

**T.C.  
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
JEOLOJİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**HİDROJEOLJİK ÇALIŞMALARDA LABORATUVAR DESTEKLİ  
JEOFİZİK YÖNTEMLERİN KULLANIMI**

**DOKTORA TEZİ**

**MOHAMED SALEM OUDEIKA**

**DENİZLİ, MART - 2021**

**T.C.  
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
JEOLJİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**



**HİDROJEOLJİK ÇALIŞMALARDA LABORATUVAR DESTEKLİ  
JEOFİZİK YÖNTEMLERİN KULLANIMI**

**DOKTORA TEZİ**

**MOHAMED SALEM OUDEIKA**

**DENİZLİ, MART - 2021**

**Bu tez çalışması Pamukkale Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri  
Koordinasyon Birimi tarafından 2018FEBE010 nolu proje ile desteklenmiştir.**

**Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini; bu çalışmanın doğrudan birincil ürünü olmayan bulguların, verilerin ve materyallerin bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini ve alıntı yapılan çalışmalara atfedildiğine beyan ederim.**

**MOHAMED SALEM OUDEIKA**

## ÖZET

**HİDROJEOLOJİK ÇALIŞMALARDA LABORATUVAR DESTEKLİ  
JEOFİZİK YÖNTEMLERİN KULLANIMI  
DOKTORA TEZİ  
MOHAMED SALEM OUDEIKA  
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
JEOLOJİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
(TEZ DANIŞMANI: PROF. DR. ALİ AYDIN)  
(EŞ DANIŞMAN: DR. ÖĞR ÜYESİ. SUAT TAŞDELEN)  
DENİZLİ, MART - 2021**

İnsanoğlu için hayati önem taşıyan su kaynaklarının, kuraklık, sanayileşme ve nüfus artışı gibi birçok etken neticesinde gelişen ciddi sıkıntıları önlemek için bu kaynakların belirlenmesi ve korunması hayat sürdürülebilirliği için büyük önem arz etmektedir. Bu tez çalışmalarında Gökpınar kaynağı ve Gökpınar baraj göllerinin beslenmeleri sağlayan yeraltı suyu akış yönlerinin, uygulanmış olan jeofizik yöntemlerinin sonuçları, birbiriyle karşılaştırılarak belirlenmiştir. Jeofizik yöntemlerinden elde edilen sonuçların doğruluğunu teyit eden laboratuvar modelleme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Laboratuvar modelleme çalışmaları, çoklu elektrod sistemi ve elektromanyetik cihazlarının prototipleri geliştirilerek sağlanmıştır. Gökpınar kaynağı ile baraj gölünün konumları itibarı ile ciddi çevresel tehlikelerle karşı karşıyadır. Bu nedenle, gittikçe büyüyen ve sanayileşen Denizli il merkezinin ağır metal kirliliğinin durumu belirlenerek, su kaynaklarına ve rezervlerine etkisinin araştırılması büyük bir önem taşımaktadır. Bu doğrultuda sahadan toplanan yüzey toprak numunelerinin manyetik süseptibilite ölçümleri alınarak, kimyasal içeriklerini XRF yöntemi yardımıyla belirlenerek değerlendirilmiştir. Bu tez çalışmalarının sonucunda uygulanmış olan yöntemler yeraltı suyu akış yönlerini, ağır metal kirliliğinin ve yeraltı suyu kaynaklarının belirlenmesine yol açarak elverişli olduklarını göstermiştir.

**ANAHTAR KELİMELEER:** Akiferler, Jeofizik Teknikler, Yer Altı Suları, Denizli.

## **ABSTRACT**

### **THE USE OF GEOPHYSICAL METHODS IN HYDROGEOLOGICAL STUDIES COMBINED WITH LABORATORY MODELLING**

**PH.D THESIS**

**MOHAMED SALEM OUDEIKA**

**PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE**

**GEOLOGICAL ENGINEERING**

**(SUPERVISOR:PROF. DR. ALİ AYDIN)**

**(CO-SUPERVISOR:ASTS. PROF. DR. SUAT TAŞDELEN)**

**DENİZLİ, MARCH 2021**

Groundwater resources determination and protection are of great importance regarding the wide variety of problems as desertification, population growth, and industrialization, threatening these vital resources. In this thesis work combinations of geophysical methods were implemented in order to define the groundwater flow pathways assuring the feeding and replenishment of the Gökpınar spring and Gökpınar dam lake. The results obtained from the applied methods were reinforced by an analogical modeling process realized in the laboratory. An electrical resistivity tomography automatization system and an inductive conductivity meter prototypes constructed in order to perform this analogical modeling process. Due to their locations, the Gökpınar spring and the Gökpınar dam lake are both facing serious environmental problems. For this reason, it is necessary to determine the heavy metal load and its effect on the groundwater in Denizli city which is experiencing a fast-growing and industrialization. Hence, collected soil samples were subjects of magnetic susceptibility measurements and XRF analysis. As a result, the implemented methods showed considerable efficiency by leading to the determination of groundwater pathways, heavy metal load, and groundwater resource determination.

**KEYWORDS:** Aquifers, Groundwater, Geophysical Techniques, Denizli.

# İÇİNDEKİLER

## Sayfa

<b>ÖZET</b> .....	<b>i</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>ii</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>iii</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b> .....	<b>v</b>
<b>TABLO LİSTESİ</b> .....	<b>viii</b>
<b>SEMBOL LİSTESİ</b> .....	<b>ix</b>
<b>ÖNSÖZ</b> .....	<b>x</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
<b>2. MATERYAL VE YÖNTEM</b> .....	<b>2</b>
2.1 Elektrik Özdirenç Yöntemleri .....	2
2.1.1 Temel Ölçüm Düzenegi .....	2
2.1.2 Yayıgın Dizilimler .....	4
2.1.3 Elektrik Özdirenç Yöntemleri .....	5
2.2 Elektromanyetik Yöntemi .....	7
2.2.1 Ölçüm Teknikleri .....	8
2.2.2 Ölçülen Büyüklükler .....	9
2.2.3 Araştırma Derinliği ve Görünür Özdirenç .....	10
2.3 Yer Radarı Yöntemi (GPR).....	10
2.3.1 Araştırma Derinliği.....	11
2.3.2 Ölçüm Teknikleri .....	12
2.4 Manyetik Süseptibilite Yöntemi.....	13
2.4.1 Manyetik Süseptibilite Ölçü Düzenegi.....	13
2.5 XRF Yöntemi .....	13
2.5.1 XRF Analizinin Çalışma Prensipleri .....	14
2.5.2 XRF Analiz Düzenegi .....	14
<b>3. ÇALIŞMA ALANI KONUMU</b> .....	<b>15</b>
3.1 Çalışma Alanı .....	15
3.2 Ulaşım .....	16
3.3 İklim.....	17
3.4 Topoğrafya .....	17
<b>4. JEOLJİ</b> .....	<b>19</b>
4.1 Neojen Öncesi Temel Birimleri.....	19
4.2 Neojen Birimleri .....	19
4.3 Kuvaterner Yaşlı Birimler .....	20
4.4 Tektonik .....	23
4.5 Hidrojeoloji .....	23
<b>5. MODELLEME ÇALIŞMALARI VE PROTOTİP CİHAZLAR</b> .....	<b>26</b>
5.1 Modelleme Tankının Oluşturulması .....	26
5.2 Faraday Kafesi Oluşturulması .....	27
5.3 Modelleme Çalışmalarında Kullanılan Kum ve Çakıl Özellikleri .....	28
5.3.1 Elek Analizinin Sonuçları.....	28
5.3.2 Modellemede Kullanılan Numuneler İçin XRF Analizlerinin Sonuçları .....	30
5.3.3 Kum ve Çakıl Numunelerinin Manyetik Süseptibilite Ölçümleri.....	32
5.4 Elektromanyetik ve Çoklu Elektrod Özdirenç Prototip Cihazları .....	33

5.4.1	Elektromanyetik Cihazı .....	33
5.4.1.1	Verici Kısmı .....	33
5.4.1.2	Çalışma Frekansı .....	34
5.4.1.3	Alıcı Kısmı .....	35
5.4.2	Çoklu Elektrod Özdirenç Cihazı .....	36
5.5	Modelleme Çalışmaları .....	39
5.5.1	Akifer Modelleri.....	39
5.5.2	Gömülü Boru Modelleri .....	44
<b>6.</b>	<b>ARAZİ ÇALIŞMALARI.....</b>	<b>50</b>
6.1	Gökpınar Kaynağı ve Çevresi .....	50
6.1.1	Veri Toplama .....	51
6.1.2	Kullanılan Yöntemlere Göre Veri İşlem .....	52
6.1.3	Elde Edilen Verilerin Değerlendirilmesi .....	53
6.2	Gökpınar Baraj Gölü ve Yakın Çevresi .....	60
6.2.1	Veri Toplama ve İşlemi .....	61
6.2.2	Elde Edilen Verilerin Değerlendirilmesi .....	62
6.3	Denizli Ağır Metal Kirliliğinin Durumu Belirlenmesi .....	68
6.3.1	Numune Toplama .....	69
6.3.2	Manyetik Süseptibilite Ölçümleri .....	70
6.3.3	XRF Analizleri ve Kirlilik Durumu .....	72
6.3.3.1	Çok Değişkenli İstatistik Analizi.....	80
<b>7.</b>	<b>SONUÇ VE ÖNERİLER .....</b>	<b>85</b>
<b>8.</b>	<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>87</b>
<b>9.</b>	<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>93</b>



# ŞEKİL LİSTESİ

## Sayfa

<b>Şekil 2.1:</b> Elektrik akım ve gerilim çizgilerinin dağılımı, Van Nostrand ve Cook (1966) kullanılarak çizilmiştir.....	3
<b>Şekil 2.2:</b> Wenner dizilimin uygulama şeması (Loke ve diğ. 2011). ....	4
<b>Şekil 2.3:</b> Schlumberger dizilimin uygulama şeması (Loke ve diğ. 2011).....	5
<b>Şekil 2.4:</b> Dipol-Dipol dizilimin uygulama şeması (Loke ve diğ. 2011). ....	5
<b>Şekil 2.5:</b> Wenner diziliminde profil ölçü yönteminin şeması (Aziz 2015) .....	6
<b>Şekil 2.6:</b> Çoklu elektrod özdirenç yönteminde jeo-elektrik kesitin oluşturma şeması (Loke ve diğ. 2011). ....	7
<b>Şekil 2.7:</b> Elektromanyetik yöntemde verici-alıcı bobinler ve yeraltında bir iletken ile etkileşim şeması (Grant ve West 1965). ....	8
<b>Şekil 2.8:</b> Elektromanyetik yöntem için kullanılan ölçüm düzeneklerinin şeması (a) ard-arda (b) paralel hat, Dondurur (1998) kullanarak çizilmiştir.....	9
<b>Şekil 2.9:</b> Düşey iletken bir yapının elektromanyetik yöntemine gösterdiği tepkinin kuramsal şeması (McNeill 1980, Özürlan ve Uluggerli 2005). ....	9
<b>Şekil 2.10:</b> GPR yöntemi çalışma prensibi gösteren şema, Last ve Smol (2001) kullanılarak değiştirilmiştir. ....	11
<b>Şekil 2.11:</b> a. Mono-statik, b. Bi-statik anten düzenekleri.....	12
<b>Şekil 2.12:</b> Dik ve kısa kenar bakışlı (b) Paralel ve kısa kenar bakışlı (c) Paralel ve uzun kenar bakışlı (d) Dik ve uzun kenar bakışlı (Annan 2005).....	12
<b>Şekil 2.13:</b> X-Ray Floresans (XRF) ışının ortaya çıkışı (Arslanhan 2016).....	14
<b>Şekil 3.1:</b> Çalışma alanının yer bulduru haritası. ....	16
<b>Şekil 4.1:</b> Çalışma alanı ve yakın çevresinin genelleştirilmiş jeolojik haritası Semiz (2018) kullanarak Arcgis programı yardımıyla çizilmiştir..	21
<b>Şekil 4.2:</b> Denizli ili ve yakın çevresinin genelleştirilmiş stratigrafik kolon kesiti (Şimşek, 1984, Sun, 1990, Konak ve diğ., 1990, Taner 2001 ve Topal, 2003' den yararlanılmıştır). ....	22
<b>Şekil 5.1:</b> Laboratuvar ortamında modelleme çalışmaları için kullanılmış olan deney tankının hazırlanması.....	26
<b>Şekil 5.2:</b> Modelleme çalışmalarının sonuçları, dış manyetik alanlardan korunması için hazırlanmış olan faraday kafesinin görüntüsü.....	27
<b>Şekil 5.3:</b> Modelleme çalışmalarında kullanılan numunelerin sınıflandırılması için yapılan ele analizi aşamaları. ....	28
<b>Şekil 5.4:</b> Elek analizinden numune 1 için elde edilen tane dağılım eğrisi. ....	29
<b>Şekil 5.5:</b> Elek analizinden numune 2 için elde edilen tane dağılım eğrisi. ....	30
<b>Şekil 5.6:</b> XRF analizi için numune hazırlanması.....	30
<b>Şekil 5.7:</b> Bartington MS2 manyetik süsseptibilite ölçme cihazı .....	32
<b>Şekil 5.8:</b> Verici bobin devresi (Tharian 2017).....	34
<b>Şekil 5.9:</b> Opamp yükselteç devresinde AC çalışma prensibi .....	35
<b>Şekil 5.10:</b> Elektromanyetik cihazı ve kullanılan aparatların görüntüsü.....	36
<b>Şekil 5.11:</b> Çoklu elektrod özdirenç cihazının akımın izlediği yol ve kullanılan röle şeması.....	37

<b>Şekil 5.12:</b> Çoklu elektrod özdirenç cihazının çalışma prensibini ve yazılım akışını gösteren şema .....	38
<b>Şekil 5.13:</b> Çoklu elektroz özdirenç cihazının deneme tezgahında kullanılan aparatlar.....	39
<b>Şekil 5.14:</b> Laboratuvar ortamında oluşturulan akifer modellerin görüntüsü...40	
<b>Şekil 5.15:</b> Kuru akifer için sayısal modellemede oluşturulan model ve elde edilen görünür özdirenç ve ters çözümleri. ....	41
<b>Şekil 5.16:</b> Doygun akifer için sayısal modellemede oluşturulan model ve elde edilen görünür özdirenç ve ters çözümleri. ....	42
<b>Şekil 5.17:</b> Tankta oluşturulan akifer modelinin özdirenç profilleri. ....	43
<b>Şekil 5.18:</b> Kuru ve bakır sülfat solüsyonu ile doldurulmuş Akiferlerin GPR görüntüleri .....	43
<b>Şekil 5.19:</b> Akifer modeli için elde edilen voltaj eğrileri. ....	44
<b>Şekil 5.20:</b> Model 1 için indüklenen voltaj eğrisi. ....	45
<b>Şekil 5.21:</b> Model 2 için indüklenen voltaj eğrisi. ....	45
<b>Şekil 5.22:</b> Model 3 için indüklenen voltaj eğrisi. ....	46
<b>Şekil 5.23:</b> Model 4 için indüklenen voltaj eğrisi. ....	47
<b>Şekil 5.24:</b> Model 5 için indüklenen voltaj eğrisi. ....	47
<b>Şekil 5.25:</b> Çoklu elektrod özdirenç için plastik boru modeli. ....	48
<b>Şekil 5.26:</b> Çoklu elektrod özdirenç için metal boru modeli. ....	49
<b>Şekil 6.1:</b> Gökpınar Kaynağı çevresinde alınan jeofizik ölçümleri .....	52
<b>Şekil 6.2:</b> Elektrik özdirenç (ÇEÖ-P1, ÇEÖ-P2) ve GPR (GPR-P1) profilleri	54
<b>Şekil 6.3:</b> Elektrik özdirenç (ÇEÖ-P3), elektromanyetik (EM-P1) ve GPR (GPR-P2) profilleri .....	55
<b>Şekil 6.4:</b> Elektrik özdirenç (ÇEÖ-P4), elektromanyetik (EM-P2) ve GPR (GPR-P3) profilleri .....	56
<b>Şekil 6.5:</b> Elektrik özdirenç (ÇEÖ-P5), elektromanyetik (EM-P3) ve GPR (GPR-P4) profilleri .....	57
<b>Şekil 6.6:</b> Elektrik özdirenç (ÇEÖ-P6), elektromanyetik (EM-P4) ve GPR (GPR-P4) profilleri .....	58
<b>Şekil 6.7:</b> Çalışma alanının üç boyutlu özdirenç ve karşılığı oluşturulan ve yeraltı suyu akış yönünü gösteren jeolojik modeli ile konumlandırılan fayları. ....	59
<b>Şekil 6.8:</b> Özdirenç verileri kullanılarak oluşturulan su tablası kontur haritası ile konumlandırılan fay ve karstik oluşumlar.....	60
<b>Şekil 6.9:</b> Gökpınar baraj gölü çalışma alanındaki havza ile akarsuların haritası.....	61
<b>Şekil 6.10:</b> Gökpınar baraj gölü çevresinde düşey elektrik (DES) ve mekanik sondajların lokasyonları. ....	62
<b>Şekil 6.11:</b> Çalışma alanında açılan sondaj verileri kullanarak oluşturulmuş litoloji modeli. ....	63
<b>Şekil 6.12:</b> Çalışma alanında elde edilen görünür özdirenç eğrilerine örnek. ..	64
<b>Şekil 6.13:</b> Düşey elektrik sondajların birleştirilmesiyle elde edilen özdirenç kesitlerine örnek. ....	65
<b>Şekil 6.14:</b> DES eğrilerinin sonuçları kullanılarak oluşturulan 3 boyutlu özdirenç modeli. ....	66
<b>Şekil 6.15:</b> DES eğrilerinin sonuçları kullanılarak derinliğe bağlı olarak özdirenç değişim haritaları. ....	67
<b>Şekil 6.16:</b> Açılan sondajlardan elde edilen verileri kullanılarak oluşturulmuş su tablası kontur haritası. ....	68

<b>Şekil 6.17:</b> Denizli ve Gökpınar çevresinde toplanan numuneler. (● XRF analizi için seçilen numuneler, ▲ laboratuvarında ölçü numuneleri).	70
<b>Şekil 6.18:</b> Düşük ( $\chi_{LF}$ ) (a) ve yüksek ( $\chi_{HF}$ ) (b) frekanslar için oluşturulan manyetik süseptibilite kontur haritaları .....	71
<b>Şekil 6.19:</b> XRF analizlerine göre ağır metal (Pb, Cr, Cu) içeriklerinin çalışma alanındaki dağılım haritaları.....	75
<b>Şekil 6.20:</b> XRF analizlerine göre ağır metal (Zn, Fe, Ni) içeriklerinin çalışma alanındaki dağılım haritaları.....	76
<b>Şekil 6.21:</b> Numunelerdeki ağır metal içeriği kullanılarak hesaplanan PLI .....	79
<b>Şekil 6.22:</b> Ağır metal içerikleri ve PLI ile manyetik süseptibilite doğrusal regresyon eğrileri.....	81
<b>Şekil 6.23:</b> XRF sonuçları, PLI ve manyetik süseptibilite ölçümlerini kullanarak toplanan 79 örnek için hiyerarşik küme analizinin sonuçlarını gösteren dendrogram. ....	82
<b>Şekil 6.24:</b> Altı element (Cr, Ni, Fe, Zn, Pb, Cu, PLI ve $\chi_{LF}$ ) için hiyerarşik küme analizinin sonuçlarını gösteren dendrogram. ....	83
<b>Şekil 6.25:</b> Denizli ili toprak örneklerinde analiz edilen elementlerin (Cr, Ni, Fe, Zn, Pb, Cu) PLI ve $\chi_{LF}$ temel bileşen analizi. ....	84

## TABLO LİSTESİ

### Sayfa

<b>Tablo 5.1:</b> Numunelerde ana oksit elementlerin yüzdelik miktarları .....	31
<b>Tablo 5.2:</b> Modelleme tankında kullanılan numunelerdeki iz elementlerin miktarları.....	31
<b>Tablo 5.3:</b> Modelleme tankında kullanılan kum ve çakıl için manyetik süseptibilite ölçüleri.....	32
<b>Tablo 5.4:</b> Tellerin kalınlıklarına göre dayanacakları akım değerleri (JESC 2011).....	34
<b>Tablo 6.1:</b> Denizli şehir merkezinde ve Gökpınar kaynak çevresinde daha önceki manyetik süseptibilite çalışmalarından elde edilen sonuçlar.....	69
<b>Tablo 6.2:</b> Çalışma alanının kirlilik durumunun belirlenmesi için uygulanan parametreler.....	73
<b>Tablo 6.3:</b> Toplanan Numuneler (N <sup>o</sup> : Numune numarası), Koordinatları (X, Y), ve kimyasal sonuçlar.....	77
<b>Tablo 6.4:</b> Standart Sapma (SD), Varyasyon Katsayısı (CV) ve toplanan numunelerdeki ağır metal konsantrasyonlarının ortalama değerleri. ....	78
<b>Tablo 6.5:</b> Kontaminasyon faktörü (CF) ve jeoakümülyasyon indeksinin (Igeo), ortalama ve maksimum değerleri .....	80
<b>Tablo 6.6:</b> Çalışma alanı için ölçülen ve hesaplanan değişkenlerin Pearson korelyasyon matrisi (R).....	81

## SEMBOL LİSTESİ

<b><i>H</i></b>	: Manyetik alan şiddeti
<b><i>J</i></b>	: Mıknatıslanma şiddeti
<b><i>k</i></b>	: Manyetik süseptibilite
<b><i>Fe</i></b>	: Demir
<b><i>Cr</i></b>	: Krom
<b><i>Pb</i></b>	: Kurşun
<b><i>SI</i></b>	: Uluslararası ölçüm sistemi
<b><i>CGS</i></b>	: Birim sistemi (santimetre (cm), kütle birimini (g), zaman birimini (s))
<b><math>\mu</math></b>	: Manyetik geçirgenlik
<b><i>Zn</i></b>	: Çinko
<b><i>Gps</i></b>	: Küresel konumlama sistemi
<b><math>\rho_a</math></b>	: Görünür özdirenc
<b><i>K</i></b>	: Geometrik faktörü
<b><math>\Delta U</math></b>	: Gerilim farkı
<b><i>I</i></b>	: Akımı temsil
<b><math>\alpha</math></b>	: Sönüm faktörünü (dB/m)
<b><math>\sigma</math></b>	: İletkenlik (mS/m)
<b><math>\varepsilon</math></b>	: Permittivite
<b><i>f</i></b>	: Frekans
<b><math>c_u</math></b>	: Üniformaluluk katsayısı
<b><math>C_c</math></b>	: Süreklilik katsayısı
<b><i>L</i></b>	: Endüktans
<b><math>X_L</math></b>	: Endüktif reaktansı
<b><math>\chi_{FD}</math></b>	: Frekans bağımlılığı
<b><math>\chi_{LF}</math></b>	: Düşük frekansta ölçülen manyetik süseptibilite
<b><math>\chi_{HF}</math></b>	: Yüksek frekansta ölçülen manyetik süseptibilite
<b><i>CF</i></b>	: Kontaminasyon faktörü
<b><i>PLI</i></b>	: Pollution Load Index
<b><math>I_{geo}</math></b>	: Jeokümülyasyon indeksi
<b><i>CV</i></b>	: Varyasyon Katsayısını
<b><i>SD</i></b>	: Standart Sapma
<b><i>PCA</i></b>	: Temel bileşen analizi (Principal Component Analysis)
<b><i>CA</i></b>	: Kümeleme analizi (Cluster Analysis)

## ÖNSÖZ

Gerek tez konusunun seçimi gerekse doktora ders sürecinde, beni gitmek istediğim yönde destekleyen, tıkanan yolu açan, her zaman olumlu yaklaşan, mesleki ve hayat tecrübelerinden esinlendiğim çok değerli danışman hocalarım Prof. Dr. Ali AYDIN ve Dr. Öğr. Üyesi Suat TAŞDELEN'e, tezin bütün aşamalarında desteğini esirgemeyen, gerektiğinde İzmir'den gelerek tez izleme komitelerine yılmadan katılan Prof. Dr. Derman DONDURUR'a, çalışma esnasında geliştirilen cihaz prototiplerinde destek ve yardımlarını esirgemeyen Doç. Dr. Halil ALPASLAN ve Öğr. Gör. Ercan GÖNÜLDEŞ'e, tezden üretilen makalelerinin şekillenmesinde çok değerli katkılarıyla emeği geçen, Prof. Dr. Erdal AKYOL'a ve Doç. Dr. Ali KAYA'ya, tez sürecinin hemen her alanında beni destekleyen ve cesaretlendiren arkadaşlarımdan Elif Meriç İLKİMEN, Abdurrahman Cihan BAYRAKTAROĞLU, Fırat Can SATICI ve Cengiz Berat DİNÇKAN'a, çok teşekkür ederim.

Bugün bu noktada olmama vesile olan değerli aileme, sonsuz şükranlarımı sunarım. Ayrıca bu doktora tez çalışmasını rahmetli babam anısına ithaf ediyorum.

Son olarak, olumsuzluklara rağmen çevresini olumlu yönde etkilemeye çalışan herkese, huzur ve mutluluk dolu güzel bir yaşam dilerim.

Mohamed Salem OUDEIKA

# 1. GİRİŞ

Hidrojeolojik çalışmalarda Jeofizik yöntemler, 1960'lı yılların başlarından beri tüm dünyada yaygın şekilde tercih edilerek ve kabul görerek kullanılmaktadır. Jeolojik ve hidrojeolojik yöntemlerle birlikte kullanılarak jeofizik yöntemlerle yeraltındaki litolojik birimlerin hidrodinamik özellikleri belirlenebilir. Yani suyu barındırabilecek birimlerin akifer olma kapasiteleri, hidrolik karakteristikleri ve bunların diğer birimlerle olan sınırları belirlenebilir. Su tablası, yeraltı suyu akım yönü, yeraltı suyu kalitesi, tatlı-tuzlu girişimi, tektonik ve karst haritaları hazırlanarak 2D ve 3D görüntüleme çalışmaları yapılabilir. Yeraltı suyu ile ilgili çalışmalarda kullanılacak olan jeofizik yöntemlerin seçimi sahanın jeolojik, hidrojeolojik, topoğrafik ve çevresel özelliklerine bağlı olarak değişir. Gravite, elektrik (özdirenç), elektromanyetik, sismik yöntemler ve kuyu logları yeraltı suyu çalışmalarında kullanılabilir. Günümüzde elektrik ve elektromanyetik yöntemler en çok tercih edilen yöntemlerdir. Elektrik (özdirenç) yöntemi, yeraltının elektriksel özelliklerinin (özdirenç) su içeriği tarafından değiştirilmesi esasına dayanır ve su varlığı hakkında dolaylı bir bilgi verir. Elektromanyetik yöntemler ise, elektromanyetik dalga yayılımının neden olduğu yer tepkisini ölçer. Bu tür yöntemlerde, özdirenç yöntemlerinin tersine, elektriksel iletkenlik ölçülür. Kayaçların iletkenlik farklılıklarından yararlanarak yer altı su sistemlerindeki meydana gelen yüksek iletkenli yapıların tespit edilmelerine olanak sağlar.

Bu tezde, yukarıda söz edilen yöntemleri hem arazi şartlarında hem de laboratuvar ortamında uygulayarak farklı jeolojik ortamlardaki yeraltı suyunun varlığının tespit edilmesine yönelik korelasyonlar amaçlanmıştır. Elektrik ve Elektromanyetik yöntemleri kullanılarak, jeolojik ve hidrojeolojik bakımdan kendi içinde farklılıklar sunan bir havza içinde yer alan Gökpınar kaynağını besleyen yeraltı sularının iletimini kontrol eden akım yollarının ve yönlerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bunun eşliğinde, elektrik özdirenç ve elektromanyetik cihazların geliştirmeleri ve arazi sonuçlarının modellenmesi için laboratuvar ortamında çalışmalar planlanmıştır.

## 2. MATERYAL VE YÖNTEM

### 2.1 Elektrik Özdirenç Yöntemleri

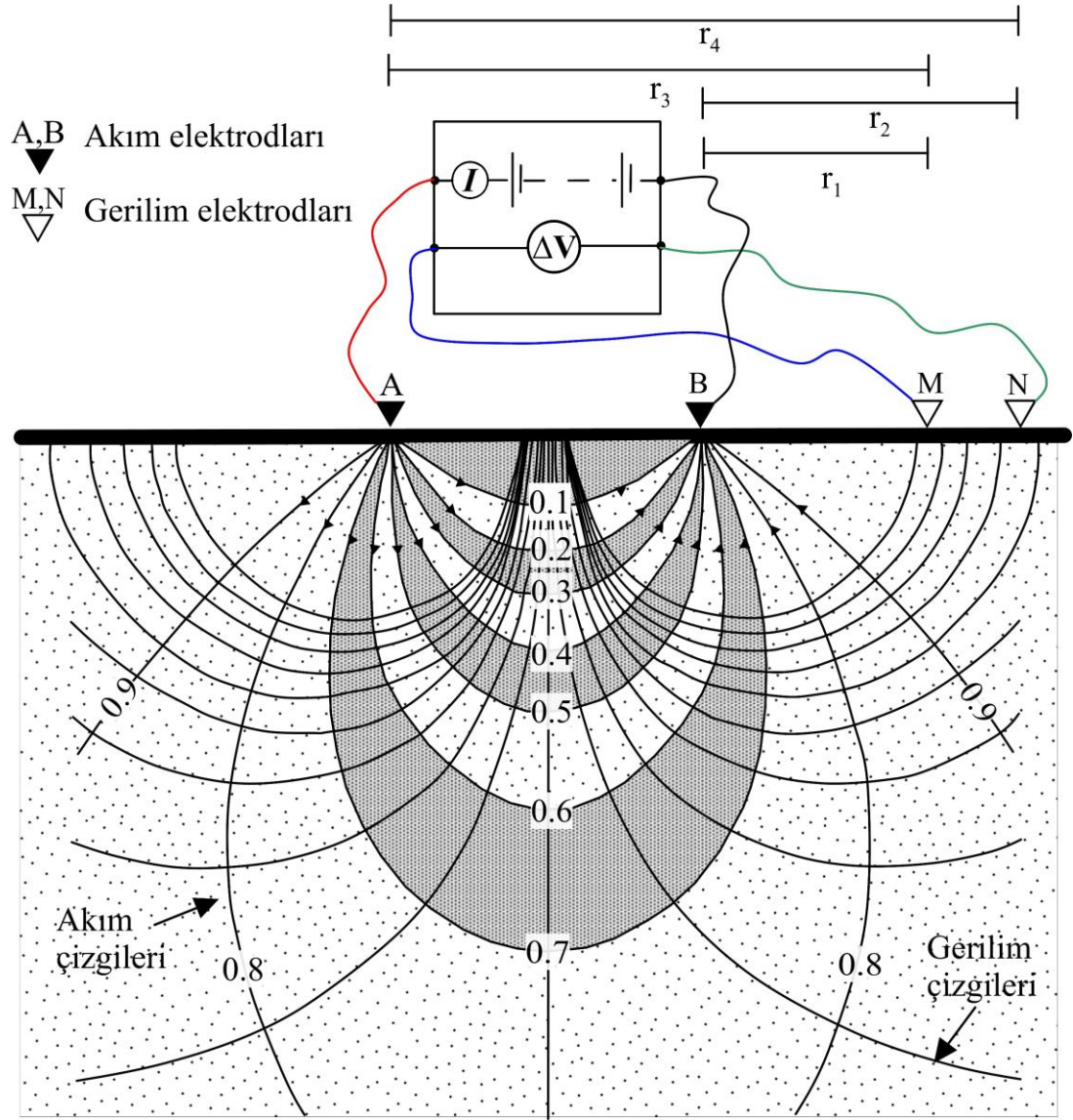
Jeofizik uygulamalarından olan elektrik özdirenç yöntemleri yeraltı elektriksel özelliklerinin farklılıklarından yararlanarak, yeraltının görüntülemesinde kullanılmaktadır. Bu tez çalışmasında kullanılan bu yöntem ilk 1915 yılında Wenner tarafından kullanılmıştır (Wenner 1915). Bu yöntem Ohm kanununa dayanarak görünür özdirençin hesaplamasına olanak sağlamaktadır.

Elektrik özdirenç yöntemi, ucuzluğu ve uygulama kolaylığı sunduğu için yeraltı suyu aramalarında olduğu gibi, maden, jeotermal ve başka birçok mühendislik alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Yeraltındaki ortamlarda suyun varlığı özdirenç değerlerinde oldukça etkili olduğundan, jeofizik özdirenç yöntemi yeraltı suyu çalışmalarında en yaygın olarak kullanılan yöntemlerin başında gelir (Archie 1942, Cosenza ve diğ. 2006).

#### 2.1.1 Temel Ölçüm Düzeneği

Yöntemin uygulanmasında dört elektrot ve bir özdirenç ölçer aleti kullanılır. Temel prensip, yere iki elektrot (AB) yardımıyla elektrik akımı göndererek bir diğer iki elektrod (MN) arasında oluşan gerilim farkını ölçmektir (Şekil 2.1). Böylelikle elde edilen görünür özdirenç değerleri kullanılarak yeraltın mekânsal gerilim farklılıkları belirlenmiş olur. Genel olarak kullanılan elektrotların konumlandırılması rastgele olabilir (Şekil 2.1). Ancak uygulamada standartlaşmış elektrot dizilimleri mevcuttur. Bu dizilimlerden, uygulama kolaylığı ve verimliliklerine bağlı olarak istenilen tercih yapılır.





Şekil 2.1: Elektrik akım ve gerilim çizgilerinin dağılımı, Van Nostrand ve Cook (1966) kullanılarak çizilmiştir.

Görünür özdirenç değerlerinin hesaplamaları ölçüm aşamasında kullanılan dizilim şekline bağlı olarak hesaplanır. Her dizilime göre normalize ve standartlaşmış bir geometri faktörü söz konusudur. Görünür özdirenç denklem (2. 1) yardımı ile hesaplanır.

$$\rho_a = K \frac{\Delta U}{I} \quad (2. 1)$$

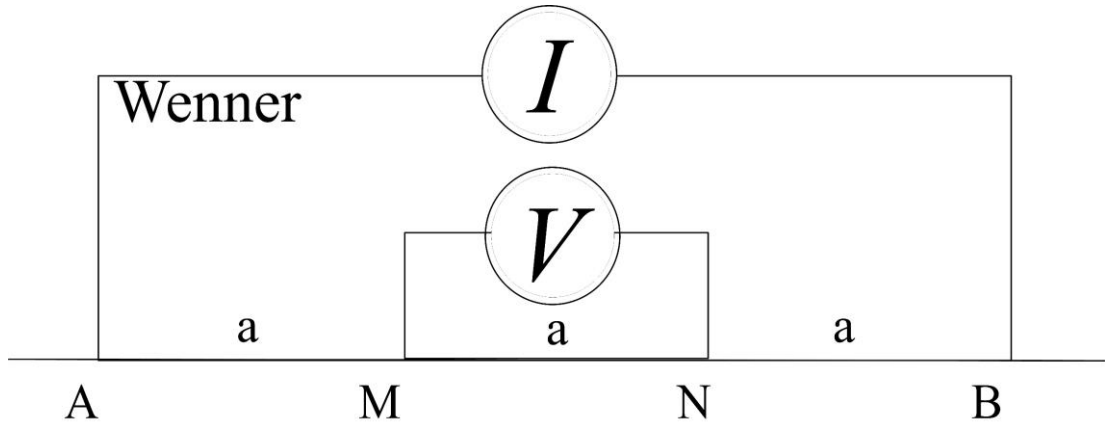
$\rho_a$  Görünür özdirenç,  $K$  geometrik faktörü,  $\Delta U$  gerilim farkı ve  $I$  akımı temsil etmektedir.

### 2.1.2 Yaygın Dizilimler

Yeraltının özdirenç değişiminin hesaplanması, arazide farklılık gösteren elektrot dizilimleri kullanılarak ve jeolojik yapıların görünür özdirenç değerleri ölçülerek başlar. Elektrot dizilimlerine bağlı olarak hesaplanan bu özdirenç değerleri veri işleme tabi tutularak yeraltının gerçek özdirenç değerlerini elde edilebilir. Elektrot dizilimlerine ve elektrotlar arasındaki mesafelere göre yeraltının jeolojik ve hidrojeolojik özellikleri, yanal ve düşey yönlerdeki değişimleri dolaylı bir şekilde tespit edilebilir. Wenner, Shlumberger ve dipol-dipol dizilimleri uygulamada en yaygın olan dizilimlerdir.

#### ➤ Wenner dizilimi

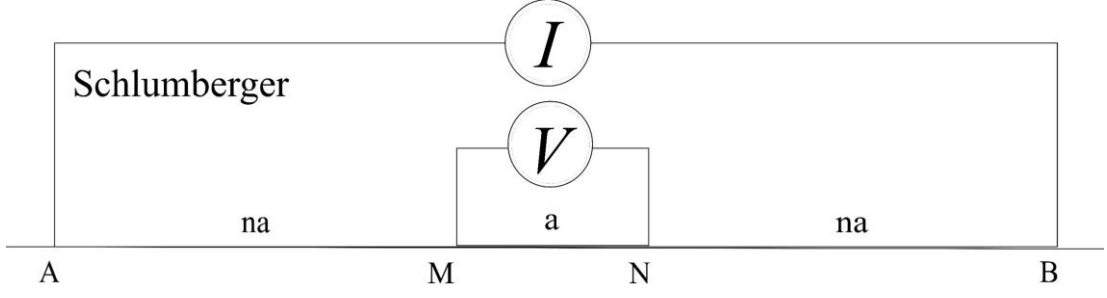
Bu dizilimde, güç kaynağına bağlı olan harici iki elektrottan yere akım gönderilirken dahili iki elektrotun arasındaki oluşan gerilim farkı ölçülür. Elektrotların ara mesafeleri ise artırılarak eşit tutulur. Böylelikle istenilen araştırma derinliğine ulaşılabilir (Şekil 2.2).



Şekil 2.2: Wenner dizilimin uygulama şeması (Loke ve diğ. 2011).

#### ➤ Shlumberger dizilimi

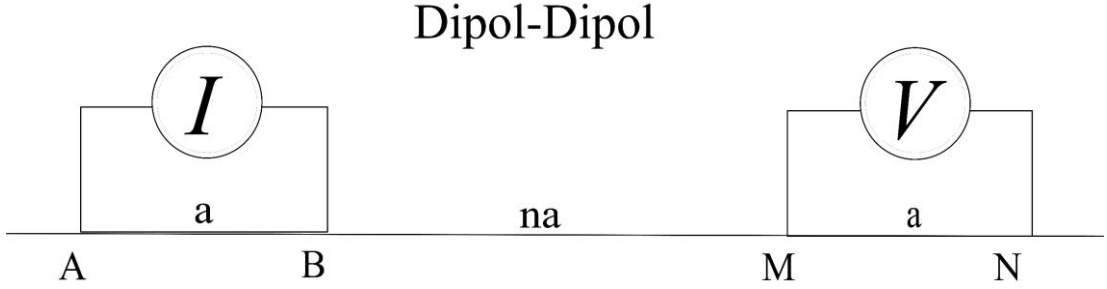
Shlumberger diziliminde harici elektrotların ara mesafesi artırılırken dahili elektrotlar sabit tutulur. Akım elektrotları gerilim elektrotlardan uzaklaştıkça oluşan gerilim farkı minimum değere ulaşır, bu durumda gerilim elektrotları arasındaki mesafe artırılabilir (Şekil 2. 3).



Şekil 2.3: Schlumberger dizilimin uygulama şeması (Loke ve diğ. 2011).

➤ Dipol-Dipol dizilimi

Bu dizilimde akım ve gerilim elektrotların çiftleri şekil (2.4)'te görüldüğü gibi elektrotlar arasındaki mesafe yakın tutularak elektrot çiftleri birbirinden uzaklaştırılır.



Şekil 2.4: Dipol-Dipol dizilimin uygulama şeması (Loke ve diğ. 2011).

### 2.1.3 Elektrik Özdirenç Yöntemleri

Elektrik özdirenç yöntemlerinin veri toplama şekillerine bağlı olarak, Düşey Elektrik Sondaj, Profil Ölçüsü ve Özdirenç Tomografisi'ne (Çoklu Elektrod Özdirenç yöntemi) ayrılabilirler.

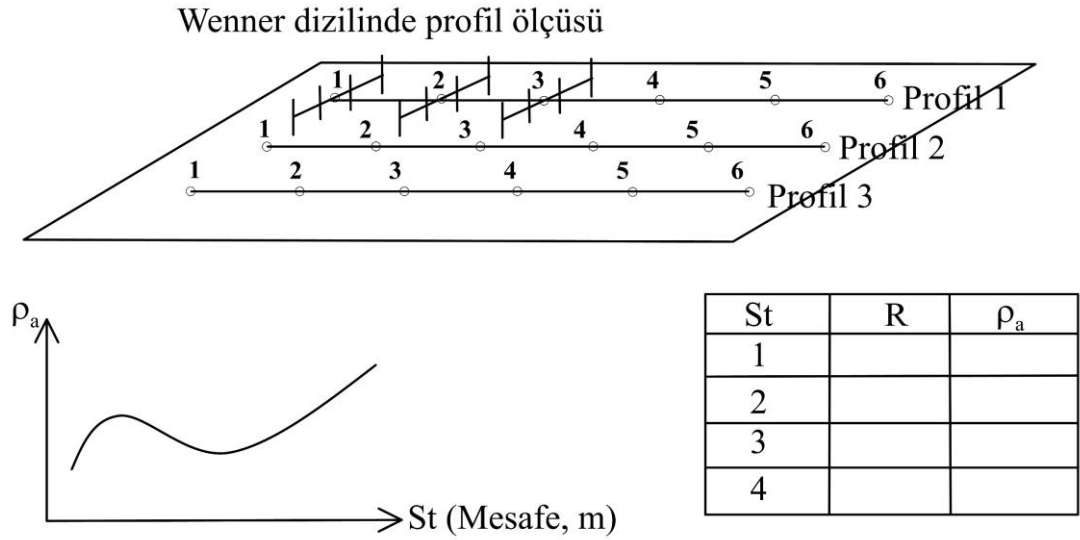
➤ Düşey Elektrik Sondaj

Elektrik özdirenç yöntemlerinden en yaygın ve maliyeti en düşük olan yöntemdir. Bu yöntemde arazi şartlarına ve jeolojik özelliklere bağlı olarak, gerilim ve akım elektrotları, seçilen dizilime göre bir orta nokta ve bu noktadan itibaren doğrusal bir hat üzerinde ve aynı hizada bakışimli bir şekilde konumlandırılır. Böylelikle yeraltındaki jeolojik tabakaların derinlik ve kalınlıkları tespit edilebilir.

Elde edilen görünür özdirenç değerleri log fonksiyonuna karşılık olarak elektrotların arasındaki mesafenin loguna çizdirilir. Bu çizim sonucunda elde edilen özdirenç eğimleri ters çözüme tabi tutularak yerin altındaki birimlerin kalınlık ve derinlikleri hesaplanabilir.

➤ Profil ölçüsü

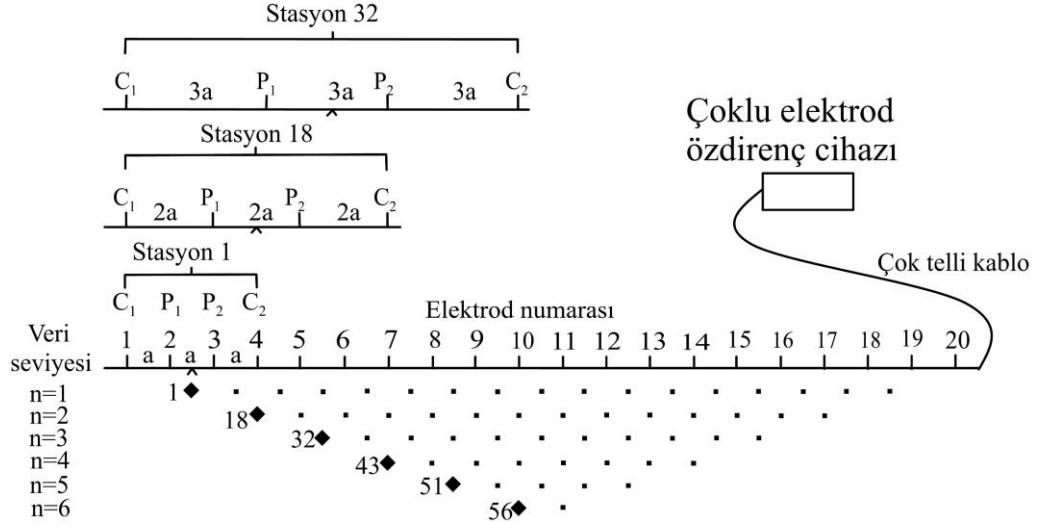
Yukarda, düşey elektrot sondajları için anlatılanın tersine, profil ölçüleri yeraltının yanal yöndeki değişimlerini araştırır. Bu yöntemde elektrotların arası mesafesi araştırılması istenilen derinliğe göre seçilir ve sabit tutularak bir profil boyunca kaydırılarak ölçü alınır (Şekil 2.5).



Şekil 2.5: Wenner diziliminde profil ölçü yönteminin şeması (Aziz 2015)

➤ Özdirenç Tomografisi

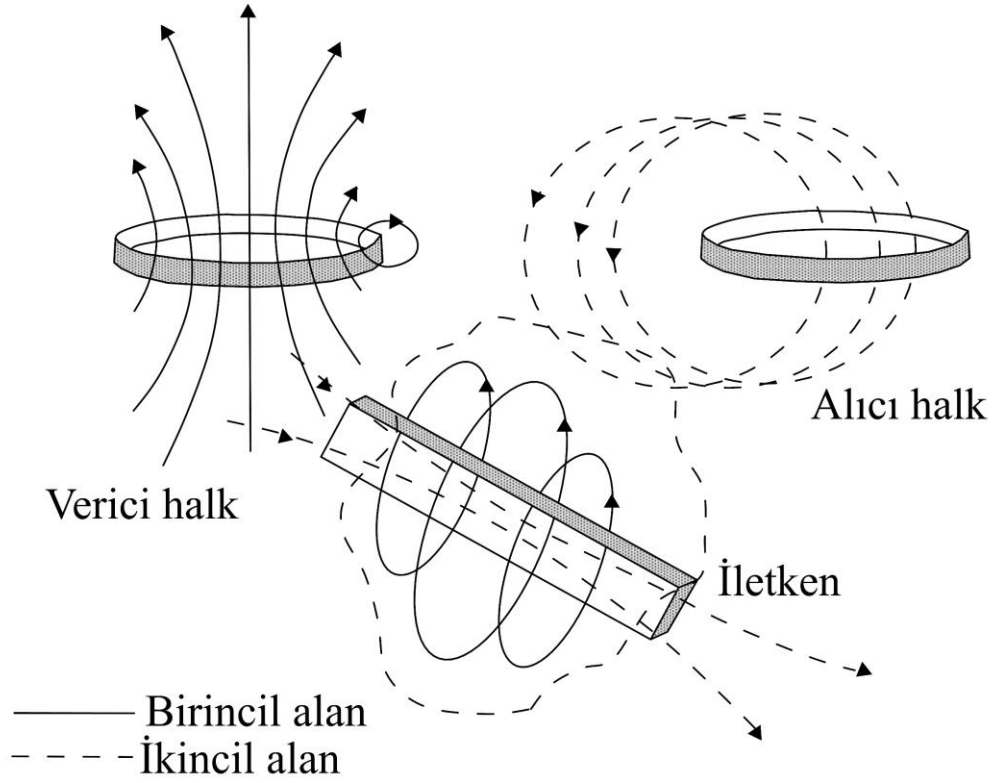
Adından anlaşılacağı üzere bu yöntemde hem düşey hem yanal yönde yeraltının görüntülenmesine olanak sağlanır. Bu yöntemde hem düşey hem yanal yönlerdeki birimlerin geçişleri görüntüleyebilmek için elektrot aralıkları artırılarak bir profil boyunca kaydırılarak ölçü kadı alınır. Ölçülen bu değerler yardımıyla yeraltını andıran bir jeo-elektrik kesiti oluşturulur (Şekil 2.6).



Şekil 2.6: Çoklu elektrod özdirenç yönteminde jeo-electrik kesitin oluşturma şeması (Loke ve diğ. 2011).

## 2.2 Elektromanyetik Yöntemi

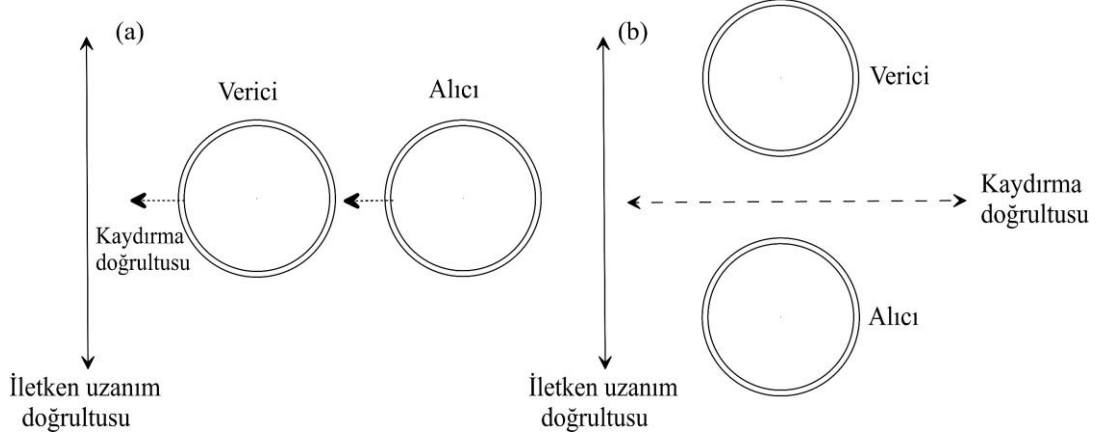
İsveç'te geliştirilen frekans ortamı elektromanyetik (FEM) yöntemi günümüzde yer bilimleri araştırmalarında yaygın olarak kullanılır. Genel olarak, tahribatsız olan bu yöntem, bir verici bobin yardımıyla ortama birincil bir elektromanyetik alan yayılarak oluşan ikincil manyetik alan ölçülmesine dayanır. Adından anlaşılacağı üzere FEM bir frekans ortamı elektromanyetik yöntemdir ve 35 Hz ile 60 kHz arasında çalışır. Yeraltında bir iletken olduğu takdirde, verici bobini bir alternatif akımıyla uyarılmasından dolayı iletkende birincil manyetik alana dik yönde Eddy akımları oluşur. Bu akımların neticesinde oluşan ikincil manyetik alan alıcı bobin yardımıyla kaydedilir (Şekil 2.7). Bu yöntem, yanal yöndeki değişimlerin saptanmasında oldukça etkili olduğu için yaygın olarak gömülü yapı, karstik boşluk, kırık, çatlak, makaslama bölgeleri ve bunların içerisinde biriken suların araştırmalarında kullanılır (Palacky ve diğ. 1981, McNeill 1980).



Şekil 2.7: Elektromanyetik yönteminde verici-alıcı bobinler ve yeraltında bir iletken ile etkileşim şeması (Grant ve West 1965).

### 2.2.1 Ölçüm Teknikleri

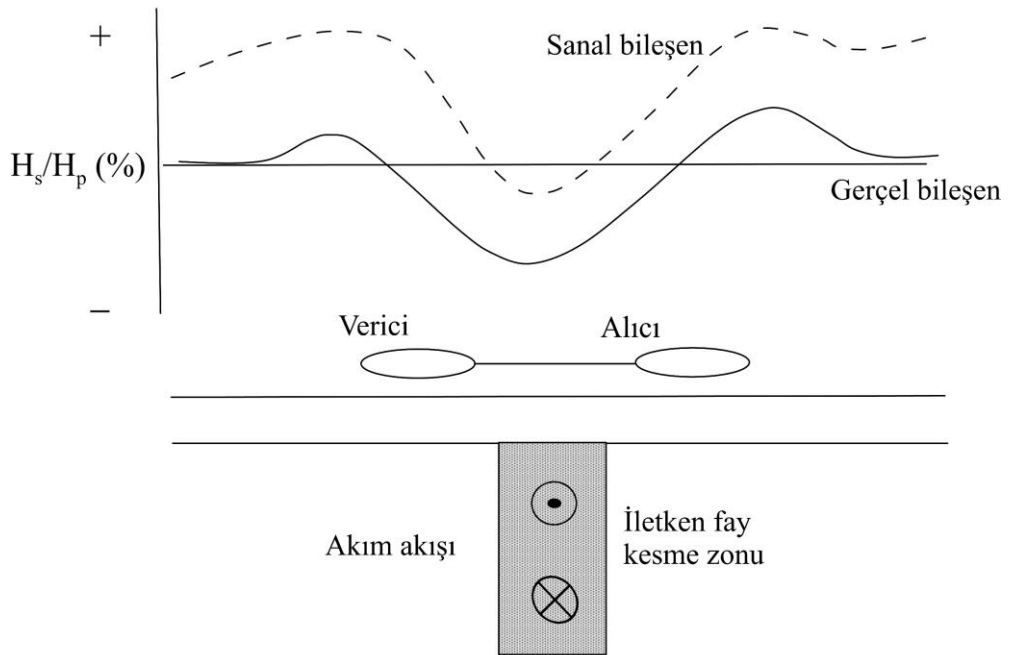
Elektromanyetik yönteminde de diğer yöntemlerde olduğu gibi uygulamada, profilleme, delgi ve haritalama biçimlerinde ölçümler alınır. Elektromanyetik yönteminde bobinleri bir hat boyunca kaydırılarak ölçü alınır. Profilleme ölçüsü denir, bu ölçü düzenekleri yanal yöndeki iletkenlik değişimlerinin saptanması için tercih edilebilir. Delgi ölçümleri ise verici-alıcı bobinlerin çalışma frekansları ve aralarındaki mesafeyi değiştirilerek gerçekleştirilir ve genel olarak düşey yöndeki iletkenlik değişimleri izlemek için uygulanır. Araştırma amacı ve özelliklerine bağlı olarak kullanılan bobinlerin ayarlanması gerekir. Bu tez çalışmasında şekil (2.8)'de görüldüğü gibi artarda ve paralel hat ölçüm düzenekleri kullanılmıştır.



**Şekil 2.8:** Elektromanyetik yöntem için kullanılan ölçüm düzeneklerinin şeması (a) ard-arda (b) paralel hat, Dondurur (1998) kullanarak çizilmiştir.

### 2.2.2 Ölçülen Büyüklükler

Elektromanyetik yönteminde verici yardımıyla ortama yayılan elektromanyetik alanı ve bu alanın sonucunda oluşan ikincil elektromanyetik alanın değerleri ölçülür. Düşey iletken bir yapının elektromanyetik yöntemine gösterdiği tepkisinin kuramsal eğrileri ölçülen ikincil elektromanyetik alanın birincil manyetik alana oranı şekil (2.9)'da verilmiştir.



**Şekil 2.9:** Düşey iletken bir yapının elektromanyetik yöntemine gösterdiği tepkinin kuramsal şeması (McNeill 1980, Özürkan ve Uluggerli 2005).

### 2.2.3 Araştırma Derinliği ve Görünür Özdirenc

Yere gönderilen elektromanyetik dalgaların derinlere nüfuz ederken frekansa ve yeraltının iletkenliğine bağlı olarak azalmaktadır. Elektromanyetik yönteminin nüfuz derinliği aşağıdaki denklemler (2. 2 ve 2. 3) kullanılarak hesaplanabilir.

$$\delta = \left( \frac{2}{\omega\mu\sigma} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2. 2)$$

$$d = 503.2 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \quad (2. 3)$$

Genel olarak arazi ölçümlerinden elde edilen Hs/Hp oranları, eğri şekilde değerlendirilebilir ve buna ek olarak aşağıdaki denklem (2. 4) kullanılarak yeraltının iletkenlik değerleri hesaplanabilir.

$$\sigma_a = \frac{4}{\mu_0\omega r^2} \left( \frac{H}{H_p} \right)_{sanal} \quad (2. 4)$$

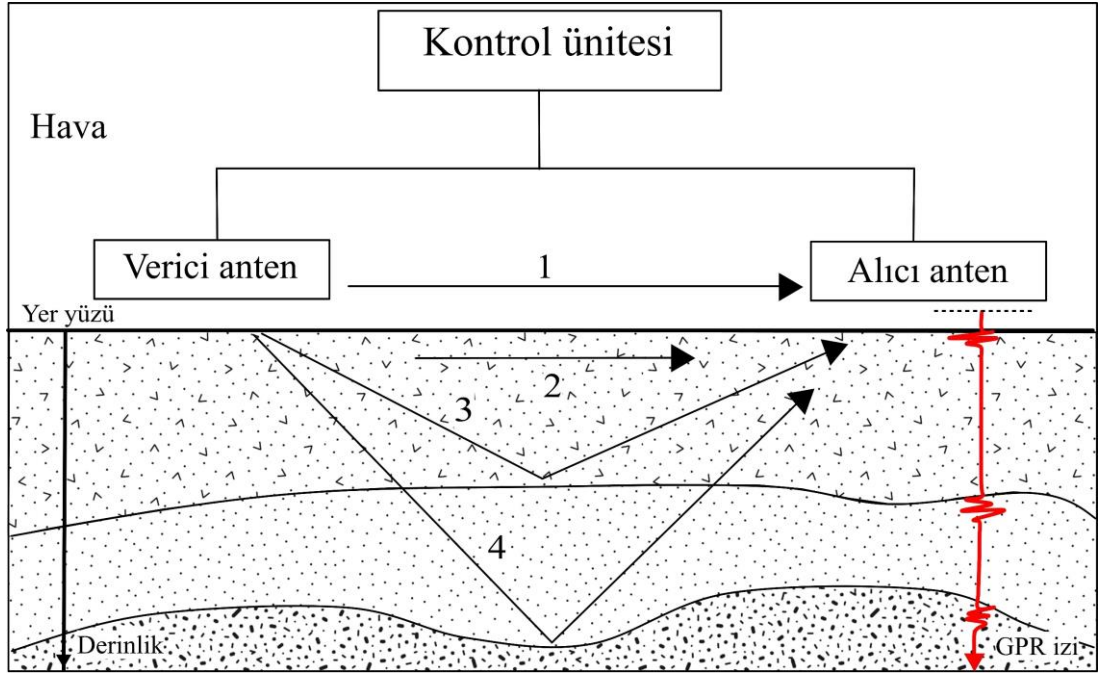
Günümüzde bu eşitliği kullanarak doğrudan görünür iletkenliğin hesaplanmasına imkân sağlayan aygıtlar mevcuttur (Özürlan ve Ulugergerli 2005).

### 2.3 Yer Radarı Yöntemi (GPR)

Yer radarı GPR sığ derinlikte olan yapıların araştırmalarında çözünürlüğü yüksek olan bir jeofizik yöntemdir (Griffin ve Pippet 2002). Bu yöntem diğer elektromanyetik yöntemlerinin olduğu gibi bir elektromanyetik alanın ortama yayılmasına dayanmaktadır. Oldukça etkili ve tahribatsız olan bu yöntem son yıllarda birçok alanda tercih edilmektedir. Şekil (2. 10)'da görüldüğü gibi, kontrol ünitesinden uyarlanan verici anten yere yüksek frekanslı elektromanyetik dalgalar gönderilir, yeraltındaki fiziksel farklılık gösteren yapıların yüzeylerinden yansıtılan bu dalgalar alıcı anten yardımıyla kaydedilir. Böylelikle dalga'nın gidiş geliş zamanı kullanılarak yapıların derinlikleri hesaplanabilir. Yer içine gönderilen bu dalgaların ilerleme hızı,



gönderildikleri ortamın bağıl dielektrik geçirgenlik ve manyetik geçirgenliklerine bağlıdır (Weeds 1994).



**Şekil 2.10:** GPR yöntemi çalışma prensibi gösteren şema, Last ve Smol (2001) kullanılarak değiştirilmiştir.

Şekil (2.10)'da görüldüğü gibi alıcı antene ilk gelen dalgalar havada yayılan dalgalardır (1). Derinlere nüfuz etmeyen dalgalar yüzeyden yansıyarak alıcı antene ulaşır (2). Yeraltındaki birimlerin yüzeylerinden yansıyan dalgalar ise alıcı antene daha geç ulaşırlar (3 ve 4). Genel olarak arazi şartlarını göz önüne alınarak GPR profillerin doğrultu ve uzunlukları belirlenir.

### 2.3.1 Araştırma Derinliği

GPR yönteminin uygulamalarında, anten ara mesafeleri, örnekleme aralığı ve frekans değerleri araştırmanın amacına göre özenle ayarlanması gereken değişkenlerdir. Bazı çalışma alanlarında düşey elektrik sondaj verisi olduğu takdirde ortamda sönmeme miktarı bulunabilir. Böylelikle en yüksek araştırma derinliği (2. 5) yardımı ile elde edilebilir.

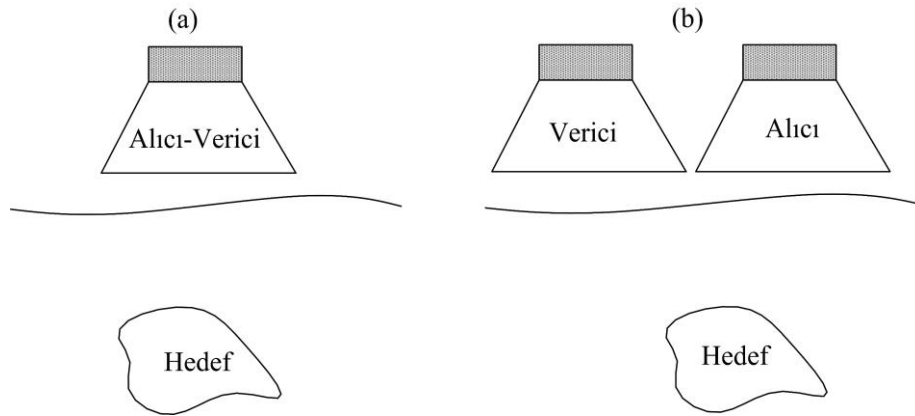
$$r \leq \frac{30}{\alpha} \text{ veya } r \leq \frac{35}{\sigma} \quad (2. 5)$$

Bu durumda ( $\alpha$ ) sönüm faktörünü temsil eder ve birimi dB/m'dir. ( $\sigma$ ) ise iletkenliği temsil eder ve birimi mS/m'dir. GPR araştırmalarında hedeflenen derinlik ( $d$ ) ve söz konusu olan ortamın permitivite değeri ( $\epsilon$ ) kullanarak (2. 6) yardımı ile uygun anten frekans değeri seçilebilir.

$$f = \frac{150}{d\sqrt{\epsilon}} \quad (2. 6)$$

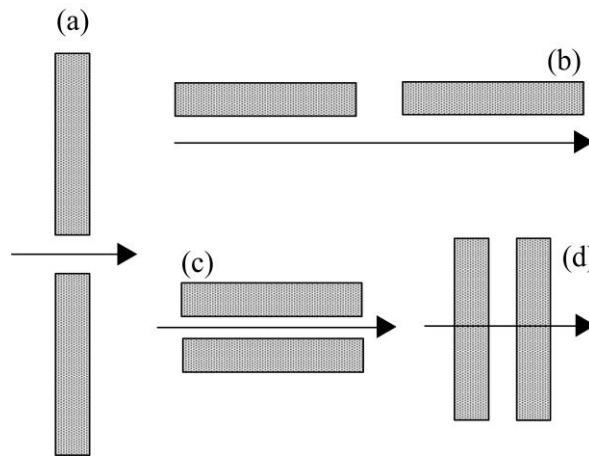
### 2.3.2 Ölçüm Teknikleri

GPR aygıtlarında verici ile alıcı antenleri tek bir düzenekte bulundurulmasına Mono-statik; Ayrı ayrı düzenekte olurlarsa Bi-statik anten denir (Sekil 2.11).



Şekil 2.11: a. Mono-statik, b. Bi-statik anten düzenekleri.

GPR antenlerinin ayarlanmasına imkân sağlayan aygıtların anten açılımı ve hatların uzanımı, çalışma alanı jeoloji ve topografyasına bağlı olarak seçilmelidir (Şekil 2.12).



Şekil 2.12: Dik ve kısa kenar bakışımı (b) Paralel ve kısa kenar bakışımı (c) Paralel ve uzun kenar bakışımı (d) Dik ve uzun kenar bakışımı (Annan 2005).

## 2.4 Manyetik Süseptibilite Yöntemi

Manyetik süseptibilite “*k*” simgesi ile gösterilir ve harici bir manyetik alan etkisinde malzemenin mıknatıslanma yeteneğinin ölçüsü olarak tanımlanmaktadır. Kademeli olarak artırılan bir dış manyetik alan etkisinde kalan bir maddenin dipollerinin dış manyetik alanın yönüne dönme hızları ve miktarları, o maddenin manyetik süseptibilitesini belirler (Makaroglu, 2011). Manyetik süseptibilite(*k*), manyetik alan şiddeti (*H*) ve Mıknatıslanma şiddeti (*J*) (2. 7) bağıntı ile ilişkilendirilebilir.

$$k = J/H \quad (2. 7)$$

Manyetik süseptibilite SI ve CGS sistemlerinde sıfırdan büyük boyutsuz bir büyüklüktür.

### 2.4.1 Manyetik Süseptibilite Ölçü Düzeneği

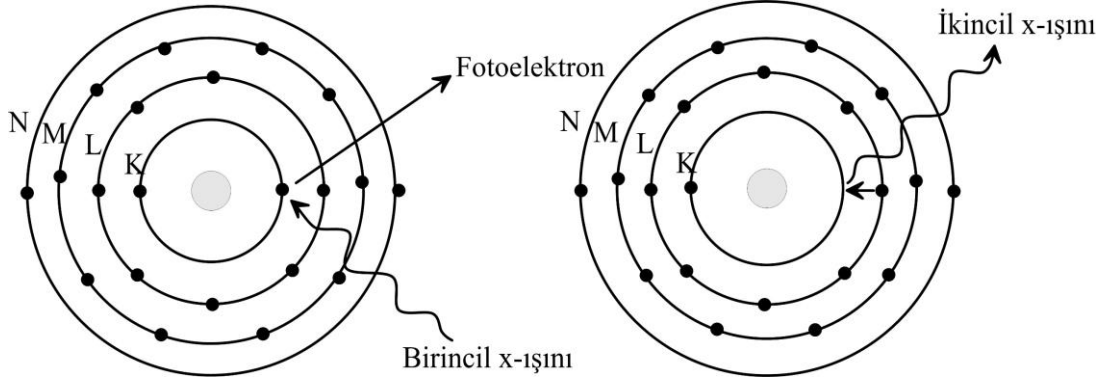
Bu tez çalışmalarında laboratuvar ortamında manyetik süseptibilite ölçümleri gerçekleştirilmesinde MS2 Marka manyetik süseptibilite ölçüm cihazı kullanılmıştır. Cihazın numune yuvasında yerleştirilen nüme için, farklı iki frekansta hem SI hem CGS ayarlarında ölçüm alınır.

## 2.5 XRF Yöntemi

X ışını floresens (XRF) analiz yöntemi maddenin içerdiği kimyasal unsurların belirlenmesinde en etkili ve yaygın kullanılan yöntemlerden biridir. Yöntemden elde edilen sonuçların yüksek doğruluk oranları ve uygulama kolaylığı, bu tip çalışmalarda oldukça rağbet görmesine neden olur. Genel olarak foton-madde sonucu meydana gelen x-ışınları ve saçılma fotonlarının nicel ve nitel değerlendirilmesine bağlı olarak uygulanan bir tekniktir.

### 2.5.1 XRF Analizinin Çalışma Prensibi

XRF cihazlarındaki yayılan X-ışınları numunedeki elektronlara çarparak konumlarını birbirleriyle değiştirmelerine sebep olur. Bu sayede atoma enerji seviyesine bağlı olan ikinci bir X ışını gönderilir ve floresans olayı meydana gelir (Şekil 2.13). Bu uygulama sonucunda, ışımının XRF-cihazlarındaki algılayıcı yardımıyla numune kimyasal içeriği belirlenebilir (Arslanhan 2016).



Şekil 2.13: X-Ray Floresans (XRF) ışının ortaya çıkışı (Arslanhan 2016)

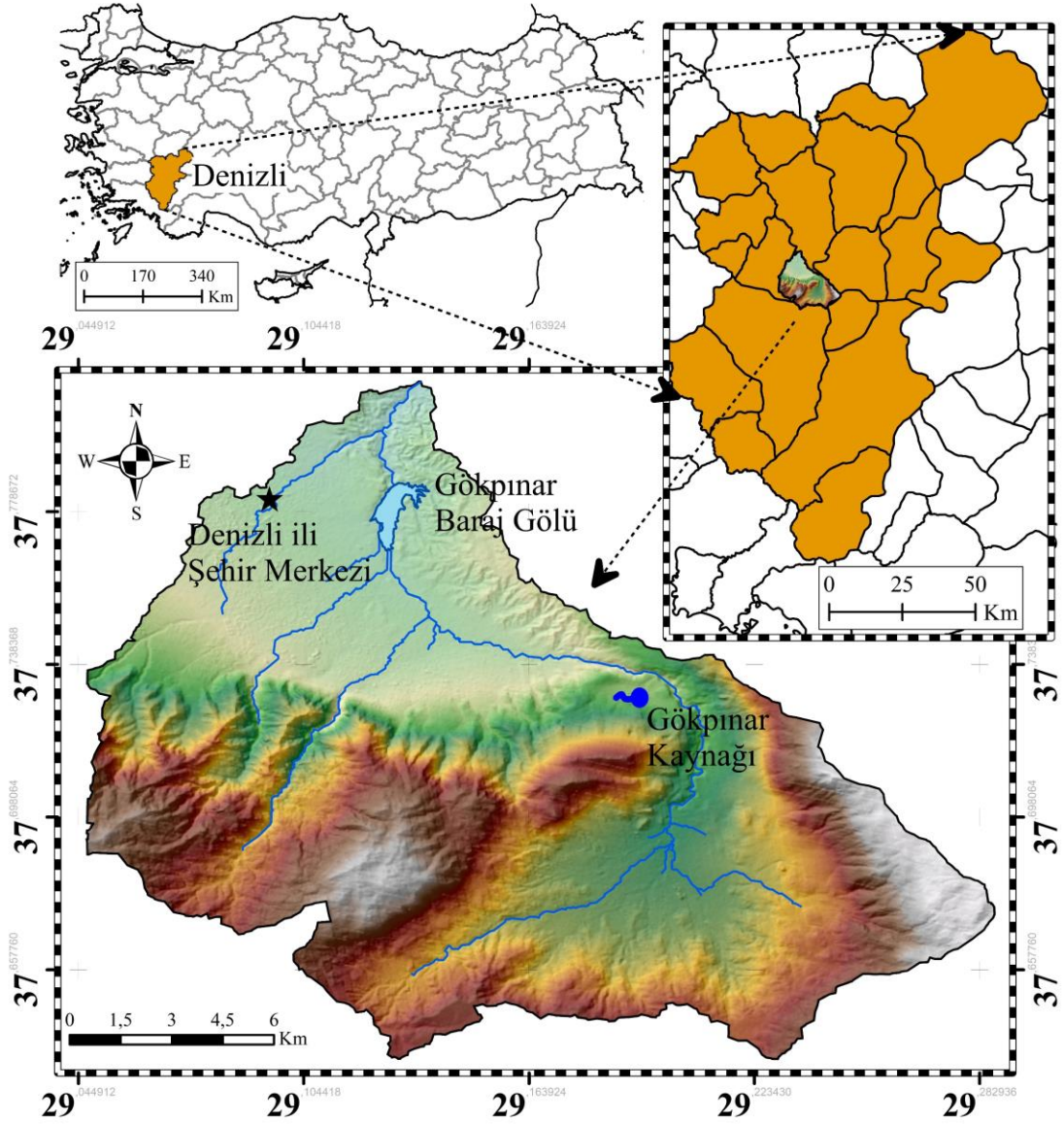
### 2.5.2 XRF Analiz Düzenegi

XRF analizleri Pamukkale Üniversitesi İleri Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezinde (İLTAM) Spectro XEPOS marka Polarize Enerji Dağılımlı X-ışını Floresans Spektrometresi (PEDXRF) yardımıyla uygulanmıştır. XRF analizi için GEOL, GBW-7109 ve GBW-7309 olarak anılan Birleşik Devletler Jeolojik Araştırması (USGS) standartları kullanılmıştır. XRF analizlerinde kullanılacak numuneleri, tungstenli karbid hazneli halkalı bir değirmende toz haline getirilmiş, 6,25 gr ile 1,4 gr wax (M-HWC) ile karıştırılarak bir disk haline getirmek için 18 N'de otomatik bir şekilde sıkıştırılmıştır.

### 3. ÇALIŞMA ALANI KONUMU

#### 3.1 Çalışma Alanı

Arazi uygulamalarının yapıldığı çalışma alanı, Gökpınar kaynağı, Gökpınar baraj gölü ve Denizli şehir merkezi olmak üzere üç lokasyondan oluşur. Çalışma alanı yer bulduru haritası Arcgis programı kullanılarak oluşturulmuştur. Bu üç lokasyon da Gökpınar Barajı havzası içinde yer alır. Gökpınar Baraj Gölü havzası, Denizli il merkezinin 2 km kuzeydoğusunda, yer alır (Şekil 3.1). Havzanın yüzey drenaj alanı, coğrafi koordinat sistemine göre  $28^{\circ} 59'16''$ -  $29^{\circ} 17' 13''$  doğu boylamları ile  $37^{\circ} 38'15''$ -  $37^{\circ} 47' 14''$  kuzey enlemleri arasında kalan yaklaşık  $228 \text{ km}^2$ 'lik bir alanı kapsar. Gökpınar Kaynak bölgesi ile ilgili çalışmalar coğrafi koordinat sistemine göre doğu  $29^{\circ}11'22.81''$ -  $29^{\circ}12'24.34''$  boylamları ile kuzey  $37^{\circ}43'57.99''$ -  $37^{\circ}43'28.09''$  enlemleri arasında kalan yaklaşık  $3 \text{ km}^2$ 'lik bir alanı kapsar. Gökpınar Baraj Gölü güneyindeki çalışma alanı coğrafi koordinat sistemine göre doğu  $29^{\circ}06'00''$ -  $29^{\circ}10'00''$  boylamları ile kuzey  $37^{\circ}43'20''$ -  $37^{\circ}45'20''$  enlemleri arasında kalan yaklaşık  $1.56 \text{ km}^2$ 'lik bir alandır. Bu iki lokasyona, Denizli şehir merkezindeki çalışmalar da dahil edildiğinde, toplam çalışma alanı yaklaşık  $35 \text{ Km}^2$ 'dir.



Şekil 3.1: Çalışma alanının yer bulduru haritası.

### 3.2 Ulaşım

Karayolu ile ülkenin her tarafından çalışma alanına ulaşılabilir. Demiryolu vasıtasıyla Ankara, İstanbul ve İzmir illeri ile bağlantı mevcuttur. Havaalanına uzaklığı 60 km'dir. Havza içindeki en önemli yol, havzayı kuzeybatıdan güneydoğuya kadar tam ortasından boydan boya kat ederek geçen Denizli-Antalya, Muğla karayoludur. Onun dışında yerleşim yerlerini birbirine bağlayan asfalt, parke ve beton yollar mevcut olup, tümünde yaz kış ulaşım sağlanır. Ormanlık bölgelerde de iş makinaları için "orman yolu" olarak tabir edilen stabilize yollar mevcuttur.

### 3.3 İklim

Denizli ili Türkiye coğrafi haritasında Ege bölgesinde yer almasına rağmen, Egemen olan iklim, iç-Batı Anadolu iklimidir. Yani Ege, Akdeniz ve karasal İç Anadolu iklimi arasında karakteristik bir geçiş teşkil eder. Genel olarak İç Anadolu iklimine daha yakın olduğu söylenebilir. Çünkü yıllık ortalama yağış miktarı Kıyı Ege Bölgesine göre daha az olduğu gibi, yıllık ortalama sıcaklık değerleri de İç Anadolu iklimine daha yakındır. Aynı şekilde günlük ve mevsimlik sıcaklık oynamaları da kıyı bölgelerine göre daha fazladır.

Denizden yüksekliği 425 m olan Denizli Devlet Meteoroloji İstasyonunda 1956-2017 yılları arasında 61 yıl sıcaklık ve yağış ölçümleri yapılmıştır. Bu ölçümlere göre yıllık ortalama sıcaklık 16,3 derece, yıllık ortalama yağış 563,7 mm'dir. En fazla yağış 91,6 mm ile ocak; en az yağış ise 8,3 mm ile ağustos ayında olur. En sıcak ay 27,6 °C ile temmuz, en soğuk ay ise 5.9 °C ile ocak aylarıdır. Egemen rüzgâr yönü güneybatıdır (T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı Meteoroloji Genel Müdürlüğü 2021). En yüksek sıcaklık 15. 08. 2007 tarihinde 44,4 °C; en düşük sıcaklık ise 09. 02. 1965 yılında -11,4 °C olarak gerçekleşmiştir.

### 3.4 Topoğrafya

Büyük Menderes Grabeni ile Gediz Grabeninin kesiştiği alanın doğusunda yer alan Denizli Havzası genişleme tektoniğine bağlı bir morfoloji sunar. Yerleşim alanının güney tarafı yüksek dağlar ve sarp yamaçlarla kuşatılmış olup, kuzeye doğru gidildikçe daha düşük kotlarda yamaç molozu ve alüvyon yelpazesi niteliğinde kısmen daha yumuşak bir topoğrafya egemen olur. Şehir merkezinin denizden yüksekliği 354 metredir. Gökpınar Barajının havza sınırlarını oluşturan başlıca yükseltiler, kuzeydoğuda Çürüksu grabeni ile Denizli alt grabeni arasındaki küçük bir horst niteliğindeki KB-GD gidişli Karakova yükselimi (360-700m), güneydoğuda Ege Bölgesinin en yüksek noktası olan Honaz Dağı (2571m), Batıda Çakıroluk Tepe (1714m), güneybatıda Çatalca Tepe (1712m) ve Baldırnkaya Tepe'dir (1827m). Havza içerisinde Honaz dağı ve Teleferik yaylasıdır.

Vali Recep Yazıcıoğlu-Gökpınar Baraj Gölet Havzasında yer alan ve büyük oranda yerleşime açık olan Bağbaşı Mahallesi taş düşme riski olan alandır. Ayrıca Gökpınar kaynağının kuzey tarafta kalan Honaz dağı yakası çok yavaş heyelanlı bölgedir. Cankurtaran mahallesinin doğusunda Honaz Dağının etekleri yamaç duraylılığı bakımından riskli alanlardır.



## 4. JEOLojİ

Çalışma alanında yüzeyleyen kaya birimleri; “Neojen öncesi temel birimleri”, “Neojen birimleri” ve “Kuvaterner birimleri” olarak görülür.

### 4.1 Neojen Öncesi Temel Birimleri

Genellikle Menderes masifine ait metamorfik kayalardan ibaret olup, havzanın kuzey ve güneyinde yer alan dağlık kesimlerde yüzeyleyebilir. Metamorfik kayalar üzerine bindirme ile yerleşmiş Mesozoyik-Alt Tersiyer yaşlı bu alloktan birimler “Likya napları” olarak bilinir (Okay 1989). Menderes metamorfitleri, alttan üste doğru gnays, şist, kuvarsit ve mermerlerle temsil edilir (Şimşek 1982).

### 4.2 Neojen Birimleri

Alüvyal yelpaze, göl ve akarsu ortamlarında depolanmış, graben dolgularından oluşur. İstif önceki çalışmalarda alttan üste doğru Kızılburun, Sazak, Sakızcılar ve Kolonkaya gibi formasyonlara ayrılır (Şekil 4.1) (Şimşek 1982).

Kızılburun Formasyonu, bölgede bulunan kendisinden yaşlı (Şekil 4.2) tüm birimleri aşılabilir uyumsuzlukla örter. Bloklu çakıltı, çakıltı, kumtaşı, kiltası ve siltaşı egemendir. Yer yer killi kireçtaşı ara katkıları içerir. Tabanda bloklu çakıltı, ve konglomeratik kumtaşları ile başlar. Çakıllar çoğunlukla şist, mermer ve kuvarsit çakıllarıdır (Sun 1990). Üst kesimlere doğru tane boyu giderek inceler ve karbonat miktarı artar. Birimin ortalama kalınlığı 150 metre olup, yaşlı Alt Miyosen'dir (Şekil 4.1) (Sun 1990).

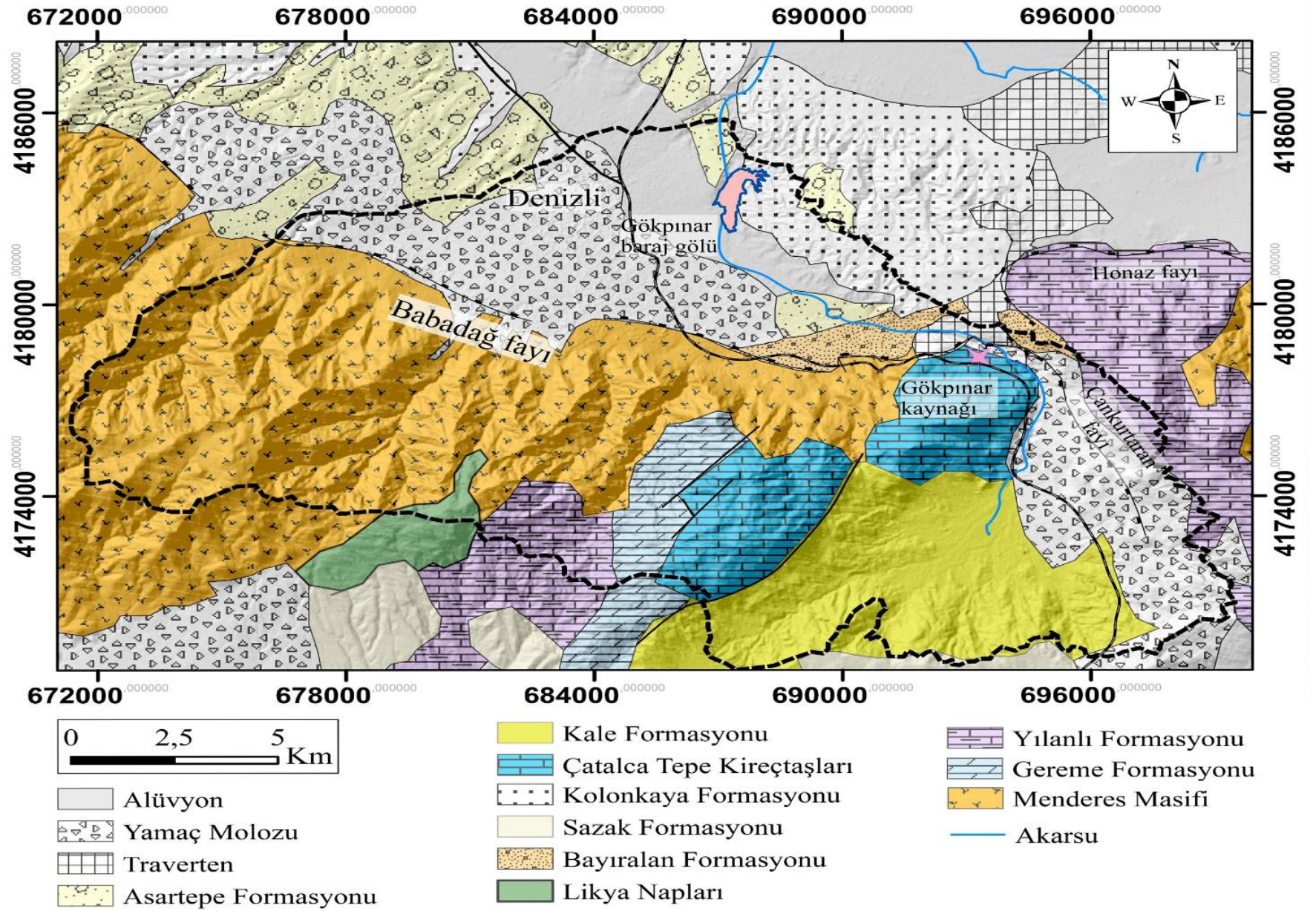
Sazak Formasyonu, Kızılburun Formasyonu üzerine geçişli bir dokanakla gelir. Altta kiltası, siltaşı, killi kireçtaşı, marn ve üstte masif kireçtaşlarından oluşan bir adlama sunar. Birimin kalınlığı 250-300 m dir (Sun 1990). Birim içindeki marnlar ve kireçtaşları gastrapod fosili içerir. Birimin yaşlı, Taner (2001) tarafından yapılan son değerlendirmede, Kolonkaya Formasyonuna Üst Miyosen'dir (Şekil 4.1) (Topal, 2003).

Sakızcılar Formasyonu, alttan Sazak Formasyonu ile sınırlı olup, üstte Kolonkaya Formasyonu ile yanal geçişlidir. Gölsel ara katkılar içeren, yelpaze çökellerinden oluşur (Konak ve diğ 1990). Birim, killi kireçtaşı, marn, kil, silttaşı ve ince kumtaşı ara düzeyleri gibi kaya türleri içerir ve kalınlığı 150-200 metredir. Birimin yaşı Üst Miyosen' dir (Taner 2001).



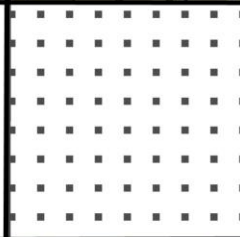
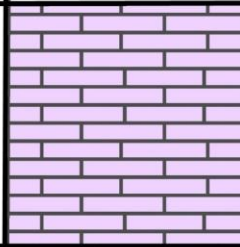
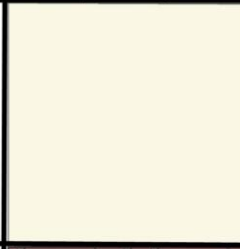


Kolonkaya Formasyonu, Sakızcılar Formasyonu üzerine geçişli bir dokanak ilişkisiyle gelirve üstten Asartepe Formasyonu ile uyumsuz olarak örtülür. Kıltaşı, silttaşı, kireçtaşı ve marn ara düzeyleri içeren egemen kumtaşı istifinden ibarettir (Şimşek 1984). Egemen kaya türün kumtaşlarıdır. Birimin içinde kuvars çakılları bulunur. Tabakalı yapı net olarak izlenebilir. Çakıllar yer yer köşeli, yer yer yuvarlaklaşmış, bazı kesimlerde iyi tutturulmuştur. Çökelme ortamı, düşük enerjili göl ortamını temsil eder. Yaşı Üst Miyosen olarak belirlenmiştir (Şekil 4.1) (Taner 2001).

### **4.3 Kuvaterner Yaşlı Birimler**

Asartepe Formasyonu, konglomera, kumtaşı ve silttaşlarından oluşan alüvyal kökenli çökellerdir (Ercan ve diğ 1977). Orta-kalın tabakalanma gösteren çakıltaşı-kumtaşı-silttaşı-çamurtaşı düzensiz ardalanmasından oluşur. Yer yer kıltaşı ve marn mercekleri de içerir. Konglomeralar polijeniktir ve genellikle yuvarlak, yarı yuvarlak çakıllardan oluşur. Çakıllar çoğunlukla temel kayalara ait ve kuvarsit, kuvars-şist, fillat ve mermer gibi metamorfik kayalardan türemiş olan çakıllarıdır. Konglomeralar kötü boylanmalı olup, çakıl boyutları bazı kesimlerde blok büyüklüğündedir. Kaynak alanından uzaklaştıkça, çakıllar giderek ufalır ve tabaklanma belirgin hale gelmektedir. Birimin kalınlığı 50-150 m arasında değişir. Formasyonu'nun çökel topluluğu, temel topografyası üzerinde akan, alüvyon yelpazesine başlayıp, menderesli akarsu çökelleriyle devam eden bir flüvyal ortamı gösterir. Formasyona Ercan ve diğ (1977) tarafından Pliyo-Kuvaterner yaşı verilmiştir (Şekil 4.1).



Şekil 4.1: Çalışma alanı ve yakın çevresinin geliştirilmiş jeolojik haritası Semiz (2018) kullanarak Arcgis programı yardımıyla çizilmiştir.

SENZOZOYİK	ÜST SİSTEM						LİTOLOJİK ÖZELLİKLER	
	SİSTEM							
	SERİ							
	KAT							
	FORMASYON							
	KLİNLİK (m)							
NEOJEN MIYOSEN ÜST	KUVATERNER							Alüvyon/Traverten Yamaç molozu
		ASARTEPE	50-150					Çakıltaşı, kumtaşı, silttaşı ve çamurtaşı ardalanması
	KOLONKAYA	860-1100					Marn, killi kireçtaşı ve çamurtaşlarıyla ardalanma gösteren kumtaşları	
		SAKIZCILAR	150-200					Killi kireçtaşı, marn, kil, silttaşı ve çok ince kum ara seviyeleri
		SAZAK	250-300					Kilttaşı, silttaşı, killi kireçtaşı, marn, masif kireçtaşı
		KIZILBURUN	150					Bloklu çakıltaşı, çakıltaşı, kumtaşı, kiltai, silttaşı
								Kristalize kireçtaşı, kuvarsit, şist, mermer
	TEMEL							

Şekil 4.2: Denizli ili ve yakın çevresinin genelleştirilmiş stratigrafik kolon kesiti (Şimşek, 1984, Sun, 1990, Konak ve diğ., 1990, Taner 2001 ve Topal, 2003' den yararlanılmıştır).

#### 4.4 Tektonik

İnceleme alanı Güneybatı Anadolu'da Menderes grabeni olarak bilinen doğu-batı uzanımlı büyük çöküntü alanının güneydoğu kesiminde yer alır. Jeolojik anlamda Ege horst-graben sistemi içindedir. Ege horst-graben sistemi, Miyosen sonunda oluşmaya başlayan ve son 5 milyon yıldır açılma türü bir tektonik rejimin denetimi altında gelişimini sürdüren bir yapıya sahiptir. Sistemde çoğunlukla doğu-batı, bazen kuzeybatı-güneydoğu ve kuzeydoğu-güneybatı gidişli eğim ve verev atımlı normal faylar etkindir (Şengör ve Yılmaz, 1983). Denizli; Gediz, Büyük Menderes ve Çürüksu grabenlerinin kesişme noktasındadır. Yöre depremsellik bakımından 1. derece deprem kuşağı içinde yer alır. Bölgede, farklı şekil ve büyüklükte grabenler ve horstlar oluşmuştur. Bölgede, Gediz Irmağı Vadisi, Büyük ve küçük Menderes nehirleri grabenleri; Manisa Dağı, Çaldağ, Dibek Dağı, Bozdağ gibi yükseltiler ise horstları oluşturur. Büyük Menderes ve Gediz grabenlerinin kesiştiği bölgenin doğusunda kalan çöküntü alanına önceki çalışmaların bazılarında Çürüksu grabeni (Şimşek ve diğ., 1978) bazılarında da Denizli havzası (Westaway, 1993; Çakır, 1999) adı verilmiştir. Denizli havzası 50 km uzunluğunda ve 24 km genişliğinde KB-GD uzanımlı bir çöküntü havzasıdır. Havza kuzey ve güneyden normal faylarla sınırlanmıştır. Sınır fayları tek parça olmayıp, farklı uzunluklardaki segmentlerinden oluşur. Kuzeydeki segmentler Pamukkale'den itibaren Hierapolis, Akköy ve Tripolis parçaları olarak adlandırılmıştır (Çakır 1999). Havza, KB-GD gidişli 'Karakova yükselimi' ile 2 alt bölüme ayrılmıştır. Havza içinde Neojen istifinin yükselmesi sonucu ortaya çıkan ve küçük çaplı bir horst olan Karakova yükselimi yer alır. Denizli il merkezi Karakova yükselimi ile güney sınır fayı (Babadağ fayı) arasında yer alır. Babadağ fayı doğuda Bağbaşı'ndan başlayıp, Servergazi, Şirinköy ve Göveçlik üzerinden batıda Babadağ'a kadar uzanır. Fayın güneydeki taban bloğunda Menderes metamorfileri, kuzeydeki tavan bloğu üzerinde ise Neojen ve Kuvaterner birimleri yer alır. Fay, havzanın kuzeyinde olduğu gibi farklı uzunluktaki parçalardan oluşur.

#### 4.5 Hidrojeoloji

Gökpınar Barajı havzası içinde en önemli yüzeysel akış, Büyük Menderes Nehri'nin önemli yan kollarından biri olan Gökpınar Deresi'dir. Gökpınar Deresi,

havzadaki küçük kaynaklardan doğan Okçuiçi Dere, Kocadere ve Akpınar Dere'nin birleşmesiyle oluşur. Gökpınar, Derindere ve Yukarı Santral kaynakları tarafından beslenir. Baraj gölüne ulaşmadan önce mevsimsel yağışlar ile akışa geçen Devrent Deresi, Cevizli Dere ve Kapız Dere sularını da alarak baraj gölüne ulaşır (Şekil 3.1)

İnceleme alanı yeraltı suları ve doğal su kaynakları bakımından oldukça zengindir. Başlıca su kaynakları Gökpınar (845 l/s), Derindere (436 l/s), Bentpınarı (130 l/s), Yukarısantral (38 l/s), Gökçen (30 l/s), Kozlupınar (100 l/s), Mesut (12 l/s), Turgut pınarı'dır (70 l/s). Topoğrafik olarak daha yüksek olan doğudaki Honaz Dağı batı yamaçları boyunca da irili ufaklı birçok kaynak yer alır. Bu kaynakların bir kısmı doğal ve yapay nedenlere bağlı olarak yaz aylarında kurur. Bazıları ise her mevsim akar durumdadır. Bölgedeki çoğunlukla yüksek debili ve her mevsim akar durumda olan bazı kaynakların suları, yerel yönetim ve yöre halkı tarafından içme, sulama ve kullanma suyu temin etmek amacıyla üzerine kaptaj inşa edilerek alınmış, ya da çeşme haline getirilerek ortak kullanıma sunulmuştur. Akışı tamamen bu kaynaklara bağlı olan sürekli akar durumdaki bazı yan derecikler bu işlemlerden sonra tamamen kurumuştur. Cankurtaran Köyü, içme suyunu bu kaynaklardan temin etmektedir. Köyün yerleşim alanı içinde her biri yaklaşık 2,5 l/sn debili 2 adet doğal su kaynağı, kaptajları yapılmış olarak kullanımdadır.

İnceleme alanında köy içinde ve yakın çevresindeki tarla ve bahçelerde yöre halkı tarafından içme ve sulama suyu temin etmek amacıyla açılan birçok kuyu ve sondaj mevcuttur.

Havzanın yüzey drenaj alanı içindeki litolojik birimlerin geçirimsizlik farklılıkları esas alınarak hidrojeolojik ortam koşulları, "geçirimsiz", "yarı geçirimli" ve "geçirimli" olmak üzere üçe ayrılmıştır.

Geçirimsiz birimler: Üst Kretase yaşlı serpantin blokları içeren filiş birimi, Baraj gölünün de üzerinde yer aldığı Marn, çakıltaşı, kumtaşı, kıltaşı ve çamurtaşı, araldanmasından oluşan Pliyosen karasal kırıntılılar birimi, tamamen geçirimsiz özellikte kabul edilebilecek ortamlardır. Bu birimler üstte Kuvaterner birimler tarafından uyumsuz olarak örtülmektedir. Geçirimsiz birimler, Ortaca Dağı'nın batısı ve havzanın kuzeydoğu kesiminde ve Baraj gölü yakın çevresi ve tabanında yayılım gösterirler.

Yarı geçirimli birimler: Havzanın güney kesiminde yaklaşık 45 km<sup>2</sup>'lik bir alanda yüzeyleyen Oligosen yaşlı karasal kırıntılılar, konglomera ile ardalanmalı olarak kumtaşı, silttaşı şeyl ardalanmalı birim geçirimli olmakla birlikte önemsiz akifer özelliğindedir. Havzanın güney kesiminde yaklaşık 45 km<sup>2</sup>'lik bir alanda yüzeyler. Derindere Boğazı ile kuzey ve güney olarak ikiye ayrılan havzanın her iki tarafında da orta kesimlerde toplam olarak yaklaşık 50 km<sup>2</sup> alanda yer alan Kuvaterner yaşlı Alüvyon da yarı geçirimli birimleri oluşturur. Kendi içinde yatay ve düşey doğrultularda geçişli olan düzensiz kil-silt-kum-çakıl içeriklidir. Geçirimli birimlere göre akifer olarak daha az öneme sahiptir. Havzanın orta kesiminde Bağbaşı mahallesi ve yakın çevresinde yaklaşık 11 km<sup>2</sup> alanda yerleşik olan birim Menderes Masifine ait olan Permien gnayslar da yarı geçirimli kaya birimlerdir. Bunlar; Alt Paleozoyik mikaşistler, Permo-karbonifer metakuvarsitler, siyah fillat rekrystalize kireçtaşları, Mesozoyik rekrystalize kireçtaşları, yaşı Alt Eosen'e kadar çıkan rekrystalize pelajik kireçtaşı ve flišten oluşmuştur.

Geçirimli ortamlar: Jura-Kretase pelajik kireçtaşları, Triyas-Jura Dolomitik mermerler, Triyas-Kretase neritik kireçtaşları ve Traverten birimleri geçirimli kaya ortamları oluşturur. Jura-Kretase pelajik kireçtaşları Kalın tabakalı-masif, yer yer laminalı, ince taneli, rekrystalize kireçtaşlarından oluşan, yaklaşık 1500 metre görünür kalınlıkta monoton bir karbonat istifidir. Triyas-Jura Dolomitik mermerler Havzanın batı ve orta kesiminde toplam 13 km<sup>2</sup>'lik alanda yüzeyler. Monoton, masif-kalın tabakalı, genellikle gri, koyu gri dolomitik mermerlerden oluşur. Kalınlığı yaklaşık 500 metredir. Triyas-Kretase neritik kireçtaşları masif-kalın tabakalı, çört yumrulu kireçtaşlarından oluşan ve Jura-Kretase Dolomitler üzerinde yer alan birime Çatalca tepe kireçtaşı adı verilmiştir (Erakman ve diğ 1986). Havza içinde yaklaşık 15 km<sup>2</sup> alana sahip olan formasyonun ismi Ortaca dağındaki Çatalca tepeden gelmektedir. Çatalca tepe kireçtaşının asgarî kalınlığı 750 metredir. Traverten biriminin havza içinde kalan alanı yaklaşık 2 km<sup>2</sup> kadardır. Göpınar Barajı havzasını dik ve derin bir vadi ile ikiye ayıran Derindere boğazının doğu kesiminde alüvyonların altında çakıltaşı ara düzeyli birçok traverten katmanının yer aldığı, çakıltaşı ara düzeyleri ile birbirinden ayrılmış başlıca iki traverten düzeyinin toplam 90 metre kalınlığa erişir.

## 5. MODELLEME ÇALIŞMALARI VE PROTOTİP CİHAZLAR

### 5.1 Modelleme Tankının Oluşturulması

Laboratuvar ortamında modeller oluşturmak için 196 x 65 x 65 cm boyutlarında bir deney tankı geliştirilmiştir. Deney tankı tasarımı ve oluşturulmasında kullanılan malzemelerin, yapılacak olan ölçümlere etkisiz olması gerekmektedir. Çalışmada kullanılacak yöntemler iletken cisimlere hassas olduklarından dolayı deney tankında tahta, cam ve silikon yapıştırıcı kullanılmıştır. Tankın dayanıklılığının sağlanması için bir tahta çerçevesi yapılmıştır, çerçevedeki kullanılan tahtaların birbirine, 8.5 çapında kavela ve silikon yapıştırışı bağlanmaktadır.

Modelleme çalışmalarında basit modellerle başlamak tankın boyutları ayarlanmıştır. Bu doğrultuda tankta aranan özellikler tutarak metal olmayan ve ölçülere etkilemeyecek malzemeler kullanılmıştır. Tankın alt ve arka kısımlarında gaz betonu, aranan ölçülere göre dizilmiştir. Tankta dizilen gaz betonun üzerinde yalıtım malzemesi olan strafor serilmiştir. Buna ilaveten ve izolasyonu tamamen sağlanabilmesi için straforların üzerinde kalın naylon serilmiştir. Tankın kullanılan kısmı 40 cm genişlik, 40 cm yükseklik ve 196 cm uzunluktadır (Şekil 5.1).



Şekil 5.1: Laboratuvar ortamında modelleme çalışmaları için kullanılmış olan deney tankının hazırlanması



## 5.2 Faraday Kafesi Oluşturulması

Faraday kafesi, elektriksel iletken metal ile kaplanmış veya iletkenler ile ađ biçiminde örölmüş içteki hacmi dışardaki elektrik veya elektromanyetik alanlardan koruyan bir muhafazadır. Faraday kafesi, ilk olarak İngiliz fizikçi Michael Faraday tarafından bulunduğu için Faraday kafesi olarak adlandırılan bu kafes sayesinde bu alanların içeri girmesi ve dışarı çıkması engellenmiş olur.

Bu çalışmanın laboratuvar ortamında olacak kısmı elektromanyetik gürültülerinden etkilenmesi minimize etmek için bu yöntemi kullanılacaktır. Çalışma alanın, dış manyetik alanlardan etkilenmemesi ve cihazın ölçtüğu değerler gürültülerden ayrılabilmesi için bu kafese ihtiyaç duyulmuştur. Kafesin oluşturulmasında alüminyum folyo, kalın karton, zımba, alüminyum direkleri ve bant kullanılmıştır. Faraday kafesinin yapımında ilk olarak alüminyum direkleri kullanarak yüksekliği 2m genişliği 3m uzunluğu 4m olan bir kafe oluşturulmuştur. Kafesin duvarlarına ve üst kısmına karton plakaları zımbalayarak kapatılmıştır. Kartonların üstünde, yapışkan bant kullanarak alüminyum folyoyu sabitlemiştir (Şekil 5.2).



Şekil 5.2: Modelleme çalışmalarının sonuçları, dış manyetik alanlardan korunması için hazırlanmış olan faraday kafesinin görüntüsü.

### 5.3 Modelleme Çalışmalarında Kullanılan Kum ve Çakıl Özellikleri

#### 5.3.1 Elek Analizinin Sonuçları

Deney tankında kullanılacak olan 5 tane malzemeden birer numune olarak Elek analizi için hazırlanmıştır. Bu analizde bir elek seti, fırça, terazi ve etüv kullanılmıştır. Su muhtevası belirleyebilmek amacıyla numunelerin etüv'e koymadan önce ve etüvden çıktıktan sonra tartılmıştır. Numuneler 24 saat 105<sup>0</sup>C sıcaklıkta etüvde kurularak ve elek vibro aleti yardımıyla her biri ayrı ayrı elek setinden geçirilip toplam numunenin ağırlığı esas olarak her elekte kalan ve geçen miktarların yüzdesi hesaplanmıştır (Şekil 5.3). Tane dağılımı eğrisi çizildikten sonra  $D_{10}$ ,  $D_{30}$  ve  $D_{60}$  eğriden okunur. Bu değerlere bağlı olarak uniformluk ve süreklilik katsayısı hesaplanmıştır.

$$c_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (5.1)$$

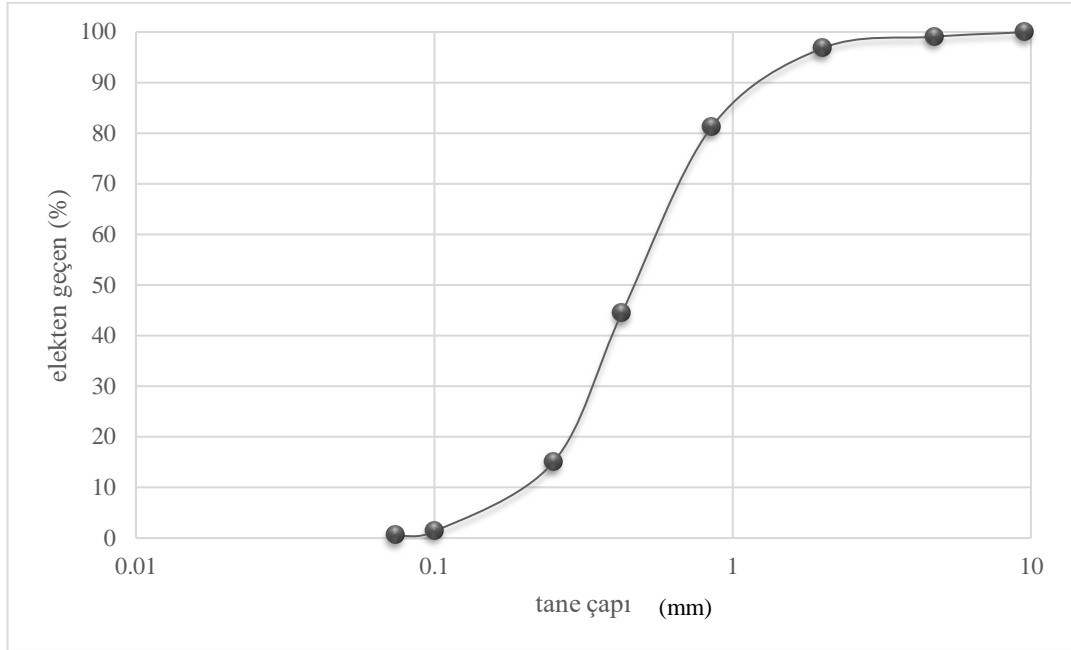
$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}} \quad (5.2)$$



Şekil 5.3: Modelleme çalışmalarında kullanılan numunelerin sınıflandırılması için yapılan ele analizi aşamaları.

➤ **Numune 1 (kum)**

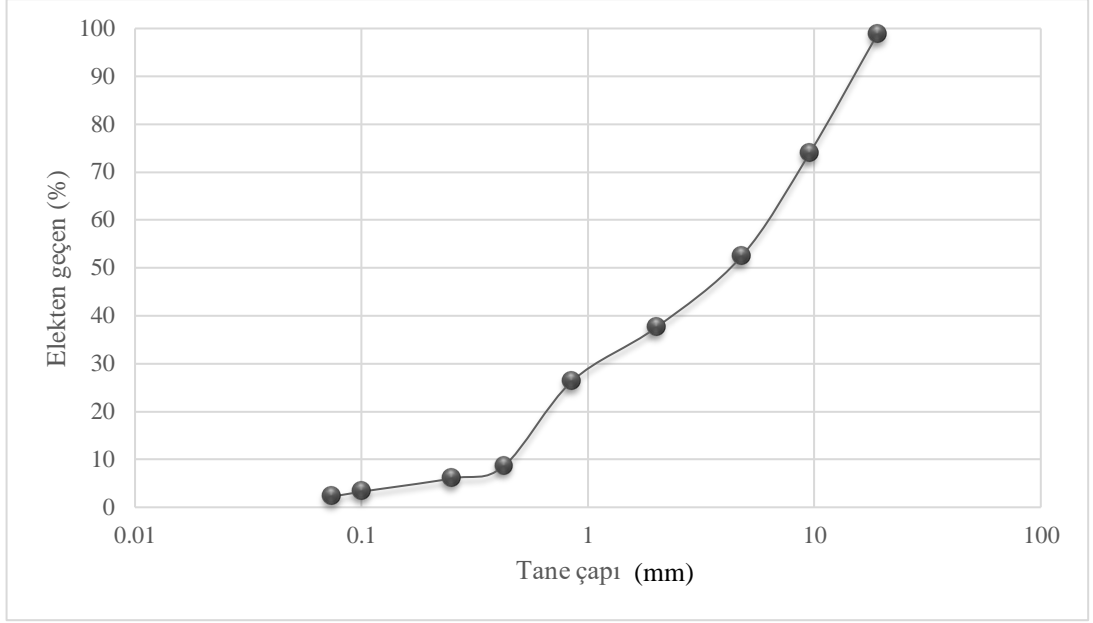
Bu numune için hesaplanan üniformalık ve süreklilik katsayıları "2.75" ve "1.11" bulunmuştur. Bu durumda Türk zemin sınıflama sistemine göre üniform kum olarak değerlendirilmiştir (Şekil 5.4).



Şekil 5.4: Elek analizinden numune 1 için elde edilen tane dağılım eğrisi.

➤ **Numune 2 (Çakıl)**

Bu numune için hesaplanan üniformalık ve süreklilik katsayıları "13.33" ve "0.37" bulunmuştur. Bu durumda Türk zemin sınıflama sistemine göre düzgün tane dağılımlı çakıl olarak değerlendirilmiştir (Şekil 5.5).



Şekil 5.5: Elek analizinden numune 2 için elde edilen tane dağılım eğrisi.

### 5.3.2 Modellemede Kullanılan Numuneler İçin XRF Analizlerinin Sonuçları

XRF analizleri için ayrılan numuneler Jeoloji Bölümü laboratuvarında kurutulup öğütülmüş şekilde (Şekil 5.6), Pamukkale Üniversitesindeki İleri Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezinde (İLTEM), yaptırılmıştır. Kullanılan numunelerin ana oksit içerikleri Tablo (5.1)'de verilmiştir. İz elementleri ise Tablo (5.2)'de verilmiştir.



Şekil 5.6: XRF analizi için numune hazırlanması

**Tablo 5.1:** Numunelerde ana oksit elementlerin yüzdelerik miktarları

Ana oksit element	Birim ağırlığı	1	2	3	4	5
Na <sub>2</sub> O	%	0,815	0,476	3,354	0,544	0,424
MgO	%	1,007	4,092	0,754	0,305	0,219
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	2,073	4,226	10,030	0,220	0,170
SiO <sub>2</sub>	%	27,080	17,330	56,990	1,572	0,413
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	%	0,085	0,088	0,137	0,068	0,079
SO <sub>3</sub>	%	0,086	0,696	0,005	0,015	0,008
K <sub>2</sub> O	%	0,467	0,687	3,751	< 0,0012	< 0,0012
CaO	%	30,020	35,130	4,955	57,780	50,070
TiO <sub>3</sub>	%	0,158	0,268	0,299	0,012	0,008
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	0,039	0,031	0,004	0,001	0,001
MnO	%	0,033	0,058	0,024	0,006	0,003
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	0,988	3,167	1,715	0,090	0,062

**Tablo 5.2:** Modelleme tankında kullanılan numunelerdeki iz elementlerin miktarları

İz elementleri	Numune 1 (ppm)	Numune 2 (ppm)	İz elementleri	Numune 1 (ppm)	Numune 2 (ppm)
Sb	126,7	127,4	Cl	9	< 2,0
Te	195,5	193,3	V	21,7	< 1,0
I	120,5	133,8	Co	30,2	< 3,0
Cs	310,4	337,1	Ni	72,3	22,8
Ba	702	521	Cu	9,1	4,5
La	649	705	Zn	12,8	6,9
Ce	< 2,0	< 2,0	Ga	5	4,1
Pr	13,7	23,9	Ge	< 0,5	< 0,5
Nd	34	22,9	As	5	< 0,5
Er	< 5,1	< 5,1	Se	< 0,5	< 0,5
Yb	< 2,0	< 2,0	Br	1,5	1,2
Hf	1,9	< 1,0	Rb	20,6	2,5
Ta	24	20,3	Sr	265,4	137
W	199,7	10,8	Y	7,5	< 0,5
Hg	1,0	< 1,0	Z	53,2	2,6
Tl	< 1	1,3	Nb	5,5	1,7
Pb	7,2	4,8	Mo	4,6	4,2
Bi	< 1,0	< 1,0	Ag	95,6	95
Th	5,2	3,8	Cd	82,4	87,8
U	< 1,0	< 1,0	Sn	107,4	105,3

### 5.3.3 Kum ve Çakıl Numunelerinin Manyetik Süseptibilite Ölçümleri

Minerallerin Manyetik duyarlılığı, maddenin içinde bulunan mineral ve elementlerin özellikleriyle yakından ilgilidir. Deney tankında kullanılacak olan 5 malzemenin farklı hava koşullarında ve farklı yerlerinden dörder numune alınmıştır; numuneleri Bartington MS2 cihaz için kullanılan plastik özel kaplara yerleştirilerek ölçümleri alınmıştır (Şekil 5.7).



Şekil 5.7: Bartington MS2 manyetik süseptibilite ölçme cihazı

Manyetik süseptibilite ölçümleri tablo (5.3)'te verilmiştir. Numunelerin manyetik süseptibilite değerleri SI sisteminde 0-32 arasında değişmektedir.

Tablo 5.3: Modelleme tankında kullanılan kum ve çakıl için manyetik süseptibilite ölçümleri

Numune Adı	Numune durumu	SI-HF	SI-LF	CGS-HF	CGS-LF
Numune 1.a	(Kurutulup öğütülmüş)	25	21	20	20
Numune 1.b	(Yağmurdan ıslanmış numune)	29	25	24	23
Numune 1.c	(Güneşle kuruyan malzeme yüzeyinden alınmış)	31	32	25	25
Numune 1.d	(Güneşle kuruyan malzeme yüzeyinin 10 cm altından alınmış)	19	20	15	15
Numune 2.a	(Kurutulup öğütülmüş)	0	0	0	0
Numune 2.b	(Yağmurdan ıslanmış numune)	0	0	0	0
Numune 2.c	(Güneşle kuruyan malzeme yüzeyinden alınmış)	0	0	0	0
Numune 2.d	(Güneşle kuruyan malzeme yüzeyinin 10 cm altından alınmış)	0	0	0	0

## 5.4 Elektromanyetik ve Çoklu Elektrod Özdirenç Prototip Cihazları

### 5.4.1 Elektromanyetik Cihazı

Cihazın tasarımında gerekli donanımlar, Pamukkale Üniversitesinin Mekatronik laboratuvarındaki bulunan cihazlardan bir fonksiyon jeneratörü ve osiloskop kullanılmıştır. Kullanılan osiloskop çift kanalıdır ve 100 MHz'e kadar görüntüleme sağlayabilmektedir. Fonksiyon jeneratörü ise 3MHz'e kadar sinyal üretebilmektedir.

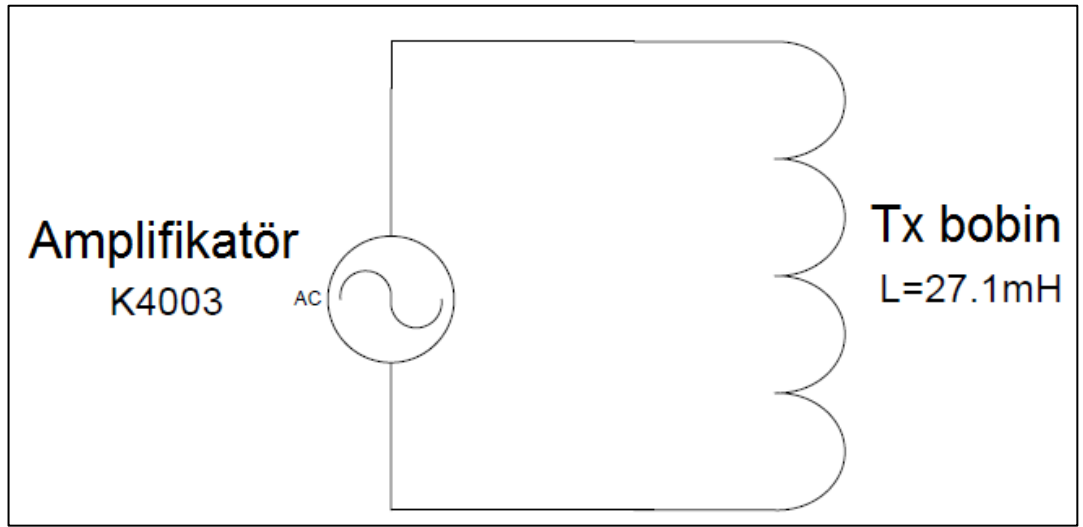
Elektromanyetik cihazının tasarımında Tharian (2017) çalışmalarının ışığında iki bobinli sistem oluşturulmuştur. Elektromanyetik cihazı iki verici ve alıcı kısımdan oluşmaktadır. Verici kısmı tasarımında fonksiyon jeneratörü yardımıyla sinyal üreterek verici bobinini uyarılması sağlanmıştır. Alıcı kısmında indüklenen gerilim farkı osiloskop ve voltmetre yardımlarıyla izlenip ölçülmektedir.

#### 5.4.1.1 Verici Kısım

Cihazda kullanılan bobinlerin özellikleri aynı tutulmuştur, verici bobinin beslenmesinde kullanılacak frekansı bir fonksiyon jeneratörü yardımıyla sağlanmıştır. Ancak bu fonksiyon jeneratörünün ürettiği sinyalin genliği, bobini yeterince uyaramadığından dolayı bir yükselteç devresinin kullanılmasını ihtiyaç duyulmuştur. Verici bobindeki oluşturulacak elektromanyetik alan, bobinden geçecek akıma bağlıdır (Şekil 5.8). Ancak bu akım yüksek tutulduğu takdirde bobinde ısınma riski bulunmaktadır. Bu sebepten dolayı bobinin dayanacağı akım miktarı uygulanmıştır (2A) (Tablo 5.4). Yükselteç olarak, TDA2616 IC ile oluşturulmuş çift kanallı bir güç amplifikatörü kullanılmıştır. Bu amplifikatör 2 x 15Wrms (4ohm) güç üretimine sahiptir. Amplifikatör beslemesi ise şebekeye bağlı 2 x 12V AC 50W trafo ile sağlanmıştır (Tharian 2017).

**Tablo 5.4:** Tellerin kalınlıklarına göre dayanacakları akım değerleri (JESC 2011).

Ebat	KV	S-HKV	EMKER	HB-KX	HB-KEX
0.2 mm <sup>2</sup>	2A	3A	6A	7A	-
0.3 mm <sup>2</sup>	3A	5A	9A	10A	11A
0.5 mm <sup>2</sup>	5A	8A	12A	14A	16A
0.75 mm <sup>2</sup>	7A	11A	17A	19A	20A
1.25 mm <sup>2</sup>	12A	19A	24A	27A	30A
2 mm <sup>2</sup>	-	-	-	37A	39A



**Şekil 5.8:** Verici bobin devresi (Tharian 2017)

#### 5.4.1.2 Çalışma Frekansı

Verici kısım, sadece bir indüksiyon bobininden oluştuğu ve bu bobin güç amplifikatör yardımıyla uyarıldığı için empedans yükü endüktif reaktansı temsil etmektedir (Tharian 2017).

$$X_L = 2\pi fL \quad (5. 3)$$

Burada f uygulanan gerilimin frekansı (Hz), L ise bobinin endüktansdır (Henry).

Güç amplifikatör üreticisine göre maksimum olarak 2 x 10W rms (8ohm) güç kapasitesine sahiptir. Şekil (5. 8)'den anlaşılacağı gibi kullanılan bobinin özelliklerine



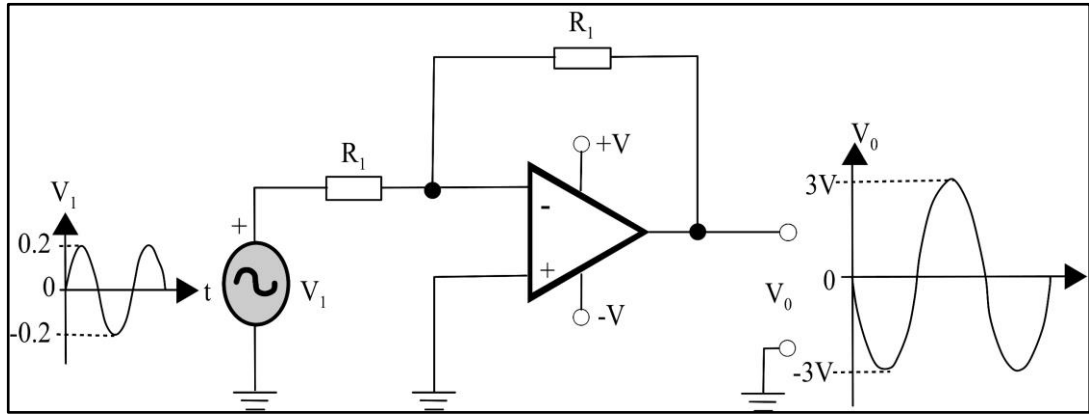
bağlı olarak 27.1 mH empedans değerine sahiptir. Bu değerler yerlerine denklem (5.3)'te konulursa,

$$f = 47\text{Hz}$$

bobinin çalışma frekansı olarak bulunur (Tharian 2017).

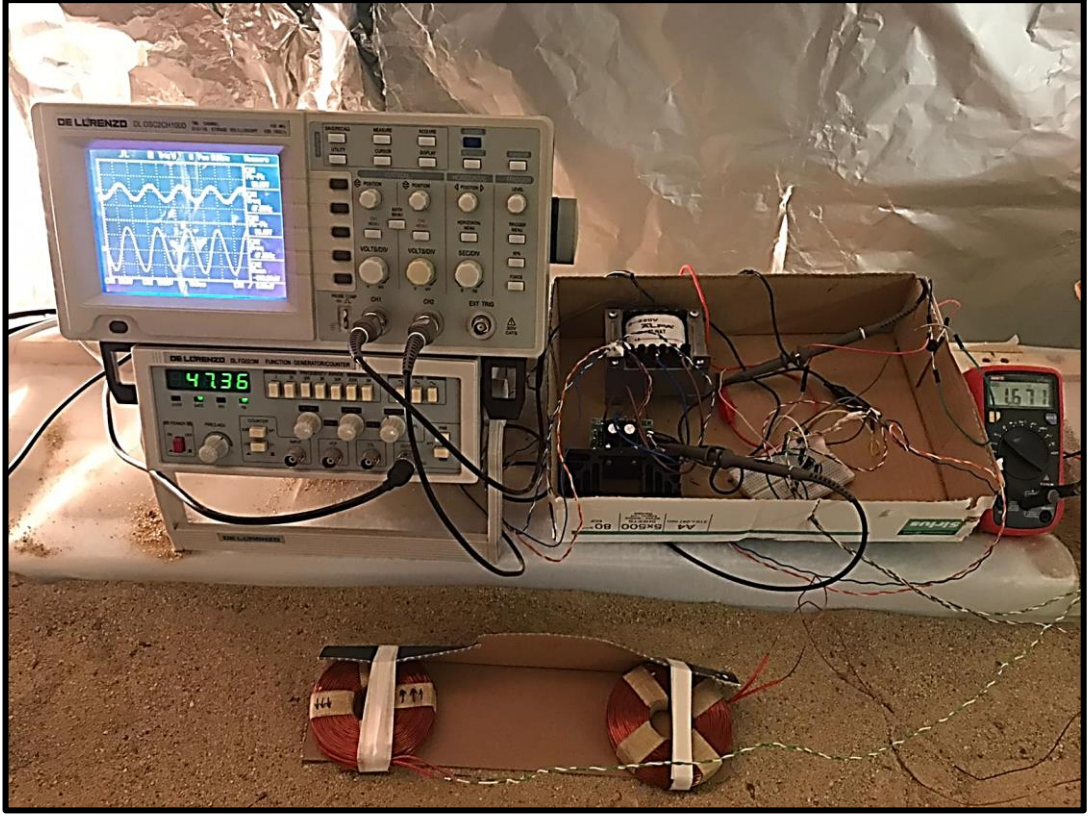
#### 5.4.1.3 Alıcı Kısmı

Bu kısımda, verici bobindeki oluşan birincil elektromanyetik alanın etkisinden dolayı, alıcı bobindeki oluşacak gerilim farkının ölçülmesine temel alınmıştır. Alıcı bobindeki oluşan gerilim farkları çok küçük olmalarından dolayı bir opamp yükselteç devresi kurulmuştur. Bu yükselteç devresinin kurulmasıyla gerilimler ölçülebilir hale getirilmiştir (Şekil 5.9). Opampların en temel uygulamalarından biri yükselteç tasarımıdır. Yükselteçler; girişlerine uygulanan elektriksel işaretleri yükselterek çıkışlarına aktaran sistemlerdir (Tharian 2017).



Şekil 5.9: Opamp yükselteç devresinde AC çalışma prensibi

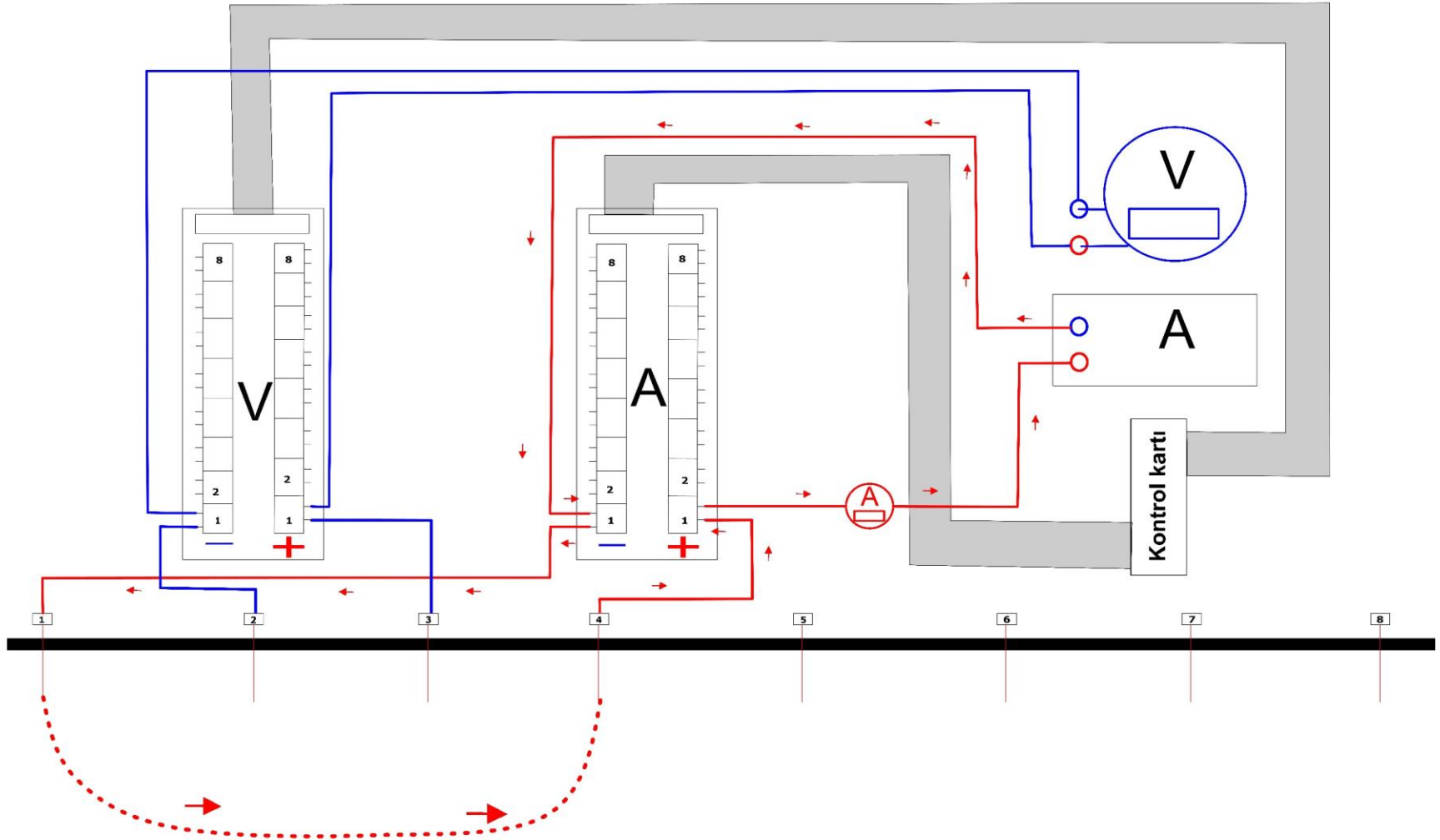
Bahse geçen özellikler dikkate alınarak verici ve alıcı bobinler sarılmıştır. Bu bobinlerin alıcı ve verici devrelerin bağlayarak cihaz prototipinin denemeleri yapılmıştır (Şekil 5. 10).



Şekil 5.10: Elektromanyetik cihazı ve kullanılan aparatların görüntüsü

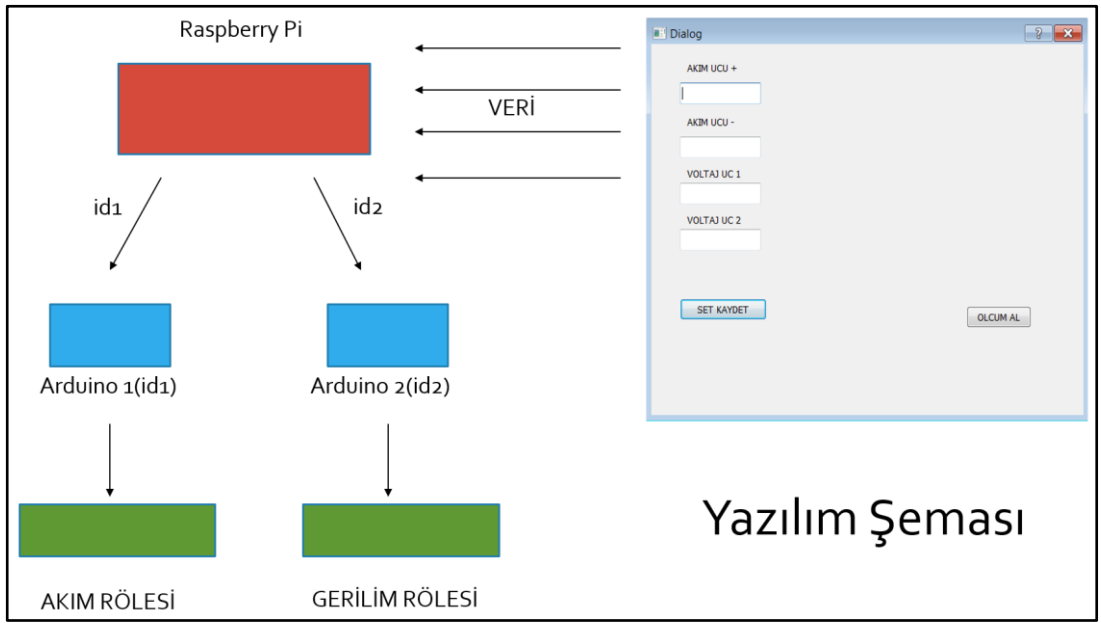
#### 5.4.2 Çoklu Elektrod Özdirenç Cihazı

Elektrod kontrol sisteminin çalışması için kontrol kartına, her elektrod dizilimine göre yazılım kullanılmalıdır. Yazılım bünyesindeki elektrodların ayrı ayrı kontrol edilebilirliği çok büyük bir avantaj sağlamaktadır. Özellikle kuyu içi özdirenç yönteminde elektrodların kombinasyonu uygulayıcısına bağlı olduğu için avantaj göstermektedir. Cihazının kullanımının kolaylığı için kullanıcı dostu bir ara yüz geliştirilmiştir (Şekil 5. 11).



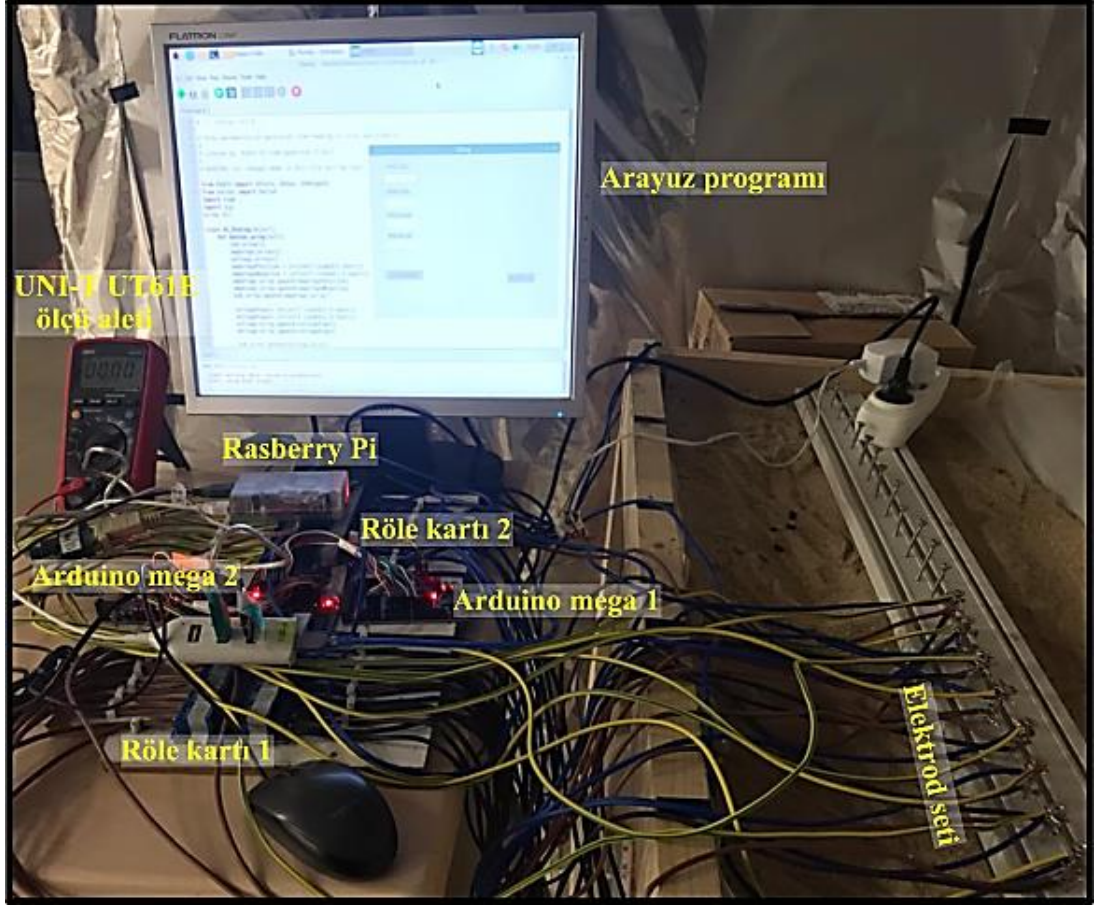
Şekil 5.11: Çoklu elektrod özdirenç cihazının akımın izlediği yol ve kullanılan röle şeması

Şekil (5.11)'deki senaryoyu gerçekleştirilmesi için UNI-T UT61E ölçü aleti temin edilerek akım ve gerilim değerleri kaydedilmelerine çalışılmıştır. Kullanılan ölçü aleti hazır bilgisayar programı olsa da bu programı cihaz özelliklerine desteklememektedir. Bundan dolayı müdahale edilebilecek bir PYTHON kodu hazırlanmasına ihtiyaç duyulmuştur. Böylelikle rölelerin açılma ve kapanma zamanlama düzeneğine bağlı olarak voltaj ve amper değerleri alınabilecektir (Şekil 5.12).



Şekil 5.12: Çoklu elektrod öz direnç cihazının çalışma prensibini ve yazılım akışını gösteren şema

Cihazın röle kartlarını kontrol edebilmek için Arduino ve Raspberry pi kartları yardımıyla ve amacımıza uygun programları yazılmıştır. Şekil (5.13)'de görüldüğü gibi kullanıcı bir arayüz yardımı ile istenen öz direnç dizilimine göre rölelerin sıralaması oluşturularak, Raspberry pi kartındaki gömülü yazılım tarafından alınır ve ilgili arduino kartına aktarılır. Veriler arduino kartlarına ulaştığında ilgili akım veya gerilim rölesi açılır veya kapanır. Ve bu işlem her röle için otomatik bir şekilde istenilen dizilime göre ölçüler alınabilmektedir.



Şekil 5.13: Çoklu elektroz özdidirenç cihazının deneme tezgahında kullanılan aparatlar.

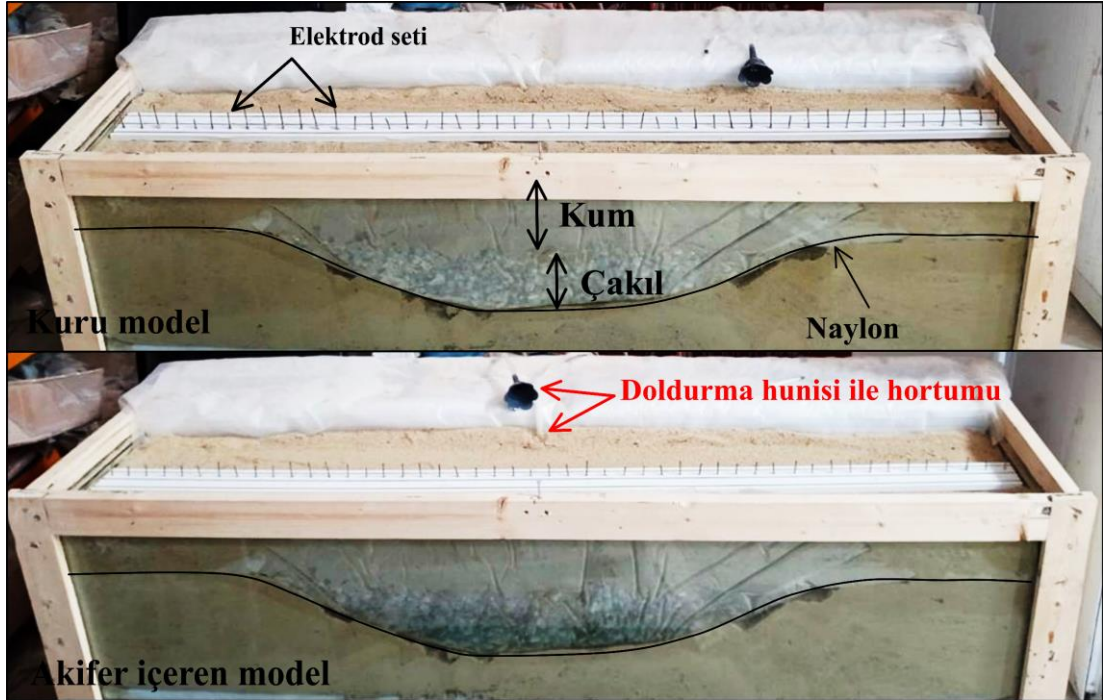
Cihaz denemeleri tank üzerinde iki tane röle kartını kullanılarak 8 tane elektrod kullanılabilir. Bu sayı artırabilmek için arduino ve röle kartlarını artırılması gerekmektedir. Şekil (5. 13)'te görüldüğü gibi arayüz programından veri setleri ayarlanır ve müdahale gerektirmeden cihaz otomatik olarak girilen dizilime göre akım gönderir ve bağlı olduğu hat boyunca gerilimi ölçer. Cihazı tasarlarken karşılaşılan zorluklardan cihaz aynı anda akım ve gerilim ölçmemesidir bu durumu çözmek için paralel bir şekilde gerilim kayıt sistemi oluşturulmasını önerilmektedir.

## 5.5 Modelleme Çalışmaları

### 5.5.1 Akifer Modelleri

Çalışmaların bu kısmında yapay bir akifer modelinin çoklu elektrod özdidirenç ve yer radarı (GPR) yöntemlerine oluşturduğu tepki araştırılmıştır. Modelin

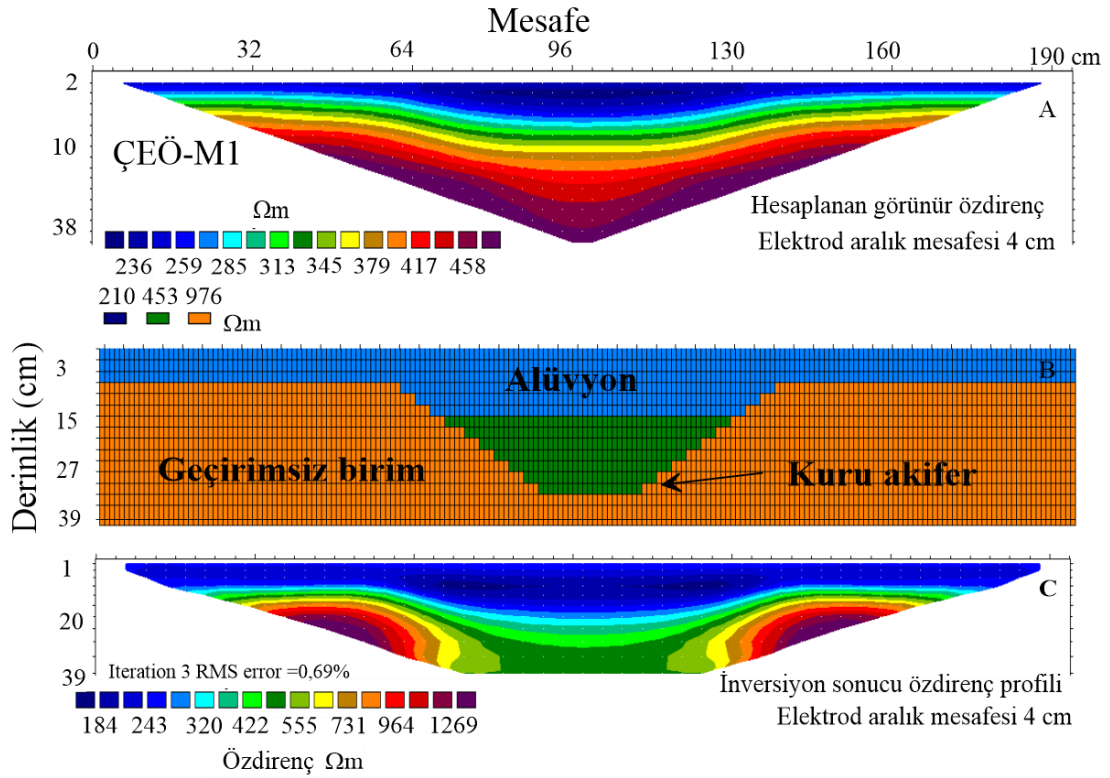
oluşturulmasının ilk aşamasında akifere senklinal şekli vermek için model tankında eğimli bir kum tabakası oluşturulmuştur, geçirimsiz temel kaya ise kumun yüzeyi ve tankın etrafları örtecek şekilde bir naylon serilmiştir. İkinci aşamada ise akifer niteliği temsil edecek bir çakıl tabakası konularak üstüne daha az geçirimliliği olan bir kum tabakası eklenmiştir (Şekil 5.14). Oluşturulmuş olan akifer modelinin bakır sülfat çözeltisi ile doldurmak amacıyla, akiferin tabanında bir hortum yerleştirilmiştir. Hortumun başında bir huni bağlayarak akiferin doldurulmasının kolaylığı sağlanmıştır. Solüsyon ise 10 litre çeşme suyuna yarım kilo bakır sülfat ilave edilerek hazırlanmıştır. Veri toplanması iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Birinci akiferi doldurmadan önce ikincisi ise doldurulduktan sonra yapılmıştır.



Şekil 5.14: Laboratuvar ortamında oluşturulan akifer modellerin görüntüsü.

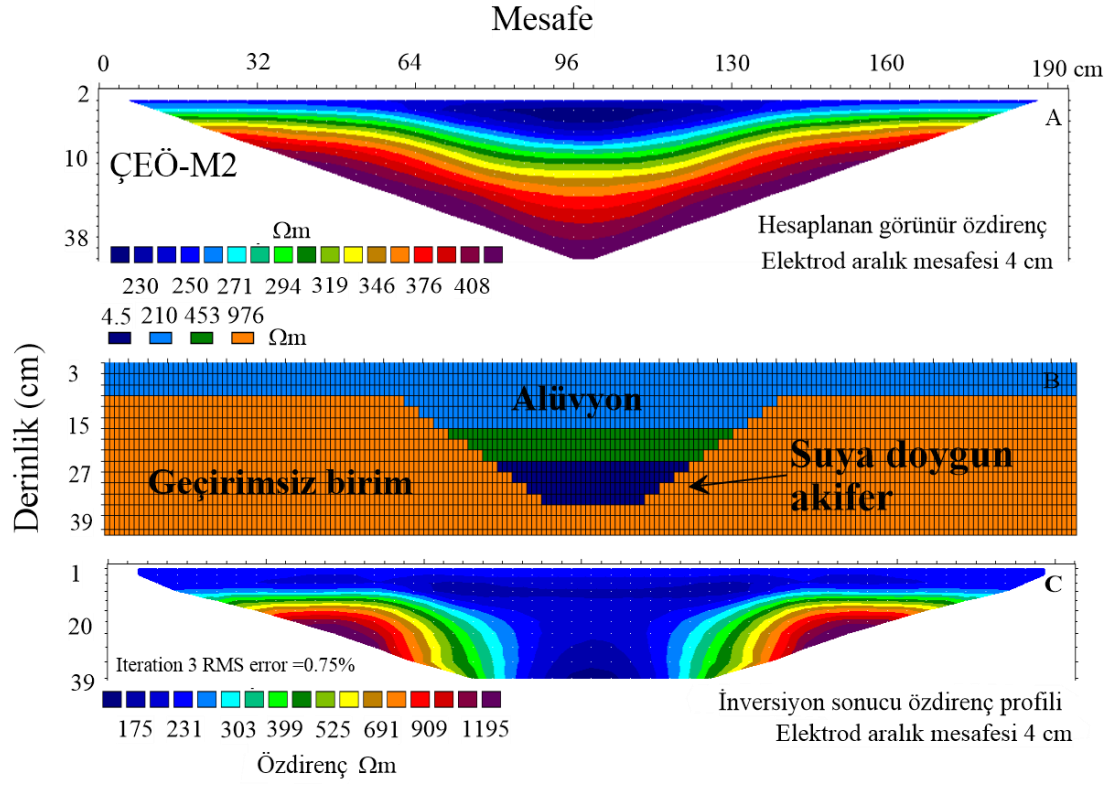
Deneysel modelleme çalışmalarından önce oluşturulacak modelin öz direnç yöntemine muhtemel tepkisinin hakkında ön fikir sahibi olmak için sayısal modelleme RES2DMOD programı yardımıyla yapılmıştır. Kuru akifer için alüvyon  $210 \Omega\text{m}$ , kuru akifer birimi  $453 \Omega\text{m}$  ve geçirimsiz anakaya ise  $976 \Omega\text{m}$  olacak şekilde bir model oluşturulmuştur. Oluşturulan bu modellemeden elde edilen görünür öz direnç değerleri ters çözüm işlemine RES2DINV programı kullanılarak tabii tutulmuştur. Kuru model (ÇEÖ-M1) için yapılan sayısal modellemenin sonucuna bakıldığında akiferin tabanı

olan ana kayadan itibaren yüzeye doğru öz direncin yükseldiğini görülmektedir (Şekil 5.15).



**Şekil 5.15:** Kuru akifer için sayısal modellemede oluşturulan model ve elde edilen görünür öz direnç ve ters çözümleri.

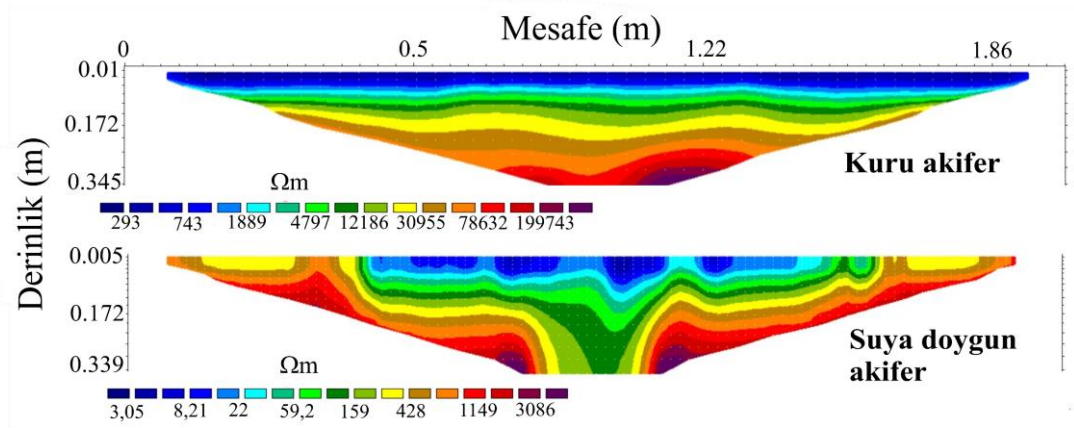
Suya doymun akifer modelinde ise alüvyon akiferin gözenekliliği dolduracak şekilde bakır sülfat temsil edecek 4,5  $\Omega m$  hücreleri eklenmiştir. Çözeltiye doymun model ise (ÇEÖ-M2) profilin orta kısmında düşük öz direnç gözlenmiştir. Buna bağlı olarak öz direnç yönteminin laboratuvar ortamında oluşturulmuş modele uygulanmasından elde edilecek tepkilerin sayısal modelleme sonuçları ile benzer olması beklenmektedir (Şekil 5.16).



**Şekil 5.16:** Doymun akifer için sayısal modellemede oluşturulan model ve elde edilen görünür özdirenç ve ters çözümleri.

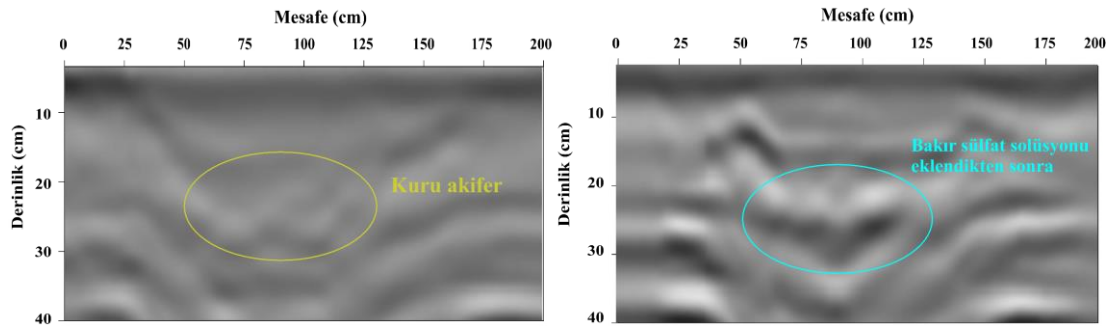
Kuru akifer özdirenç ölçümleri, en üstte konulan kum tabakasının temelde olan naylon yatağı ve üstündeki geçirimli çakıl taşlarına kıyaslayarak düşük değerler göstermiştir. Özdirenç profillerine bakıldığında, derinlere doğru gidildikçe özdirenç değerleri yükseldiği görülmektedir. Doymun akifer özdirenç ölçümlerinde ise belirgin bir anomali yansımıştır. Akifere enjekte edilen bakır sülfat solüsyonu, profilin orta kısmındaki görülen özdirenç düşüşüne neden olmuştur (Şekil 5.17). Doymun akiferin özdirenç profilindeki özdirenç üst sınırı kuru akiferin profiline kıyaslandığında önemle bir azalma olduğu görülmektedir. Çoklu elektrod özdirenç deneysel sonuçları, sayısal modelleme sonuçlarıyla uyum göstererek yöntemin bu tür araştırmalarda etkili olduğunu kanıtlamıştır.





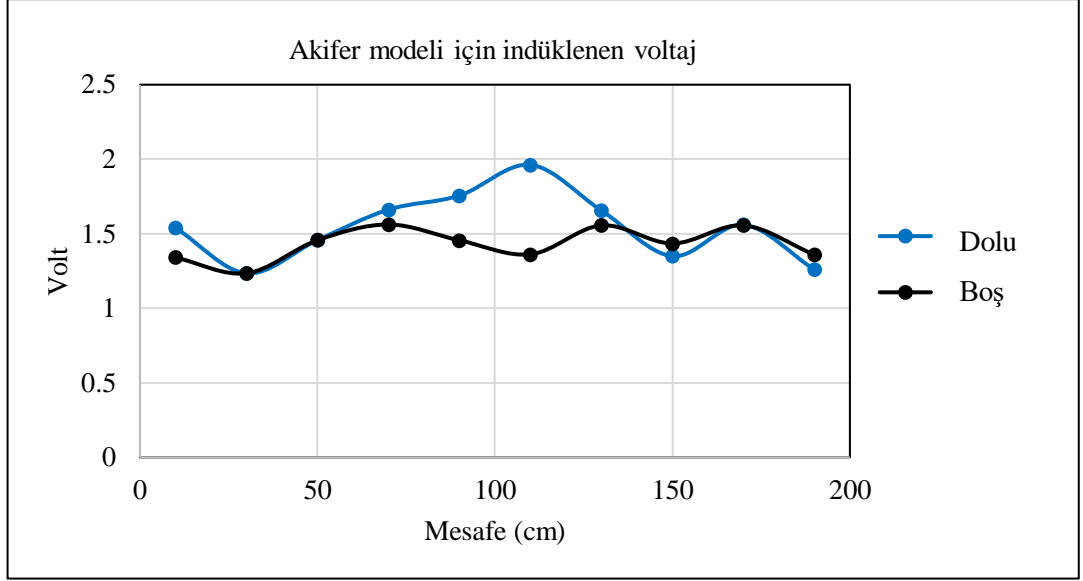
Şekil 5.17: Tankta oluşturulan akifer modelinin öz direnç profilleri.

GPR ölçümleri 400 MHz'lik bir anten yardımıyla veri toplanmıştır. Elde edilen profiller veri işleme tabi tutularak değerlendirilmiştir. Çoklu elektrod öz direnç yönteminde olduğu gibi GPR yönteminde de akifer bakır sülfat solüsyonu eklemeyen ve ekledikten sonra veri toplanmıştır. Kuru akifer için oluşturulan GPR profilinde modelin yapısal formunu açık bir şekilde görülebilmektedir. Solüsyon eklenmesiyle modelde oluşan yüksek dielektrik farklılığı GPR profilinde güçlü yansıma görülmüştür (Şekil 5.18).



Şekil 5.18: Kuru ve bakır sülfat solüsyonu ile doldurulmuş Akiferlerin GPR görüntüleri

İndüklenen voltaj eğrisine bakıldığında, akifer modeli yansıyan bir anomali görülmektedir. Anomalinin pik değeri her iki bobinin akiferin ortasına geldiğinde oluştuğunu görülmüştür. Prototipi oluşturulan elektromanyetik cihazın verimliliği artırılması önerilmektedir. Bunun için alıcı kısmındaki yükselteç devrelerinin değerleri değiştirilerek kazancının artırılması düşünülebilir (Şekil 5.19).

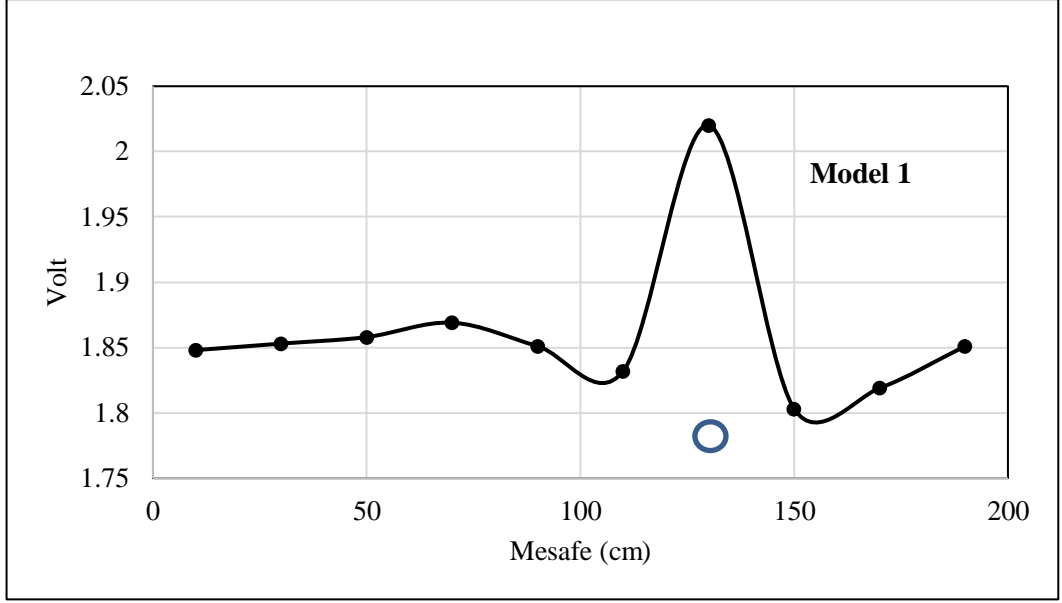


Şekil 5.19: Akifer modeli için elde edilen voltaj eğrileri.

Çalışmanın bu kısmında, laboratuvar ortamındaki uygulanmış olan modellemelerin sonuçları uyum göstermiştir. Özdirenç yöntemi için yapılan sayısal modelleme işleminin deneysel sonuçların teyit etmenin konusunda çok büyük önem taşımaktadır. Özdirenç ve GPR profillerinde anomalilerin yapay akiferin ihtiva ettiği sulardan doğrudan etkilendiğini görülmüştür. Elektromanyetik yöntemi kullanılarak indüklenen voltaj değerlerin değerlendirilmesiyle yeraltındaki elektriksel özelliklerin tahmini yapılmıştır.

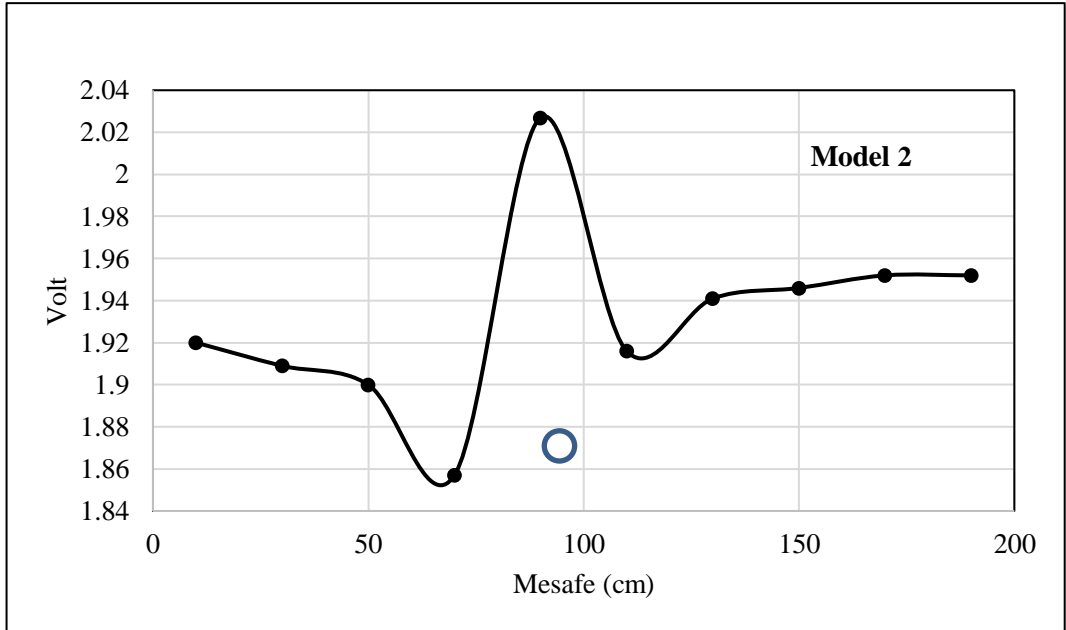
### 5.5.2 Gömülü Boru Modelleri

Çalışmanın bu kısmında modeller üzerinde elektromanyetik cihaz denemeleri yapılmıştır. Elektromanyetik yöntemde farklı dizilimler kullanılmaktadır. Bu dizilimlerden yatay dipol dizilimi uygulanmıştır. Farklı malzemeler kullanılarak tank modelin üzerinde profiller alınmıştır. Model 1'de bobinlerin ara mesafesi ve ölçü aralığı 20 cm olarak tutulmuştur. Model oluşturmak için 8.5cm çapında bir demir boru, tankın içinde 5cm derinlikte gömülmüştür. Model 1'de şekilde görüldüğü gibi, gömülen boru tankın 140 cm'sinde konumlandırılmıştır (Şekil 5.20).



Şekil 5.20: Model 1 için indüklenen voltaj eğrisi.

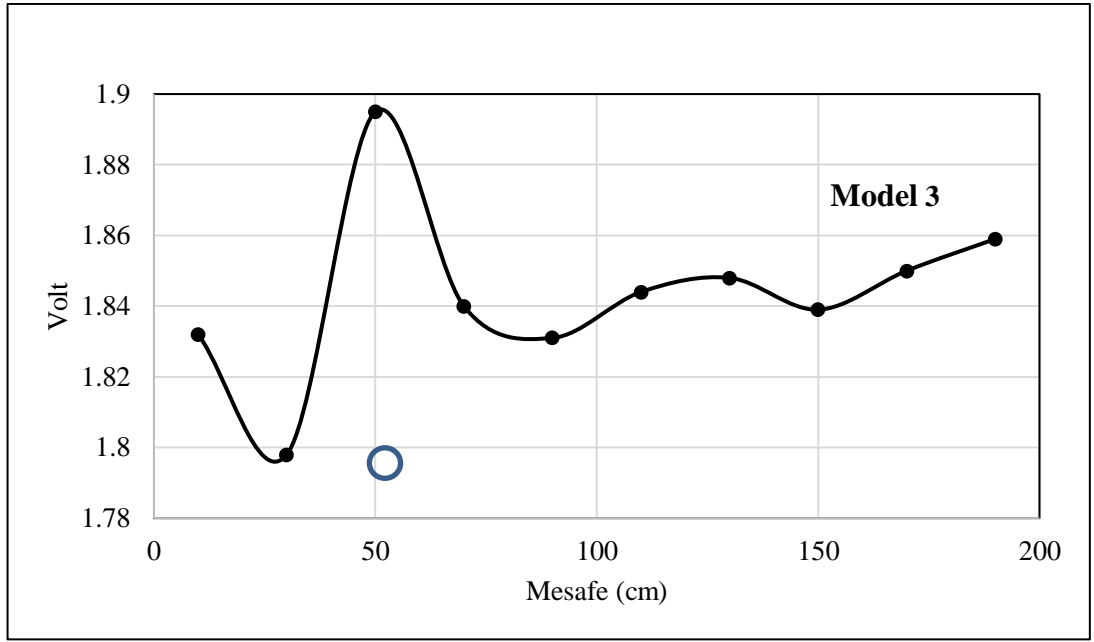
Model 2’de boru tankın ortasında ve aynı derinlikte gömülerek ölçüler tekrar alınmıştır. Ölçüler sırasında verici bobin hedefe yakın olduğu zaman alınan değerlerin arttığı gözlenmiştir (Şekil 5.21).



Şekil 5.21: Model 2 için indüklenen voltaj eğrisi.

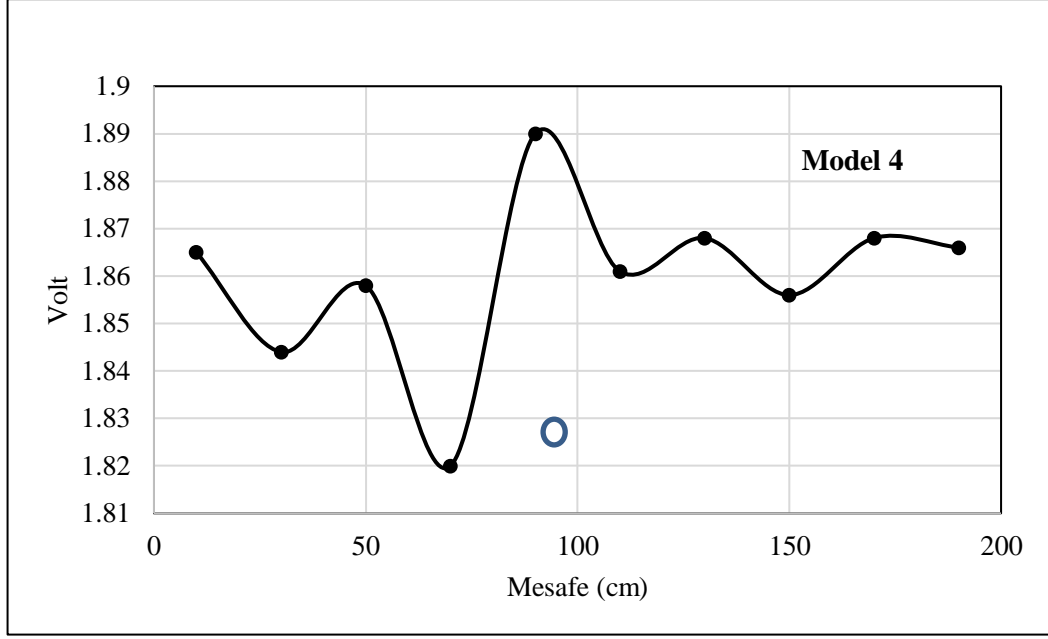
Model 3’te, boru tankın 50 cm’sinde gömülerek ölçüler tekrar alınmıştır. Bu modelde voltaj değerleri 1.8 ile 1.9 volt arasında değişmektedir. Diğer profillerde de

görüldüğü gibi alıcı bobin hedefe yaklaşırken indüklenen voltaj azalır. Verici bobin hedefe daha yakın olduğunda voltaj değerleri yükselir (Şekil 5.22).



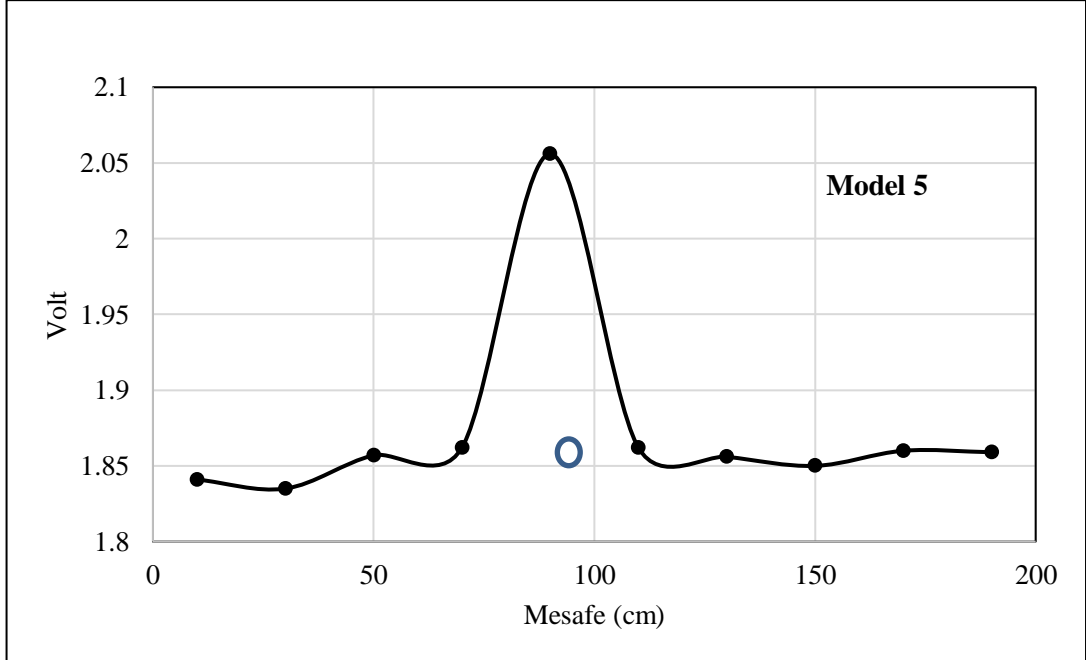
Şekil 5.22: Model 3 için indüklenen voltaj eğrisi.

Model 4 ve model 5'te 40 cm uzunlukta ve 6cm çapında 1 metal boru kullanılmıştır. Bu modellerdeki özellikler sabit tutarak iki farklı bobin dizilimi kullanılarak ölçüler alınmıştır. Model 4'te bobinlerin eksenleri borunun eksenine dikey olacak şekilde, kaydırarak ölçüler alınmıştır. Tüm profillerde olduğu gibi bobinlerin konumları hedefin konumuna bağlı olarak indüklenen voltaj değerleri değişmektedir (Şekil 5.23).



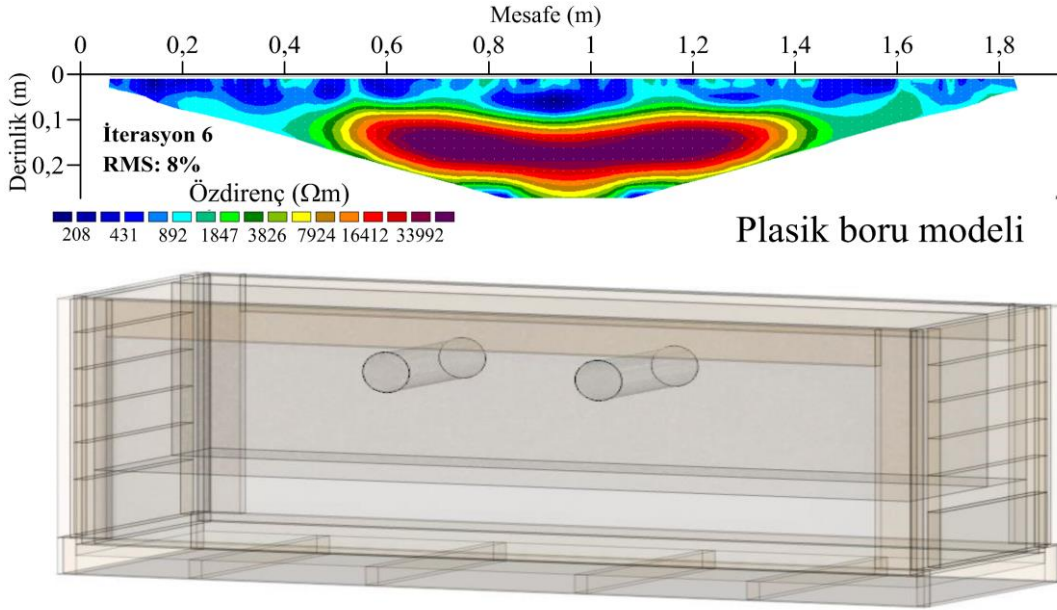
Şekil 5.23: Model 4 için indüklenen voltaj eğrisi.

Model 5'te bobinlerin eksenleri borunun eksenine paralel olacak şekilde, tankın boyunca kaydırarak ölçüler alınmıştır. Elde edilen profil, bobin dizilimi aranan nesnenin uzunumu, belirlenebildiğini görülmüştür (Şekil 5.24).



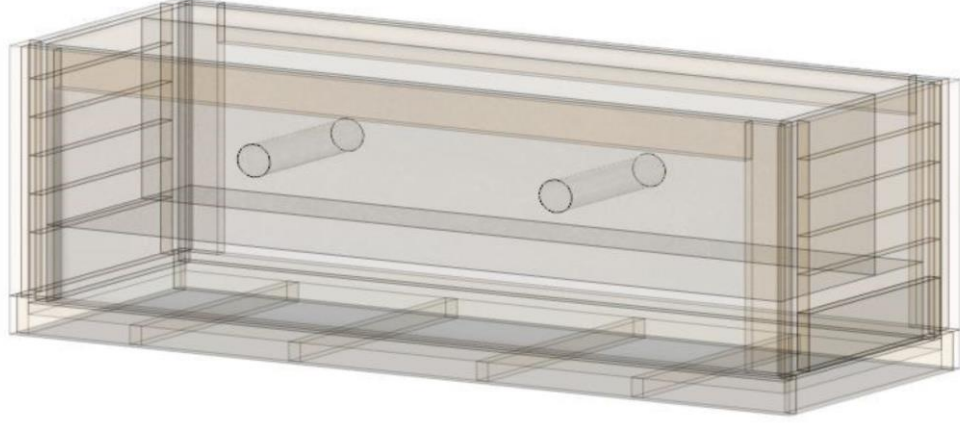
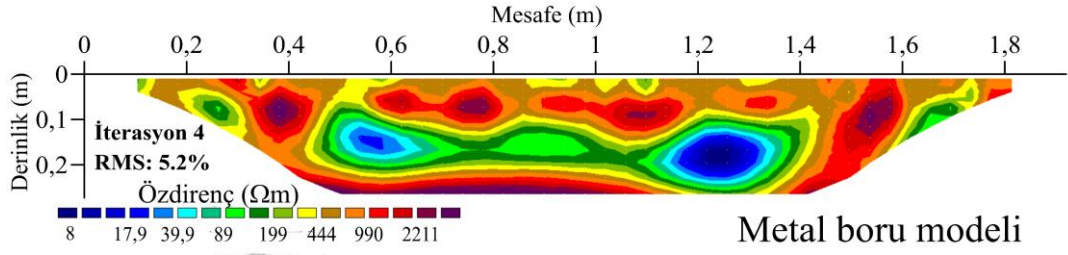
Şekil 5.24: Model 5 için indüklenen voltaj eğrisi.

Çoklu elektrod özdirenç denemelerinde 8,5 cm çapı olan metal ve 11 cm çapı olan plastik boruları kullanılmıştır. Böylelikle iletken ve yalıtkan maddelerin özdirenç değerlerine etkisi gözlenmiştir. İlk modelde iki plastik boru belirgin yüksek dirençli bir bölge ile temsil edilmiştir (Şekil 5.25). Görülen anomalinin boruların yerlerini yansıtmıştır ancak borular şekli ve çapları anlaşılması güçtür. Bunun sebebi de boruların arasındaki mesafe elektrod ara mesafelerine kıyaslayarak bir açıklama düşünülebilir.



**Şekil 5.25:** Çoklu elektrod özdirenç için plastik boru modeli.

Bu modelde metal boruları, plastik olanlara göre daha derin gömülerek ölçüm alınmıştır. Boruların ara mesafesi de artırılmıştır. Bu modelde özdirenç değerlerinin genel olarak önemli bir düşüş gözlenmiştir. (8-2211  $\Omega\text{m}$ ). Özdirenç profili, gömülü metal boruları yansıtan iki farklı minimum anomali değeri göstermiştir. Borular arasındaki artırılan mesafe, elde edilen anomaliler, boruların yuvarlak şekillerini daha anlaşılır hale getirmiştir (Şekil 5.26).



Şekil 5.26: Çoklu elektrod özdirenc için metal boru modeli.

## 6. ARAZİ ÇALIŞMALARI

Arazi uygulamaları tamamı Gökpınar Barajı havzası içinde kalan Gökpınar kaynağı, Gökpınar baraj gölü ve Denizli şehir merkezi olmak üzere üç lokasyonda gerçekleştirilmiştir. Her bir lokasyonda gerçekleştirilen arazi çalışmalarında, amaçlanan hedef doğrultusunda farklı jeofizik yöntemler kullanılmıştır. Bu bölümdeki yer bulduru haritaları Arcgis programı yardımıyla oluşturulmuştur.

### 6.1 Gökpınar Kaynağı ve Çevresi

Gökpınar Kaynağı, Denizli şehir merkezinin su ihtiyacının üçte birinden fazlasını karşılayan ilin en önemli içme suyu kaynağıdır. Gökpınar kaynağı ve çevresinde yeraltı suyu ile ilgili araştırmalar ve edinilen hidrojeolojik bilgiler, hemen hemen tamamen arazi çalışmalarında uygulanan farklı jeofizik yöntemlerin yorumu ve korelasyonuna dayanmaktadır. Bu çalışmalarla, yeraltı suyunun konumu belirlenmeye çalışılmış, yanal ve düşey dağılımı ortaya konulmuştur. Bu amaçla Çoklu Elektrot Özdirenç (ÇEÖ), yer radarı (GPR) ve frekans ortamı elektromanyetik (FEM) yöntemleri kullanılmıştır. Gökpınar kaynağının da üzerinde yer aldığı yamaç molozu, yamaç yelpazesi ve birikinti konisi gibi oluşuklar, çevredeki sarp yamaçlardan taşınan malzemelerden ibarettir. Ortamın hidrojeolojik özellikleri, tane boyu dağılımı son derece düzensiz olan bu malzemelerin yerel permeabilite farklılıklarına bağlı olarak değişir. Jeofizik arazi çalışmalarının yorumları göstermiştir ki, kaynak çevresindeki yeraltı sularının varlığı ve hareketi, litolojik birimlerin birincil gözenekliliklerinden çok, bölgedeki yoğun tektonizmanın ürünü olan fay ve çatlak gibi süreksizliklerin konumları tarafından denetlenmektedir. Kaynağın yakın çevresindeki öngörülen beslenme yönü de gömülü fayların konumlarına bağlıdır.

Gökpınar kaynağı üzerinden geçen doğu-batı doğrultulu eğim atımlı normal fay, bu kaynağı oluşturan ana faydır. Bu fay, akifer özellikteki Jura-Kretase yaşlı Çatalcatepe Kireçtaşları ile stratigrafik olarak daha üstteki karasal kırıntılı birimleri karşı karşıya getirmiştir. Güneydeki yükselen blokta, geçirimsiz birimlerin aşınması sonucu alttaki Çatalcatepe Kireçtaşları, yağışlardan doğrudan beslenme özelliği kazanmıştır. Geçirimsiz birimler ise bu kireçtaşlarından kuzeye doğru olan yeraltı suyu akışına karşı bariyer haline gelmiştir. Bu tektonik yapılanma ile yer yer basınçlı akifer



özelliği kazanan kireçtaşları, özellikle ana fay yoluyla yeryüzünde kaynakları oluşturmuştur.

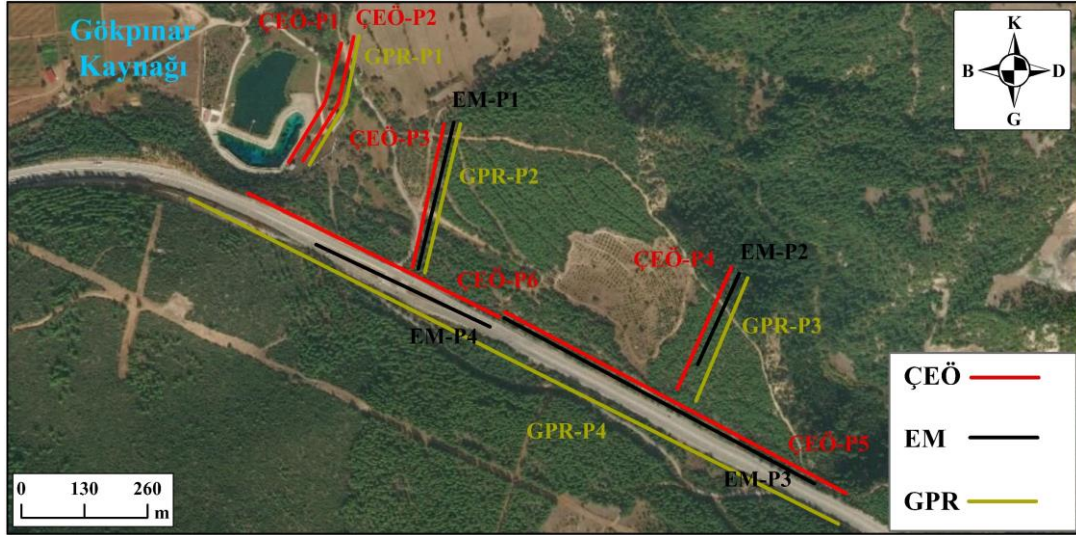
### 6.1.1 Veri Toplama

Bu çalışma, Gökpinar kaynağı çevresindeki yeraltı suyu akış yönleri belirlemek için kombine jeofizik yöntemlerin yorumlanmasına dayanır. Gökpinar Kaynağının çevresinde kullanılan yöntemlerden ilk olarak çoklu elektrot özdirenç yöntemi uygulanmıştır. Çoklu elektrod özdirenç yönteminin uygulanmasında dört kısa profil (235 m) ve iki uzun profil (470 m) boyunca görünür özdirenç verileri ABEM SAS-4000 cihazı kullanarak toplanmıştır. Çalışma alanı kapsayacak şekilde toplamda 1890 m'den oluşan jeoelektrik profiller ağı oluşturulmuştur. Wenner-Shlumberger diziliminde 48 elektrot kullanılmış, elektrot aralığı kısa profiller için 5 m, uzun profiller için 10 m olarak seçilmiştir. Topoğrafya verileri için Spectra SP80 GPS kullanılmıştır.

Elektromanyetik uygulanmasında EM34-3 cihazı Kullanılmıştır. Bu cihaz iki verici-alıcı ünite ve bobinlerden oluşur. Çalışma frekansı bobinler arasındaki mesafelere bağlı olarak; 10 m için 6.4 kHz, 20 m için ise 1.6 kHz seçilir. Elektromanyetik yöntemde oluşturulan dört profil boyunca Dikey Dipol (VD: Vertical Dipole mode) dizilimi kullanarak ve bobinleri eşit bir şekilde beşer metre aralıklarla kaydırarak ölçümler alınmıştır. Bobinlerin yatay tutulduğu bu dizilim, bobinler arası mesafenin yaklaşık 1.5 katını araştırma derinliğine sahiptir (McNeill 1980). Çalışma alanımızın bir Kısımını koruma alanı olduğundan dolayı metal tellerle çevriliydi, bu nedenle bazı kısımlarında, metal tellerin verilere olumsuz ve yanılığlı etkiler oluşturduğu için elektromanyetik profiller alınamamıştır (şekil 6.1). Çalışma alanının bir kısmı yerel yönetim tarafından metal tel çitler ile çevrilerek koruma altına alınmıştır. Metal tellerin yanılığıcı verilere sebep olacağı gerekçesi ile koruma altına alınan alanda elektromanyetik profiller alınamamıştır (şekil 6.1).

GPR ölçümleri, GSSI SIR-3000 cihazı yansıma moduna ayarlanarak ve 400 MHz anteni kullanılarak alınmıştır. Ölçümlere başlamadan önce GPR cihazı, 50 ns zaman penceresi, metrede 50 iz ve iz başına 512 örnek olacak şekilde ayarlanmıştır. Cihazın mesafe kalibrasyonu yapıldıktan sonra ölçümlerin mesafe ortamında

kaydedilmesi için ayarlar düzenlenmiştir. Böylelikle oluşturulan radargramların x eksenlerinde zaman yerine mesafe olmuştur. Çalışma alanında yaygın olarak bulunan kireçtaşlarına bağlı olarak, elektromanyetik dalgaların seyahat hızının tahmini için dielektrik geçirgenliği 8 olarak seçilmiştir (Geophysical Survey Systems Inc, 2017). Şekil (6.1)'de görüldüğü gibi GPR yönteminde farklı uzunluklarda 4 profil boyunca ölçümler alınmıştır.



Şekil 6.1: Gökpinar Kaynağı çevresinde alınan jeofizik ölçümleri

### 6.1.2 Kullanılan Yöntemlere Göre Veri İşlem

Yeraltı görünür iletkenlik profilleri, elektromanyetik yöntem uygulaması ile elde edilen veriler kullanılarak Surfer programında çizilmiştir.

Arazide ölçülen görünür özdirenç verileri RES2DINV programı yardımıyla işlenmiştir. Bu program doğrusal olmayan problemlerde çözüm sağlar. Arazide ölçülen değerlerin ve en küçük kareler ters çözüm yönteminin uygulanmasından elde edilen sonuçlarla oluşabilen uyumsuzlukları en aza indirmek için bir optimizasyon işlemi gerçekleştirilir (De Groot-Hedlin ve Constable 1990). Toplanan veriler RES2DINV programının formatına dönüştürülür ve topoğrafya verileri ekleyerek ters çözüm işlemine hazır hale getirilir. Görünür özdirenç verileri programa aktarıldıktan sonra, veri işleminin aşamalarından ilk sırada uygulanması gereken filtreleme işlemi uygulanır. Bu aşamada verilerdeki uyumsuzluk gösteren değerler teker teker seçilerek

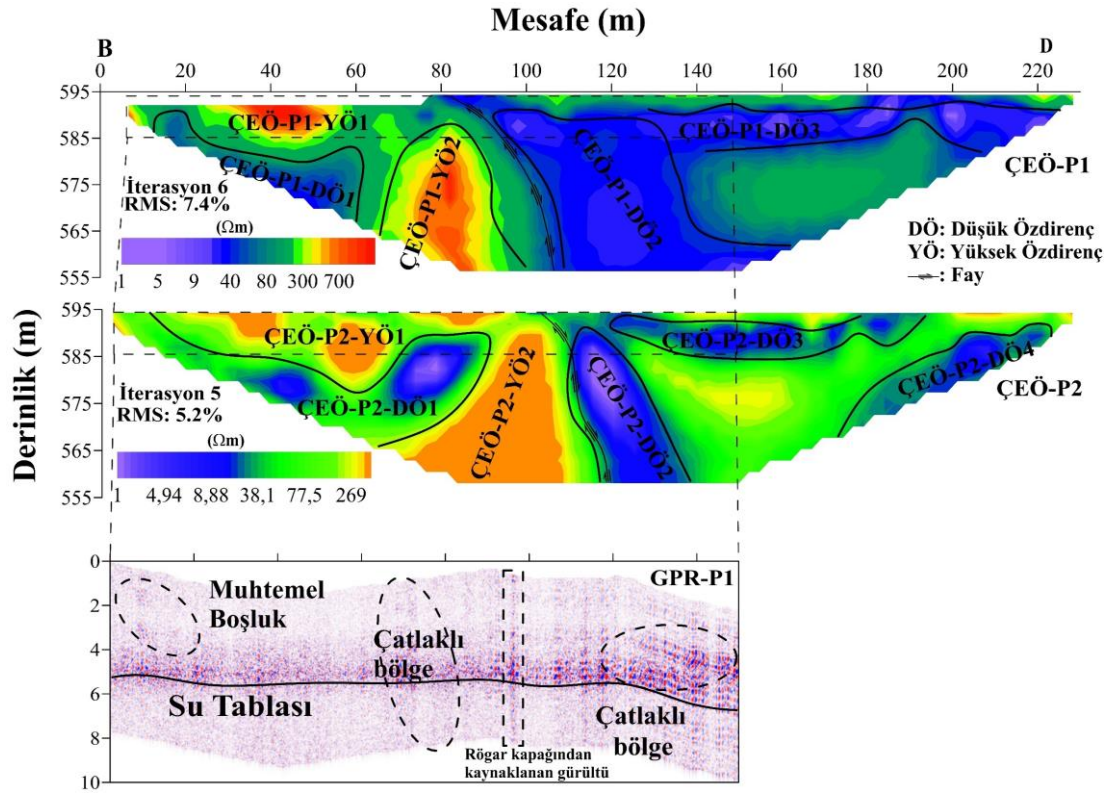
veri setinden silinir. Bu tür veriler genellikle kullanılan özdirenç cihazındaki rölelerin biri veya birkaçının arızalanması veya elektrotların toprakla zayıf iletimde olmalarından kaynaklanır.

Toplanan GPR verilerinin işlenmesinde ise Radan 6.6 bilgisayar programı kullanılmıştır. Elde edilen profiller yorumlanabilmek için bir takım veri işlem aşamalarından geçirilmelidir. Veri işleminde ilk sırada yer alan statik düzeltme yer radarının dizaynından ileri gelir. Alıcı ve verici antenler arasında bulunan boşluk sebebiyle alıcı anten ölçüme başladığı andan itibaren doğrudan gelen dalga alıcıya ulaşana kadar bir zaman geçer. Bu sebeple radargramlarda anten ve yer yüzeyi arasında veri bulunmayan bir bölüm bulunur. Bu durumda veri negatif zaman kadar ötelenerek gürültü giderilebilir. Yer radarı arazi verilerinde görülen bir diğer sorun ise, ilerleyen zamanlarda sinyalin sönümlenmesinin giderilmesine karşın rastgele gürültünün ön plana çıkmasıdır. Dolayısıyla bu etkinin giderilmesi için bant geçiren süzgeç uygulanması yapılmıştır. Radar verilerinin içerisinde yer alan gerçek sinyalleri önemli ölçüde maskelenmesine yol açabilen yatay gürültü (ringing) olarak adlandırılan bozucu sinyallerdir. Yatay gürültülerin kaldırılması için Background Removal uygulanmıştır. Derinlerden gelen genlik bilgisi yüzeye yakın bölgelere göre daha zayıf olur. Bu durumu düzeltmek için ise verilere genlik kazanç düzeltmesi uygulanmıştır. Bunlarla birlikte topoğrafya düzeltmesi yapılmıştır.

### **6.1.3 Elde Edilen Verilerin Değerlendirilmesi**

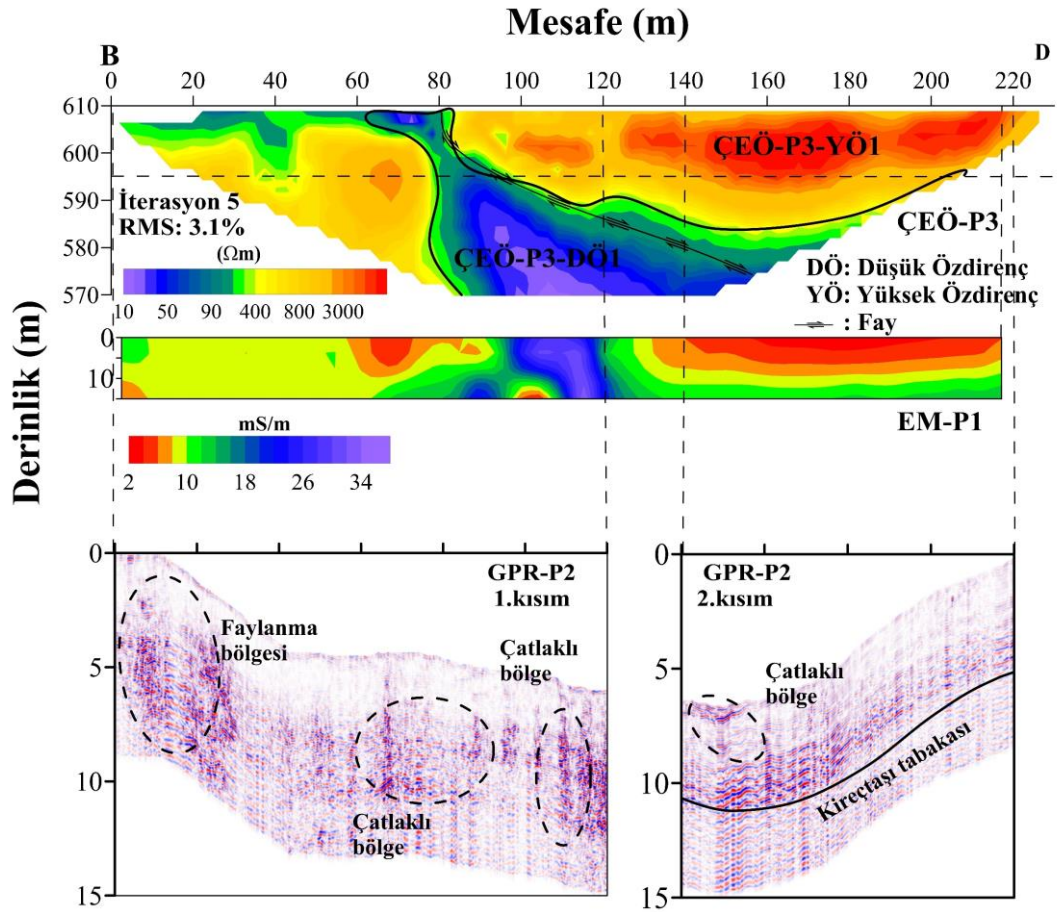
Kaynağa en yakın olan ÇEÖ-P1 profilinin baş kısmında ve 580 m ile 565 m rakımlarda, yüksek özdirenci (ÇEÖ-P1-YÖ1) olan bir birim ile örtülmüş özdirenci düşük (ÇEÖ-P1-DÖ1) olan bir bölgenin varlığı gözlenir. Profilin 65 ve 90 metreleri arasında özdirenci yüksek olan bir birimin varlığı görülmüştür (ÇEÖ-P1-YÖ2). Profilin orta kısmında geçirimli bir birimin var olduğuna işaret eden düşük özdirenci olan bir bölge (ÇEÖ-P1-DÖ2) gözlenmiştir. Profilin 140 metresinden sonuna doğru düşük özdirenci olan bir tabakanın varlığı gözlenmiştir (ÇEÖ-P1-DÖ3). ÇEÖ-P2'ye bakıldığında, ÇEÖ-P1'deki anomalilere benzerlik gözlenmiştir. Profilin başlangıcından 80 metresine kadar uzanan ve 590 m ile 575 m kotlarında düşük özdirenci olan bir birim (ÇEÖ-P2-DÖ1) bulunur. Bu birim özdirenci yüksek olan bir

tabaka (ÇEÖ-P2-YÖ1) ile örtülmüştür. Profilin 100 metresinden 120 metresine kadar uzanan yüksek özdirenci olan ve yeraltı suyunun akışına karşı gelen bir birimin varlığı gözlenir (ÇEÖ-P2-YÖ2). Yanal yönde akış gösteren yeraltı suyu bu profilde düşük özdirenci olan (ÇEÖ-P2-DÖ2) bölge olarak yansımıştır. Karşı karşıya gelen bu iki birim bir fayın varlığının bir göstergesidir. Profilin 120 metresinden 200 metresine kadar suya doymun ve sığ derinlikte bir birim bulunur (ÇEÖ-P2-DÖ3). Profilin sonuna doğru yaklaşık 10 m derinlikte geçirimi bir birim gözlenmiştir (ÇEÖ-P2-DÖ4). GPR profillerine bakıldığında genel olarak bölgenin tektonik yapısına uyum göstermiştir. GPR profilinin sıklığına ve elektromanyetik dalgaların derinliklere nüfuz etmesini sınırlayan su tablasının varlığına rağmen, özdirenç profillerindeki görülen anomaliler (ÇEÖ-P1-YÖ1, ÇEÖ-P2-YÖ1) GPR profillerinde de görülmüştür. Bu anomaliler, türbülanslı yeraltı suyu akışı nedeniyle bir karstlaşma sonucu oluşan karstik boşluğa ait olabilir. Profil üzerinde işaret edilen çatlaklı bölge özdirenç profillerinde de görülmüştür. Profilin 95 metresinde görülen anomali, bir rögar kapağının oluşturduğu yansımaları gösterir. 120 m ile 150 m arasında yeraltı suyu akışına müsaade eden çatlaklı bir bölge gözlenmiştir (Şekil 6.2).



Şekil 6.2: Elektrik özdirenç (ÇEÖ-P1, ÇEÖ-P2) ve GPR (GPR-P1) profilleri

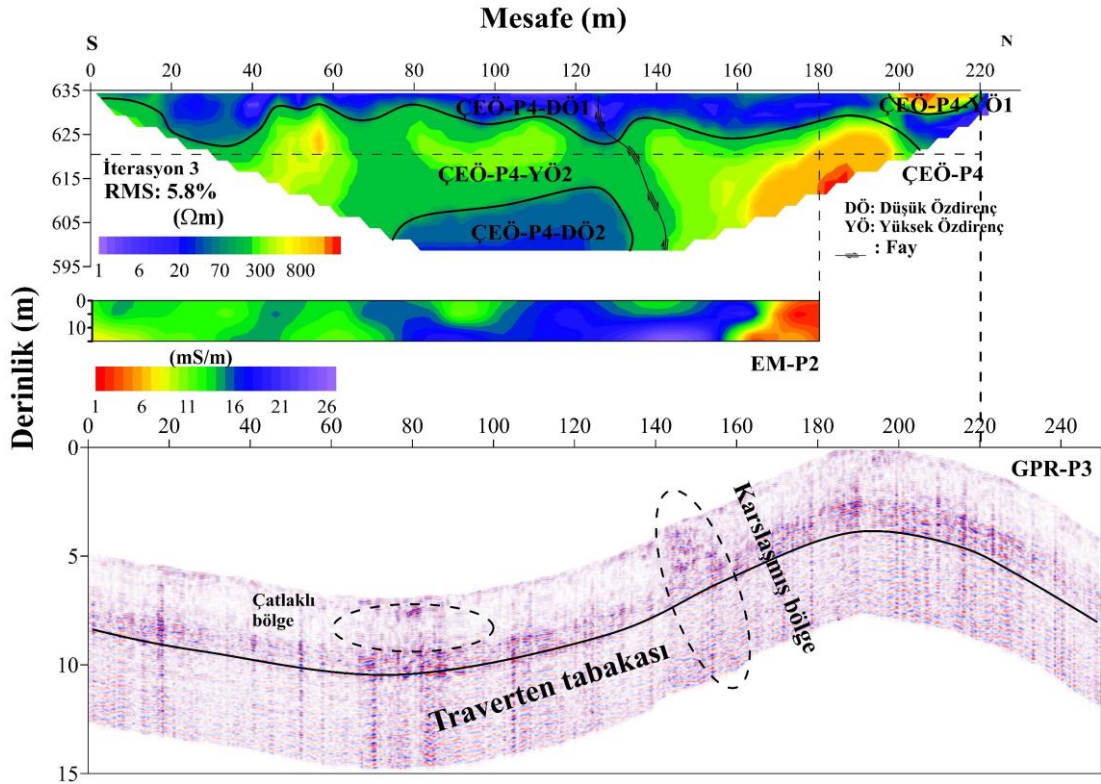
Şekil (6.3)'te özdirenç, elektromanyetik ve GPR yöntemlerinin uygulanmasından çizilen üç profil karşılaştırıldığında, profillerin uyumlu olduğu ve birbirini görür. Özdirenç profilinin 60 metresindeki yüzeyden eğimli bir şekilde derinlere doğru uzanan düşük özdirenç birimi (ÇEÖ-P3-DÖ1) ikincil gözenekliliği olan çatalca tepe kireçtaşlarına ait olabilir. Bu birimin sığda kalan kısmı GPR ve elektromanyetik profillerinde de görülmüştür. Profilin 80 metresinden itibaren sonuna doğru geçirimsiz ve akifer niteliğinde çatalca tepe kireçtaşlarını örten (ÇEÖ-P3-YÖ1) bir birimin varlığı gözlenmiştir. Bu bulgular, Gökpınar kaynağının güneydeki Çatalca Tepe kireçtaşları tarafından yanıl olarak beslendiğini gösterir (Şek 6.3). GPR profili, bölgede tektonizmadan ve karstlaşmadan etkilenmiş birimlerin var olduğunu gösterir. GPR profili Antalya yolu boyunca bir faylanma zonunun varlığına işaret etmiştir. Bu faylanma zonu Gökpınar kaynağının beslenmesinde önemle rol oynamakla birlikte kaynağın su kalitesine, ağır metal ve diğer kirlilik unsurları iletme tehlikesi oluşturur. GPR Profilinin ikinci kısmında ise ağırlıklı olarak geçirimsiz ve kireçtaşlarından oluşan bir tabaka gözlenmiştir.



Şekil 6.3: Elektrik özdirenç (ÇEÖ-P3), elektromanyetik (EM-P1) ve GPR (GPR-P2) profilleri

Çoklu elektrot öz direnç dördüncü profil boyunca sığ derinlikte öz direnci düşük bir tabaka (ÇEÖ-P4-DÖ1) gözlenmiştir. Bu tabaka suya doymun travertenlerden oluşabilir.

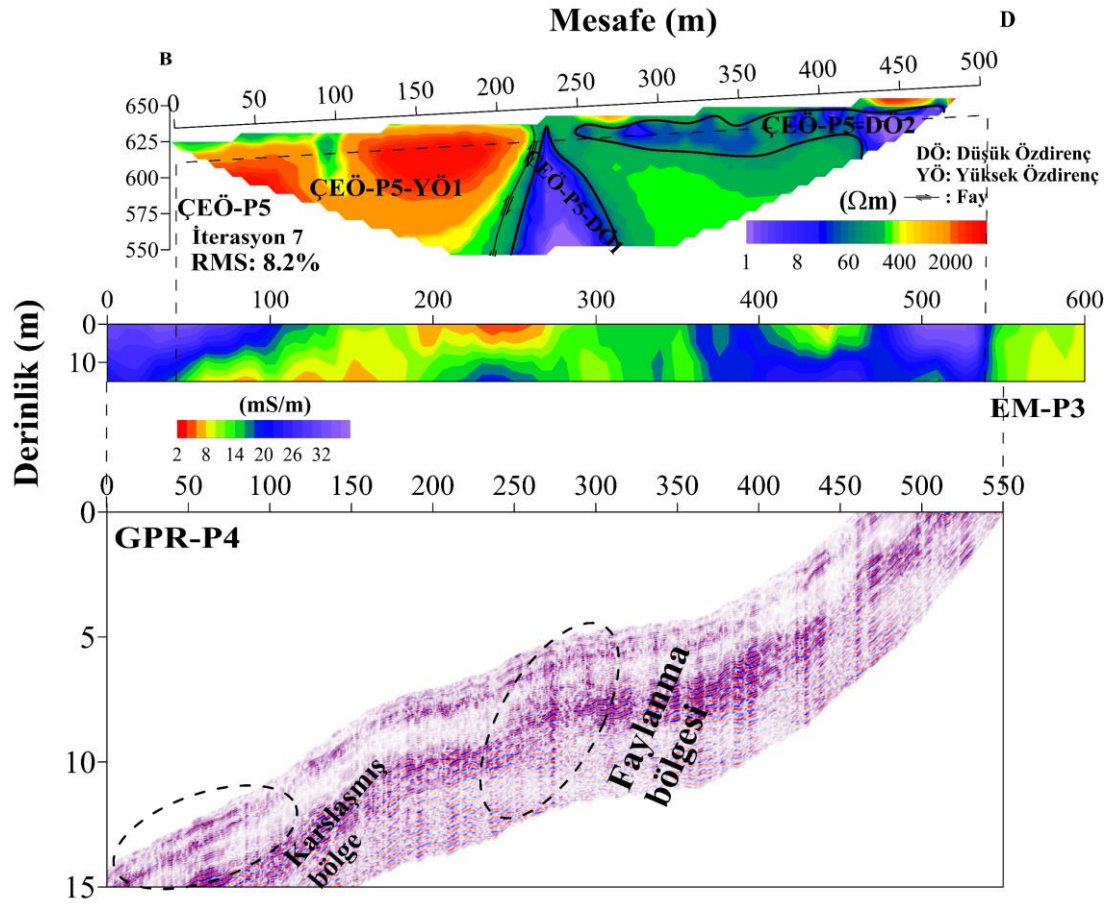
Travertenlerin hemen altında yer yer karışmış ve yüzey sularının derinlere nüfuz etmesine sebep olabilecek bir birim bulunur. Profilin 100 ile 140 metrelerin arasında ve yaklaşık olarak 20 m derinlikte düşük öz direnci olan (ÇEÖ-P4-DÖ2) birimi kaynağın bir beslenme bölgesinin varlığına işaret eder. Genel olarak çoklu elektrot öz direnç profilinde görülen anomaliler GPR ve EM profillerinde de görülmüştür (Şekil 6.4).



Şekil 6.4: Elektrik öz direnç (ÇEÖ-P4), elektromanyetik (EM-P2) ve GPR (GPR-P3) profilleri

Profilin 255. metresinde belirgin ve yüzeyden itibaren derinlere doğru uzanan muhtemel bir fay zonu gözlenir. Bu profilde görülen akifer niteliğinde olan ve kaynak kotundan daha düşük kotlara uzanan birimler kaynağın beslenmesinde büyük öneme sahiptir. Fayın karşısına gelen ve düşük öz direnci olan bölge (ÇEÖ-P5-DÖ1) nispeten basınçlı bir akiferi temsil eder. Profilin 270 metresinden itibaren nispeten geçirimli ve yeraltı suyunun akışına müsaade eden bir tabaka ile örtülmüş (ÇEÖ-P5-DÖ2) bir birimin varlığını gözlenmiştir.

GPR profilinde sıg derinlikteki yapılar detaylı bir şekilde gözlenmiştir. ÇEÖ ve GPR profilleri karşılaştırıldığında yüksek benzerlikte ve uyum gösteren anomaliler görülmüştür. Her iki profile geçirimsiz temel anakaya ve fay zonu gözlenmiştir. GPR profilinde görülen karstlaşmadan etkilenmiş bölgeler EM profilinde de görülmüştür. Yüksek öz direnci olan ÇEÖ-P5-YÖ1 bölgesi elektromanyetik profilinde de kısmen gözlenmiştir. Düşük öz direnci olan ÇEÖ-P5-DÖ2 bölgesi EM profilinde yüksek iletkenliği olan bir bölgenin karşılığına gelmiştir (Şekil 6.5).

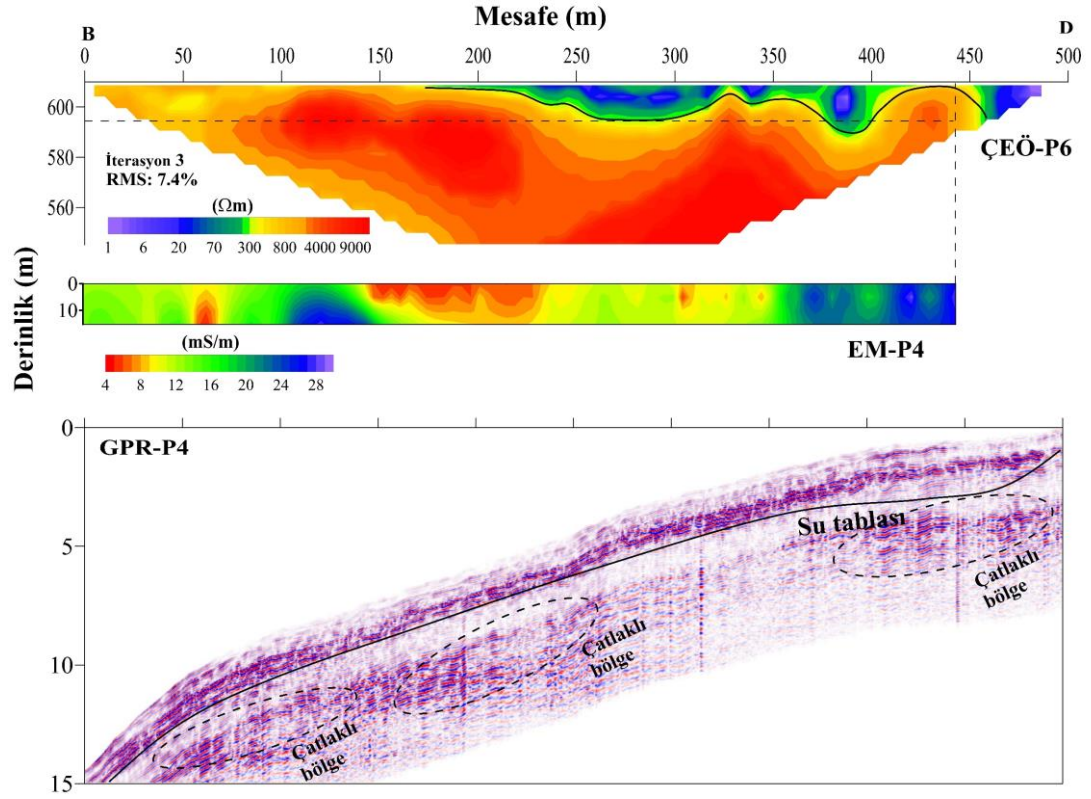


Şekil 6.5: Elektrik öz direnç (ÇEÖ-P5), elektromanyetik (EM-P3) ve GPR (GPR-P4) profilleri

Çoklu elektrot öz direnç yönteminin bu profilinde 150 m'den itibaren profilin sonuna doğru uzanan suya doymun bir tabakanın varlığı gözlenmiştir. Bu tabakanın hemen altında öz direnci yüksek olan ve geçirimsiz bir birimin yer aldığı açıkça görülür. Sıg derinliği araştıran GPR ve EM profilleri uyumluk göstermiştir.

GPR profilinde gösterilen çatlaklı bölge, EM profilinde suya doymun yüksek iletkenliği olan bir birim ile temsil edilmiştir. ÇEÖ profilinde ve yüzeyde görülen

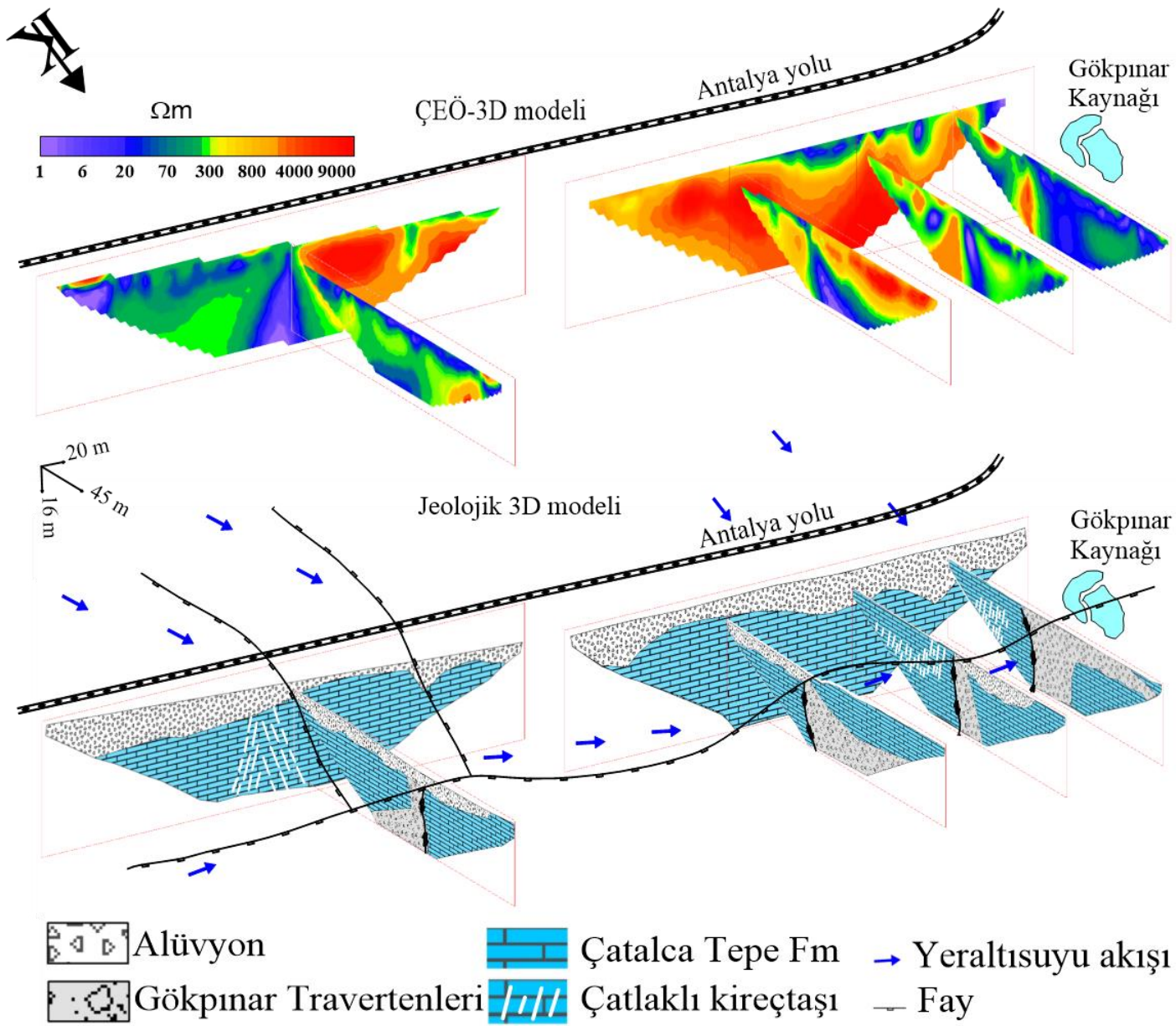
düşük öz direnci olan tabakanın GPR profilinde su tablasına ait olduğu gözlenmiştir (Şekil 6.6).



Şekil 6.6: Elektrik öz direnç (ÇEÖ-P6), elektromanyetik (EM-P4) ve GPR (GPR-P4) profilleri

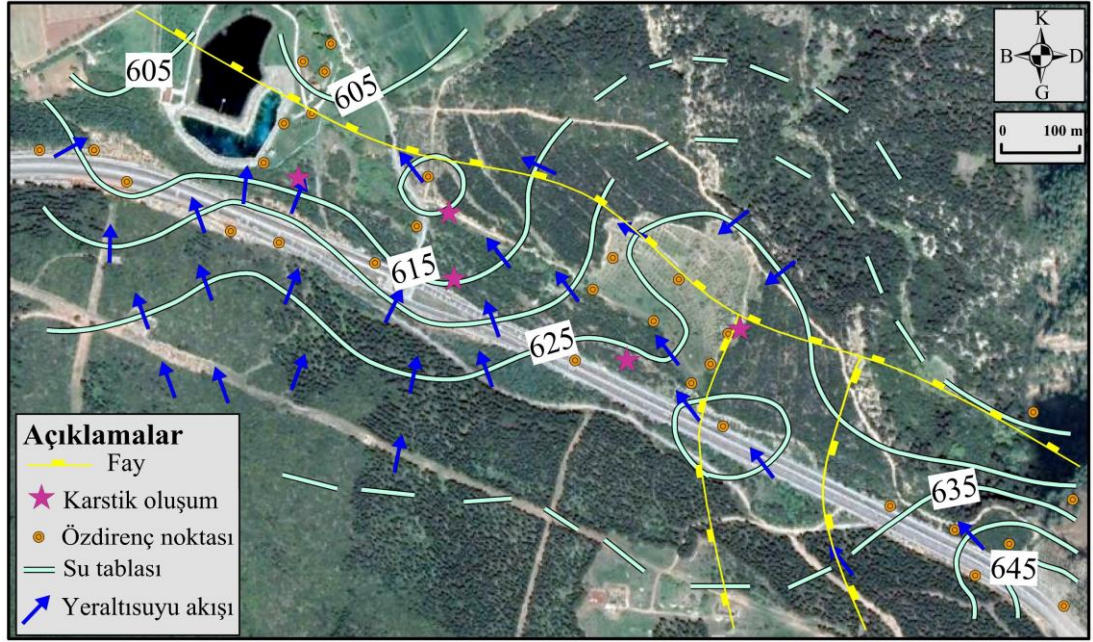
Çalışma alanının litolojik ve tektonik yapısını daha iyi anlayabilmek için üç boyutlu bir çit diyagramı oluşturarak öz direnç ve jeolojik modelleri karşılıklı olarak değerlendirilmiştir (Şekil 6.7). Üç boyutlu modele bakıldığında ÇEÖ-P1, ÇEÖ-P2, ÇEÖ-P3 ve ÇEÖ-P4 profillerinde bir fayın Gökpınar kaynağına doğru uzandığı belirgin bir şekilde gözlenir. ÇEÖ-P5 profilinde çatalca tepesinden süzülen yağmur sularını kaynağına doğru kanalize eden gömülü fay zonunun varlığı gözlenir. Genel olarak çalışma alanındaki yeraltı suyu batı yönünden önemli miktarda akış gösterirken diğer yönlerden daha az miktarda akış göstermiştir.





Şekil 6.7: Çalışma alanın üç boyutlu öz direnç ve karşılığı oluşturulan ve yeraltı suyu akış yönünü gösteren jeolojik modeli ile konumlandırılan fayları.

Şekil (6.8)'te öz direnç verileri kullanılarak Gökpınar kaynağının çevresindeki muhtemel su tablası gösterilmiştir. Su tablası şekilde görüldüğü gibi 645 ile 605 m kotlarındadır. Gökpınar kaynağı, sığ akiferler ile bir fay ve çatlak sistemi yoluyla yükselen derin yeraltı suları tarafından beslenir. Jeofizik arazi çalışmalarının sonuçlarından anlaşıldığı gibi, Çatalca tepe dağına düşen yağmur suları Babadağ fayı boyunca yanal ve düşey doğrultularda kaynağa doğru kanalize edilir. Gökpınar kaynağının güneyinde bulunan daha küçük süreksizlikler yeraltı suyu bakımından zengin olup, kaynağın beslenmesi katkıda bulunur. Öte yandan karstik kireçtaşlarının varlığı, uygulanmış olan jeofizik yöntemlerin sonuçlarıyla ortaya konmuştur. Bu birimler kaynağın beslenmesinde önemli bir rol oynar.

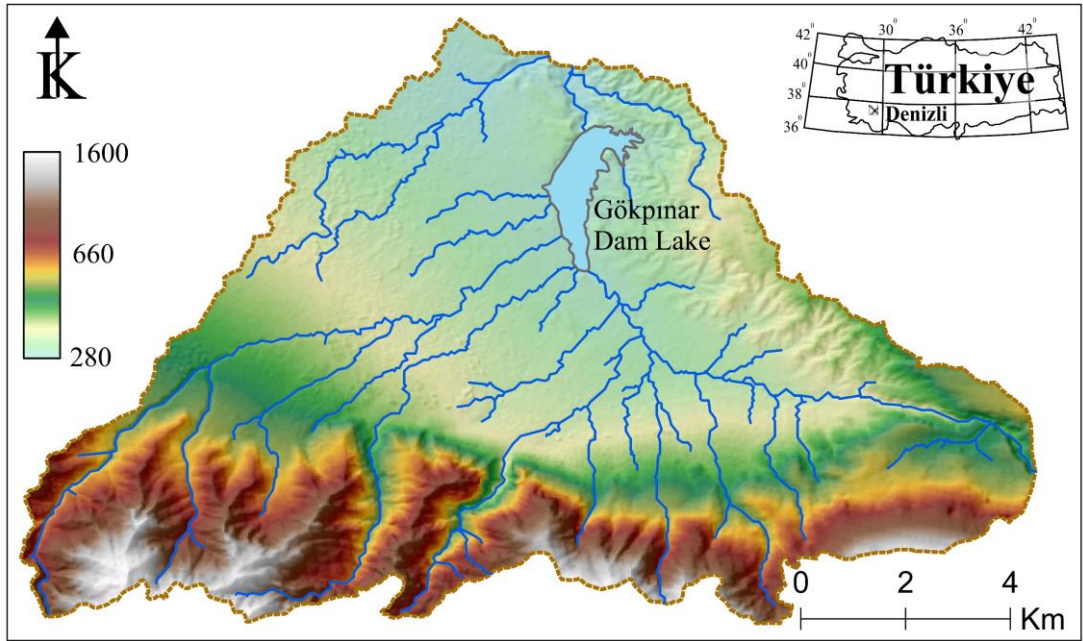


Şekil 6.8: Öz direnç verileri kullanılarak oluşturulan su tablası kontur haritası ile konumlandırılan fay ve karstik oluşumlar.

## 6.2 Gökpınar Baraj Gölü ve Yakın Çevresi

Baraj göllerinin çevrelerindeki yeraltı suyu seviyelerinin belirlenmesi; su bütçesi hesapları, gölün beslenme-boşalım şartları ve koruma alanlarının tespiti bakımından büyük önem taşır. Bu çalışmada Gökpınar baraj gölü çevresindeki yeraltı suyu akış yönleri jeofizik ve hidrojeolojik yöntemler kullanılarak araştırılmıştır.

Gökpınar Barajının yüzey drenaj alanına ait su bölüm hattı, güney sınırı kuşatan dağların zirvelerinden geçer. Bu dağların Göle bakan kuzey yamaçları boyunca Kozlupınar ve Bentpınarı kaynakları da dahil olmak üzere irili ufaklı birçok kaynak yer alır. Ayrıca morfolojisi Babadağ fayı tarafından kontrol edilen bu sarp tepelerde, mevsimsel ani yağışlar ile akışa geçen yan dereler mevcuttur. Bu dere ve kaynaklarına ait yüzey ve yeraltı suları Baraj gölüne doğru akarak gölün beslenmesine doğrudan katkıda bulunur (Şekil 6.9).

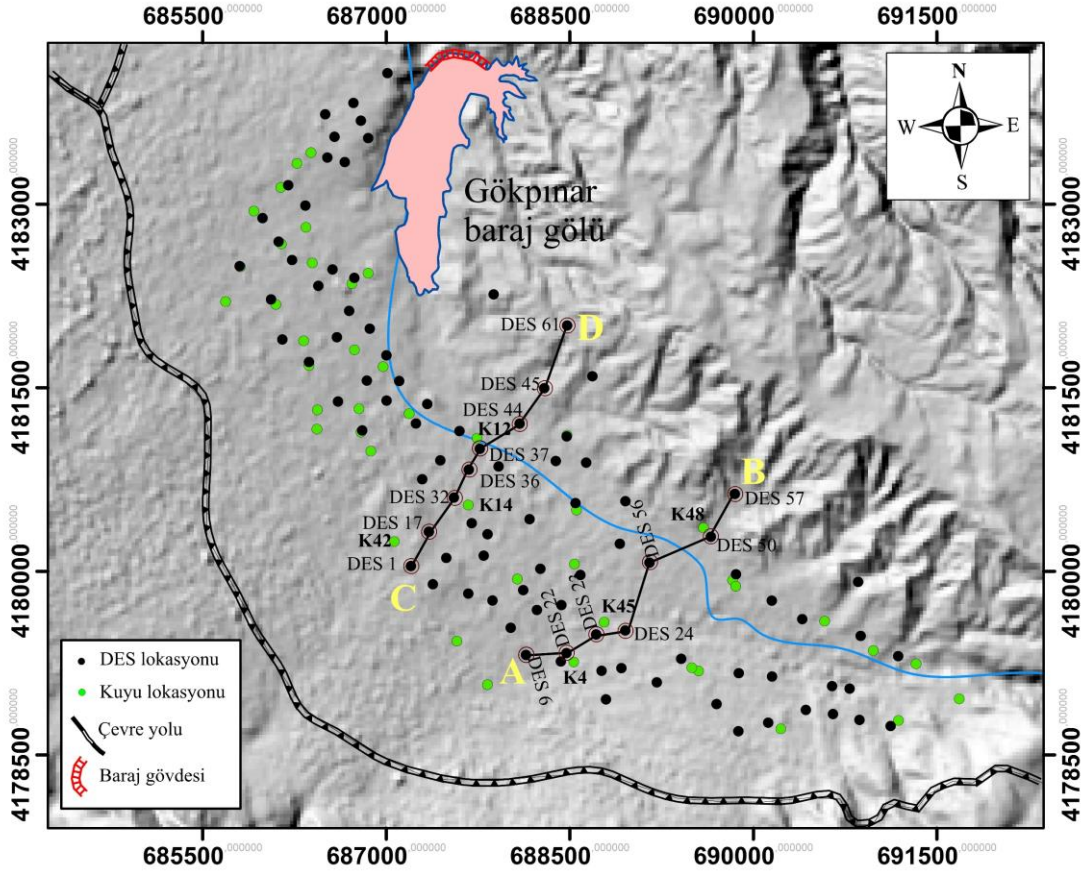


Şekil 6.9: Gökpınar baraj gölü çalışma alanındaki havza ile akarsuların haritası.

### 6.2.1 Veri Toplama ve İşlemi

Çalışmanın bu kısmında, Gökpınar baraj gölünün çevresindeki yeraltı suyu akış yönlerini belirlemek için 98 noktadan Düşey Elektrik Sondajı (DES) alınmıştır (Şekil 6.10). DES noktaları baraj gölü çevresinin topografyasına ve arazi şartlarına bağlı olarak seçilmiştir. Çalışma alanının güneybatı ve güneydoğu kesimlerinde yüksek kotta bölgeler; yer alır. Gölün kuzey kısımlarındaki baraj gövdesi ve çevresi, gölün deşarj alanları oluşturur. Buna karşılıklı olarak ve çalışmanın amacına istinaden gölün beslenme alanlarını temsil eden daha yüksek bölgelerden veri toplanmıştır. Özdirenç verileri toplamak için Shlumberger dizilimi kullanılarak harici iki akım elektrottan akım yere gönderilir ve dahili iki elektrot yardımıyla oluşan gerilim farkı

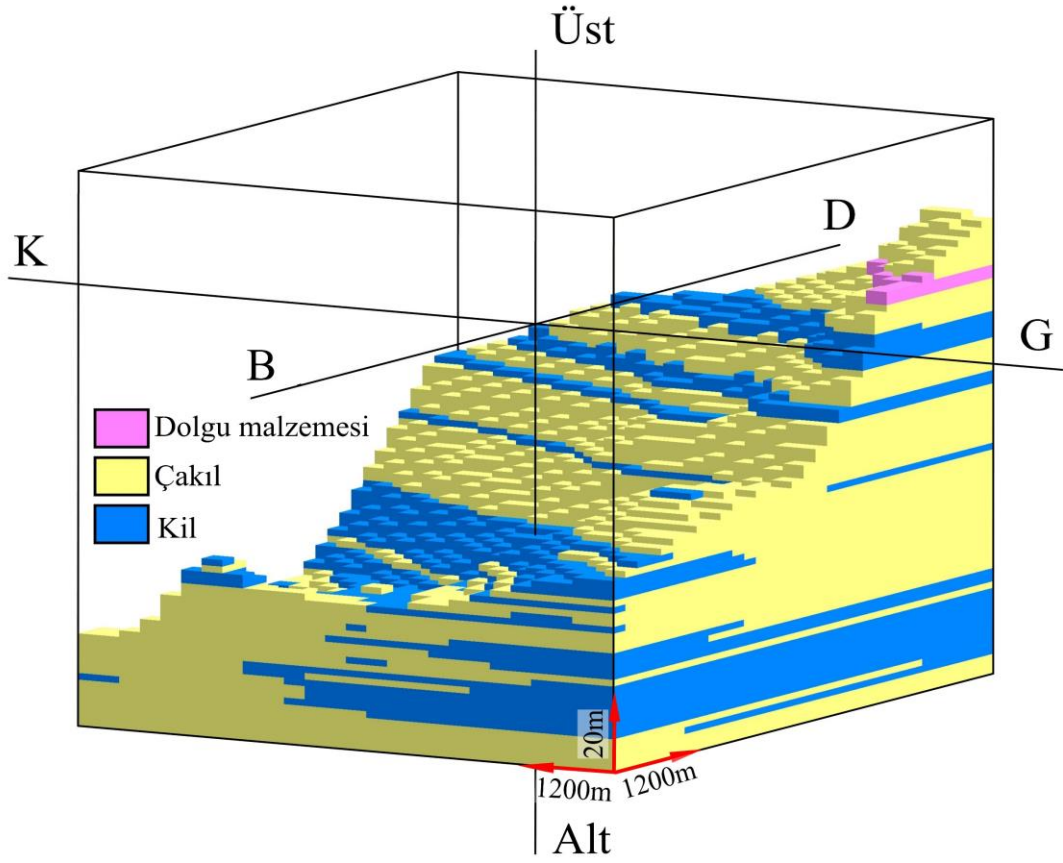
ölçülür. Elde edilen öz direnç değerleri IP2WIN ters çözüm programı kullanılarak DES eğrileri oluşturulmuştur. DES eğrilerinden elde edilen sonuçların yardımı ile üç boyutlu öz direnç modeli oluşturulmuştur. Mekanik sondajlardan elde edilen bilgileri kullanarak üç boyutlu litoloji modeli oluşturulmuştur.



Şekil 6.10: Gökpınar baraj gölü çevresinde düşey elektrik (DES) ve mekanik sondajların lokasyonları.

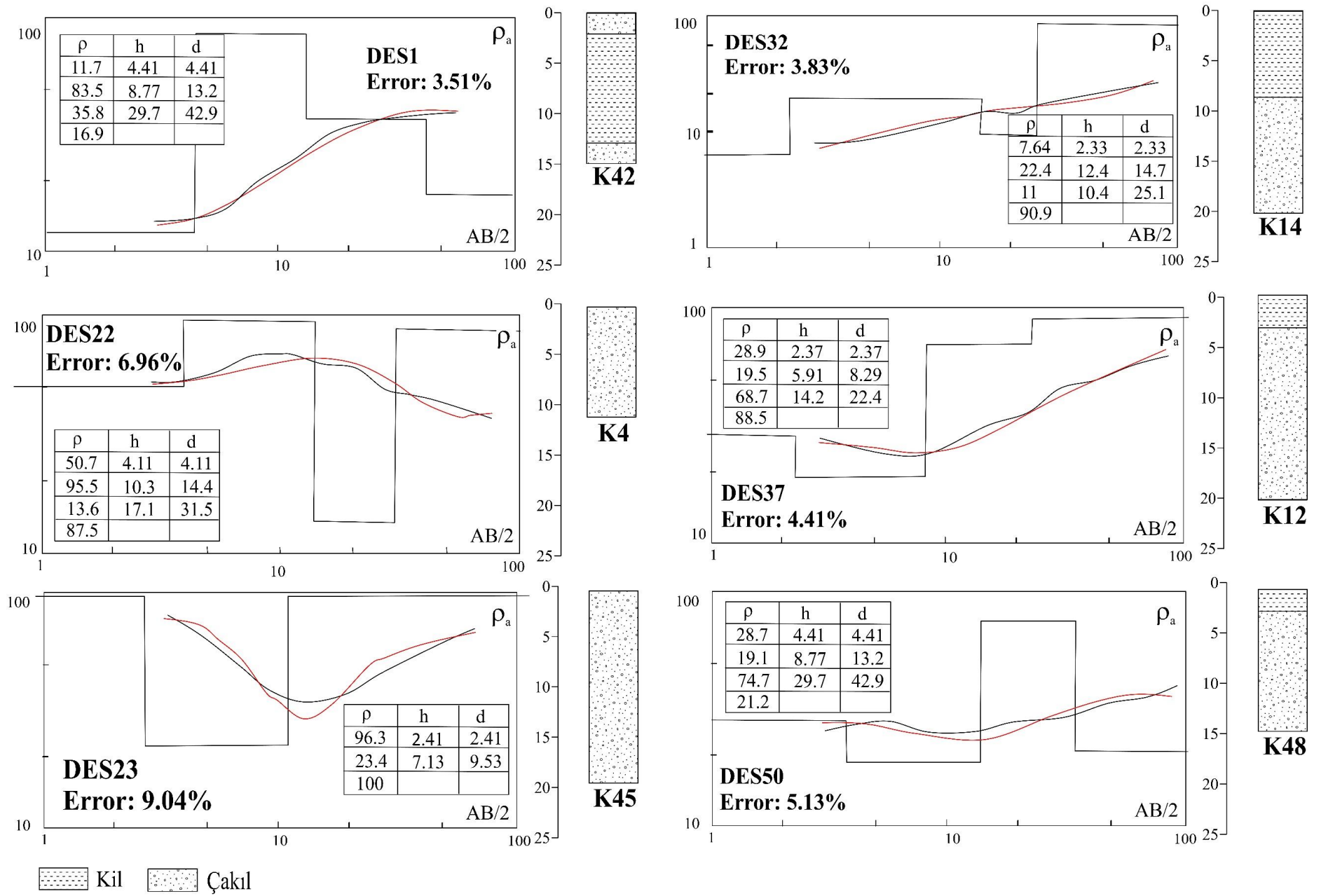
## 6.2.2 Elde Edilen Verilerin Değerlendirilmesi

Çalışma alanının litolojisinin üç boyutlu modelleme işleminde, açılmış olan sondajların verileri kullanılarak örneklendirilmemiş bölgelerinin tahmini RockWorks programı yardımıyla interpolasyon uygulayarak yapılmıştır. Bölgede açılan sondajların derinlikleri 5 ile 15 metre arasında değişir. Litoloji modelinde yansıtılan bu derinlikteki birimler daha yaşlı birimleri örten Kuvaterner yaşlı alüvyonlara aittir. Açılmış olan sondajlar sıg derinlikte olsa da çalışma alanı temsil eder ve buna bağlı olarak bölgede bir serbest akifer var olduğu düşünülebilir (Şekil 6.11).



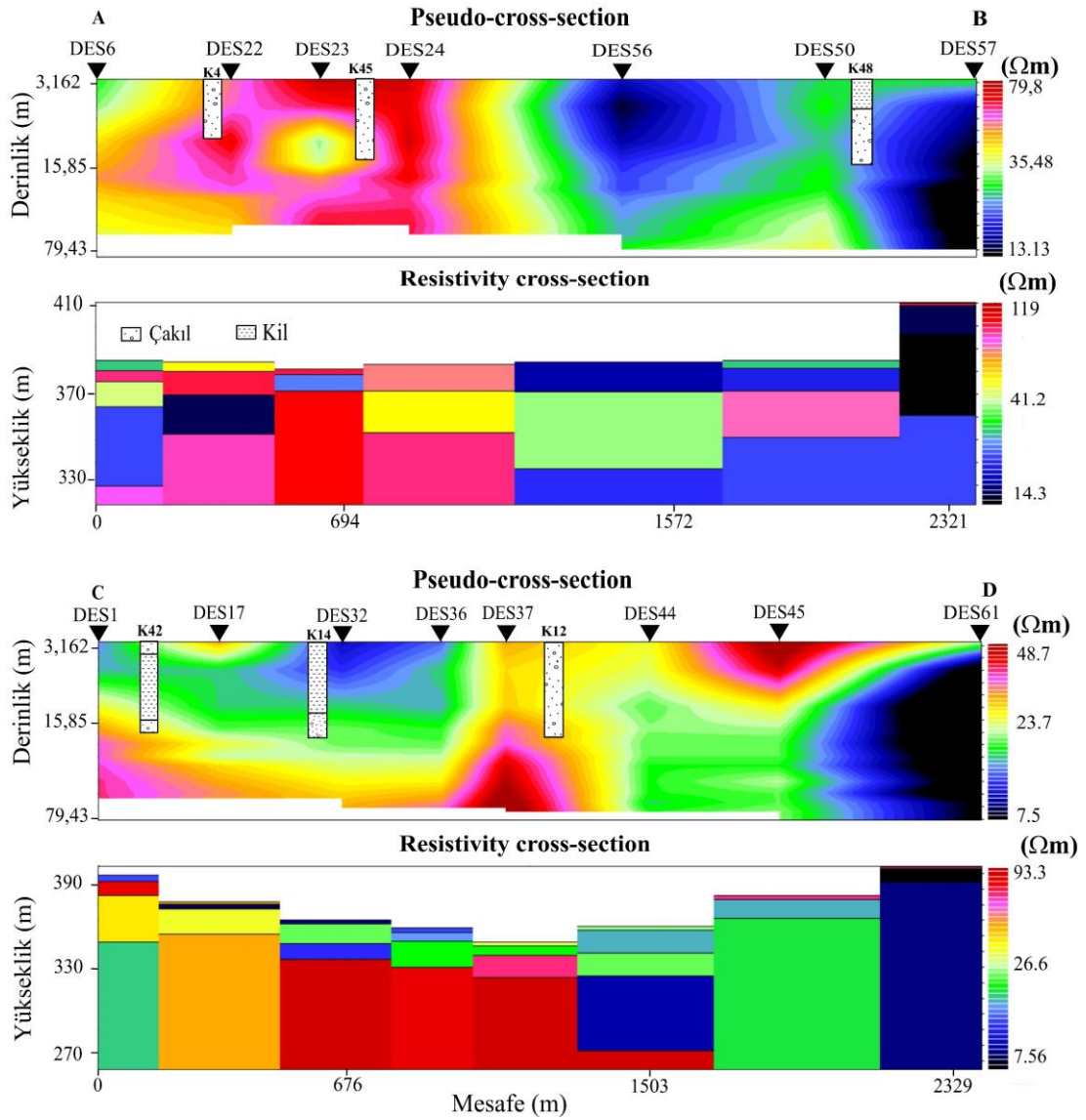
**Şekil 6.11:** Çalışma alanında açılan sondaj verileri kullanarak oluşturulmuş litoloji modeli.

Şekil (6.12)'de ters çözüm sonucu olan görünür özdirenç eğrileri gösterilmiştir. Bu ters çözüm işlemi, log-log skalasında görünür özdirenç değerleri IP2WIN programı yardımıyla çizdirilerek ve çok tabakalı bir modeller oluşturmakla gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçların eşleşme hatası 5%'ten az bulunmuştur. DES modellerinden elde edilen sonuçlara bağlı olarak, çalışma alanının heterojen bir yapıya sahip olduğu söylenebilir.



Şekil 6.12: Çalışma alanında elde edilen görünür özdeniş eğrilerine örnek.

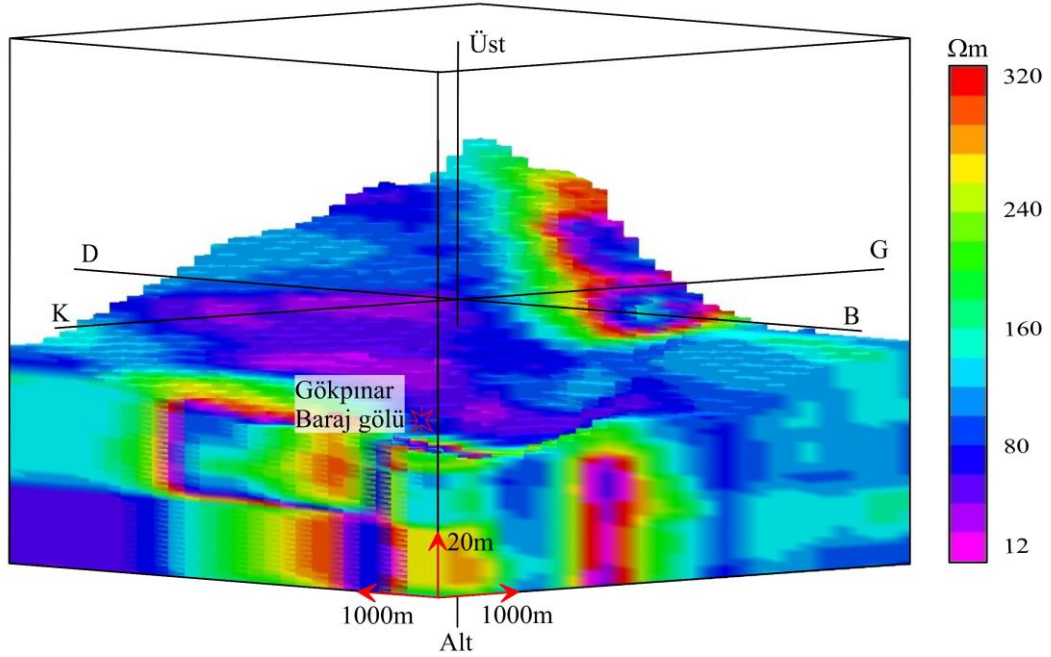
Şekil (6.13)'te verilen elektrik özdirenç kesitleri, düşey elektrik sondajlarını birleştirilerek elde edilmiştir. Bu profillere bakıldığında, karşılık gelen sondajlarla bir uyum sağladıkları görülebilir. Sondaj verilerinde görülen çakılların rezistivite değerleri, bu çakılların ihtiva ettikleri su miktarına göre değişir (Oudeika ve diğ. 2020<sup>b</sup>). Buna bağlı olarak bu profillerdeki yüksek özdirençli bölgeler, özgül verimliliği yüksek olan çakıl tabakalarına karşılık gelir.



Şekil 6.13: Düşey elektrik sondajların birleştirilmesiyle elde edilen özdirenç kesitlerine örnek.

Özdirenç verileri, çalışma alanının jeolojik ve litolojik durumuna göre düşük (geçirimli ve suya doygun), orta (nemliliği yüksek) ve yüksek (geçirimsiz temel) olarak üç grup halinde sınıflandırılabilir. Bu çalışmada, ters çözüm sonucu olan DES

eğrilerinden elde edilen verileri kullanılarak üç boyutlu öz direnç modeli RockWorks programı yardımıyla oluşturulmuştur (Şekil 6.14). Çalışma alanının üç boyutlu öz direnç modeli incelendiğinde öz direnci yüksek olan üç bölge gözlenmiştir. Genel olarak çalışma alanının kuzey-batı, güney-batı ve güney kısımlarında yoğunlaşan yüksek öz direnç anomalileri gözlenir. Bu yüksek ve orta öz direnç anomalileri, çalışma alanında bulunan geçirimsiz ve yarı geçirgen birimlerin varlığına işaret eder. Bu birimlerin aralarında öz direnci düşük olan bölgeler, kaynağın beslenme bölgelerini temsil eder.

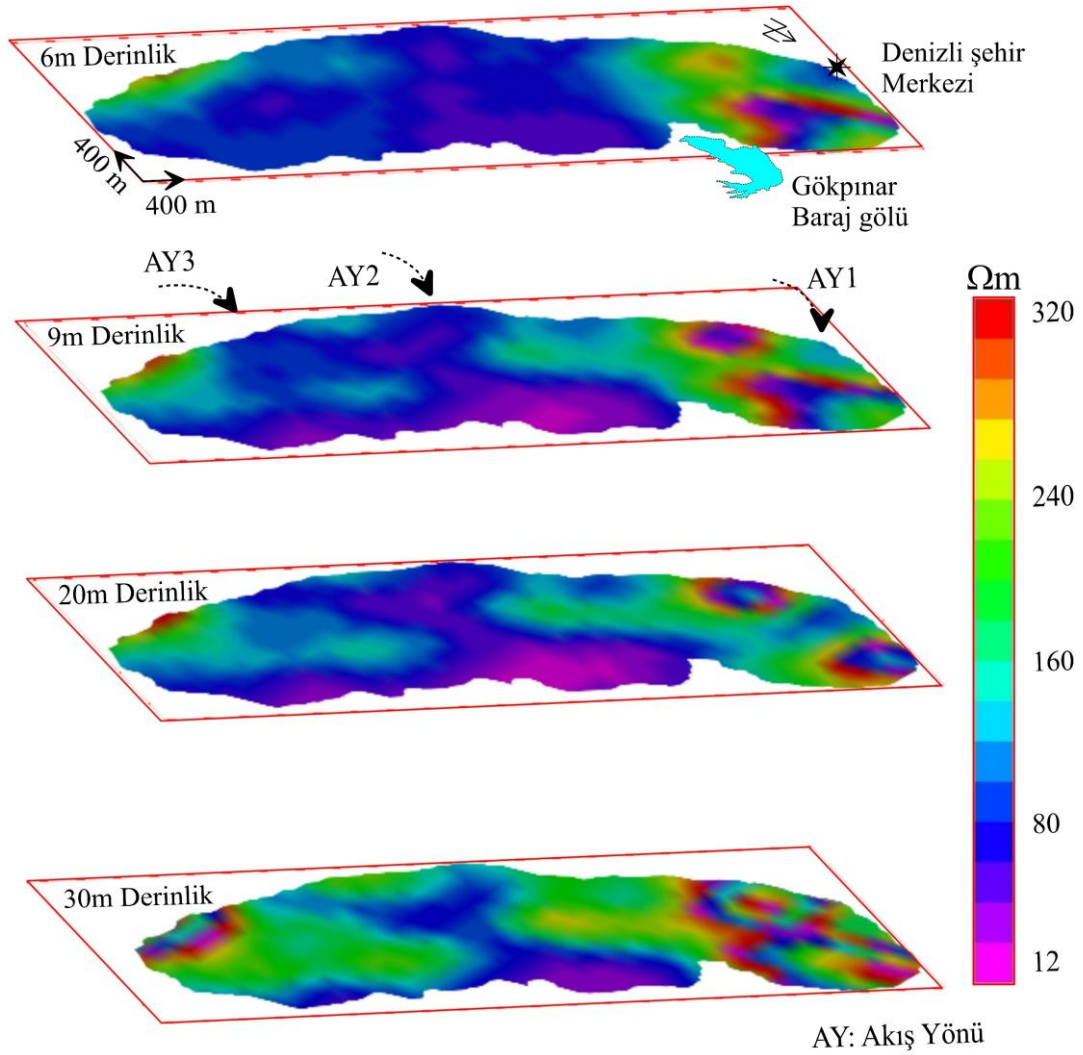


**Şekil 6.14:** DES eğrilerinin sonuçları kullanılarak oluşturulan 3 boyutlu öz direnç modeli.

Dilimli öz direnç 3B model değerlendirmesi, çalışma alanındaki yeraltı suyu akış yollarının belirlenmesine olanak sağlamıştır. Yer altı birimlerin elektriksel özellikleri, genel olarak su içeriklerine ve petrografik oluşumlarına bağlı olarak değişir. Dilimli öz direnç modelinde farklı derinliklerde yanal öz direnç değişimleri gözlenmiştir. 6 metre derinliğindeki dilim, 60  $\Omega\text{m}$ ' ye kadar çıkan öz direnç dağılımı göstererek akifer niteliğinde bir birimin varlığına işaret etmiştir. 9 metre derinliğe gelindiğinde düşük öz direnç bölgelerinin azalığı görülmüştür. Bölgede muhtemel tektonik bir yapılanmaya bağlı olarak 9 metre derinliğinde keskin bir öz direnç yükselişi gözlenir. Bu derinlikte de yeraltı suyu akışlarının esas olarak üç yönden (Güney-Batı, Kuzey-Batı ve Kuzey Doğu) kaynaklandığı görülmektedir. Bu sular

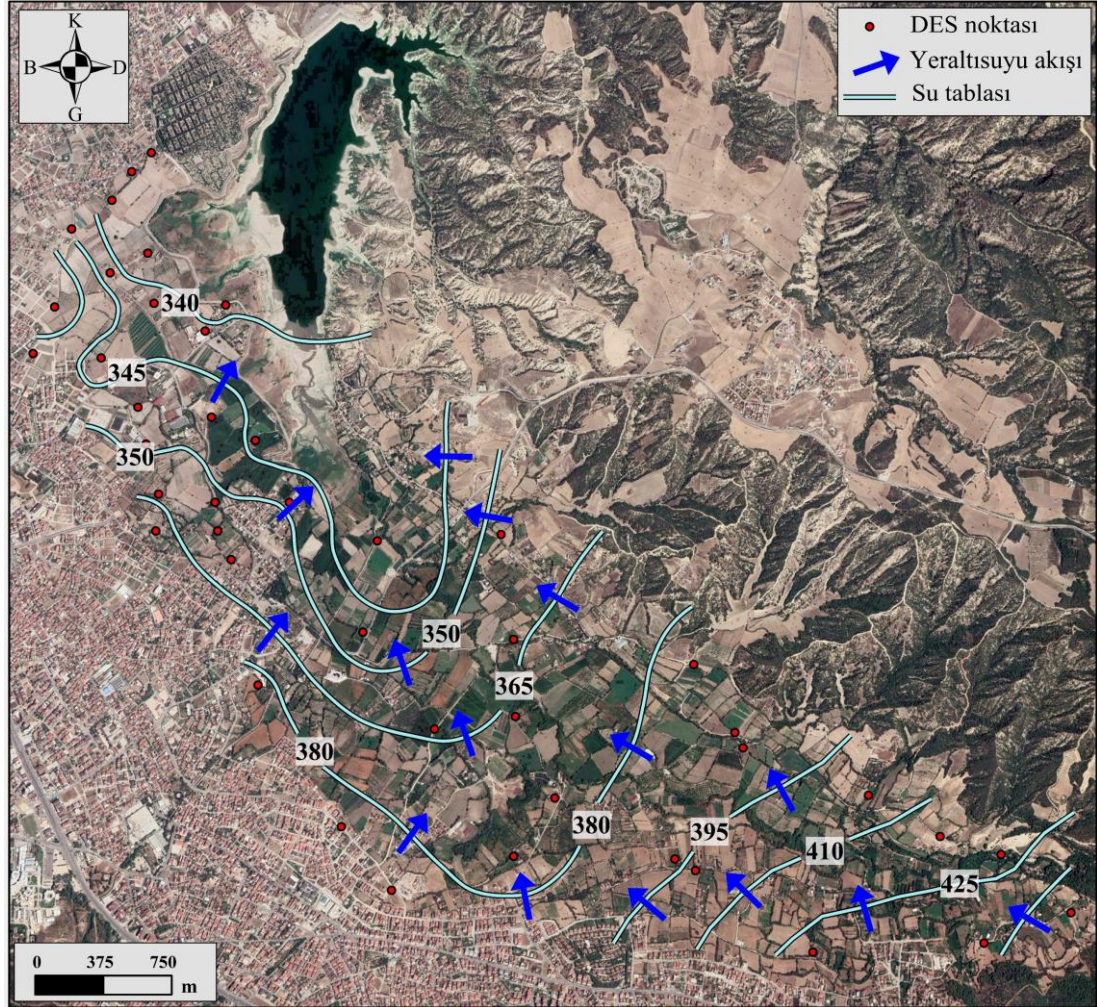


çalışma alanının orta kısımlarında birleşerek baraj gölüne sızılmaktadır. 20 metre derinlik dilimi, çalışma alanının Güney-Doğu ve Kuzey-Batı kesimlerinden akan yeraltı sularının, bu bölgelerdeki direnç anomalilerinin genişlemesinin yansıttığı önemli bir azalmamanın varlığını göstermiştir. Bu derinleşte de Kuzey-Batıdan akan yeraltı suları durduran bir yapıya karşı karşıya geldiklerinden dolayı yükselerek havzanın Kuzey-Doğu kısmına yönelmektedir. 30 metre derinliğindeki dilime bakıldığında çalışma alanının Güney-Doğu ve Kuzey-Doğu akifer kısımlarını birbirinden ayıran, geçirimsiz bir oluşum varlığını gözlenmektedir. Bu ayrılma, güney-doğudan kuzey-batıya doğru tüm çalışma alanını geçen yanal yüksek direnç anomalisi ile yansımıştır (Şekil 6.15).



Şekil 6.15: DES eğrilerinin sonuçları kullanılarak derinliğe bağlı olarak öz direnç değişim haritaları.

Gökpınar baraj gölü'nün havza içinde kalan güney ve güneydoğu kesimlerinde hidrojeolojik ve jeofizik arazi çalışmalarına dayanarak yeraltı suyu akış yönleri belirlenmiş ve su tablası kontur haritası çizilmiştir. Yeraltı suyunun akım yönü, topoğrafyaya az çok uyumlu bir şekilde, güneydoğudaki 425 m'ye varan yüksek kotlardan kuzeybatıdaki 340 m'ye kadar inen düşük kotlara doğru, yani baraj gölüne doğrudur (Şekil 6.16).



Şekil 6.16: Açılan sondajlardan elde edilen verileri kullanılarak oluşturulmuş su tablası kontur haritası.

### 6.3 Denizli Ağır Metal Kirliliğinin Durumu Belirlenmesi

Çalışmanın bu kısmında Denizli il merkezinin sanayileşme ve nüfus artışı nedenlerinden ileri gelen ağır metal kirliliği durumu ele alınmıştır. Bu doğrultuda bölgeden çok sayıda toprak numuneleri toplayarak XRF ve manyetik süseptibilite

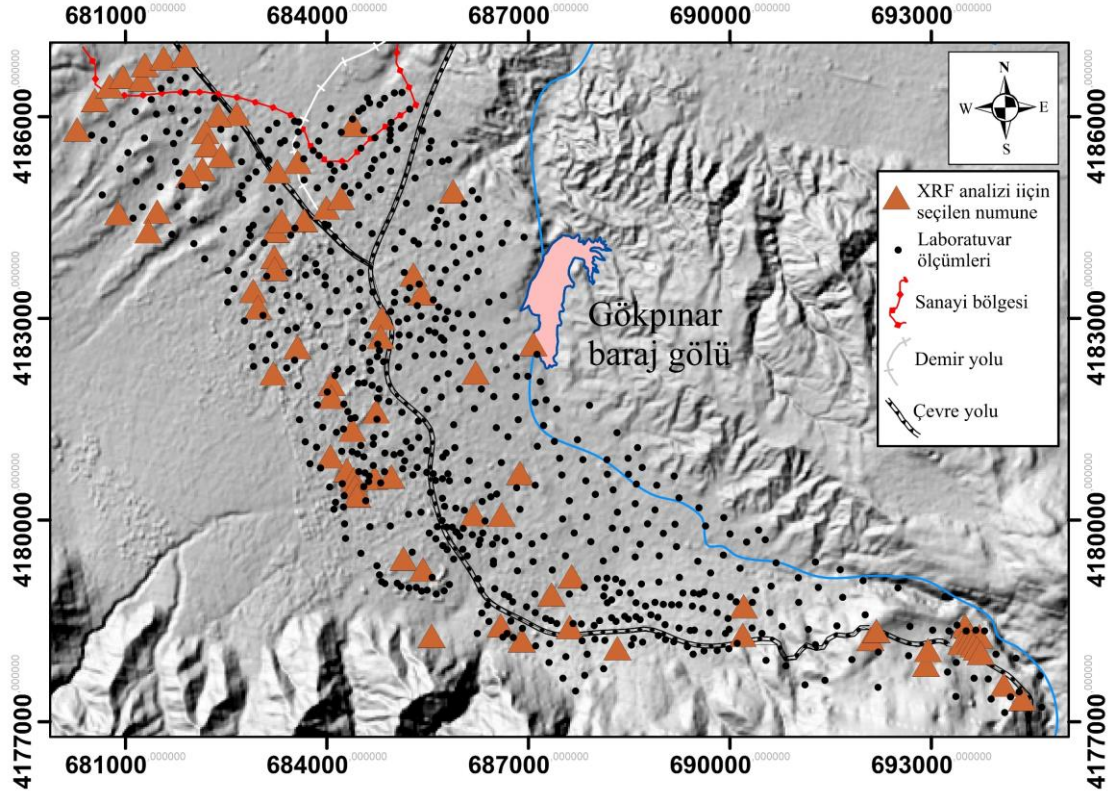
ölçümleri alınmıştır. Tablo (6.5)'de gösterilen önceki çalışmaların sonuçlarını baz alarak bir karşılaştırma yapılmıştır.

**Tablo 6.1:** Denizli şehir merkezinde ve Gökpınar kaynak çevresinde daha önceki manyetik süseptibilite çalışmalarından elde edilen sonuçlar.

	Denizli şehir merkezi (Aydın ve diğ. 2015)	Gökpınar kaynağı çevresi (Gungor ve diğ. 2017)	Güncel sonuçlar (Oudeika ve diğ. 2020 <sup>a</sup> )
Numune sayısı	251	346	783
$\chi_{LF}$	0-850 x 10 <sup>-8</sup> m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup>	0-800 x 10 <sup>-8</sup> m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup>	7-598 x 10 <sup>-8</sup> m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup>
$\chi_{HF}$	0-850 x 10 <sup>-8</sup> m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup>	-	7.3-530 x 10 <sup>-8</sup> m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup>
$PLI$	140'a kadar	42'ye kadar	7.7'ye kadar
$\chi_{FD}$	3%-13%	-	
Araştırılan ağır metaller	Fe, Si, Pb, Cr (R, 0.75-0.91)	Pb, Cu, Cr (R <sup>2</sup> , 0.0354)	Fe, Cr, Ni, Cu, Pb, Zn (R, 0.62-0.84)
$\chi_{LF}$			

### 6.3.1 Numune Toplama

Çalışma alanı kapsayacak şekilde 783 toprak numunesi alınmıştır. Bölgede, önceki ağır metal belirleme çalışmalarını baz alarak çalışma alanının ağır metal kirliliğinin güncel durumu belirlenmiştir. Numuneler dağılımı, şehir planına ve sahanın erişilebilirliğine bağlı olup, yaklaşık 100 metre aralıklarla düzensiz olarak toplanmıştır. Numuneler, paslanmaz çelik mala kullanılarak yaklaşık 10 x 10 cm alandan ve üst topraktan (0-20cm) toplanmıştır. Alınan bu numunelerin konumları GPS yardımıyla kaydedilerek etiketleyip plastik torbalarda saklanmıştır (Şekil 6.17).

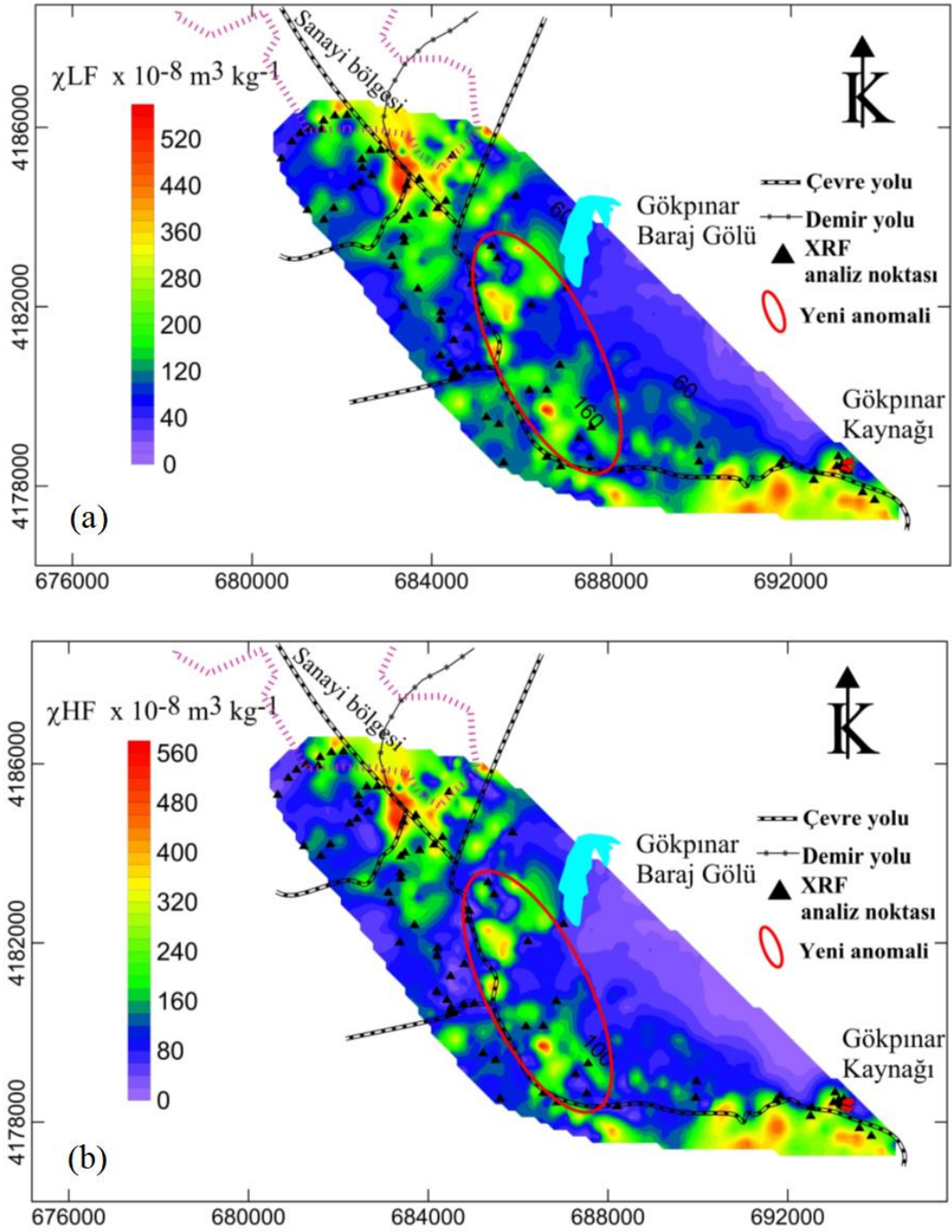


Şekil 6.17: Denizli ve Gökpınar çevresinde toplanan numuneler. (● XRF analizi için seçilen numuneler, ▲ laboratuvarında ölçü numuneleri)

### 6.3.2 Manyetik Süseptibilite Ölçümleri

Çalışma sahasından toplanan numunelerin manyetik süseptibiliteleri ölçülmek üzere 75<sup>0</sup>C’de 24 saat boyunca kurutulmuştur. Manyetik süseptibilite ölçümleri, çift frekanslı [0.47-4.7 kHz] ve 1.0 hassasiyetinde Bartington MS2 sensörü kullanılarak yapılmıştır. Ölçüm hatalarını önlemek için her numune için ölçümler üçer kere tekrarlanmıştır. Bu işlemin sonucunda 3%’ten az bir hata oranı bulunmuştur. Manyetik süseptibilite değerlerinin kontur haritaları Surfer programı kullanılarak oluşturulmuştur. Bu haritalara bağlı olarak sahanın XRF analizleri yapılacak olan numuneler seçilmiştir. Bu numunelerden kimyasal analiz için seçilenler siyah üçgenler ile gösterilmiştir. Ölçüler frekans bağımlılığı hesaplamalarında kullanılmıştır. Bu bağımlılık denklem (6.1) hesaplanmasıyla antropojenik kaynaklar tarafından salınan ultra ince süperparamanyetik parçacıklarının varlığı tahmin edilebilir (Dearing 1996).

$$\chi_{FD}\% = \frac{(\chi_{LF} - \chi_{HF})}{\chi_{LF}} \times 100\% \quad (6.1)$$



**Şekil 6.18:** Düşük ( $\chi_{LF}$ ) (a) ve yüksek ( $\chi_{HF}$ ) (b) frekanslar için oluşturulan manyetik süseptibilite kontur haritaları

Şekil (6.18)'teki düşük (a) ve yüksek (b) frekansta ölçülen manyetik süseptibilite kontur haritaları, çalışma alanının güneydoğu ve kuzeydoğu kesimlerinde benzer anomaliler göstererek, sanayi bölgesi yakınında ve Antalya karayolu kenarındaki Gökpınar kaynağının yakınında olası yüksek antropojenik ağır metal yükünün varlığını yansıtır. Manyetik süseptibilite değerleri düşük frekans için  $7 \times 10^{-8} \text{m}^3 \text{kg}^{-1}$  ve  $598 \times 10^{-8} \text{m}^3 \text{kg}^{-1}$  arasında değişirken yüksek frekans için  $7.3 \times$

$10^{-8}\text{m}^3\text{kg}^{-1}$  ve  $530 \times 10^{-8}\text{m}^3 \text{kg}^{-1}$  arasında değişir. Örneklerin toplamı için hesaplanan frekans bağımlılıkları, ortalama 2,9% değer göstererek sahada önemli bir manyetik duyarlılık ortaya çıkarır. Çalışma alanında yapılan önceki çalışmalarla karşılaştırıldığında, Antalya yolu boyunca farklı bölümlerde yeni anormalliklerin ortaya çıktığını görebiliriz. Aydın ve Akyol (2015) ile Gungor ve diğ (2017) 'e göre temel olarak manyetik süseptibilite anomalileri çalışma alanının kuzey ve güneydoğu kesimlerinde görülmüştür. Önceki çalışmaların sonuçları, bu çalışmanın güncel manyetik süseptibilite haritalama sonuçları ile karşılaştırıldığında, Gökpınar çevresi, şehir merkezinde olduğu gibi anomalilerin genişlediği görülmüştür. Gökpınar baraj gölü ve şehir merkezinin bazı kısımlarında yeni anomaliler görülmüştür. Meydana gelen bu yeni anomaliler, çalışma alanının zaman içinde gittikçe kirlendiğini gösterir.

### 6.3.3 XRF Analizleri ve Kirlilik Durumu

Manyetik süseptibilite anomalilerinin; çalışma alanındaki doğal jeokimyasal özelliklerden değil, antropojenik etkinliklerden kaynaklandığını doğrulamak için XRF yöntemi kullanılarak analiz edilmek üzere 79 örnek seçilmiştir.

Fe, Cr, Ni, Cu, Pb ve Zn bileşenlerine ait kimyasal analiz sonuçlarına dayanarak bölgenin genel jeolojik yapısına bağlı kirlilik kriterleri hesaplanmıştır. İlk olarak, bir numune içindeki kirlilik unsuru miktarlarının, çalışma alanına göre baz alınan numune içindeki ortalama miktarlarına oranlarını temsil eden kontaminasyon faktörü denklem (6.5) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$CF_i = \frac{C_i}{C_{background_i}} \quad (6.5)$$

$CF_i$  Kontaminasyon faktörü,  $C_i$  kullanılan numunedeki ağır metal miktarı,  $C_{background_i}$  ise baz numunenin ağır metal konsantrasyonu.  $CF_i$  değerleri; düşük kontaminasyon ( $CF_i < 1$ ), orta kontaminasyon ( $1 < CF_i < 3$ ), yüksek kontaminasyon ( $3 < CF_i < 6$ ) ve çok yüksek kontaminasyon ( $CF_i > 6$ ) olarak yorumlanır (Tablo 6.2) (Hakanson 1980).

İkinci sırada, tüm element konsantrasyonlarını dahil ederek numunelerdeki ağır metal kontaminasyonunun derecesini değerlendirmek için PLI indeksi (Pollution Load

Index) denklem (6.2) kullanılarak hesaplanmıştır. Bu hesaplamının sonucunda çalışma alanının kirliliği şu şekilde yorumlanabilir: Kirlenmemiş ( $PLI \leq 1$ ), hafif kirli ( $1 < PLI \leq 2$ ), orta derecede kirli ( $2 < PLI \leq 3$ ) ve çok kirli ( $PLI \geq 3$ ) (Tablo 6.2) (Chen ve diğ. 2014, Li ve diğ. 2015).

$$PLI = \sqrt[n]{CF_1 \times CF_2 \times \dots \times CF_n} \quad (6.2)$$

Kirlilik unsurlarının antropojenik unsurlara bağlı birikimlerini belirlemek için Jeoakümülyasyon indeksi ( $I_{geo}$ ) kullanılmıştır (Müller 1969). Jeoakümülyasyon indeksi (6.3) denklemi kullanılarak hesaplanabilir.

$$I_{geo} = \log_2(C_i/1.5C_{background_i}) \quad (6.3)$$

$I_{geo}$  değerlerine bağlı olarak söz konusu numunenin kirlilik durumu şu şekilde yorumlanabilir: Kirlenmemiş numune ( $0 \leq I_{geo} \leq 1$ ), orta derecede kirli ( $1 \leq I_{geo} \leq 2$ ), çok kirli ( $2 \leq I_{geo} \leq 3$ ) ve aşırı derecede kirli ( $4 \leq I_{geo} \leq 5$ ) (Tablo 6.2) (Müller 1969, Varol 2011, Kalender ve diğ. 2013).

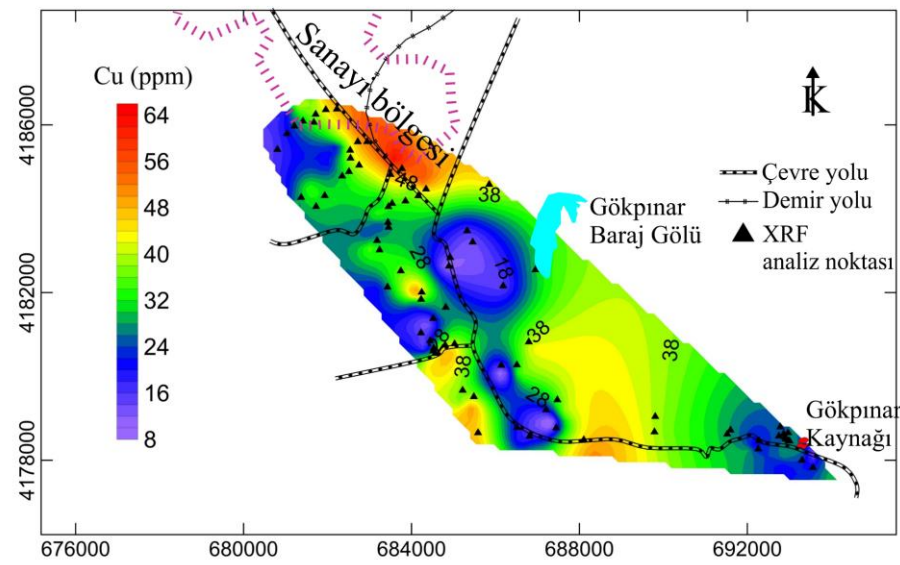
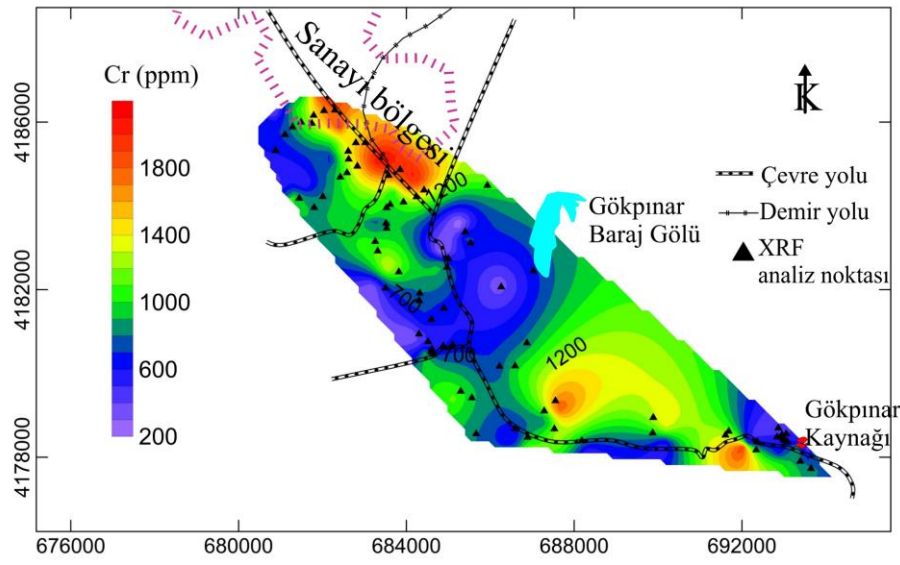
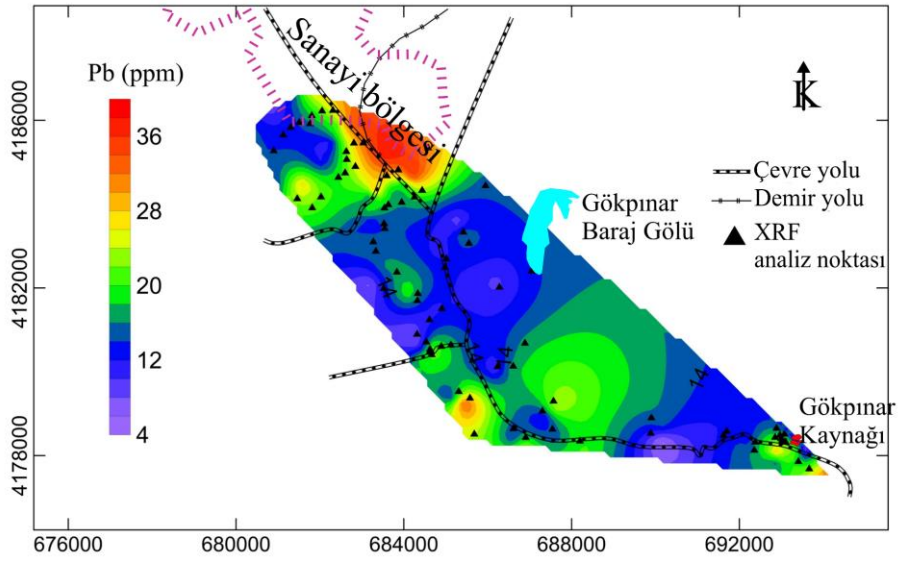
**Tablo 6.2:** Çalışma alanının kirlilik durumunun belirlenmesi için uygulanan parametreler

CF	PLI	Igeo
$CF \leq 1$ (Düşük kontaminasyon)	$PLI \leq 1$ (Kirlenmemiş)	$0 \leq I_{geo} \leq 1$ (Kirlenmemiş)
$1 < CF \leq 3$ (Orta derecede kontaminasyon)	$1 < PLI \leq 2$ (Hafif kirli)	$1 \leq I_{geo} \leq 2$ (Orta derecede kirli)
$3 < CF \leq 6$ (Önemli ölçüde kontaminasyon)	$2 < PLI \leq 3$ (Orta derecede kirli)	$2 \leq I_{geo} \leq 3$ (Çok kirli)
$CF \geq 6$ (Çok yüksek kontaminasyon)	$PLI \geq 3$ (Çok kirli)	$4 \leq I_{geo} \leq 5$ (Aşırı derecede kirli)

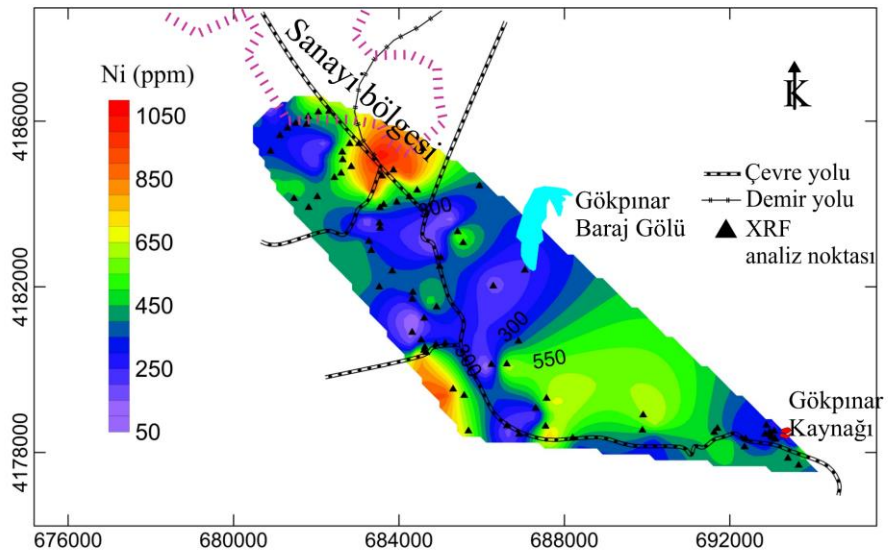
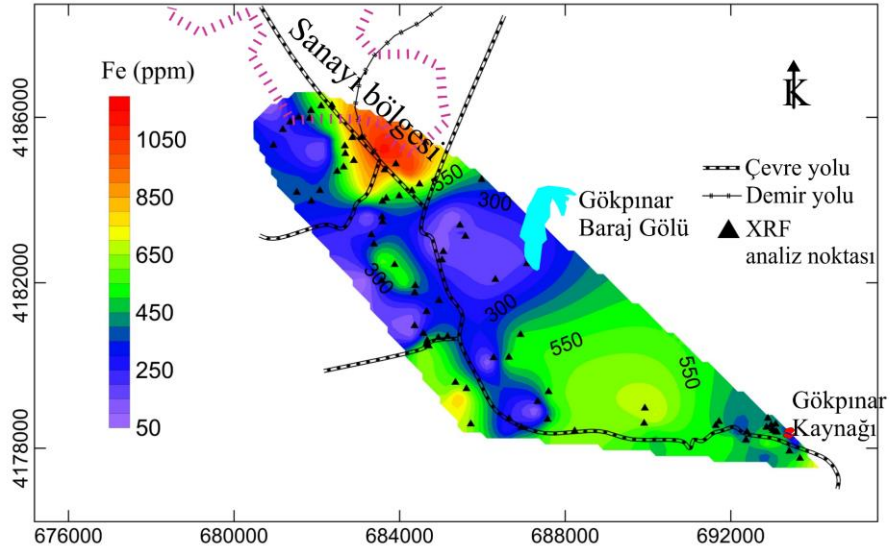
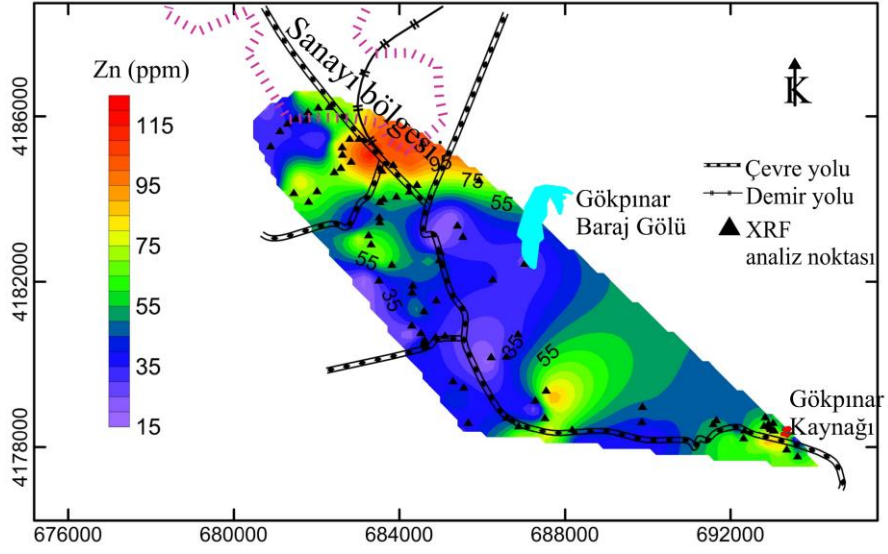
Denizli il merkezinden toplanan numunelerin ağır metal içerikleri ve koordinatları, Tablo (6.3)'de sunulmuştur. Cr, Fe, Ni, Cu, Pb ve Zn için konsantrasyon (ppm) sırasıyla 80-2047, 36-1134, 69-1040, 6-64, 5-38 ve 12,7-117,3 aralıklarda değişir. Diğer metallerde olduğu gibi Cu, çoğunlukla çalışma alanının kuzey kesimlerinde yer alan alçak yükselti bölgelerinde yağmur suyu yardımıyla taşınarak daha şiddetli anomaliler göstermiştir. Cr, endüstriyel tesislerde (kimya, metalurji fabrikaları vb.) en çok kullanılan metallere aittir. Üst topraktaki varlığının %70 bu tesislerden kaynaklandığı bilinir (Johnson ve diğ. 2006, Kulahci 2007). Cu, Pb ve Zn, araçların farklı parçalarının ve motorlarının aşınmasının yanı sıra egzoz gazlarını

oluşturan yanma reaksiyonlarının sonucu olarak trafikte yaygın olarak salınır (Lu ve diğ. 2007, Canbay ve diğ. 2010). Diğer elementlerle kaynakları paylaşırken Ni konsantrasyonu kentsel atıklar tarafından teşvik edilmektedir (Bibi ve diğ. 2007). Şekil (6.19) ve şekil (6.20), XRF analizi ile belirlenen ağır metallerin şehir içinde ve Gökpınar kaynağı çevresinde dağılım haritalarını göstermektedir. Cu, diğer elementlerin konsantrasyonlarına göre daha düşük olmasına rağmen, en yaygın element olarak görülmüştür. Cr, şehir sanayi bölgesinin yanı sıra Gökpınar baraj gölü alanını da kaplayarak, Cu'dan sonra yayılım açısından ikinci sıradadır. Taşıma araçlarında oluşan yakıt yanmasından ileri yayılan Pb, Antalya yolunun etrafında özellikle Gökpınar kaynağının çevresinde anomaliler oluşturmuştur (Şekil 6. 19) (Lu ve diğ. 2007). Fe, araştırma alanının kuzeybatı kesiminde demiryolunun varlığıyla ilgili olabilecek ağır bir konsantrasyon göstermiştir. Ni, 68,5 ile 1040ppm arasında değişen konsantrasyonlar göstermiştir. Sanayi bölgesi ve Gökpınar baraj gölü çevresinde yüksek yoğunluk göstermiştir. Zn, çalışma alanının kuzey kesiminde, şehir merkezinde ve Gökpınar kaynağının yakınında üç maksimum anomali göstermiştir (Şekik 6.20).





Şekil 6.19: XRF analizlerine göre ağır metal (Pb, Cr, Cu) içeriklerinin çalışma alanındaki dağılım haritaları.



**Şekil 6.20:** XRF analizlerine göre ağır metal (Zn, Fe, Ni) içeriklerinin çalışma alanındaki dağılım haritaları

**Tablo 6.3:** Toplanan Numuneler (N<sup>o</sup>: Numune numarası), Koordinatları (X, Y), ve kimyasal sonuçlar.

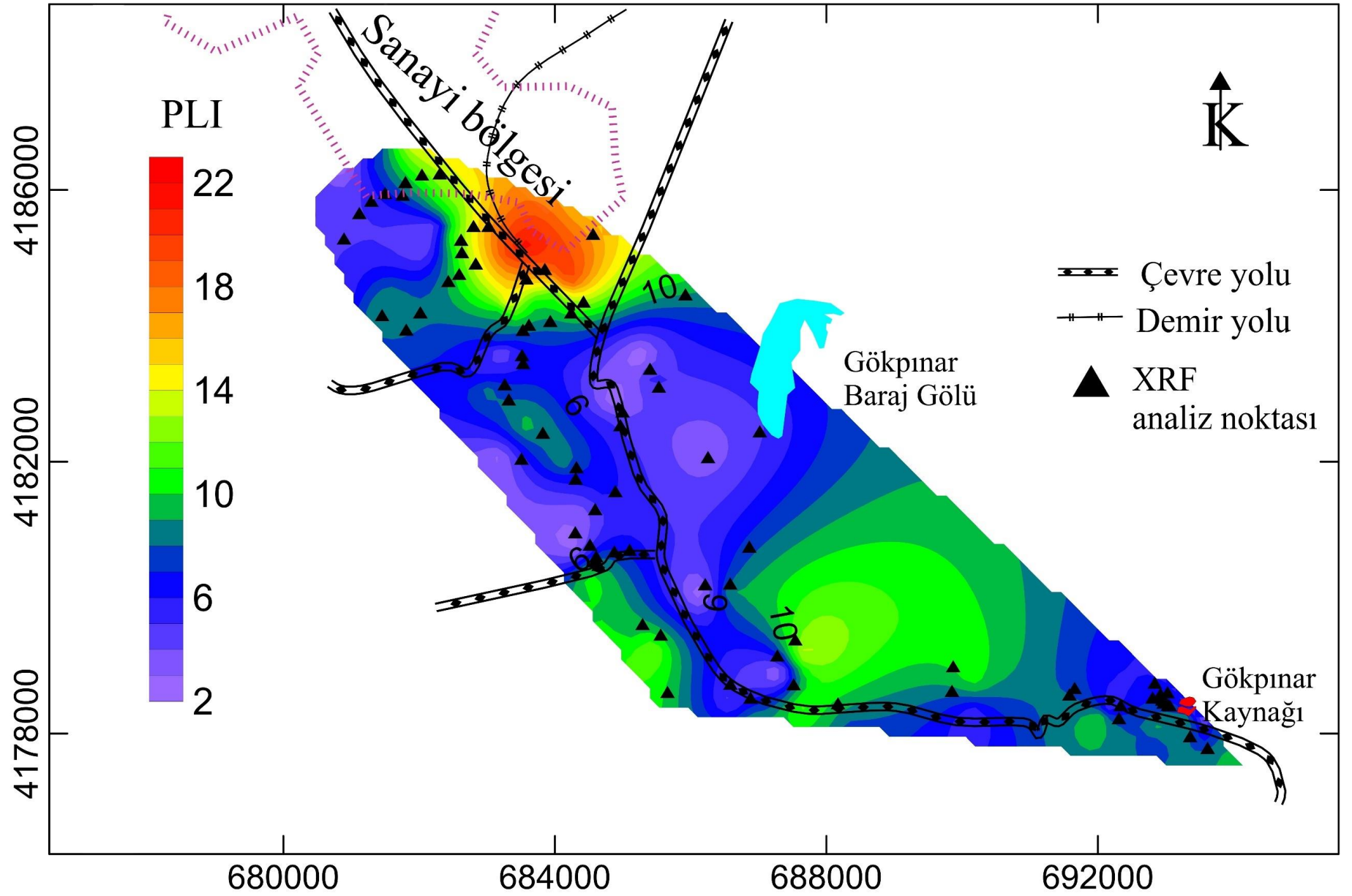
N <sup>o</sup>	X (UTM, 35S)	Y (UTM)	$\chi_{HF}$ (10 <sup>-8</sup> m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> )	$\chi_{LF}$ (10 <sup>-8</sup> m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> )	$\chi_{Fd}$ (%)	Cr (ppm)	Fe (ppm)	Ni (ppm)	Cu (ppm)	Pb (ppm)	Zn (ppm)	PLI
1	685556	4178294	123	129.5	5.02	812	670	693.3	48.7	23.5	33.1	10.073
2	690168	4178717	152.5	158.3	3.66	1375	712	649.2	36.4	15.1	47.3	10.372
3	686567	4180066	131.3	136.7	3.95	977	525	662.1	35.6	17.3	38.2	8.966
4	687591	4178421	165.3	168.6	1.96	1265	588	782.4	36.8	14.4	82.6	11.308
5	685152	4179402	101.2	102.9	1.65	1142	606	915.3	36.7	14.2	39.8	9.9057
6	688308	4178110	87.2	92.9	6.14	481	614	322.3	51.3	20.6	35.1	7.6169
7	685444	4179234	134.3	143.6	6.48	955	820	646.9	50.8	34	43.9	12.278
8	684944	4180615	83.5	90.2	7.43	633	476	337.8	47.3	19	32.5	7.3581
9	690150	4178315	123	126	2.38	489	481	315.2	37.2	4.6	34	5.0021
10	684384	4180428	127	130.1	2.38	704	477	324.9	42	17.6	42.7	7.5798
11	684698	4180586	105.1	109.9	4.37	522	540	400.5	46.6	21.4	43.2	8.1184
12	684443	4180368	98.3	102.6	4.19	971	623	833.1	43	19.3	40.5	10.423
13	693425	4178446	90	94	4.26	430	288	256.8	23.5	6.3	31.9	4.0512
14	692873	4178082	305	333	8.41	660	590	323.9	27.8	28.6	91.1	9.212
15	694277	4177386	184	202	8.91	470	605	295.8	25.7	29.5	89	8.3746
16	692847	4177872	154	161	4.35	1040	352	431	19.6	15.2	61.1	7.3098
17	692130	4178361	88	92	4.35	490	343	305.9	19.8	11.9	45	5.2428
18	692045	4178257	250	263	4.94	1930	525	483.9	28	14.9	66.2	9.965
19	693994	4177575	310	330	6.06	760	722	363.5	30.1	30.4	69.1	9.8239
20	693631	4178291	64	67	4.48	720	394	424.6	21.9	12.8	44.2	6.411
21	693389	4178207	165	173	4.62	950	498	435.6	26.5	21.8	90.1	9.5115
22	693515	4178266	10	11	9.09	80	36	70.9	7.8	6.3	12.7	0.9861
23	693545	4178174	87	93	6.45	490	268	251.8	15.3	11	37.7	4.331
24	693569	4178123	120	123	2.44	580	319	479.8	15.1	9.7	34.5	5.0406
25	693638	4178085	45	49	8.16	260	141	155.2	7.8	6.4	21.7	2.1399
26	693666	4178078	101	105	3.81	810	445	537.1	22.2	12.8	45.9	7.1227
27	684067	4180901	49.1	49.8	1.41	285	128	185.3	18	8.3	27.4	2.888
28	684305	4180699	36.8	37.6	2.13	438	112	138.6	13.6	7.5	18.3	2.4711
29	684403	4180509	75.9	78.9	3.80	834	402	416.5	27.4	13.7	40	6.8628
30	686877	4180668	134.6	140.6	4.27	853	520	367.2	42.7	16.8	33.7	7.7846
31	687047	4182548	58.3	60.1	3.00	693	197	239.5	31.6	13.6	28.1	4.9145
32	686209	4182127	55.9	57.1	2.10	318	168	174	15.2	9.3	36.8	3.2291
33	684087	4181963	130.5	138.6	5.84	753	560	384	53.7	19.5	41	8.7219
34	684713	4181572	56.5	60.5	6.61	683	340	488	28.4	11.6	38.2	6.3548
35	684829	4182870	32.8	32.8	0.00	184	103	128	15.2	10.7	18.4	2.2092
36	685272	4183566	27.3	28	2.50	163	67	104	18.4	8.3	17.6	1.8584
37	685846	4184778	162.3	173.4	6.40	1216	498	435	46.8	16.4	95.2	10.692
38	684000	4184483	222.2	224.9	1.20	1752	632	494	37.8	19.4	74.1	11.663
39	684200	4184660	449.2	451.9	0.60	2063	1053	935	55.6	35.6	98.5	19.576
40	683574	4185194	513.3	516	0.52	2084	1134	1040	63.7	38.1	104.7	21.444
41	683275	4185039	464.9	467.4	0.53	2065	946	947	49.2	32.8	117.3	19.102
42	683317	4184283	370.4	372.1	0.46	1285	836	963	33.6	29.4	82.4	14.364
43	683664	4184346	151.4	154.7	2.13	1013	683	604	38.2	18.4	63.5	10.624
44	683219	4184199	219.1	222	1.31	1084	784	483.6	29.5	16.5	53	9.4902
45	683208	4183790	153.7	154.9	0.77	1074	305	437	34.6	19.5	46.2	7.9818
46	682926	4183312	89	90.6	1.77	973	230	274	24.6	13.6	33.5	5.4905
47	682992	4183067	149.2	152	1.84	1093	268	450	35.7	16.1	77	8.4214
48	683222	4183659	67.2	68.8	2.33	713	103	138.6	23.6	12.9	40.3	3.9038
49	683198	4182099	40.2	42.5	5.41	307	71	416.5	20.5	7.6	18	2.8403
50	683543	4182523	172.1	173.2	0.64	1362	592	367.2	33.6	16.3	69	9.5938
51	684353	4185766	369.1	373.8	1.26	1167	862	762	43.6	31.6	110.5	15.332
52	682018	4184996	91.4	92.7	1.40	832	173	174	21.4	11.8	43.6	4.574
53	682192	4185113	59.2	60.8	2.63	593	166	384	26.1	13.5	38.5	5.1776
54	682459	4185283	180.9	183.7	1.52	1258	542	488	39.2	18.4	85.2	10.822
55	682234	4185467	80.9	82.7	2.18	977	195	128	19.3	10.9	29.7	4.0621
56	682223	4185671	143.3	145.4	1.44	1265	522	371	37.1	17.3	41.9	8.6277
57	682422	4185893	249.3	250.8	0.60	1945	582	435	45.2	21.4	74.5	12.084
58	682667	4185897	317.3	317.3	0.00	1284	863	494	52.8	32.5	55.3	13.04
59	681279	4186403	106	108.2	2.03	955	284	396	36.2	13.8	39.4	6.8747
60	681324	4186611	112.7	113.3	0.53	633	371	284	45.3	12.6	28.5	6.015
61	681592	4186732	191.5	192.4	0.47	972	415	538	28.5	21.7	97.3	9.8955
62	681876	4186749	278	282.2	1.49	1947	639	753	48.3	27.3	76.9	14.714
63	680995	4186432	58.4	58.5	0.17	522	96	173	19.4	9.2	36.1	3.3233
64	680775	4186305	20.7	21.2	2.36	178	63	96.2	15.3	8.4	18.3	1.7909
65	680580	4186106	82.5	83	0.60	731	183	437	17.3	11.5	29.4	4.7751
66	680330	4185692	60.7	62.5	2.88	660	389	274	12.5	15.3	36.2	5.1243
67	680948	4184442	121.8	122.8	0.81	470	384	482	18.4	13.6	27.1	5.3262
68	681336	4184204	163.8	165.1	0.79	1040	380	435	28.5	22.54	69.4	8.893
69	681564	4184488	176.8	178.6	1.01	490	375	494	34.6	27.4	82.5	8.7606
70	684389	4181278	72	75.4	4.51	683	153	96.5	11.6	10.7	53.7	3.4489
71	684072	4181776	145.5	147	1.02	760	367	284	27.4	18.5	41.3	6.5466
72	686163	4180054	40.3	41.8	3.59	720	74	68.5	7.3	9.5	17	1.9877
73	684794	4182645	77.9	78.8	1.14	950	185	341	9.6	12.6	53	4.8877
74	685415	4183273	90.6	92.1	1.63	762	218	604	13.5	16.3	29	5.4133
75	685556	4178294	123	129.5	5.02	490	349	483.6	36.8	18.4	38	6.8824
76	686570	4178431	93.2	98.4	5.28	580	258	173	18.4	13.8	51	4.7562
77	686895	4178203	162.9	169.8	4.06	1175	486	274	29.5	23.5	75.4	9.0101
78	687329	4178891	44.6	49	8.98	810	63	183	6.1	11.2	20	2.4769
79	687619	4179155	207.2	210.3	1.47	1835	547	653	38.4	24.1	93.5	13.272

Toplanan örneklerde Cr, Fe, Ni, Cu, Pb ve Zn ortalama konsantrasyonları sırasıyla 885.6, 425, 418, 30, 17 ve 51 ppm'dir. Analiz edilen ağır metal elementlerin Varyasyon Katsayısı (CV), ortalama değer ve Standart Sapma (SD) gibi istatistiksel parametreler Tablo (6.4)'te verilmiştir. Manyetik süseptibilite ve frekans bağımlılık varyasyon katsayıları 71 ve 76, manyetik süseptibilite değerlerini yüksek farklılıkta olduğuna işaret etmiştir. Kimyasal analizlerin istatistik sonuçları yüksek CV değerleri ile insan kaynaklı ağır metal yükünün varlığını agösterir (Liu ve diğ. 2016).

**Tablo 6.4:** Standart Sapma (SD), Varyasyon Katsayısı (CV) ve toplanan numunelerdeki ağır metal konsantrasyonlarının ortalama değerleri.

	$\chi_{LF}$ ( $10^{-8}m^3kg^{-1}$ )	$\chi_{FD}$ (%)	Cr (ppm)	Fe (ppm)	Ni (ppm)	Cu (ppm)	Pb (ppm)	Zn (ppm)
<b>SD</b>	104	2	472	250	227	13	8	26
<b>CV (%)</b>	71	76	53	59	54	44	45	50
<b>Ortalama</b>	146	3	886	425	419	30	17	51

PLI ve CF hesaplamalarında baz alınan numune Gökpınar kaynağındaki kireçtaşlarından seçilmiştir. Numunelerin Kontaminasyon faktörleri maksimum değeri Fe (30.98) göstermiştir. Diğer metaller şu şekilde sıralanmıştır: Cr (25.86), Ni (14.71), Zn (9.24), Cu (7.96) ve Pb (5.86). Çalışma alanı için hesaplanan PLI ortalama değeri 7,7 ile çok kirli olarak bulunmuştur. XRF analizi için seçilen numunelerden 69'u çok kirli, 6'sı orta, 3'ü hafif ve 1'i kirli olarak bulunmuştur. PLI kontur haritasına (Şekil 6.21) bakıldığında, iki ana kirlenmiş bölge belirlenmiştir: Biri sanayi bölgesini çevreleyen ve diğeri Gökpınar kaynağından başlayarak Antalya yolu çevresi.



Şekil 6.21: Numunelerdeki ağır metal içeriği kullanılarak hesaplanan PLI

CF ve PLI değerlendirmesine ek olarak, seçilen numuneler için jeoakümülyasyon indeksi hesaplanmıştır. CF ortalama değerlerine bakıldığında, Pb Orta derecede kontaminasyon, Cu, Zn ve Ni önemli ölçüde kontaminasyon, Fe ve Cr çok yüksek kontaminasyon olarak değerlendirilir (Tablo 6.5). Jeoakümülyasyon değerleri elementlere göre bu şekilde sıralanabilir: Pb < Cu < Zn < Ni < Fe < Cr. Numunelerin% 70'i çok ve aşırı derecede kirli olarak değerlendirilmiştir.

**Tablo 6.5:** Kontaminasyon faktörü (CF) ve jeoakümülyasyon indeksinin (I<sub>geo</sub>), ortalama ve maksimum değerleri

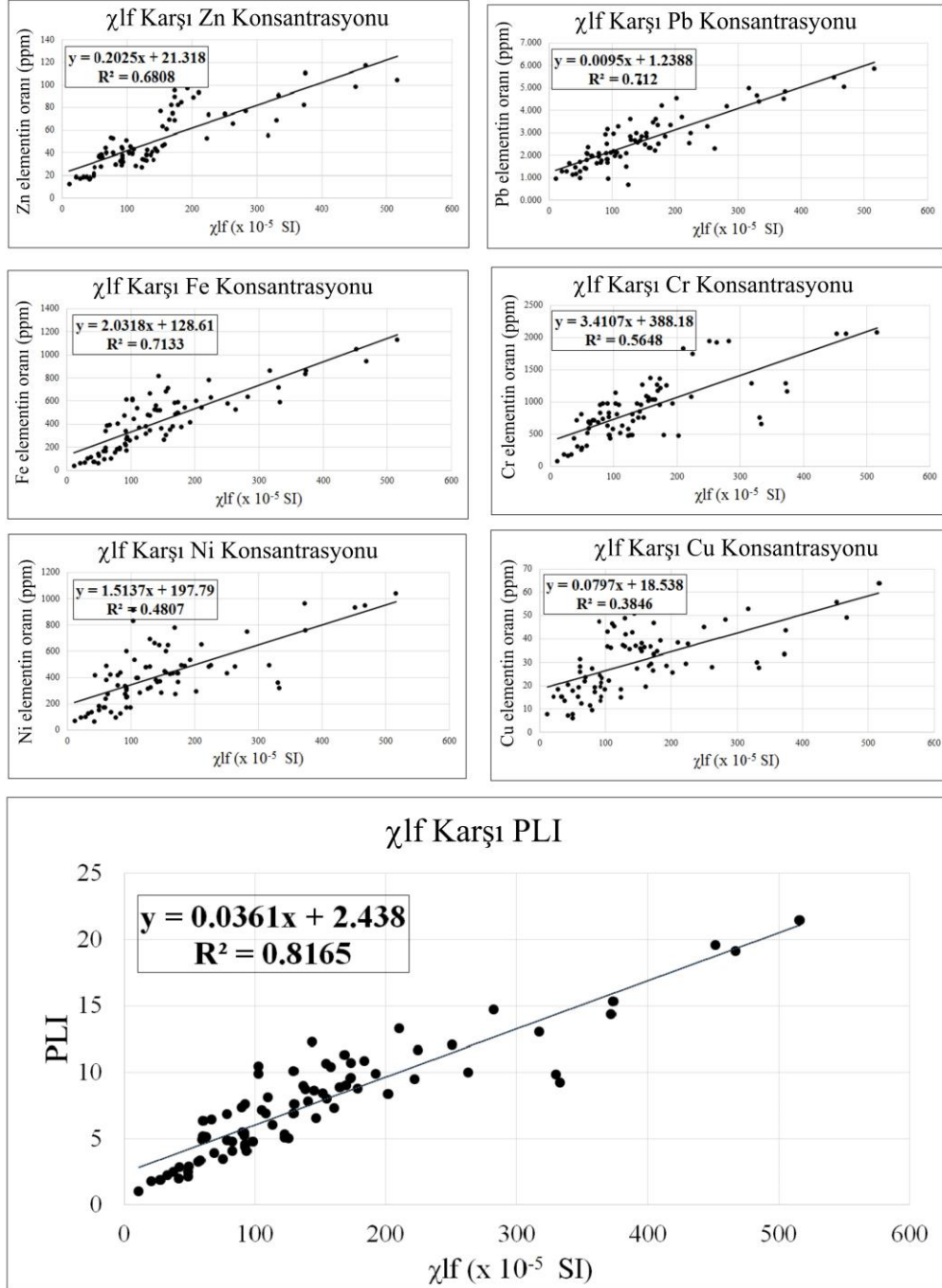
	CF		I <sub>geo</sub>	
	Ortalama	Max	Ortalama	Max
<b>Cr</b>	10.99	25.86	2.66	4.12
<b>Fe</b>	11.61	30.98	2.64	4.39
<b>Ni</b>	5.92	14.71	1.74	3.29
<b>Cu</b>	3.77	7.96	1.2	2.44
<b>Pb</b>	2.63	5.86	0.71	2.01
<b>Zn</b>	4	9.24	1.24	2.62

### 6.3.3.1 Çok Değişkenli İstatistik Analizi

Manyetik süseptibilite ölçümleri ve kimyasal analizlerinin sonuçları kullanılarak Excel ve Statsoft Statistica programların yardımıyla çok değişkenli istatistik analizi yapılmıştır. Elde edilen veriler, scatter diyagramları, temel bileşen (PCA: Principal Component Analysis) ve kümeleme (CA: Cluster Analysis) analizlerine tabi tutularak değerlendirilmiştir. XRF analizler ve PLI değerlerinin  $\chi_{LF}$  ölçüleri ile korelasyon sabitleri hesaplanmıştır (Şekil 6.22). Çalışma alanının ağır metal kirliliğinin araştırmasında uygulanmış olan manyetik süseptibilite yönteminin sonuçları XRF analiz sonuçlarıyla yüksek korelasyon göstererek bu yöntemin bu tür çalışmalarda etkili olduğunu göstermiştir (Tablo 6.6). Şekil (6.22) bakıldığında PLI,  $\chi_{LF}$  ile diğer elementlerle doğrusal olarak yüksek korelasyon göstermiştir.

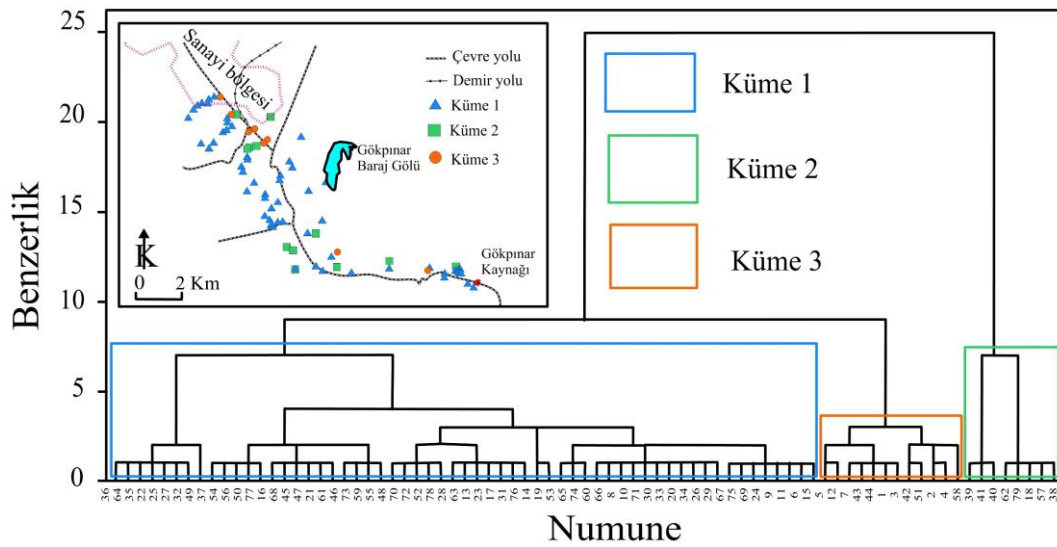
**Tablo 6.6:** Çalışma alanı için ölçülen ve hesaplanan değişkenlerin Pearson korelasyon matrisi (R).

Değişken	$\chi_{lf}$	Cr	Fe	Ni	Cu	Pb	Zn	PLI
$\chi_{lf}$	1							
Cr	0.7516	1						
Fe	0.8446	0.6895	1					
Ni	0.6933	0.6806	0.7907	1				
Cu	0.6202	0.5776	0.7997	0.6439	1			
Pb	0.8438	0.6004	0.8274	0.6542	0.6963	1		
Zn	0.8251	0.6993	0.6797	0.5867	0.4944	0.7408	1	
PLI	0.9036	0.8411	0.9283	0.8557	0.8009	0.8662	0.8160	1



**Şekil 6.22:** Ağır metal içerikleri ve PLI ile manyetik süseptibilite doğrusal regresyon eğrileri

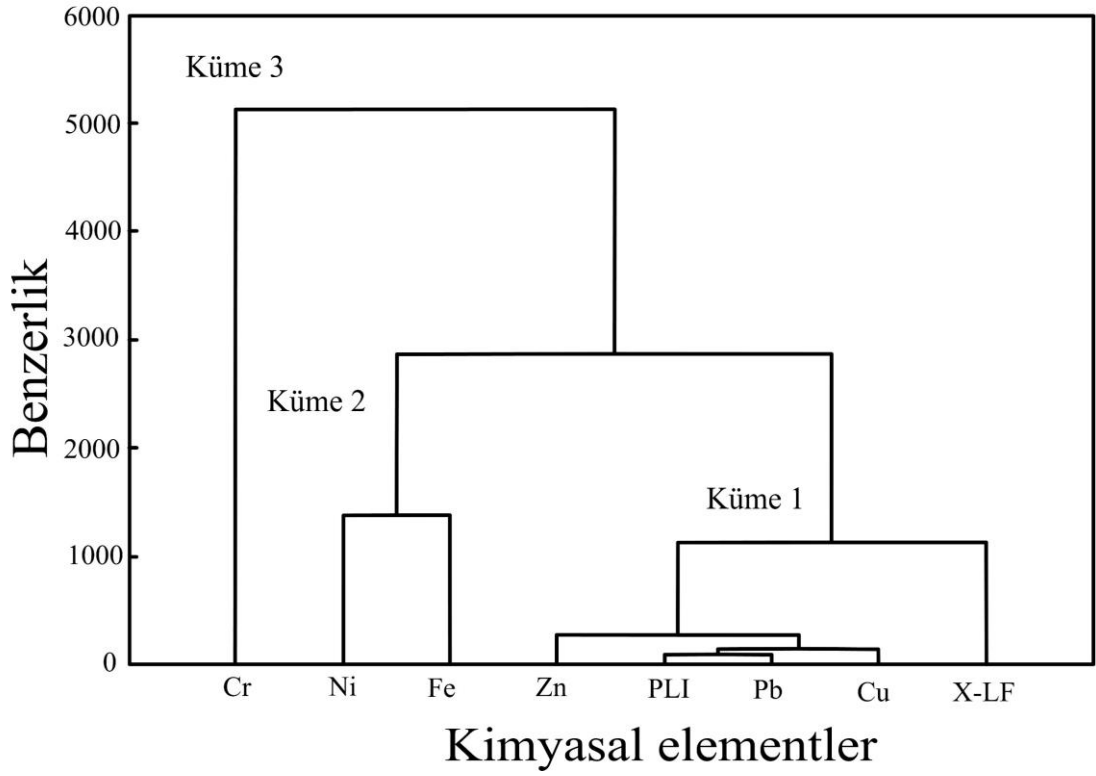
Kümeleme analizi, veri setlerindeki benzerlik oranlara dayanarak çok değişkenli veri kümelerini gruplandırmaya olanak veren bir yöntemdir. Şekil (6.23), kümeler halinde benzer özelliklere sahip örneklerin kombinasyonlarını göstermektedir. Kümeleme işleminden sonra çalışma alanından toplanan verilerin benzerlik oranlarına göre üç kümeye ayrıldığı gözlenmektedir. Birinci kümede veriler yaklaşık 75% almaları ile çalışma alanının numuneleri benzerlik göstermiştir. Bu kümenin numuneleri, Antalya yolu, Gökpınar su kaynağı ve sanayi bölgesi çevresinde görülmüştür. İkinci ve üçüncü kümeler dağınık bir numune dağılımı göstererek toplam numunelerin 25%'inden oluşmuştur.



Şekil 6.23: XRF sonuçları, PLI ve manyetik süseptibilite ölçümlerini kullanarak toplanan 79 örnek için hiyerarşik küme analizinin sonuçlarını gösteren dendrogram.

Bu çalışmada kullanılan manyetik süseptibilite, PLI ve ağır metallerin numunelerdeki muhtevalarına bağlı olarak kümeleme analizi yapılmıştır. İşlemin sonucu dendrogram şeklinde üç kümenin oluştuğunu görülmektedir. Birinci kümenin Zn, Pb ve Cu ihtiva ederek bu elementlerin Denizli topraklarının kirlenmesinde en etken unsurlar oluşunu göstermiştir. Küme 2 ve 3'te yer alan elementler kirlilik bakımından diğer elementlere göre daha az etken olduğunu göstermektedir (Şekil 6.24).

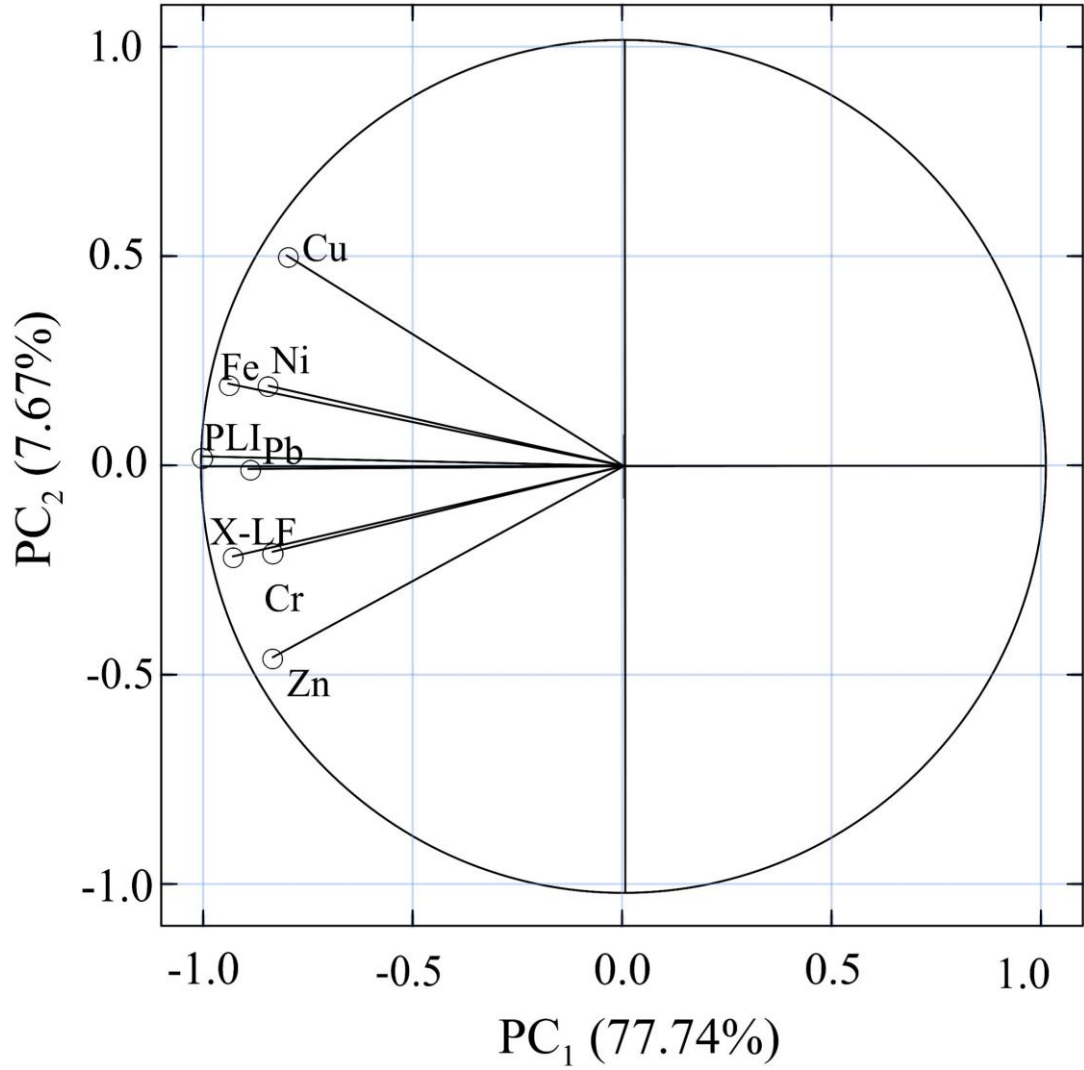




**Şekil 6.24:** Altı element (Cr, Ni, Fe, Zn, Pb, Cu, PLI ve  $\chi$ LF) için hiyerarşik küme analizinin sonuçlarını gösteren dendrogram.

Temel bileşen analizine göre birinci bileşen PC1 sonuçların %77.74 birikmiş varyansın açıkladığını gösterirken ikinci temel bileşen ise %7.67 açıklamıştır. Her iki temel bileşen birikmiş varyansın %85.74 açıklamaktadır (Şekil 6.25).

## PC<sub>1</sub> ve PC<sub>2</sub> : 85.41%



**Şekil 6.25:** Denizli ili toprak örneklerinde analiz edilen elementlerin (Cr, Ni, Fe, Zn, Pb, Cu) PLI ve  $\chi$ LF temel bileşen analizi.

Sonuç olarak manyetik süseptibilite yöntemi, ağır metal kirliliği tespitinde etkin bir yöntem olduğunu kanıtlamıştır. Çalışma alanında son yıllar sanayi gelişimi ve nüfus artışı ile birlikte orantılı olarak ağır metal kirliliği artmaktadır. Araştırılan metallerin aralarında kirlilik bakımında en yüksek etken unsur çinko olduğunu kanıtlanmıştır. PLI hesaplamalarından elde edilen sonuçlar 7.7 bir oran göstermekle çalışma alanının ağır kirlilik sahip olduğuna görülmüştür.

## 7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Gökpınar kaynağının Çevresindeki yeraltı suyu akış yönleri belirlenmesinde kullanılmış olan Elektromanyetik, GPR ve özdirenç yöntemleri etkili olduklarını görülmüştür. Elde edilen kesitler birbiriyle uyum göstererek yeraltının yapısı ortaya çıkarılmıştır. Kaynağın çevresindeki tektonizma ve karşılaşma sonucu olan fay, kırık ve boşlukları, yeraltı suyu kaynağa doğru kanalize edildiğini görülmüştür. GPR ve elektromanyetik profilleri, özdirenç profillerine göre daha sığ derinlik göstermelerine rağmen doğrulama ve sonuçların güvenilirliği artırmak için kullanılabilir. Sahanın jeolojik ve yapısal olarak ön değerlendirmesi, jeofizik profillerin konumları ve uzanımlarının belirlenmesinde büyük önem taşımaktadır. Sahadan toplanan verilerin laboratuvar ortamında modellenmesinin sonucunda yeraltının uygulanmış olan yöntemlerin tepkisinin hakkında bilgiler elde edilebilir. Jeofizik sonuçlara göre, hemen hemen tüm ERT profillerinde gözlenen fay, kaynağı besleyen yeraltı suyunun sağlanmasında önemli rol oynamaktadır. Kesitlerin yorumları, sığ ve derin yeraltı suları arasında fay ve karstik oluşumların yardımıyla doğrudan bağlantılı olduklarını görülmüştür. Bölgedeki derin yeraltı suyu ve yüzey suları ile doğrudan iletim halinde olmaları, Antalya yolundan geçen trafik sonucu ağır metal kirliliğinden etkilenebilir. Çalışma alanında görülen karstik oluşumların varlığı Antalya yolunun ve çevresinde çökme tehlikesi taşıdığını görülmüştür.

Gökpınar baraj gölünün çevresindeki yeraltı suyunun akış yönleri düşey elektrik ve mekanik sondajların verileri ışığında araştırılmıştır. Bu verilerin değerlendirilmesiyle yeraltı suyunun akışı derinliğe bağlı olarak değiştiğini görülmüştür. Sondaj verilerinden oluşturulan su tablası kontur haritası, dilimli özdirenç modeli ile uyum göstermiştir. Çalışma alanı, geçirimsiz, yarı geçirimli ve geçirimli birimlerden oluştuğunu görülmüştür. Gölün yeraltı suyu bakımından beslenmesi sağlayan akiferler, yaklaşık 15 metre kalınlığında bir alüvyon örtü tabakasına ait olduğunu gözlenmiştir. Bu tabakanın altına muhtemelen senklinal şekilli, bölgedeki yeraltı sularını ikiye ayıran bir bariyer niteliğinde geçirimsiz bir formasyon yer almaktadır. Baraj gölü besleyen yeraltı suları, derinlik ile birlikte azalırken yüzeye yakın bölgelerde daha önemle akışlar gözlenmiştir. Yeraltı suyu akışları, çalışma alanının Güney-Batı, Kuzey-Batı ve Güney-Doğu kısımlarından kaynaklandığını görülmüştür.

Denizli il merkezi ağır metal kirlilik durumu manyetik süseptibilite ölçümleri ve XRF analizlerin değerlendirilmesiyle belirlenmiştir. Çalışma sahasından toplanan numunelerdeki Cr, Fe, Ni, Cu, Pb ve Zn ortalama içerikleri sırasıyla 885.6, 425, 418, 30, 17 ve 51 ppm olarak bulunmuştur. Gözlenen kirlilik parametrelerin yükselmelerinde, sahada bulunan oldukça geniş sanayi bölgesi ile birlikte sürekli yoğunlaşan trafik birincil rol oynamaktadır. Oluşturulan kontur haritaları, antropojenik ağır metallerin ve manyetik duyarlılık ölçümlerinin Antalya karayolu ve sanayi bölgesi ile yakından ilişkili olduğunu göstermektedir. Sanayide, çeşitli kaynağı olan kurşun, en yaygın olan kirlenici unsur olarak bulunmuştur. Bu nedenle Denizli ili merkezinde sanayi bölgesi ve trafik nedeniyle temel kirlilik unsuru kurşun olmuştur. PLI hesaplamalarından elde edilen sonuçlar 7.7 bir oran göstermekle çalışma alanının bazı kesimleri ağır kirlilik sahip olduğuna görülmüştür. Ayrıca, kirlilik parametreleri ve ağır metal konsantrasyonları, manyetik süseptibilite ölçümleriyle önemli korelasyon göstermiştir. Pearson korelasyonu, küme analizi ve temel bileşenden oluşan çok değişkenli istatistiksel analiz, Cu, Pb ve Zn'nin PLI artışında en etkili unsurlar olduklarını görülmüştür. Jeoakümülyasyon indeksi ( $I_{geo}$ ) ve kontaminasyon faktörü (CF) PLI sonuçlarıyla uyum göstermiştir. Trafik ve endüstriyel faaliyetlerle ortaya çıkan ağır metallerin bir kısmı yağmur suyu yoluyla toprağa sızılır, geri kalanı daha sonra yağmur ve rüzgarla alçak bölgelere taşınarak birikir. Önceki çalışmalarla karşılaştırıldığında, şehrin çevreye ve insan sağlığına tehlikeli tehditler oluşturabilecek ağır metal kirliliklerle giderek arttığını görülmüştür.

Cihaz denemeleri tank üzerinde iki tane röle kartını kullanılarak 8 tane elektrod kullanılabilir. Bu sayı artırabilmek için arduino ve röle kartlarını artırılması gerekmektedir. Cihazı tasarlarken karşılaşılan zorluklardan cihaz aynı anda akım ve gerilim ölçememesidir bu durumu çözmek için paralel bir şekilde gerilim kayıt sistemi oluşturulmasını önerilmektedir.

## 8. KAYNAKLAR

Annan, A.P., “Ground penetrating radar. In Near surface geophysics”, *Society of Exploration Geophysicists*, 357-438, (2005).

Archie, G., “The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics”, *Transactions of the American Institute of Mechanical Engineering*, 146, 54-62, (1942).

Arslanhan, M., “Çimento üretim proseslerinde eritiş metoduyla hazırlanmış numunelerin WDXRF analizleri ve hata etkilerinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Bursa Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, (2016).

Aydin, A. and Akyol, E., “Observing urban soil pollution using magnetic susceptibility”, *Int. J. Environ* 9, 295-302. (2015).

Aydin, A., Akyol, E. and Soyatik, N., “Detailed Microzonation Studies around Denizli, Turkey”, *International Journal of Geological and Environmental Engineering*, 8, 681-684, (2014).

Aziz, B. Q., “Survey design and procedure [online]”. (02 March 2020), <https://www.slideshare.net/King1106/lecture-13electrical-method-field-procedure>, (2015).

Bibi, M., Faruque, A. and Hiroaki, I., “Assessment of metal concentrations in lake sediments of Southwest Japan based on sediment quality guidelines”, *Environ. Geol*, 52, 625–639, (2007).

Canbay, M., Aydin, A. and Kurtulus, C., “Magnetic susceptibility and heavy-metal contamination in topsoils along the Izmit Gulf coastal area and IZAYTAS (Turkey)”, *J. Appl. Geophys*, 70, 46–57, (2010).

Chen, Y.F., Ma, J.H., Dong, Y.W., Liu, D.X. and Chen, X., “Background values of as and Hg in surface dusts in the vicinity of Kaifeng City and their application. *Environ*”, *Sci.* 35, 3052-3059, (2014).

Cosenza, P., Marmet, E., Rejiba, F., Cui, Y.J., Tabbagh, A. and Charlery, Y., “Correlations between geotechnical and electrical data: a case study at Garchy in France”, *Journal of Applied Geophysics*, 60, 165-178, (2006).

Çakır, Z., “Along-strike discontinuity of active normal faults and its influence on Quaternary travertine deposition: examples from western Turkey”, *Turkish J. Earth Sci.* 8, 67-80, (1999).

Dearing, J.A., Dann, R.J.L., Hay, K., Lees, J.A., Loveland, P.J., Maher, B.A. and O’Grady, K., “Frequency-dependent susceptibility measurements of environmental materials”, *Geophys. J. Int.*, 124, 228-240, (1996).

De Groot-Hedlin, C. and Constable, S., “Occam’s inversion to generate smooth, two-dimensional models from magnetotelluric data”, *Geophysics* 55, 1613-1624, (1990).

Dondurur, D., “Gömülü İletken Boru ve Kabloların Elektrik ve Elektromanyetik Yöntemler Kullanılarak Ortaya Çıkarılması”, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalı, (1998).

Erakman, B., Meşhur, M., Gül, M.A., Alkan, H., Öztaş, Y. and Akpınar, M., “Fethiye-Köyceğiz-Tefenni-Elmalı Kalkan arasında kalan alanın jeolojisi”, (eds: A. Güven, A. Dinçer, A.S, Derman) *Türkiye Altıncı Petrol Kong.* Ankara, (1986).

Ercan, T., Dinçel, A., Günay, E. and Türkcan, A., “Uşak Yöresinin Jeolojisi ve Volkanitlerinin Petrolojisi”, *Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Raporu*, 6354, (1977).

Geophysical Survey Systems Inc., RADAN 6.6 manual. Geophysical Survey Systems Inc, United States, 126-127, (2017).

Gungor, M., Kaya, A., Tasdelen, S., Akyol, E. and Aydın, A., “Heavy metal distribution around gokpınar springs, Denizli –Turkey”, *International Journal of Advances in Science Engineering and Technology*, 5, 74-80, (2017).

Grant, F. S., and West G. F. “Interpretation Theory in Applied Geophysics” *New York: McGraw- Hill*, 361, (1965).

Griffin, S. and Pipet, T., “Ground Penetrating Radar. *Geophysical and Remote Sensing Methods for Regolith Exploration*”, 144, 80-89, (2002).

Hakanson, L., “An ecological risk index for aquatic pollution control: a sedimentological approach”, *Water Res*, 980, 975-1001, (1980).

Johnson, J., Schewel, L. and Graedel, T.E., “The Contemporary Anthropogenic Chromium Cycle”, *Environ Sci Technol*, 40, 7060-7069, (2006).

Kalender, L. and Çiçek Uçar, S., “Assessment of metal contamination in sediments in the tributaries of the Euphrates River, using pollution indices and the determination of the pollution source. Turkey”, *J. Geochem. Explor*, 134, 73–84, (2013).

Konak, N., Akdeniz, N. and Çakır, M. H., “Çal-Çivril-Karahallı dolayının jeolojisi”, *MTA Derleme*, 8945, (1990).

Kulahci, F. and Sen, Z., “Multivariate statistical analyses of artificial radionuclides and heavy metals contaminations in deep mud of Keban Dam Lake. Turkey”, *Appl. Radiat. Isot*, 66, 236-246, (2008).

Last, W. M. and Smol, P., *Tracking Environmental Change Using Lake Sediments: Physical and Chemical Techniques*, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, (2001).

Liu, D., Ma, J., Sun, Y. and Li, Y., “Spatial distribution of soil magnetic susceptibility and correlation with heavy metal pollution in Kaifeng City, China”, *Catena*, 139, 53-60, (2016).

Li, Y.M., Ma, J.H., Liu, D.X., Sun, Y.L. and Chen, Y.F., “Assessment of heavy metal pollution and potential ecological risks of urban soils in Kaifeng City”, *China Environ. Sci.* 36, 1037-1044, (2015).

Loke, M.H., Chambers, J.E. and Kuras, O., “Instrumentation, electrical resistivity”, *Encyclopedia of Solid Earth Geophysics*, 599-604, (2011).

Lu, S.G., Bai, S.Q. and Xue, Q.F., “Magnetic properties as indicators of heavy metals pollution in urban topsoils: a case study from the city of Luoyang, China”, *Geophys. J. Int.*, 171, 568-580, (2007).

Makaroğlu, Ö., “Van Gölü Sedimanlarının Çevre Magnetizması ve Paleomağnetik Kayıtları”, Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, (2011).

McNeill, J. D., “Electromagnetic terrain conductivity measurement at low induction numbers [online]”. (October 2020),  
<http://www.geonics.com/pdfs/technicalnotes/tn6.pdf>, (1980).

JESC., “Current-Carrying Capacity of wires and cables [online]”. (October 2020),  
[http://www.khd.co.jp/en/information/pdf/Current-Carrying\\_Capacity\\_of\\_wires\\_and\\_cables.pdf](http://www.khd.co.jp/en/information/pdf/Current-Carrying_Capacity_of_wires_and_cables.pdf), (2011).

Müller, G., “Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River ”, *J. Geol.*, 2, 108–118, (1969).

Okay, A., “Geology of the Menderes Massif and the Lycian Nappes South of Denizli, Westerntaurides”, *Miner Res Expl Bull*, 109, 37–51, (1989).

Oudeika, M.S., Altinoglu, F.F., Akbay, F. and Aydin, A., “The use of magnetic susceptibility and chemical analysis data for characterizing heavy metal contamination of topsoil in Denizli city, Turkey”, *Journal of Applied Geophysics*, 183, 0926-9851, (2020<sup>a</sup>).

Oudeika, M.S., İlkimen, E.M., Taşdelen, S. and Aydin, A., “Distinguishing Groundwater Flow Paths in Fractured Rock Aquifers Formed Under Tectonic Stress Using Geophysical Techniques: Cankurtaran Basin, Denizli, Turkey”, *Int J Environ Res*, 14, 567–581, (2020<sup>b</sup>).

Özürlan, G. And Uluggerli, E. U., *Jeofizik Mühendisliğinde Elektromanyetik Yöntemler*, İstanbul, Birsen Yayınevi, İstanbul, (2005).



Palacky, G. J., Ritsema, I. L. and Jong, S. J., “Electromagnetic prospecting for groundwater in Precambrian terrains in the Republic of Upper Volta”, *Geophysical Prospecting*, 29, 932-955, (1981).

Semiz, B., “Pamukkale (Denizli) bölgesi killerinin karakteristik özellikleri ve seramik sektöründe kullanılabilirlikleri”, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 24, 1237-1244, (2018).

Şengör A.M.C. and Yılmaz Y., “Türkiye’de Tetis’in Evrimi; Levha Tektoniği Açısından Bir Yaklaşım”, *Türkiye Jeoloji Kurumu Yerbilimleri Özel Dizisi*, 1, 73, (1983).

Şimşek, Ş., “Denizli Sarayköy-Buldan alanının jeolojisi ve jeotermal olanakları” *İ.Ü. Yer Bilimleri Fakültesi Yayın organı*, 3, 145–162, (1982).

Taner, G., “Denizli bölgesi Neojen’ine ait katların stratigrafik konumlarında yeni düzenleme”, *54. Türkiye Jeoloji Kurultayı*, Ankara, Turkey, (2001).

Tasdelen, S., “Hydrogeological and Geophysical Characterization of Kozlupınar and Bentpınarı Water Springs (Denizli, SW Turkey)”, *IJRDO-JOURNAL OF APPLIED SCIENCE*, 4, 12, (2018).

T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı Meteoroloji Genel Müdürlüğü., “Türkiye son durumlar” (15 March 2021), <https://www.mgm.gov.tr/genel/meteorolojinedir.aspx> (2021).

Tharian, R.J., “A light-weight Electromagnetic Based Embedded Sensing System For Ground Water Exploration”, Master Of Science In Embedded Systems, Delft University of Technology, Faculty of Electrical Engineering, Mathematics and Computer Science, (2017).

Topal, S., “Denizli neojen istifinin stratigrafisi ve tektonik özellikleri”, Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, (2003).

Van Nostrand, R. G. and Cook, K. L., “Interpretation of resistivity data. U.S. Geol.Survey”, *Prof. Paper*, 449, (1966).

Varol, M., "Assessment of heavymetal contamination in sediments of the Tigris River (Turkey) using pollution indices and multivariate statistical techniques", *J. Hazard. Mater.*, 195, 355-364, (2011).

Weeds, R. D., "Geophysical Characterization of Sites" *Rotterdam: AA. Balkema*, 69-79, (1994).

Wenner, F., "A Method of Measuring Earth Resistivity", *Bulletin of the Bureau of Standards*, 12, 469-478, (1915).

Westaway, R., "Neogene evolution of the Denizli region of western Turkey", *Journal of Structural Geology*, 15, 37-53, (1993).