**ANKARA ÜNİVERSİTESİ**
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

# DOĞRU AKIM ÖZDİRENÇ YÖNTEMİ İLE YERALTI BARAJLARINDA YER SEÇİMİ UYGULAMASI

**Selin KAYA**

**JEOFİZİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**ANKARA**
**2020**

**Her hakkı saklıdır**

# ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

DOĞRU AKIM ÖZDİRENÇ YÖNTEMİ İLE YERALTI BARAJLARINDA YER SEÇİMİ UYGULAMASI

Selin KAYA

Ankara Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. M. Emin CANDANSAYAR

Mevcut uygulamalarda, saha gözlemi sonucu baraj yeri ekseni belirlenir. Bu eksenin memba ve mansap tarafında Jeofizik çalışma olarak, Doğru Akım Özdirenç (DAÖ) düşey elektrik sondaj ölçüleri alınmaktadır. Bu verilerin bir boyutlu ters çözümü sonucu elde edilen özdirenç modelleri ile de sondajlar önerilmektedir. Mevcut jeoloji ve jeofizik çalışmaları, vadi boyunca alüvyonun 3B dağılımının tespiti, olası gömülü boşluk, fay, blok malzeme vb. yanal ve düşey süreksizliklerin tespitinde yetersiz kalmaktadır.

Bu çalışmada, yukarıdaki belirsizliklerin giderileceği Jeofizik çalışma önerilmektedir. Başlangıçta yapılan jeoloji ve hidrojeoloji saha gözlemlerinin ardından, vadi boyunca paralel hatlarda DAÖ sondaj profil ölçüsü alınmalı ve bu verilerin 2B ve/veya 3B ters çözümü yapılmalıdır. Ters çözüm sonucu elde edilecek 2B ve 3B özdirenç modelleri ile vadi boyunca alüvyonun 3B yayılımı ortaya çıkarılır. Yine alüvyon içindeki olası gömülü boşluk, blok malzeme, vadiyi dik kesen süreksizlikler belirlenir. Jeofizik özdirenç modellerinin yorumu ile olası eksen doğrultuları seçilir. Bu eksen doğrultuları boyunca DAÖ sondaj-profil ölçüleri alınır. Bu yeni verilerin 2B ters çözümü ile olası baraj eksenleri boyunca süreksizlikler ve alüvyon geometrisi ortaya çıkarılır. Tüm bu çalışmalar sonunda eksen yeri seçilir.

Bu kapsamda, Ankara, Nallıhan' da yapılması planlanan bir yeraltı baraj yerinde DAÖ sondaj profil verileri toplanmıştır. Bu veriler 2B ve 3B ters çözüm algoritmaları ile yorumlanmıştır. Önceki çalışmalardan belirlenen eksen yerinde alüvyonun kalın olduğu tespit edilmiştir. 2B ve 3B özdirenç modellerinin yorumu sonucu önceki planlanan eksenin 100 metre mansap tarafında yeni bir eksen yeri önerilmiştir. Önceki çalışmada önerilen baraj eksenine göre, bu yeni eksen yeri daha dar ve alüvyon kalınlığı daha incedir. Ayrıca, suyun depolanacağı rezervuar alan daha genişlemiş olacaktır. Bu tez çalışmasında, yeraltı barajlarının yer seçimi, baraj yapımı ve baraj işletilmesi sırasında yapılması gereken güncel teknolojinin kullanıldığı jeofizik çalışmalar önerilmiştir.



**Kasım 2020, 49 sayfa**

**Anahtar Kelimeler:** Yeraltı Barajı, Yer Seçimi, Doğru Akım Özdirenç, 2B, 3B, Ters Çözüm

## ABSTRACT

Master Thesis

APPLICATION OF DIRECT CURRENT RESISTIVITY METHOD FOR SITE SELECTION OF UNDERGROUND DAMS

Selin KAYA

Ankara University
Graduate School of Natural andAppliedSciences
Department of GeophysicalEngineering

Supervisor: Prof. Dr. M. Emin CANDANSAYAR

The geological and geophysical studies are conducted together for underground dam site selections. In the current applications, the dam axis is determined after the field observation. As a geophysical study, Direct Current Resistivity (DCR), vertical electrical sounding (VES) data were observed in the upstream and downstream part of the defined dam axis. Drilling locations were defined according to the resistivity models obtained from one-dimensional inversion of VES data. The currently used geological and geophysical studies were insufficient to define lateral and vertical discontinuities, such as the three dimensional (3D) distribution of the alluvium unit along the valley, the possible buried cavity, fault, block material, etc.

In this study, we suggest a new geophysical study that eliminates the above-mentioned uncertainties. After the geological and hydrogeological field observations, DCR sounding profiling data should be collected in parallel lines along the valley and they are inverted by using two dimensional (2D) and/or 3D inversion algorithms. The 3D structure of the alluvium unit along the valley is revealed from interpretation of those 2D and/or 3D resistivity model that is obtained from the inversion. In addition to this, possible buried cave, block material, and the discontinuities that are crossing the valley can be determined. The possible dam axes are selected after the interpretation of resistivity models. The DCR sounding profiling data are collected along the defined possible dam axes that are perpendicular to the valley. With the 2D inversion of these new data, possible discontinuities along the dam axes and alluvial geometry are revealed. At the end of all these studies, the axis location is chosen.

In this context, DCR sounding profiling data were collected at an underground dam site planned to be built in Nallıhan, Ankara. These data are interpreted with 2D and 3D inversion algorithms. It was determined that the alluvium was thick at the axis location determined from previous studies. As a result of the interpretation of the 2D and 3D resistivity models, a new axis location is proposed 100 meters downstream of the previously planned axis. This new axis location is narrower and alluvial thickness is thinner than the previously purposed dam axis location. In addition, the reservoir area where the water will be stored will be wider. In this thesis, geophysical studies using current technology, which should be done during the site selection of underground dams, dam construction, and dam operation, are proposed.



**November 2020, 49 pages**

**Key Words:** Underground Dam, Site Selection, Direct Current Resistivity, 2D, 3D, inversion

## TEŞEKKÜR

Ankara Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalında yapmış olduğum Yüksek Lisans Tez çalışmam süresince her türlü ilgi ve koşulsuz desteğini gördüğüm, beni her konuda yönlendiren danışman hocam Sayın Prof. Dr. M. Emin CANDANSAYAR'a (Ankara Üniversitesi Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalı) sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmamda hoşgörüsünü ve yardımlarını esirgemeyen Sayın Araş. Gör. Dr. N. Yıldırım GÜNDOĞDU'ya teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam süresince hayatıma yön veren, yardımlarını, deneyimlerini ve desteğini gördüğüm Giresun Üniversitesi Öğretim Üyesi değerli Prof. Dr. Ahmet APAYDIN'a teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmam süresince yardımlarını esirgemeyen DSİ 5. Bölge Müdürlüğünde çalışan mesai arkadaşlarım Sibel DEMİRCİ AKTAŞ, Nurşen ŞAHİN, Berna TOPUZ, Harun ÖZGÜR'e ve Şube Müdürüm Emrah İHSANOĞLU'na teşekkürlerimi sunarım.

Her alanda desteklerini esirgemeyen değerli aileme saygı ve sevgilerimi sunuyorum.

Selin KAYA
Ankara, Kasım 2020

# İÇİNDEKİLER

**TEZ ONAY SAYFASI**
**ETİK** ..... **i**
**ÖZET** ..... **ii**
**ABSTRACT** ..... **iii**
**TEŞEKKÜR** ..... **iv**
**SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ** ..... **vi**
**ŞEKİLLER DİZİNİ** ..... **vii**
**ÇİZELGELER DİZİNİ** ..... **ix**
**1. GİRİŞ** ..... **1**
**2. YERALTI BARAJI** ..... **4**
**2.1 Yeraltı Barajlarının Yer Üstü Barajlarına Göre Üstünlük ve Zayıflıkları** ..... **6**
**2.2 Yeraltı Barajlarından Suyun Elde Edilmesi** ..... **7**
**2.3 Yeraltı Barajlarında Yer Seçimi** ..... **8**
**2.4 Türkiye'de Yeraltı Barajı Uygulamaları** ..... **11**
**2.4.1 Çorum-İskilip yeraltı barajı** ..... **12**
**2.4.2 Ankara-Elmadağ Kargalı yeraltı barajı** ..... **13**
**2.5 Dünyada Yeraltı Barajı Uygulamaları** ..... **14**
**3. MATERYAL VE YÖNTEM** ..... **16**
**3.1 DAÖ Yöntemi** ..... **17**
**3.2 DAÖ Veri Toplama Teknikleri ve Geleneksel Elektrot Dizilimleri** ..... **19**
**3.3 DAÖ Yönteminde İki Boyutlu (2B) ve Üç Boyutlu (3B) Düz ve Ters Çözüm** ..... **20**
**4. ARAŞTIRMA VE BULGULAR** ..... **23**
**4.1 Çalışma Alanı** ..... **23**
**4.2 Çalışma Alanının Jeolojisi** ..... **25**
**4.3 Veri Toplama** ..... **28**
**4.4 DAÖ Verilerinin 2B Ters Çözümü** ..... **30**
**4.5 DAÖ Verilerinin 3B Ters Çözümü** ..... **36**
**5. BULGULAR** ..... **38**
**6. SONUÇLAR** ..... **44**
**KAYNAKLAR** ..... **46**
**ÖZGEÇMİŞ** ..... **49**

## SİMGELER DİZİNİ

| | |
|---|---|
| E | Elektrik Alan |
| $\rho$ | Özdirenç |
| $\rho_a$ | Görünür Özdirenç (GÖ) |
| $T(\lambda)$ | Dönüşük özdirenç fonksiyonu |
| $J_0(\lambda)$ | Sıfırıncı Dereceden Birinci Cins Bessel Fonksiyonu |
| $\Phi$ | Gerilim |
| I | Akım Şiddeti |
| K | Geometrik Faktör |
| $\pi$ | Pi (sabit sayı) (3.14) |
| $\lambda$ | İntegral Değişkeni |
| $\sigma$ | İletkenlik |
| $\sigma_a$ | Görünür İletkenlik |
| $\delta$ | Birim Fonksiyon |
| S | Depolama Katsayısı |
| K | Hidrolik İletkenlik |

**Kısaltmalar**

| | |
|---|---|
| DAÖ | Doğru Akım Özdirenç |
| DES | Düşey Elektrik Sondaj |
| 1B (1D) | Bir boyutlu (OneDimensional) |
| 2 B (2D) | İki boyutlu (TwoDimensional) |
| 3B (3D) | Üç Boyutlu (Three Dimensional) |
| DSİ | Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü |
| ASKİ | Ankara Su Kanalizasyon İşleri Genel Müdürlüğü |

## ŞEKİLLER DİZİNİ


Şekil 2.1 a. Zemin üzerine yükselen baraj, b. Gömülü baraj (Submersible dam) ..... 5
Şekil 2.2 Rusubat tutucu baraj ..... 5
Şekil 2.3 Yer üstü barajlarında çoğunlukla verimli araziler veya yerleşim birimleri göl altında kalarak kullanılamaz hale gelmektedir(Çorum-Obruk barajı rezervuarı)..... 6
Şekil 2.4 Yeraltı barajlarından su elde etme seçenekleri; 1: Cazibeli, 2: Keson kuyulardan pompaj, 3: Sondaj kuyularından pompaj ..... 8
Şekil 2.5 Yeraltı barajlarında işlem aşamaları ..... .10
Şekil 2.6 Türkiye'de 2000'l yıllarda inşa edilen yeraltı barajlarının dağılımı..... 12
Şekil 2.7 İskilip yeraltı barajının bulunduğu Meydan Çayı vadisinden ve gövde dolgusu inşaatından genel görünüm ..... 13
Şekil 2.8 Elmadağ yeraltı barajının bulunduğu vadisinden ve gövde dolgusu inşaatından genel görünüm ..... 14
Şekil 2.9 Brezilya'da Pernambuco eyaletinde yer üstü barajlarındaki buharlaşma sorununa çözüm amacıyla yapılan küçük ölçekli yeraltı barajı ..... 15
Şekil 2.10 Etiyopya'da kuraklık sorununa çözüm olarak önerilen tersip bendi tip projesi ..... 15
Şekil 3.1 Doğru akım özdirenç yöntemi ölçü düzeneği, akım ve dik potansiyel çizgileri ..... 18
Şekil 3.2 DAÖ yönteminde kullanılan başlıca elektrot dizilimleri..... 20
Şekil 3.3 a. 1B özdirenç modeli, b. 2B özdirenç modeli, c. 3B özdirenç modeli ..... 21
Şekil 4.1 Çalışma alanı (Ankara-Nallıhan-Kabaca) yer bulduru haritası ..... 24
Şekil 4.2 Kabaca yeraltı barajı eksen yeri ve potansiyel sulama alanının 1/25.000 ölçekli haritada gösterimi (Adapazarı H26 b4) ..... 24
Şekil 4.3 Kabaca yeraltı baraj yeri ve havzası jeoloji haritası, Jeofizik çalışma alanı (sarı dikdörtgen) (Apaydın vd. 2014) ..... 26
Şekil 4.4 Önceden planlanmış Kabaca yeraltı barajı eksen bölgesi ve mansabının sol yamaçtan görünümü..... 27
Şekil 4.5 Kabaca yeraltı barajı eksen yerindeki kumtaşlarının yakından görünümü..... 27
Şekil 4.6 Ölçüm profillerinin (P1, P2, P3, P4) çalışma alanındaki konumları ..... 28
Şekil 4.7 Ölçüm profilleri (P1, P2, P3, P4)..... 29
Şekil 4.8 AGI SuperSting R8/IP özdirenç ölçüm aleti ..... 30
Şekil 4.9 P1 profiline ait 2B özdirenç modeli, ölçülen ve kuramsal veri yapma kesitleri. (a) DCRMT2D yazılımı (b) EarthImager2D yazılımı ..... 32
Şekil 4.10 P2 profiline ait 2B özdirenç modeli, ölçülen ve kuramsal veri yapma kesitleri. (a) DCRMT2D yazılımı (b) EarthImager 2D yazılımı..... 33
Şekil 4.11 P3 profiline ait 2B özdirenç modeli, ölçülen ve kuramsal veri yapma kesitleri. (a) DCRMT2D yazılımı (b) EarthImager 2D yazılımı..... 34
Şekil 4.12 P4 profiline ait 2B özdirenç modeli, ölçülen ve kuramsal veri yapma kesitleri. (a) DCRMT2D yazılımı (b) EarthImager 2D yazılımı..... 35
Şekil 4.13 P1, P2 ve P3 profillerinde ölçülen tüm verilerin 3B ters çözümü sonucu elde edilen 3B özdirenç modeli..... 37
Şekil 5.1 P2 profili boyunca açılan sondajlarla korelasyonunu gösteren yer elektrik modeli……..40

Şekil 5.2 P2 profili için Şekil 5.1' deki 2B özdirenç modelinden türetilen jelojik kesit.....40
Şekil 5.3 P4 profili boyunca açılan sondajlarla korelasyonunu gösteren yer elektrik modeli. Beyaz kalın çizgi ile gösterilen sınır, alüvyon ve ana kaya ara yüzeyidir. B: Alüvyon konisi.....41
Şekil 5.4 P4 profili için Şekil 5.3' deki 2B özdirenç modelinden türetilen jelojik kesit.....41
Şekil 5.5 Önceki çalışılan eksen yeri ve tez çalışması sonucu yeni önerilen eksen yeri ve profil doğrultuları .....42
Şekil 5.6 Yeraltı barajı çalışmalarında Jeofizik araştırmaların işlem aşamaları.....43

# ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 4.1 Ölçüm profillerine ait bilgiler ..... 29
Çizelge 4.2 Ölçüm profillerinin 2B ters çözümüne ait veriler ..... 31

# 1. GİRİŞ

Dünya nüfusunun son 100 yılda 7 kat artış göstermesinden dolayı insanlığın temel gereksinimi olan içme suyu ihtiyacı da hızlı bir şekilde artmaya da devam etmektedir. Dolayısıyla yüzeyde tatlı su kaynaklarının depolamasının yanı sıra, dünyada ve ülkemizde tatlı su kaynaklarını depolamak amacıyla alternatif su depolama yöntemlerinden biri olan "Yeraltı Barajları" yapılmaya başlanmıştır. Yeraltı barajları, boşluk oranı yüksek olan akifer ortamlarda su depolamak ve suyun miktarını arttırmak amacıyla çoğunlukla vadi alüvyonlarında inşa edilir. Son yıllarda kaya ortamlarında ve sahil akiferlerinde de inşa edilmeye başlandığı görülmektedir.

Yeraltı barajlarında yer seçiminin, yer üstü barajlarında olduğu gibi, ön inceleme ve planlama, projelendirme, inşaat ve işletme olmak üzere aşamaları vardır. Her mühendislik projesinde olduğu gibi, işlem yer seçimi ile başlar. Yeraltı barajlarında yer seçimine yönelik çalışmalarda, su ihtiyacının tespitinin ardından genel bir hidrojeolojik ön inceleme ile baraj için uygun olabilecek seçenekler belirlenir. Daha sonra ayrıntılı hidrojeolojik, jeofizik, jeolojik araştırmalar ve sondaj yöntemleri ile en uygun yere karar verilir. Yeraltı barajlarında yer seçiminde öncelikle akiferin geometrisi, hidrolik özellikleri, beslenme koşulları ve su kalitesi en önemli hususlardır. Yer seçimi ve projelendirme yapılmadan önce, havza hidrolojisi ve hidrojeolojisi kapsamında yağış, yüzeysel akış, yeraltı suyu beslenimi konularının araştırılması gerekmektedir. Bunun için öncelikle hidrojeolojik haritalama ile akifer sınırları belirlenir, daha sonra jeofizik araştırmalarla çalışma alanındaki jeolojik birim sınırları ortaya konulur ve sondaj çalışmaları ile en uygun yere karar verilir (Apaydın 2014).

Baraj yeri seçimi, baraj gövdesinin sağlamlığının ve baraj gövdesinde su tutmayacak alanların araştırılması amacıyla bir jeofizik yöntem olan Doğru Akım Özdirenç (DAÖ) yöntemi yaygın olarak kullanılmaktadır (Sjödahl 2006, 2008, Aina 1996, Karastathis 2002). DAÖ yöntemi, ülkemizde yeraltı barajlarının yer seçiminde DSİ vb. kamu kuruluşlarında uygulanmaktadır. Ancak, ülkemizde yeraltı baraj yeri seçimi için yapılan DAÖ çalışmalarında, genellikle vadinin en dar olduğu yer seçilmekte ve vadi genişliğine bağlı olarak 50-100 metre aralıklarla "Düşey Elektrik sondajı (DES)" ölçüsü

alınmaktadır. Ölçülen her DES verisi bir boyutlu (1B) ters çözüm algoritmaları ile değerlendirilmekte ve tabakalı özdirenç modelleri elde edilmektedir. DES noktaları arasında ölçü alınmayan yerlerin ise özdirenç modeli, iki DES noktasındaki modellerin "interpolasyonu" ile kabaca belirlenmektedir. Ancak temel ve su sondajları, jeolojik çalışmalar ve bu tip jeofizik çalışmalar aşağıdaki sorunları her zaman tespit edemeyebilir;

1- Baraj memba ve eksen kısmındaki olası gömülü fay ve boşluklar tespit edilmesi
2- Blok bir yapı, temel kaya varsayılarak alüvyon kalınlığı olduğundan ince yorumlanabilir. Bu yorum, yanlış baraj ekseni yerinin seçimine neden olabilir.
3- Baraj ekseni boyunca alüvyon ve temel kaya sınırındaki değişimlerin tespit edilmesi.
4- Yeraltı barajları yer seçiminde genelde depolama havzası gözetilerek, vadinin en dar yeri belirlenmektedir. Ancak vadinin en dar yerinde alüvyon çok kalın olabilir. Bu durumda, yapılacak baraj gövdesini temel kayaya oturtmak maliyetli olacaktır.

Bu tip araştırmalarda, vadi boyunca paralel hatlar üzerinde 5-10 metre elektrot aralığı ile DAÖ sondaj-profil ölçüleri alınarak gömülü fay, boşluk vb. yapılar belirlenebilir. Örneğin elektrot aralığı a=10 metre ve 112 elektrotlu bir sistem ile 1120 metre bir hat boyunca 10 metre yanal ayrımlılıkta blok yapılar, gömülü fay ve/veya boşluk yapıları vb. yanal süreksizlikler ile 250-275 metre derinliğe kadar olan düşey yöndeki özdirenç değişimi belirlenebilir. Böyle bir çalışma 10 metre aralıklı 100 adet mekanik sondajın vereceği sonuca eşdeğerdir.

Bu tez çalışmasının amacı, yukarıdaki sorunların tespit edilerek, baraj yeri seçiminin daha doğru yapılmasını sağlayacak bir Jeofizik araştırma yöntemi (methodology) önermektir. Yeraltı barajı yapılması planlanan sahada DAÖ yöntemi ile vadi boyunca paralel hatlar boyunca sondaj profil ölçüsü alınması önerilmiştir. Böylece, her bir hat boyunca ölçülen sondaj-profil veri setinin 2B ters çözümü yapılabilir. Ayrıca bütün paralel profiller boyunca ölçülen sondaj-profil verileri birlikte kullanılarak 3B ters çözümü yapılır. 2B ve 3B ters çözüm sonucu bulunacak 2B ve 3B özdirenç modelleri birlikte yorumlanarak, vadi boyunca alüvyon kalınlık değişimi, alüvyon temel kaya

ilişkisi, olası gömülü faylar, olası gömülü blok yapılar tespit edilebilir. Yine bu verilerin yorumu sonucu alüvyonun en ince olduğu baraj gövdesinin en uygun yeri için olası alanlar belirlenebilir. Bu belirlenen eksen doğrultusu boyunca (vadiyi dik kesecek) doğrultular boyunca yine DAÖ sondaj profil ölçüleri alınarak, eksen boyunca alüvyon ve temel kaya ilişkisi çok ayrıntılı ortaya çıkarılabilir. Bu modellerin yorumu sonucu belirlenecek sondaj noktalarında yapılacak temel ve su sondajları ile Jeofizik modellerin doğrulaması yapılabilir. Tüm bu araştırmalar sonucunda, baraj gövdesinin yapılacağı en uygun eksen doğrultusu belirlenebilir.

Bu tez çalışmasında, Nallıhan, Kabaca Köyü' nde yapılması planlanan yeraltı baraj alanında yukarıda belirtildiği gibi vadi boyunca ve baraj ekseni boyunca DAÖ sondaj profil ölçüleri alınmıştır. Vadi boyunca üç doğrultuda ölçülen verilerin ayrı ayrı 2B ters çözümü ve üç profil birleştirilerek 3B ters çözümü yapılmıştır. Yine eksen boyunca ölçülen verilerin 2B ters çözümü yapılmıştır. Ters çözüm sonucu bulunan 2B ve 3B özdirenç modelleri, temel ve su sondajları ile birlikte yorumlanmış alüvyonun sınırları ve temel kaya topoğrafyası yanal ve düşey yönde ayrıntılı olarak görüntülenmiştir. Çalışma sonunda önceden belirlenen baraj yeri ekseninin, mansap' a doğru yaklaşık 100 metre kaydırılması önerilmiştir. Böylece, daha az maliyet ile baraj gövdesi imal edilebilecektir. Ayrıca, baraj gövdesinin mansap tarafına doğru kaydırılması ile daha fazla suyun birikeceği rezervuar alanın büyümesi sağlanmış olacaktır.

Bu tez çalışması, ileride yapılacak yeraltı baraj yeri seçimi için yapılacak Jeofizik araştırmalar için örnek teşkil edecektir. İleride kamu kuruluşları ve özel sektör bünyesinde yapılacak yeraltı barajı projelerinin daha az sondaj maliyeti ile yapılması için bu tez çalışmasında uygulanan araştırma yönteminin kullanılması önerilmektedir. Yine bu tez kapsamında, yeraltı baraj yeri seçimi öncesi, sırası ve sonrasında yapılması gereken Jeofizik araştırmalar ile ilgili bir akış şeması önerilmiştir.

## 2.YERALTI BARAJI

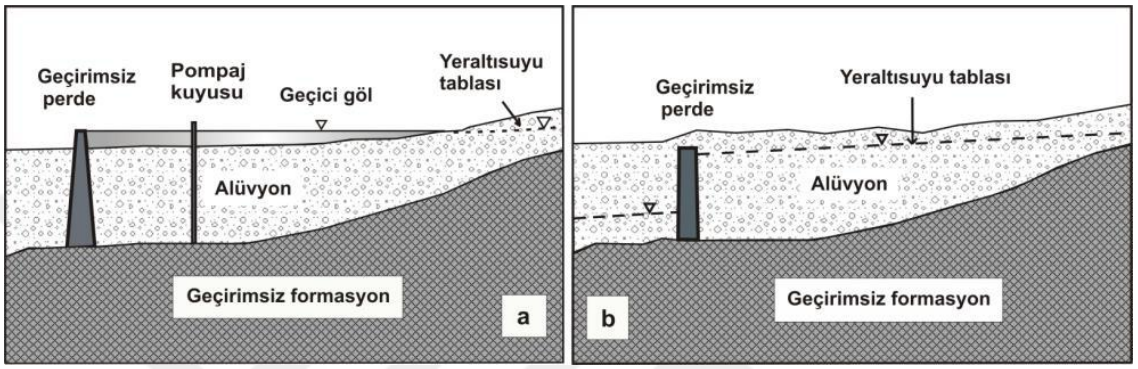
Yeraltı barajı (groundwater/ underground dam), genellikle vadilerde alüvyon akiferlerin önünde beton bir perde (dam/ cut-off Wall) oluşturularak inşa edilir. Söz konusu perde yeterli rezervuar hacmine ve uygun beslenme koşullarına sahip olan akiferin mansabına, genellikle geçirimsiz tabaka üzerine oturtulur. Yeraltı suyu akımının engellenerek perde gerisinde suyun depolanması veya baraj yapılmadan önce akifer içinde bulunan suyun biriktirilmesi sağlanır (Apaydın 2014). Doğal akifer içinde inşa edilebildiği gibi, yapay akifer oluşturularak da inşa edilebilmektedir. Yeraltı barajı özellikle taneli akiferlerde, vadilerin daraldığı yerlerde inşa edilmektedir.

Yeraltı barajları yararlanma amacına, gövdenin tamamen gömülü olmasına veya zemin üzerine yükselmesine, gövde inşaatında kullanılan malzemenin çeşidine göre değişik adlar alabilmektedir. Yeraltına inşa edilen depolama yapıları yeraltı barajı ve tersip bentleri (sand storage dam) olarak ikiye ayrılabilir (Nilsson 1988). Rusubat (su ile gelen süprüntü malzemeler) depolama barajları olan tersip bentleri bazen su depolamak amacıyla da kullanılabilmektedir. Geçirimsiz perdenin yeraltında tamamen gömülü olduğu barajlar batık baraj (submerged dam), perdenin yeraltı depolaması ile birlikte yüzey depolaması olacak şekilde zeminden yukarıya yükseltildiği barajlar gömülebilir baraj veya batabilir baraj (submersible dam) olarak adlandırılır (Şekil 2.1-2.2) (Santos ve Frangipani 1978).

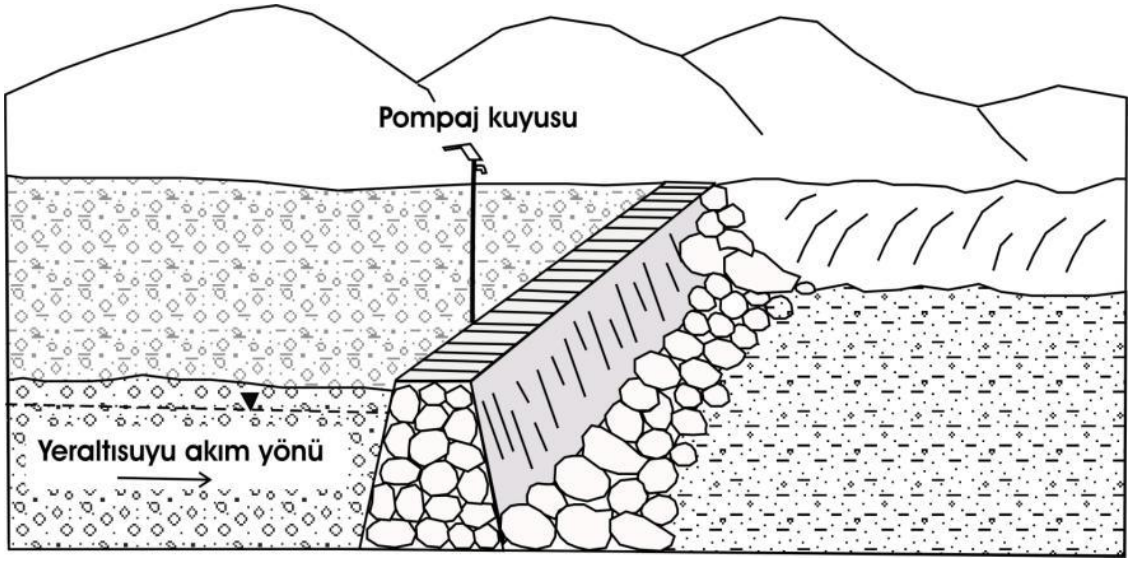
Yeraltı barajlarını yer üstü barajlarındaki gibi geçirimsizliği sağlayan perdenin hangi malzemeden yapıldığına göre de isimlendirmek (beton baraj, dolgu baraj vb.) mümkündür. Geçirimsizliği sağlayacak olan perdenin inşaatında değişik türde doğal veya yapay malzemeler kullanılabilmektedir. En çok kullanılanlar kil, beton, plastik, blok kaya veya bunların bileşimidir. Malzemenin seçiminde, yer üstü barajlarında olduğu gibi, doğal koşullar ile piyasa koşulları etkili olmaktadır (Apaydın 2014).

Yeraltı barajlarında depolanan yeraltı suyu topoğrafik, jeolojik, teknik ve ekonomik koşullara bağlı olarak cazibeyle veya çoğu kez kuyulardan pompajla kullanıma sunulmaktadır. Genel olarak, cazibeli barajların inşaat maliyeti, pompajlı barajların ise

işletme maliyeti daha yüksek olmaktadır. Yeraltı barajları yapımında, öncelikler akifer tabakanın sınırlarının ve hidrolik özelliklerinin belirlenmesi gerekmektedir. Yeraltı barajlarının hidrolik özelliklerini belirlemek, yeryüzündeki barajlara göre daha zordur. Bu barajlarının inşa edilebilmesi için, akifer tabakanın belirli bir kalınlıkta olması, kenarlardan geçirimsiz olması, depolama (S) ve hidrolik iletkenlik katsayısının (K) yüksek olması ve akiferin kesit alanının azaldığı bir dar alan olması gerekir.




Şekil 2. 1a. Zemin üzerine yükselen baraj, b. Gömülü baraj (Submersible dam) (Santos ve Frangipani 1978)




Şekil 2.2 Rusubat tutucu baraj (Apaydın 2014)

## 2.1 Yeraltı Barajlarının Yer Üstü Barajlarına Göre Üstünlük ve Zayıflıkları

Yer üstü rezervuarları içinde kalan araziler başka amaçla kullanılamayacak olduğundan arazi (toprak) kaybı, anlaşmazlıklar, taşınma ve yüksek maliyet (kamulaştırma) gibi sorunlar söz konusudur (Şekil 2.3). Bu sorunlar yeraltı barajları için geçerli değildir. Diğer yandan, yeraltı barajlarının inşaat süresi yer üstü barajlarına göre daha kısadır. İnşaatı daha kolay uygulanabilir ve çoğunlukla da daha ucuzdur. Yeraltı barajlarının önemli bir diğer üstünlüğü de buharlaşma ile su azalmasının çok daha az görülmesidir.



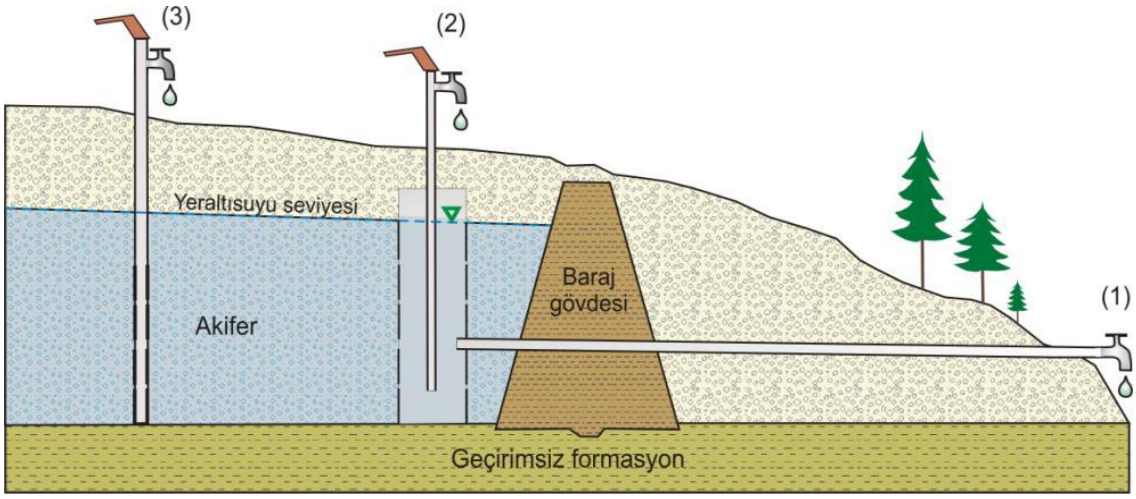
Şekil 2.3 Yer üstü barajlarında çoğunlukla verimli araziler veya yerleşim birimleri göl altında kalarak kullanılamaz hale gelmektedir (Çorum-Obruk barajı rezervuarı) (Apaydın 2014)

Bunun yanında, yeraltı barajlarının yer seçiminden projelendirmeye kadar olan çalışmaları yer üstü barajlarına göre daha karmaşıktır. Örneğin; yer üstü barajlarında rezervuarda depolanabilecek su miktarının tespiti, haritalama ve akarsuda yapılacak debi ölçümleri ile kolayca mümkündür. Yeraltı barajı inşa etmek amacıyla yapılan çalışmalarda gözenekli jeolojik formasyon içindeki rezervuarda depolanabilecek yeraltı suyu miktarının ve akiferin beslenme koşullarının belirlenmesi ise oldukça zordur. Bunun için ayrıntılı hidrojeolojik çalışmaların (jeolojik ve hidrojeolojik haritalama, jeofizik çalışmalar, kuyuların açılması, arazi testleri, laboratuvar testleri, değişik yöntemlerle hesaplamalar vb.) yapılması gerekmektedir.

## 2.2 Yeraltı Barajlarından Suyun Elde Edilmesi

Yeraltı barajları topoğrafyanın uygun olması durumunda cazibe ile elde edilir. Aksi durumda pompaj yapmak gerekir. Doğal olarak, özellikle kazı maliyeti dikkate alındığında, cazibeli yeraltı barajlarının inşaat maliyeti, pompajlı yeraltı barajına oranla daha yüksek olmaktadır. Ancak cazibe ile su elde edilen yeraltı barajlarında tesisin işletme ömrü boyunca enerji harcanmayacağından işletme maliyeti düşük olmaktadır. Bu nedenle, yeraltı barajlarının projelendirme aşamasında su elde etme seçeneklerinin hem fiziksel arazi koşulları, hem de maliyet açısından dikkate alınarak iyi bir fizibilite çalışmasının yapılması ve projelendirmenin bu fizibilite verilerine göre en iyi seçenekte karar kılınması suretiyle yapılması son derece önemlidir.

Topoğrafik eğimin fazla olduğu veya akifer kalınlığının az olduğu vadi alüvyonlarında yeraltı barajlarının cazibe ile su elde edilebilecek şekilde inşa edilmesi mümkün olabilmektedir. Ancak akiferin kalın ve eğimin az olduğu durumlarda kazı maliyeti ve teknik güçlükler nedeniyle suyun kuyulardan pompajla elde edilmesi zorunlu olabilmektedir. Genellikle sahil akiferlerinde enjeksiyonla veya bitişik kazık benzeri yöntemlerle inşa edilenlerden ancak pompajla yararlanılmaktadır. Gevşek taneli malzemeden oluşan (çoğunlukla kumlu ve çakıllı vadi alüvyonları) akiferlerde inşa edilen yeraltı barajlarında açılan kuyular, yeraltı suyu seviyesinin derinliğine, akiferin hidrolik iletkenliğine, su ihtiyacına ve teknik imkânlara göre sondaj veya geniş çaplı keson kuyu olabilmektedir (Şekil 2.4). Kaya akiferlerinde ise sondaj kuyuları açılır (Apaydın 2014).




Şekil 2.4 Yeraltı barajlarından su elde etme seçenekleri; 1: Cazibeli, 2: Keson kuyulardan pompaj, 3: Sondaj kuyularından pompaj (Apaydın vd. 2008)

## 2.3 Yeraltı Barajlarında Yer Seçimi

Yer seçimi, planlama ve projelendirme yönü ile daha çok hidrojeoloji, mühendislik jeofiziği ve mühendislik jeolojisi uygulama alanına girmektedir.

Bir yerde yeraltı barajı yapılabilmesi için aşağıdaki şartların uygun olması istenir (Apaydın 2014):

- Kalınlığı genellikle 15-20 m'yi geçmeyen alüvyon ortamlar tercih edilmelidir. Ancak kazı güçlüğü ortadan kaldırıldığında veya plastik beton perde veya bitişik kazık yönteminin uygulanması halinde daha kalın alüvyonlarda da yeraltı barajı yapılabilmektedir. Topoğrafyanın uygun olması halinde, kalınlık arttıkça depolama hacmi ve dolayısıyla da yararlanılabilecek su miktarı artmaktadır (Kaya akiferlerinde de inşa edilen yeraltı barajları mevcuttur. Örneğin, Japonya'da karstik kireçtaşlarında enjeksiyon yöntemi ile inşa edilen yeraltı barajları bulunmaktadır).

- Akifer kaba taneli veya kırıklı-çatlaklı-erime boşluklu, depolama katsayısı (S) ve hidrolik iletkenliği (K) yüksek olmalıdır.

- Alüvyonun veya kaya akiferinin altında kazılabilecek veya etkili enjeksiyon yapılabilecek derinlikte geçirimsiz ortam bulunmalıdır.

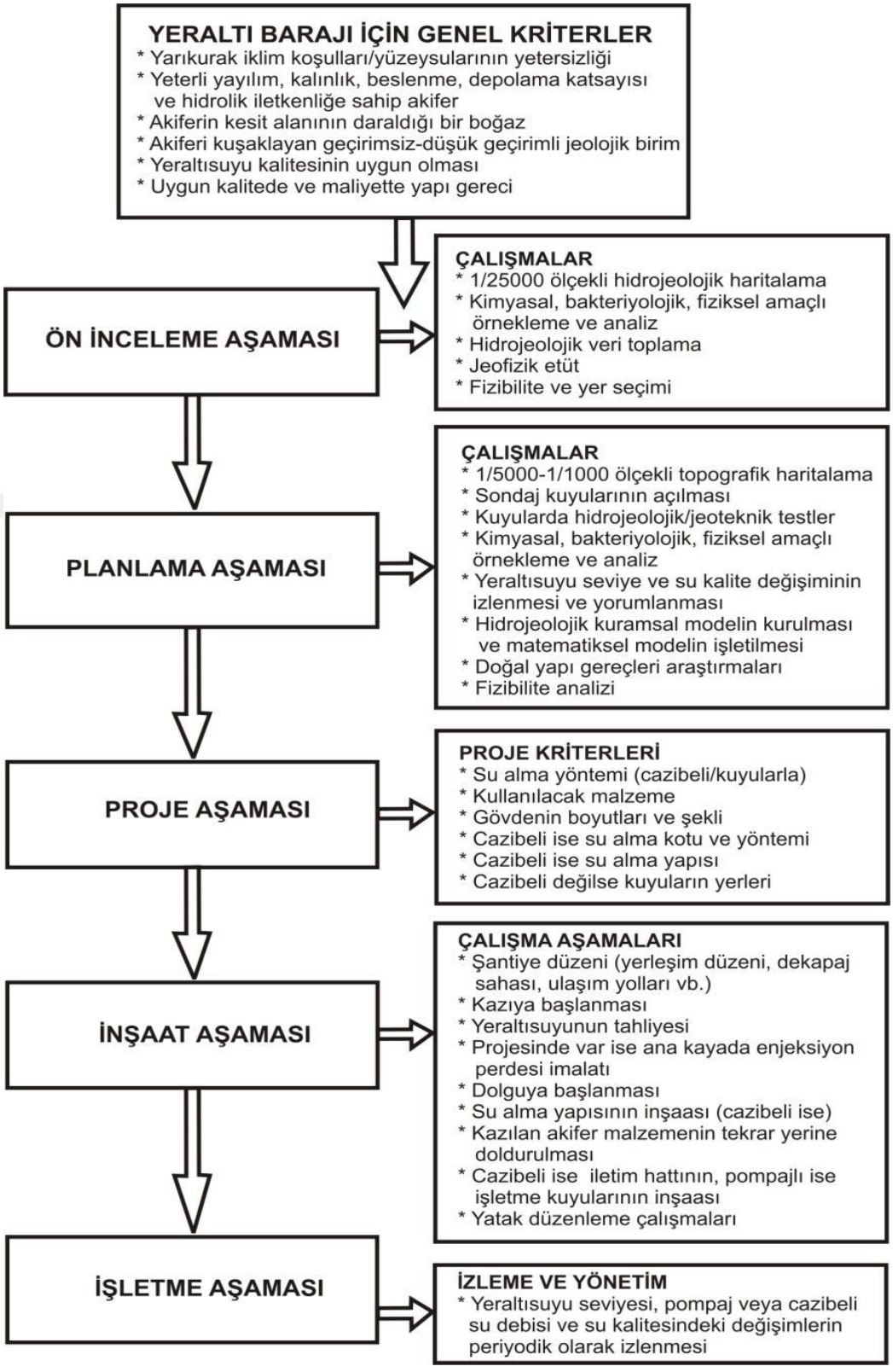
- Akiferin alanı ve beslendiği havza geniş olmalı ya da yağışlı aylarda yüzeysel akıştan veya yan formasyonlardan yeterli beslenim olmalıdır.

- Kazıda ve dolguda maliyet ve teknik güçlükler yönünden akifer formasyonun daraldığı ve kalınlığının azaldığı bir boğaz olmalıdır.

- Gövde inşa edildiğinde, gövde gerisinde suyun depolanabileceği yeterli büyüklükte yeraltı rezervuarı oluşabilmelidir. Bu, topoğrafik eğimin az olması, perde gerisinde akiferin kalınlaşması ve yayılımının artması halinde mümkündür. Ancak bu koşul her durumda zorunlu değildir. Eğimin fazlalığından dolayı kret kotu altında kalan depolama hacmi az olsa dahi, akifer havza gerisine doğru geniş alanlara uzanıyorsa ve yeterli miktarda besleniyorsa, yeraltı barajı inşa edilmesi mümkündür (Apaydın 2014).

Yer üstü barajlarında olduğu gibi, ön inceleme ve planlama, projelendirme, inşaat ve işletme olmak üzere aşamaları vardır. Apaydın (2009) tarafından önerilen yeraltı barajlarının ön inceleme aşamasından işletmeye kadar olan aşamalarda yapılacak işlerle ilgili iş akış şeması şekil 2.5'te verilmiştir. Bu şema genel bir kılavuz olup, her projenin özelliklerine ve yerel koşullara göre farklılıklar olabilmektedir.

Her mühendislik projesinde olduğu gibi, işlem yer seçimi ile başlar. Bu işlem verilen genel kılavuzda ön inceleme adımında yer almaktadır. Bu adımda su ihtiyacının tespitinin ardından genel bir hidrojelojik ön inceleme ile baraj için uygun olabilecek seçenekler belirlenir. Jeofizik araştırmalar, aşağıda verilen işlem aşamalarında sadece ön inceleme değil planlama aşaması ve işletme aşamasında da kullanılmalıdır. Bu tez çalışması sonuçlarında, yapılacak işlem adımlarında değişiklik önerilmiştir.




Şekil 2.5 Yeraltı barajlarında işlem aşamaları (Apaydın 2009)

## 2.4 Türkiye'de Yeraltı Barajı Uygulamaları

Ülkemizde, Köy Hizmetleri Genel Müdürlüğü ve Toprak Koruma ve Sulama Genel Müdürlüğü' nün yaptığı küçük ölçekli yeraltı barajları bulunmaktadır. Ancak bunlar ile ilgili kaynaklarda yeterli bilgi yoktur. Yeraltı baraj yapımı Türkiye'de 2015 yılından itibaren artış göstermektedir. Bu yeraltı barajlarının çoğunluğu, vadi alüvyonlarında inşa edilen gövde gerisine gelen yeraltı suyu akışını toplayıp cazibe ile isale hattına çeviren bent şeklindeki yapılardır. Bent yapımında genellikle beton veya kil perde kullanılmıştır. Bu projelerin çoğunluğunda geçirimsiz perde ana kayaya oturtulmuş, bir kısmında da alüvyon içinde askıda bırakılmıştır. Bu yapılar çoğunlukla köylerin içme suyu ve sulama suyu ihtiyaçlarını karşılamak amacıyla inşa edilmiştir.

Ülkemizde ilk büyük ölçekli yeraltı barajının İzmir Çeşme'de inşa edilmesi planlanmıştır. Bu barajda, enjeksiyon perdesi ile deniz suyu girişimini önleyerek yeraltı suyunu kıyı akiferinde biriktirilmesi planlanmıştır. Ancak bu projenin inşaatı tamamlanamadığından tam olarak başarı sağlanamamıştır. Ülkemizde ikinci yeraltı barajı ise, 2003 yılında Kırıkkale'nin Yahşihan ilçesinde DSİ 5. Bölge tarafından yapılmıştır. Bu barajda, geçirimsiz granitler üzerindeki alüvyonda inşa edilen yeraltı barajında geçirimsiz gövde, beton üzerinde kil çekirdekli zonlu toprak dolgudur. Ülkemizde 2003-2012 yılları arasında birçok yeraltı barajı inşa edilmiştir. Bunlara örnek olarak; Malıboğazı (Ankara-2004), Aşağı Olunlu (Kırıkkale-2006), Sancar (Eskişehir-2007), Bahşılı (Kırıkkale-2010), İskilip (Çorum-2011), Baskil (Elazığ-2011), Elmadağ (Ankara-2012) yeraltı barajları verilebilir (Şekil 2.6).

Bu barajların yapımı ile ilgili ayrıntılı iki örnek aşağıda verilmiştir.




Şekil 2.6 Türkiye'de 2000'li yıllarda inşa edilen yeraltı barajlarının dağılımı (Apaydın 2014)

### 2.4.1 Çorum-İskilip yeraltı barajı

Çorum'a bağlı İskilip ilçe belediyesi içme suyu ihtiyacını eski kaynaklar ile ilçenin kuzeyinde ve kuzeybatısındaki iki ayrı vadi alüvyonunda açılan sondaj kuyularından ve kuzeybatıdaki Meydan Çayı'nda inşa edilen drenaj tesislerinden elde etmektedir. Ancak, kurak aylarda kaynak ve kuyuların verimleri azalmakta ve drenajlar yeraltı suyu seviyesinin düşmesi sonucunda doygun zonun üzerinde kalarak kurumaktadır. Belediye Başkanlığının ilave su talebi üzerine ilçenin cazibeli içme suyu miktarını arttırmak ve fazla su elde edilmesi halinde merkezdeki çiftçilerin sulama suyu ihtiyacını karşılamak amacıyla Meydan Çayı vadisinde (Şekil 2.7), drenajların bulunduğu yerde bir yeraltı barajı inşa edilmesi öngörülmüştür. Ön inceleme çalışması; genel jeolojik-jeoteknik, jeofizik ve hidrojeolojik inceleme ve ölçümler ile eksen yerinde açılan bir adet hidrojeolojik amaçlı araştırma sondaj kuyusundaki pompalama testlerini kapsamaktadır. Planlama çalışmalarında ise eksen yerinde daha ayrıntılı jeolojik-jeoteknik ve hidrojeolojik çalışmalar ile doğal yapı gereci araştırmaları gerçekleştirilmiştir (Apaydın 2014).

Meydan Çayı vadisi boyunca en fazla 100 m genişliğinde bir şerit halinde uzanan Kuvaterner yaşlı alüvyon genellikle kaba taneli olup, kum, çakıl ve blok boyutundaki malzemeden ibarettir. Bu yeraltı barajının yapımında jeofizik çalışmalar, söz konusu alüvyonun kalınlığının belirlenmesine yönelik yapılmıştır. Çalışma alanında belirlenen noktalarda (eksen yerine yakın) DES ölçüleri alınmış ve alüvyon kalınlığı 10-15 m arasında değiştiği belirlenmiştir. Açılan araştırma sondaj kuyularında alüvyon kalınlığının 10-13 m arasında olduğu tespit edilmiştir. Çalışma alanında yapılan diğer çalışmalardan elde edilen bilgiler ile jeofizik bilgiler bir arada yorumlanarak eksen yeri belirlenmiştir. (Apaydın 2014).



Şekil 2.7 İskilip yeraltı barajının bulunduğu Meydan Çayı vadisinden ve gövde dolgusu inşaatından genel görünüm (Apaydın 2014)

### 2.4.2 Ankara-Elmadağ Kargalı yeraltı barajı

Elmadağ Belediye Başkanlığının ilave su talebi üzerine ilçenin cazibeli içme suyu miktarını arttırmak amacıyla Ankara Su ve Kanalizasyon İdaresi (ASKİ) tarafından Kargalı Vadisi'nde bir yeraltı barajı inşa edilmesi öngörülmüştür. Yer seçimi ve etütleri DSİ 5. Bölge Müdürlüğü'nün katkıları ile yapılmış; projesi DSİ tarafından daha önce yapılan yeraltı barajı projelerinden destek alınarak ASKİ tarafından çizilmiştir. İnşaatı ASKİ tarafından gerçekleştirilen baraj yeraltı ve yer üstünde depolama özelliğine sahiptir.

Ön inceleme-planlama çalışması; genel jeolojik inceleme, jeofizik araştırma, sondaj kuyularının açılması ve malzeme etütlerini kapsamaktadır. DSİ ve ASKİ yetkilileri ile

yer seçimi amacıyla yapılan inceleme sonucunda karar verilen eksen yerinde DSİ'nin önerisi ile jeofizik özdirenç verileri toplanmıştır ve eksen yerindeki alüvyon kalınlığı 10-15 m arasında belirlenmiştir. Açılan kuyularda kalınlık en fazla 18 m tespit edilmiştir. Tüm bulgular göz önünde bulundurularak hazırlanan projede ana kayaya oturtulacak gövde alüvyon içinde 14 m ve yer üstünde 10 m yükselecek şekilde tasarlanmıştır (Şekil 2.8).

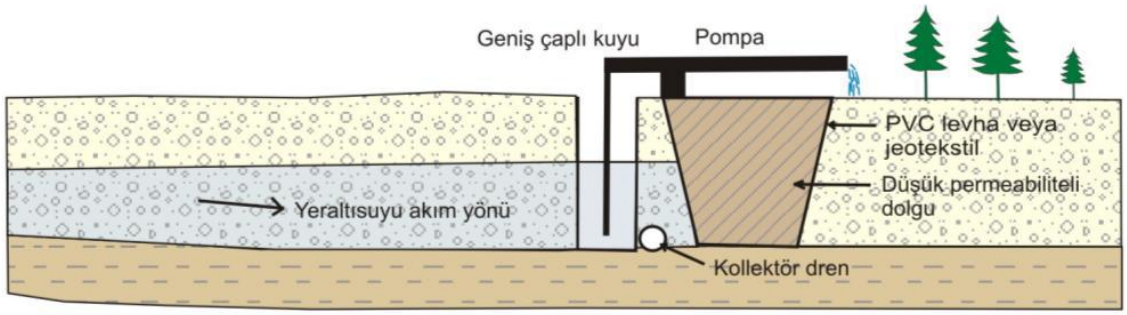



Şekil 2.8 Elmadağ Kargalı yeraltı barajının bulunduğu vadisinden ve gövde dolgusu inşaatından genel görünüm (Apaydın 2014)

## 2.5 Dünyada Yeraltı Barajı Uygulamaları

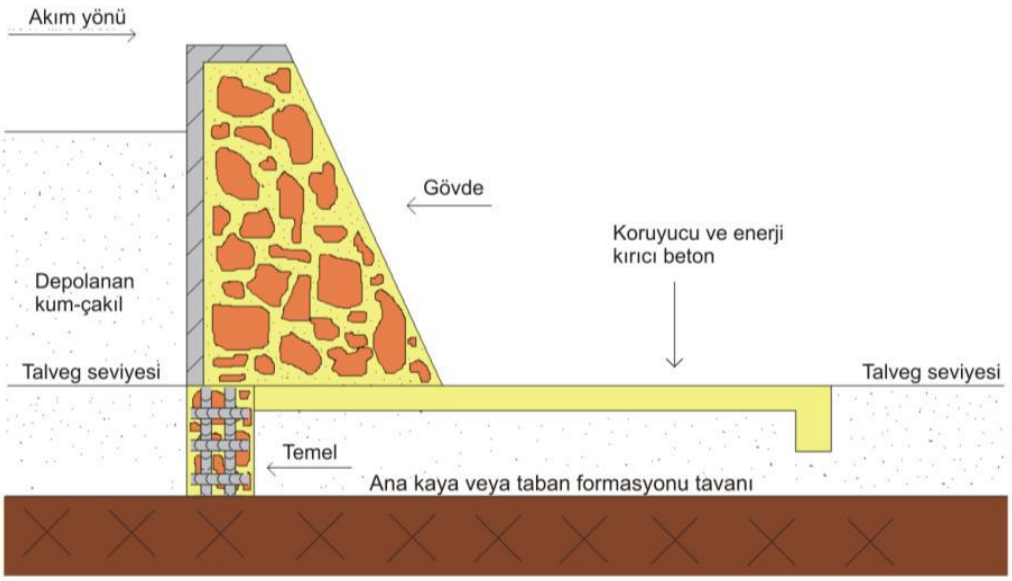
Son 30 yıl içinde sayıları artan ve yapım tekniklerinde gelişme görülen yeraltı barajlarının en yaygın olduğu ülkeler Brezilya, Japonya, Çin, Kenya ve Hindistan'dır. Bunların haricinde Orta Doğu ve Afrika ülkeleri başta olmak üzere değişik ülkelerde yeraltı barajları inşa edilmektedir. Bunlar küçük ölçekli ve yerel içme suyu ihtiyaçlarının karşılanmasından geniş arazilerin sulanmasına yetecek kadar değişik boyutlarda olabilmekte; gövde tipi değişik malzemeden ve değişik yöntemlerle inşa edilmektedir. Dünyada yapılan yeraltı barajı çalışmalarına örnek olarak Brezilya'nın Pernambuco eyaletinde inşa edilen baraj gösterilebilir. Brezilya'da yarı kurak iklim koşullarına sahip olan kuzey bölgesindeki jeolojik koşulların uygun olmasıyla çok sayıda yer üstü barajı inşa edilmiştir. Ancak buharlaşmanın çok yüksek olması nedeniyle bu barajlarda su kaybı fazla olmaktadır. Bu nedenle 1990'lı yıllarda 500 civarında küçük boyutlarda yeraltı barajı yapılmıştır (Foster vd. 2002).Bu barajlar içme ve sulama suyu sağlamada kullanılmaktadır. Bölgede temel kaya olan granitler üzerinde

küçük vadilerde alüvyonlar uzanmaktadır. Yeraltı barajları çoğunlukla vadi alüvyonlarında inşa edilmiştir (Şekil 2.9).




Şekil 2.9 Brezilya'da Pernambuco eyaletinde yer üstü barajlarındaki buharlaşma sorununa çözüm amacıyla yapılan küçük ölçekli yeraltı barajı (Foster ve Tuinhof 2004)

Bir diğer örnek Etiyopya'da bölgenin kuraklık şartlarına çözüm olması amacıyla inşa edilen yeraltı barajları olarak verilebilir. Bunların çoğu betonarme veya taş örme tersip bentleridir (Şekil 2.10).




Şekil 2.10 Etiyopya'da kuraklık sorununa çözüm olarak önerilen tersip bendi tip projesi (Apaydın 2014)

## 3. MATERYAL VE YÖNTEM

Planlanan yeraltı barajı eksen yeri ön inceleme çalışmaları aşamasında, eksen yeri ve barajın depolama alanında yeraltı suyu taşıyan akiferin incelenmesinde, jeofizik elektrik yöntemlerden "Doğru Akım Özdirenç (DAÖ) Yöntemi" sıkça kullanılmaktadır. DAÖ yöntemi ile akifer kalınlığı, alüvyon içerisindeki tane boyunun genel durumu, su tablası seviyesi, karstik boşlukların aranması, ana kaya sınırının belirlenmesi, kıyı akiferlerinde tuzlu su girişiminin belirlenmesi, açılacak sondaj kuyularının yerlerinin seçimi, baraj eksen yerinin taban-tavan topoğrafyasının belirlenmesi için kullanılır.

Yeraltı barajı yer seçimine yönelik ülkemizde yapılan çalışmalarda DAÖ, "Düşey Elektrik Sondajı (DES)" ölçüsü alınarak 1B yorumlanır. Ancak bu ölçümlerin değerlendirilmesi sonucu elde edilen 1B yer elektrik modelleri 3B akifer yapısının (yanal ve düşey sınırlarının), akifer kalınlığının ve temel kaya derinliği ve topoğrafyasının çalışma alanının genelindeki değişiminin ortaya konulmasında yetersiz kalmaktadır. Ayrıca, DAÖ DES ölçüsü, temel ve su sondaj yeri seçimi ve jeoloji çalışmaları, baraj yeri seçiminde aşağıdaki sorunların çözümünde yetersiz kalmaktadır;

1- Baraj memba ve eksen kısmındaki olası gömülü fay ve boşluklar tespit edilmesi.
2- Blok bir yapı, temel kaya varsayılarak alüvyon kalınlığı olduğundan ince yorumlanabilir. Bu yorum, yanlış baraj eksen yerinin seçimine neden olabilir.
3- Baraj ekseni boyunca alüvyon ve temel kaya sınırındaki değişimlerin tespit edilmesi.
4- Yeraltı barajları yer seçiminde genelde depolama havzası gözetilerek, vadinin en dar yeri belirlenmektedir. Ancak vadinin en dar yerinde alüvyon çok kalın olabilir. Bu durumda, yapılacak baraj gövdesini temel kayaya oturtmak maliyetli olacaktır.

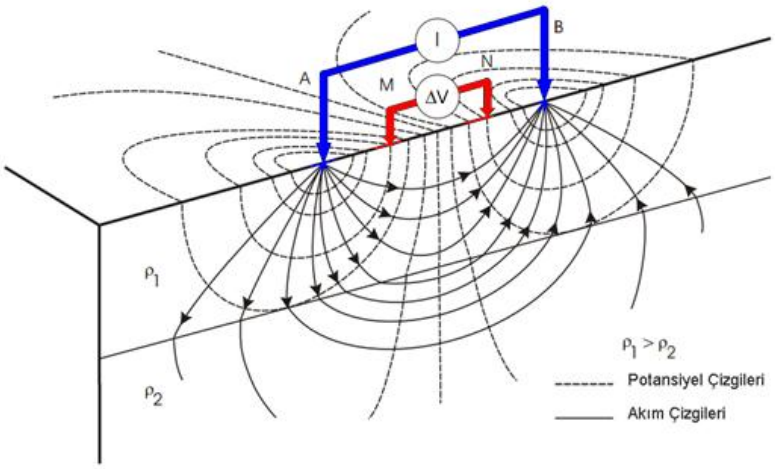
DAÖ yönteminde veri toplama ve değerlendirme aşamalarında dünyada artık bir standart haline gelen 2B ve 3B yer elektrik modellerinin elde edilmesine yönelik çalışmalar bu yetersizlikleri ortadan kaldırmaktadır. İzleyen bölümlerde yukarıdaki sorunları çözecek Jeofizik araştırma yöntemi açıklanmaktadır.

## 3.1 DAÖ Yöntemi

DAÖ yöntemi, günümüzde mühendislik jeofiziği çalışmalarında özellikle jeolojik birim sınırlarının belirlenmesinde en çok kullanılan jeofizik yöntemlerdendir. DAÖ çalışmalarında jeolojik birimler, fay yapıları ve boşluk yapıları, heyelan kayma düzlemleri, yeraltısuyu araştırmalarında son 30 yıldır DAÖ verileri çok-elektrodlu ve çok kanallı ölçü sistemleri ile toplanarak bu verilerin 2B ve 3B ters çözümü ile araştırılmaktadır (Susuki ve Higashi 2001; Balkaya vd. 2012; Saad vd. 2012; Rossi vd., 2017; Sing ve Sharma 2018; Auken vd. 2006; Kim vd. 2009; Candansayar ve Tezkan, 2008; Demirci vd. 2020; Gündoğdu vd. 2020).Son 20 yılda ters çözüm algoritmaları ve ölçü sistemleri tekniklerindeki gelişmelere bağlı olarak, diğer uygulama alanlarında olduğu gibi mühendislik jeofiziği problemlerinin çözümünde de yeraltının 2B ve 3B özdirenç modellerinin elde edilmesi oldukça yaygınlaşmıştır.

Jeofizik yöntemlerden DAÖ yöntemi, yeraltı yapılarının özdirençlerine duyarlıdır. Doğadaki her kayacın kendine özgü bir özdirenç değeri vardır. Özdirenç, kayaçların mineral içeriği, boşluk oranı, yaşı, içinde barındırdığı akışkan miktarı vb. özelliklerine bağlı olarak değişen bir fizik parametredir.

Yöntemde, yere akım elektrotlarından (A ve B) akım uygulanır ve diğer gerilim elektrotları (M ve N) arasında oluşan gerilim farkı ölçülür (Şekil 3.1).




Şekil 3.1 Doğru akım özdirenç yöntemi ölçü düzeneği, akım ve dik potansiyel çizgileri (Candansayar 2007; Van Nostran ve Cook 1966)

Ölçülen gerilim farkından($\Delta\phi$) aşağıdaki eşitlik yardımı ile görünür özdirenç değeri ($\rho_a(Ohm.m)$) hesaplanır

$$\rho_a = k\frac{\Delta\phi}{I}. \tag{3.1}$$

Burada $I$ yere uygulanan akım, k ise akım ve potansiyel elektrotları arasındaki mesafelerden hesaplanan geometrik faktördür ve izleyen şekilde hesaplanır:

$$k = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}\right)} \tag{3.2}$$

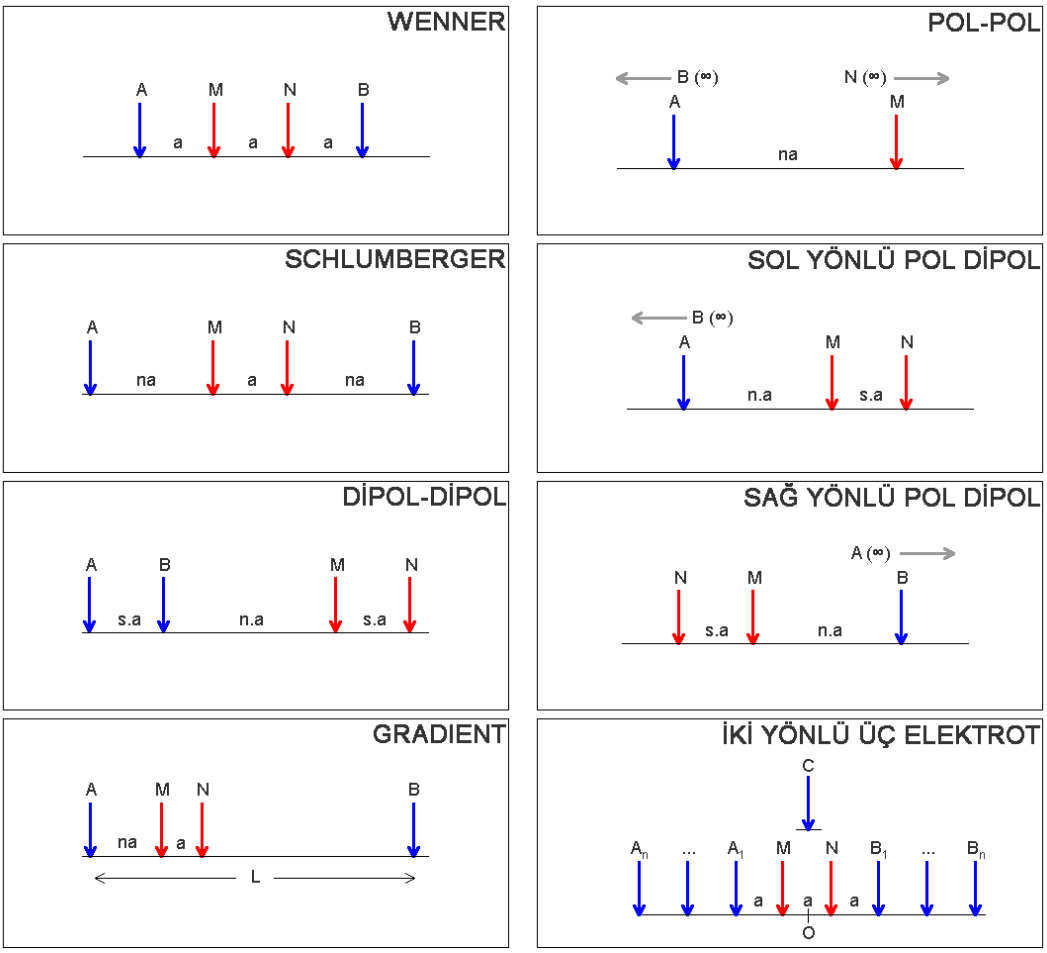
Görünür özdirenç akım ve gerilim elektrotlarının konumu, ortamdaki kayaçların özdirençlerine bağlı bir jeofizik veridir (Candansayar 1997). Ortamın tek düze ve izotrop olması durumunda görünür özdirenç ortamın özdirencine eşittir. Ancak gerçek yeraltı tek düze ve izotrop olmadığından görünür özdirenç verileri üzerinden yorum yapılamaz. Yorum için, bu verilerden ters çözüm işlemi ile gerçek parametre değerlerinin kestirilmesi zorunludur.

## 3.2 DAÖ Veri Toplama Teknikleri ve Geleneksel Elektrot Dizilimleri

DAÖ yönteminde üç çeşit veri toplama tekniği vardır. Bunlar; bir ölçüm noktasında düşey yöndeki (z-derinlik) özdirenç değişiminin incelenmesi amacıyla kullanılan "düşey elektrik sondajı (DES)", belirli bir doğrultu boyunca (x) sabit bir derinlik seviyesindeki yanal özdirenç değişimin incelenmesi amacıyla kullanılan "profil ölçüsü" ve yine bir doğrultu boyunca hem yanal hem de düşey özdirenç değişimin incelenmesi amacıyla kullanılan "sondaj-profil ölçüsü" tekniğidir.

Son 25 yıldır çok elektrotlu ve çok kanallı özdirenç ölçüm cihazları ile DAÖ uygulamalarında yaygın olarak sondaj-profil ölçüsü toplanmaktadır. Bu cihazlar ile görece çok kısa sürede çok fazla sayıda veri 2B ve 3B değerlendirmeye uygun olarak toplanabilmektedir. Tek bir doğrultu boyunca toplanan veriler 2B ters çözüm algoritmaları ile ayrı ayrı değerlendirilirken, çalışma alanını tarayacak şekilde birbirine paralel ve/veya dik doğrultular boyunca toplanan veriler bir arada 3B ters çözüm algoritmaları ile değerlendirilmektedir. 3B ters çözüm sonucu elde edilen yer elektrik modeli gerçek yeraltını en iyi temsil eden modeldir.

DAÖ yönteminde yere akım uygulanan akım elektrotları ve gerilim farkının ölçüldüğü potansiyel elektrotlarının konumlarına göre farklı elektrot dizilimleri kullanılmaktadır. Geleneksel olarak kullanılan elektrot dizilimleri şekil 3.2'de verilmiştir. Çok elektrotlu ve çok kanallı ölçü sistemleri ile genellikle "pol-dipol" ve "dipol-dipol" dizilimleri kullanılmaktadır (Candansayar 2007).




Şekil 3.2 DAÖ yönteminde kullanılan başlıca elektrot dizilimleri. Burada "a" elektrot aralığı, "n" seviye sayısı (n=1,2,…), "s"dipol açıklığıdır (s=1,2,…) (Candansayar 2007)

### 3.3 DAÖ Yönteminde İki Boyutlu (2B) ve Üç Boyutlu (3B) Düz ve Ters Çözüm

Düz çözüm, fiziksel ve geometrik parametreleri belli bir model için kuramsal verinin hesaplanmasıdır. Model parametreleri m, düz çözüm işleci$f$ ve kuramsal veri $d^k$ olarak ifade edilirse;

$$d^k = f(m) \tag{3.3}$$

olarak ifade edilebilir.

Düz çözüm, jeofizik verilerinin değerlendirilmesinde kullanılan ters çözüm algoritmalarının bir parçasıdır. Arazide ölçülen veri ile çakıştırılmak istenilen kuramsal

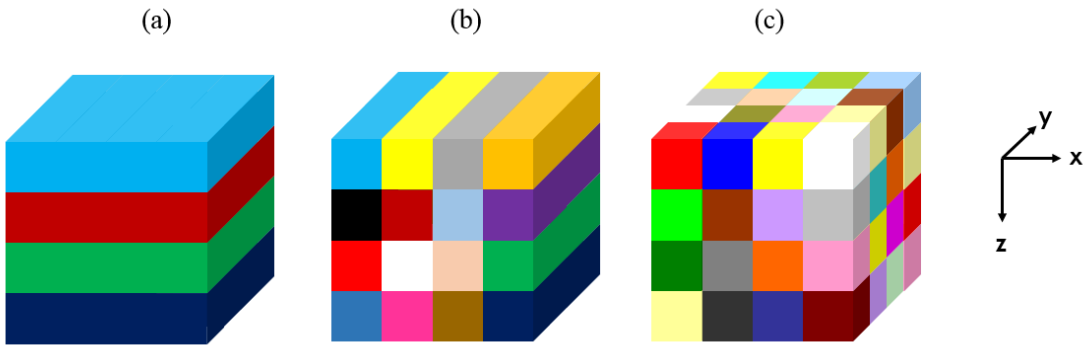
veri düz çözüm ile elde edilir. Ayrıca düz çözüm işlemi bir modelleme aracı olarak da kullanılır. Görüntülenmek istenilen yeraltı yapısının (modelin) olası cevabının nasıl olacağı, hangi arazi parametreleri (elektrot dizilimi, elektrot aralığı, seviye sayısı vb.) ile daha iyi bir sonuç alınabileceği vb. çalışmalar düz çözüm ile yapılır.

DAÖ yönteminde modelleme 1B, 2B veya 3B bir özdirenç dağılımı (Şekil 3.3) için Poisson denklemi çözümünden, belirlenen veri toplama tekniği için gerilim farklarının hesaplanması ve bunlardan istenilen elektrot dizilimi için görünür özdirenç değerlerinin hesaplanması şeklinde tanımlanabilir. Kısaca bir özdirenç modeli için görünür özdirençlerin hesaplanmasıdır. 2B ve 3B modellemede kullanılan Poisson denklemi bir diğer ifadeyle düz çözüm bağıntısı denklem (3.4) ve denklem (3.5)'te verilmiştir:

$$-\nabla.\left(\frac{1}{\rho}(x,z)\nabla\varphi(x,z)\right) = I\delta(x-x_s)\delta(z-z_s) \tag{3.4}$$

$$-\nabla.\left(\frac{1}{\rho}(x,y,z)\nabla\varphi(x,y,z)\right) = I\delta(x-x_s)\delta(y-y_s)\delta(z-z_s) \tag{3.5}$$

Burada $\rho$ özdirenç, $\varphi$ gerilim farkı, $I$herhangi bir $(x_s, y_s, z_s)$ noktasından uygulanan akım, $\delta$ birim impuls fonksiyonu, $\nabla$ ise gradyent işlecidir.




Şekil 3.3 a. 1B özdirenç modeli, b. 2B özdirenç modeli, c. 3B özdirenç modeli

Ters çözüm, ölçülen veriden ($d^{ö}$) fiziksel parametrelerin (m) kestirilmesidir. Bu tanım basitçe

$$m = f^{-1}(d^{ö}) \tag{3.4}$$

olarak ifade edilebilir. Ölçülen jeofizik verilerin yorumlanabilir hale dönüştürülmesi ters çözüm algoritmaları ile yapılmaktadır. DAÖ verilerinin ters çözümünde çoğunlukla türev tabanlı yöntemler (Gauss-Newton, En-küçük Kareler, Eşlenik Gradyen) tercih edilir.

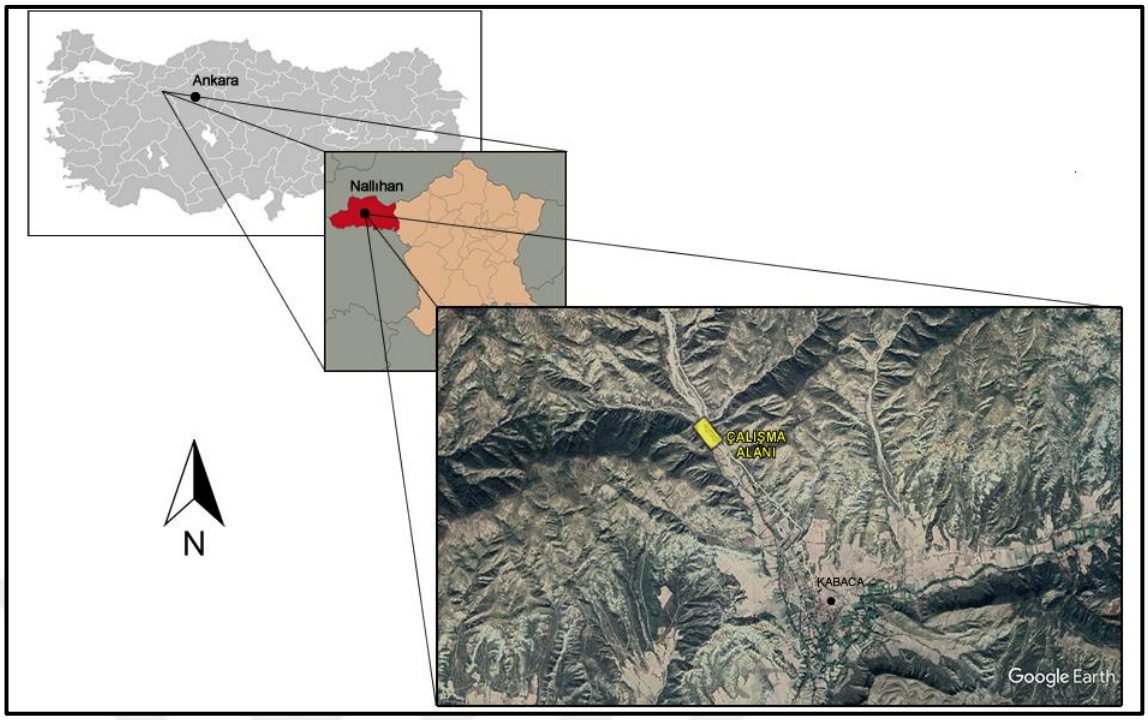
# 4. ARAŞTIRMA VE BULGULAR

Ankara'nın Nallıhan ilçesine bağlı Kabaca Köyü şimdiye kadar sulama suyu ihtiyacının bir kısmını Kabaca Sulama Kooperatifi'nden elde etmektedir. Ancak işletme maliyetlerinin yüksek olması ve kooperatifin bunu karşılayacak güce sahip olmaması nedeniyle sulamada sıkıntılar yaşanmaktadır. Bu nedenle, kuzeyden güneydeki Kabaca Köyü'ne doğru uzanan Karakaya Deresi'nde 1975-76 yıllarında TOPRAK-SU tarafından inşa edilen drenaj galerisi yerinde ve membaında Kabaca Köyü Muhtarlığı'nın talebi üzerine 2014 yılı Aralık ayında ön hidrojeolojik inceleme yapılmıştır. Yapılan incelemede, yaklaşık 40 yıl önce inşa edilen eski tesisisin işlevini yeterince yerine getiremediği anlaşılmıştır. Bu nedenle bölgede yeni bir yeraltı barajı inşasına yönelik, yeraltı suyu taşıyan alüvyonun ve yeraltı barajı yapılması düşünülen eksen yerinin kalınlığını belirlemeye yönelik eksen yerinin membasında, mansabında ve ekseninde düşey elektrik sondajı (DES) ölçümleri alınmıştır.

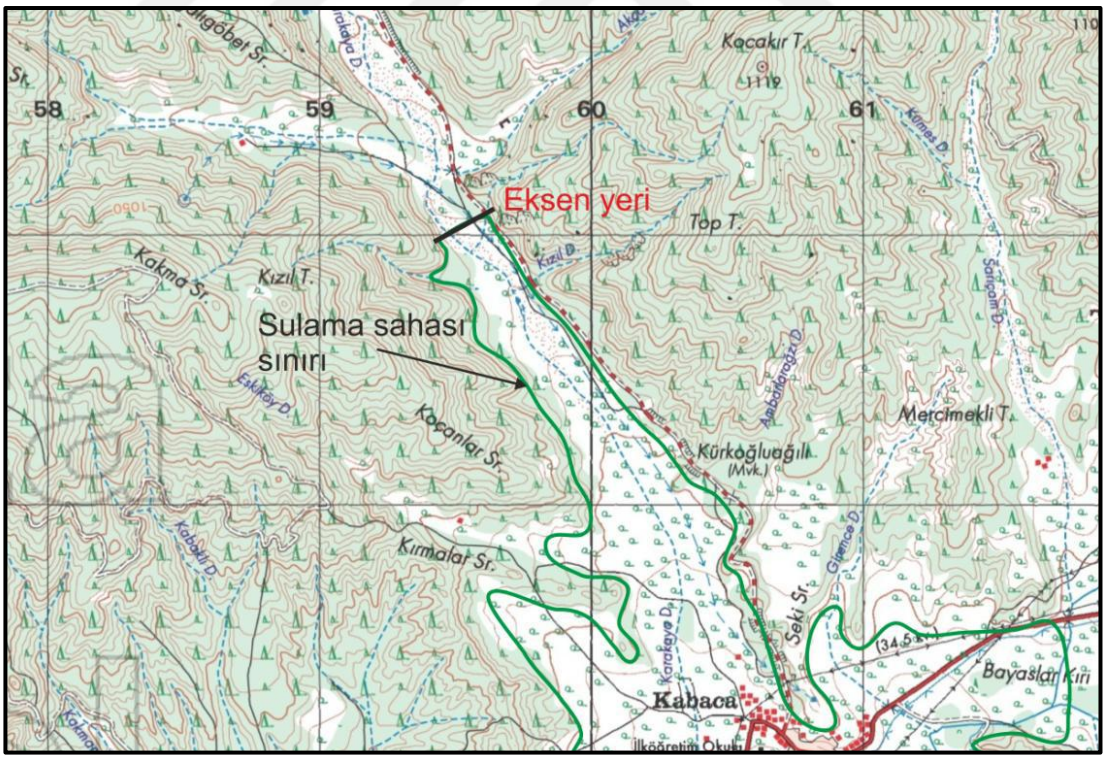
Bu tez çalışması kapsamında hedefe yönelik daha detaylı bilgilerin elde edilmesi ve yeraltının gerçeğe daha yakın olarak ortaya çıkarılması için söz konusu sahada, planlanan yeraltı baraj yerinde birbirine paralel hatlar ve bu paralel hatlara dik bir hat boyunca sondaj-profil ölçüleri alınmıştır.

## 4.1 Çalışma Alanı

Çalışma alanı Ankara'ya bağlı Nallıhan ilçesinin Kabaca Köyü'nün yaklaşık 2.3 km kuzeyinde, Karakaya Deresi havzasında yer almaktadır ve Yukarı Sakarya ana havzası içinde 12-31 no.lu Nallıhan' da bulunan "Nalderesi" hidrojeolojik alt havzası içindedir (Şekil 4.1). Ön inceleme çalışmalarına göre belirlenen eksen yeri Adapazarı H26 b4 topografik paftasında yer almaktadır (Şekil 4.2). Kabaca yeraltı barajı yağış havzası en düşük, en yüksek ve ortalama kotu sırasıyla 830, 1600 ve 1230 m'dir.




Şekil 4.1 Çalışma alanı (Ankara-Nallıhan-Kabaca) yer bulduru haritası




Şekil 4.2 Kabaca yeraltı barajı eksen yeri ve potansiyel sulama alanının 1/25.000 ölçekli haritada gösterimi (Adapazarı H26 b4) (Apaydın vd. 2017). Planda gösterilen "eksen yeri (siyah çizgi)", bu tez çalışmasında farklı bir noktaya yapılması önerilmiştir.

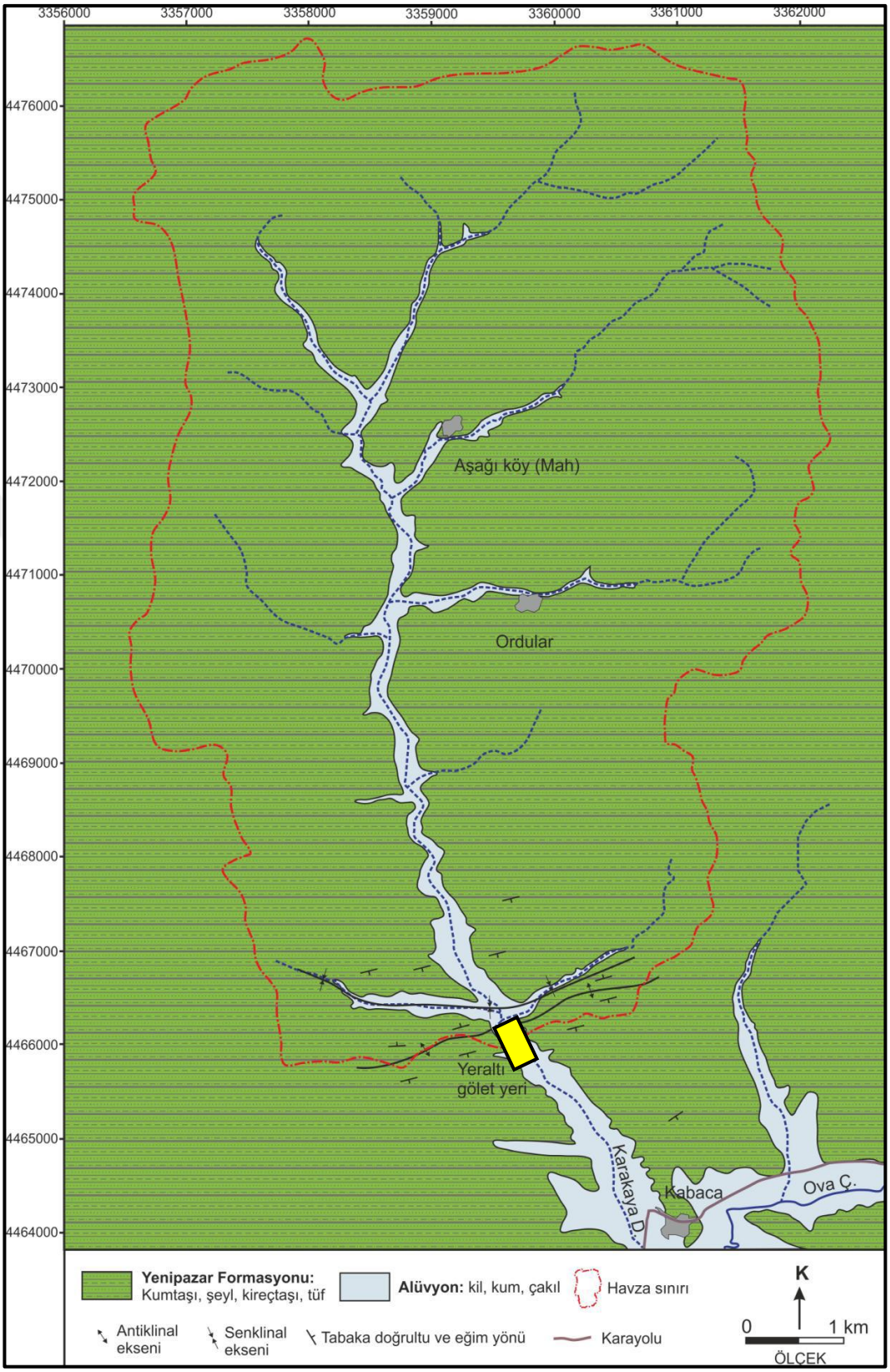
## 4.2 Çalışma Alanının Jeolojisi

Çalışma alanı ve civarında Üst Kretase yaşlı Yenipazar formasyonuna ait şeyl ara bantlı kumtaşları yer almaktadır. Onun üzerinde ise Karakaya dere vadisi ve onun yan kolları boyunca uzanan az killi kumlu çakıllı alüvyon bulunmaktadır (Şekil 4.3).Yeraltı barajı ve civarında bulunan formasyonlar aşağıda belirtilmiştir.

Eksen yerinin sağ ve sol yamacında gözlenen Yenipazar formasyonu adını Saner (1980) volkanitli, bloklu, kumtaşı ve şeyl ardalanmasından oluşan filiş fasiyesindeki çökel istifinden almıştır.

Göynük-Mudurnu-Seben-Kıbrısçık-Nallıhan bölgesinde yaygın olan bu formasyon kumtaşı, şeyl, kireçtaşı ve tüf ardalanmalıdır. Eksen yeri ve havzada genellikle şeyl ara tabakalı kumtaşları egemendir (Şekil 4.4-4.5). Tabakalanma çok belirgin olup tabaka kalınlıkları kumtaşlarında 5-50 cm arasında değişmektedir. Formasyon çoğu yerde kıvrımlıdır. Kıvrım eksenleri bölgede genel olarak doğu-batı veya kuzeydoğu-güneybatı doğrultuludur. Formasyonun genel görünümü gridir, ancak ayrışmış zonlar kahverengimsidir. Kumtaşları aşınmaya karşı daha dayanımlı olduğundan şeyllere göre daha dik ve sarp topoğrafya oluşturmuşlardır (MTA 2002; Apaydın vd. 2017).

Çalışma alanında, Yenipazar formasyonunun üzerinde bulunan alüvyon Karakaya Deresi boyunca uzanır. Kuvaterner yaşlı vadi alüvyonu genellikle kaba taneli olup, kum, çakıl ve blok boyutundaki malzemeden ibarettir. Taneler çoğunlukla kireçtaşları ve kumtaşlarından türemiştir.




Şekil 4.3 Kabaca yeraltı baraj yeri ve havzası jeoloji haritası, Jeofizik çalışma alanı (sarı dikdörtgen) (Apaydın vd. 2014)



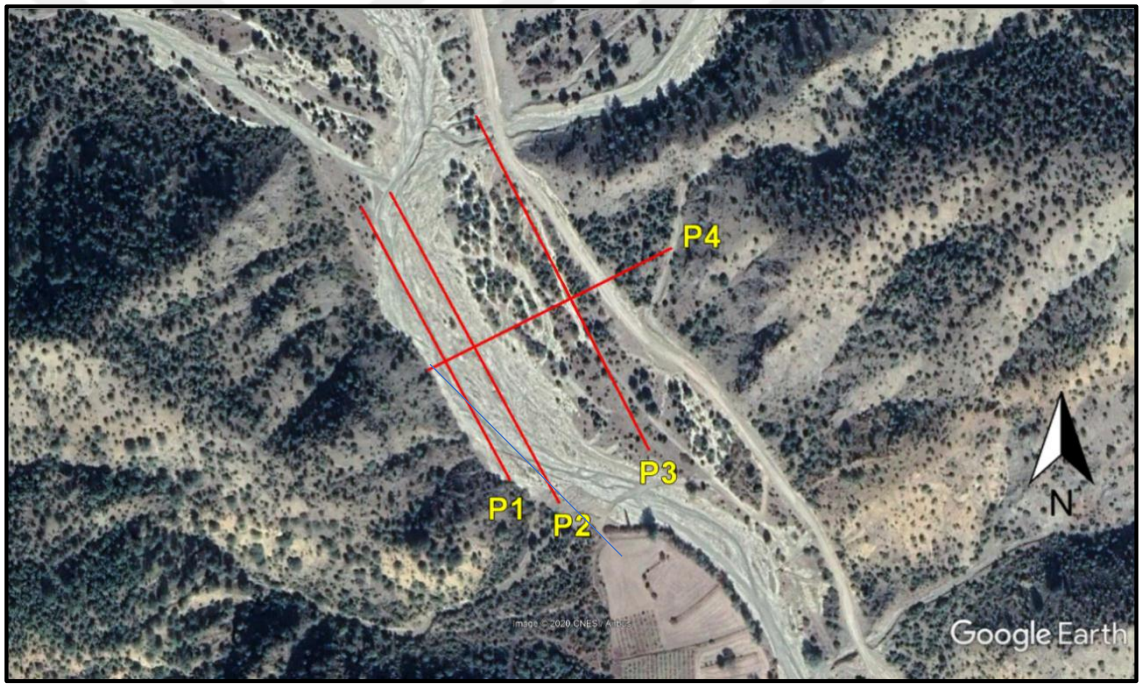

Şekil 4.4 Önceden planlanmış Kabaca yeraltı barajı eksen bölgesi ve mansabının sol yamaçtan görünümü (Apaydın vd. 2014)



Şekil 4.5 Kabaca yeraltı barajı eksen yerindeki kumtaşlarının yakından görünümü (Apaydın vd. 2014)

## 4.3 Veri Toplama

Başlangıçta, Haziran 2020 tarihinde çalışma alanında vadi boyunca 4 paralel profilde ve eksen boyunca bir profilde ölçü alınmıştır. Ancak vadi boyunca ölçülen iki profil ve ve eksen boyunca ölçülen bir profilde veri kalitesi kablo sorunu nedeni ile gürültülü ölçülmüş ve kullanılamamıştır. Daha sonra Ekim 2020' de söz konusu alanda iki ek profilde ölçü alınmıştır. Çalışma alanında Jeofizik DAÖ verileri düşünülen yeraltı barajı eksen yerine dik (vadi boyunca) olacak şekilde üç (P1, P2, P3) ve bu üç profile dik (eksene paralel) bir profilde (P4) olmak üzere toplam dört profilde sondaj-profil ölçüsü alınmıştır. P1, P2, P3 profilleri vadi boyunca yaklaşık KB-GD doğrultulu, P4 profili ise eksen boyunca yaklaşık KD-GB doğrultuludur (Şekil 4.6-4.7).



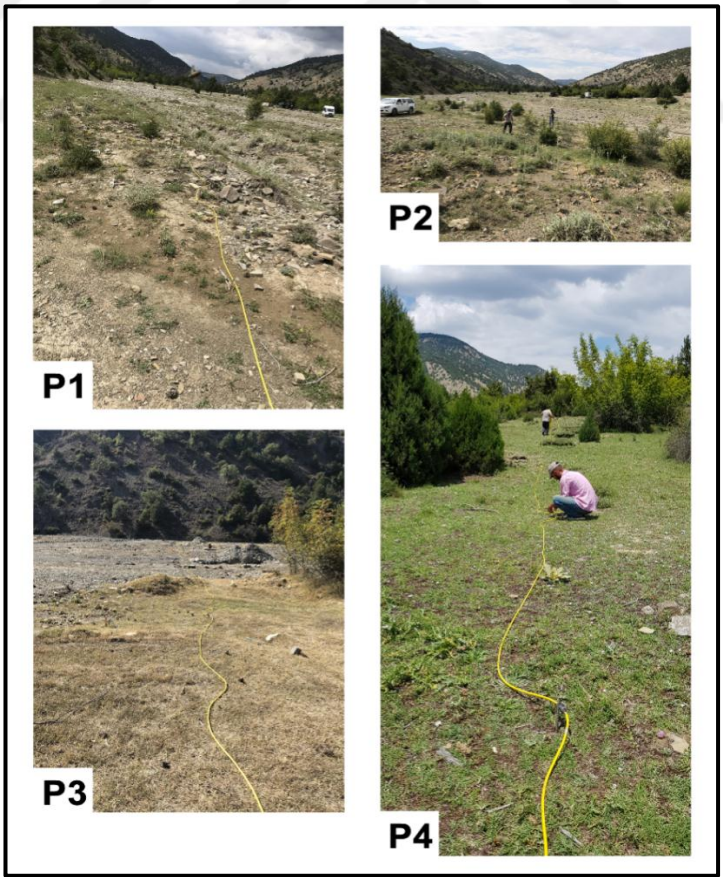

Şekil 4.6 Ölçüm profillerinin (P1, P2, P3, P4) çalışma alanındaki konumları

Çalışmada Ankara Üniversitesi Jeofizik Mühendisliği Bölümü'nde bulunan AGI SuperSting R8/IP çok elektrotlu ve çok kanallı özdirenç ölçüm sistemi kullanılmıştır (Şekil 4.8). Her dört profilde de elektrot aralığı a=5 m seçilmiştir. Kullanılan elektrot sayısı ve buna bağlı olarak profil boyu hedeflenen araştırma derinliği göz önünde bulundurularak arazinin topoğrafya ve bitki örtüsü koşullarına göre belirlenmiştir. Sağ ve sol yönlü pol-dipol ve dipol-dipol elektrot dizilimleri kullanılarak n=1,2,..,8 seviyede

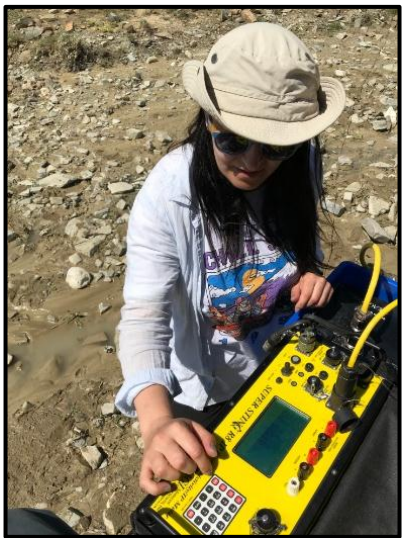
s=a, 2a, 3a, 4a dipol açıklıkları ile veriler toplanmıştır. Tüm profiller ile ilgili bilgiler Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1 Ölçüm profillerine ait bilgiler

| | | | Koordinatlar (36T)-UTM | | Ölçülen Veri Sayısı | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Profil Adı** | **Elektrot Sayısı** | **Profil Boyu (m)** | **Başlangıç** | **Bitiş** | **Pol-dipol (AMN+BMN)** | **Dipol-dipol (ABMN)** | **Toplam Veri Sayısı** |
| **P1** | 49 | 240 | 359505 4465938 | 359390 4466160 | 1617 | 737 | 2354 |
| **P2** | 56 | 275 | 359533 4465941 | 359413 4466172 | 1953 | 737 | 2690 |
| **P3** | 56 | 275 | 359629 4466130 | 359437 4466037 | 1528 | 740 | 2268 |
| **P4** | 45 | 220 | 359605 4465964 | 359477 4466205 | 561 | 507 | 1068 |
| **Toplam** | 204 | 1000 | - | - | 5659 | 2721 | 8380 |




Şekil 4.7 Ölçüm profilleri (P1, P2, P3, P4)



Şekil 4.8 AGI SuperSting R8/IP özdirenç ölçüm aleti

## 4.4 DAÖ Verilerinin 2B Ters Çözümü

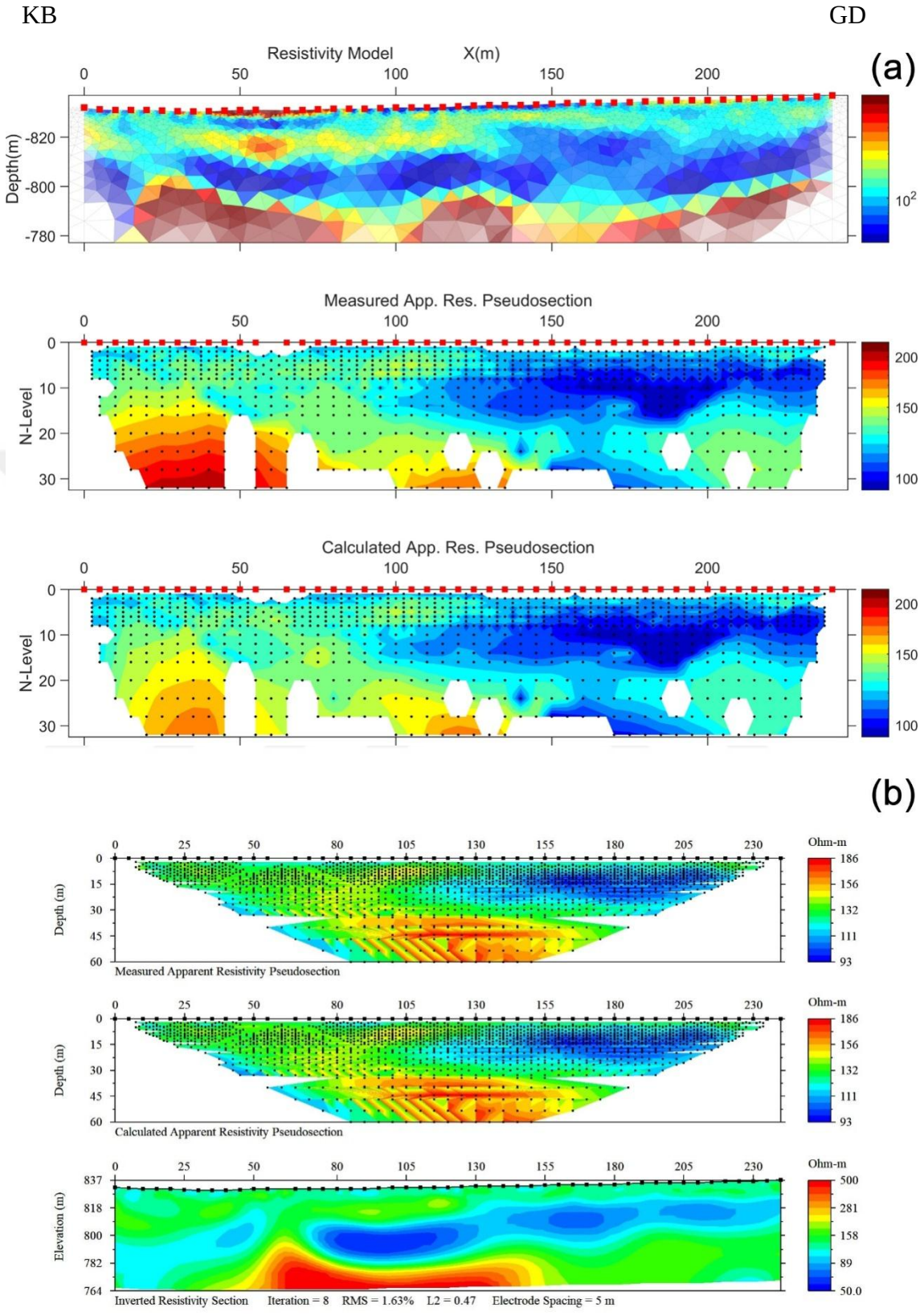
Çalışmada dört profil boyunca toplanan DAÖ verileri her profildeki farklı elektrot dizilimleri birleştirilerek ayrı ayrı iki farklı ters 2B ters çözüm algoritması ile değerlendirilmiştir. Bu algoritmalar, DetectSol Yerbilimleri Jeofizik San. Tic. Ltd. Şti. firmasına ait düzensiz ağ kullanarak 2B ters çözüm yapan "DCRMT2D"isimli program ile AGI firmasına ait düzenli ağ kullanarak 2B ters çözüm yapan "EarthImager2D" programıdır. P1, P2 ve P3 için DCRMT2D ve EarthImager2D programları ile yapılan ters çözüm sonuçları Şekil 4.9, 4.10 ve 4.11' de verilmiştir. Tüm ters çözüm işlemlerinde başlangıç modeli olarak tek düze (homojen) yer modeli seçilmiştir ve modelin özdirenç değeri her profilde ölçülen verilerin ortalamasına eşit alınmıştır. Ters çözüm yöntemi olarak yuvarlatıcı-durağanlaştırıcılı-düzgünleştiricili Gauss-Newton yöntemi kullanılmıştır. Verilerin 2B ters çözümüne ait kullanılan veri, yineleme sayısı ve en küçük karekök hata (RMS) değeri çizelge 4.2'de verilmiştir. Veriler çok küçük standart sapma değerleri ile ölçülmüştür. Dolayısıyla tüm ters çözüm sonuçları çok küçük RMS hataları ile (RMS<2.0) elde edilmiştir (Çizelge 4.2). Dolayısıyla, ölçülen ve kuramsal veri çakışması çok iyidir. İlerleyen bölümlerde sondaj sonuçları ile ilişkilendirilmiş ve elde eidlen modelleri sondajlar ile uyumlu oluğu görülmüştür.

2B modellerin yorumu “Tartışma ve Sonuçlar” bölümünde, sondaj verileri ile ilişkilendirilerek yapılmıştır.

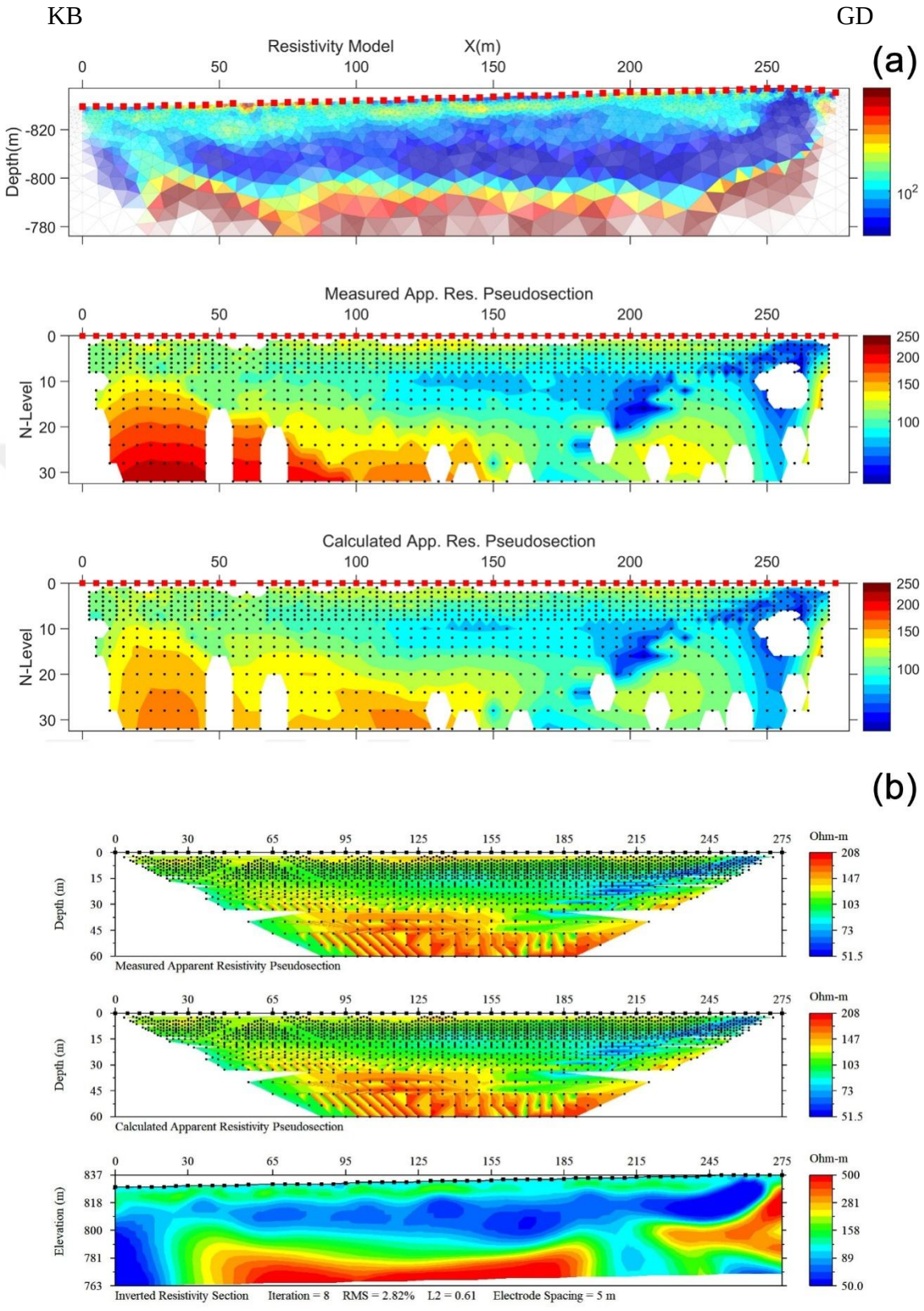
Çizelge 4.2 Ölçüm profillerinin 2B ters çözümüne ait bilgiler

| **Profil Adı** | **Ters Çözümde Kullanılan Veri Sayısı** | **Ters Çözümde Kullanılan Parametre Sayısı (EI2D-DCRMT2D)** | **Yineleme Sayısı (EI2D-DCRMT2D)** | **RMS (EI2D – DCRMT2D)** |
|---|---|---|---|---|
| P1 | 2247 | 2355- 2104 | 7-6 | 1.2-1.2 |
| P2 | 2648 | 2693-2211 | 5-5 | 2.2-2.1 |
| P3 | 1548 | 2635-2198 | 10-7 | 2.1-1.9 |
| P4 | 722 | 2213-1978 | 6-5 | 1.4-1.3 |

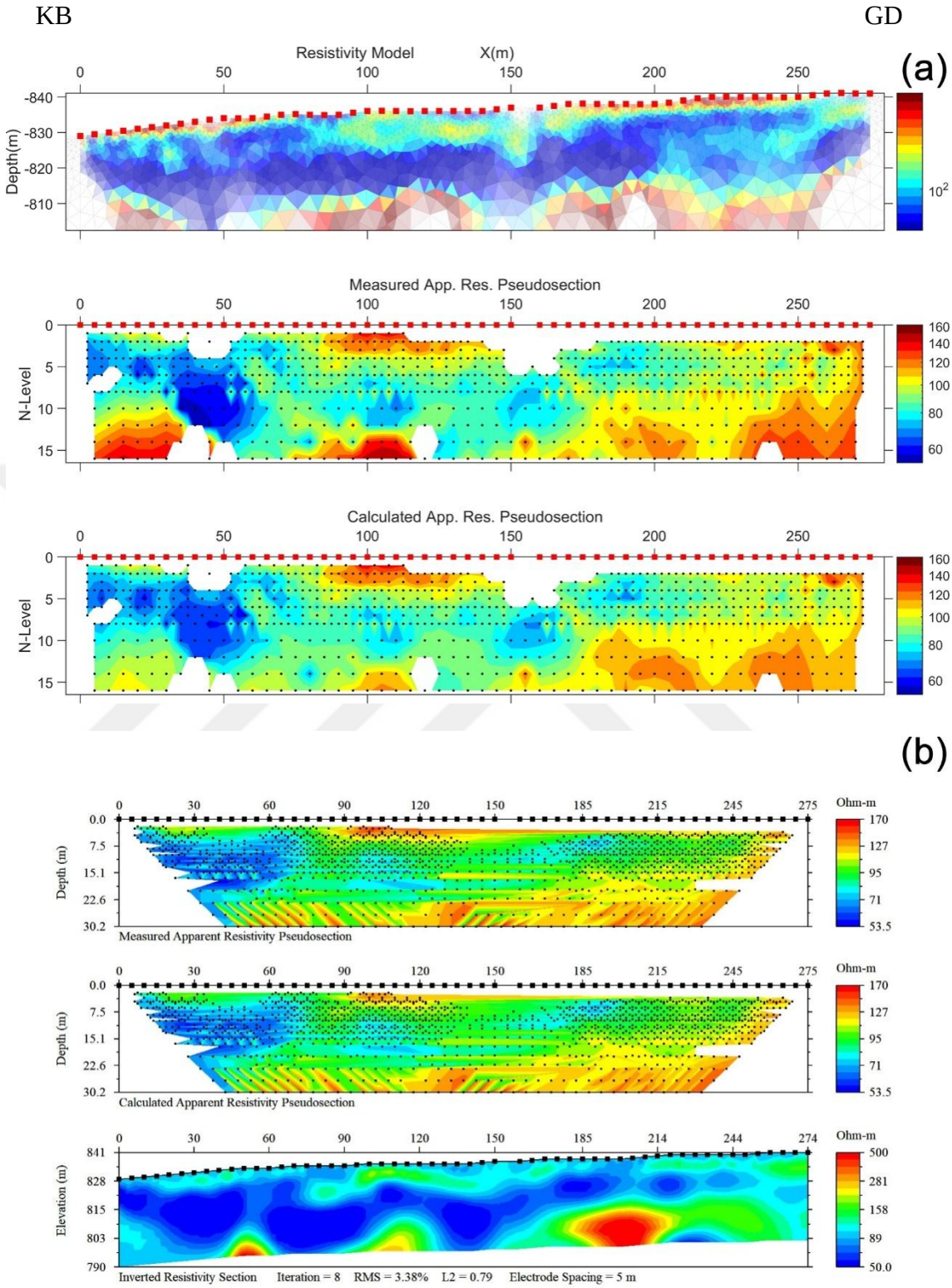
Ters çözüm sonu elde edilen 2B yer elektrik modelleri ve ilgili profillere ait ölçülen ve kuramsal veri yapma kesitleri Şekil 4.9-4.12’de verilmiştir.



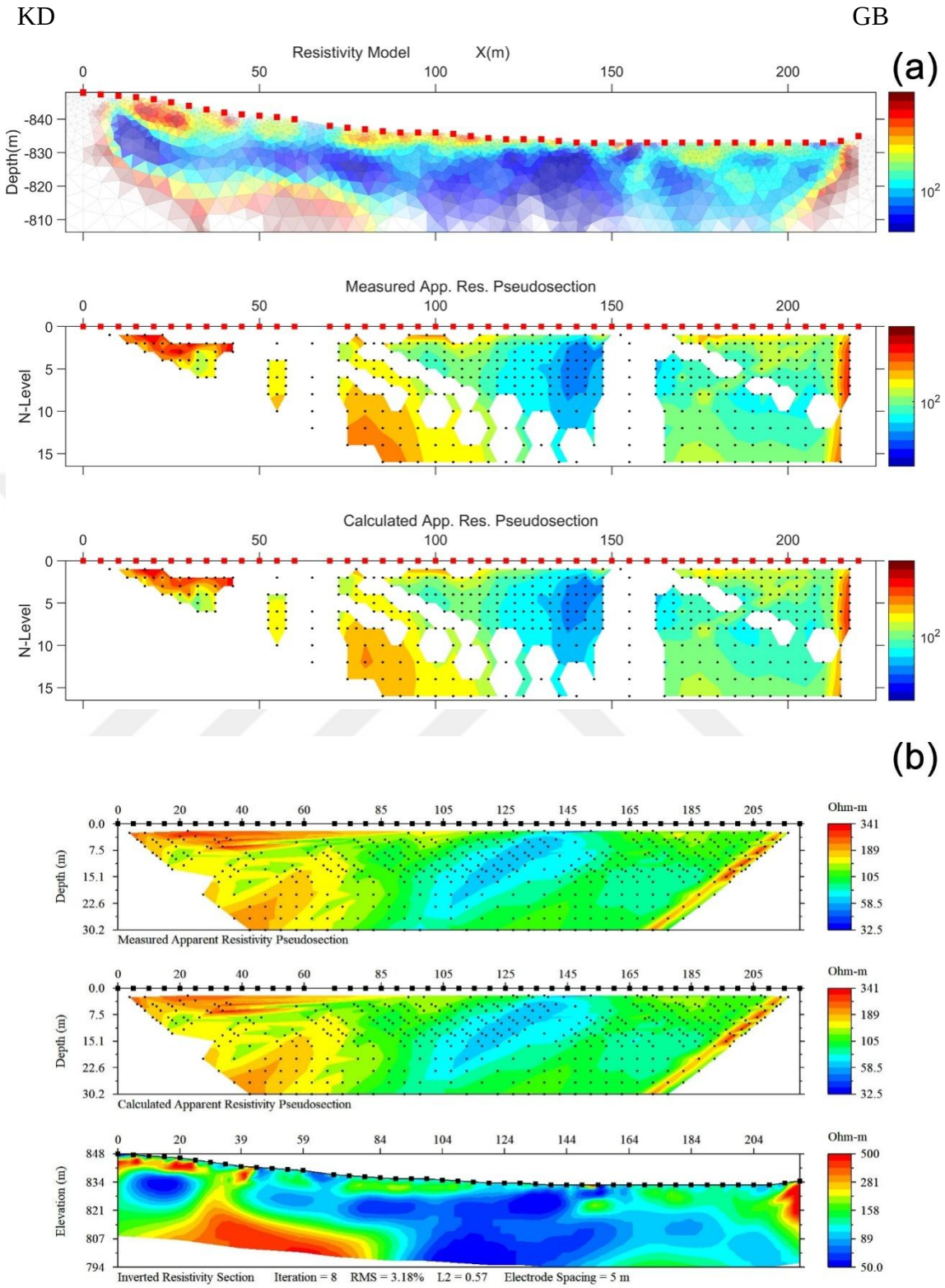

Şekil 4.9 P1 profiline ait 2B özdirenç modeli, ölçülen ve kuramsal veri yapma kesitleri. (a) DCRMT2D yazılımı (b) EarthImager2D yazılımı




Şekil 4.10 P2 profiline ait 2B özdirenç modeli, ölçülen ve kuramsal veri yapma kesitleri. (a) DCRMT2D yazılımı (b) EarthImager 2D yazılımı




Şekil 4.11 P3 profiline ait 2B özdirenç modeli, ölçülen ve kuramsal veri yapma kesitleri. (a) DCRMT2D yazılımı (b) EarthImager 2D yazılımı

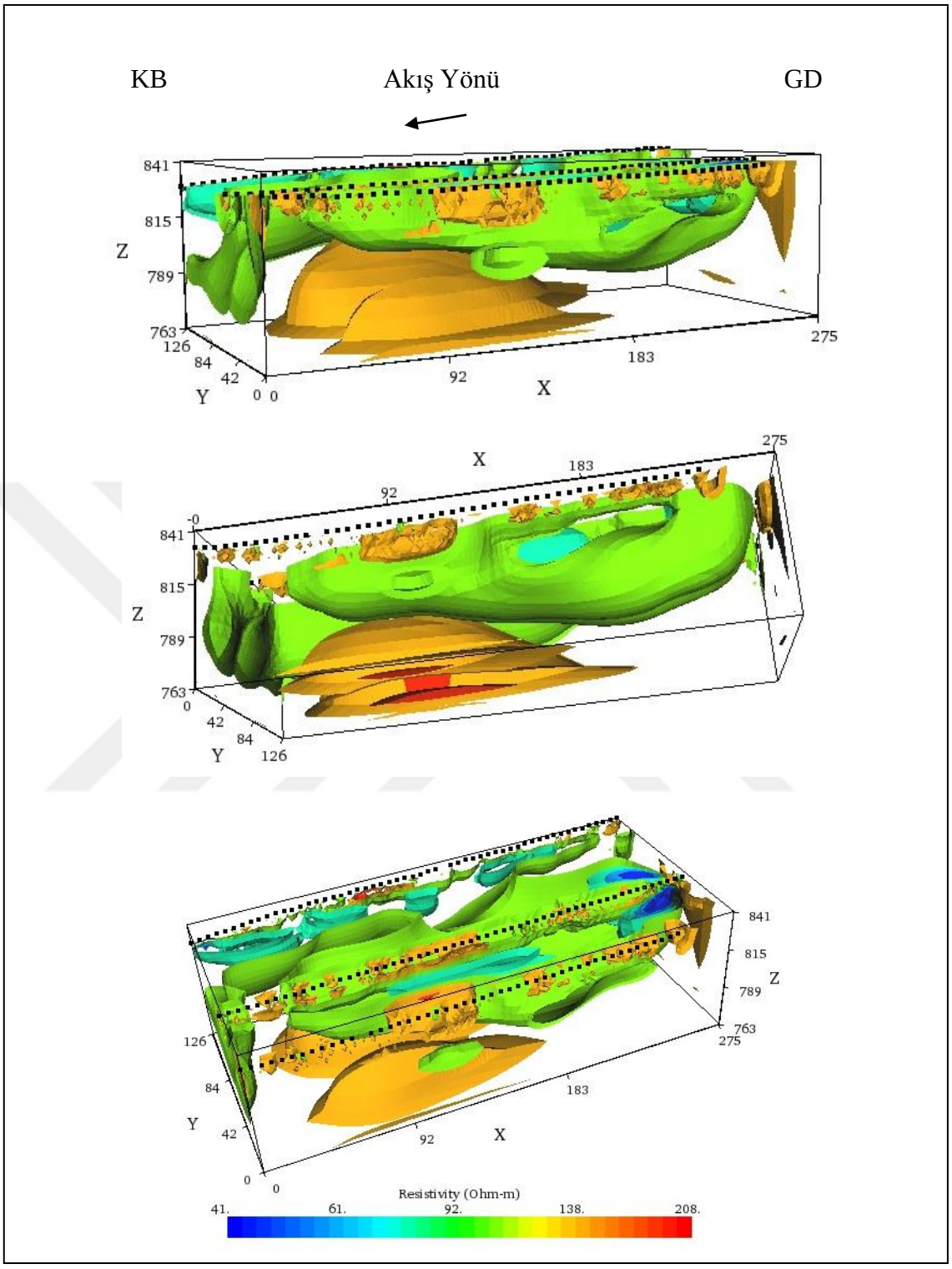



Şekil 4.12 P4 profiline ait 2B özdirenç modeli, ölçülen ve kuramsal veri yapma kesitleri. (a) DCRMT2D yazılımı (b) EarthImager 2D yazılımı

## 4.5 DAÖ Verilerinin 3B Ters Çözümü

Çalışma alanında üç paralel profilin (P1, P2 ve P3) 3B ters çözümü AGI firmasının EarhImager3D programı ile yapılmıştır (Şekil 4.12). Bu ters çözüm sonucunda özellikle temel kaya ile üstteki alüvyon ara sınırı 3B olarak çok net şekilde ortaya çıkarmıştır.

Ters çözümde 6.443 veri kullanılmıştır. Ters çözümde 54.264 model parametresi çözülmüştür. Burada ölçü hattı boyunca elektrod aralığı 5m iken, iki profil arası mesafe 80 metreden yüksektir. Bu nedenle y- yönünde model ayrımlılığı zayıftır. Başlangıç modeli olarak tek düze (homojen) yer modeli seçilmiştir ve modelin özdirenç değeri ilgili profillerde ölçülen verilerin ortalamasına eşit alınmıştır. Ters çözüm yöntemi olarak yuvarlatıcı-durağanlaştırıcılı (smoothing stabilizer) düzgünleştiricili ters çözüm (Regularized inversion) yöntemi kullanılmıştır. Ters çözüm sonu elde edilen 3B yer elektrik modeli Şekil 4.13'te verilmiştir. Bu modelde' de özellikle alüvyon ve temel kaya arayüzeyi 3B olarak ortaya çıkarılmıştır. Bu sonuçlar 2B ters çözüm sonuçları ile uyum içindedir.




Şekil 4.13 P1, P2 ve P3 profillerinde ölçülen tüm verilerin 3B ters çözümü sonucu elde edilen 3B özdirenç modeli (eş yüzey geçirilerek çizilen özdirenç modelinin farklı açılardan görünüm). Burada özdirencin 100 Ohm.m' den büyük olduğu turuncu yüzey alüvyon ve temel kaya ara yüzeyidir.

## 5. BULGULAR

Bu tez çalışması kapsamında yeraltı barajı yapılması planlanan sahada;

1- DAÖ yöntemi ile vadi boyunca paralel hatlar boyunca sondaj profil ölçüsü alınması önerilmiştir. Böylece, her bir hat boyunca 2B özdirenç modelleri elde edilmiştir. Burada her bir özdirenç modeli elektrot sayısının yarısı kadar yapılacak sondaj sayısına eşdeğer sonuç vermiştir.

2- Yeraltı baraj yerinin memba, eksen ve mansap kısmında yapılan su ve temel sondaj çalışmalarından elde edilen jeolojik birimlerin kalınlıklarının 2B özdirenç modelleri ile uyum sağladığı tespit edilmiştir (Şekil 5.1, Şekil 5.2, Şekil 5.3 ve Şekil 5.4). Ancak alüvyon kalınlığının eksen boyunca çok fazla olduğu tespit edilmiştir. Dolayısıyla, önceki çalışmalarda belirlenen eksen doğrultusunun yerinin değiştirilmesi önerilmiştir.

3- Yine bu verilerin yorumu sonucu alüvyonun en ince olduğu baraj gövdesinin yeri için yeni bir eksen doğrultusu belirlenmiştir. Bu yeni eksen doğrultusu, 2014 yılında yapılan önceki çalışmalara göre planlanan eksenin yaklaşık 100 metre mansap tarafındadır (Şekil 5.5). Daha önceden önerilen eksen doğrultusunda alüvyonun yaklaşık 40 m olduğu tespit edilmiştir. Yeni eksen doğrultusunda ise alüvyon kalınlığının yaklaşık 30 m olduğu tespit edilmiştir. Önerilen yeni eksen doğrultusunda temel kaya derinliği yaklaşık 800 metre kotu iken, önceki önerilen eksen doğrultusunda temel kaya derinliği ortalama 790 metre kotudur. Burada yeni önerilen eksen boyunca da ek bir sondaj profil ölçüsü alınmalı ve ardından su ve temel sondaj kuyularının açılması önerilmektedir.

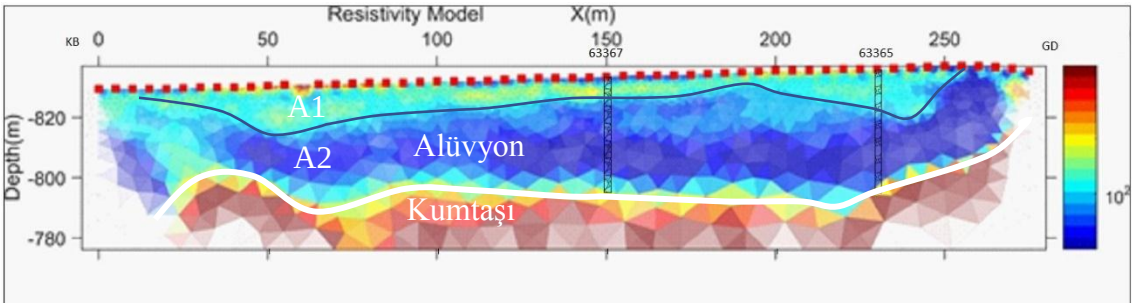
4- Çalışma sonunda önceden belirlenen baraj yeri ekseninin, mansap' a doğru yaklaşık 100 metre kaydırılması önerilmiştir. Yeraltı barajlarının eksen yeri yapısının temel birime oturtulması göz önüne alındığında bu tez çalışması sonucunda önerilen yeni eksen yeri, kazı maliyetinin daha az olmasına imkan

verecektir. Ayrıca, baraj gövdesinin mansap tarafına doğru kaydırılması ile daha fazla suyun depolanacağı rezervuar hacminin artmasına neden olacaktır.

5- DES ölçüm tekniği uygulamasında DES noktaları arasında ölçü alınmayan yerlerin özdirenç modeli, iki DES noktasındaki modellerin "interpolasyonu" ile kabaca belirlenmektedir. Yine bu ölçüm sonuçlarına göre önerilen ve daha sonra açılan sondajlar da her zaman doğru bir yeraltı kesiti modeli vermeyebilir. Bu nedenle baraj inşası aşamasında eksen yerinde yapılacak kazı veya dolgu çalışmaları sırasında beklenmedik bazı problemler gözlemlenebilir. Bu çalışma ile önerilen; çalışma sahasında DAÖ yöntemi ile baraj memba, eksen ve mansap kısmında toplanan veriler sonucu elde edilen 2B ve 3B ayrıntılı özdirenç modelleri yardımı ile kazı veya dolgu aşamasında karşılaşılacak bazı problemlerin daha önceden tespit edilmesine olanak sağlayacaktır.

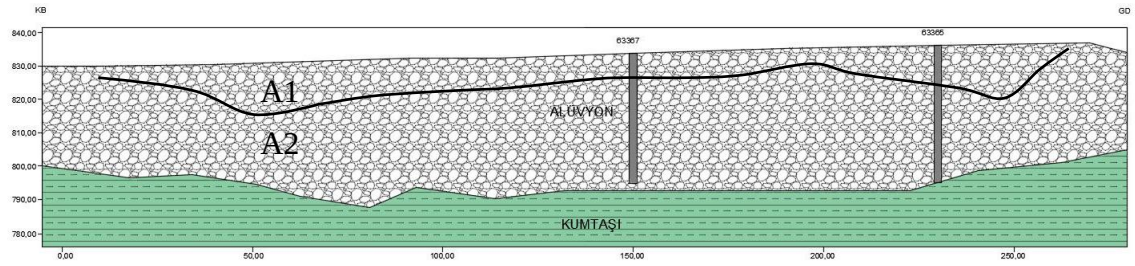
6- Bu tez çalışması sonucunda yeraltı barajları uygulamalarında yer alan Jeofizik araştırmalar, Şekil 2.5'te verilen işlem aşamalarında sadece ön inceleme aşamasında değil, planlama aşamasında jeofizik modeller yardımıyla açılan sondajların korelasyonu ve doğal yapı malzemelerinin araştırılmasına olanak sağlayacaktır. Ayrıca baraj gövdesinde olması muhtemel su kaçağı, oturma gibi problemlerin DAÖ yöntemi ile toplanan veriler sonucu elde edilecek yer elektrik modelleriyle araştırılmasına olanak sağlayacak olup, izleme aşamasında da kullanılması (Şekil 5.6) önerilmektedir.

Bu tez çalışması ileride yapılacak yeraltı baraj yeri seçimi için yapılacak Jeofizik araştırmalar için örnek teşkil edecektir.



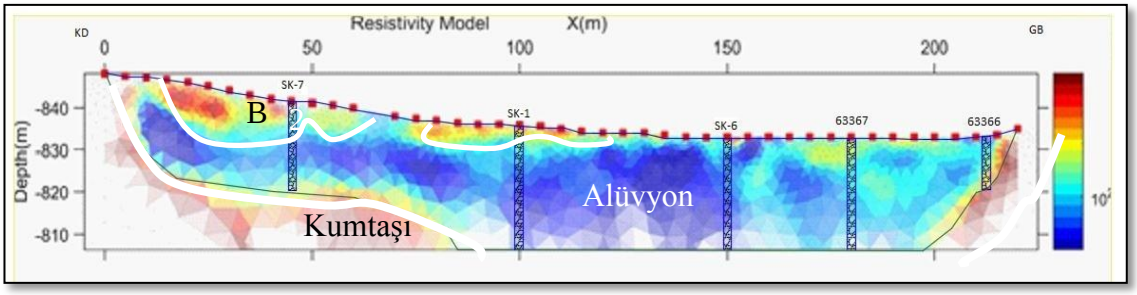

Şekil 5.1 P2 profili boyunca açılan sondajlarla korelasyonunu gösteren yer elektrik modeli.

Beyaz kalın çizgi ile gösterilen sınır, alüvyon ve ana kaya ara yüzeyidir. Alüvyon kendi içinde A1 ve A2 olarak iki alana ayrılmaktadır. Yüzeydeki A1 alanı daha az kili, daha iri taneli kumlu çakıllı birimdir. A2 olarak sınırlandırılan alan ise daha killi, daha ince taneli çakıllı, kumlu alüvyonu göstermektedir.



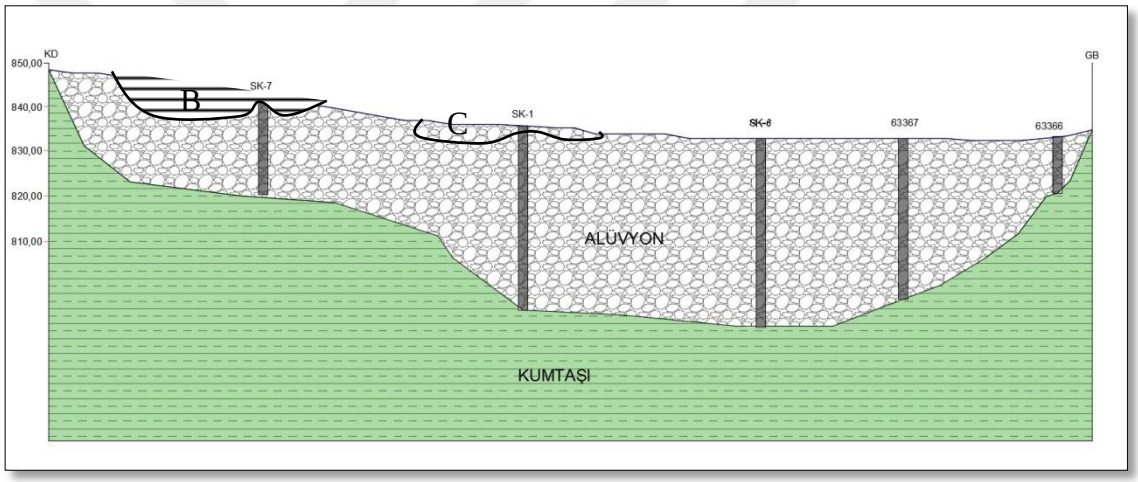

Şekil 5.2 P2 profili için Şekil 5.1' deki 2B özdirenç modelinden türetilen jelojik kesit.

Bu kesitte alüvyon birim kendi içinde A1 ve A2 bölgelerine ayrılmıştır. Bu alanların açıklaması yukarıdaki paragrafta verilmiştir.



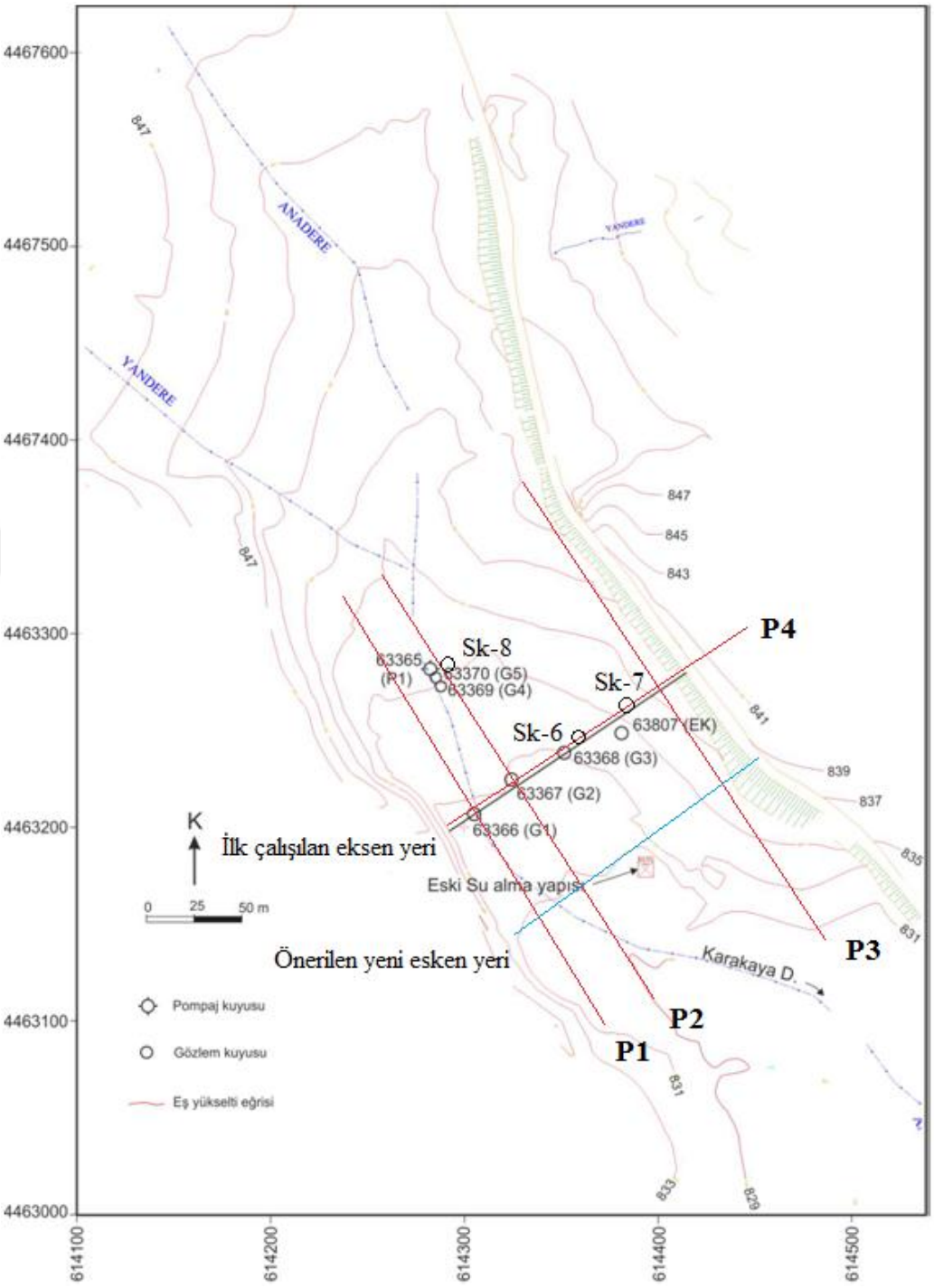

Şekil 5.3 P4 profili boyunca açılan sondajlarla korelasyonunu gösteren yer elektrik modeli.

Beyaz kalın çizgi ile gösterilen sınır, alüvyon ve ana kaya ara yüzeyidir. B1 alanı alüvyon konisidir.

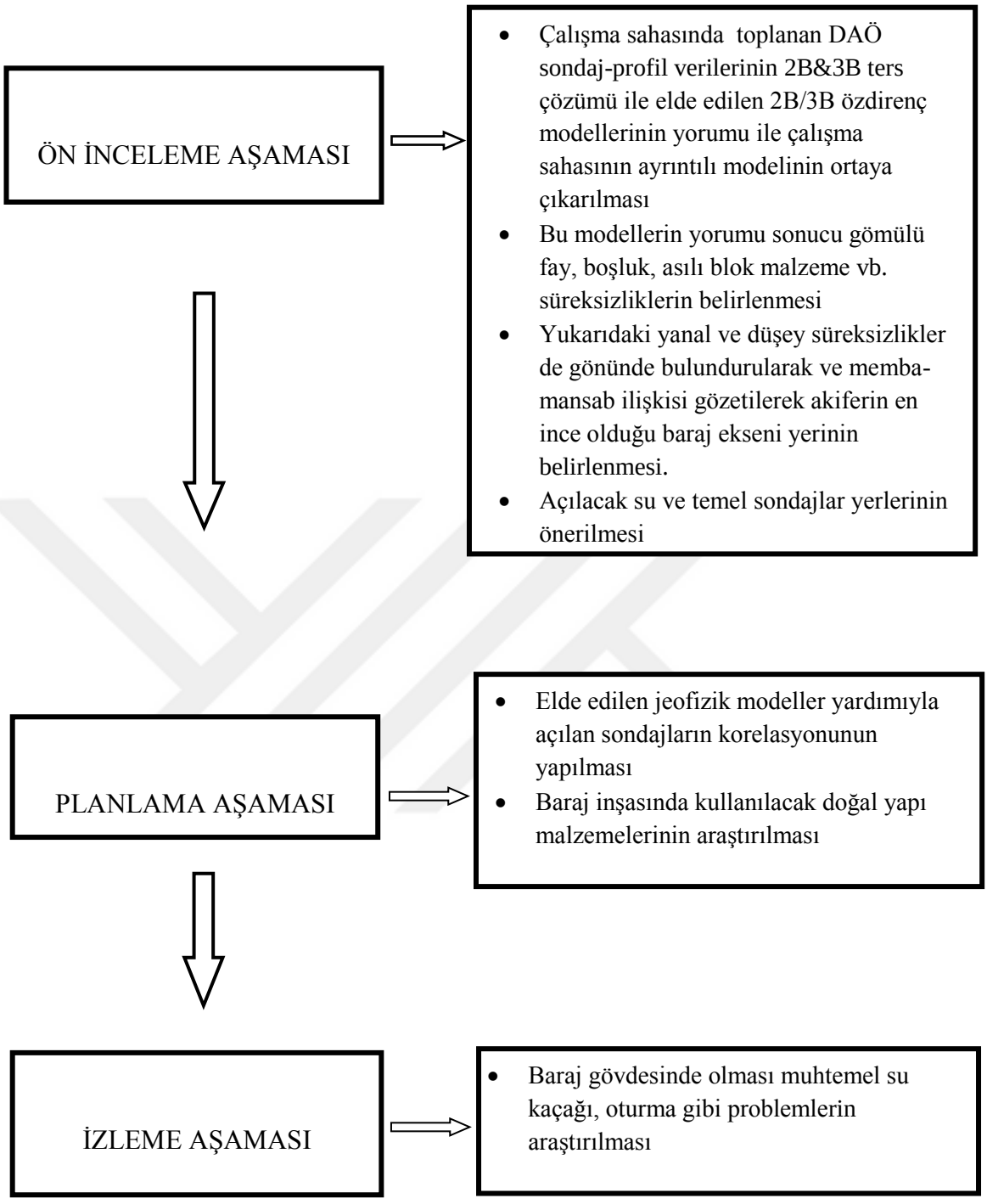



Şekil 5.4 P4 profili için Şekil 5.3' deki 2B özdirenç modelinden türetilen jelojik kesit.

Özdirenç modelinin derin bölgeleri, kuyu verilerine göre çizilmiştir. B ile gösterilen alan alüvyon konisi, C ile gösterilen alan bloklu çakıllı alüvyondur.




Şekil 5.5 Önceki çalışılan eksen yeri ve tez çalışması sonucu yeni önerilen eksen yeri ve profil doğrultuları




Şekil 5.6 Yeraltı barajı çalışmalarında Jeofizik araştırmaların işlem aşamaları

# 6. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, yeraltı sularının mevcut miktarını arttırmak amacıyla günümüzde tercih edilmeye başlanılan yeraltı barajları için uygun yerlerin seçiminde Jeofizik yöntemlerden Doğru Akım Özdirenç (DAÖ) yönteminin kullanılabilirliği araştırılmıştır. Mevcut yeraltı baraj yeri seçimi çalışmalarında uygulanan Jeofizik çalışmalardaki eksiklikler tezin giriş bölümünde açıklanmıştır.

Bu tez çalışmasında vadi boyunca paralel hatlar üzerinde 5-10 metre elektrot aralığı ile DAÖ sondaj-profil ölçüleri alınarak gömülü fay, boşluk vb. yapılar belirlenebilir. Örneğin elektrot aralığı a=10 metre ve 112 elektrotlu bir sistem ile 1120 metre bir hat boyunca 10 metre yanal ayrımlılıkta blok yapılar, gömülü fay ve/veya boşluk yapıları vb. yanal süreksizlikler ile 250-275 metre derinliğe kadar olan düşey yöndeki özdirenç değişimi belirlenebilir. Böyle bir çalışma 10 metre aralıklı 100 adet mekanik sondajın vereceği sonuca eşdeğerdir. Bu tez konusu kapsamında, Nallıhan- Kabaca köyü' ndeki yeraltı baraj yerinde örnek bir Jeofizik DAÖ çalışması yapılmıştır. Çalışmada vadi boyunca 3 paralel doğrultuda DAÖ sondaj-profil verileri toplanmıştır. Bu verilerin 2B ve 3B ters çözümü sonucu, alüvyon ve temel kaya ara yüzeyi vadi boyunca 270 metre ve vadiye dik yönde yaklaşık 200 metrelik alanda ayrıntılı olarak ortaya çıkarılmıştır. Alanda alüvyonun 3B olarak kalınlaştığı ve inceldiği bölgeler belirlenmiştir. Sonuçta, önceki çalışmada önerilen eksen yerinde alüvyonun çok kalın olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, eksenin bitim yeri olan yolun üst kotunda alınan ölçüler, burada da kalın bir alüvyon konisinin olduğu ortaya çıkarılmıştır. Buda eksenin önceki çalışmalarda belirlendiğinden daha geniş olması ve bu nedenle maliyeti de artıracağı bu tez çalışması ile ortaya çıkarılmıştır. Yine bu tez çalışması ile, planlanan eksenin yerine, bu eksenden 100 metre mansap tarafına doğru yeni bir eksen yeri önerilmiştir. Bu eksen doğrultusunda alüvyonun daha ince ve eksen yerinin daha dar olduğu jeofizik çalışma sonunda ortaya çıkarılmıştır.

Sonuç olarak bu tez çalışması ile ileride yapılacak yeraltı baraj yeri seçiminde aşağıdaki çalışmalar önerilmiştir;

1- Ön jeoloji ve hidrojeoloji saha gözlemlerinden sonra vadi boyunca birbirine paralel hatlarda DAÖ sondaj profil ölçüleri alınmalıdır. Sondaj-profil ölçü hatlarının uzunluğu, çalışmalarına göre değişebilir.
2- Ölçülen DAÖ sondaj profil verileri 2B ters çözüm ile yeraltının 2B özdirenç modelleri elde edilmelidir. Eğer profiller arası mesafe çok fazla değil ise ayrıca 3B ters çözüm yapılması da önerilmektedir.
3- DAÖ modellerinin yorumu sonucu, vadi boyunca 3B alüvyon kalınlığı belirlenir. Memba alanının fazla olabileceği ve alüvyonun ince ve baraj ekseninin dar olacağı bir veya birkaç doğrultu belirlenmelidir. Belirlenen bu eksen doğrultuları boyunca tekrar DAÖ sondaj profil ölçüleri alınarak, eksen boyunca yanal ve düşey süreksizlik ve alüvyonun kalınlığı ortaya çıkarılmalıdır. Eksen boyunca yapılan Jeofizik DAÖ çalışmaları sonunda eksen doğrultusu belirlenmeli ve yine özdirenç modellerine göre önerilen noktalarda su ve temel araştırma sondajları yapılmalıdır.
4- Sondaj ve Jeofizik modellerin korelasyonu sonucu baraj eksenine karar verilmelidir.
5- Ayrıca, baraj inşası sırasında, baraj gövdesinde kullanılacak doğal yapı malzemelerinin alınacağı yerin belirlenmesi için yine Jeofizik DAÖ ölçüleri alınmalıdır.
6- Barajın su tutmasından sonra ilerde oluşacak su kaçaklarının ve oturmaların nedenleri Jeofizik araştırmalar ile belirlenebilir. Jeofizik elektrik yöntemler (DAÖ, Yapay Uçlaşma ve Doğal Uçlaşma) yöntemleri ile su kaçak yerleri tespit edilebilir. Yine oturma için DAÖ ve Sismik kırılma yöntemleri incelenebilir.
7- Bu tez çalışması sonunda baraj yeri seçimi, baraj yapımı ve barajın işletilmesi sürecinde yapılacak Jeofizik araştırmalar bir akış şeması ile Şekil 5.6’ da önerilmiştir.

## KAYNAKLAR


Aina A., Olurunfemi M., Ojo J. 1996. An integration of aeromagnetic and electrical resistivity methods in dam site investigation, Geophysics. Vol. 61, pp. 349-356.

Apaydın A., Demirci Aktaş S., Kaya S. 2008. Orta Anadolu'da Kuraklıkla Mücadelede Yeraltı barajları, Kuraklık ve Su Yönetimi Toplantısı DSİ Genel Müdürlüğü, Ankara

Apaydın A, Demirci Aktaş, S, Kaya, 2009. Yeraltında su depolama: Yeraltı barajları. Mavi Gezegen, Popüler Yerbilim Dergisi, TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası yayını, Sayı 14, 44-53.

Apaydın A., 2014, Yer Seçiminden İşletmeye Yeraltı Barajları Kitabı, DSİ Genel Müdürlüğü Destek Hizmetleri Daire Başkanlığı Basım ve Foto-Film İşl. Müd. 245 s. (www.dsi.gov.tr/yayinlarimiz)

Apaydın A., 2015, Ankara Nallıhan Kabaca Yeraltı barajı Jeoteknik Ön inceleme Raporu, , DSİ 5. Bölge Müdürlüğü.

Apaydın A., Kaya S., 2017. Ankara Nallıhan Kabaca Yeraltıbarajı Jeoteknik Ön inceleme Raporu, DSİ 5. Bölge Müdürlüğü

AGI Inc. 2008. EarthImager 2D resistivity Inversion Software.

Auken, E., Pellerin, L., Christensen, N. B., & Sørensen, K. 2006. A survey of current trends in near-surface electrical and electromagnetic methods. Geophysics, 71(5), G249-G260.

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

Candansayar, M. E. 1997. Doğru Akım Özdirenç Yönteminde Modelleme Ve İki-Boyutlu Yapıların Aranmasında Elektrot Dizilimlerinin Ayrımlılıklarının Karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi (Yayınlanmamış).

Candansayar, M.E. 2007. Doğru Akım Özdirenç yöntemi, Elektrik Yöntemler Lisans Ders Notu, Ankara Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Jeofizik Mühendisliği Bölümü, Ankara, 38 s.

Candansayar, M. E., Tezkan, B. 2008. Two- dimensional joint inversion of radiomagnetotelluric and direct current resistivity data. Geophysical Prospecting, 56(5), 737-749.

Demirci, I., Gündoğdu, N. Y., Candansayar, M. E., Soupios, P., Vafidis, A., & Arslan, H. 2020. Determination and Evaluation of Saltwater Intrusion on Bafra Plain:

Joint Interpretation of Geophysical, Hydrogeological and Hydrochemical Data. Pure and Applied Geophysics, 1-20.

DetectSol Yerbilimleri Jeofizik San. Tic. Ltd. Şti. 2020. DCRMT2D- Doğru Akım Özdirenç ve Manytotellürik/RMT Verilerin 2B Ters çözümü Paket programı.

Gündoğdu, N. Y., Demirci, İ., Demirel, C., & Candansayar, M. E., 2020. Characterization of the bridge pillar foundations using 3d focusing inversion of DC resistivity data. Journal of Applied Geophysics, 172, 103875.

Foster S, Azevedo G & Baltar A 2002. Subsurface dams to augment groundwater storage in Basement Terrain for Human Subsistence-Brazilian Experience" World bank, GWMATE Case Profile Collection, Vol. 5, pp. 5.

Foster F.,Tuinhof A. 2004, SubsurfaceDamsToAugmentGroundwater Storage İn BasementTerrainFor Human Subsistence, World Bank Sustainable Gaundwate Managment Lessons From Practice, pp. 1-8.

Foster S, Azevedo G &Baltar A 2002. Subsurface dam stoaugment ground water storage in Basement Terrainfor Human Subsistence-Brazilian Experience" World bank, GWMATE Case Profile Collection, Vol. 5, pp. 5.

Karastathis V.,Petros K., Drakatos G. 2002, Geophysical methods contributing to the testing of concrete dams, Journal of Applied Geophysics, Vol. 50, pp. 247–260.

Kim, J. H., Yi, M. J., Park, S. G., & Kim, J. G. 2009. 4-D inversion of DC resistivity monitoring data acquired over a dynamically changing earth model. Journal of Applied Geophysics, 68(4), 522-532.

MTA 2002, 1:100000 ölçekli Türkiye jeoloji haritaları-No: 39, Adapazarı H26 paftası, Jeoloji Etütleri Dairesi, Derleyen: Erol Timur ve Ahmet Aksay, Ankara

Nilsson A 1988. Groundwater dams for small-scale water supply, Intermediate Technology Publications Ltd. London, pp. 69.

Papadopoulos, N.G.,Tsourlos, P., Papazachos, C., Tsokas, G.N., Sarris, A. and Kim, J.H. 2011, An AlgorithmForFast 3D İnversion Of Surface Electrical Resistivity Tomography Data: Application On İmaging Buried Antiquities. Geophysical Prospecting, Vol. 59, pp. 557–575.

Rossi, M., Olsson, P. I., Johanson, S., Fiandaca, G., Bergdahl, D. P., & Dahlin, T. 2017. Mapping geological structures in bedrock via large- scale direct current resistivity and time domain induced polarization tomography. Near Surface Geophysics, 15(6), 657-667.

Saad, R., Nawawi, M. N. M., & Mohamad, E. T. 2012. Groundwater detection in alluvium using 2-D electrical resistivity tomography (ERT). Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 17, 369-376.

Saner, S., l98O, Muduınu-Göynük havzasının Jura ve soffası çökelim nitelikleriyle paleocoğrafik yorumlaması. TJK Bülteni, 23l|, 39-52.

SantosJ.P&Frngipani A. 1978, Barragens Submersas_Um Alternativa Para Nordeste Braseleria, in Congreso Braserio de Geologia de Engenharia, V.2, SauaPaula, pp. 119-126.

Singh, Anand, and S. P. Sharma 2018. Identification of different geologic units using fuzzy constrained resistivity tomography. Journal of Applied Geophysics 148,127-138.

Sjödahl P., Dahlin Torleif., ZhouBing. 2006. 2.5D Resistivity Modeling of Embankment Dams to Assess Influence from Geometry and Material Properties. Geophysics. Vol. 71.

Suzuki, K., & Higashi, S. 2001. Groundwater flow after heavy rain in landslide-slope area from 2-D inversion of resistivity monitoring data. Geophysics, 66(3), 733-743.

Van Nostrand R.G, Cook K.L. 1966. İnterpretation of Rezistivity dada, USGS Report, 310 s.

# ÖZGEÇMİŞ

**Adı ve Soyadı :** Selin KAYA

**Doğum Yeri** : Kars

**Doğum Yılı** : 02.07.1979

**Medeni Hali :** Bekar

**Yabancı Dili** : İngilizce

## Eğitim Durumu

**Lise:** Kars Alparslan Lisesi (1996)

**Lisans:** Ankara Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Jeofizik Mühendisliği Bölümü (2003)

**Yüksek Lisans:** Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalı (Şubat 2013 – Kasım 2020)

## Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl

Devlet Su İşleri 5. Bölge Müdürlüğü, Jeoteknik Hizmetler ve Yeraltısuları Şube Müdürlüğü (Ağustos 2007-)

## Yayınlar

Apaydın A., Demirci Aktaş S., Kaya S., 2009, Yeraltında Su Depolama: Yeraltı Barajları , Mavi Gezegen Dergisi, Sayı:14.

## Ulusal Kongre Sunum

Apaydın A., Demirci Aktaş S., Kaya S., 2015, Ankara-Çankırı-Çorum Bölgesinde Yeraltı Barajları Konusunda Güncel Gelişmeler, Ulusal Mühendislik Jeolojisi Sempozyumu, KTÜ, Trabzon.

Apaydın A., Demirci Aktaş S., Kaya S., 2012, Orta Anadolu'da Küçük Ölçekli Su İhtiyaçları İçin Yeraltı Barajları Poster Sunumu, 65.Türkiye Jeoloji Kurultayı, Ankara.