaşı'nın (Düzköy-Trabzon) Mikrofasiyes İncelemesi. "Yüksek Lisans'' tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeoloji Mühendisliği Ana Bilim Dalı, 49 s, Trabzon.

Aydin, A., & Basokur, A. T. (2018). Investigation of the dimension stone potential in a marble quarry using ground-penetrating radar. *Environmental Earth Sciences*, *77(16)*, 588.

Aydin, F., Şen, C., Dokuz, A., Kandemir, R., Sarı, B., & Uysal, İ. (2016). Kuzeydoğu Türkiye Geç Kretase Volkanizmasının Petrolojisi ve Kökeni: Doğu Pontidler Geç Mesozoyik jeodinamik

Ayolabi, E. A., Adeoti, L., Oshinlaja, N. A., Adeosun, I. O., & Idowu, O. I. (2009). Seismic refraction and resistivity studies of part of Igbogbo township, south-west Nigeria.

Azwin, I. N., Saad, R., & Nordiana, M. (2013). Applying the seismic refraction tomography for site characterization. *APCBEE procedia*, *5*, 227-231.

B.C. Ministry of Forests (1997). Karst in British Columbia: a complex landscape sculpted by water (brochure) For. Prac. Br., Victoria, B.C. www. for.gov.bc.ca/hfp/ publications/00192/ (Accessed May 2010).

Baggett, J., Abbasi, A., Monsalve, J., Bishop, R., Ripepi, N., & Hole, J. (2020) Ground-penetrating radar for karst detection in underground stone mines. *Min Metall Explor 37*:153–165.

Baker, G. S., Jordan, T. E., & Pardy, J. (2007). An introduction to ground penetrating radar (GPR).

Balakrishna, Balaji Shrikant Maury, S., & Narshimulu, G. (2014). Ground water potential in fractured aquifers of Ophiolite formations, Port Blair, South Andaman Islands using electrical resistivity tomography (ERT) and vertical electrical sounding (VES). *Journal of the Geological Society of India*, *83*, 393-402.

Balkaya, Ç., Göktürkler, G., Erhan, Z., & Levent Ekinci, Y. (2012). Exploration for a cave by magnetic and electrical resistivity surveys: Ayvacık Sinkhole example, Bozdağ, İzmir (western Turkey). *Geophysics*, *77*(3), B135-B146.

Balkaya, Ç., Ekinci, Y. L., Çakmak, O., Blömer, M., Arnkens, J., & Kaya, M. A. (2021). A challenging archaeo-geophysical exploration through GPR and ERT surveys on the Keber Tepe, City Hill of Doliche, Commagene (Gaziantep, SE Turkey). *Journal of Applied Geophysics*, *186*, 104272.

Barba, L., Blancas, L., Ortız, A., & Ligorred, J. (2009). GPR detection of karst and archaeological targets below the historical centre of Merida, Yucatan, Mexico, Studia Universitatis Babeş-Bolyai Geologia, 54 (2), 27-31.

Barde-Cabusson, S., Finizola, A. & Grobbe, N. A., 2021. Practical approach for self-potential data acquisition, processing, and visualization. Interpretation 9, T123–T143. https:// doi. org/ 10. 1190/ INT- 2020- 0012.1.

Barone, P. M., & Di Maggio, R. M. (2019). Forensic geophysics: ground penetrating radar (GPR) techniques and missing persons investigations. *Forensic Sciences Research*, *4*(4), 337-340.

Barutçu, 1981. Uygulamalı Jeofizik. İstanbul Teknik Üniversitesi Matbaası, Gümüşsuyu.

Bastam, T. (2014). Değirmendere (Trabzon) havzası kaynak sularında su-kayaç ilişkisi. ‘’Yüksek Lisans’’ tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeoloji Mühendisliği Ana Bilim Dalı, 89s., Trabzon.

Başkan, M. B., & Atalay, N. (2014). İçme ve sulama sularında bor kirliliği ve bor giderme yöntemleri. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, *20*(3), 78-84.

Batayneh, A. T., Abueladas, A. A., & Moumani, K. A. (2002). Use of ground-penetrating radar for assessment of potential sinkhole conditions: an example from Ghor al Haditha area, Jordan. *Environmental Geology*, *41*(8), 977-983.

Bates, R. L., & Jackson, J. A. (1984). Dictionary of geological terms, third ed.: prepared for the American

Bella, P., & Gaal, L. (2013, June). Genetic types of non-solution caves. In *Proceedings of the 16th International Congress of Speleology* (Vol. 3, pp. 237-242). Praha, Czech Republic: Speleological Society.

Benedetto, A., & Pajewski, L. (Eds.). (2015). *Civil engineering applications of ground penetrating radar*. Springer.

Benter, A. (2014). *Characterising the Internal Composition of Rock Piles Using Ground Penetrating Radar* (Doctoral dissertation, Charles Sturt University).

Berge, M. A. (2011). Elektrik Özdirenç Ters-Çözümüyle Çok Katmanlı Arkeolojik Yerleşmelerin Görüntülendirilmesi. Dokuz Eylül Üniversitesi. *Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İzmir*.

Berthling, I. & Melvold, K. (2009). Ground-penetrating radar, in Ground Penetrating Radar: Theory and Applications (ed. H.M. Jol), Elsevier, Amsterdam, 81–97.

Bhattacharya, B. B., Jardani, A., & Bera, A. (2007). Three-dimensional probability tomography of self-potential anomalies of graphite and sulphide mineralization in Orissa and Rajasthan, India. *Near Surface Geophysics*, *5*(4), 223-230.

Bhattacharya, B.B., Roy, N., 1981. A note on the use of nomograms for self-potential anomalies. Geophysical Prospecting 29(1), 102-107.

Biswas, A., & Sharma, S. P. (2016). Integrated geophysical studies to elicit the subsurface structures associated with Uranium mineralization around South Purulia Shear Zone, India: A review. *Ore Geology Reviews*, *72*, 1307-1326.

Biswas, A., & Sharma, S.P., 2014. Resolution of multiple sheet-type structures in self-potential measurements. Earth System Science 123, 809-825.

Black, W.E., Corwin, R.F. (1984). Application of self-potential measurements to the delineation of groundwater seepage in earth-fill embankments. *Fifty fourth SEG Meeting*, Expanded abstracts, ss. 162–164. Atlanta, USA.

Blome, C.D., Smith, B.D., Smith, D.V., Faith, J R., Hunt, A.G., Moore, D.W., Miggins, D.P., Ozuna, G.B., & Landis, G.P., (2008). Multidisciplinary Studies of the Edwards Aquifer and Adjacent Trinity Aquifer of South-Central Texas, Search and Discovery Article #80018. Adapted from oral presentation at AAPG Annual Convention, San Antonio, TX, April 20-23, (http://pubs.usgs. gov/fs/2006/3145).

Bonacci, O. (2015). Karst hydrogeology/hydrology of dinaric chain and isles. *Environmental Earth Sciences*, *74*, Geological Institute, Garden City, NJ., Anchor Press/Doubleday, 571 p.

Boran, M., & Sivri, N. (2001). Trabzon (Türkiye) İl Sınırları İçerisinde Bulunan Solaklı ve Sürmene Derelerinde Nütrient ve Askıda Katı Madde Yüklerinin Belirlenmesi. *Su Ürünleri Dergisi*, *18*(3).

Brown, K., 2002. Arsenic, Drinking Water and Health (A Report Prepared for ACHS),USA.

Bryant, F. (1958). Snell's law of refraction. *Physics Bulletin*, *9*(12), 317.

Bulguroğlu, N. (1991). Düzköy-Çayırbağı Yöresinin Jeolojik İncelemesi. ‘’Yüksek Lisans’’ tezi. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 80s, Trabzon.

Burg, J.P., 1975. Maximum entropy spectral analysis, Ph.D. Thesis, Stanford University, California.

Cardarelli, E., Marrone, C., & Orlando, L. (2003). Evaluation of tunnel stability using integrated geophysical methods. *Journal of Applied Geophysics*, *52*(2-3), 93-102.

Carpenter, P. J., Higuera-Diaz, I. C., Thompson, M. D., Atre, S., & Mandell, W. (2003, April). Accuracy of seismic refraction tomography codes at karst sites. In *16th EEGS*

Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems (pp. cp-190). European Association of Geoscientists & Engineers.

Cassidy, N.J. (2009) Ground penetrating radar data processing, modelling and analysis, in Ground Penetrating Radar: Theory and Applications (ed. H.M. Jol), Elsevier, Amsterdam, 141–176.

Celep, S. (2009). Trabzon ili yer altı ve yer üstü sularının hidrojeolojik, hidrojeokimyasal incelemesi ve su kalitesinin izlenmesi. 'Yüksek Lisans' tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeoloji Mühendisliği Ana Bilim Dalı, 180s, Trabzon.

Chalikakis K., Plagnes V., Guerin R., Valois R., & Bosch F.P. (2011). Contribution of geophysical methods to karst-system exploration: An overview, *Hydrogeology Journal, 19*, 1169–1180.

Chambers, J. E., Gunn, D. A., Wilkinson, P. B., Meldrum, P. I., Haslam, E., Holyoake, S., ... & Wragg, J. (2014). 4D electrical resistivity tomography monitoring of soil moisture dynamics in an operational railway embankment. *Near Surface Geophysics*, *12*(1), 61-72.

Chiemeke, C. C., & Aboh, H. O. (2012). Delineation of aquiferous layers within the basement complex using joint inversion of seismic refraction tomography and high resolution 3D seismic reflection survey. *Arch. Applied Sci. Res*, *4*, 400-405.

Christ, R. D., & Wernli Sr, R. L. (2013). *The ROV manual: a user guide for remotely operated vehicles*. Butterworth-Heinemann.

Connor, C.B., & Sandberg, S.K. (2001). Application of Integrated Geophysical Techniques to Characterize the Edwards Aquifer, Texas, South Texas Geological Society Bulletin
41 (7), pp. 11-25.

Consorti, L., & Köroğlu F. (2019). Maastrichtian-Paleocene larger Foraminifera biostratigraphy and facies of the Şahinkaya Member (NE Sakarya Zone, Turkey): Insights into the Eastern Pontides arc sedimentary cover, Journal of Asian Earth Sciences, 183, 1-15.

Consorti, L., Schlagintweit, F., Köroğlu, F., & Rashidi, K. (2020). Stratigraphic record of Eponides Montfort, 1808 (benthic Foraminifera) from the Paleocene of the northern Neotethys marginé, *Micropaleontology, 66* (5), 369-376.

Conyers, L. B. (2016). *Ground-penetrating radar for geoarchaeology*. John Wiley & Sons.

Conyers, L. B. (2023). *Ground-penetrating radar for archaeology*. Rowman & Littlefield.

Conyers, L.B. (2004) Ground Penetrating Radar for Archaelogy. Altamira Press, USA.

Cooley, J.W., Tukey, J.W., 1965. An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series, Mathematics of Computation 19, 297-301.

Corwin, R. F. (1990). The self-potential method for environmental and engineering applications. In *Geotechnical an Environmental Geophysics: Volume I: Review and Tutorial* (ss. 127-146). Society of Exploration Geophysicists.

Cueto, M., Olona, J., Fernández-Viejo, G., Pando, L., & López-Fernández, C. (2018). Karst-induced sinkhole detection using an integrated geophysical survey: a case study along the Riyadh Metro Line 3 (Saudi Arabia). *Near Surface Geophysics, 16*(3), 270-281.

Culver, D.C., & White, W.B., (2005). Encyclopedia of Caves. Academic Press, p. 661.

Çağlar, İ., 1991, Self Potantial (SP) Method in Geophysics. İstanbul Teknik Üniversitesi Matbaası. Gümuşsuyu İstanbul.

Daniels, D.J. (2004). Ground Penetrating Radar, 2nd Edition. The Institute of Electrical Engineers, London, United Kingdom.

Daniels, J. (2007). Ground penetrating radar in archaeology. *Antiquity, 81(311),* 658-660.

Das, B., & Agarwal, B.N.P. (2012). Depth determination of 2-D SP anomaly source using Energy Spectrum method and its advantages. 9th Biennial International Conference & Exposition on Petroleum Geophysics, Hyderabad 2012, Expanded Abstract P-187.

Davies, W.E., & Morgan, I.M., (1990). Geology of caves: US Geological Survey.

Davis, J. L., & Annan, A. P. (1989). Ground-penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy 1. *Geophysical prospecting, 37*(5), 531-551.

Day, B. A. & Nightingale, H. l. (1984) Realionships between ground- water silica, total

Dayı, A. (1996) Değirmendere Havzası Yüzey Sularında Bazı İnorganik Kimyasal Parametrelerin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon.

De Castro, D. L., Bezerra, F. H., & Oliveira Jr, J. G. (2024). Integrated geophysical approach for detection and size-geometry characterization of a multiscale karst system in carbonate units, semiarid Brazil. Open Geosciences, 16(1), 20220606.

De Giorgi, L., & Leucci, G. (2018). The archaeological site of Sagalassos (Turkey): exploring the mysteries of the invisible layers using geophysical methods. *Exploration Geophysics*, *49*(5), 751-761.

De Giorgi, L., & Leucci, G. (2019). Passive and active electric methods: new frontiers of application. In *Innovation in near-surface geophysics* (ss. 1-21). Elsevier.

De Waele, J., & Gutiérrez, F. (2022). *Karst hydrogeology, geomorphology and caves*. John Wiley & Sons.

De Groot-Hedlin, C., & Constable, S. (1990). Occam's inversion to generate smooth, two-dimensional models from magnetotelluric data. *Geophysics, 55*(12), 1613-1624.

Delle Rose, M., & Leucci, G. (2010). Towards an integrated approach for characterization of sinkhole hazards in urban environments: the unstable coastal site of Casalabate, Lecce, Italy, *J. Geophys. Eng. 7*:143–154.

Demirci, A., Ekinci, Y.L., Bekler, T., Erginal, A.E., Öztürk, B. (2008). Geophysical Characterization of a Landslide in Lapseki-Çanakkale By Seismic Refraction and Electrical Resistivity Methods, Türkiye 18. Uluslararası Jeofizik Kongre Ve Sergisi, Ankara, Türkiye.

Dewangan, S. K., Shrivastava, S. K., Tigga, V., Lakra, M., & Namrata, P. (2023). Review Paper on the Role of Ph in Water Quality Implications for Aquatic Life, Human Health, and Environmental Sustainability. International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology, 10(6), 215-218.

Dhakate, R., Amarender, B., Kumar, V. S., Sankaran, S., & Rao, V. G. (2015). Application of ground-penetrating radar for identification of groundwater resources in a coastal terrain. *Arabian Journal of Geosciences*, *8*, 4703-4715.

Di Maio, R., Mauriello, P., Patella, D. O. M. E. N. I. C. O., Petrillo, Z., Piscitelli, S., & Siniscalchi, A. (1998). Electric and electromagnetic outline of the Mount Somma–Vesuvius structural setting. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, *82*(1-4), 219-238.

Di Maio, R., & Patella, D., 1994. Self-potential anomaly generation in volcanic areas. The Mt. Etna case history, Acta Vulcanologica, 4, 119-124.

Dimri, V.P., 1992. Deconvolution and inverse theory: Application to geophysical problems, 1st edition, Elsevier.

Diotallevi, V., Floris, M., & Lucchini, V. (2007). Characterization of marble samples by a ground penetrating radar technique. *Journal of Applied Geophysics, 62(3)*, 243-251.

Dmitriev, A. N. (2012). Direct and inverse SP modeling on the basis of exact model of self-potential field nature. *Geology Geophys*, *53*(6), 797-812.

Dobrin, M. B. (1960) *Introduction to Geophysical Prospecting* (3th end). NY: Mc Graw-Hill.

Doğan, U. (2004). Dolin sınıflamasında yeni yaklaşımlar. *Gazi Üniversitesi Gazi Eğitim Fakültesi Dergisi*, *24*(1).

Doolittle, J. A., & Collins, M. E. (1998). A comparison of EM induction and GPR methods in areas of karst. *Geoderma, 85*(1), 83-102.

Doolittle, J. A., Jenkinson, B., Hopkins, D., Ulmer, M., & Tuttle, W. (2006). Hydropedological investigations with ground-penetrating radar (GPR): Estimating water-table depths and local ground-water flow pattern in areas of coarse-textured soils. *Geoderma*, *131*(3-4), 317-329.

Dönmez, A. (2006) Protection of Caves by Turkish Law. Master thesis, Akdeniz University. Antalya, 108 p. (in Turkish).

Drahor, M. G. (2004). Application of the self-potential method to archaeological prospection: Some case histories. *Archaeological Prospection*, *11*(2), 77-105.

Drahor, M. G. (2019). Identification of gypsum karstification using an electrical resistivity tomography technique: The case-study of the Sivas gypsum karst area (Turkey). *Engineering geology*, *252*, 78-9

Eker, A.M. 2009. Ankara'nın kuzeyindeki pliyo-kuvaterner zeminlerin dinamik karakterlerinin ve yerel zemin koşullarının yüzey dalgası yöntemleri ile belirlenmesi, ''Yüksek Lisans'' tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü / Jeoloji Mühendisliği Ana Bilim Dalı, 164s.

El-Qady, G., Hafez, M., & Ushıjıma, K. (2005). Imagıng Subsurface Cavities Using Geoelectric Tomography and Ground-Penetrating Radar, Journal of Cave and Karst Studies, v. 67, no. 3, p. 174–181.

Eppelbaum, L. V. (2019). Advanced system of self-potential field analysis in ore deposits of the South Caucasus. *Proc. Natl. Azerbaijan Acad. Sci*, *2*, 21-35.

Erguvanlı. K. & Yüzer. E., 1987. Yeraltısuları Jeolojisi (Hidrojeoloji), İstanbul Teknik

Erinç, S. (2012). Jeomorfoloji II. İstanbul: Der Yayınları, cilt 2.

Ersoy A. F., Turan N. A., Arslan H., & Kuleyin A. (2021). Assessment of seawater intrusion in Kızılrmak delta coastal area (North Turkey) using hydrochemical and isotopic data, Environmental Earth Sciences, cilt.80, sa.11.

Ersoy, A. F., & Hatipoğlu Temizel, E. (2022). Karadere Deresi'nin (Araklı-Trabzon) içme ve sulama suyu amaçlı kullanım uygunluğunun incelenmesi.

Ersoy, A. F., & Karagüllü, D. (2018). Söğütlü Deresi (Trabzon) su kalitesi parametrelerinin coğrafi bilgi sistemleri kullanılarak değerlendirilmesi. *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, *42*(1), 1-16.

Ersoy, A.F, & Sönmez, S.C. (2014). Hydrogeochemical and isotopic characteristics of the Ilıca geothermal system (Erzurum, Turkey), Environmental Earth Sciences, cilt.72, sa.11, ss.4451-4462.

Essa, K., Mahanee, S., Smith, P.D., 2008. A new inversion algorithm for estimating the best fitting parameters of some geometrically simple body to measured self-potential anomalies. Exploration Geophysics 39, 155-63.

Essa, K.S., 2011. A new algorithm for gravity or self-potential data interpretation. Journal of Geophysics and Engineering 8, 434-446.

Fairchild, I. J., & Baker, A. (2012). Speleothem science: from process to past environments. John Wiley & Sons.

Farfour, M., Economou, N., Abdalla, O., & Al-Taj, M. (2022). Integration of Geophysical Methods for Doline Hazard Assessment: A Case Study from Northern Oman, *Geosciences*, 12, 243.

Fatma, K., Yacine, D., Haydar, B., Ahmed, Y., Mohammed, D., Karim, H., & Abdelatif, B. (2020). Use of electrical resistivity tomography (ERT) and electromagnetic induction (EMI) methods to characterize karst hazards in north-eastern of Algeria. *Arabian Journal of Geosciences*, *13*, 1-9.

Fedi, M., & Abbas, M. A. (2013). A fast interpretation of self-potential data using the depth from extreme points method. *Geophysics*, *78*(2), E107-E116.

Finizola, A., Lénat, J. F., Macedo, O., Ramos, D., Thouret, J. C., & Sortino, F. (2004). Fluid circulation and structural discontinuities inside Misti volcano (Peru) inferred from self-potential measurements. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, *135*(4), 343-360.

Finizola, A., Sortino, F., Lenat, J. F., & Valenza, M. (2002). Fluid circulation at Stromboli volcano (Aeolian Islands, Italy) from self-potential and CO2 surveys. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, *116*(1-2), 1-18.

Fitterman, D.V. & Stewar, M.T. (1986). Transient electromagnetic sounding for groundwater, *Geophysıcs, 51(4)*, pp. 995-1005.

Ford, D., & Williams, P. D. (2007). Karst hydrogeology and geomorphology. John Wiley & Sons.

Forte, E., Dossi, M., Pipan, M., & Colucci, R. R. (2014). Velocity analysis from common offset GPR data inversion: theory and application to synthetic and real data. *Geophysical Journal International*, *197*(3), 1471-1483.

Fox, R.W. (1830). On the electromagnetic properties of metalliferous veins in the mines of Cornwall. *Philos T R Soc Lond* 120(B3):399–414.

Freeze, R. A., & Cherry, J. A. (1979). Groundwater prentice-hall. *Englewood Cliffs, NJ*, *176*, 161-177.

Galagedara, L. W., Parkin, G. W., & Redman, J. D. (2003). An analysis of the ground-penetrating radar direct ground wave method for soil water content measurement. *Hydrological Processes*, *17*(18), 3615-3628.

Gary, M.O., Rucker, D.F., Smith, B.D., Smith, D.V. & Befus, K., (2013). Geophysical investigations of Edwards-Trinity Aquifer System at Multiple Scales: Interpreting Airborne and Direct-Current Resistivity in Karst, 13th Sinkhole Conference, NCKRI Symposium, 2,195-206.

Gelişli, K., & Babacan, A.E. (2021). Yeraltısuyu aramalarında jeofizik özdirenç uygulamaları. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, *9*(2), 535-543.

Gloaguen, E., Chouteau, M., Marcotte, D., & Chapuis, R. (2001). Estimation of hydraulic conductivity of an unconfined aquifer using cokriging of GPR and hydrostratigraphic data. *Journal of Applied Geophysics*, *47*(2), 135-152.

Goldie, M. (2002). Self-potentials associated with the Yanacocha high-sulfidation gold deposit in Peru. *Geophysics*, *67*(3), 684-689.

Goldstein, N. E., Halfman. S., Corwin, R. F. & Alvarez, J. R. (1989). Self-potential anomaly changes at the East Mesa and Cerro Prieto geothermal fields. *Proceedings of the 14th workshop on geothermal reservoir engineering*, s. 145-153. Stanford University

Gomez-Ortiz, D., & Martín-Crespo, T. (2012). Assessing the risk of subsidence of a sinkhole collapse using ground penetrating radar and electrical resistivity tomography. *Engineering Geology*, *149*, 1-12.

Gomez-Ortiz, D., Pereira, M., Martin-Crespo, T., Rial, F. I., Novo, A., Lorenzo, H., & Vidal, J. R. (2009). Joint use of GPR and ERI to image the subsoil structure in a sandy coastal environment. *Journal of Coastal Research*, 956-960.

Goodman, D., & Woods, J. (1995). An archaeological evaluation of ground-penetrating radar. *Archaeological Prospection, 2(4)*, 195-204.

Gosar, A., & Ceru, T. (2016). Search for an artificially buried karst cave entrance using ground penetrating radar: a successful case of locating the S-19 Cave in the Mt. Kanin massif (NW Slovenia). *International Journal of Speleology*, *45*(2), 4.

Göksu, M.Z.L. (2015) Su Kirliliği, 2. Basın, Akademisyen Kitapevi, Ankara.

Göktürkler, G., & Balkaya, Ç. (2012). Inversion of self-potential anomalies caused by simple-geometry bodies using global optimization algorithms. Journal of Geophysics and Engineering 9, 498-507.

Grandjean, G., Gourry, J. C., & Bitri, A. (2000). Evaluation of GPR techniques for civil-engineering applications: study on a test site. *Journal of applied geophysics*, *45*(3), 141-156.

Griffiths, D. H., & Barker, R. D. (1993). Two-dimensional resistivity imaging and modelling in areas of complex geology. *Journal of applied Geophysics*, *29*(3-4), 211-226.

Guireli Netto, L., Malagutti Filho, W., & Gandolfo, O. C. B. (2020). Detection of seepage paths in small earth dams using the self-potential method (SP). *REM-International Engineering Journal*, *73*, 303-310.

Gupta, D. K., Arora, Y., Singh, U.K., Gupta, J.P., 2012. Recursive Ant Colony Optimization for estimation of parameters of a function. 1st International Conference on Recent Advances in Information Technology (RAIT), Dhanbad, pp. 448-454.

Gupta, M. S. (1980). Georg Simon ohm and Ohm's law. IEEE Transactions on Education, 23(3), 156-162.

Gusmeroli, A. Liu, L., Schaefer, K., Zhang, T., Schaefer, T., & Grosse, G. (2015). Active layer stratigraphy and organic layer thickness at a thermokarst site in Arctic Alaska identified using ground penetrating radar. *Arct. Antarct. Alp. Res.*, *47*, 195–202.

Güler, Ç., & Çobanoğlu, Z. (1997). *Su kalitesi*. TC Sağlık Bakanlığı.

Gültekin, F., Dilek, R., Ersoy, A. F., & Ersoy, H. (2005). Aşağı Değirmendere Trabzon Havzasındaki Suların Kalitesi. *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, *29*(1), 21-34.

Gültekin, F., Ersoy, A. F., Hatipoğlu, E., & Celep, S. (2012). Determination of Water Quality Parameters in Wet Season of Surface Water in Trabzon (in Turkish with English abstract), Ecology, 21(82), 77-88.

Gültekin, F., Firat Ersoy, A., Hatipoglu, E., & Celep, S. (2013). Quality assessment of surface and groundwater in Solaklı Basin (Trabzon, Turkey). *Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 72*, 213-224.

Güven, A. (2013). Hazar gölü (Elazığ) çevresindeki alüvyon akiferlerinin hidrojeoloji incelemesi.

Güven, İ.H. (1993). Doğu Pontidler'in 1/250.000 Ölçekli Kompilasyonu, Maden Tetkik Arama Genel Müdürlüğü, Ankara, 98 s. Hamilton, W.I. (1842). Reseaches in Asia Minor. Pontus and Armenia II. London.

Hamilton, W.I. (1842). Reseaches in Asia Minor. Pontus and Armenia II. London

Hammon, W. S., III, G. A. McMechan, and X. Zeng, 2000, Forensic GPR: Finite difference simulations of responses from buried human remains: *Journal of Applied Geophysics, 45*, 171–186.

Hanyga, A., & Seredynska, M. (2000). Ray tracing in elastic and viscoelastic media. *Pure and Applied Geophysics, 157*, 679-717.

Hartmann, A., Goldscheider, N., Wagener, T., Lange, J., & Weiler, M. (2014). Karst water resources in a changing world: Review of hydrological modeling approaches. *Reviews of Geophysics*, *52*(3), 218-242.

Hem, J.D., 1985. Study and İnterpretation of the chemical characteristics of natural water. U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2254, U.S. Geological Survey, Alexandria, VA22304, USA, 263 p.

Hengari, G. M., Hall, C. R., Kozusko, T. J., & Bostater, C. R. (2013). Use of ground penetrating radar for determination of water table depth and subsurface soil characteristics at Kennedy Space Center. In *Earth Resources and Environmental Remote Sensing/GIS Applications IV* (Vol. 8893, pp. 301-312). SPIE.

Hiltunen, D. R., & Cramer, B. J. (2008). Application of seismic refraction tomography in karst terrane. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, *134*(7), 938-948.

Hinkel, K.M., Doolittle, J.A., Bockheim, J.G., Nelson, F.E., Paetzold, R., Kimble, J.M. & Travis, R. (2001), Detection of subsurface permafrost features with ground penetrating radar, Barrow, Alaska. *Permafr. Periglac. Process, 12*, 179–190.

Hippolyte, J.C., Müller, C., Sangu, E., & Kaymakci, N. (2015). Stratigraphic comparisons along the Pontides (Turkey) based on new nannoplankton age determinations in the Eastern Pontides: geodynamic implications. Geological Society London, Special Publications, 428, SP428-9.

Hossain, M. A., Rahman, S., & Rahman, M. M. (2019). Effect of pH on the removal of organic pollutants from water. International Journal of Environmental Science and Technology, 16(6), 3261-3270. https://doi.org/10.1007/s13762-019-02331-7

Hubbard, S., Chen, J., Williams, K., Peterson, J., & Rubin, Y. (2005). Environmental and agricultural applications of GPR.

Hussain, Y., Uagoda, R., Borges, W., Nunes, J., Hamza, O., Condori, C., ... & Cárdenas-Soto, M. (2020). The potential use of geophysical methods to identify cavities, sinkholes and pathways for water infiltration. *Water*, *12*(8), 2289.

Idi, B. Y., & Kamarudin, M. N. (2011). Ground water estimation and water table detection with ground penetrating radar. *Asian Journal of Earth Sciences*, *4*(3), 193.

Imposa, S., Grassi, S., Di Raimondo, S., Patti, G., Lombardo, G., & Panzera, F. (2018). Seismic refraction tomography surveys as a method for voids detection: an application to the archaeological park of Cava Ispica, Sicily, Italy. *International Journal of Architectural Heritage*, *12*(5), 806-815.

Ishido, T., & Pritchett, J. W. (2000). Using numerical simulation of electrokinetic potentials in geothermal reservoir management. In *Proc. World Geothermal Congress 2000* (ss. 2629-2634).

Ishido, T., Pritchett, J., Nishi, Y., Sugihara, M., Kano, Y., Matsushima, N., ... & Ariki, K. (2018). Self-potential monitoring at the sumikawa geothermal field, Akita, Japan. In *Proceeding of 43rd Stanford Geothermal Workshop held in Stanford University, Stanford, California, USA*.

Iuliano, T., Mauriello, P., Patella, D., 2001. A probability tomography approach to the analysis of potential field data in the Campi Flegrei Caldera (Italy). Annals of Geophysics 44, 403-420.

Iuliano, T., Mauriello, P., Patella, D., 2002. Looking inside Mount Vesuvius by potential fields integrated probability tomographies. Journal of Volcanology and Geothermal Research 113, 363-378.

İnan, N., İnan, S., & Kurt, İ. (1999). Doğu Pontidler'de uyumlu bentik K/T geçişi: Tonya formasyonunun (GB Trabzon) Şahinkaya üyesi. *Türkiye Jeoloji Bülteni*, *42*(2), 63-67.

Jardani A, Revil A, Santos F, Fauchard C, & Dupont JP. (2007). Detection of preferential inflitration pathways in sinkholes using joint inversion of self-potential and EM-34 conductivity data, Geophysical Prospecting 55: 749-760.

Jardani, A., Dupont, J.P., Revil, A., 2006. Self-potential signals associated with preferential ground water flow pathways in sinkholes. Journal of Geophysical Research 111, B09204.

Johnson, R.W., Glaccum, R. & Wojtasinski, R. (1979). Application of ground penetrating radar to soil survey. Soil and Crop Science Society of Florida Proceedings, 68–72.

Johnson, D. G. (1992). *Use of ground-penetrating radar for water-table mapping, Brewster and Harwich, Massachusetts* (Vol. 90, No. 4086). US Department of the Interior, US Geological Survey.

Jol, H.M. (2009). Ground Penetrating Radar Theory and Applications, First edition, The Boulevard, Langford Lane, Kidlington, Oxford OX5 1GB, UK.

Kanbur, M., Silahtar, A., & Özsoy, C. (2014). Yansıma ve Yüzey Dalgaları Metotları ile İnsan Yapımı Tünel Yerinin Bulunması, SDÜ Kampüs Örneği-Isparta. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, *15*(3), 244-255.

Kandemir, R. (2004). Gümüşhane Yakın Yörelerindeki Erken- Orta Jura Yaşlı Şenköy Formasyonu'nun Çökel Özellikleri ve Birikim Koşulları. Doktora Tezi. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, Türkiye, 274 s.

Kandemir, R., & Yilmaz, C., 2009. Lithostratigraphy, facies, and deposition environment of the lower Jurassic Ammonitico Rosso type sediments (ARTS) in the Gümüşhane area, NE Turkey: implications for the opening of the northern branch of the Neo-Tethys Ocean. Journal of Asian Earth Sciences, 34, 586-598.

Kara, V. (2010). *Elastik dalga teorisi ve sismik yansıma yönteminin temel ilkeleri*. TMMOB Jeofizik Mühendisleri Odası.

Karczewski, J., Ortyl, L., & Pasternak, M. (2011). Zarys metody georadarowej (wydanie drugie poprawione i rozszerzone). *Wydawnictwa AGH, Krakow*.

Kaufmann, G., & Romanov, D. (2009). Geophysical investigation of a sinkhole in the northern Harz foreland (North Germany), Environ Geol 58:401–405.

Kay, S.M., Marple, S.L., 1981. Spectrum analysis - a modern perspective. Proceedings of the IEEE 69, 1381-1419.

Keçeli, A. (2012). SP Kaynakları. Jeofizik, Jeoteknik, Maden Mühendislerine Uygulamalı Jeofizik (2. Baskı) içinde (116-117). Ankara: TMMOB Jeofizik Mühendisleri Odası JFMO Eğitim Yayınları No:18.

Keçeli, A. (2012). Uygulamalı Jeofizik. JFMO Eğitim Yayınları, No:18.

Ketin, İ. (1966). Anadolu'nun tektonik birlikleri. MTA Dergisi 66:20–34. (in Turkish with English abstract).

Khaldaoui, F., Djediat, Y., Baker, H., Ydri, A., Djeddi, M., Hamadou, K., & Bouzar A. (2020). Use of electrical resistivity tomography (ERT) and electromagnetic induction (EMI) methods to characterize karst hazards in north-eastern of Algeria. *Arabian Journal of Geosciences*, *13*, 1-9.

Kim, J. H., Cho, S. J., & Yi, M. J. (2007). Removal of ringing noise in GPR data by signal processing. *Geosciences Journal*, *11*, 75-81.

Kirsch, R. (2006). Groundwater Resources in Burried Valleys: A Challenge for Geosciences, Leibniz Institute for Applied Geosciences (GGA-Institut): Hannover, 296.

Klimchouk, A., Bayari, S., Nazik, L., & Toerk, K. (2006). Glacial destruction of cave systems in high mountains, with a special reference to the Aladaglar massif, Central Taurus, Turkey. *Acta carsologica*, *35*(2), 111-121.

Klimchouk, A., Palmer, A. N., De Waele, J., Auler, A. S., & Audra, P. (Eds.). (2017). *Hypogene karst regions and caves of the world*. Springer.

Knight, R. (2001). Ground penetrating radar for environmental applications. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, *29*(1), 229-255.

Knödel, K., Lange, G., & Voigt, H. J. (2007). *Environmental geology: handbook of field methods and case studies*. Springer Science & Business Media.

Korkmaz, S. (1993). Tonya-Düzköy (GB-Trabzon) Stratigrafisi, *Türkiye Jeoloji Bülteni, 36,* 151-158.

Kovacs, A., Gow, A.J. and Morey, R.M. (1995) The in-situ dielectric constant of polar firn revisited. Cold Regions Science and Technology, 23: 245–256.

Kowalczyk, S., Lejzerowicz, A., & Kowalczyk, B. (2018, June). Groundwater table level changes based on ground penetrating radar images: A case study. In *2018 17th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR)* (pp. 1-4). IEEE.

Köroğlu, F. (2018). Çayırbağı-Çalköy (Düzköy-Trabzon) Yöresindeki Şahinkaya Üyesi'nin Stratigratif Mikropaleontolojik ve Sedimantolojik İncelenmesi. ''Yüksek Lisans'' tezi, Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeoloji Mühendisliği Ana Bilim Dalı, 191s, Rize.

Köroğlu, F., & Kandemir, R. (2019a). Vulnerable geosites of Çayırbağı-Çalköy (Düzköy/Trabzon) in the Eastern Black Sea region of NE Turkey and their geotourism potential, Geoheritage, 11, 1101-1111.

Köroğlu, F., & Kandemir, R. (2019b). The bio-lithoclastic carbonate facies analysis: Şahinkaya Member Maastrichtian (Late Cretaceous) skeletal carbonate deposit, Sakarya Zone, NE Turkey, *Carbonates and Evaporites 34*:1737–1755.

Köroğlu, F. (2024). Doğu Karadeniz'in Karstik Oluşumları: Karaca (Torul, Gümüşhane) ve Çal (Düzköy, Trabzon) Mağaralarının Jeoturizm Potansiyeli. *Türkiye Jeoloji Bülteni*, *67*(2), 195-230.

Kranjc, A. (2013). 6.10 Classification of closed depressions in carbonate karst.

Kruse, S., Grasmueck, M., Weiss, M., & Viggiano, D. (2006). Sinkhole structure imaging in covered karst terrain. *Geophysical Research Letters*, *33*(16).

Kumari, A., Kumar, D., & Warwade, P. (2021). Application of multi-criteria decision making (MCDM) and electrical resistivity tomography (ERT) techniques for identification of groundwater recharge zone (s) in granitic hard rock aquifer. *Journal of Earth System Science*, *130*(2), 81.

Kwon, H. S., Kim, J. H., Ahn, H. Y., Yoon, J. S., Kim, K. S., Jung, C. K., ... & Uchida, T. (2005). Delineation of a fault zone beneath a riverbed by an electrical resistivity survey using a floating streamer cable. *Exploration Geophysics*, *36*(1), 50-58.

Lange, L.A. (1999). Geophysical studies at Kartchner Caverns State Park, Arizona, Journal of Cave and Karst Studies 61 (2): 68-72.

Laurens, S., Balayssac, J. P., Rhazi, J., & Arliguie, G. (2002). Influence of concrete relative humidity on the amplitude of Ground-Penetrating Radar (GPR) signal. Materials and Structures, 35, 198-203.

Leucci, G. (2006). Contribution of Ground Penetrating Radar and Electrical Resistivity Tomography to Identify the Cavity and Fractures Under the Main Church in Botrugno (Lecce, Italy), *Journal of Archaeological Science*, *33(9*), 1194–1204.

Li, X., & Yin, M., 2012. Application of differential evolution algorithm on self-potential data. PLoS One 7(12), 1-11.

Listyani R.A., & Ridayati (2022). Groundwater Contributing to Doline Hydrochemistry in Panggang and Wonosari-Baron Hydrogeological Subsystems, Indonesia. *Journal of Water and Environment Technology*, *20*(5), 107-117.

Liu, R., Sun, H., Liu, D., Wang, X., Zhou, X., Zhao, Y., ... & Sun, H. (2023). A joint application of semi-airborne and in-tunnel geophysical survey in complex limestone geology. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, *82*(6), 1-17.

Liu, X., Dong, X., & Leskovar, D. I. (2016). Ground penetrating radar for underground sensing in agriculture: a review. *International Agrophysics*, *30*(4).

Loke, M.H. (2010). Res2Dinv ver. 3.59 for Windows XP/Vista/7, 2010. Rapid 2-D Resistivity & IP Inversion Using the Least-Squares Method, Geoelectrical Imaging 2D & 3D Geotomo Software 2010, Malaysia.

Longhurst, R. S. (1973). *Geometrical and physical optics*. Orient BlackSwan.

Luo, Y., Xia, J., Miller, R. D., Xu, Y., Liu, J., & Liu, Q. (2008). Rayleigh-wave dispersive energy imaging using a high-resolution linear Radon transform. *Pure and Applied Geophysics*, *165*, 903-922.

Mahmoudzadeh, M. R., Frances, A. P., Lubczynski, M., & Lambot, S. (2012). Using ground penetrating radar to investigate the water table depth in weathered granites—Sardon case study, Spain. *Journal of Applied Geophysics*, *79*, 17-26.

Mainali, G., Nordlund, E., Knutsson, S., & Thunehed, H. (2015). Tailings dams monitoring in Swedish mines using self-potential and electrical resistivity methods. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, *20*(13), 5859-5875.

Margiotta, S., Negri, S., Parise, M., & Quarta, T. A. M. (2016). Karst geosites at risk of collapse: the sinkholes at Nociglia (Apulia, SE Italy). *Environmental Earth Sciences*, *75*, 1-10.

Martínez-Moreno, F. J., Galindo-Zaldívar, J., Pedrera, A., Teixido, T., Ruano, P., Peña, J. A., ... & Martín-Rosales, W. (2014). Integrated geophysical methods for studying the karst system of Gruta de las Maravillas (Aracena, Southwest Spain). *Journal of Applied Geophysics*, *107*, 149-162.

Matsushima, N., Kikuchi, T., Tosha, T., Nakao, S., Yano, Y., Ishido, T., ... & Ariki, K. (2000). Repeat SP measurements at the Sumikawa geothermal field, Japan. In *Proceedings of the world geothermal congress* (Vol. 4, ss. 2725-2730).

McCann, D.M., Jackson, P.D. & Fenning, P.J. (1988) Comparison of the seismic and ground-probing radar methods in geological surveying. IEE Proceedings, 135: 380–390.

McCraw, D. J., & Land, L. (2016). Sinkholes: A hidden, real New, Mexico geohazard. New Mexico Earth Matter, 16(1), 1–6

McGrath, R.C., Styles, P., Thomas, E., & S. Neale, S. (2002). Integrated high-resolution geophysical investigations as potential tools for water resource investigations in karst terrain, Environmental Geology 42:552–557.

Mcneely, R. N., Neimanis, V. P., & Dwyer, L. (1979). Water quality source book-Aguide to quality to water parameters: Inland Waters Directorate. *Water Quality Branch, Ottowa, Canada*, 26-30.

Mehanee, S. A., 2022. Simultaneous joint inversion of gravity and self-potential data measured along profile: Theory, numerical examples, and a case study from mineral exploration with cross validation from electromagnetic data. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **60**, 1–20. https:// doi. org/ 10. 1109/ TGRS. 2021. 30719 73.

Mehanee, S. A., Essa, K. S., Soliman, K. S., & Diab, Z. E., 2023. A fast imaging method for the interpretation of self-potential data with application to geothermal systems and mineral investigation. *Scientific Reports*, *13*(1), 13548.

Mehanee, S., 2014. An efficient regularized inversion approach for self-potential data interpretation of ore exploration using a mix of logarithmic and non-logarithmic model parameters. *Ore Geol. Rev.* **57**, 87–115.

Mertzanides, I.C., Soupios, P. M., Tsokas, G. N., Vargemezis, G. ve Paliadeli Saatsoglou, C., 2014. GPR Exploration for Concealed Antiquities in the Archeological Site of the Vergina, Second Balkan Geophysical Congres ve Exhibition, 130-131.

Mohammed, D. (2015). Graphical techniques of presentation of hydro-chemical data. *Journal of Environment and Earth Science*, *5*(4).

Monteiro Santos, F.A., 2010. Inversion of self-potential of idealized bodies' anomalies using particle swarm optimization. Computer & Geosciences 36, 1185-1190.

Morey, M. (1974). Continuous sub-surface profiling by impulse radar. Subsurface Exploration for Underground Excavation and Heavy Construction, ASCE Specialty Conference, Henneker, 213–232.

Moser, T. J. (1991). Shortest path calculation of seismic rays. *Geophysics*, *56*(1), 59-67.

Moustafa, S. S., Ibrahim, E. H., Elawadi, E., Metwaly, M., & Al Agami, N. (2012). Seismic refraction and resistivity imaging for assessment of groundwater seepage under a Dam site, Southwest of Saudi Arabia. *International Journal of the Physical Sciences*, *7*(48), 6230-6239.

Mutlu, Ü. (1996). *Trabzon ili akarsularındaki bazı fiziksel ve kimyasal parametrelerinin araştırılması* (Master's thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü).

Mylroie, J. E. (2019). Coastal caves. In *Encyclopedia of caves* (pp. 301-307). Academic Press.

Nabighian, M. N., 1972. The analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section: Its properties and use for automated anomaly interpretation. Geophysics 37, 507–517.

Nacar, S., Baki, O. T., & Bayram, A. (2022). Akarsularda Çözünmüş Oksijen Konsantrasyonunun Regresyon Tabanli Yöntemlerle Modellenmesi: Harşit Çayi Örneği. Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 27(1), 309-324.

Nakashima, Y., Zhou, H., & Sato, M. (2001). Estimation of groundwater level by GPR in an area with multiple ambiguous reflections. *Journal of applied geophysics*, *47*(3-4), 241-249.

Narwold, C.F. ve Owen, W.P. (2002). Seismic Refraction Analysıs of Landslides. Second International Conference on the Application of Geophysical and NDT Methodologies to Transportation Facilities and Infrastructure, Los Angeles, California.

Nazik, L., (2004). The karst regions of Turkey (According to the Morphogenesis and Morphometric Properties). Proceeding of Int. Symp. on Earth System Sciences, 77-82, Istanbul-Turkey.

Ndlovu, S., Munjeri, K., Munyaradzi, M., Magombe, E., Nyakotyo, H., & Magama, M. T. (2009). Introducing exploration geophysics to students using Ohm's law: A case study of prospecting for groundwater by Hlangabeza high school students in Nkayi rural district of Zimbabwe. *International Journal of Physics and Chemistry Education*, *1*(2), 77-85.

Neal, A. (2004). Ground-penetrating radar and its use in sedimentology: principles, problems and progress. Earth Science Reviews, 66: 261– 330.

Nolte, D. D. (2018). *Galileo unbound: A path across life, the universe and everything*. Oxford University Press.

Nordiana, M. M., Olugbenga, A. T., Saharudin, M. A., & Ismail, N. E. H. (2018, April). The application of 2-d resistivity and self potential (SP) methods in determining the water flow. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 995, No. 1, p. 012077). IOP Publishing.

Nourbehecht, B. (1963). *Irreversible thermodynamic effects in inhomogeneous media and their applications in certain geoelectric problems* (Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology).

Nyquist, J. E., Freyer, P. A., & Toran, L. (2008). Stream bottom resistivity tomography to map ground water discharge. *Groundwater*, *46*(4), 561-569.

Oberender, P., & Plan, L. (2013, July). A genetic classification of caves in Lower Austria. In *Proceedings 16th international congress of speleology, Czech Republic, Brno* (Vol. 3, pp. 390-392).

Oberender, P., & Plan, L. (2018). A genetic classification of caves and its application in eastern Austria. *Geological Society, London, Special Publications*, *466*(1), 121-136.

Ofluoğlu, S. (1993). Çalköy-Alazlı (Düzköy-Trabzon) Yöresinin Karstlaşma Yönünden İncelenmesi. ‘’Yüksek Lisans’’ tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeoloji Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Trabzon.

Ogilvy, A. A., Ayed, M. A., & Bogoslovsky, V. A. (1969). Geophysical studies of water leakages from reservoirs. *Geophysical Prospecting*, *17*(1), 36-62.

Oğuz, T. C, (2015). “İçmesuyu Arıtımında Yaygın Olarak Karşılaşılan Su Kalite Problemleri ve Arıtımı İçin Çözüm Önerileri”. Orman ve Su İşleri Bakanlığı, Uzmanlık Tezi, Ankara.

Okay, A. İ. (1989). Tectonic units and sutures in the Pontides northern Turkey. (A. M. Şengör, Ed.) Tectonic evolution of the Tethyan region, 109-115.

Okay, A. İ. (1999). Tectonic units and sutures in the Pontides northern Turkey. (A. C. Şengör, Ed.) Tectonic Evolution of the Tethyan Region, 109-115.

Okay, A. İ. (2000). Was the Late Triassic orogeny in Turkey caused by the collision of an oceanic plateau? Geological Society London Special Publications, 173(1), 25-41.

Okay, A. İ., & Göncüoğlu, M. C. (2004). The Karakaya Complex: A review of data and concepts. Turkish Journal of Earth Sciences, 13(2), 77-95.

Orojah, O. J., & Agayina, K. E. Hydro-geophysical Investigation Using Seismic Refraction Tomography to Study the Groundwater Potential of Ahmadu Bello University Main Campus, within the Basement Complex of Northern Nigeria.

Osumeje, J.O., & Kudamnya E.A. (2014). Hydro-geophysical Investigation Using Seismic Refraction tomography to Study the Groundwater potential of Ahmadu Bello University main campus, within basement Complex of Northern Nigeria’’ Journal of environment and Earth Science, 4, 2, 16–22.

Öğretmen, Z., & Şeren, A. (2014). Investigating fracture–cracked systems with geophysical methods in Bayburt Kıratlı travertine. *Journal of Geophysics and Engineering*, *11*(6), 065009.

Özdemir, A., & Palabıyık, Y. (2019). Güney (Denizli) Civarında Jeotermal Enerji Arama: Derin Düşey Elektrik Sondaj (DES) Ölçümlerinin Jeofizik ve Jeolojik Yorumu. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (17), 1198-1214.

Özer, S., Meriç, E., Görmüş, M., & Kanbur, S. (2009). Biogeographic distribution of rudists and benthic foraminifera: an approach to Campanian– Maastrichtian palaeo biogeography of Turkey, Geobios 42:623–638.

Özsayar, T., Pelin, S., & Gedikoglu, A. (1981). Dogu Pontıdler'de Kretase. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Yer Bilimleri Dergisi, Jeoloji, 1/ 2, 65-114.

Öztekin Okan, Ö. (2004). Kolan (Karakoçan) sıcak ve mineralli su kaynağı'nın hidrojeokimyasal incelemesi. *PhD. Fırat University, Elazığ, Turkey (in Turkish with English abstract, unpublished).*

Öztürk, M. Z. (2018). Karstik kapalı depresyonların (dolinlerin) morfometrik analizleri. *Coğrafya Dergisi*, (36), 1-13.

Pandey, A.K., Gogoi, J., & Pandey, P. (2019). Mapping Shallow Subsurface to Identify Sinkhole Formation in Urban Areas using Ground Penetration Radar: A Case Study from Hyderabad, India, Current Science, Vol. 117, No. 10, 25

Panthulu, T. V., Krishnaiah, C., & Shirke, J. M. (2001). Detection of seepage paths in earth dams using self-potential and electrical resistivity methods. *Engineering Geology*, *59*(3-4), 281-295.

Papadopoulos, N., & Sarris, A. (2016). Integration of geophysical and topographic surveys for the management of an ancient Greek settlement. *Journal of Applied Geophysics*, 134.

Parasnis, D.S. (1962). Principles of applied geophysics. Methuen: London. 176pp.

Park, C. B., Miller, R. D., & Miura, H. (2002). Optimum field parameters of an MASW survey. *Japanese Society of Exploration Geophysics Extended Abstracts*, *36*.

Park, C. B., Miller, R. D., & Xia, J. (1998). Imaging dispersion curves of surface waves on multi-channel record. In *SEG technical program expanded abstracts 1998* (pp. 1377-1380). Society of Exploration Geophysicists.

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

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, M. K., Park, S., Yi, M. J., Kim, C., Son, J. S., Kim, J. H., & Abraham, A. A. (2014). Application of electrical resistivity tomography (ERT) technique to detect underground cavities in a karst area of South Korea. *Environmental earth sciences*, *71*, 2797-2806.

Parker Jr, E. H., & Hawman, R. B. (2012). Multi-channel analysis of surface waves (MASW) in karst terrain, Southwest Georgia: Implications for detecting anomalous features and fracture zones. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, *17*(3), 129-150.

Patella, D. (1997). Introduction to ground surface self-potential tomography [Link]. *Geophysical Prospecting*, *45*(4), 653-681.

Pathirana, S., Lambot, S., Krishnapillai, M., Cheema, M., Smeaton, C., & Galagedara, L. (2023). Ground-Penetrating Radar and Electromagnetic Induction: Challenges and Opportunities in Agriculture. *Remote Sensing*, *15*(11), 2932.

Pazzi, V., & Donati, A. (2002). Evaluation of the top-soil covering the Carrara marble basin (northern Tuscany) by ground penetrating radar. *Journal of Applied Geophysics, 50(4),* 371-386.

Pekşen, E., Yas T., Kayman, A.Y., Özkan, C., 2011. Application of particle swarm optimization on self-potential data. Journal of Applied Geophysics 75, 305-318.

Pelin, S. (1977). Alucra (Giresun) Güneydoğu Yöresinin Petrol Olanakları Bakımından İncelenmesi, Doçentlik Tezi. Karadeniz Teknik Üniveristesi. Yer Bilimleri Fakültesi, No: 13, Trabzon, Türkiye, 115 s.

Percival, D.B., Walden, T.A., 1993. Spectral Analysis for Physical Applications: Multitaper and Conventional Univariate Techniques. Cambridge University Press, Cambridge.

Perlick, V. (2000). *Ray optics, Fermat's principle, and applications to general relativity* (Vol. 61). Springer Science & Business Media.

Petiau, G. (2000). Second generation of lead-lead chloride electrodes for geophysical applications. Pure and applied geophysics, 157 (3), 357-382.

Piper, A. M. (1944). A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, *25*(6), 914-928.

Pueyo-Anchuela, O., Pocoví Juan, A., Soriano, M.A. & Casas-Sainz A.M. (2009). Characterization of karst hazards from the perspective of the doline triangle using GPR-Examples from Central Ebro Basin (Spain), Engineering Geology 108 (2009) 225–236. 133

Rajan, M., Nelson, H. D., & Chen, W. J., 1986. Parameter sensitivity in the dynamics of rotor-bearing systems.

Rao, B.S.R., Murthy, I.V.R., Reddy, S.J., 1970. Interpretation of self-potential anomalies of some simple geometrical bodies. Pure and Applied Geophysics 78, 60-77.

Rao, S.V.S., & Mohan, N.L., 1984. Spectral interpretation of self-potential anomaly due to an inclined sheet. Current Science 53, 474-477.

Rawal, K. (2016). *Exploring the geomechanics of sinkholes: a preliminary numerical study* (Doctoral dissertation, University of Toledo).

Redhaounia, B., Ilondo, B. O., Gabtni, H., Sami, K., & Bédir, M. (2016). Electrical Resistivity Tomography (ERT) applied to Karst carbonate aquifers: case study from Amdoun, northwestern Tunisia. *Pure and Applied Geophysics*, *173*(4), 1289-1303.

Revil, A., Ehourane, L. & Thyreault, E., 2001. Tomography of self-potential anomalies of electrochemical nature, Geophysical Research Letters, 28, 4363-4366.

Revil, A., Finizola, A., & Gresse, M. (2023). Self-potential as a tool to assess groundwater flow in hydrothermal systems: A review. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 107788.

Reynolds, J.M. (1985). Dielectric behaviour of firn and ice from the Antarctic Peninsula, Antarctica. *Journal of Glaciology*, 31 (109): 253–262.

Reynolds, J. M. (2011). An introduction to applied and environmental geophysics. John Wiley & Sons.

Robert, T., Dassargues, A., Brouyere, S., Kaufmann, O., Hallet, V., & Nguyen F. (2011). Assessing the contribution of electrical resistivity tomography (ERT) and self-potential (SP) methods for water well drilling program in fractured/karstified limestones, Journal of Applied Geophysics 75 (1): 42-53.

Roberts, R. L. and Daniels, J. J., 1996. Analysis of GPR Polarization Phenomena, JEEG, 1, 2, 139-157.

Robinson, A.G., Banks, C.J., Rutherford, M.M., & Hirst, J.P.P. (1995). Stratigraphic and structural development of the Eastern Pontides, Turkey. J Geol Soc 152(5):861–872.

Robinson, M. Bristow, C., McKinley, J., Ruffell, A. (2013). Ground penetrating radar school of geography, archaeology and palaeoecology, Queen's University Belfast 2. Department of Earth and Planetary Sciences, Birkbeck University of London.

Rodriguez, V., Gutiérrez, F., Green, A. G., Carbonel, D., Horstmeyer, H., & Schmelzbach, C. (2014). Characterizing sagging and collapse sinkholes in a mantled karst by means of ground penetrating radar (GPR). *Environmental & engineering geoscience*, *20*(2), 109-132.

Ruan, W., Liu, B., Liu, H., Dong, H., & Sui, Y. (2023). Ground Penetrating Radar (GPR) Identification Method for Agricultural Soil Stratification in a Typical Mollisols Area of Northeast China. *Chinese Geographical Science*, 1-15.

Runkel, A. C., Tipping, R. G., Green, J. A., Mossler, J. H., Alexander, S. C., & Alexander Jr, E. C. (2003). Hydrogeology of the Paleozoic bedrock in southeastern Minnesota, Minnesota geological survey report of investigations 61. *St Paul, Minnesota, University of Minnesota*.

Rutschlin, M., Cloete, J.H., Mason, I. & Palmer, K.D. (2007) The¨ radio frequency dielectric properties of the stratified UG1-UG2 geological unit in the Bushveld Complex. *Journal of Applied Geophysics*, 62: 354–360.

Salon, S., & Chari, M. V. K. (1999). Numerical methods in electromagnetism. Elsevier.

Sargın A.H. (2010). Yeraltısuları, DSİ Jeoteknik Hizmetler ve Yeraltısuları Dairesi Başkanlığı, Ankara, Türkiye.

Sarı, M. (2012). *Jipslerin jeofiziksel özelliklerinin incelenmesi (Sivas örneği)* (Master's thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü).

Saribudak, M. (2015). The million dollar question: Which geophysical methods locate caves best over the Edwards Aquifer? A potpourri of case studies from San Antonio and Austin, Texas, USA.

Saribudak, M. (2016). Geophysical mapping of Mount Bonnell fault of Balcones Fault zone and its implications on Trinity-Edwards Aquifer interconnection, central Texas, USA, The Leading Edge, 35(9), 936-941.

Saribudak, M., & Hauwert, N. M. (2017). Integrated geophysical investigations of Main Barton Springs, Austin, Texas, USA. *Journal of Applied Geophysics*, *138*, 114-126.

Saribudak, M., Hauwert, N. & Hawkins, A. (2013). Geophysical signatures of Barton Springs (Parthenia, Zenobia and Eliza) of the Edwards Aquifer, Austin, Texas'', Sinkhole Conference 14 proceedings, Carbonite and Evaporites, Springer, ISSN 0891-2556.

Sasai, Y., Zlotnicki, J., Nishida, Y., Yvetot, P., Morat, P., Murakami, H., ... & Sekiguchi, W. (1997). Electromagnetic Monitoring of Miyake-jima Volcano, Izu-Bonn Arc, Japan: A Preliminary Report. *Journal of geomagnetism and geoelectricity*, *49*(11-12), 1293-1316.

Sato, M., & Mooney, H. M. (1960). The electrochemical mechanism of sulfide self-potentials. *Geophysics*, *25*(1), 226-249.

Sayed, S.R.M., Elkhedr, H.I., Eslam, E., Mohamed, M. ve Naser, A. (2012). Seismic refraction and Resistivity imaging for assessment of groundwater seepage under a Dam site, Southwest of Saudi Arabia, International Journal of the Physical Sciences, vol. 7, no. 48, p 6230 – 6239.

Schoeller, H. (1965). Hydrodynamique lans le karst. Actes du Colloque de Dubrovnik, IAHS.

SeisImager/2D, 2005. Manual V 1.4 WindowsTM software for analysis of surface waves (Pickwin v. 3.14; WaveEq v. 2.07), including explanation of Geometrics Seismodule Controller Software Surface Wave Data Acquisition Wizards. ftp://geom. geometrics.com/pub/seismic/SeisImager.

Sengupta, B. (2013). Drinking water quality: standards and practices. In Water quality monitoring and management (pp. 1-19). Springer, Berlin, Heidelberg.

Şenkaya, M., & Karslı, H. (2021). Sismik Kırılma Verilerinde Jeofon Merkez Frekansının İlk Varış Zamanları Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, *9*(3), 880-893.

Shah, S.D., Smith, B.D., Clark, A.K. & Payne, J.D. (2008). An Integrated Hydrogeologic and Geophysical Investigation to Characterize the Hydrostratigraphy of the Edwards Aquifer in an Area of Northeastern Bexar County, Texas, USGS Scientific Investigations Report, 2008-5181.

Sharma, P. V. (1997). *Environmental and engineering geophysics*. Cambridge university press.

Sharma, P.V. (2002). *Environmental and engineering geophysics*. Cambridge University Press.

Sheehan, J. R., Doll, W. E., & Mandell, W. A. (2005). An evaluation of methods and available software for seismic refraction tomography analysis. *Journal of Environmental & Engineering Geophysics*, *10*(1), 21-34.

Sheriff, S. (2010) Processing Ramac GPR Data with Reflex. 1-7.

Shevnin, V. A., Bobachev, A. A., Ivanova, S. V., & Baranchuk, K. I. (2014, September). Joint analysis of self potential and electrical resistivity tomography data for studying Alexandrovsky settlement. In *Near Surface Geoscience 2014-20th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics* (Vol. 2014, No. 1, pp. 1-5). European Association of Geoscientists & Engineers.

Siska, P. P., Goovaerts, P., & Hung, I. K. (2016). Evaluating susceptibility of karst dolines (sinkholes) for collapse in Sango, Tennessee, USA. *Progress in physical geography*, *40*(4), 579-597.

Smith, B. D., Cain, M.J., Clark, A.K., Moore, D.W., Faith J.R., & Hill. P.L. (2005). Helicopter electromagnetic and magnetic survey data and maps, northern Bexar County'', U.S. Geological Survey Open-file Report 2005–1158.

Sonkamble, S., & Chandra, S. (2021). GPR for earth and environmental applications: Case studies from India. *Journal of Applied Geophysics*, *193*, 104422.

Srivastava, S., Datta, D., Agarwal, B.N.P., Mehta, S., 2014. Applications of Ant Colony Optimization in determination of source parameters from total gradient of potential fields, Near Surface Geophysics, 12, 373-389.

Stevanovic, Z., & Dragisic, V. (1998). An example of identifying karst groundwater flow, Environmental Geology 35 (4): 241-244.

Stoica, P., Moses, R.L., 2005. Spectral Analysis of Signals. Prentice Hall, New Jersey.

Sudakova, M., Sadurtdinov, M., Skvortsov, A., Tsarev, A., Malkova, G., Molokitina, N., & Romanovsky, V. (2021). Using ground penetrating radar for permafrost monitoring from 2015–2017 at calm sites in the Pechora river delta. *Remote Sensing*, *13*(16), 3271.

Sundararajan, N., Srinivas, Y., 1996. A modified Hilbert transform and its application to self-potential interpretation. Journal of Applied Geophysics 36, 137-143.

Susilo, A., Sunaryo, A. T., Sutanhaji, A. T., & Hasan, M. F. (2017). Identification of underground river flow in Karst Area using geoelectric and self-potential methods in Druju Region, Southern Malang, Indonesia. vol, 12, 10731-10738.

Şahinci, A. (1991). Doğal Suların Jeokimyası, Reform Matbaası, İzmir, 548s.

Şeren, A., Gelisli, K., & Catakli, A. (2008). A geophysical investigation of the late roman underground settlement at Aydintepe, Northeast Turkey. *Geoarchaeology: An International Journal*, *23*(6), 842-860.

Şeren, A., Babacan, A.E., Gelisli, K., Ögretmen, Z., & Kandemir, R. (2012). An investigation for potential extensions of the Karaca Cavern using geophysical methods. *Carbonates Evaporites* 27:321–329.

Tarcan, G., Filiz, Ş., Gemici, U., & Sezer, U. (1999). Diyarbakır akiferlerinin hidrojeokimyasal özellikleri ve kirlenebilirliği. Geological Bulletin of Turkey, 42(2).

Taylor, C. J., & Greene, E. A. (2008). Hydrogeologic characterization and methods used in the investigation of karst hydrology. *Field techniques for estimating water fluxes between surface water and ground water*, 71-114.

Telford, W. M., Geldart, L. P., & Sheriff, R. E. (1990). *Applied geophysics*. Cambridge university press.

Telford, W.M., Geldart, L.P., Sheriff, R.E. (1990). *Resistivity Methods*. In: Applied Geophysics, 2nd Edition, Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK, 353-358

Thomas, T.M. (1974). The South Wales interstratal karst. *Transactions of the British Cave Research Association*, 1, 131–152.

Thomson, D.J., 1982. Spectrum estimation and harmonic analysis. Proceedings of IEEE 70, 1055-1096.

Topp, G. C., Davis, J. L., & Annan, A. P. (1980). Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines. *Water resources research*, *16*(3), 574-582.

Törk, K., Çakir, K., & Kahraman, İ. (2013). Çal Mağarasi (Trabzon-Düzköy) Araştirma Raporu.

Tripathi, G. N., & Frayar, A. E. (2016). Integrated surface geophysical approach to locate a karst conduit: a case study from Royal Spring Basin, Kentucky, USA. *J. Nepal Geol. Soc*, *51*, 27-37.

Tuzer, M. (2015). Yer Radarı ile Karstik Boşluk Araştırmaları, ‘’Yüksek Lisans’’ Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Avrasya Yer Bilimleri Enstitüsü, Yer Sistem Bilimi Bilim Dalı, 91s, İstanbul. 134

Türk-Öz, E., & Özyurt, M. (2018). Palaeoenvironment reconstruction and planktonic foraminiferal assemblages of Campanian (Cretaceous) carbonate succession, Çayırbağ area (Trabzon, NE Turkey), *Carbonates and Evaporites*, 33, 1-33.

Ugwu, S. A., & Nwankwoala, H. O. (2008). Application of seismic refraction methods in groundwater studies in Calabar Southeastern Nigeria. *Scientia Africana, 7*(2).

Ulrych, T.J., Bishop, T.N., 1975. Maximum entropy spectral analysis and autoregressive decomposition. Reviews

Uncuoglu, E., Citakoglu, H., Latifoglu, L., Bayram, S., Laman, M., Ilkentapar, M., & Oner, A. A. (2022). Comparison of neural network, Gaussian regression, support vector machine, long short-term memory, multi-gene genetic programming, and M5 Trees methods for solving civil engineering problems. *Applied Soft Computing*, *129*, 109623.

URL-1. (2024, Nisan 15). How do you read a piper diagram: https://www.tiloom.com/en/how-to-read-a-piper-diagram/ adresinden alınmıştır.

Valois, R., Camerlynck, C., Dhemaied, A., Guerin, R., Hovhannissian, G., Plagnes, V., Rejiba, F., & Robain, H. (2011). Assessment of doline geometry using geophysics on the Quercy plateau karst (South France), *Earth Surf. Process. Landf. 36*:1183–1192.

Vandergriff, L.J. (2008). Nature and properties of light. In: C. Roychoudhuri (eds.), Fundamentals of Photonics. Bellingham: SPIE Press. pp 1-38

Varnavina, A.V., Khamzin, A.K., Kidanu, S.T., & Anderson, N.L. (2019). Geophysical site assessment in karst terrain: a case study from South western Missouri, Journal of Applied Geophysics, 170 (2019) 103838.

Verep, B., Serdar, O., Turan, D., & Sahin, C. (2005). Iyidere (Trabzon)'nin fiziko-kimyasal açıdan su kalitesinin belirlenmesi. *Ekoloji*, *15*(57), 7-16.

Veress, M. (2016). *Covered karsts*. Springer.

Veress, M. (2020). Karst types and their karstification. *Journal of Earth Science*, *31*(3), 621-634.

Waltham, A. C., & Fookes, P. G. (2003). Engineering classification of karst ground conditions. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, *36*(2), 101-118.37-55.

Wanfang, Z., Beck, B. F., & Stephenson, J. B. (1999). Investigation of groundwater flow in karst areas using component separation of natural potential measurements. *Environmental Geology*, *37*(1), 19-25.

White, W. B. (2002). Karst hydrology: recent developments and open questions. *Engineering geology*, *65*(2-3), 85-105.

White, W.B. (2015). Chemistry and karst. ACTA Carsologica **44**(3), 349–362, doi: 10.3986/ac.v44i3.1896.

Wijewardana, Y. G. N. S., & Galagedara, L. W. (2010). Estimation of spatio-temporal variability of soil water content in agricultural fields with ground penetrating radar. *Journal of Hydrology*, *391*(1-2), 24-33.

Williams, M. A., & Ziegler, S. (2014). Local Regulatory Protection for Ecosystem Services: A Case Study from the Karst Region of Southeast Minnesota, USA.

Xia, J., Miller, R. D., & Park, C. B. (1999). Estimation of near-surface shear-wave velocity by inversion of Rayleigh waves. Geophysics, 64(3), 691-700.

Xia, J., Miller, R. D., Park, C. B., Hunter, J. A., & Harris, J. B. (1999). Evaluation of the MASW technique in unconsolidated sediments. In *SEG Technical Program Expanded Abstracts 1999* (pp. 437-440). Society of Exploration Geophysicists.

Xiang, L., Zhou, H. L., Shu, Z., Tan, S. H., Liang, G. Q., & Zhu, J. (2013). GPR evaluation of the Damaoshan highway tunnel: A case study. *Ndt & E International*, *59*, 68-76.

Yalçın, H. ve Gürü, M. (2010) Su Teknolojisi, 2. Baskı, Palme Yayıncılık, Ankara.

Yang, Y., Xu, W., Chen, J., Chen, Q., & Pan, Z. (2018). Hydrochemical Characteristics and Groundwater Quality Assessment in the Diluvial Fan of Gaoqiao, Emei Mountain, China. *Sustainability*, *10*(12), 4507.

Yasukawa, K., Ishido, T., & Kajiwara, T. (2005). Geothermal reservoir characterization by SP monitoring. In *Proceedings of the World Geothermal Congress 2005, Antalya, Turkey*.

Yasukawa, K., Mogi, T., Widarto, D., & Ehara, S. (2003). Numerical modeling of a hydrothermal system around Waita volcano, Kyushu, Japan, based on resistivity and self-potential survey results. *Geothermics*, *32*(1), 21-46.

Ye, Z., & Ye, Y. (2019). Comparison of detection effect of cavities behind shield tunnel segment using transient electromagnetic radar and ground penetration radar. *Geotechnical and Geological Engineering*, *37*, 4391-4403.

Yelf, R. (2004, June). Where is true time zero? In *Proceedings of the Tenth International Conference on Grounds Penetrating Radar, 2004. GPR 2004.* (Vol. 1, pp. 279-282). IEEE.

Yerüstü Su Kalitesi Yönetmeliği (YSKY), 2021, Resmi Gazete, Başbakanlık Basımevi, 28483, 9-33.

Yılmaz, Ö. (1987) Seismic data processing. Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, OK.

Young, M. E., De Bruijn, R. G. M., & Al-Ismaily, A. S. (1998). Exploration of an alluvial aquifer in Oman by time-domain electromagnetic sounding. *Hydrogeology Journal*, *6*, 383-393.

Yüksel, A. (2007). Üçtepe yöresinin (İmamoğlu–Adana) hidrojeolojik incelemesi. *Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Ensititüsü, Yüksek Lisans Tezi*.

Yüngül, S., 1950. Interpretation of spontaneous-polarization anomalies caused by spherical ore bodies. Geophysics 15, 237-246.

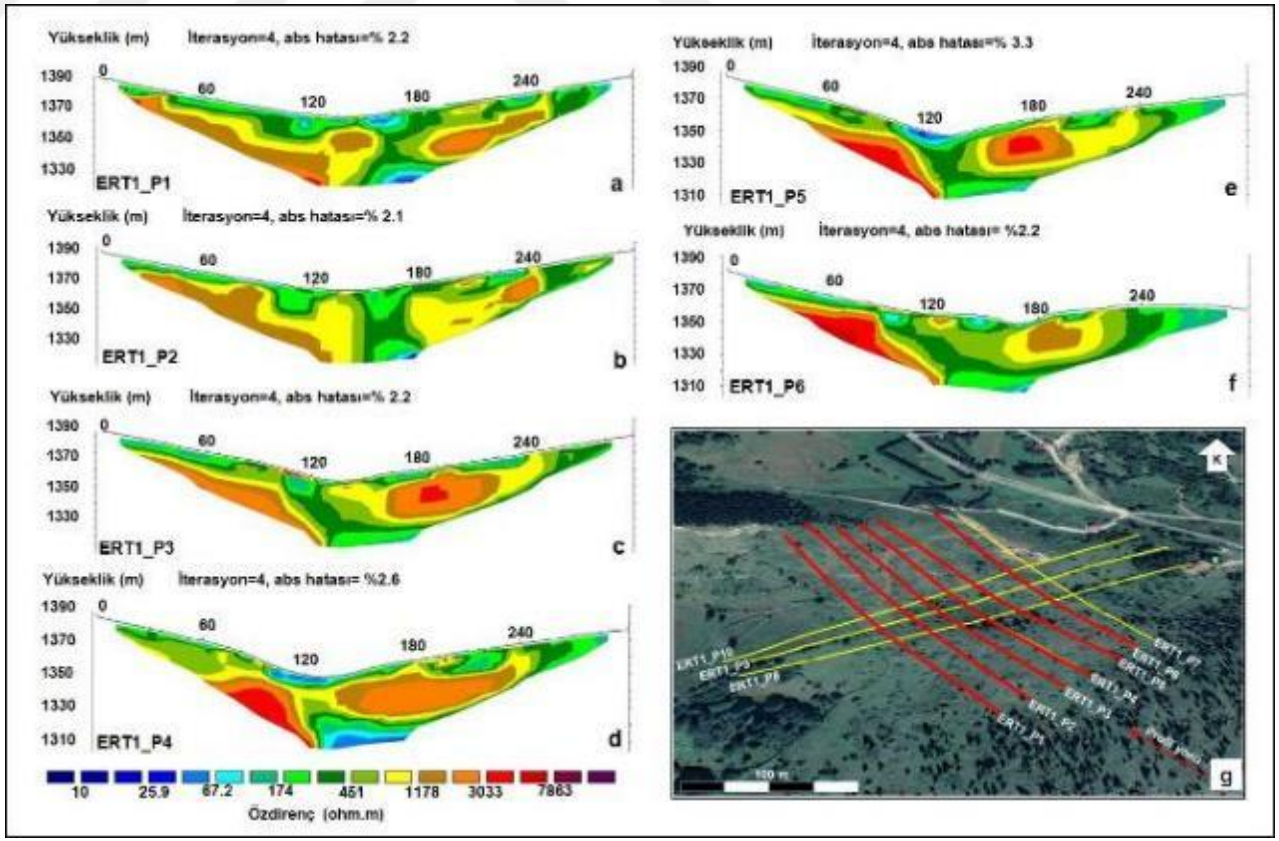
Zeybek, M., & Kalyoncu, H. (2016). The determination of water quality of Kargı Stream (Antalya, Turkey) in terms of physicochemical parameters (in Turkish with English abstract), Ege Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 33(3), 223-231.

Zhao, W., Yuan, L., Forte, E., Lu, G., Tian, G., & Pipan, M. (2021). Multi-frequency GPR data fusion with genetic algorithms for archaeological prospection. *Remote Sensing*, *13*(14), 2804.

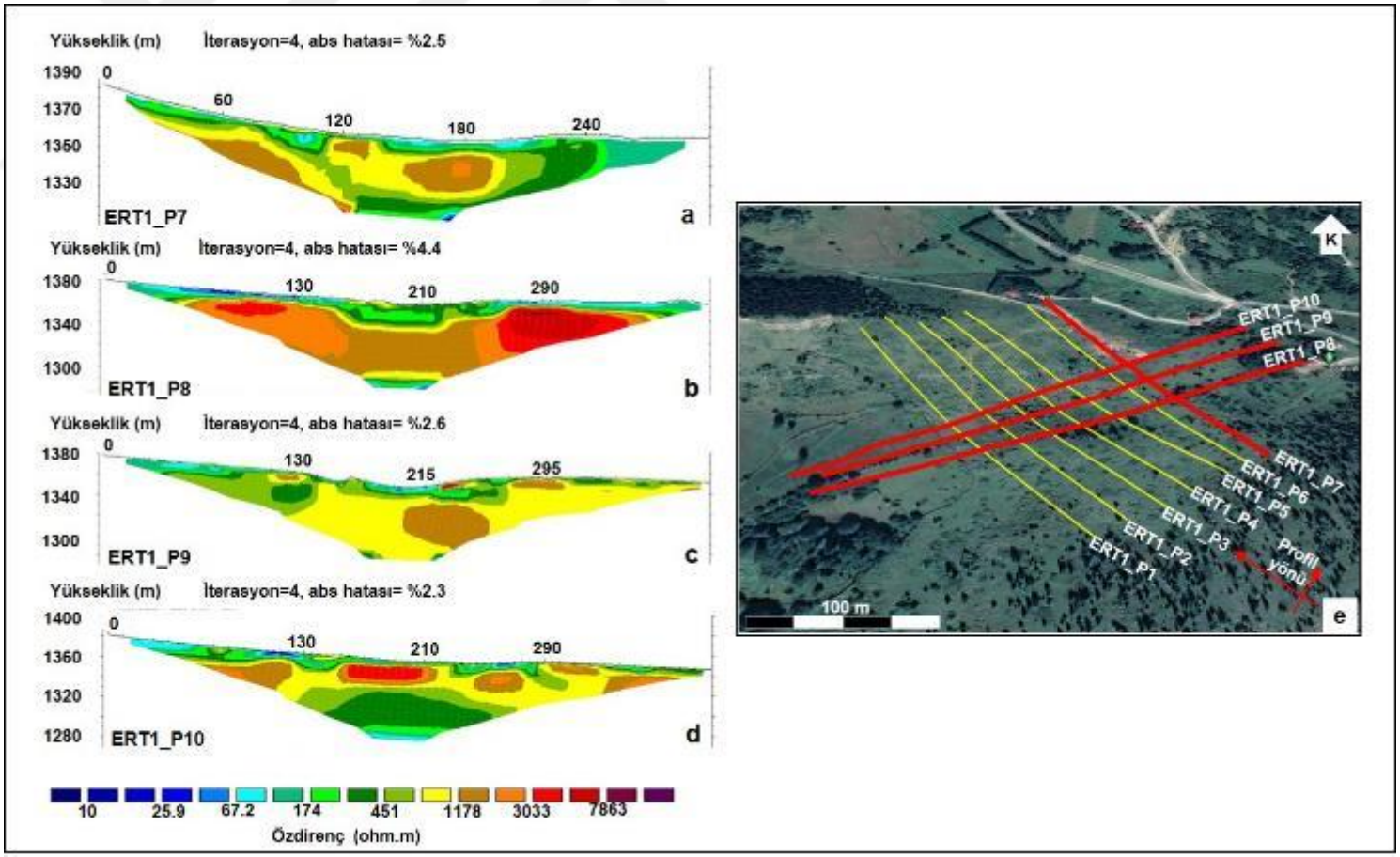
Zhou, W., Beck, B.F., & Stephenson, J.B. (2000). Reliability of dipole-dipole electrical resistivity tomography for defining depth to bedrock in covered karst terranes, Environmental Geology 39 (7).

6. EKLER

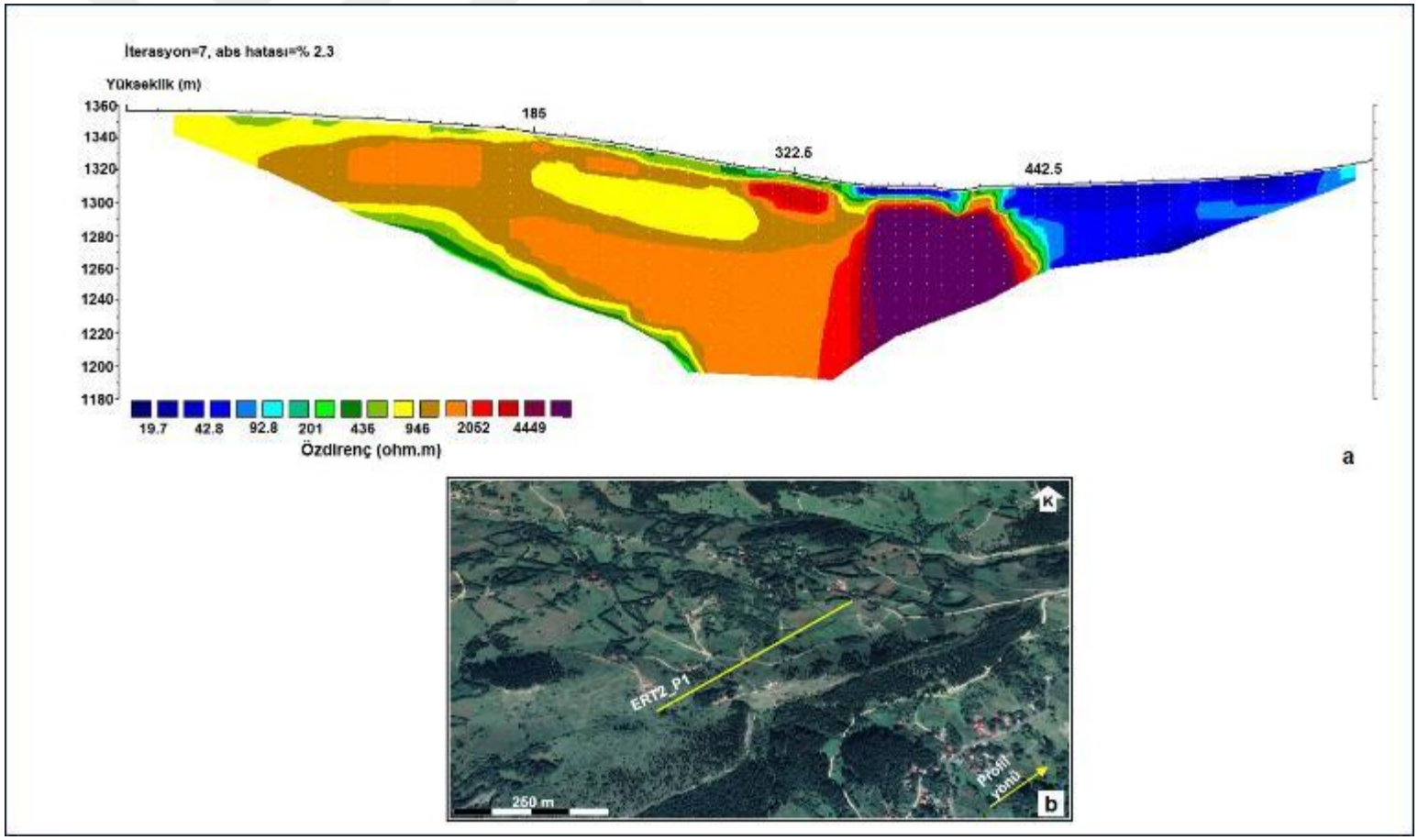
Ek 1. Çalışma Alanı 1'den elde edilen 2B *ERT* (ERT1_P1-ERT1_P6) kesitleri. a) ERT1_P1, b) ERT1_P2, c) ERT1_P3, d) ERT1_P4, e) ERT1_P5, f) ERT1_P6 kesitleri, g) ERT1_P1-ERT1_P6 kesitlerinin elde edildiği profiller (kırmızı çizgiler)



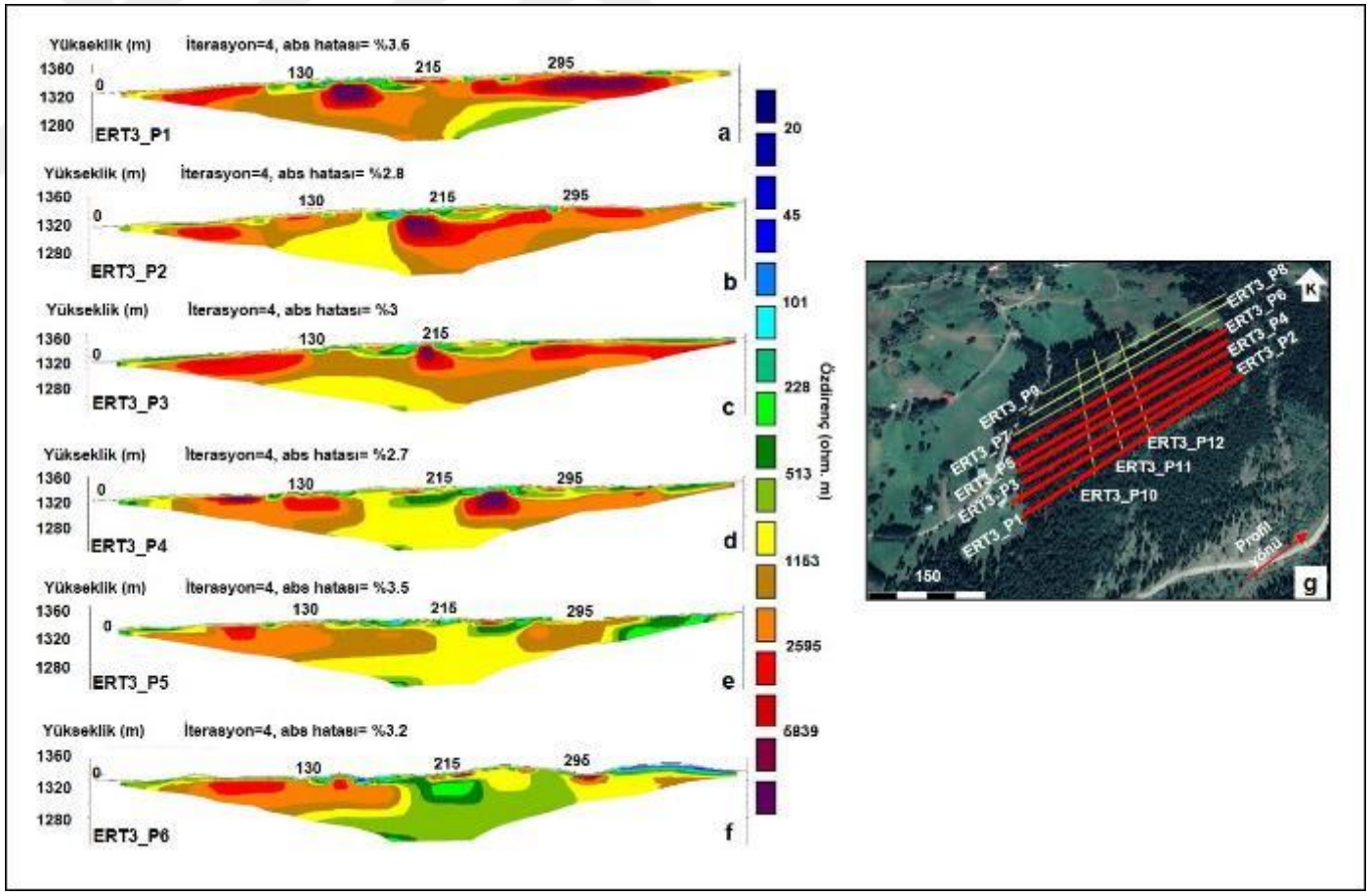
Ek 2. Çalışma Alanı 1'den elde edilen 2B *ERT* (ERT1_P7-ERT1_P10) kesitleri. a)ERT1_P7, b) ERT1_P8, c) ERT1_P9, d) C) ERT1_P9, e) ERT1_P7-ERT1_P10 kesitlerinin elde edildiği profiller (kırmızı çizgiler)



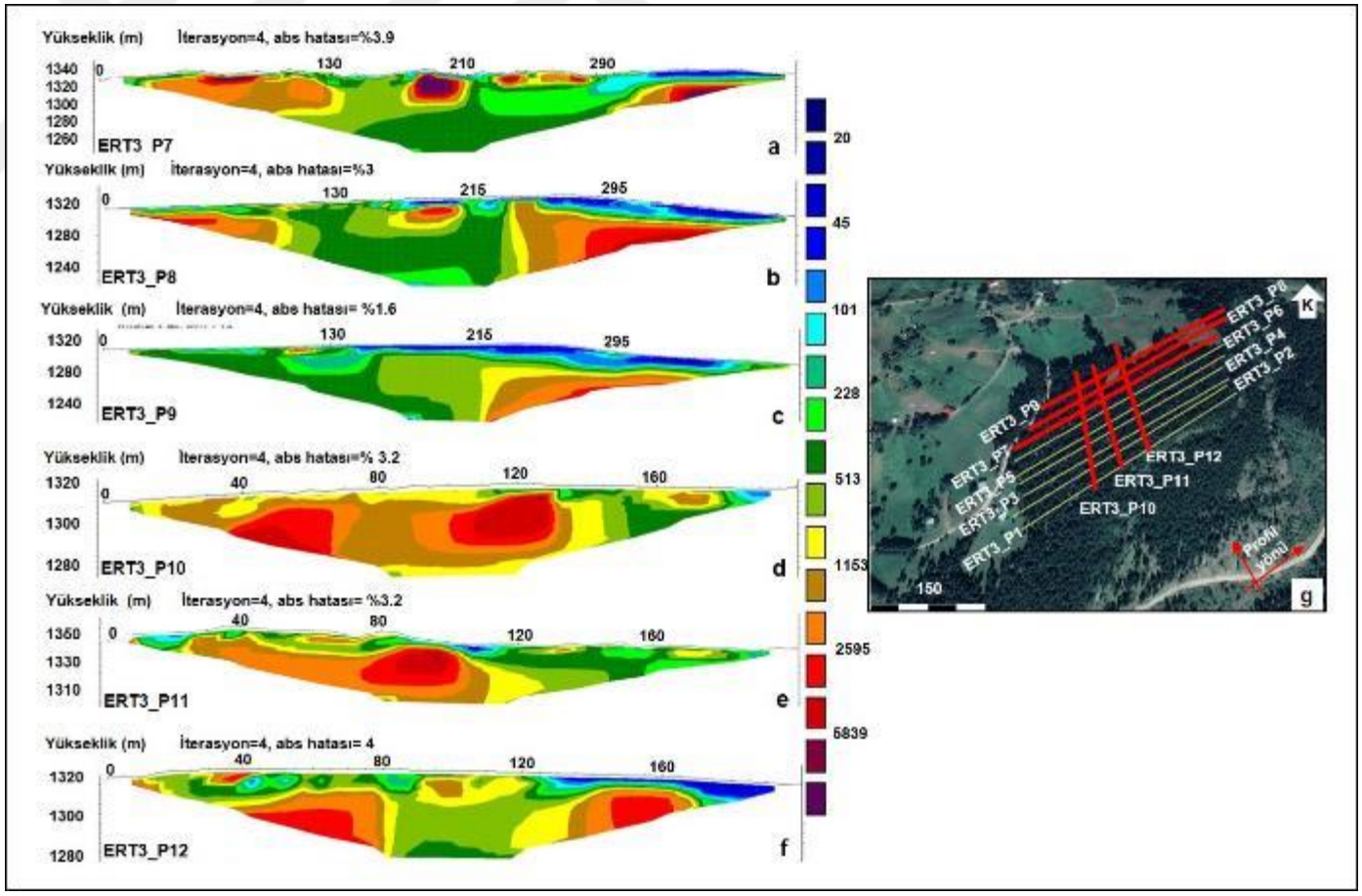
Ek 3. a) Çalışma Alanı 2'deki ERT2_P1 profilinden elde edilen ERT2_P1 kesiti, b) Çalışma Alanı 2, ERT2_P1 profili



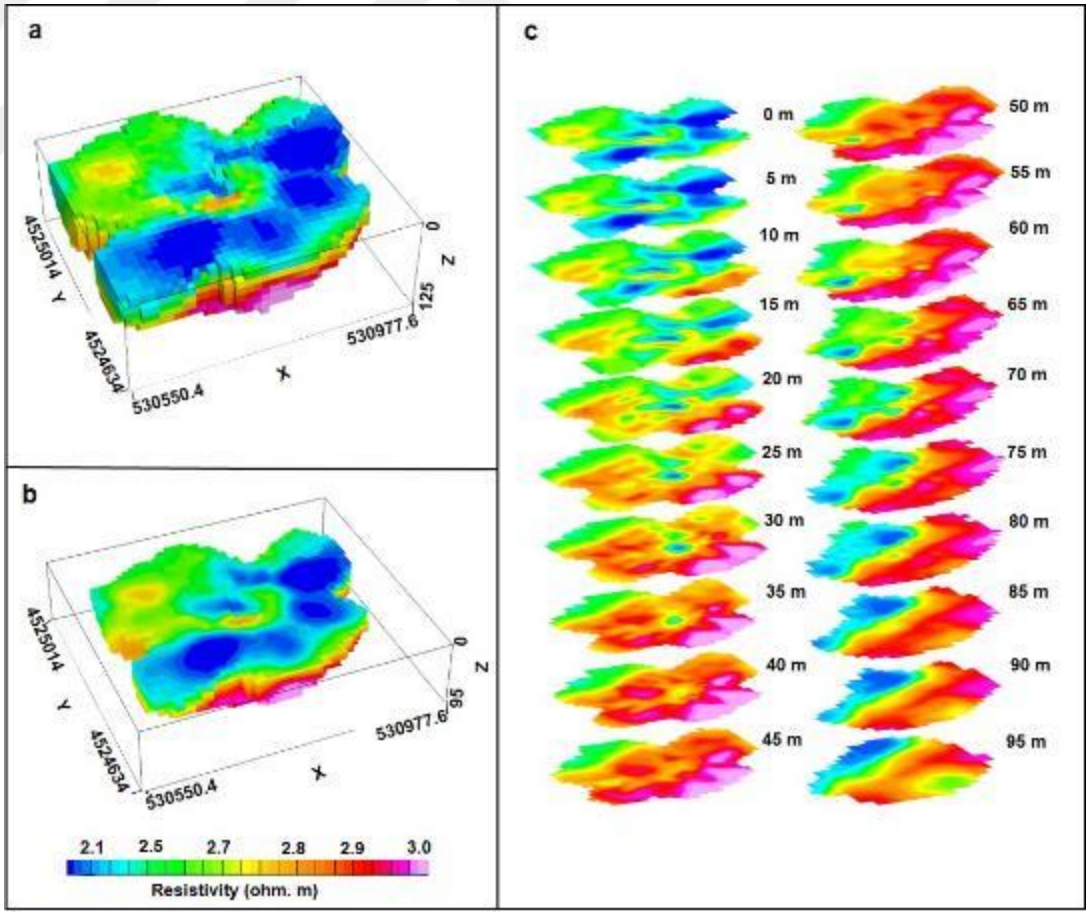
Ek 4. Çalışma Alanı 3'ten elde edilen 2B *ERT* kesitleri (ERT3_P1-ERT3_P6). a) ERT3_P1, b) ERT3_P2, c) ERT3_P3, d) ERT3_P4, e) ERT3_P5, f) ERT3_P6 kesitleri, g) ERT3_P1-ERT3_P6 kesitlerinin elde edildiği profiller (kırmızı çizgiler)



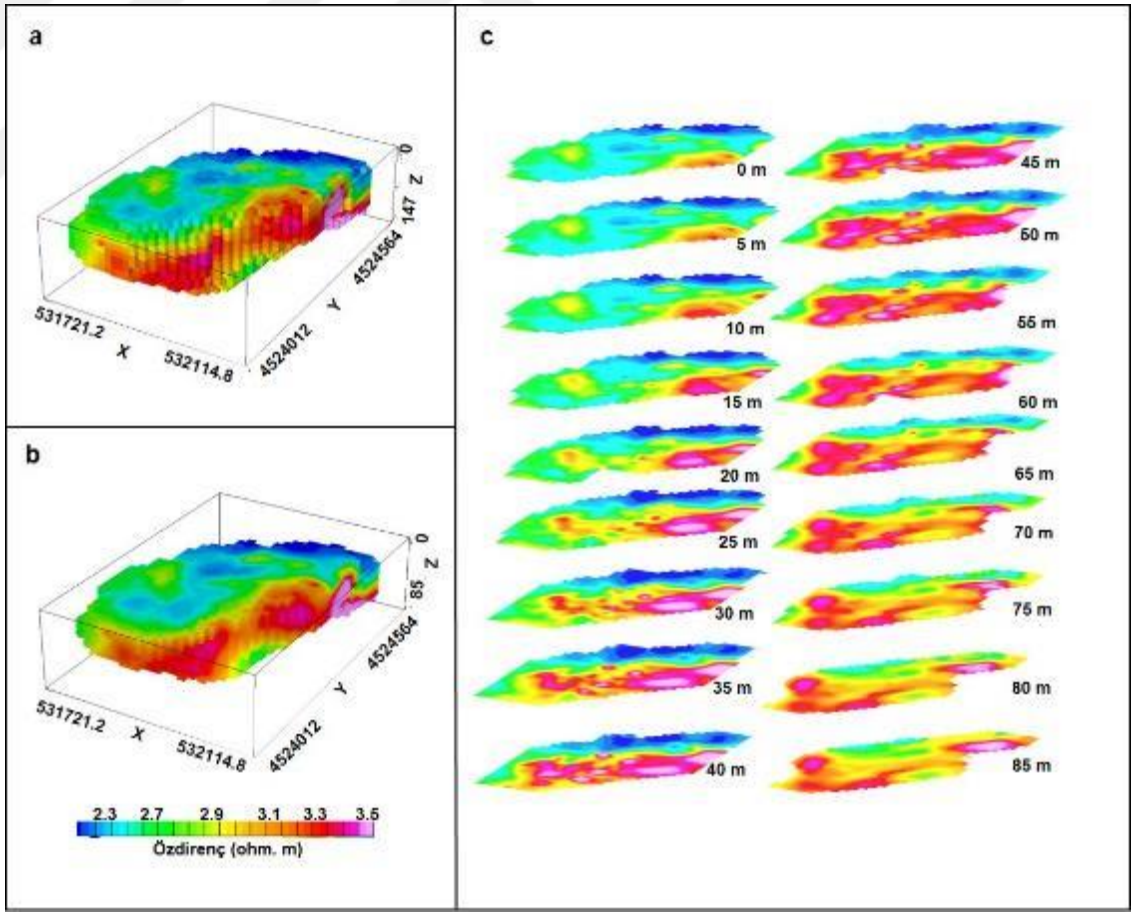
Ek5. Çalışma Alanı 3'ten elde edilen 2B ERT kesitleri (ERT3_P7-ERT3_P12). a) ERT3_P7, b) ERT3_P8, c) ERT3_P9, d) ERT3_P10, e) ERT3_P11, f) ERT3_P12 kesitleri, g) ERT3_P7-ERT3_P12 kesitlerinin elde edildiği profiller (kırmızı çizgiler)



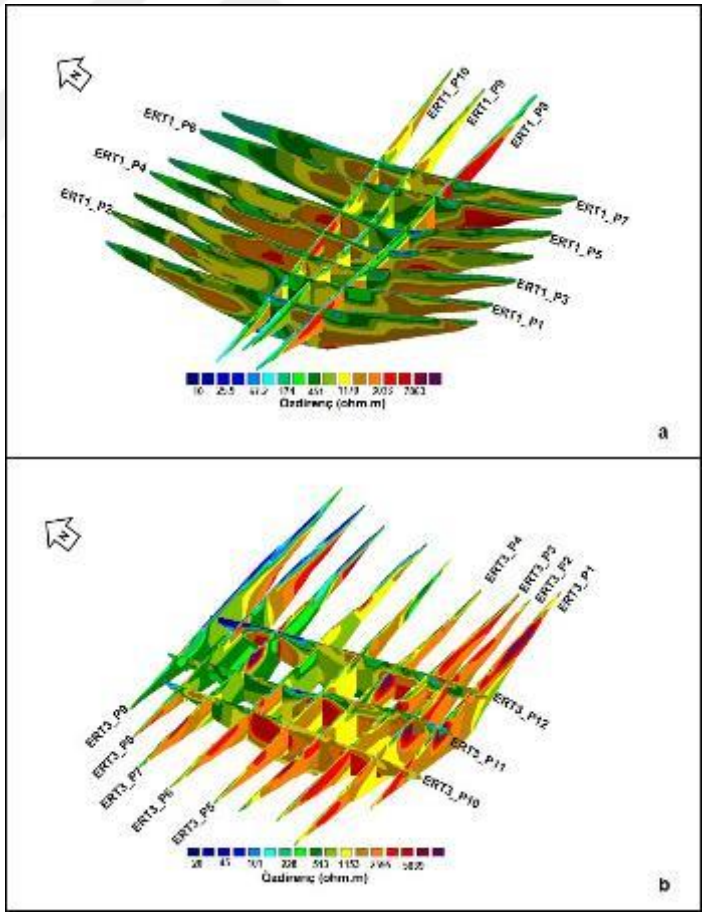
Ek 6. Çalışma Alanı 1, 3B'lu *ERT* görüntüleri ve seviye haritaları, a) Çalışma Alanı 1'den elde edilen 3B'lu *ERT* görüntüsü, b) 3B'lu *ERT* görüntü seviye haritalarının bir aradaki görüntüsünü, c) 3B'lu *ERT* görüntüsünün her 5 m de bir görüntülenen seviye haritaları



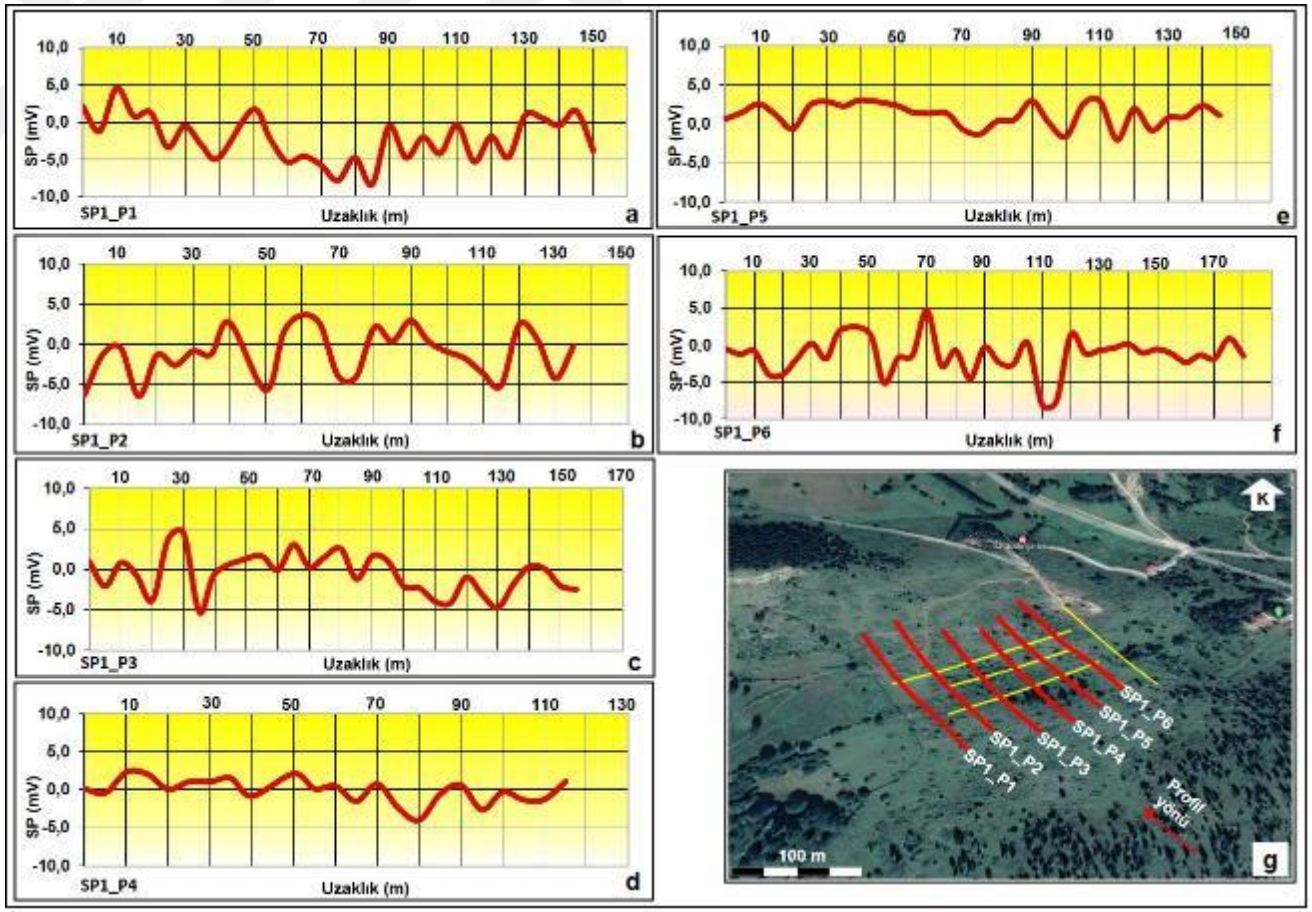
Ek 7. Çalışma Alanı 3, 3B'lu ERT görüntüleri ve seviye haritaları. a) Çalışma Alanı 3'den elde edilen 3B'lu ERT görüntüsü, b) 3B'lu ERT görüntü seviye haritalarının bir aradaki görüntüsünü, c) 3B'lu ERT görüntüsünün her 5 m de bir görüntülenen seviye haritaları



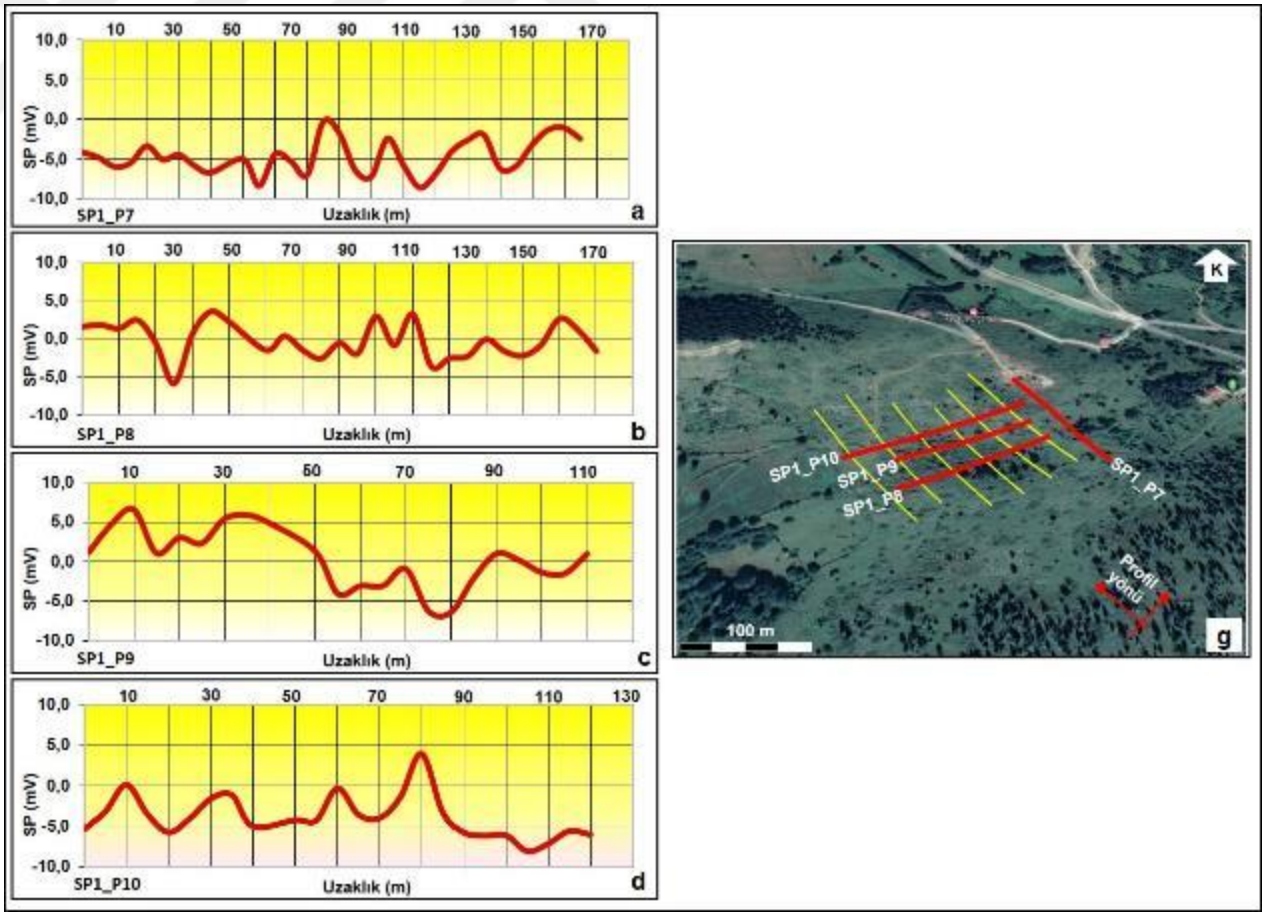
Ek 8. Fence diyagramları. a) Çalışma Alanı 1'den, b) Çalışma Alanı 2'den elde edilen *ERT* kesitlerinin fence diyagramı



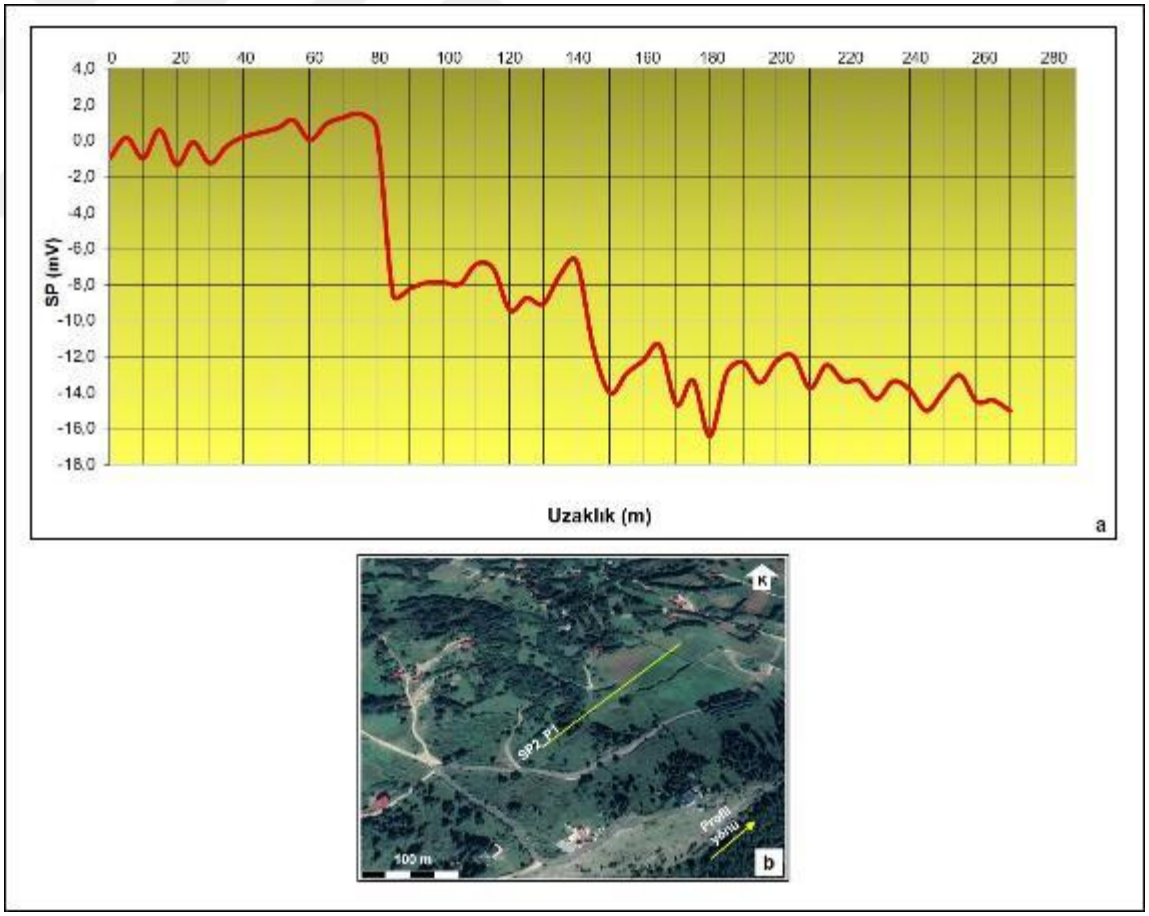
Ek 9. Çalışma Alanı 1'den elde edilen *SP* (SP1_P1-SP1_P6) kesitleri. a) SP1_P1, b) SP1_P2, c) SP1_P3, d) SP1_P4, e) SP1_P5, f) SP1_P6 kesitleri, g) SP1_P1-SP1_P6 kesitlerinin elde edildiği profiller (kırmızı çizgiler)



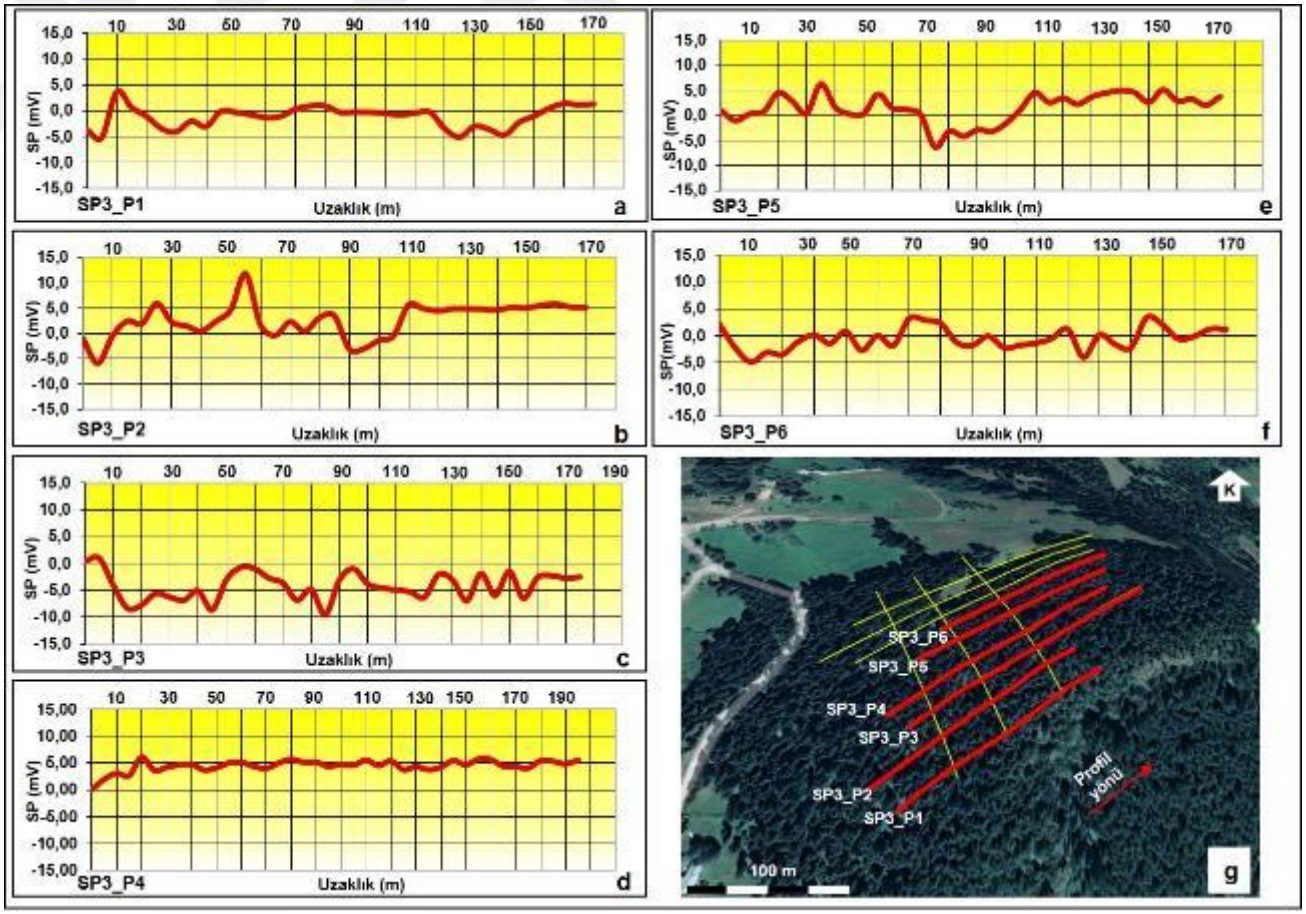
Ek 10. Çalışma Alanı 1'den elde edilen *SP* (SP1_P7-SP1_P10) kesitleri. a) SP1_P7, b) SP1_P8, c) SP1_P9, d) SP1_P10 kesitleri, e) SP1_P7-SP1_P10 kesitlerinin elde edildiği profiller (kırmızı çizgiler)



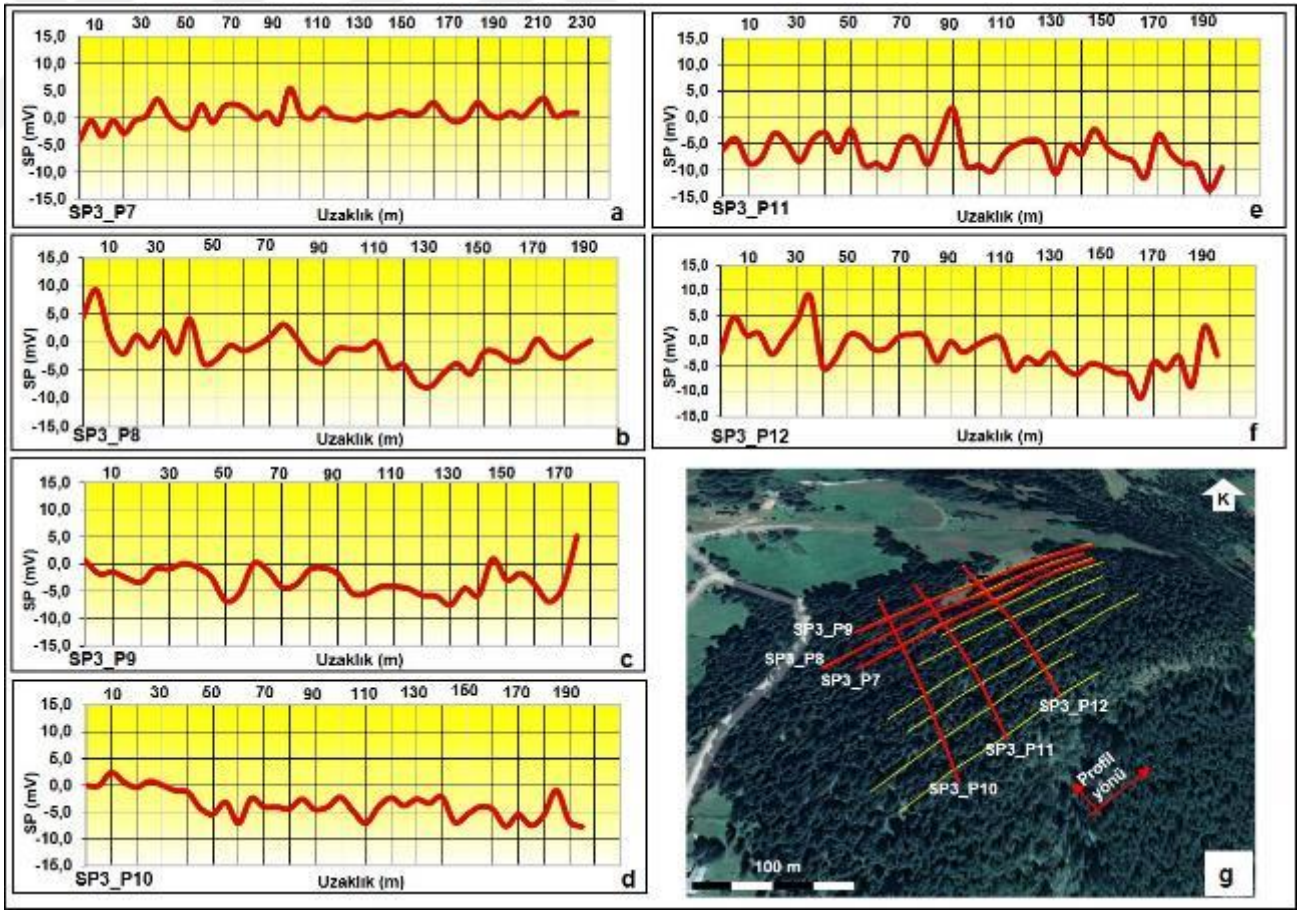
Ek 11. a) Çalışma Alanı 2'den elde edilen SP2_P1 kesiti, b) SP2_P1 kesitinin elde edildiği profil



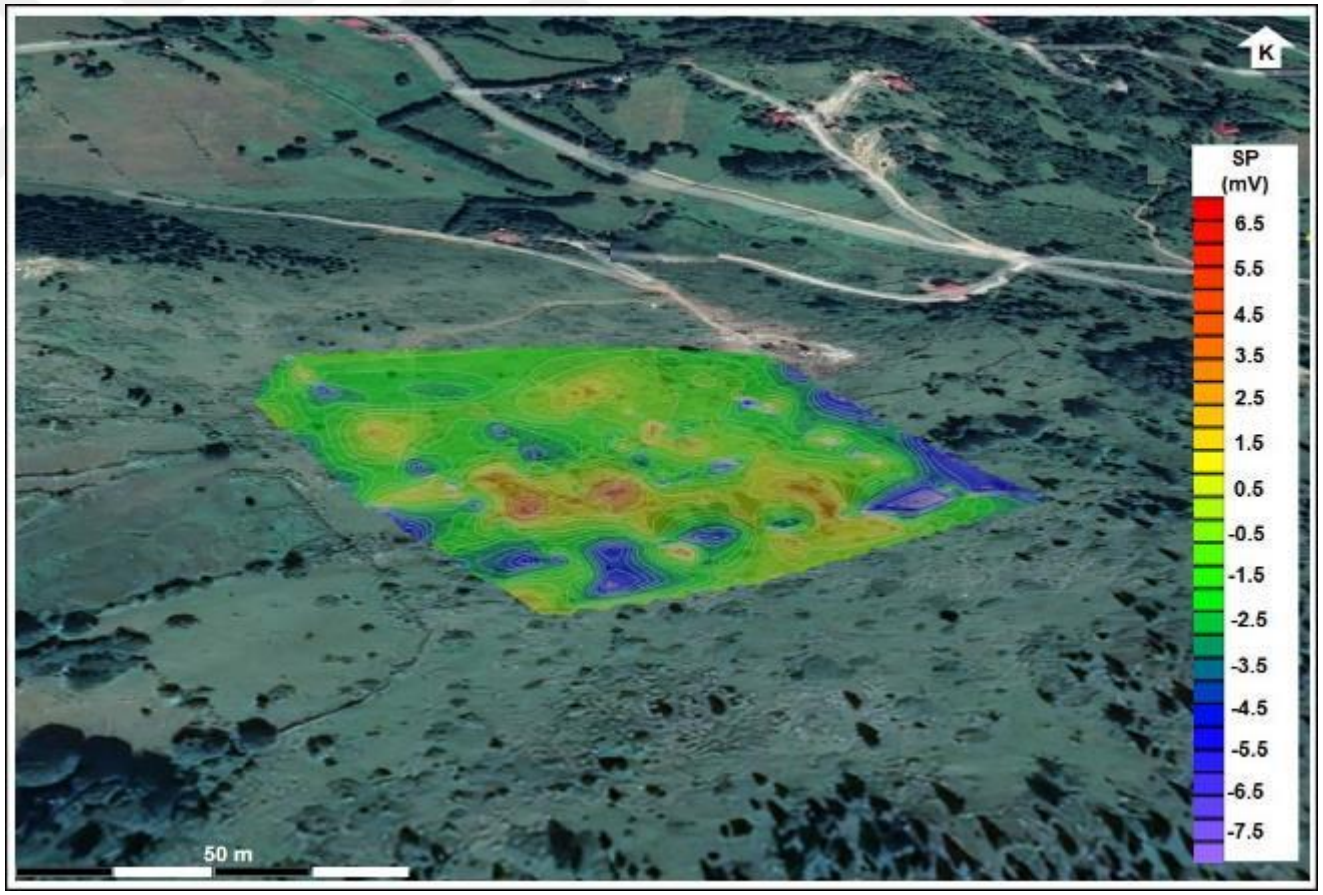
Ek 12. Çalışma Alanı 3'ten elde edilen *SP* (SP3_P1-SP3_P6) grafikleri. a) SP3_P1, b) SP3_P2, c) SP3_P3, d) SP3_P4, e) SP3_P5, f) SP3_P6 grafikleri, g) SP3_P1-SP3_P6 kesitlerinin elde edildiği profiller (kırmızı çizgiler)



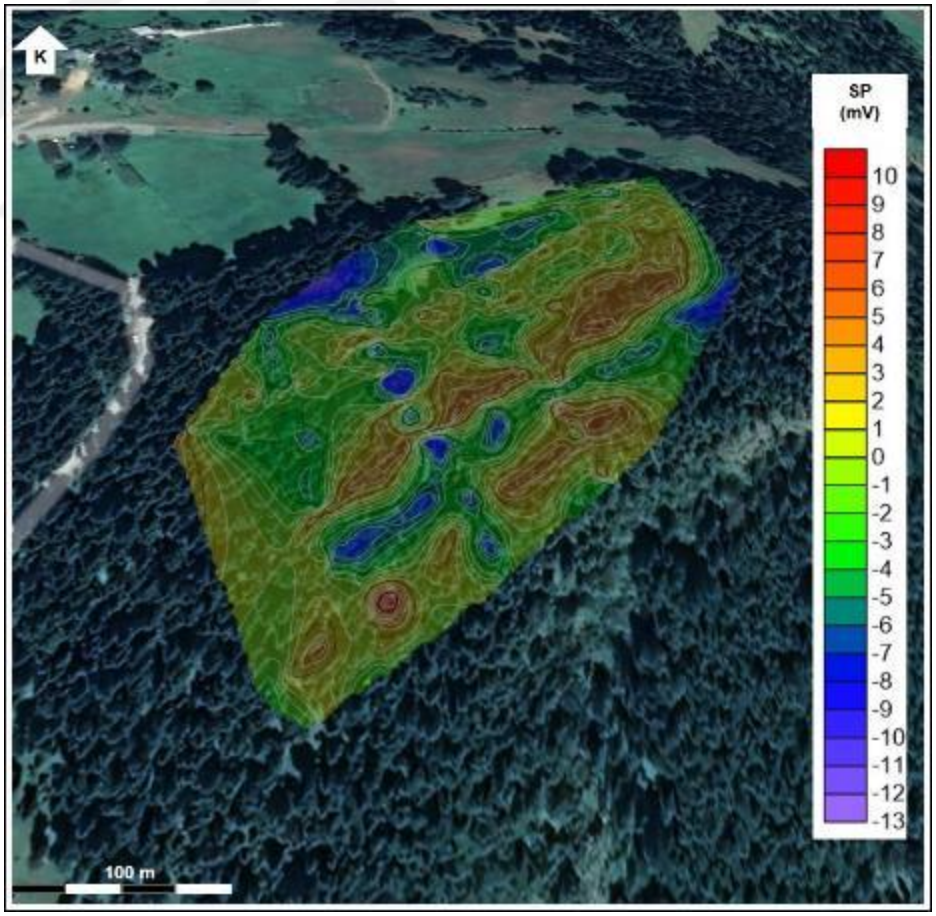
Ek 13. Çalışma Alanı 3'ten elde edilen SP (SP3_P7-SP3_P12) grafikleri. a) SP3_P7, b) SP3_P8, c) SP3_P9, d) SP3_P10, e) SP3_P11, f) SP3_P12 grafikleri, g) SP3_P7-SP3_P12 kesitlerinin elde edildiği profiller (kırmızı çizgiler)



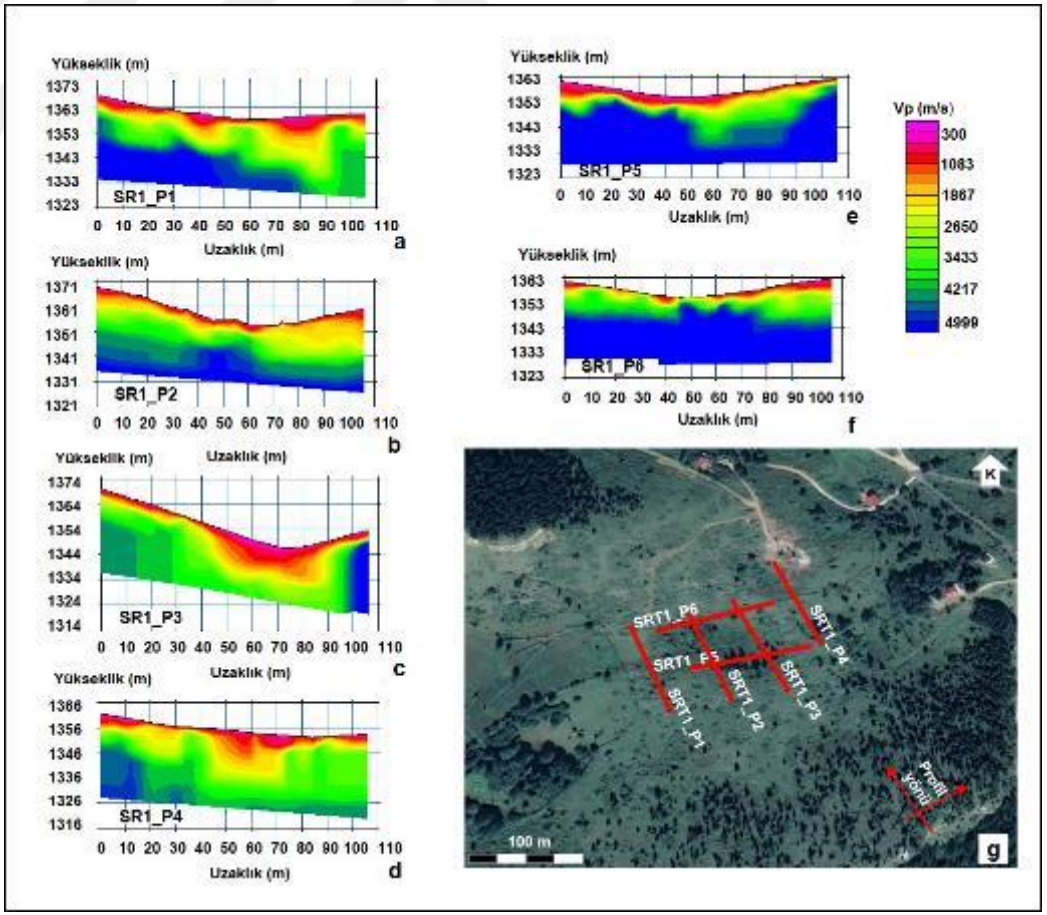
Ek 14. Çalışma Alanı 1'den elde edilen *SP* haritası



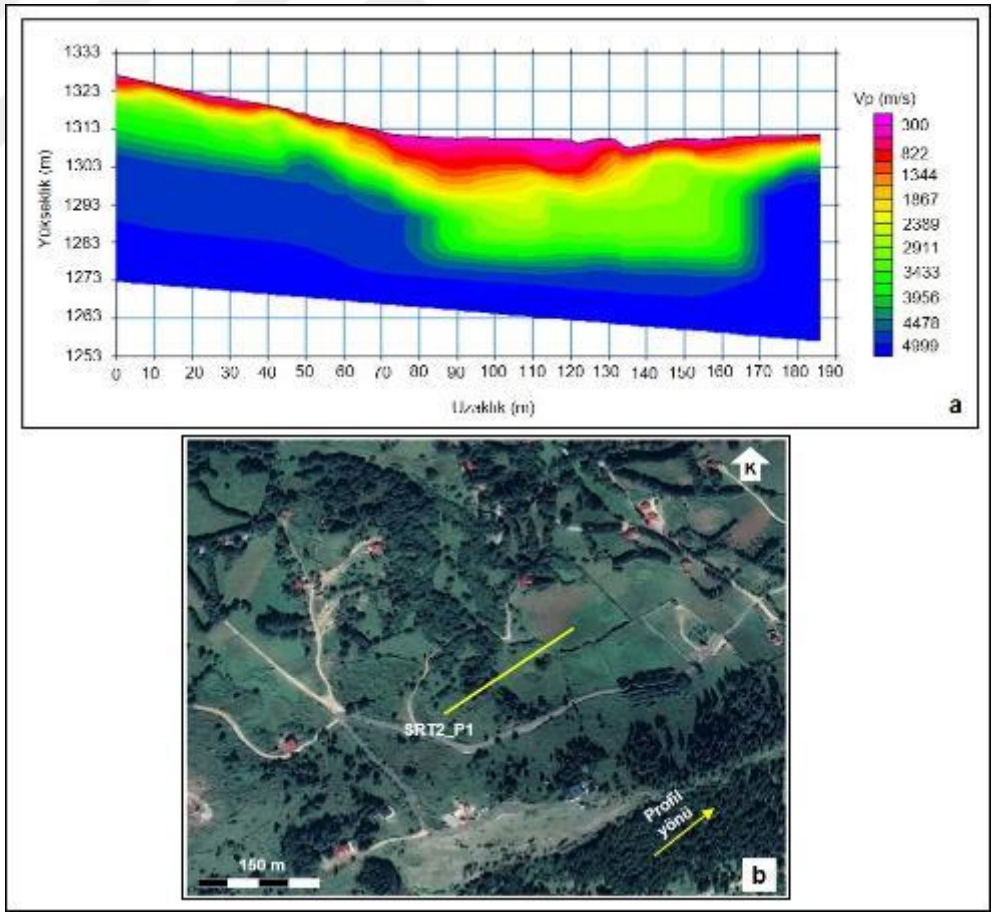
Ek 15. Çalışma Alanı 3’ten elde edilen *SP* haritası



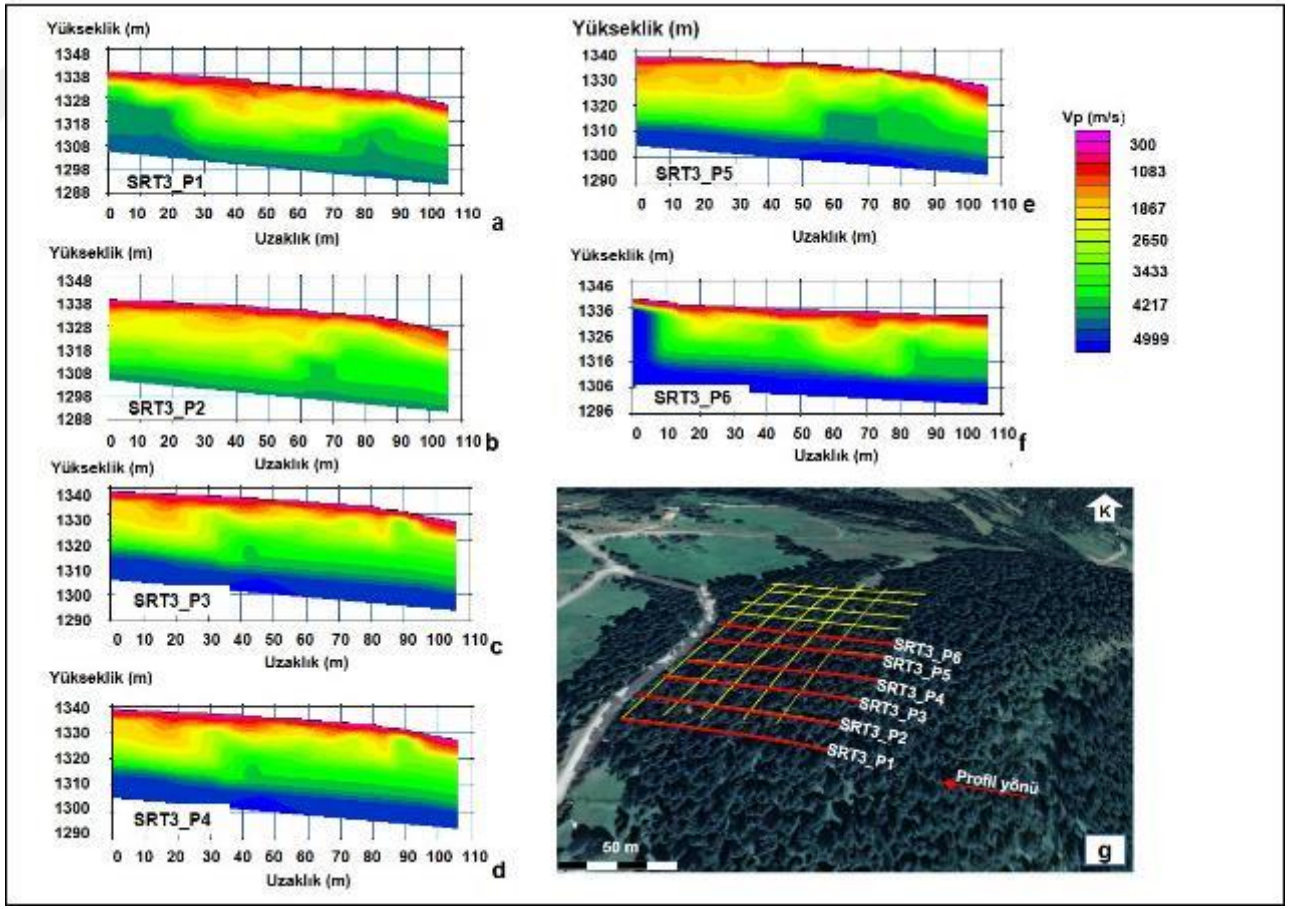
Ek 16. Çalışma Alanı 1'den elde edilen *SRT* (SRT1_P1-SRT1_P6) kesitleri. a) SRT1_P1, b) SRT1_P2, c) SRT1_P3, d) SRT1_P4, e) SRT1_P5, f) SRT1_P6 kesitleri, g) SRT1_P1-SRT1_P6 kesitlerinin elde edildiği profiller (kırmızı çizgiler)



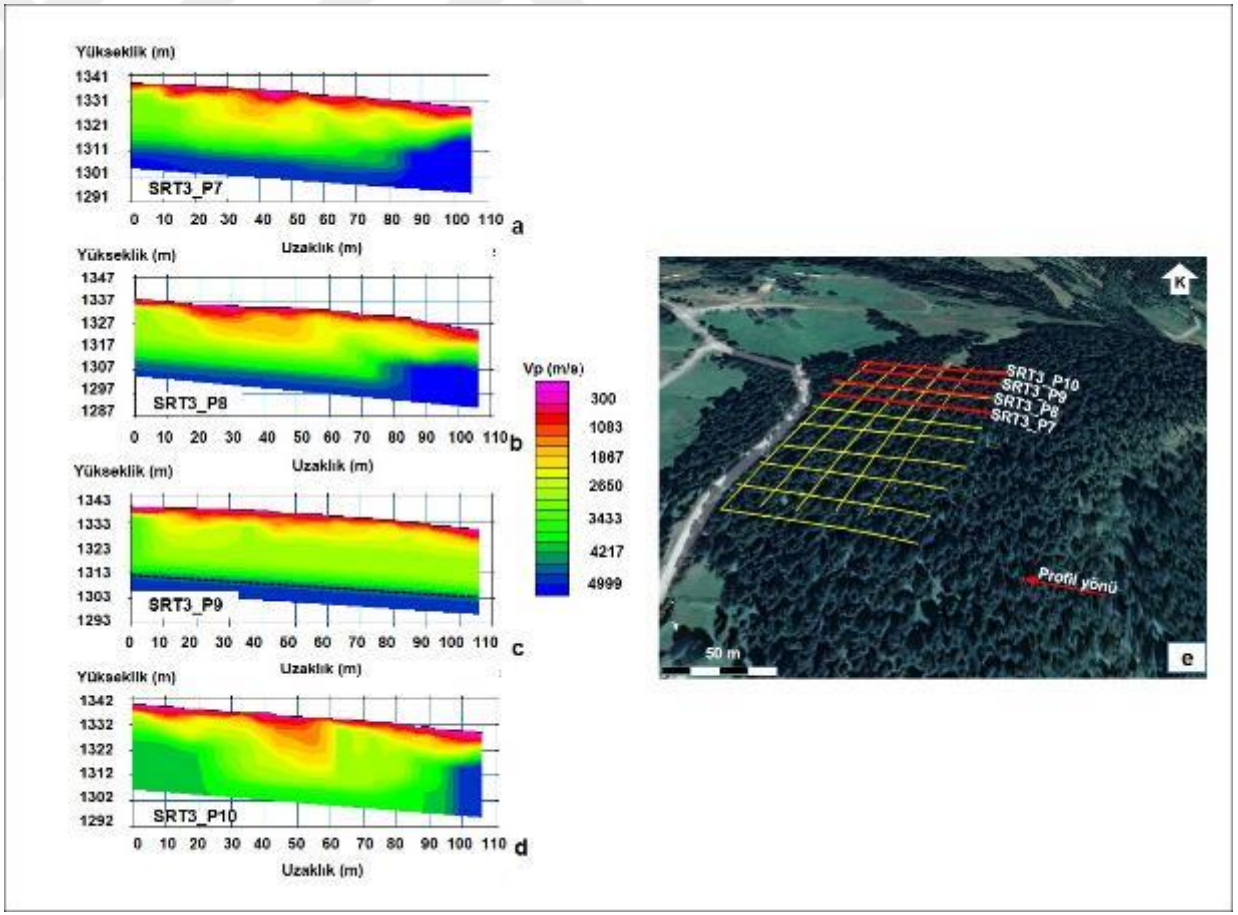
Ek 17. a) Çalışma Alanı 2'den elde edilen SRT2_P1 kesiti, b) SRT2_P1 kesitinin elde edildiği profil



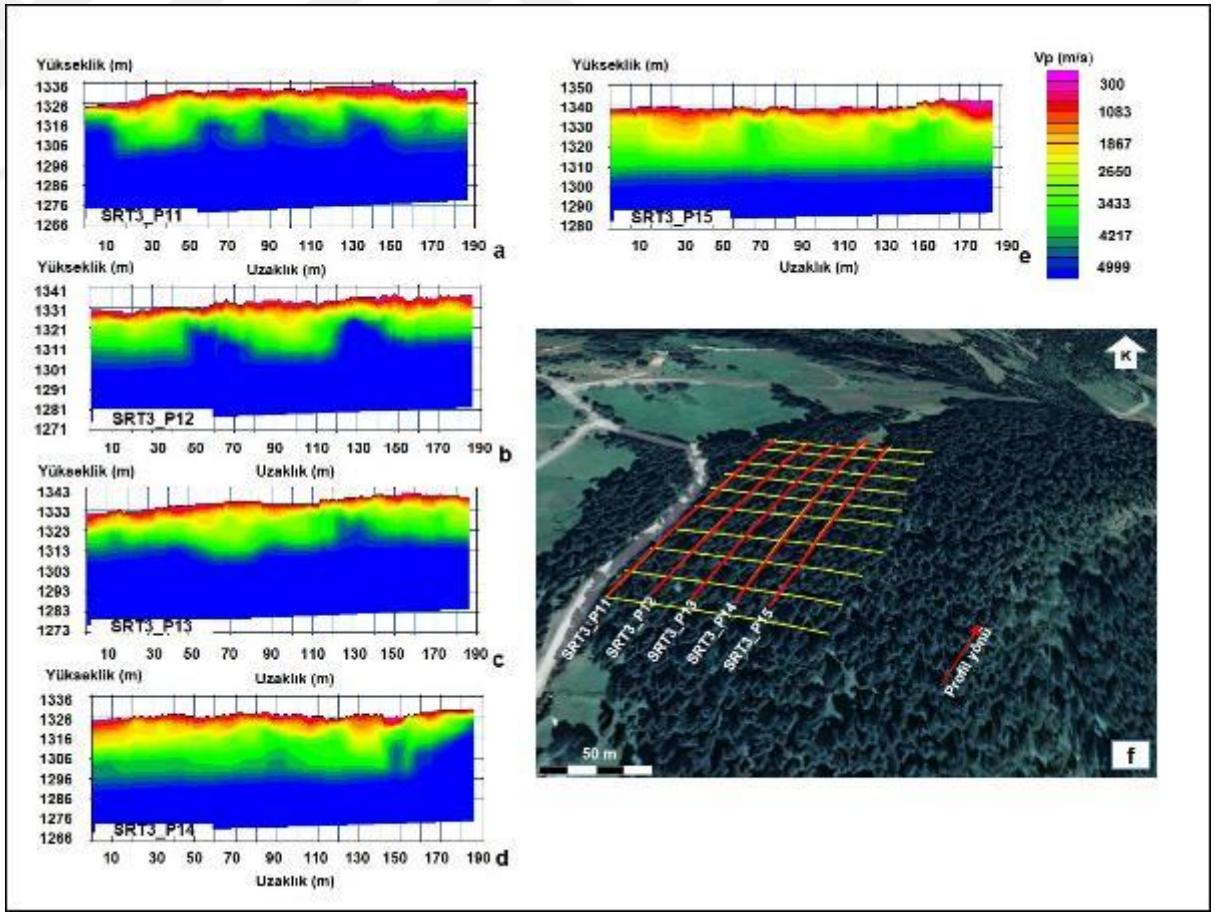
Ek 18. Çalışma Alanı 3'ten elde edilen SRT (SRT3_P1-SRT3_P6) kesitleri. a) SRT3_P1, b) SRT3_P2, c) SRT3_P3, d) SRT3_P4, e) SRT3_P5, f) SRT3_P6 kesitleri, g) SRT3_P1-SRT3_P6 kesitlerinin elde edildiği profiller (kırmızı çizgiler)



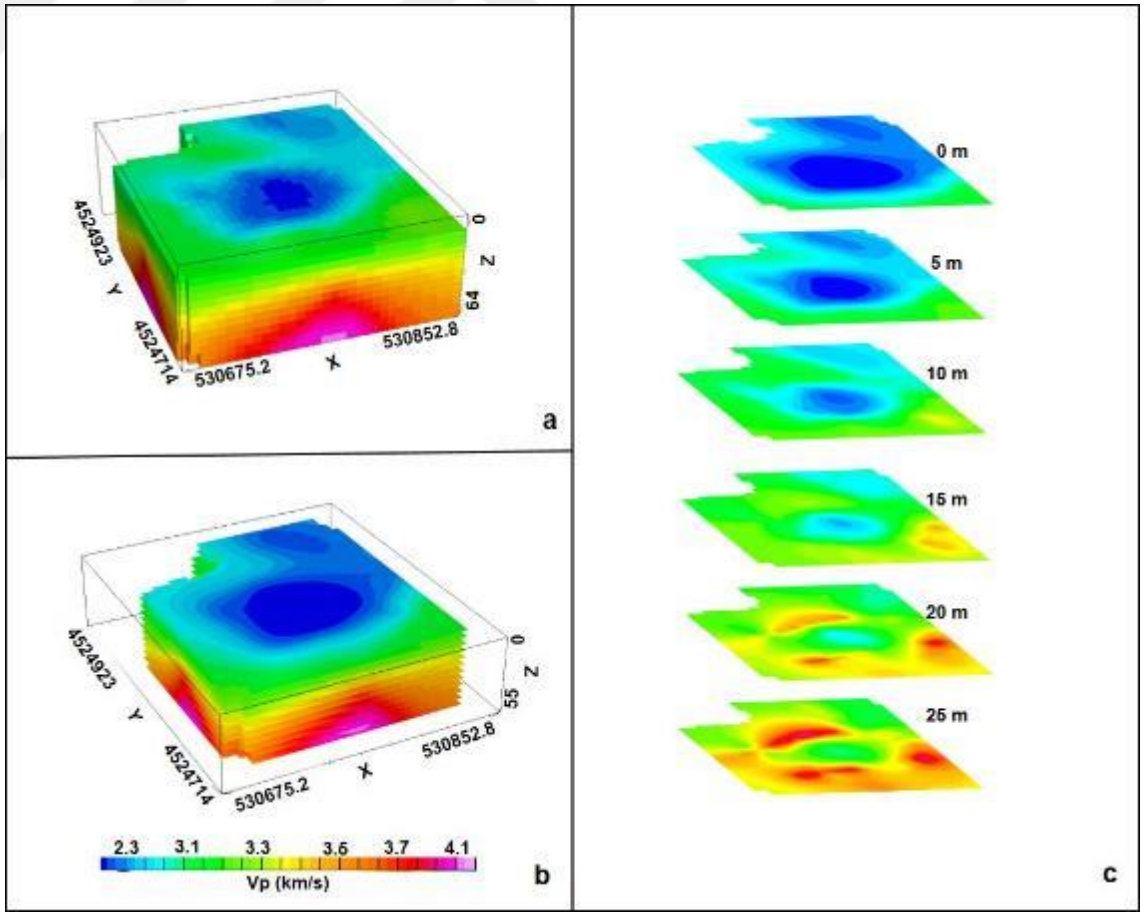
Ek 19. Çalışma Alanı 3'ten elde edilen SRT (SRT3_P7-SRT3_P10) kesitleri. a) SRT3_P7, b) SRT3_P8, c) SRT1_P9, d) SRT3_P10, e) SRT3_P7-SRT3_P10 kesitlerinin elde edildiği profiller (kırmızı çizgiler)



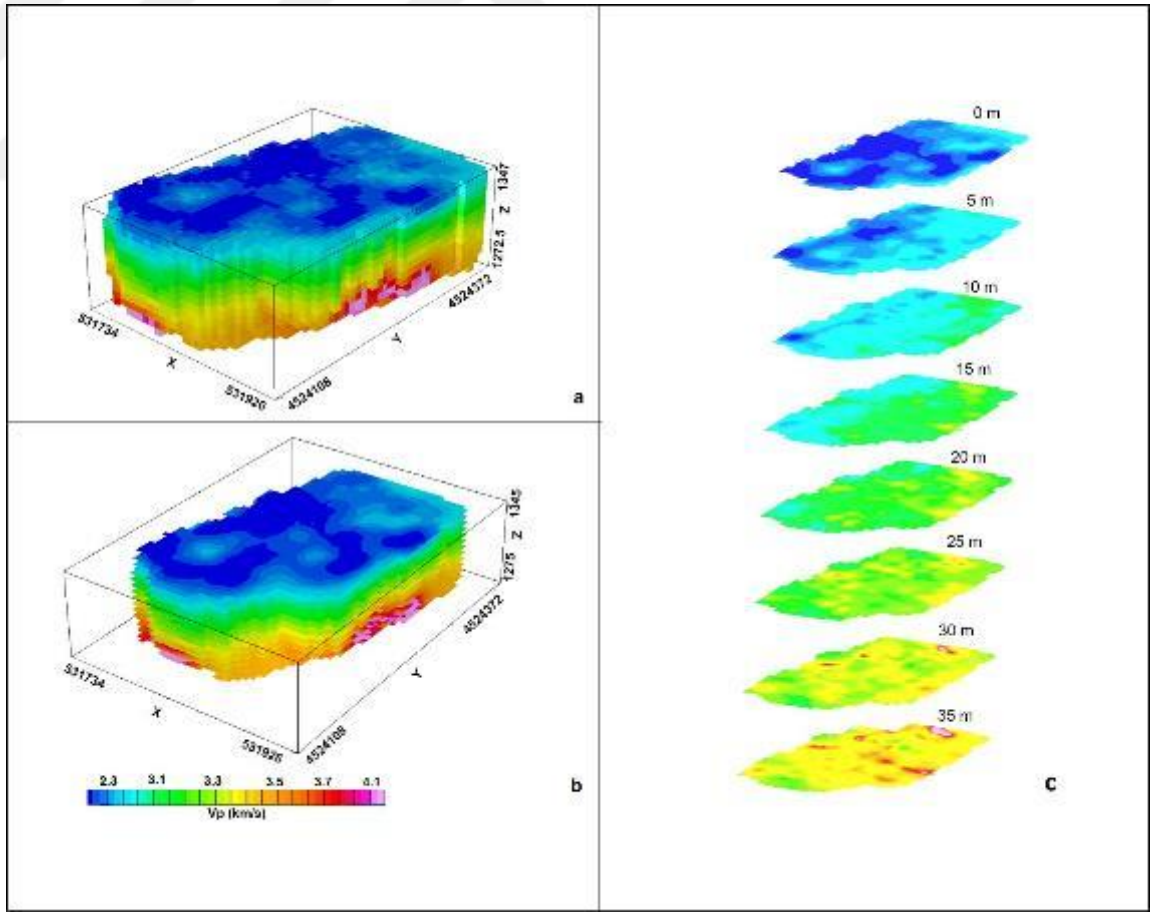
Ek 20. Çalışma Alanı 3'ten elde edilen SRT (SRT3_P11-SRT3_P15) kesitleri. a) SRT3_P11, b) SRT3_P12, c) SRT3_P13, d) SRT3_P14, e) SRT3_P15, f) SRT3_P11-SRT3_P15 kesitlerinin elde edildiği profiller (kırmızı çizgiler)



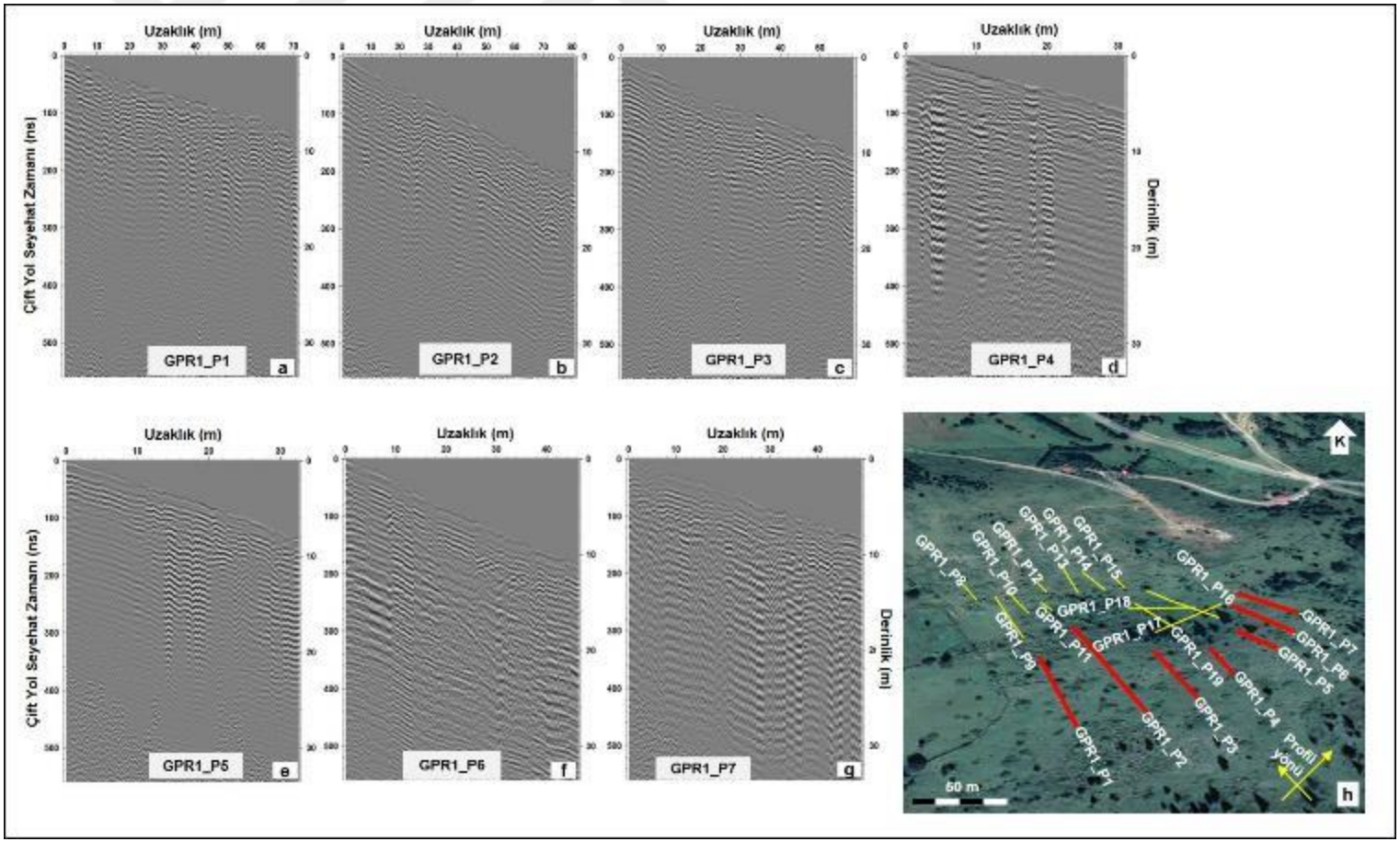
Ek 21. Çalışma Alanı 1, 3B'lu *SRT* görüntüleri ve seviye haritaları a) Çalışma Alanı 1'den elde edilen 3B'lu *SRT* görüntüsü, b) 3B'lu *SRT* görüntü seviye haritalarının bir aradaki görüntüsünü, c) 3B'lu *SRT* görüntüsünün her 5 m de bir görüntülenen seviye haritaları



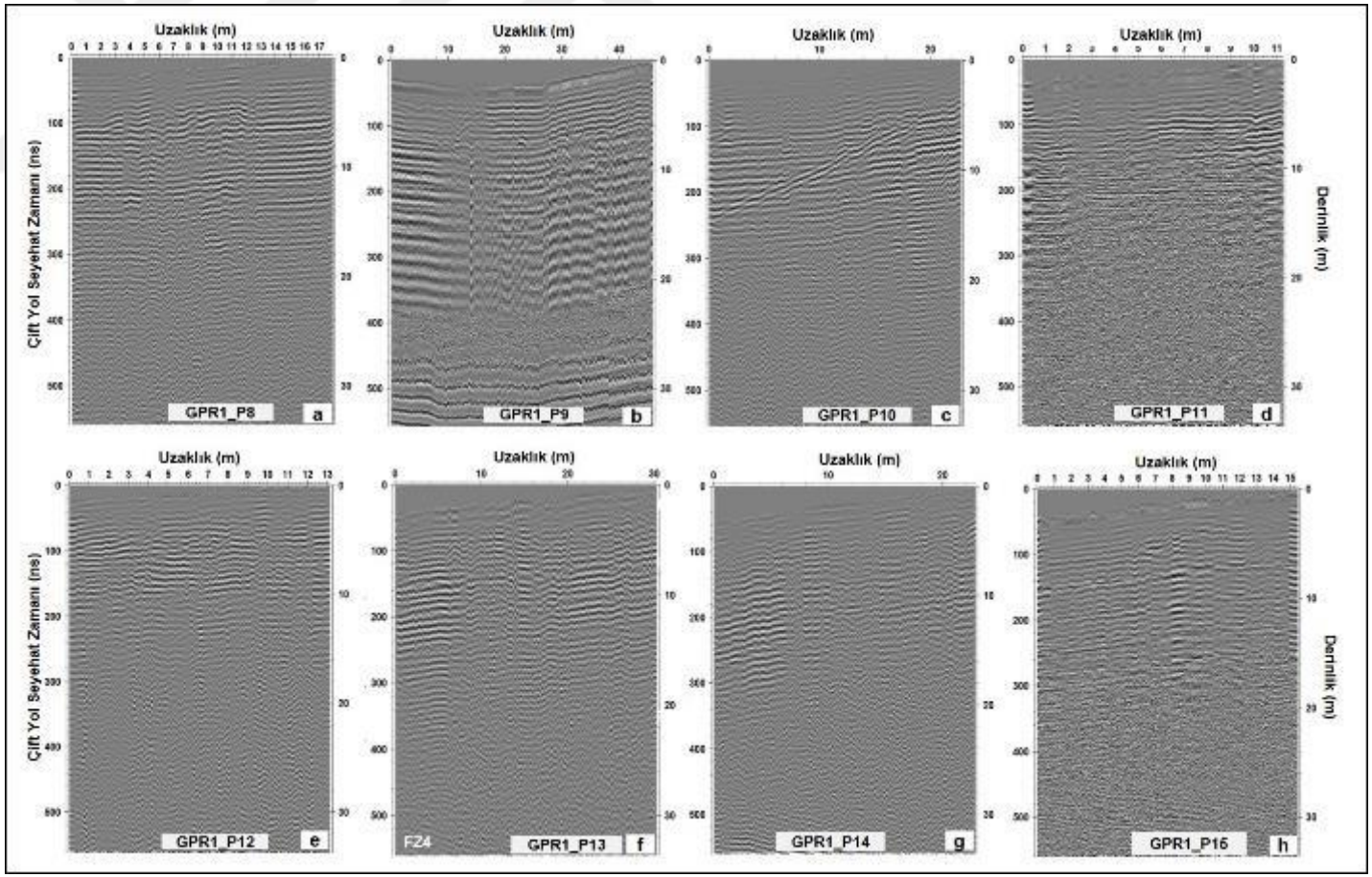
Ek 22. Çalışma Alanı 3, 3B'lu SRT görüntüleri ve seviye haritaları, A) Çalışma Alanı 3'ten elde edilen 3B'lu SRT görüntüsü, B) 3B'lu SRT görüntü seviye haritalarının bir aradaki görüntüsünü, C) 3B'lu SRT görüntüsünün her 5 m de bir görüntülenen seviye haritaları



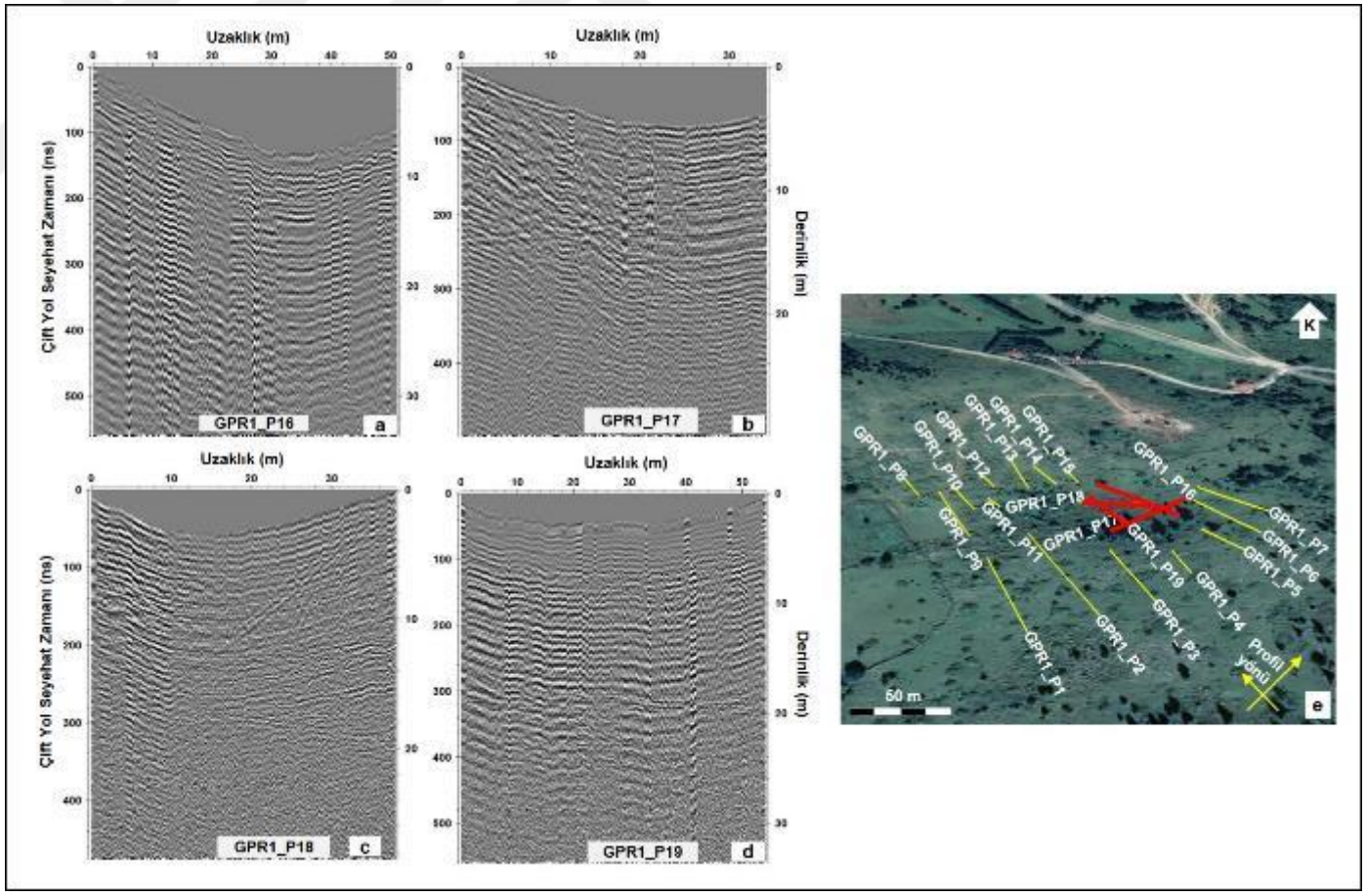
Ek 23. Çalışma Alanı 1'den elde edilen GPR (GPR1_P1-GPR1_P7) kesitleri. a) GPR1_P1, b) GPR1_P2, c) GPR1_P3, d) GPR1_P4, e) GPR1_P5; f) GPR1_P6, g) GPR1_ P7 kesitleri, h) GPR1_P1-GPR1_P7 kesitlerinin elde edildiği profiller (kırmızı çizgiler)



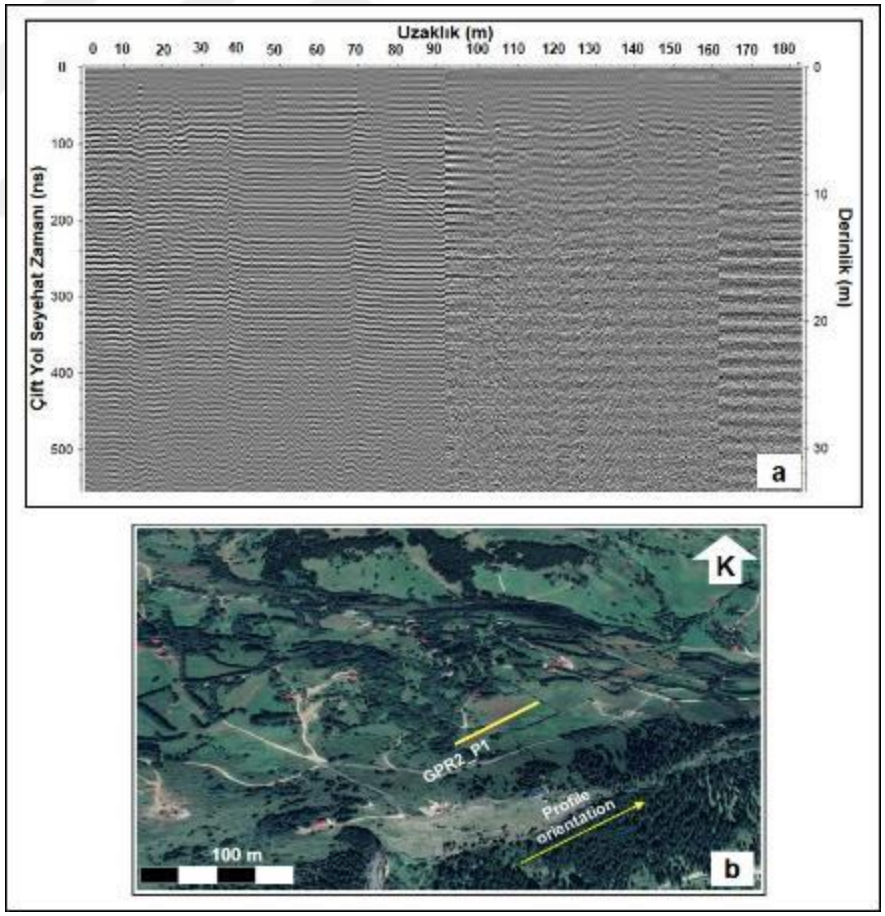
Ek 24. Çalışma Alanı 1'den elde edilen GPR (GPR1_P8-GPR1_P15) kesitleri. a) GPR1_P8, b) GPR1_P9, c) GPR1_P10, d) GPR1_P11, e) GPR1_P12; f) GPR1_P13, g) GPR1_ P14, h) GPR1_ P15 kesitleri



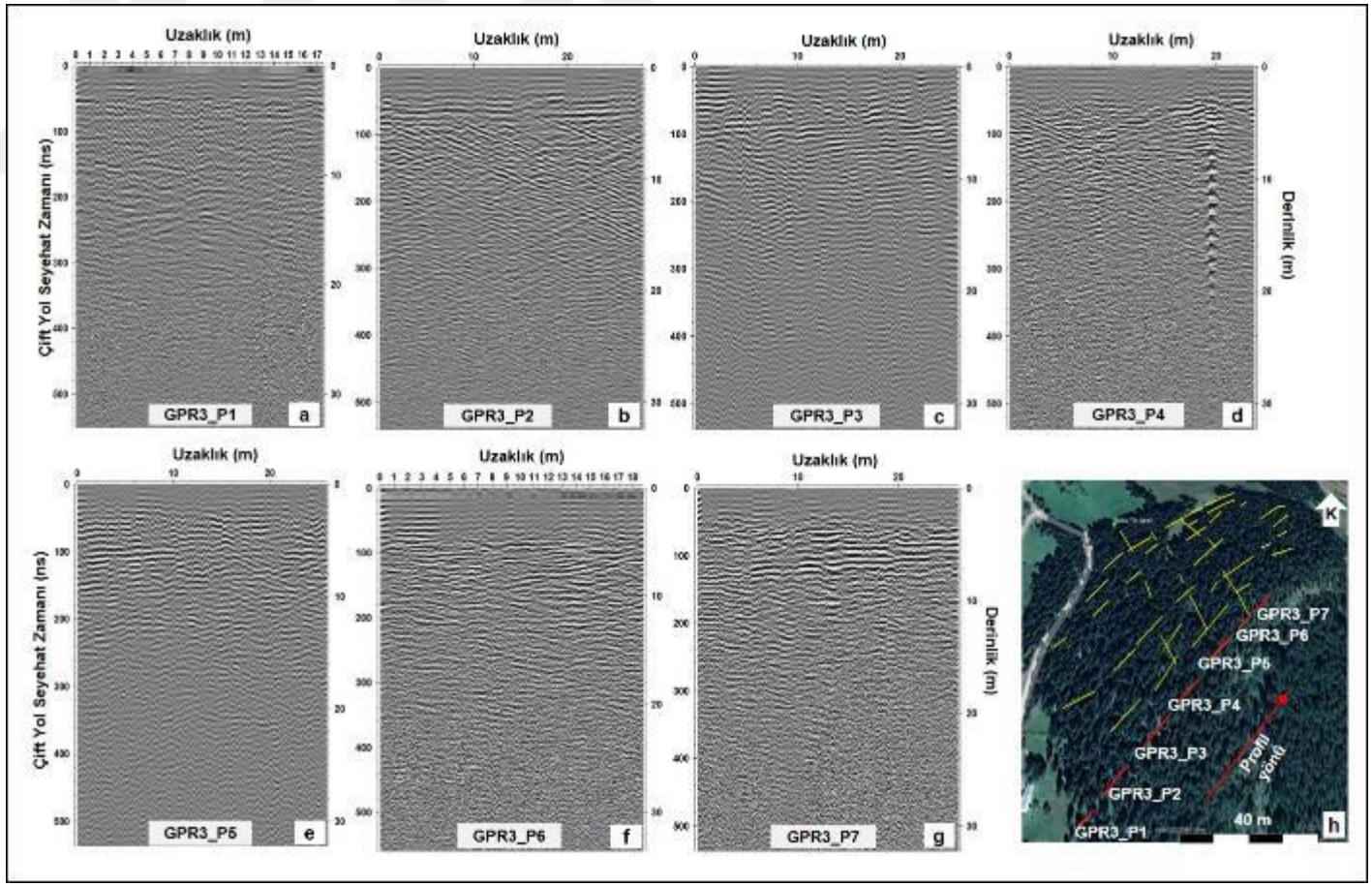
Ek 25. Çalışma Alanı 1'den elde edilen GPR (GPR1_P16-GPR1_P19) kesitleri. a) GPR1_P16, b) GPR1_P17, c) GPR1_P18, d) GPR1_P19, e) GPR1_P16-GPR1_P19 kesitlerinin elde edildiği profiller (kırmızı çizgiler)



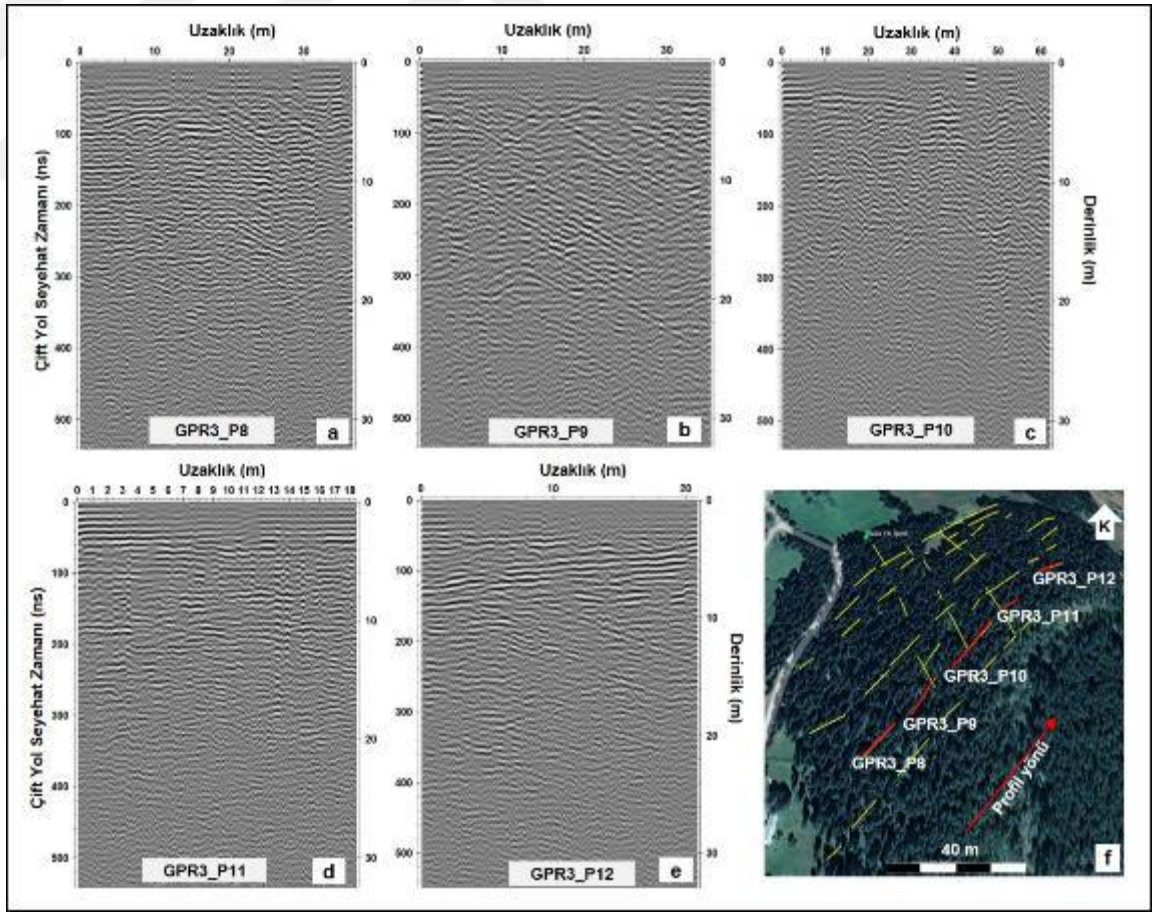
Ek 26. a) Çalışma Alanı 2'den elde edilen SRT2_P1 kesiti, b) SRT2_P1 kesitinin elde edildiği profil



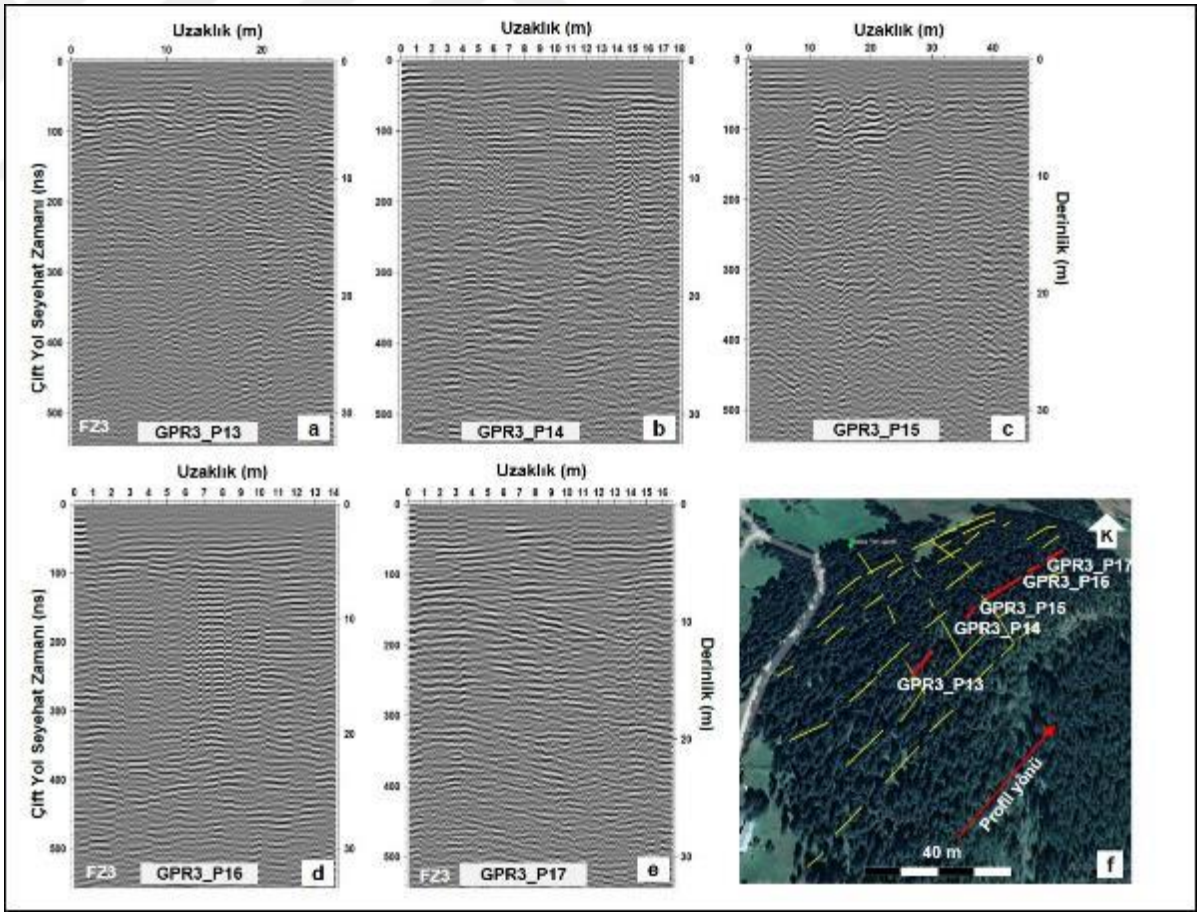
Ek 27. Çalışma Alanı 3'ten elde edilen GPR (GPR3_P1-GPR3_P7) kesitleri. a) GPR3_P1, b) GPR3_P2, c) GPR3_P3, d) GPR3_P4, e) GPR3_P5, f) GPR3_P6, g) GPR3_P7 kesitleri, h) GPR3_P1-GPR3_P7 kesitlerinin elde edildiği profiller (kırmızı çizgiler)



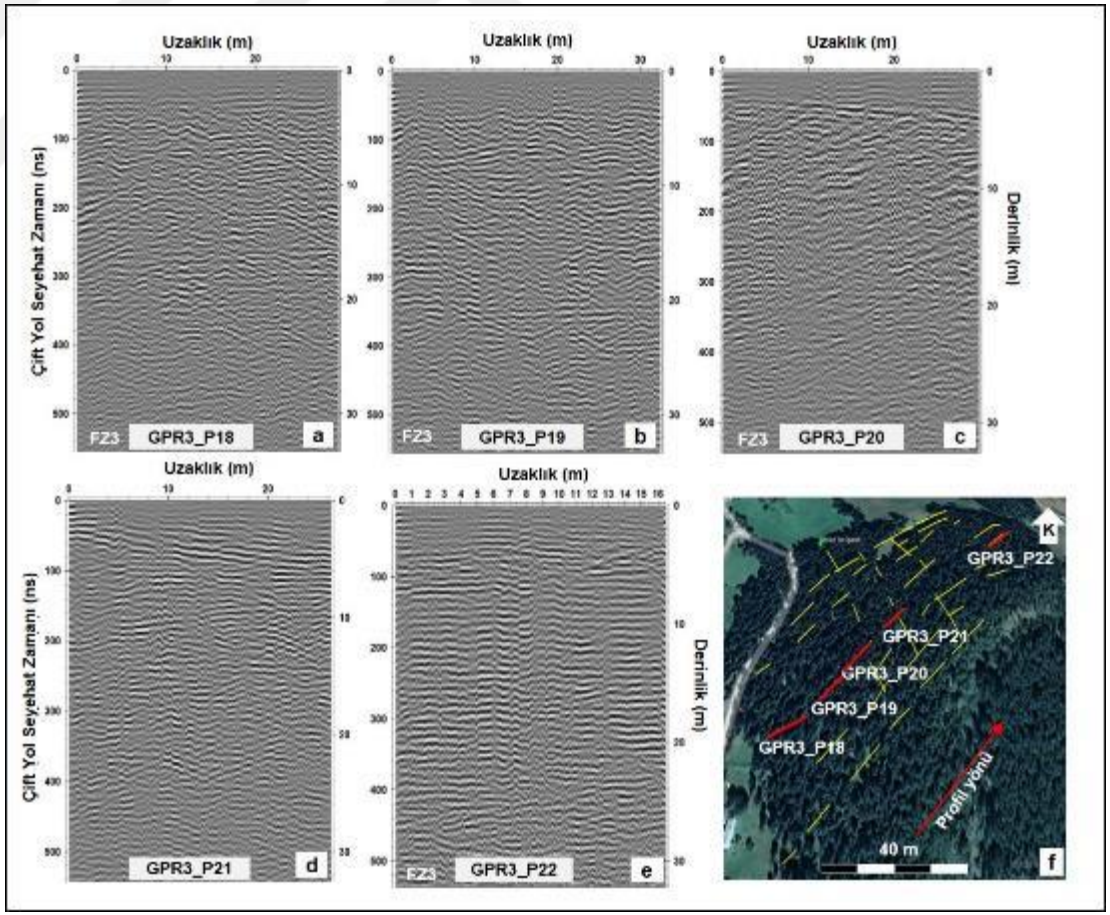
Ek 28. Çalışma Alanı 3'ten elde edilen GPR (GPR3_P8-GPR3_P12) kesitleri. a) GPR3_P8, b) GPR3_P9, c) GPR3_P10, d) GPR3_P11, e) GPR3_P12 kesitleri, f) GPR3_P8-GPR3_P12 kesitlerinin elde edildiği profiller (kırmızı çizgiler)



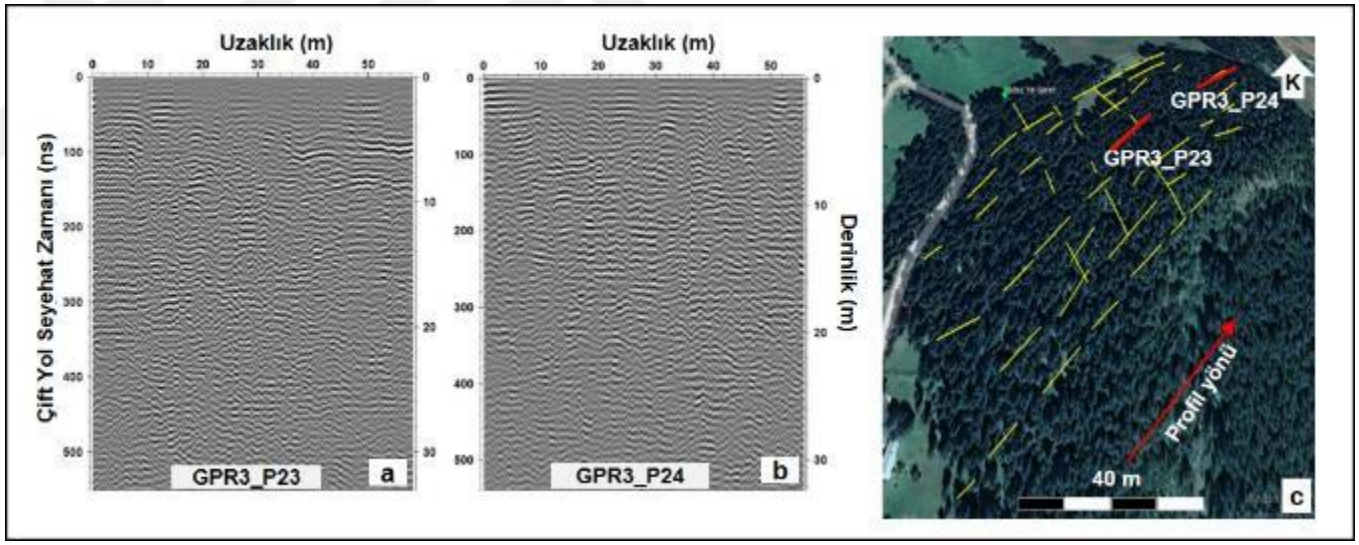
Ek 29. Çalışma Alanı 3'ten elde edilen GPR (GPR3_P13-GPR3_P17) kesitleri. a) GPR3_P13, b) GPR3_P14, c) GPR3_P15, d) GPR3_P16, e) GPR3_P17 kesitleri, f) GPR3_P13-GPR3_P17 kesitlerinin elde edildiği profiller (kırmızı çizgiler)



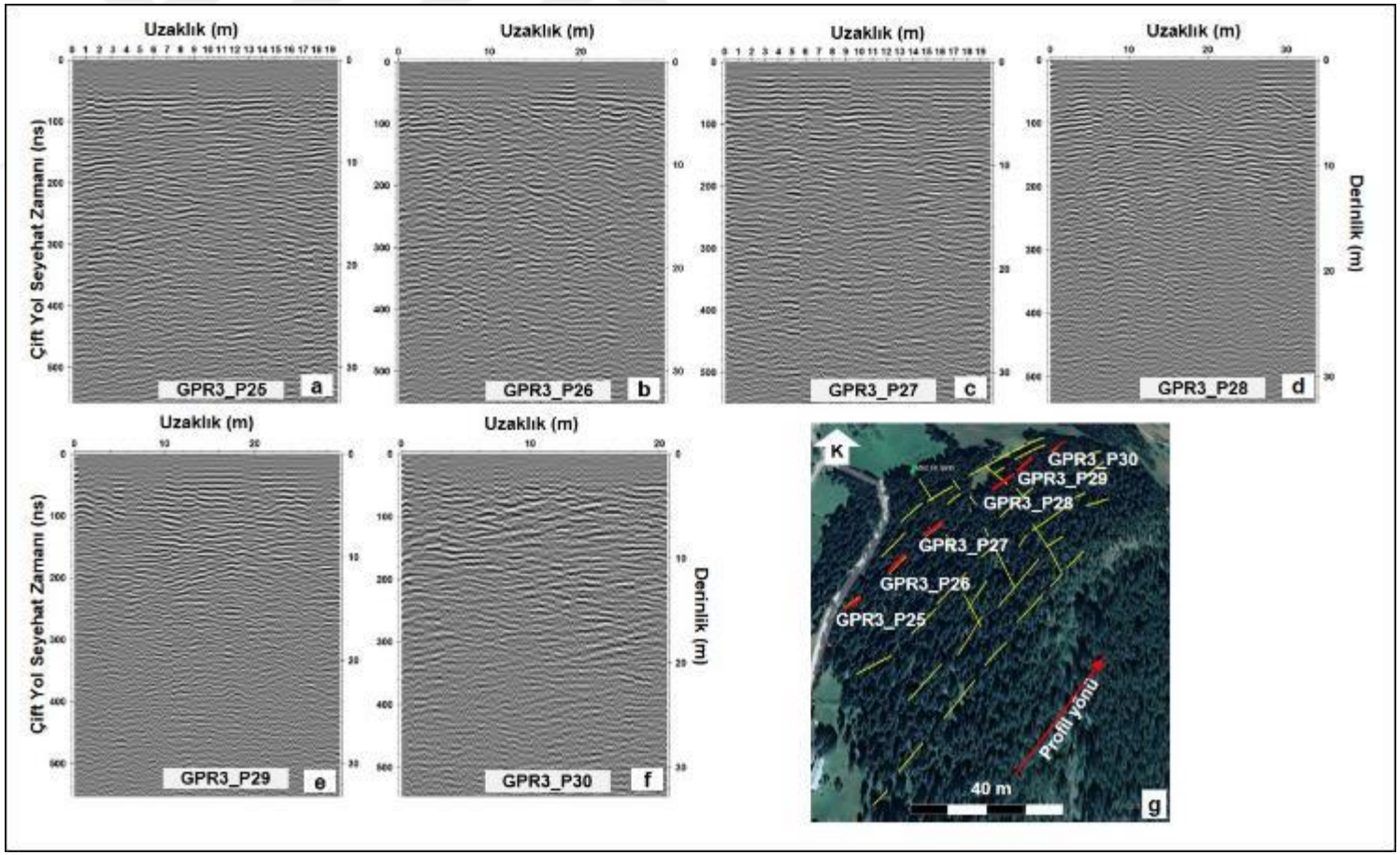
Ek 30. Çalışma Alanı 3'ten elde edilen GPR (GPR3_P18-GPR3_P22) kesitleri. a) GPR3_P18, b) GPR3_P19, c) GPR3_P20, d) GPR3_P21, e) GPR3_P22 kesitleri, f) GPR3_P18-GPR3_P22 kesitlerinin elde edildiği profiller (kırmızı çizgiler)



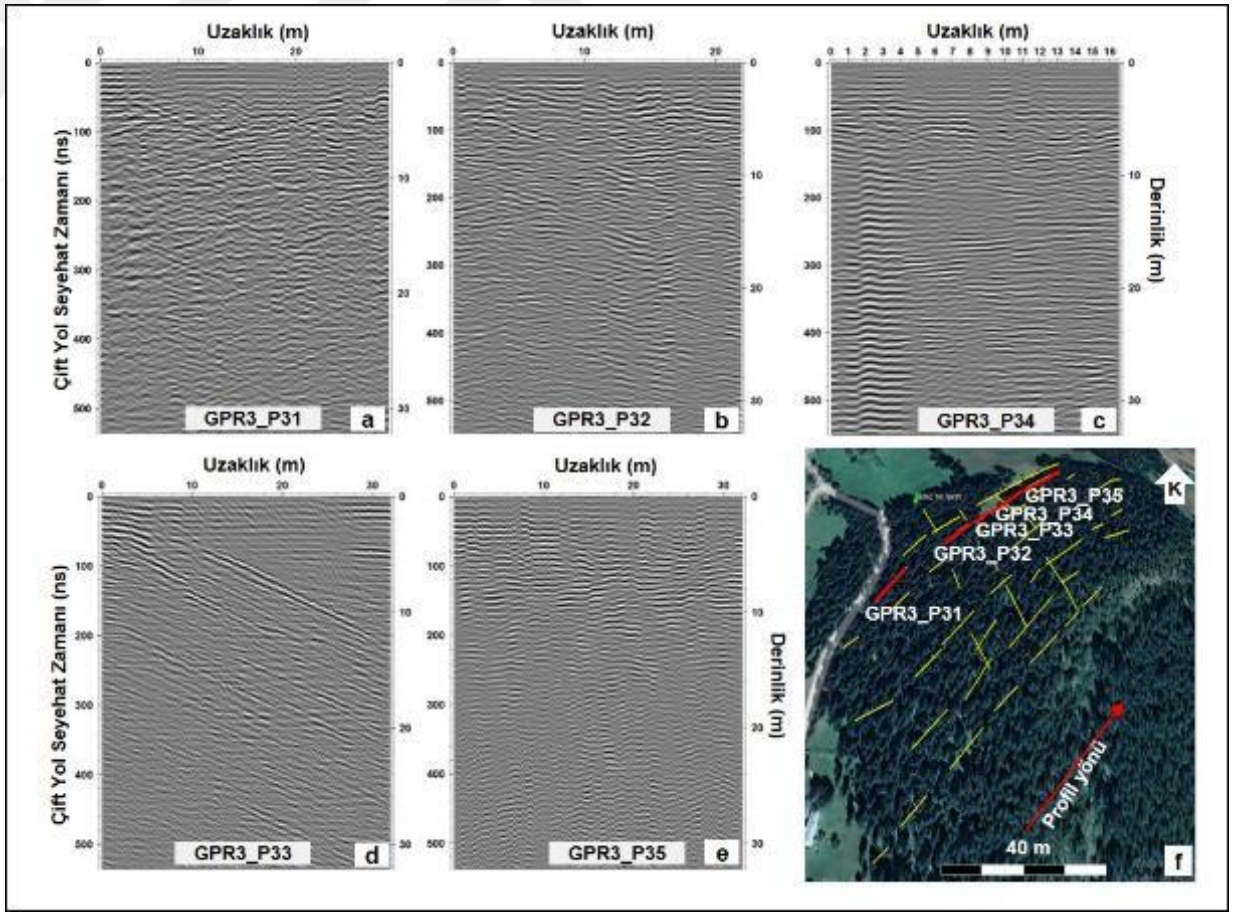
Ek 31. Çalışma Alanı 3’ten elde edilen GPR (GPR3_P23-GPR3_P24) kesitleri. a) GPR3_P23, b) GPR3_P24, c) GPR3_P23, d) GPR3_P24 kesitlerinin elde edildiği profiller (kırmızı çizgiler)



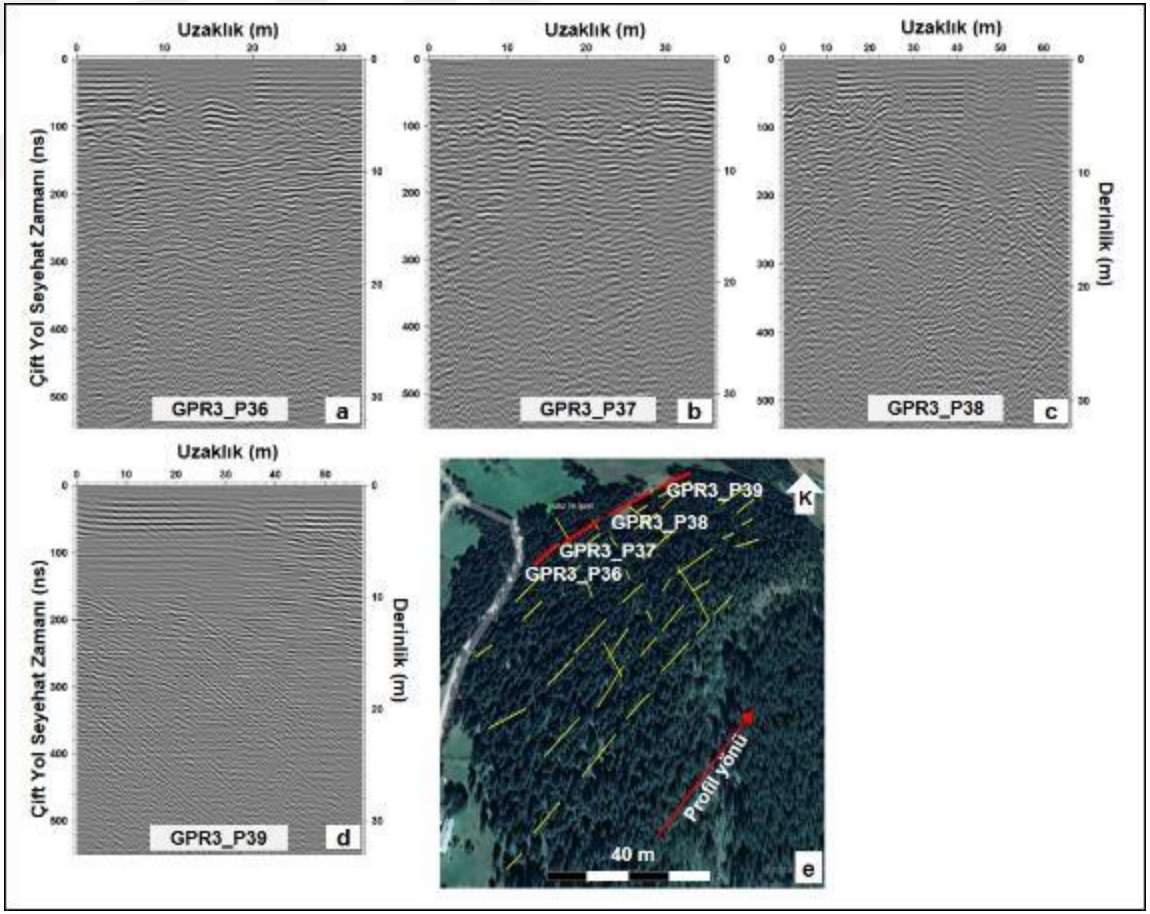
Ek 32. Çalışma Alanı 3'ten elde edilen GPR (GPR3_P25-GPR3_P30) kesitleri. a) GPR3_P25, b) GPR3_P26, c) GPR3_P27, d) GPR3_P28, e) GPR3_P29, f) GPR3_P30 kesitleri, g) GPR3_P25-GPR3_P30 kesitlerinin elde edildiği profiller (kırmızı çizgiler)



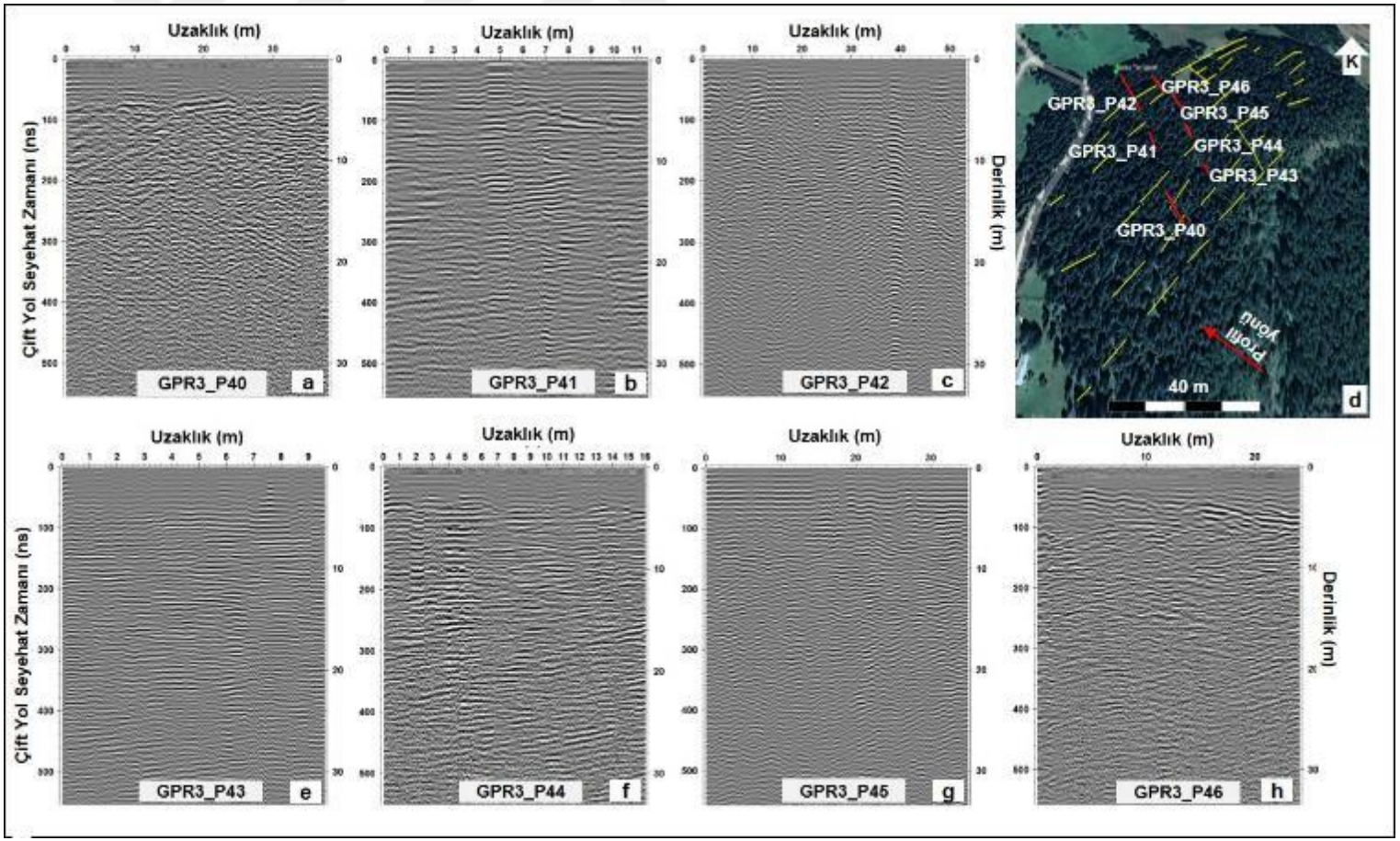
Ek 33. Çalışma Alanı 3’ten elde edilen GPR (GPR3_P31-GPR3_P35) kesitleri. a) GPR3_P31, b) GPR3_P32, c) GPR3_P33, d) GPR3_P34, e) GPR3_P35 kesitleri, f) GPR3_P31-GPR3_P35 kesitlerinin elde edildiği profiller (kırmızı çizgiler)



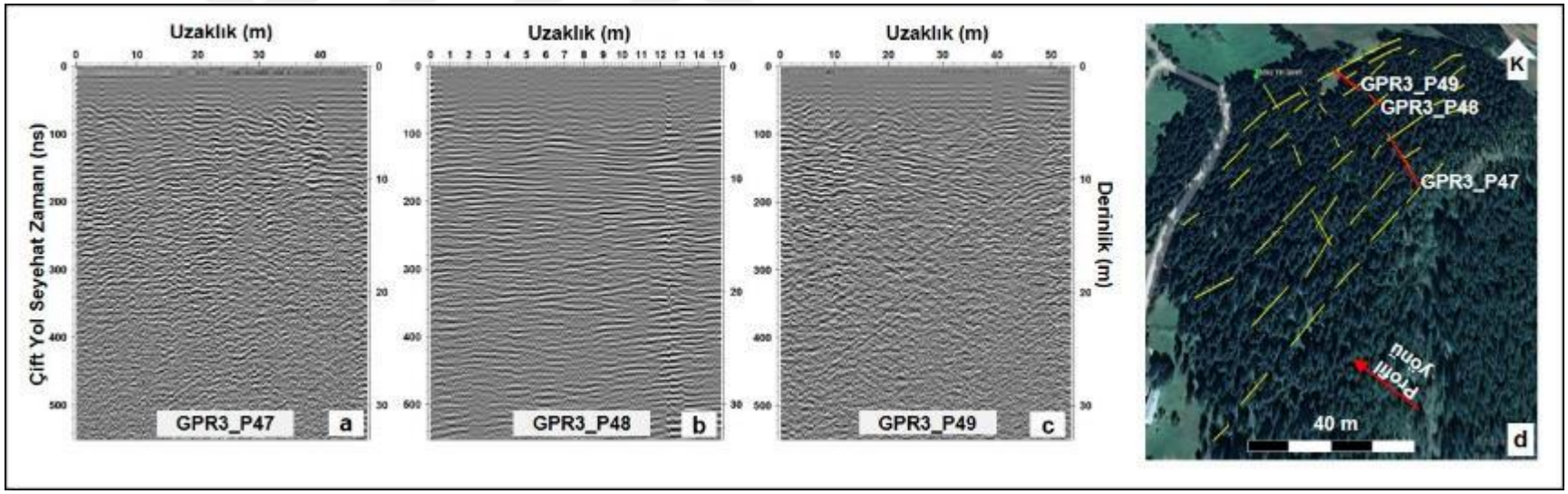
Ek 34. Çalışma Alanı 3'ten elde edilen GPR (GPR3_P36-GPR3_P39) kesitleri. a) GPR3_P36, b) GPR3_P37, c) GPR3_P38, d) GPR3_P39, e) GPR3_P36-GPR3_P39 kesitlerinin elde edildiği profiller (kırmızı çizgiler)



Ek 35. Çalışma Alanı 3'ten elde edilen GPR (GPR3_P40-GPR3_P46) kesitleri. a) GPR3_P40, b) GPR3_P41, c) GPR3_P42, d) GPR3_P13-GPR3 P17 kesitlerinin elde edildiği profiller (kırmızı çizgiler), e) GPR3_P43, f) GPR3_P44, g) GPR3_P45 kesitleri, h) GPR3_P46 kesitleri



Ek 36. Çalışma Alanı 3'ten elde edilen GPR (GPR3_P47-GPR3_P49) kesitleri. a) GPR3_P47, b) GPR3_P48, c) GPR3_P49, d) GPR3_P47-GPR3_P49 kesitlerinin elde edildiği profiller (kırmızı çizgiler)



ÖZGEÇMİŞ

Hilal ALEMDAĞ, ilköğrenimini Yeşilyurt Köyü İlköğretim Okulu ve Yavuz Selim İlköğretim Okulu'nda tamamladıktan sonra lise eğitimini 2008 yılında Yunus Emre Lisesi'nde tamamladı. 2009-2010 öğretim yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Jeofizik Mühendisliği bölümünde lisans eğitimine başladı. 2014 yılında bu bölümden mezun oldu. Aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeofizik Mühendisliği Anabilim dalında tezli yüksek lisans programına başladı. 2018 yılında "Bahçecik (Gümüşhane-Tekke) Traverten Ocağındaki Kırık, Çatlak, Boşluk ve Süreksizliklerin Yer Radarı (GPR) Yöntemi ile Araştırılması" başlıklı yüksek lisans tezini sunmasının ardından doktora eğitimine başladı. 2018 yılından itibaren Karadeniz Teknik Üniversitesi Jeofizik Mühendisliği Bölümü'nde araştırma görevlisi olarak görev yapmaktadır.