

**T.C.
SÜLEYMAN DEMİREL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**SÖKE ALT HAVZASININ DOĞRU AKIM ÖZDİRENÇ
YÖNTEMİ İLE ARAŞTIRILMASI**

Betül AKYÜN

**Danışman
Prof. Dr. Çağlayan BALKAYA**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
JEOFİZİK ANABİLİM DALI
ISPARTA - 2024**

© 2024 [Betül AKYÜN]

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇİNDEKİLER	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT	iv
TEŞEKKÜR.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	x
1. GİRİŞ	1
1.1. Yer Altı Suyu, Akifer ve Hidrolojik Sorunlar	1
1.2. Araştırma Alanı	4
1.3. Amaç	4
2. KAYNAK ÖZETLERİ	6
2.1. Büyük Menderes Havzası Jeolojik ve Jeofizik Araştırmaları	6
2.2. DAÖ ve DES Çalışmaları.....	8
2.3. Dar-Zarrouk Araştırmaları	11
3. GENEL JEOLojİ.....	13
3.1. Büyük Menderes Havzasının Genel Jeolojik Özellikleri ve Hidrojeolojik Önemi.....	13
3.2. Stratigrafik ve Tektonik Yapı.....	13
3.3. Hidrojeolojik Özellikler	15
4. DOĞRU AKIM ÖZDİRENÇ (DAÖ) YÖNTEMİ.....	16
4.1. DAÖ Yönteminin Temel İlkeleri	17
4.2. DAÖ Ölçü Teknikleri ve Elektrot Dizilimleri.....	18
5. ARAZİ UYGULAMASI VE DEĞERLENDİRME	23
5.1. DAÖ DES Uygulaması	23
5.2. DES Verilerinin Bir-Boyutlu (1B) Değerlendirmesi.....	26
5.2.1. DES eğrilerinin birleştirilmesi.....	27
5.2.2. DES verilerinin 1B ters çözümü	29
5.2.3. Dar-Zarrouk parametrelerinin hesaplanması	31
5.2.4. 1B DES ters çözüm sonuçlarının görselleştirilmesi	36
5.3. DES verilerinin İki-Boyutlu (2B) Ters Çözümü	36
6. ARAŞTIRMA BULGULARI	40
6.1. 1B Ters Çözüm Sonuçları	40
6.2. 2B Ters Çözüm Sonuçları	56
7. SONUÇ VE ÖNERİLER	64
KAYNAKLAR	69
EKLER.....	72
EK A. Çizelgeler	72
ÖZGEÇMİŞ	90

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

SÖKE ALT HAVZASININ DOĞRU AKIM ÖZDİRENÇ YÖNTEMİ İLE ARAŞTIRILMASI

Betül AKYÜN

Süleyman Demirel Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Çağlayan BALKAYA

Büyük Menderes Havzası; Söke, Aydın, Didim ve Bafa Alt Havzalarından oluşmaktadır. Bu tez çalışması kapsamında, Söke Alt Havzası'nda GB-KD doğrultusunda uzanan 19 ölçüm noktasında düşey elektrik sondajı (DES) tekniği ile gerçekleştirilen doğru akım öz direnç araştırmasından görece sığ yeraltının elektrik ve hidrojeolojik özelliklerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda, araştırmada toplanan görünür öz direnç veri kümeleri bir-boyutlu (1B) ve iki-boyutlu (2B) ters çözüm teknikleri ile değerlendirilmiştir. 1B değerlendirme sonucunda her bir DES ölçüm noktası için katman parametreleri olan öz direnç ve kalınlıklar belirlenmiş ve bu verilerden yeraltının düşey yöndeki öz direnç dağılımı elde edilmiştir. 1B çözüm, incelenen alanın güneybatı bölümlerinde alüvyon kalınlığının kuzeydoğu bölgelerine kıyasla arttığını ortaya koymuştur. Ayrıca, bu bölgede yaklaşık 30-50 m derinlik seviyelerinde ve 30 km kuzeydoğu yönüne doğru uzanan düşük öz dirençli, tuz içeriği yüksek ve bozuşmuş bir zon belirlenmiştir. DES verilerinin 2B ters çözümünden elde edilen yeraltı modeli, 1B sonuçlarla uyumlu olarak, görece sığ derinliklerde düşük öz dirençli yapıyı ve bozuşmuş zon ortaya çıkarmıştır. Ayrıca, 2B çözüm, yanal yönde ondülasyon gösteren öz direnç değişimlerini de belirlemiştir.

Yeraltı formasyonlarının fiziksel özelliklerini anlamak ve yeraltı yapılarını modellemek açısından önemli olan diğer parametreler de hesaplanmıştır. Bu parametreler arasında eşdeğer öz direnç ve kalınlık, boyuna ve enine öz direnç, anizotropi katsayısı, etkin formasyon öz direnci, yansıma katsayısı, öz direnç kontrastı ve koruyucu kapasite derecelendirmesi (*KKD*) yer almaktadır. Elde edilen bulgular, Söke Alt Havzası'ndaki yeraltı formasyonlarının heterojen ve farklı elektriksel özellikler gösterdiğini ortaya koymaktadır. Özellikle, boyuna iletim ve enine direnç gibi parametrelerdeki belirgin değişiklikler, yer altındaki su içeriği ve geçirgenlik farklılıklarını işaret etmektedir. Yüksek eşdeğer öz direnç ve düşük boyuna iletim değerleri, yer altındaki kuru ve geçirgen olmayan zonları, düşük eşdeğer öz direnç ve yüksek boyuna iletim değerleri ise su barındıran ve geçirgen zonları temsil etmektedir. Analizlerden elde edilen *KKD* değerleri, çoğunlukla "Mükemmel" olarak belirlenmiş olup havzanın su taşıma kapasitesinin yüksek olduğunu ve suyun korunması için uygun formasyonların mevcut olduğunu göstermektedir. Bu tez çalışmasında gerçekleştirilen jeofiziksel analiz sonuçlarının bölgede etkin su yönetimi ve

hidrojeolojik modellemeler için sağlam temeller sunarak gelecekteki su kaynakları yönetimi çalışmalarına önemli ölçüde katkı sağlayacağı öngörülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Söke Alt Havzası, doğru akım öz direnç yöntemi, düşey elektrik sondaj tekniği, ters çözüm, Dar-Zarrouk parametreleri

2024, 90 sayfa



ABSTRACT

M.Sc. Thesis

INVESTIGATION OF THE SOKE SUB-BASIN USING THE DIRECT CURRENT RESISTIVITY METHOD

Betül AKYÜN

**Süleyman Demirel University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Geophysical Engineering**

Supervisor: Prof. Dr. Çağlayan BALKAYA

The Büyük Menderes Basin consists of the Söke, Aydın, Didim and Bafa sub-basins. The aim of this work is to determine the electrical and hydrogeological properties of the relatively shallow subsurface in the Söke sub-basin by a direct current resistivity survey carried out using the Vertical Electrical Sounding (VES) technique at 19 measurement points in the SW-NE direction. In this context, the apparent resistivity data collected in the study were evaluated using one-dimensional (1D) and two-dimensional (2D) inversion techniques. As a result of the 1D inversion, layer parameters such as resistivity and thickness were determined for each VES point and the vertical resistivity distribution of the subsurface was obtained. The 1D solution revealed that the thickness of the alluvium is greater in the south-western sections of the study area than in the north-eastern sections. In addition, a low resistivity zone characterized by high salinity and degradation was identified at a depth of approximately 30-50 m and extends approximately 30 km to the northeast. The 2D inversion model derived from the VES data agreed with the 1D results and showed a low resistivity structure and a degraded zone at relatively shallow depth. Besides, the 2D inversion also identified a lateral variation in resistivity, indicating undulations.

Other important parameters for understanding the physical properties of the subsurface formations and modeling the subsurface structures were calculated. These parameters include equivalent resistivity and thickness, longitudinal and transverse resistivity, anisotropy coefficient, effective formation resistivity, reflection coefficient, resistivity contrast and protective capacity rating (*PCR*). The results show that the subsurface formations in the Söke sub-basin have heterogeneous and distinct electrical properties. In particular, significant deviations in parameters such as longitudinal conductivity and transverse resistivity indicate differences in the water content and permeability of the subsurface. High values for equivalent resistivity and low values for longitudinal conductivity correspond to dry and impermeable zones, while low values for equivalent resistivity and high values for longitudinal conductivity correspond to water-bearing and permeable zones. The *PCR* values, most of which were classified as “excellent”, indicate that the basin has a high water-bearing capacity and that suitable formations for water conservation are present. It is expected that the geophysical analysis results presented in this paper will provide a solid foundation for effective water resource management and hydrogeological modeling in the region,

thus making an important contribution to future studies on water resource management.

Keywords: Söke Sub-basin, direct current resistivity method, vertical electrical sounding, inversion, Dar-Zarrouk parameters

2024, 90 pages



TEŞEKKÜR

Bu araştırmanın gerçekleştirilmesinde beni yönlendiren, karşılaştığım zorlukların üstesinden gelmemde bilgi ve tecrübesiyle destek olan değerli danışmanım Prof. Dr. Çağlayan BALKAYA'ya; tezimin gelişim sürecine değerli görüş ve önerileriyle katkı sağlayan Prof. Dr. Osman UYANIK ve Prof. Dr. Emin Uğur ULUGEREGERLİ'ye içten teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışmanın çeşitli aşamalarında değerli bilgi ve görüşleriyle destek sağlayan DSİ 21. Bölge Müdürlüğü Yeraltısuları Şube Müdürü Yüksek Jeoloji Mühendisi Ersin ÇELİKER'e teşekkürlerimi sunarım.

Çalışma kapsamında veri temini ve laboratuvar olanaklarından faydalanmamı sağlayan DSİ 21. Bölge Müdürlüğü ve değerli çalışanlarına teşekkür ederim.

Tezimin her aşamasında yanımda olan ve desteklerini esirgemeyen aileme sonsuz sevgi ve saygılarımı sunarım.

Betül AKYÜN
ISPARTA, 2024

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 1.1. Su döngüsü.....	2
Şekil 3.1. Çalışma alanı genel jeoloji haritası	14
Şekil 4.1. Dört elektrotlu bir dizilim ile DAÖ yönteminin temel çalışma prensibi.....	19
Şekil 4.2. Bir Roma dış kale burcunun (savunma kulesi) üzerinde elde edilen GÖ profil eğrisi (Sagvar, Macaristan).....	20
Şekil 4.3. GÖ DES eğrisi (üstte) ve bir DES çalışması için Schlumberger Elektrot diziliminin şematik gösterimi.....	21
Şekil 5.1. Türkiye'nin başlıca su havzaları	23
Şekil 5.2. DAÖ DES alan çalışmasından bir görüntü	24
Şekil 5.3. Söke Alt Havzası üzerinde gerçekleştirilen DAÖ çalışmasında DES noktalarının ve bilinen bazı sondajların konumları.....	24
Şekil 5.4. DES noktaları yakınlarında gerçekleştirilen ve SK-1 – SK-6 olarak adlandırılan sondajlardan belirlenen litoloji.....	25
Şekil 5.5. DES1 eğrisinin birleştirilmesi a) Ham veriler b) Birleştirilmiş veri c) Birleştirilmiş veri ile ham verinin karşılaştırılması d) Birleştirilmiş veri ve 1B ters çözümde kullanılacak yuvarlatılmış veri.....	28
Şekil 5.6. DES10 eğrisinin birleştirilmesi a) Ham veriler b) Birleştirilmiş veri c) Birleştirilmiş veri ile ham verinin karşılaştırılması d) Birleştirilmiş veri ve 1B ters çözümde kullanılacak yuvarlatılmış veri.....	28
Şekil 5.7. LM algoritması ile gerçekleştirilen 1B ters çözüm akış diyagramı	30
Şekil 6.1. Söke Alt Havzası'nda DAÖ yöntemi kullanılarak DES tekniği ile toplanan veri kümelerinin 1B ters çözümlerinden elde edilen katman parametreleri.....	41
Şekil 6.2. Söke Alt Havzası'nda DAÖ yöntemi kullanılarak DES tekniği ile toplanan veri kümelerinin 1B ters çözümlerinden elde edilen katman parametrelerinin yorumu	47
Şekil 6.3. AB/2 değerlerine karşılık gelen ve alan çalışmasından tüm DES noktaları için elde edilen görünür öz dirençlerin yeraltı dağılımı (üstte) ve 2B ters çözümünden elde edilen görünür öz dirençlerin yeraltı dağılımı (altta)	57
Şekil 6.4. Şekil 6.4. DES verilerinin 2B ters çözümünden elde edilen yeraltı öz direnç dağılımı	58
Şekil 6.5. DAÖ çalışmasında elde edilen görünür öz direnç değerleri ile DES noktaları 1-6 için 2B ters çözümünden elde edilen sonuçların karşılaştırılması.....	60
Şekil 6.6. DAÖ çalışmasında elde edilen görünür öz direnç değerleri ile DES noktaları 7-12 için 2B ters çözümünden elde edilen sonuçların karşılaştırılması.....	61
Şekil 6.7. DAÖ çalışmasında elde edilen görünür öz direnç değerleri ile DES noktaları 13-18 için 2B ters çözümünden elde edilen sonuçların karşılaştırılması.....	62
Şekil 6.8. DAÖ çalışmasında elde edilen görünür öz direnç değerleri ile DES-19 için 2B ters çözümünden elde edilen sonuçların karşılaştırılması.	63

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 5.1. Akifer koruyucu kapasite derecelendirmesi (<i>KKD</i>).....	33
Çizelge 5.2. 1B ters çözüm sonuçlarından yeraltı öz direnç dağılımı elde etmek için kullanılan kodun veri giriş format	36
Çizelge 6.1. Çizelge 6.1. DES-1 eğrisi, 1B ters çözümü ve ters çözümünden elde edilen katman parametreleri temel alınarak hesaplanan diğer parametreler.....	49
Çizelge 6.2. Söke Alt Havzası DAÖ DES uygulamasından belirlenen parametreler ve 19 DES noktası için istatistiksel değerleri	51
Çizelge A.1. DES-2 eğrisi, 1B ters çözümü ve ters çözümünden elde edilen katman parametreleri temel alınarak hesaplanan diğer parametreler.....	73
Çizelge A.2. DES-3 eğrisi, 1B ters çözümü ve ters çözümünden elde edilen katman parametreleri temel alınarak hesaplanan diğer parametreler.....	74
Çizelge A.3. DES-4 eğrisi, 1B ters çözümü ve ters çözümünden elde edilen katman parametreleri temel alınarak hesaplanan diğer parametreler.....	75
Çizelge A.4. DES-5 eğrisi, 1B ters çözümü ve ters çözümünden elde edilen katman parametreleri temel alınarak hesaplanan diğer parametreler.....	76
Çizelge A.5. DES-6 eğrisi, 1B ters çözümü ve ters çözümünden elde edilen katman parametreleri temel alınarak hesaplanan diğer parametreler.....	77
Çizelge A.6. DES-7 eğrisi, 1B ters çözümü ve ters çözümünden elde edilen katman parametreleri temel alınarak hesaplanan diğer parametreler.....	78
Çizelge A.7. DES-8 eğrisi, 1B ters çözümü ve ters çözümünden elde edilen katman parametreleri temel alınarak hesaplanan diğer parametreler.....	79
Çizelge A.8. DES-9 eğrisi, 1B ters çözümü ve ters çözümünden elde edilen katman parametreleri temel alınarak hesaplanan diğer parametreler.....	80
Çizelge A.9. DES-10 eğrisi, 1B ters çözümü ve ters çözümünden elde edilen katman parametreleri temel alınarak hesaplanan diğer parametreler.....	81
Çizelge A.10. DES-11 eğrisi, 1B ters çözümü ve ters çözümünden elde edilen katman parametreleri temel alınarak hesaplanan diğer parametreler.....	82
Çizelge A.11. DES-12 eğrisi, 1B ters çözümü ve ters çözümünden elde edilen katman parametreleri temel alınarak hesaplanan diğer parametreler.....	83
Çizelge A.12. DES-13 eğrisi, 1B ters çözümü ve ters çözümünden elde edilen katman parametreleri temel alınarak hesaplanan diğer parametreler.....	84
Çizelge A.13. DES-14 eğrisi, 1B ters çözümü ve ters çözümünden elde edilen katman parametreleri temel alınarak hesaplanan diğer parametreler.....	85
Çizelge A.14. DES-15 eğrisi, 1B ters çözümü ve ters çözümünden elde edilen	

katman parametreleri temel alınarak hesaplanan diğer parametreler.....	86
Çizelge A.15. DES-16 eğrisi, 1B ters çözümü ve ters çözümünden elde edilen katman parametreleri temel alınarak hesaplanan diğer parametreler.....	87
Çizelge A.16. DES-17 eğrisi, 1B ters çözümü ve ters çözümünden elde edilen katman parametreleri temel alınarak hesaplanan diğer parametreler.....	88
Çizelge A.17. DES-18 eğrisi, 1B ters çözümü ve ters çözümünden elde edilen katman parametreleri temel alınarak hesaplanan diğer parametreler.....	89
Çizelge A.18. DES-19 eğrisi, 1B ters çözümü ve ters çözümünden elde edilen katman parametreleri temel alınarak hesaplanan diğer parametreler.....	90



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

1B	Bir-boyutlu
2B	İki-boyutlu
A	Jacobian dizeyi
$\overline{AB}$	Akım elektrotları arası mesafe
$\overline{MN}$	Gerilim elektrotları arası mesafe
DAÖ	Doğru Akım Özdirenç
DC	Doğru akım
DSİ	Devlet Su İşleri
E	Elektriksel alan
FC	Katman özdirenç kontrastı
FC_f	Etkin özdirenç kontrastı
H	Toplam katman kalınlığı
I	Birim dizeyi
J	Elektriksel akım yoğunluğu
K	Geometrik faktör
KKD	Koruyucu Kapasite Derecelendirmesi
LM	Levenberg-Marquardt
N	Toplam veri sayısı
RC	Katman yansıma katsayısı
RC_f	Etkin yansıma katsayısı
S	Boyuna iletim
SK	Sondaj kuyusu
t	Katman kalınlığı
T	Enine direnç
h_e	Eşdeğer kalınlık
β	Sönüm parametresi
ρ	Katman özdirenci
ρ_a	Görünür özdirenç
ρ_e	Eşdeğer özdirenç
ρ_l	Boyuna özdirenç
ρ_m	Etkin formasyon özdirenci
ρ^{olc}	Ölçülen görünür özdirenç
ρ^{hes}	Hesaplanan görünür özdirenç
ρ_t	Enine özdirenç
σ	Elektriksel iletkenlik
φ	Amaç fonksiyonu
Δd	Ölçülen ve hesaplanan veri kümeleri arasındaki fark yöneyi
Δp	Parametre düzeltme yöneyi
ΔV	Gerilim farkı
λ	Anizotropi katsayısı

1. GİRİŞ

Su, yaşamın devamlılığı için temel bir bileşen olup, insanlık tarihinin her döneminde stratejik bir öneme sahip olmuştur. Dünyadaki toplam su miktarının yaklaşık yarım milyon km³'ü her yıl buharlaşarak atmosfere döner ve hidrolojik döngü içerisinde yağış olarak tekrar yeryüzüne ulaşır. Bu döngünün önemli bir parçası olan yer altı suları, yeryüzündeki en temiz tatlı su kaynaklarını oluşturmakta ve gerek tarım gerek içme suyu gerekse endüstriyel ihtiyaçlar için hayati bir rol oynamaktadır.

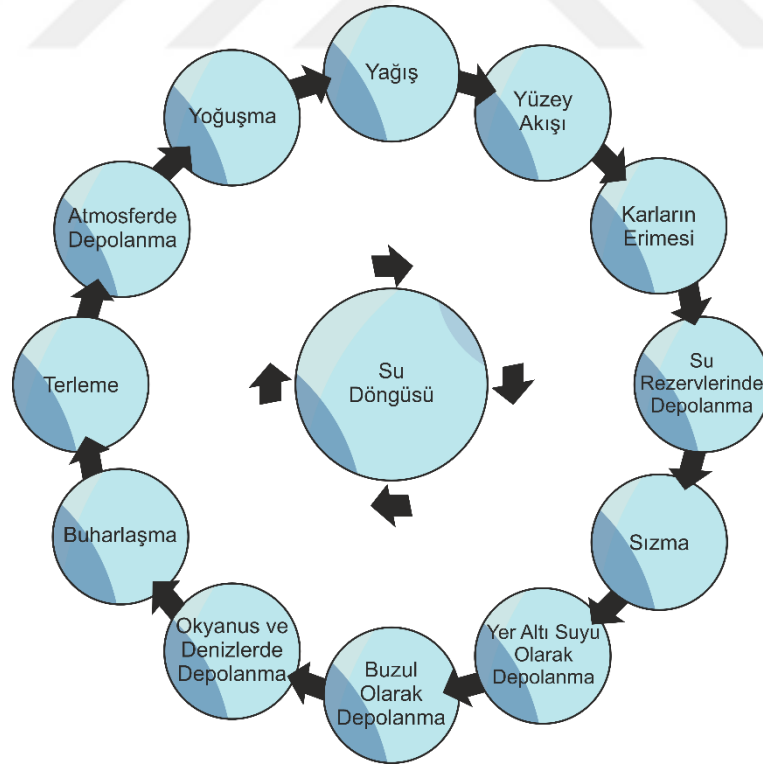
Dünya üzerindeki toplam su miktarı yaklaşık 1.4 milyar km³ olarak tahmin edilmekte ve bunun yalnızca %2.5'i tatlı su kaynaklarından oluşmaktadır. Bu sınırlı tatlı suyun %97'si yer altı sularından meydana gelirken, yüzey suları toplam tatlı su rezervlerinin %3'ünden daha azını oluşturmaktadır. Özellikle kutuplarda ve yeraltında depolanan tatlı suların büyük bir kısmı erişim açısından sınırlı olduğundan yer altı suyu kaynaklarının bilinçli kullanımı ve korunması ülkeler için stratejik bir zorunluluktur. Yer altı suları, yüzey sularının yetersiz olduğu ya da kullanılamaz hâle geldiği durumlarda kritik bir alternatif olarak devreye girer. Dünya genelinde yer altı sularının %65'i tarımsal sulamalarda, %25'i içme ve kullanma suyu temininde, %10'u ise endüstriyel ihtiyaçlarda kullanılmaktadır (Gökkür, 2016). Türkiye'de ise tarımsal amaçlı kullanım oranı %55 olarak kaydedilmiştir, ancak, nüfus artışı ve iklim değişikliği gibi faktörlerle bu oran giderek artmaktadır. Türkiye'nin yüzey ve yer altı suyu kaynakları açısından mevcut potansiyeli, su stresi altında olan ülkeler arasında yer almasına neden olmaktadır. 2020 yılı itibarıyla, Türkiye'nin toplam kullanılabilir su potansiyeli 57 milyar m³ olarak hesaplanmış ve bunun %77'sinin sulama, %23'ünün ise içme-kullanma ve sanayi amaçlı kullanıldığı belirlenmiştir (DSİ, 2021).

1.1. Yer Altı Suyu, Akifer ve Hidrolojik Sorunlar

Yer altı suyu, insan yaşamı, tarımsal üretim ve endüstriyel faaliyetler için temel bir su kaynağıdır. Ancak, hızla artan nüfus, kentleşme, sanayi gelişimi ve tarımsal faaliyetlerin yoğunlaşması, yer altı su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimini giderek zorlaştırmaktadır. Geleneksel sulama yöntemleri, özellikle salma sulama, yer altı su seviyelerinde ciddi azalmalar meydana getirmekte; bu durum, uzun vadede yer altı suyu rezervlerinin tükenmesine yol açmaktadır. Ayrıca, iklim değişikliği nedeniyle

artan sıcaklıklar, azalan yağışlar ve düzensiz yağış rejimleri, su kaynaklarının yenilenme kapasitesini olumsuz etkilemektedir. Bu sorunların çözümü, yeraltı sularının korunması, yönetimi ve sürdürülebilir kullanımına yönelik bilimsel araştırmaların yapılmasını gerektirir. Jeofizik yöntemler, yer altı su kaynaklarının belirlenmesi ve değerlendirilmesi süreçlerinde kritik bir araç olarak öne çıkmaktadır. Bu yöntemler, doğru sondaj yerlerinin seçilmesi, gereksiz maliyetlerin önlenmesi ve su yönetiminin daha etkin bir şekilde gerçekleştirilmesine olanak tanır.

Yer altı sularının oluşum süreci, hidrolojik döngü ile yakından ilişkilidir. Hidrolojik döngü, genel olarak; atmosferdeki suyun yağış olarak yeryüzüne düşmesi, yüzey akışı, yeraltına sızma ve buharlaşma süreçleriyle tekrar atmosfere dönmesi şeklinde tanımlanır (Şekil 1.1). Yeryüzüne düşen yağışların bir kısmı yüzey akışına katılarak akarsuları oluştururken, bir kısmı yeraltına sızarak geçirimsiz kayaçların üzerinde birikir ve yer altı suyunu oluşturur. Bu süreçte, yeraltına sızan suyun kayaçlar içinde hareket etmesi ve depolanması belirli hidrojeolojik özelliklere sahip birimler olan akiferlerin oluşumunu sağlar.



Şekil 1.1. Su döngüsü

Yeraltı suyunu depolayan ve ileten kayaç birimi olarak tanımlanan bir akiferin özelliklerini anlamak için, bölgenin jeolojik yapısının detaylı bir şekilde incelenmesi gereklidir. Kayaçların türü, gözeneklilik (porozite), geçirgenlik ve içerdikleri suyun hareketine etkili olan yapısal unsurlar (faylar, kırıklar ve tabakaların eğimi) gibi faktörler, akiferin su depolama ve taşıma kapasitesini belirler. Örneğin, kumtaşı ve kireçtaşı gibi yüksek poroziteye sahip kayaçlar önemli su depolama kapasitelerine sahiptir. Karstik alanlarda bulunan kireçtaşlarında oluşan erime boşlukları, yer altı suyunun hareketine ve kimyasal özelliklerine doğrudan etki eder. Bununla birlikte, kayaçların içindeki faylar ve kırıklar, yer altı suyunun akış yollarını ve hızını şekillendirir.

Jeofizik araştırmalar, yer altı sularının belirlenmesi ve değerlendirilmesinde kritik bir rol oynar. Elektrik özdirenç, manyetik ve gravite gibi yöntemler, yer altı suyu bulunan birimlerin fiziksel özelliklerini belirlemekte kullanılır. Özellikle doğru akım özdirenç (DAÖ) yöntemi, yeraltı litolojisinin ve akiferlerin özelliklerini ortaya koymada etkili bir araçtır. Bu bağlamda, hidrojeolojik araştırmalar ile jeofizik yöntemlerin entegrasyonu, su kaynaklarının daha kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesine olanak sağlar. Bu yöntemler, yeraltı su potansiyelinin detaylı bir şekilde haritalanmasına olanak tanırken, hidrojeolojik modellemeye de temel sağlar.

Türkiye’de yer altı suyu kaynaklarının korunması ve yönetimi, Devlet Su İşleri (DSİ) tarafından yürütülmektedir. Yer altı suyu yönetimi, 167 Sayılı Yeraltı Suları Hakkında Kanun, bu kanuna dayalı Yeraltı Suları Tüzüğü ve Yeraltı Suları Teknik Yönetmeliği kapsamında düzenlenmektedir. Bu yasal düzenlemeler, yeraltı sularının sürdürülebilir kullanımını teşvik etmekte ve su kaynaklarının korunmasını amaçlamaktadır. Özellikle DSİ’nin sondaj yerlerinin belirlenmesinde jeofizik yöntemleri kullanması, saha çalışmalarının hem ekonomik hem de çevresel açıdan daha etkin bir şekilde gerçekleştirilmesine olanak tanımaktadır. Bu yöntemlerin bilimsel çalışmalarla desteklenmesi, yer altı su yönetimi için hayati bir önem taşır. Sürdürülebilir bir su yönetimi planlaması hem jeolojik hem de hidrojeolojik verilerin doğru analiz edilmesiyle mümkün olabilmektedir.

1.2. Araştırma Alanı

Büyük Menderes Havzası, Aydın, Söke, Didim ve Bafa Alt Havzaları'ndan oluşan geniş bir su toplama alanıdır. Bu çalışmanın konusu olan Söke Alt Havzası, Aydın ilinin Söke ilçesi ile Ege Denizi arasında kalan bölgeyi kapsamaktadır. Havzanın ana akarsuyu olan Büyük Menderes Nehri, İç Batı Anadolu'daki Sandıklı ve Dinar (Afyon) platoları ile Çivril ve Honaz (Denizli) civarındaki kaynaklardan doğmaktadır. Nehir, Işıklı Gölü'nden gelen sularla güçlenerek, Uşak'tan gelen Banaz Çayı ve Muğla'dan gelen Çine Çayı gibi yan kollarla birleşip Büyük Menderes Havzası'nın ana su sistemi haline gelmektedir.

Söke Alt Havzası, Büyük Menderes Nehri'nin Dipburun mevkisinde Ege Denizi'ne döküldüğü alanı kapsamaktadır. Aydın'ın Incirliova ilçesinden başlayarak Ege Denizi'ne kadar uzanan bu bölüm, nehrin havza içindeki son kesimini oluşturur. Söke Alt Havzası, hidrografik açıdan önemli bir geçiş ve birikim alanı olarak dikkat çeker ve havzanın denizle buluştuğu ekolojik ve jeomorfolojik açıdan kritik bir bölgeyi temsil eder (DSİ, 2023).

1.3. Amaç

Bu çalışma, Türkiye'nin 25 akarsu havzasından biri olan Büyük Menderes Havzası'nda yer alan Söke Alt Havzası'nda gerçekleştirilmiştir. Çalışma alanı, 27°32' - 27°33' doğu boylamları ve 37°39' - 37°49' kuzey enlemleri arasında yer almakta olup, 4.095,61 km²'lik bir drenaj alanını kapsamaktadır. Bu alan, toplam 25.966 km² büyüklüğündeki Büyük Menderes Havzası'nın %15,7'sine karşılık gelmektedir.

Yer altı suyu araştırmalarında, hidrojeolojik verilerin eksiksiz ve güvenilir bir şekilde toplanması büyük önem taşımaktadır. Rastgele gerçekleştirilen sondaj faaliyetleri, doğru kuyu yerinin ve derinliğinin tespit edilmesini zorlaştırarak ekonomik kayıplara ve verimsiz kuyuların açılmasına yol açabilir. Bu sorunları önlemek amacıyla, yer altı suyu aramalarında jeofizik yöntemlerin kullanımı yaygınlaşmıştır. Özellikle DAÖ yöntemi, yeraltı litolojisinin ve akiferlerin özelliklerinin belirlenmesi açısından oldukça etkili bir araçtır. Bu yöntem, sadece sondaj maliyetlerini düşürmekle kalmayıp, aynı zamanda çevresel etkileri de en aza indirerek sürdürülebilir bir

yaklaşımına olanak tanır. Bu yöntemle gerçekleştirilen ölçümler ile çevreye zarar vermeden yer altı suyu hakkında kapsamlı bilgiler elde edilebilir. DAÖ yöntemiyle doğru sondaj lokasyonlarının belirlenmesi, gereksiz sondaj sayısını azaltarak maliyetlerin düşürülmesini sağlar.

Bu tez çalışmasında, Büyük Menderes Havzasının bir alt havzası olan Söke bölümünde görece sık yeraltı katmanlarının elektrik ve hidrojeolojik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla DAÖ yöntemi kullanılmıştır. Çalışma kapsamında, DSİ tarafından 19 ayrı noktada $AB/2 = 500$ m açılımlı düşey elektrik sondajı (DES) ölçümleri gerçekleştirilmiştir. DES ölçümleri, havzanın hidrojeolojik özelliklerini ortaya koymak için detaylı bir şekilde değerlendirilmiştir. Elde edilen veriler, jeofizik kesitler halinde yorumlanmış ve akiferlerin konumları ile özellikleri detaylandırılmıştır.

Bu tez çalışması kapsamında, DES verileri bir-boyutlu (1B) değerlendirme yöntemiyle yeniden analiz edilmiş ve yeraltının elektriksel öz direnç özellikleri ortaya konulmuştur. Farklı kayaç türleri, örneğin kumtaşı, kireçtaşı ve kil, farklı elektriksel öz direnç değerlerine sahip olduğundan, bu elektriksel parametreler yeraltı litolojisinin dolaylı olarak yorumlanmasına olanak tanımaktadır. Öz direnç değerlerinin analizi, sadece litolojik birimlerin tanımlanmasına değil aynı zamanda hidrojeolojik birimlerin ve akiferlerin sınırlanmasına ilişkin önemli ipuçları sağlamaktadır. Bu sayede, yer altı suyu yönetimi ve kullanımına yönelik daha ayrıntılı ve doğru bir değerlendirme yapılabilmektedir. DSİ çalışmasından farklı olarak, 1B değerlendirmeden elde edilen katman parametreleri kullanılarak Dar-Zarrouk parametreleri (Maillet, 1947) olarak bilinen boyuna iletim (S) ve enine direnç (T) değerleri elde edilmiştir. Bu değerler, görece sık yeraltının elektriksel özelliklerinin belirlenmesi için önemli bir veri kümesi sunmuştur. Bu veriler ışığında, eşdeğer öz direnç (ρ_e), eşdeğer kalınlık (h_e), boyuna öz direnç (ρ_l), enine öz direnç (ρ_t), anizotropi katsayısı (λ), etkin formasyon öz direnci (ρ_m), katmanların yansıma katsayısı (RC), etkin yansıma katsayısı (RC_f), katmanların öz direnç kontrastı (FC) ve etkin öz direnç kontrastı (FC_f) gibi hidrojeolojik parametreler hesaplanmıştır. Bu parametreler, havza ve akifer hakkında çeşitli bilgiler sunmakla kalmayıp araştırma alanını jeolojik ve hidrojeolojik koşullarının detaylı yorumlanmasına olanak tanımıştır.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Tez çalışması, Aydın-Söke Alt Havzasının bir bölümünde gerçekleştirilen bir DAÖ DES çalışmasından elde edilen veri kümelerinin 1B ve 2B ters çözüm teknikleri kullanılarak görece sıkı yeraltı katmanlarının elektrik ve hidrojeolojik özelliklerinin belirlenmesini amaçlamıştır. Bu bağlamda kaynak özetleri, Büyük Menderes Havzası jeolojik ve jeofizik araştırmaları (2.1), literatürden bazı DAÖ ve DES uygulamaları (2.2) ile DES verilerinin 1B ters çözümünden belirlenen katmanların öz direnç ve kalınlık parametreleri kullanılarak hesaplanan Dar-Zarrouk parametreleri (2.3) ile ilgili çalışmaları kapsamaktadır. Kaynaklar, ilgili bölümlerde kronolojik sırada verilmiştir.

2.1. Büyük Menderes Havzası Jeolojik ve Jeofizik Araştırmaları

Dora vd. (1992), çalışmalarında Menderes Masifi'nin metamorfik tarihçesini ve jeotektonik konumunu incelemiştir. Çalışma, Menderes Masifi'nin temel litolojik yapısını ve metamorfik evrimini belirlemek amacıyla yapılmıştır. Menderes Masifi'nin temelini oluşturan birimler, gözlü granitik ve bantlı gnayslar ile migmatitlerdir. Bu birimler üzerinde yapılan incelemeler, masifin farklı bölgelerinde metamorfizmanın derecelerini gözlemlemeyi mümkün kılmıştır. Çalışma, Menderes Masifi'nin metamorfik evriminde sıcaklık, basınç ve mineral topluluklarının değişimi üzerine yoğunlaşmıştır. Araştırmacılar bu bölgede gerçekleştirilen jeolojik incelemelerde, yaklaşık 500 milyon yıl yaşındaki gözlü gnaysların Kambriyen/Ordovisyen dönemi metamorfizmasını işaret ettiğini bulmuşlardır. Ayrıca, metagranodiyoritlerin ve metavolkanitlerin Pan-African yay volkanikleriyle benzer özellikler gösterdiği sonucuna varmışlardır. Sonuç olarak, bu çalışma, Menderes Masifi'nin jeotektonik konumunu ve metamorfizma süreçlerini anlamada önemli bilgiler sunmuş, masifin temel birimlerinin eski Afrika kıtasına ait olabileceğine dair sonuçlar ortaya koymuştur.

Gürbüz ve Kazancı (2019), çalışmalarında, Büyük Menderes Nehri'nin mevcut kıvrımlı akarsu özelliklerini, ilişkili yer şekillerini ve peyzajlarını incelemeyi amaçlamaktadır. Büyük Menderes Nehri, Ege Denizi'ne dökülen en uzun nehirdir ve 615 km uzunluğundadır. Batı Türkiye'nin jeomorfolojisinde önemli bir yere sahiptir

ve 24.000 km²'lik bir drenaj havzasına sahiptir. "Meander" terimi, bu nehrin antik adı "Maiandros"tan türemiştir ve kıvrımlı akarsu yapısını tanımlamak için kullanılır. Büyük Menderes, Baklan-Dinar Graben'inden başlayarak Denizli ve Büyük Menderes grabenlerini geçerek Ege Denizi'ne ulaşır.

Kazancı vd. (2011), çalışmalarında, Türkiye'nin Batı Anadolu bölgesinde bulunan Büyük Menderes Nehri'nin jeolojisini ve evrimini incelemiştir. Çalışmanın amacı, nehrin oluşum sürecini ve jeolojik geçmişini anlamaktır. Büyük Menderes Nehri, Anadolu'nun en uzun nehirlerinden biri olup Ege Denizi'ne dökülmektedir. Araştırma, nehrin kat ettiği yol boyunca alüvyal ve deltatik tortul birikimlerin incelenmesine dayanmaktadır. Bulgular, nehrin tarihinin Geç Pleistosen dönemine kadar uzandığını göstermektedir. Bu dönemde nehir, farklı göl sistemleriyle bağlantılı kısa bir akarsu olarak başlayıp, Holosen dönemine kadar devam eden süreçte geniş bir drenaj alanına dönüşmüştür. Çalışma, nehrin morfolojik ve sedimentolojik evrimini ortaya koyarken, bölgenin tarihsel ve çevresel sürdürülebilirliği üzerine de ışık tutmaktadır.

Okat (2007), çalışmasında, Büyük Menderes Grabeninin yapısal özellikleri ve tortul kalınlığı jeofizik yöntemlerle incelemiştir. Menderes Masifi, Türkiye'nin batısında yer alan ve KD-GB yönünde uzanan metamorfik bir çekirdek kompleksi olup, Alt Miyosen'den beri Kuzey-Güney yönlü genişleme tektoniği altındadır. Bölge, genellikle negatif rejyonal Bouguer gravite anomalileri sergilemektedir, bu durum kıtasal gerilme alanındaki düşük yoğunluk zonu ve ince kabuğun etkisiyle açıklanmaktadır. Çalışmada, Bouguer gravite verileri kullanılarak Büyük Menderes Grabeninin yapısı incelenmiş, taban topografyası yöntemiyle grabenin en büyük tortul kalınlıkları hesaplanmış, güç spektrumu yöntemiyle ortalama tortul kalınlığı belirlenmiştir. Ayrıca, grabenin sınır ve uzanımları için sınır analizi yöntemi kullanılmış, elde edilen bulgular mevcut fay haritası ile karşılaştırılmıştır. Bu araştırma, grabenin yapısı ve jeotektonik gelişimi hakkında önemli içgörüler sağlamaktadır.

Taşdelen vd. (2016), çalışmalarında, Çukurköy (Denizli) dolayının sığ yeraltı suyu hidrojeoloji incelemesini gerçekleştirmiştir. Çukurköy Grabeni, Denizli il merkezinin güneydoğusunda yer almakta ve Gökpınar Barajı'nın su toplama havzasına bağlanmaktadır. Bölgedeki kaynaklar, yüzeysel akışlarla birleşerek Gökpınar

Deresi'ni oluşturur. Yer altı suları, akarsuları besler ancak su seviyesi ve debisi, özellikle kuyu açma ve sondaj faaliyetleri nedeniyle zamanla azalmış ve bazı kaynaklar kurumuştur. Sığ yeraltı suları, küçük ölçekli kullanımlar dışında büyük su talepleri için yetersizdir. Bu suların akış yönü, bölgenin morfolojisine bağlı olarak kuzeybatıya doğru yönelir.

2.2. DAÖ ve DES Çalışmaları

Balkaya vd. (2009), çalışmalarında, Burdur ve çevresinin zemin özelliklerini incelemek için gerçekleştirilen bir proje (Ertunç vd. 2001) kapsamında toplanan toplam 189 DES verisinin 1B ve 2B ters çözüm teknikleriyle yeniden değerlendirmiş ve yer altı su seviyesi ile alttaki su içeriği hakkında bilgi sunmuştur. Burdur şehri, güneybatı Türkiye'nin sismik hareketliliği yüksek bir bölgesinde, alüvyal bir akifer üzerinde yer almaktadır ve bu durum, şehirdeki zemin sıvılaşma riskini artırmaktadır. 2B ters çözüm sonuçlarına göre, düşük öz dirençli alanlar yüksek sıvı içeriğine işaret etmektedir. Bu bulgular doğrultusunda, çalışma alanı için bir sıvılaşma tehlike haritası oluşturulmuştur ve bölgenin yüksek sıvılaşma tehlikesi altında olduğu belirlenmiştir.

Balkaya vd. (2012), çalışmalarında, Ayvacık Düdeni'nin karstik yapısını belirlemek amacıyla manyetik ve elektrik öz direnç yöntemlerini kullanılmıştır. Manyetik harita, metamorfik ve sedimanter birimleri ortaya koymuş, elektrik öz direnç verileri ise mağara sistemini işaret etmiştir. DES verileri, üç jeolojik katmanı tanımlamış ve 40 m derinlikte karstik mağara olasılığını göstermiştir. Sonuçlar, kullanılan jeofizik yöntem ve değerlendirme tekniklerinin derin mağara tespiti için başarılı olduğunu kanıtlamıştır. Sentetik modelleme ile güvenilirlik doğrulanmıştır.

Başokur (2004), Türkiye Petrolleri Anonim Ortaklığı tarafından yayımlanan "Düşey Elektrik Sondajı" adlı eserinde, bilgisayar teknolojisinin DES verilerinin yorumlanmasındaki önemini vurgulamaktadır. 1980'lerin başında kişisel bilgisayarların henüz yaygınlaşmaya başladığı ve maliyetlerinin yüksek, hızlarının düşük olduğu bir dönemde, bilgisayarların sondaj verileri üzerindeki etkilerini ayrıntılı bir şekilde ele almaktadır. Başokur, bilgisayar teknolojisindeki ilerlemelerin DES veri yorumlamasında büyük gelişmelere öncülük ettiğini; özellikle hızlarının artmasıyla birlikte iki-boyutlu modelleme ve ters-çözüm tekniklerinin daha erişilebilir hale

geldiğini belirtmektedir. İki-boyutlu tekniklerin standart hale gelmesi, 1B uygulamaların sınırlarını daraltmıştır. Bu bağlamda, Başokur'un çalışması, jeolojik tabakaların yataya yakın geometrilerini içeren durumlarda yorumlama tekniklerinin etkin kullanılmasına dair öneriler sunmaktadır.

Gharakhani (2024), çalışmasında, Develi Kapalı Havzası'ndaki Sultan Sazlığı Sulak Alanı'nda DSI'nin 2009'da gerçekleştirdiği 98 DES ölçümünü kullanarak bir yeraltı suyu araştırması gerçekleştirmiştir. Araştırmanın temel amacı, akiferin derinliğini ve kalınlığını belirleyerek gereksiz sondajlardan kaçınmak ve maliyetleri düşürmektir. Çalışmada DES ölçümleri 1B ve 2B ters çözüm teknikleriyle yeniden değerlendirilmiştir. Sonuçlar, yer altı su yapıları, örtülü faylar ve jeolojik-hidrojeolojik yapı hakkında detaylı bilgi sunmuş, bölgedeki su taşıyan yapıları haritalamıştır.

Göktürkler vd. (2008a), çalışmalarında, Çubukludağ grabeninin (İzmir) güneybatısında bulunan bir alüvyal akiferi incelemeyi amaçlamıştır. Jeofizik çalışmalar kapsamında elektrik özdirenç tomografi (EÖT) tekniği ve doğal uçlaşma (DU) yöntemini uygulanmıştır. Özdirenç verileri, çalışma alanının kuzey kesiminde, Wenner-Schlumberger elektrot dizilimi kullanılarak sekiz profil boyunca elde edilmiş ve elde edilen veriler tomografik ters çözüm tekniği ile değerlendirilmiştir. DU verileri ise 16 profil boyunca türev tekniği ile toplanan verilerde bir toplam alan DU haritası elde edilmiştir. Çalışma alanının kuzey kısmında suya doymuş zon, elektrik özdirenç görüntüleme ile açıkça ortaya konmuştur. DU araştırması ise yer altı su hareketleri hakkında faydalı bilgiler sağlamıştır.

Göktürkler vd. (2008b), çalışmalarında, İzmir'in Altındağ ilçesinde bulunan bir heyelan bölgesinde EÖT tekniği ve sismik kırılma tomografi yöntemini kullanarak bir jeofizik araştırma gerçekleştirmiştir. Araştırmada, heyelan malzemesinin fiziksel özellikleri ve kayma yüzeyinin geometrisi incelenmiştir. Sonuçlar, heyelan malzemesinin düşük özdirenç ve düşük sismik hızla karakterize olduğunu, ayrıca yüksek su ve kil içeriği ile ilişkili zonlar bulunduğunu göstermiştir. Elde edilen veriler, heyelanın iç yapısını ve malzeme kalınlıklarını belirlemede faydalı olmuştur. Su içeriğinin, bölgedeki kütle hareketinde önemli bir rol oynadığı belirlenmiştir.

Kaya vd. (2015), çalışmalarında, Çanakkale'nin kıyı kentsel alanında deniz suyu girişimini araştırmıştır. Kentte, deniz suyu girişimi kıyı boyunca içme suyu kaynaklarını tehdit etmektedir. 2004 yılında gerçekleştirilen DES uygulamasından elde edilen 61 ölçüm dikkate alınarak DB doğrultulu 13 profil için 2B ters çözüm gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, tatlı su ve deniz suyunun ondülasyonlu bir arayüzeye sahip olduğunu ve deniz suyu girişiminin özellikle Sarıçay Nehri'nin güney kısmında düşük öz dirençli ($<5 \Omega m$) alanlarda yoğunlaştığını göstermiştir. Deniz suyu girişiminin kıyıya doğru birkaç yüz metre kadar ilerlediği belirlenmiştir.

Özdemir ve Palabıyık (2019), çalışmalarında, Güney (Denizli) civarında DES tekniği ile bir jeotermal enerji araştırması gerçekleştirmiştir. Uygulamada elde edilen 15 DES eğrisi 1B değerlendirilmiş ve stratigrafik kesitler oluşturulmuştur. Çalışma, bölgedeki düşük öz direnç anomalileriyle jeotermal faaliyetleri göstermiş ve bir jeotermal model geliştirilmiştir. Yüksek öz dirençli Paleozoyik mermerler ve metamorfik kayaların üzerinde düşük öz dirençli Neojen yaşlı birimler yer almıştır. Faylar boyunca iletkenlik artışları gözlemlenmiş ve buharın hâkim olduğu rezervuarlar ile ilişkili yüksek öz direnç değerleri tespit edilmiştir.

Özürlan vd. (2006), Ulusal Deniz Jeolojisi ve Jeofizik Programı kapsamında Dikili-Bergama bölgesinin derin öz direnç yapılarını ve jeotermal potansiyelini inceleyen çalışmaları yeniden değerlendirmiştir. Araştırma, Türkiye Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (MTA) tarafından 1968'de ölçülen yer elektrik öz direnç verilerini 2B ters çözüm teknikleriyle analiz etmeyi amaçlamıştır. Maximum AB/2 mesafesi 4.5 km olan Schlumberger dizilimi kullanılarak yapılan öz direnç ölçümleri, Dikili ve Kaynarca sıcak su kaynakları civarında çok düşük direnç değerleri ortaya koymaktadır. Çalışma, KG ve DB yönlü paralel fay zonlarının varlığını ve jeotermal kaynaklar için umut vaat eden graben-horst yapılarının mevcudiyetini göstermiştir. Ayrıca, 2B gravite modelleri ve sondaj kuyularından elde edilen litolojik veriler, öz direnç yorumları ile elde edilen bulguları doğrulamaktadır. Bu araştırma, bölgenin jeotermal enerji olanaklarına dair önemli ipuçları sunmaktadır.

Karabulut vd. (2021), çalışmalarında, İzmir Dikili ilçesinin kıyı bölgesinde elektrik öz direnç ve zaman ortamı etkisel kutuplaştırma (IP) yöntemlerini uygulamıştır. 34 ölçüm noktasından elde edilen verilerle, tatlı su/deniz suyu arayüzü ve jeotermal

potansiyel başarılı bir şekilde belirlenmiştir. Özdirenç verilerine göre tatlı su, tuzlu su ve jeotermal su türleri sınıflandırılmış, sonuçlar 1978'deki DSİ çalışması ile karşılaştırılmıştır. Özdirenç değerlerinin <0.6 ohm.m olduğu alanlarda deniz suyu girişinin olduğu belirlenmiştir.

Yılmaz (2010), çalışmasında, Isparta Alüvyon Düzlüğü'ndeki Çünür-Deregümü bölgelerinde yer altı suyu potansiyelini değerlendirmek amacıyla elektrik özdirenç yöntemini kullanmıştır. Çalışma, bu bölgelerde yer altı suyu potansiyelinin değerlendirilmesi amacıyla DES ve EÖT ölçümlerini kullanarak alüvyonun düşey ve yanal değişimini incelemiştir. Elde edilen veriler, 1B ve 2B değerlendirilmiş, yeraltı jeolojisi ve su potansiyeli hakkında önemli bulgular elde edilmiştir. Bu çalışma, DES verilerinin jeolojik bilgilerle entegrasyonunu vurgulamaktadır.

2.3. Dar-Zarrouk Araştırmaları

Emmanuel vd. (2020), çalışmalarında, Nijerya'nın güneyindeki Akwa Ibom Eyaleti'nde yer altı suyu kalitesini incelemek amacıyla gerçekleştirilen jeofizik araştırmanın sonuçlarını sunmuştur. Schlumberger elektrot dizilimi kullanılarak toplamda 11 DES gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veriler, dört yerelektrik tabakayı göstermektedir. Üçüncü tabaka, bölgedeki ana hidrojeolojik birim olup, $50.3 \Omega m$ ile $2088.9 \Omega m$ arasında özdirenç değerlerine ve 36.8 m ile 149.0 m arasında kalınlığa sahiptir. Yeraltı suyu kalitesi, elektriksel iletkenlik ve toplam çözünmüş katı madde (TDS) ile değerlendirilmiştir. TDS değerleri 47.7 ppm ile 386.8 ppm arasında değişirken, su içme ve diğer kullanım amaçlarına uygun olarak değerlendirilmiştir. Ayrıca, TDS ile Dar-Zarrouk parametreleri (boyuna iletkenlik ve enine direnç) ve akiferin özdirenci arasında mükemmel bir korelasyon bulunmuştur.

Alabi vd. (2021) çalışmalarında, Nijerya'nın Moloko-Asipa bölgesinde akifer alanlarını belirlemeyi ve yeraltı litolojisi hakkında bilgi sağlamayı amaçlamıştır. Araştırma, 5 m sabit örnekleme aralığıyla yürütülen sekiz VLF-EM (çok düşük frekanslı elektromanyetik) profil ve on DES ölçümleri ile gerçekleştirilmiştir. VLF-EM verileri, Karous ve Hjelt filtreleme yöntemiyle işlenmiş ve DES verileri 1B ters çözüm tekniği ile değerlendirilmiştir. Çalışmada, ayrıca, Dar-Zarrouk parametreleri kullanılarak bölgedeki akifer koruma kapasitesi de incelenmiştir. Sonuç olarak,

araştırılan alanda akiferin koruma kapasitesinin düşük olduğu ve bölgedeki yer altı suyunu belirlenmesi potansiyelinin zayıf olduğu sonucuna varılmıştır.

Bello vd. (2019), çalışmalarında, Federal Petrol Kaynakları Üniversitesi'nin (Effurun, Nijerya) bazı bölümlerinde gerçekleştirdikleri dört DES uygulamasıyla Dar-Zarrouk parametrelerini kullanarak yer altı suyu kalitesi ve potansiyelini değerlendirmeyi amaçlamıştır. Elde edilen sonuçlara göre beş jeolojik katman tespit edilmiştir. Akiferin özdirenci 364.55 ohm.m ile 567.66 ohm.m arasında değişmektedir. Çalışma, akiferin kötü korunduğunu ancak yer altı suyu potansiyelinin iyi olduğunu göstermektedir. Dar-Zarrouk parametrelerine göre yansıma katsayısı 0.87-0.97, özdirenç kontrastı ise 13.78-71.59 arasında değişmektedir.

Evusi vd. (2024), çalışmalarında, Gana'nın Kuzey Bölgesi'nde, Dar-Zarrouk parametreleri kullanarak akifer geçirgenliğini tahmin etmeyi amaçlamıştır. Toplam 40 DES verisi 1B değerlendirilerek bölgedeki akifer geçirgenliği 0.057 ile 15.285 m/gün arasında değiştiği belirlenmiştir. Hidrolik iletkenlik ise 0.01 ile 3.95 m²/gün arasında tespit edilmiştir. Dar-Zarrouk parametreleri, bölgedeki yer altı suyu özelliklerini belirlemeye yardımcı olmuş ve sondaj başarısını artırmak için jeofizik yöntemlerin etkili bir araç olarak kullanılabileceğini göstermiştir.

3. GENEL JEOLojİ

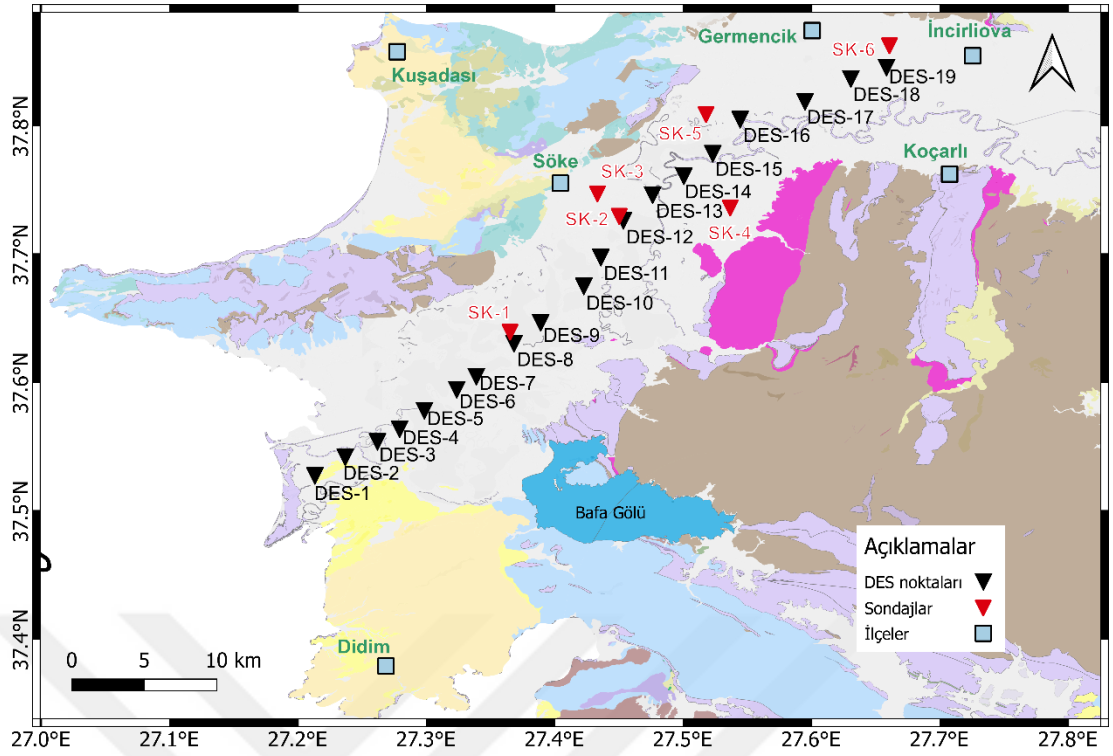
Söke Alt Havzası'nın jeolojik ve hidrojeolojik özellikleri, bölgenin aktif tektonizması, büyük graben yapıları ve jeotermal kaynakların varlığı ile şekillenmiştir. Bu özellikler, bölgeyi önemli ve değerli bir araştırma sahası yaparken burada gerçekleştirilen bilimsel çalışmalar bölgenin yeraltı suyu yönetimi açısından kritik bilgiler sağlamaktadır. İzleyen bölümlerde sunulacak bilgiler, DSİ tarafından hazırlanan "Söke-Aydın Alt Havzası Hidrojeolojik Etüt Raporu" (2023) temel alınarak derlenmiştir.

3.1. Büyük Menderes Havzasının Genel Jeolojik Özellikleri ve Hidrojeolojik Önemi

Araştırma alanı, Büyük Menderes Havzası'nın Söke ilçesinin güneybatısı ile Ege Denizi arasında yer alan Aşağı Büyük Menderes Bölümü'nü kapsamaktadır. Batı Anadolu'nun en büyük akarsuyu olan Büyük Menderes Nehri, geniş bir drenaj ağına sahiptir ve bu nedenle jeolojik ve hidrojeolojik açıdan önemli bir araştırma konusudur. Bölgenin jeolojisi, Batı Anadolu'nun karmaşık tektonik geçmişine dayanır. Menderes Masifi'nin evrimi, Muğla ve Batı Toros napları ile Ege-Akdeniz bölgesinin oluşum süreçleri, bu bölgeyi jeolojik açıdan ilgi çekici kılmıştır. Özellikle, bölgenin aktif sismotektonik yapısı ve Büyük Menderes Nehri'nin büyük grabenler içinde yer alması, çalışmalara zemin hazırlamıştır. Büyük Menderes Havzası'ndaki ilk hidrojeolojik çalışmalar, 1960'lı yılların başında DSİ tarafından yürütülmüştür. Bu çalışmalar, istikşafı sondajlar ve jeofizik ölçümlerle desteklenmiş; 1965-1971 yılları arasında ise detaylı sondajlar yapılarak rezerv raporları hazırlanmıştır.

3.2. Stratigrafik ve Tektonik Yapı

Bölgede geniş bir yayılım gösteren Menderes Masifi, farklı yaşlarda ve özelliklerde üç kayaç biriminden oluşmaktadır. Masif üzerinde Neojen örtü kayaçları ve Kuvaterner yaşlı alüvyonlar bulunmaktadır. Büyük Menderes Graben'i, yer yer 2000 metreye ulaşan kalınlıkta Neojen-Pliyosen dönemine ait kil, kum, çakıl ve blok bileşimli tortul birikimlerle doldurulmuştur. Şekil 3.1, çalışma alanının genel jeoloji haritasını göstermektedir.



Şekil 3.1. Çalışma alanı genel jeoloji haritası (MTA'dan derlenmiştir). DES ölçü noktaları ve civardaki sondajlar ayrıca gösterilmiştir.

Neojen öncesinde bölgede yoğun sıkışma tektoniği etkili olmuş, bu süreçte çeşitli sürüklenme hareketleri meydana gelmiştir. Neojen döneminde hızlı yükselme ve aşınma süreçleri, tortul birikimleri etkilemiştir. Bu dönem tortul tabakaları genellikle yatay bir eğim sergilemekle birlikte, aktif faylanmalar nedeniyle bazı bölgelerde eğimler artış göstermektedir. Kuvaterner dönemdeki tektonik hareketler vadi ve seki oluşumlarıyla kendini göstermiştir. DB yönlü faylanmalar, KG doğrultusunda ana vadilerin oluşumuna yol açmıştır.

3.3. Hidrojeolojik Özellikler

Araştırma sahasında, yeraltı suyu boşalım noktaları Büyük Menderes Nehri ve Ege Denizi olarak belirlenmiştir. Havza hem yüzeyden hem de yeraltından denize su boşalımı gerçekleştirmektedir. Yeraltı suyu kaynaklarının dağılımı ve kimyasal özellikleri, bölgedeki tektonizma ve jeolojik yapı tarafından şekillenmektedir. Söke Ovası, geniş alüvyon örtüsü, yamaç molozları ve Neojen-Pliyosen yaşlı birimlerle karakterizedir. Pliyosen yaşlı gevşek konglomeralar, kumtaşları, çamurtaşları ve gözenekli karbonat düzeyleri akifer birimleri oluşturur. Ancak, Söke Ovası'nın büyük bir bölümünde tuzlanma hakimdir. Bu durum, ovanın yakın jeolojik geçmişte denizden ayrılmasıyla ilişkilendirilmektedir.

Yoğun tektonik faaliyetler, bölgede sıcak su kaynaklarının (jeotermal) varlığına ve soğuk yeraltı suyu sistemlerinin dağılımına etki etmektedir. Aktif fay zonları boyunca yükselen sıcak sular, bölgenin jeotermal potansiyelini artırırken, tektonik kontroller soğuk yeraltı suyu sistemlerini düzenlemektedir.

4. DOĞRU AKIM ÖZDİRENÇ (DAÖ) YÖNTEMİ

Hidrojeofizik araştırmalar, yer altı suyu kaynaklarının tespiti ve özelliklerinin belirlenmesi amacıyla geniş bir uygulama alanına sahiptir. Bu araştırmalarda, jeofizik elektrik ve elektromanyetik yöntemler sıkça tercih edilmektedir. Bu yöntemlerin ortak özelliği, yeraltı yapılarının elektriksel özelliklerini belirlemede kritik bir parametre olan özdirence duyarlı olmalarıdır. Bu tez çalışmasında, Söke Alt Havzasının sığ yerelektrik yapısı DAÖ yöntemiyle araştırılmıştır. DAÖ yöntemi, yeraltı malzemelerinin özdirence dağılımını doğrudan haritalayarak, jeolojik yapıların tanımlanmasında ve yeraltı suyu aramalarında etkili bir araçtır. DAÖ yönteminin en önemli avantajları arasında nispeten basit veri toplama ve yorumlama süreçleri ile geniş bir derinlik aralığında yüksek çözünürlük sunmasıdır.

DAÖ yöntemi, geniş bir yelpazede yeraltı araştırmalarında kullanılmaktadır. Bu yöntem, özellikle litolojik yeraltı yapılarını incelemek, akifer ve akiklödlerin derinliğini, kalınlığını ve özelliklerini tahmin etmek, ayrışmamış kayaçları örten ayrışmış zonun kalınlığını belirlemek için yaygın olarak uygulanır. Ayrıca, kristalin kayaçlarda çatlak ve fayların tespiti, yeraltı suyu akış yollarının haritalanması ve depolanmış malzemelerin yatay genişliğinin belirlenmesi gibi uygulamalarda da oldukça etkilidir. DAÖ, katı atık depolama sahalarının derinliğini ve kalınlığını tahmin etmek, atık sahası içindeki heterojenlikleri tespit etmek, kirlilik bulutlarını (plume) haritalamak ve zamanla yeraltı elektriksel özelliklerindeki değişimleri izlemek için de kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra, yeraltı boşluklarının tespiti, set, bent ve barajlarda kohezyonlu ve kohezyonsuz malzeme sınıflandırması gibi mühendislik projelerinde de yaygın bir şekilde başvurulmuş bir yöntemdir. Arkeolojik araştırmalarda ise gömülü yapıların, mezarların veya diğer arkeolojik kalıntıların tespiti ve haritalanması amacıyla tercih edilmektedir. Ayrıca, enerji mühendisliğinde jeotermal rezervuarların belirlenmesi, altyapı projelerinde temel etütleri ve çevresel araştırmalarda kirlilik izleme gibi alanlarda da önemli bir araç olarak kullanılmaktadır. Dahası, DAÖ yöntemi, maden ve mineral aramalarında yeraltındaki metalik minerallerin ve maden yataklarının tespitine de olanak tanır (Seidel ve Lange, 2007).

4.1. DAÖ Yönteminin Temel İlkeleri

DAÖ yönteminin temelini anlamak için yeryüzündeki bir ortamda akımın ve gerilimin nasıl dağıldığını incelemek gereklidir. Bu tür bir ortamda elektriksel özelliklerin (özdirenç) nasıl etki ettiği, yeraltındaki yapıların jeofiziksel analizine olanak tanır. Akımın yeraltındaki dağılımını anlamak için Ohm yasası temel alınır. Ohm yasası, bir iletken ortamda elektriksel akımın, ortamın elektriksel özdirencine, akımın geçtiği mesafeye ve gerilim farkına bağlı olduğunu belirtir. Matematiksel olarak izleyen eşitlik ile gösterilebilir.

$$J = \sigma E \quad 4.1$$

Burada, J elektriksel akım yoğunluğu (A/m^2), σ ortamın elektriksel iletkenliği (S/m) ve E elektriksel alan (V/m) şiddetidir. Elektriksel alan, iki nokta arasındaki gerilim farkının (ΔV) bu noktalar arasındaki mesafeye (d) bölünmesiyle elde edilir.

$$E = -\frac{\Delta V}{d} \quad 4.2$$

Bir ortamın elektriksel özdirenci (ρ) iletkenliğinin tersidir ve akımın bu ortamdan ne kadar zor geçtiğini gösterir. Özdirenç ve iletkenlik arasındaki ilişki aşağıda verilen eşitlik ifade edilir.

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad 4.3$$

Burada ρ ortamın elektriksel özdirencidir (ohm.m) ve yeraltındaki malzemenin akıma karşı gösterdiği direnç olarak tanımlanabilir. Bir doğru akım kaynağı yer yüzeyine yerleştirildiğinde, akım, ortamdaki özdirencin etkisiyle yeraltında belirli bir şekilde dağılır. Akım, özdirenci düşük alanlarda daha kolay hareket ederken, özdirenci yüksek alanlarda daha zor hareket eder. Bu durumda, akımın yeraltındaki dağılımı homojen olmayan bir ortamda daha karmaşık hale gelir. Gerilim farkı ise akımın geçtiği ortamın özdirenciyle doğrudan ilişkilidir. Akım yoğunluğu, ortamın özdirencine ve uygulanan gerilime bağlıdır. Bu ilişki izleyen eşitlik ile tanımlanır.

$$\Delta V = I \cdot R \quad 4.4$$

Burada I uygulanan akım ve R ise yeraltındaki ortamın direncidir. Direnç, öz direnç (ρ) ve ortamın geometrisiyle ilişkilidir. Bu denkleme göre, uygulanan akım ve ölçülen gerilim farkı, ortamın öz direnci hakkında bilgi verir. DAÖ yöntemiyle yeraltındaki öz direncin hesaplanması, uygulanan akım ile ölçülen gerilim farkı kullanılarak gerçekleştirilir. Bu hesaplama, yeraltındaki homojen olmayan öz direnç dağılımının belirlenmesini sağlar. Akım ve gerilim arasındaki ilişki izleyen eşitlik ile verilir.

$$\rho = \frac{\Delta V}{I} \cdot K \quad 4.5$$

Burada K geometrik faktördür ve akım ($\overline{AB}$) akım ile gerilim elektrotları ($\overline{MN}$) arasındaki mesafeden izleyen eşitlik kullanılarak elde hesaplanır.

$$K = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}\right)} \quad 4.6$$

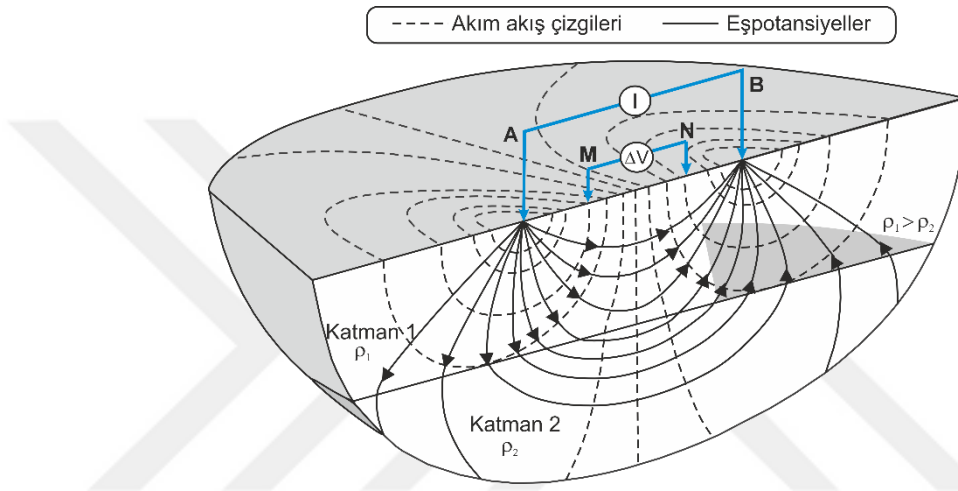
Bu denklem, bir DAÖ alan uygulamasında ortamın elektriksel öz direncini hesaplamak için kullanılır. Burada gösterilen gerilim farkı ve akım yoğunluğu arasındaki ilişki, yeraltı yapısının özellikleri hakkında bilgi sağlar. DAÖ yöntemiyle elde edilen veriler, yeraltındaki homojen olmayan öz direnç dağılımını modellemek için kullanılır. Bu modelleme, yeraltındaki farklı malzemelerin (örneğin, akiferler, ayrılmış zonlar) ve yapılarının (faylar, çatlaklar) haritalanmasını sağlar.

Homojen ve izotrop olmayan koşullar altında, Eşitlik 4.5 eşdeğer bir homojen yarı alanın öz direncini verir. Bu değeri belirlemek için genellikle elektrot diziliminin merkezi ile ilişkilendirilen görünen öz direnç ($GÖ, \rho_a$) terimi tanımlanır.

4.2. DAÖ Ölçü Teknikleri ve Elektrot Dizilimleri

DAÖ yönteminde, genel olarak, yer yüzeyine yerleştirilen dört elektrot kullanılır. Akım elektrotları (A ve B), yeraltına doğru akım (DC) uygular ve bu akım yeraltında elektriksel bir potansiyel dağılımı oluşturur. Gerilim elektrotları (M ve N) ise bu

potansiyel dağılımının iki nokta arasındaki farkını (gerilim farkını) ölçmek için kullanılır (Şekil 4.1). DAÖ yönteminde kullanılan elektrotlar genellikle paslanmaz çelikten yapılır ve dayanıklılık ile yüzey teması açısından uygun özelliklere sahiptir. Yöntem, Şekil 4.1’den de görüldüğü gibi, akım elektrotlarından doğru akım geçirilerek yeraltında bir elektriksel akım dağılımı oluşturulmasıyla başlar. Yeraltı malzemesinin özdirenci, bu akımın yönünü ve yoğunluğunu etkiler. Gerilim elektrotları arasındaki potansiyel fark ölçülerek, yeraltı yapılarının elektriksel özellikleri hesaplanır. Bu ölçümler, özdirenç dağılımını modellemek için matematiksel yöntemlerle birleştirilir.

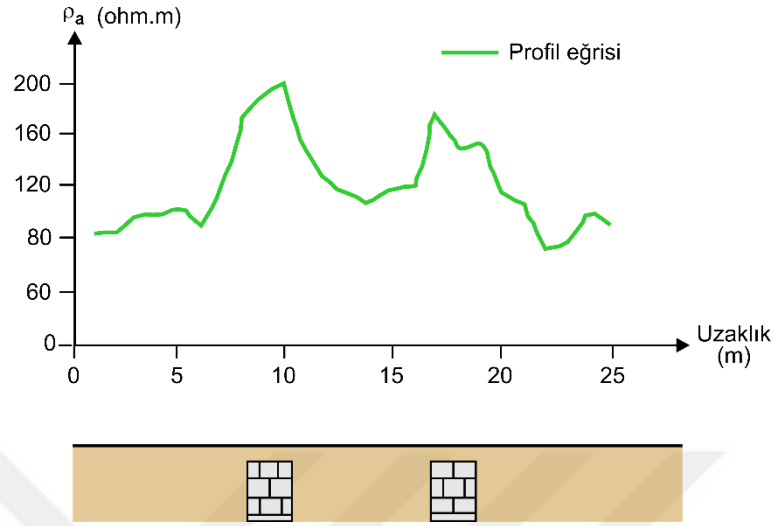


Şekil 4.1. Dört elektrotlu bir dizilim ile DAÖ yönteminin temel çalışma prensibi (Seidel ve Lange, 2007’den düzenlenmiştir)

Özdirenç ölçümleri, yer yüzeyinde, sondaj kuyuları arasında veya bir sondaj kuyusu ile yüzey arasında gerçekleştirilebilir. Özel kablolar kullanılarak göllerde, nehirlerde ve kıyı bölgelerinde su altında da ölçümler yapılabilmektedir. Bu ölçümler; profil, sondaj, hem sondaj hem de profil oluşturma yöntemlerinin birleşimini içeren iki-boyutlu (2B) özdirenç görüntüleme tekniği (sondaj-profil) ve üç boyutlu (3B) özdirenç ölçümleri gibi çeşitli yöntemlerle gerçekleştirilebilir (Seidel ve Lange, 2007, Candansayar, 2014).

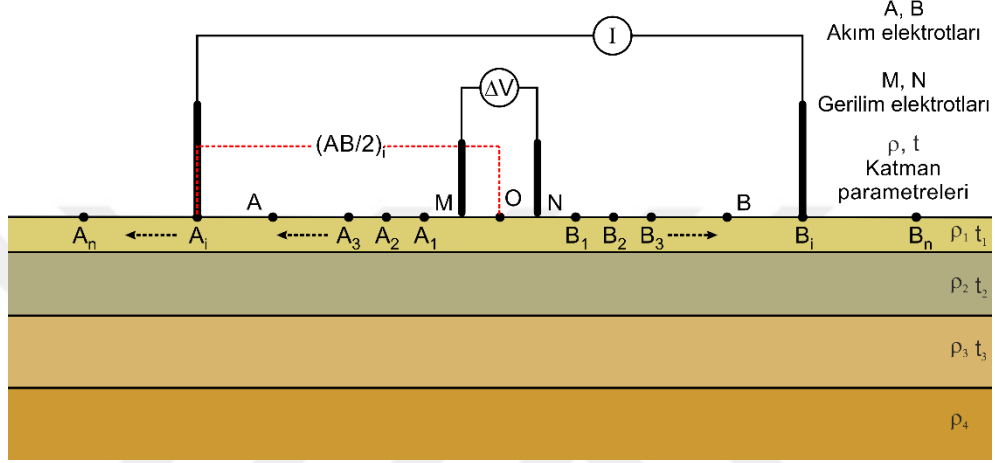
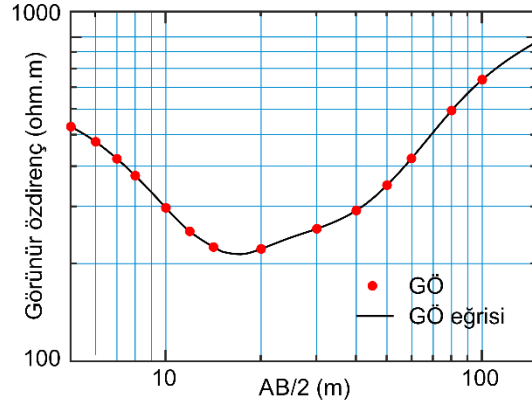
Profil yöntemleri, sabit elektrot aralıkları kullanarak yüzey boyunca yatay özdirenç değişimlerini belirler ve bu değişimler, elektrot aralıklarıyla belirlenen sabit bir araştırma derinliğine kadar incelenir. Bu yöntemde elde edilen veriler genellikle nitel olarak yorumlanır. Ölçülen görünür özdirençlerin kontur haritaları veya profil grafikleri jeolojik ve arkeolojik yapılar ile atık sahaları ve kirlilik zonları gibi insan

kaynaklı oluşumların yatay sınırlarının ve hidrojeolojik koşulların belirlenmesini sağlar (Şekil 4.2).



Şekil 4.2. Bir Roma dış kale burcunun (savunma kulesi) üzerinde elde edilen GÖ profil eğrisi (Sagvar, Macaristan). Oklar duvarları işaret etmektedir (Pattantyús, 1986)

Sondaj tekniğini temel amacı ise yeraltındaki öz direnç dağılımının düşey yönlü belirlenmesidir. Uygulamada, sabit bir bakışım merkezinden iki yönde elektrotlar bir doğrultu boyunca açılır ve yeraltının düşey yöndeki öz direnç değişimleri araştırılır. Bu nedenle, bu teknik aynı zamanda Düşey Elektrik Sondaj (DES) olarak da tanımlanır (Candansayar, 2014). Bir DES uygulamasından elde edilebilecek bir GÖ eğrisi Şekil 4.3'ün üst panelinde verilmiştir. Araştırma alanında düzenli aralıklarla veya rastgele konumlarda gerçekleştirilen birden fazla sondaj ölçümü yapıların yatay boyutları hakkında da bilgi sağlayabilir. Bu teknik uygulamasıyla birkaç yüz metreye kadar araştırma derinliklerine ulaşılabilir. Elde edilen veriler nitel ve nicel olarak yorumlanabilir. Bir-boyutlu (1B) ters çözüm, ölçülen görünür öz direnç verilerini nicel olarak değerlendirmenin temel bir yoludur ve katman parametrelerinin (öz direnç ve kalınlık) belirler. Yerelektrik verilerin jeolojiyle daha iyi ilişkilendirilebilmesi için sondaj logları veya yansıma ve kırılma sismik kesitleri gibi diğer jeofizik yöntemlerin sonuçlarıyla karşılaştırılması önerilir (Seidel ve Lange, 2007).



Şekil 4.3. GÖ DES eğrisi (üstte) ve bir DES çalışması için Schlumberger elektrot diziliminin şematik gösterimi

Sondaj-profil tekniği karmaşık jeolojik yapıların araştırılmasında ve daha detaylı bir şekilde görselleştirilmesini sağlar. Profil boyunca hem yanal hem de düşey yönde ayrıntılı bilgi sağlar ve çevresel çalışmalarda en yaygın kullanılan tekniktir. Bu teknikte 2B ters çözüm, yeraltındaki öz dirençlerin iki-boyutlu bir dağılımını sunar. 3B öz direnç ölçümleri ise daha karmaşık ve detaylı yeraltı yapılarının yüksek çözünürlüklü görüntülenmesine olanak sağlar. Ancak, halen oldukça zaman alıcı ve maliyetli olması nedeniyle görece küçük ölçekli jeofizik alan çalışmalarında sınırlı bir şekilde kullanılmaktadır. Özetle bu teknikler, farklı jeofizik araştırma ve uygulamalarında yeraltı özelliklerini incelemek için oldukça önemli araçlardır (Seidel ve Lange, 2007).

DAÖ yönteminde akım elektrotları (A ve B) ile gerilim elektrotlarının (M ve N) farklı konumlandırılmasına bağlı olarak çeşitli elektrot dizilimleri geliştirilmiştir. Aynı alanda kullanılan farklı elektrot dizilimleri ölçülen gerilim farklarını ve dolayısıyla GÖ

değerlerini de değiştirebilmektedir. Geleneksel elektrot dizilimleri genellikle bir simetri merkezine göre belirli bir doğrultu üzerinde düzenlenmiştir ve bu dizilimler arasında Schlumberger, Wenner, Dipol-Dipol ve Pol-Dipol dizilimleri bulunmaktadır. Bir alan çalışmasında kullanılacak elektrot dizilimi araştırmanın amacına göre seçilmektedir. Örneğin, Schlumberger ve Wenner dizilimleri genellikle derinlik araştırmalarında tercih edilirken, yanal süreksizliklerin belirlenmesinde Pol-Dipol dizilimi daha iyi sonuçlar vermektedir. Maden aramacılığında ise Dipol-Dipol ve Gradient dizilimleri daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Ülkemizde en sık kullanılan dizilim olan Schlumberger elektrot dizilimidir. Bu elektrot diziliminin bir DES uygulaması için şematik bir gösterimi Şekil 4.3'ün alt panelinde sunulmuştur. Buradan da görüldüğü gibi, bu dizilimde, sabit bir simetri merkezinden başlanılarak akım elektrotları her iki yönde olmak üzere bir doğrultu boyunca açılır ve bu düzenleme yeraltının düşey yöndeki özdirenç değişimlerinin incelenmesine olanak tanır (Candansayar, 2014). Uygulamada, ölçülen gerilim farkının, akım elektrotları arasındaki mesafenin artmasıyla giderek azalması durumunda, bu azalma hesaplanacak görünür özdirenç değerinin güvenilirliğini etkileyebilir. Bu tür durumlarda, gerilim elektrotları arasındaki mesafe artırılarak ölçümlerin hassasiyeti ve güvenilirliği sağlanır.

5. ARAZİ UYGULAMASI VE DEĞERLENDİRME

5.1. DAÖ DES Uygulaması

Türkiye, su kaynakları açısından zengin bir coğrafyada bulunmaktadır ve çeşitli hidrografik özellikler göstermektedir. Türkiye'nin toplam yüzölçümü çeşitli büyüklüklerde 25 ana su havzasına bölünmüştür (Şekil 5.1). Bu havzaların her biri kendine özgü hidrolojik ve ekolojik özelliklere sahiptir. Dolayısıyla, farklı su yönetimi stratejileri gerektiren yapılar barındırırlar. Türkiye'nin su havzaları, ülkenin sosyo-ekonomik kalkınmasında kritik öneme sahiptir ve bu havzaların etkin ve sürdürülebilir yönetimi hem bölgesel hem de ulusal düzeyde stratejik bir gerekliliktir.



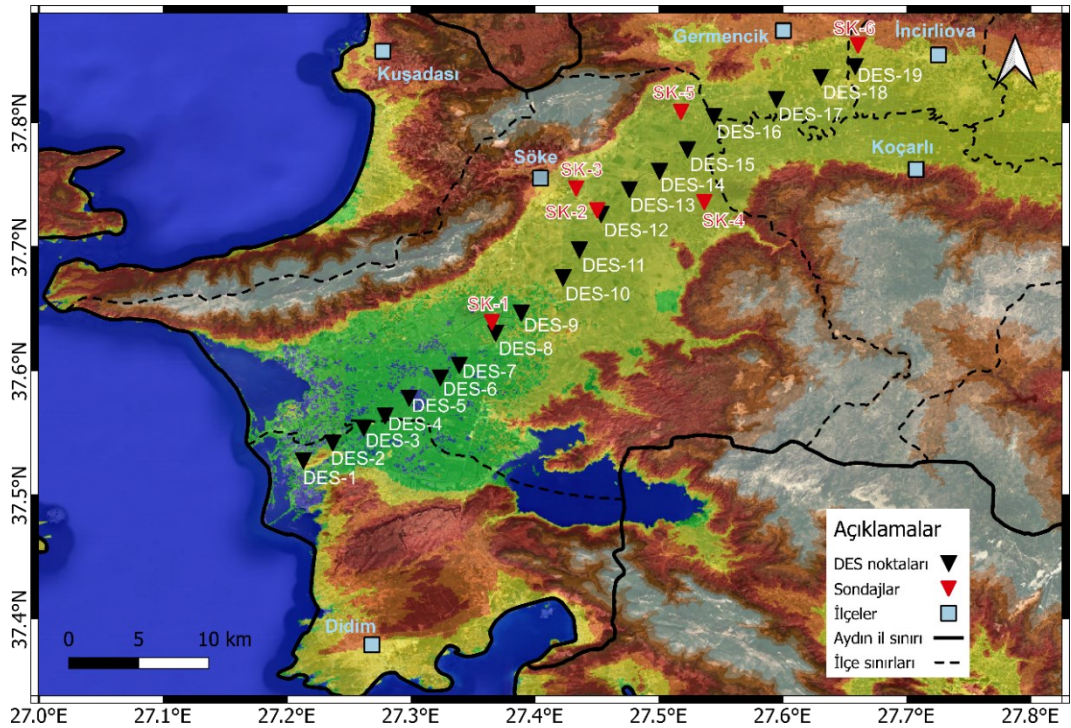
Şekil 5.1. Türkiye'nin başlıca su havzaları

Bu tez çalışması kapsamında Büyük Menderes Havzasının alt havzalarından biri olan Söke Alt Havzasının hidrojeolojik ve hidrojeofizik özelliklerinin DAÖ yöntemiyle araştırılması amacıyla GB-KD doğrultulu toplam 19 DES noktasında (DES-1 – DES-19) Schlumberger elektrot dizilimiyle ölçümler gerçekleştirilmiştir. Her bir DES noktası için AB/2 değerleri 500 m'dir. Şekil 5.2, alan çalışmasından bir görüntüyü

göstermektedir. DES noktalarının sayısal yükseklik modeli (digital elevation model, DEM) haritası üzerindeki konumları Şekil 5.3’de gösterilmiştir. Harita üzerinde ayrıca bazı DES noktaları yakınlarında gerçekleştirilen ve bu tez çalışması kapsamında SK-1 – SK-6 olarak adlandırılan 6 sondaj noktasının konumları da gösterilmiştir.



Şekil 5.2. DAÖ DES alan çalışmasından bir görüntü



Şekil 5.3. Söke Alt Havzası üzerinde gerçekleştirilen DAÖ çalışmasında DES noktalarının ve bilinen bazı sondajların konumları

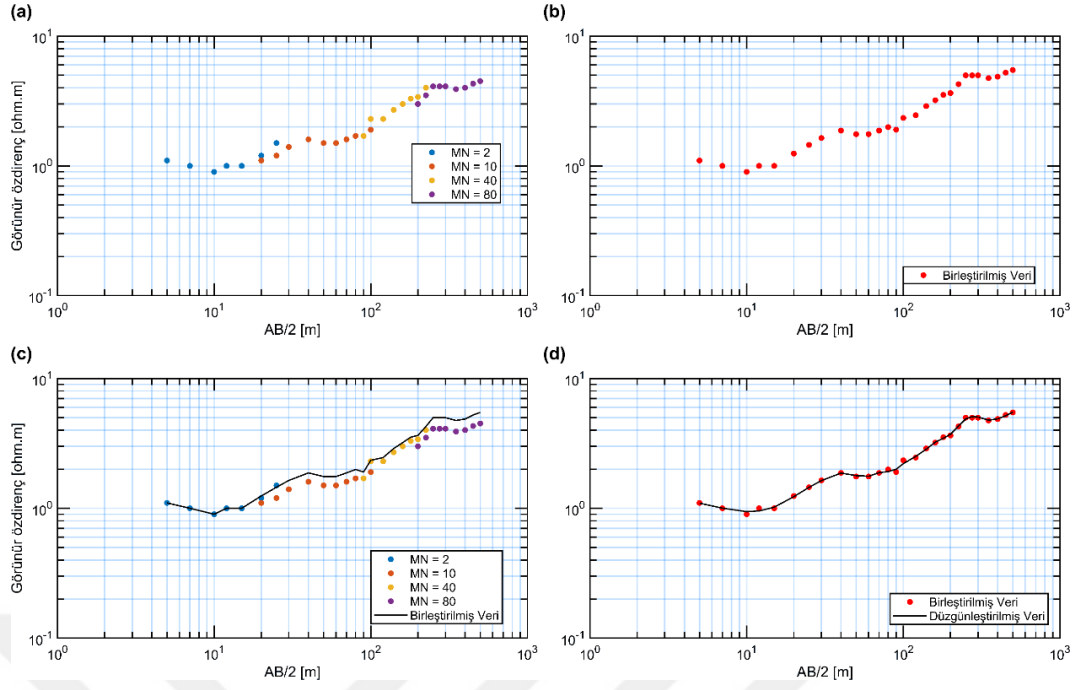
gerçekleştirilmiştir. 1B ters çözümden her bir katmanın kalınlık ve öz dirençlerinden oluşan katman parametreleri elde edilmiştir. Her bir DES verisi için elde edilen katman parametreleri kullanılarak enine direnç (T) ve boyuna iletim (S) değerlerini kapsayan Dar-Zarrouk parametreleri (Maillet, 1947) hesaplanmıştır. İzleyen bölümler, gerçekleştirilen değerlendirme aşamalarını ve elde edilen sonuçları detaylı olarak açıklamaktadır.

5.2. DES Verilerinin Bir-Boyutlu (1B) Değerlendirmesi

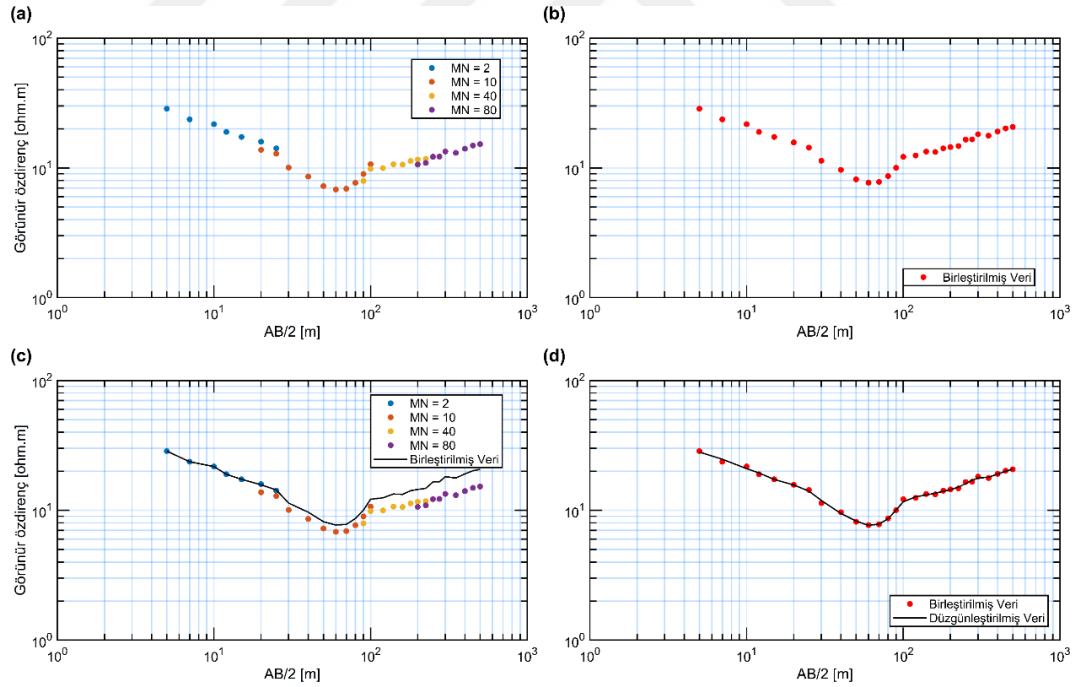
DES tekniği ile gerçekleştirilen DAÖ yöntemi uygulamasında yer altının elektriksel özelliklerinin belirlenmesi hedeflenmiştir. DES tekniğinde, yüzeyde belirli bir noktadan artan derinliklere doğru veri toplanarak yer altındaki farklı yapı ve tabakaların elektriksel direnci hakkında bilgi edinilir. Bu amaç için alan çalışmasında toplanan DES veri kümelerinin 1B ters çözüm tekniği ile değerlendirilmesi gerekmektedir. 1B değerlendirme yüzeyin tam altında bulunan tabakaların özelliklerinin derinlikle nasıl değiştiğini gösterir. Ters çözüm işlemi, DES çalışmasında toplanan görünür öz direnç verilerinden anlamlı bilgiler çıkarmak için kritik bir adımdır. DES verileri genellikle $AB/2$ değerlerine karşı ölçülen gerilim farkı/voltaj değerleri şeklinde toplanır ve bu değerlerden görünür öz dirençler matematiksel olarak Ohm yasasından hesaplanır. Ancak bu veriler, doğrudan yer altı yapılarının katmanlarını görünür hale getirmez. Ters çözüm ile görünür öz direnç veri kümeleri değerlendirilerek yer altının 1B modelleri oluşturulur. Alan çalışmasında toplanan veriler genellikle çeşitli gürültü ve hatalar içerebilir. Ters çözüm işlemi, model verilerini ölçülen verilerle en iyi şekilde eşleştirecek şekilde ayarlayarak daha doğru ve güvenilir sonuçlar elde etmeyi amaçlar. Elde edilen modeller, farklı derinliklerdeki tabakaların kalınlıkları ve öz direnç değerlerini tanımlar. Ayrıca, öz direnç değişimlerine dayalı olarak farklı jeolojik katmanlar ve yer altı yapıları belirlenebilir. Böylece DES ile toplanan görünür öz direnç verilerini 1B ters çözümüyle yer altı suyu taşıyan tabakalar, kayalar ve diğer jeolojik malzemeler gibi çeşitli yapılar belirlenir.

5.2.1. DES eğrilerinin birleştirilmesi

DES çalışmaları, belirli bir noktadan derinliğe doğru özdirenç yapısını belirlemek amacıyla akım elektrotlarının (AB) arasındaki mesafenin ($AB/2$) sistematik olarak arttırılması yoluyla gerçekleştirilir. Ancak, akım elektrotlarını daha büyük derinliklerdeki tabakaları belirleyebilmek için daha geniş mesafelere taşımak, potansiyel ölçüm elektrotları arasındaki (MN) gerilim farkının azalmasına neden olur. Akım elektrotlarının mesafesi arttıkça, MN elektrotları arasında ölçülen gerilim farkı zayıflar. Bu zayıflamanın önüne geçilmesi amacıyla potansiyel elektrotlarının aralıkları da genellikle artırılır. Sonuç olarak, belirli bir $AB/2$ mesafesi için birden fazla MN konfigürasyonu kullanılarak ölçümler gerçekleştirilir. Farklı MN konfigürasyonlarından elde edilen veriler, görünür özdirenç eğrisinin farklı segmentlerini oluşturur. Her bir segment, belirli MN aralıklarında ölçülen verileri temsil eder ve farklı hassasiyetlerle elde edildiğinden, bu segmentlerin birleştirilmeden doğrudan ters çözüm işlemi gerçekleştirilemez. Bu süreçte, segmentlerin uyumlu hale getirilmesi ve tek bir sürekli eğriye dönüştürülmesi, yer altı modellerinin oluşturulmasında kritik bir adımdır. Eğrilerin birleştirilmesi, 1B modelleme için homojen bir veri kümesi oluşturur. Bu da ters çözüm algoritmalarının daha tutarlı ve kararlı çözümler üretmesine olanak tanır. Böylece, yer altı tabakalarının elektriksel özelliklerinin daha doğru ve güvenilir bir şekilde belirlenmesi sağlanır. Bu tez çalışması kapsamında, alan çalışmasından elde edilen 19 DES eğrisinin birleştirilmesini gerçekleştiren bir MATLAB® kodu geliştirilmiştir. Bunlardan DES1 ve DES10 için programdan elde edilen görüntüler Şekiller 5.5 ve 5.6'da sunulmuştur.



Şekil 5.5. DES1 eğrisinin birleştirilmesi a) Ham veriler b) Birleştirilmiş veri c) Birleştirilmiş veri ile ham verinin karşılaştırılması d) Birleştirilmiş veri ve 1B ters çözümde kullanılacak yuvarlatılmış veri



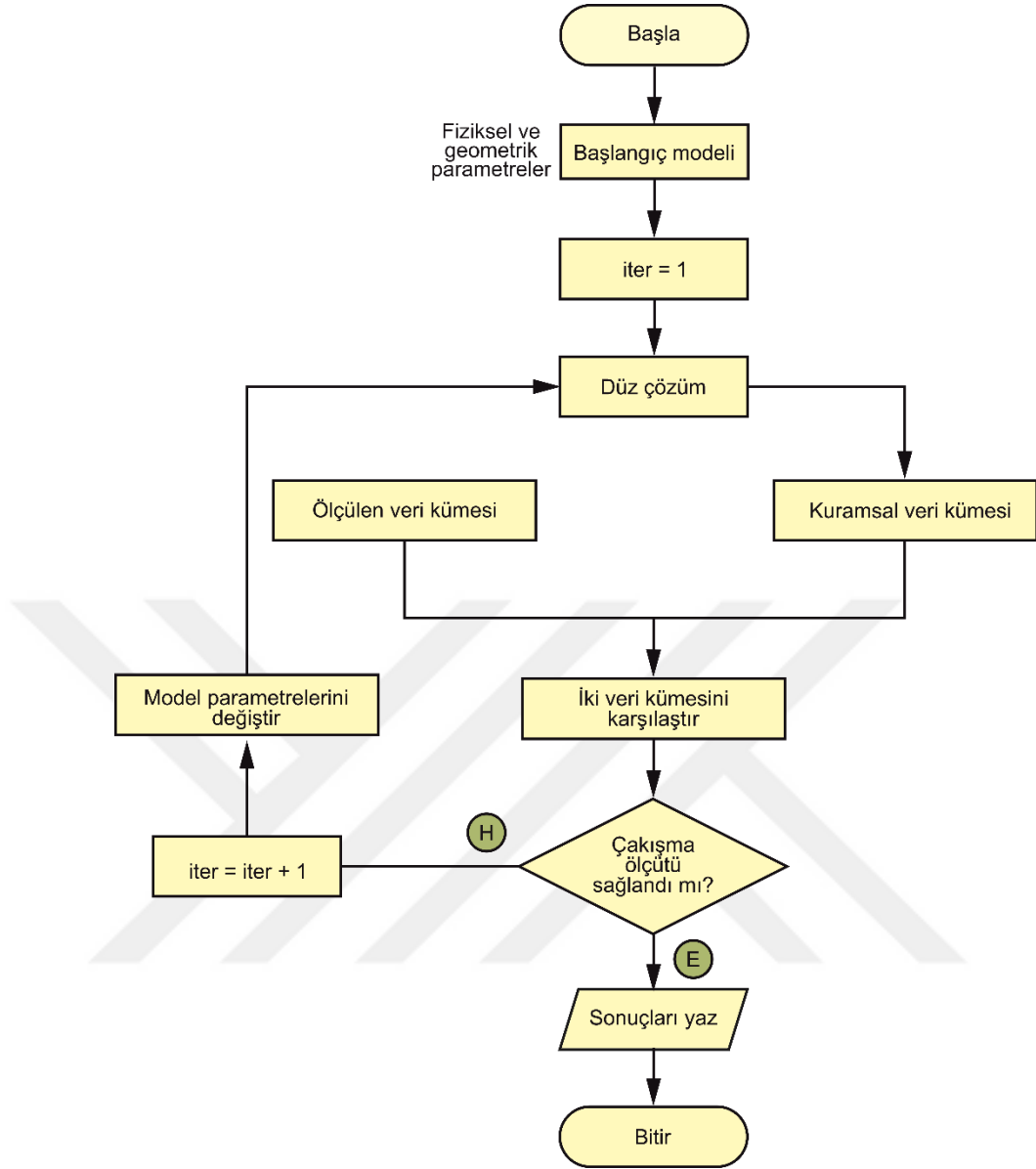
Şekil 5.6. DES10 eğrisinin birleştirilmesi a) Ham veriler b) Birleştirilmiş veri c) Birleştirilmiş veri ile ham verinin karşılaştırılması d) Birleştirilmiş veri ve 1B ters çözümde kullanılacak yuvarlatılmış veri

5.2.2. DES verilerinin 1B ters çözümü

DES verilerinin 1B ters çözümü, Levenberg-Marquardt (LM) veya sönümlü en-küçük kareler olarak adlandırılan yaklaşım kullanılarak MATLAB® ortamında gerçekleştirilmiştir. Bu yaklaşımda parametre düzeltme yöneyi aşağıdaki eşitlik ile elde edilmektedir.

$$\Delta p = (A^T A + \beta I)^{-1} A^T \Delta d \quad 5.1$$

Burada, A $n \times m$ boyutlarında ve sütunlarında her ölçü noktasında bir parametreye göre kısmi türevleri içeren Jacobian dizeyini, T dizeyin dönüğünü, β sönüm etmenini, I birim dizeyini ve Δd ise ölçülen ve hesaplanan veri arasındaki fark yöneyini gösterir. Geleneksel en dik iniş ve Gauss-Newton yöntemlerinin bir kombinasyonu olan *LM* algoritması, doğrusal olmayan en-küçük kareler problemlerinde model parametrelerini yinelemeli olarak optimize ederek modelin ölçülen verilerle en iyi uyumu sağlamasını amaçlar. Algoritma, başlangıçta, sönüm etmeninin görece büyük bir sayı olması durumunda en dik iniş algoritması gibi hareket ederken sönüm etmeninin görece küçük değerlerinde model optimuma yaklaştıkça Gauss-Newton yöntemine geçiş yaparak daha hızlı yakınsama ve daha fazla kararlılık sağlar (Başokur, 2021). Şekil 5.7 1B ters çözüm akış diyagramını göstermektedir.



Şekil 5.7. *LM* algoritması ile gerçekleştirilen 1B ters çözüm akış diyagramı

Değerlendirmede, görünür öz direnç model eğrileri hesaplanırken Nyman ve Landisman (1977) tarafından önerilen süzgeç katsayıları kullanılmıştır. Başlangıç sönüm etmeninin değeri 0.5 olarak alınmış ve 20 yinelemeye kadar her 10 yinelemede yarıya düşürülmüştür. Jacobian dizeyi ileri yön sonlu farklar yaklaşımıyla elde edilmiş ve dizey terslemesi için QR ayrıştırması kullanılmıştır. Her bir değerlendirilmede yineleme izleyen amaç fonksiyonunun (φ) değeri $<1e-06$ olunca ya da ön tanımlı maksimum yineleme sayısına ulaşıncaya sonlandırılmıştır.

$$\varphi = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\Delta d)^2 \right]^{1/2} \quad 5.2$$

Burada N gerçekleştirilen DES çalışmasındaki toplam AB/2 değerlerinin sayısına karşılık gelmektedir.

DES verilerinin 1B değerlendirilmesiyle 3–7 tabaka arasında çözümler elde edilmiştir. Minimum öz direnç değeri 0.39 ohm.m, maksimum öz direnç değeri ise 1809.3 ohm.m olmuştur. Eğri türleri ve detaylı açıklamalar izleyen bölüm kapsamında verilmiştir.

5.2.3. Dar-Zarrouk parametrelerinin hesaplanması

Söke Alt Havzası DAÖ çalışmasında DES tekniği kullanılarak toplanan görünür öz direnç verilerinin 1B ters çözümünden elde edilen ve her bir katmanın öz direnç ve kalınlık değerlerini içeren katman parametreleri görece sığ yeraltının elektriksel özelliklerinin belirlenmesi için önemli bir veri kümesi sunmuştur. Bu katman parametreleri, daha ileri analizlerde kullanılan enine direnç (T) ve boyuna iletimi (S) kapsayan Dar-Zarrouk parametrelerinin hesaplanmasında temel oluşturmıştır. Ayrıca, bu parametreler aracılığıyla eşdeğer öz direnç (ρ_e), eşdeğer kalınlık (h_e), boyuna öz direnç (ρ_l), enine öz direnç (ρ_t), anizotropi katsayısı (λ), etkin formasyon öz direnci (ρ_m), katmanların yansıma katsayısı (RC), etkin yansıma katsayısı (RC_f), katmanların öz direnç kontrastı (FC) ve etkin öz direnç kontrastı (FC_f) gibi parametreler de hesaplanmıştır. Bu tür analizler, ilgili havza veya akifer hakkında çeşitli bilgiler sunarken her bir parametrenin yorumlanması farklı jeolojik ve hidrojeolojik koşullar hakkında da ayrıntılı bilgiler edinmemizi sağlamaktadır. Bu parametrelerin matematiksel bağıntıları aşağıda verilmiştir.

$$T = \sum_{i=1}^n \rho_i t_i = \rho_1 \cdot t_1 + \rho_2 \cdot t_2 + \dots + \rho_n \cdot t_n \quad 5.3$$

$$S = \sum_{i=1}^n \frac{t_i}{\rho_i} = \frac{t_1}{\rho_1} + \frac{t_2}{\rho_2} + \dots + \frac{t_n}{\rho_n} \quad 5.4$$

$$\rho_e = \sqrt{T/S} \quad 5.5$$

$$h_e = \sqrt{T \cdot S} \quad 5.6$$

$$\rho_l = \frac{H}{S} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{\sum_{i=1}^n \frac{t_i}{\rho_i}} \quad 5.7$$

$$\rho_t = \frac{T}{H} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i \rho_i}{\sum_{i=1}^n t_i} \quad 5.8$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{\rho_t}{\rho_l}} = \frac{\sqrt{S \cdot T}}{H} \quad 5.9$$

$$\rho_m = \sqrt{\rho_l \cdot \rho_t} \quad 5.10$$

$$RC = \frac{\rho_{i+1} - \rho_i}{\rho_{i+1} + \rho_i} \quad 5.11$$

$$RC_f = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} (RC_{i,i+1}) t_i}{\sum_{i=1}^n t_i} \quad 5.12$$

$$FC = \frac{\rho_{i+1}}{\rho_i} \quad 5.13$$

$$FC_f = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} (FC_{i,i+1}) h_i}{\sum_{i=1}^n h_i} \quad 5.14$$

Yukarıdaki eşitliklerde, n toplam katman sayısı, i katmanların sayacı, ρ katmanların öz direnci, t katmanların kalınlıkları ve H ise toplam katman kalınlığıdır. Ayrıca, akifer koruyucu kapasite derecelendirmesi (KKD) de izleyen çizelgedeki ölçütler dikkate alınarak belirlenmiştir.

Çizelge 5.1 Akifer koruyucu kapasite derecelendirmesi (KKD) (Oladapo vd. 2004; Alabi vd. 2016)

ΣS	Derecelendirme
> 10	Mükemmel
5 – 10	Çok İyi
0.2 – 4.9	Orta
0.1 0.19	Zayıf
< 0.1	Çok Zayıf

Boyuna iletim (S) ve Enine direnç (T) parametreleri, özellikle yer altı suyu taşıyan formasyonların özelliklerini belirlemek için kritik öneme sahiptir. Maillat (1947) tarafından tanımlanan bu parametreler yeraltı akiferlerinin hidrojeolojik özelliklerini anlamamıza yardımcı olur.

Boyuna iletim, akiferin elektriksel iletkenliğini, yani yer altındaki suyun taşıdığı elektriksel yükün ne kadar kolay hareket edebileceğini temsil eder. Bu parametre, yer altındaki suyun salınımını (akiferin geçirgenliğini) ve suyun mineralizasyon düzeyinin anlaşılmasını sağlar. S parametresi yüksekse, bu genellikle yer altı suyu açısından zengin, geçirgen formasyonların varlığını gösterir.

Enine direnç, formasyonun elektriksel direnç özelliklerini gösterir ve genellikle formasyonun gözenekliliği ile ilişkilidir. Bu parametre, akiferin taşıma kapasitesini ve yer altındaki suyun hareketini etkileyen jeolojik özelliklerin anlaşılmasını sağlar. T parametresi yüksekse, yer altındaki suyun taşınması zor olabilir, çünkü bu, düşük geçirgenliğe sahip kayaçları gösterir. Bu parametrelerin birlikte değerlendirilmesi, akiferin su tutma kapasitesi ve akışkan taşıma özellikleri hakkında bilgi verir.

Eşdeğer öz direnç genellikle yer altındaki farklı katmanların bir bütün olarak elektriksel iletkenliğini temsil eden bir parametredir. Bu parametre, belirli bir derinlikteki yer altı formasyonunun görünür öz direncini (veya ortalama öz direncini) ifade eder. Düşük ρ_e değerleri, genellikle su içeriği yüksek, geçirgen ve iletken katmanların varlığını ve tuzlu su taşıyan formasyonları işaret eder. Örneğin, suyu taşıyan kumlu veya çakıllı akiferler, iyonların (özellikle tuzlu suyun içerdiği iyonlar) iletkenliğini artırması nedeniyle düşük öz direnç değerlerine sahip olabilir. Yüksek ρ_e değerleri, genellikle su içeriği az, düşük geçirgenliğe sahip kayaç türlerini (örneğin, kil, bazalt gibi) ve tatlı su taşıyan formasyonları gösterir. Bu tür katmanlar, genellikle

daha az iletken olup su taşımada zayıftır. Yüksek öz direnç değerleri, bu tür formasyonların elektriksel iletkenliğinin düşük olduğunu ve dolayısıyla akiferin su taşıma kapasitesinin de sınırlı olduğunu ifade eder.

Eşdeğer kalınlık, yer altındaki katmanların toplam kalınlıklarının bir tür "ortalama" değeridir. Eşdeğer kalınlık, yer altındaki elektriksel özelliklerin daha büyük veya daha küçük olmasına göre değerlendirilir. Bu parametre, bir katmanın toplam kalınlığını, o katmanın elektriksel iletkenliğine bağlı olarak belirler. Daha büyük eşdeğer kalınlık genellikle, yer altı katmanlarının elektriksel iletkenliği düşükse veya çok sayıda geçirgen katman bulunuyorsa ortaya çıkar. Bu durumda, kalınlık daha fazla sayılır, çünkü düşük iletkenlikli katmanlar elektriksel alandaki etkilerini daha geniş bir alanda gösterir. Daha küçük eşdeğer kalınlık, iletkenliği yüksek olan katmanlarda görülebilir. Bu tür katmanlar, daha ince olmalarına rağmen, elektriksel alandaki etkilerini daha hızlı ve belirgin bir şekilde iletebilirler. Eşdeğer kalınlık, yer altındaki su taşıma kapasitesini, hidrojeolojik akiferlerin derinliğini ve katmanlar arasındaki geçişleri belirlemekte önemli bir rol oynar. Eşdeğer kalınlık, özellikle akiferin derinliği ve suyun taşınabilirliği hakkında bilgi sağlar.

Anizotropi katsayısı, yer altı formasyonlarının elektriksel iletkenliğinin yönsel farklılıklarını ifade eder. Anizotropi, özellikle kayaların ve akiferlerin heterojen yapısı nedeniyle farklı yönlerde farklı elektriksel iletkenlik gösterebilen formasyonlarda önemlidir. Anizotropi katsayısının yüksek olması, yer altı suyu taşıyan formasyonlarda, özellikle farklı derinliklerde farklı iletkenlik davranışları olduğunu gösterir. Bu, akiferin yönsel su taşınım kapasitesinin incelenmesinde önemli bir parametredir. Yüksek anizotropi katsayısı, genellikle farklı kayaç türlerinin ve katmanlarının bir arada bulunduğu yerlerde gözlemlenir ve bu tür yerler, suyun farklı derinliklerden ve yönlerden hareket etme kapasitesine sahip olabilir.

Etkin formasyon öz direnci, yer altındaki formasyonların, özellikle su taşıyan katmanların elektriksel direnç özelliklerinin genel bir ölçüsüdür. Bu parametre, formasyonun su içeriği ile ters orantılıdır; yani daha fazla su içeren formasyonlar, genellikle daha düşük öz direnç değerlerine sahiptir. Bu parametre, özellikle yer altı suyu taşıyan ve su kaynağı olarak kullanılabilecek katmanların belirlenmesi için

önemlidir. Söke alt havzasındaki akiferlerin etkin formasyon öz direnci, bölgedeki suyun mineralizasyon düzeyini ve suyun kalitesini anlamamıza yardımcı olabilir.

Etkin yansıma katsayısı, yer altındaki formasyonların elektriksel özelliklerinin birbirlerine göre ne kadar farklı olduğunu gösterir. Yansıma katsayısı, genellikle yer altındaki farklı kayaç türleri arasındaki geçişleri, özellikle geçirgenlik ve su taşıma kapasitesindeki farklılıkları yansıtır. Yüksek yansıma katsayısı, farklı özelliklere sahip formasyonların net bir şekilde ayrıldığı alanlarda gözlemlenir. Bu parametre, özellikle havza içerisindeki su taşıma kapasitesini etkileyen jeolojik heterojenlikleri anlamamıza yardımcı olur.

Özdirenç kontrastı, farklı formasyonlar arasındaki elektriksel direnç farklarını temsil eder. Bu parametre, yer altındaki farklı kayaçların ve akiferlerin, su taşıma kapasitesine göre nasıl farklılık gösterdiğini anlamamıza olanak tanır. Yüksek özdirenç kontrastı, özellikle geçirgenlik açısından zengin ve fakir formasyonların ayrımını gösterir. Bu parametre, özellikle jeofizik çalışmalarda akifer sınırlarını belirlemek ve farklı formasyonlar arasındaki geçiş bölgelerini incelemek için kullanılır. Bu tür analizler, hidrojeolojik modelleme ve su kaynaklarının yönetimi için oldukça değerlidir.

Koruyucu kapasite derecelendirmesi, yer altı suyu taşımayan veya su geçirmeyen formasyonların yer altı suyu üzerindeki etkisini ifade eder. Bu parametre, özellikle kirlenmeye karşı hassas olan su taşıyan akiferlerin korunması için önemlidir. Koruyucu kapasitenin yüksek olduğu bölgeler, yer altı suyu açısından korunaklıdır ve kirlenme riskinin düşük olduğunu gösterir. Bu, çevresel koruma ve su kalitesinin sürdürülebilirliği için kritik bir parametredir.

Söke alt havzası üzerinde gerçekleştirilen DES çalışmasından 1B ters çözüm ile belirlenen katman parametreleri kullanılarak hesaplanan bu parametreler, havzanın hidrojeolojik yapısını anlamamıza olanak tanır. Özellikle, akiferlerin geçirgenlik kapasitesini, su taşıma özelliklerini, suyun mineralizasyon düzeyini ve yer altı suyu kalitesini belirlemek için bu parametreler oldukça değerli verilerdir. Akiferlerin su kapasitesini, akışkan taşıma potansiyelini ve yer altı suyu hareketini anlamak, su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimi açısından önemlidir. Bu bulgular, aynı zamanda

yer altı suyu kirliliği risklerinin değerlendirilmesi, su yönetimi politikalarının oluşturulması ve hidrojeolojik modellemelerin yapılması için de bilimsel temeller oluşturur.

5.2.4. 1B DES ters çözüm sonuçlarının görselleştirilmesi

Bu tez çalışması kapsamında, her bir DES verisinin 1B ters çözümünden elde edilen katman parametrelerinin aralarındaki uzaklık ve kot değerlerini de dikkate alarak yeraltı öz direnç dağılımlarını görselleştiren bir MATLAB® tabanlı bir kod kullanılmıştır. Görselleştirme için gerekli olan veri giriş formatı aşağıdaki çizelgede verilmiştir.

Çizelge 5.2. 1B ters çözüm sonuçlarından yeraltı öz direnç dağılımı elde etmek için kullanılan kodun veri giriş formatı

19	→ Toplam DES sayısı		
rez11	6	→ DES adı, Katman sayısı	
1.33	3.34	3.34	→ 1B ters çözüm sonuçları
0.38	3.53	6.86	→ Öz dirençler, Kalınlıklar, Derinlikler
8.38	5.92	12.78	
0.66	21.2	33.98	
42.71	78.18	112.16	
0.23	Inf	Inf	
rez12	3	→ DES adı, Katman sayısı	
6.64	4.35	4.35	1B ters çözüm sonuçları
			Öz dirençler, Kalınlıklar, Derinlikler
:	:	:	
:	:	:	
:	:	:	
Dist.	Elev.	→ DES uzaklığı, DES kotu	
0	4		
2.63	2		
:	:		
:	:		
:	:		

5.3. DES verilerinin İki-Boyutlu (2B) Ters Çözümü

Şekil 5.3’de konumları ve uzanımları gösterilen GB-KD doğrultulu 19 DES noktasında toplanan görünür öz direnç verilerinin bu çalışma kapsamında 2B ters çözümü gerçekleştirilmiştir. DES verilerinin verimli bir şekilde 2B ters çözümünün yapılabilmesi için belirli geometrik koşulların sağlanması gerekmektedir. Özellikle, DES istasyonlarının ve akım elektrotlarının alan üzerindeki uzanımlarının aynı

doğrultuya sahip olması ve her bir DES uygulamasında akım elektrotlarının komşu DES istasyonlarını da kapsayacak şekilde yerleştirilmesi önemli bir koşuldur. Bu çalışmada, DES istasyonları ve akım elektrotlarının yer yüzeyindeki konumları, alan koşulları dikkate alındığında yaklaşık olarak aynı doğrultudadır, yani yeraltı yapısının düşey olarak modellenmesine olanak verecek şekilde dizilim sağlanmıştır. Ancak, toplam ölçüm alanı boyunca her bir DES istasyonu arasındaki mesafe yaklaşık olarak 2 km veya daha fazladır. Bu, DES ölçümlerinin, özellikle su taşıma kapasitesinin veya öz direncin yatay varyasyonlarının doğru bir şekilde modellenmesini zorlaştıran bir faktördür. DES verileri ve akım elektrotlarının yerleştirilme düzeni, yer altındaki elektriksel heterojenliğin, özellikle yüzeysel yapılar ve ince yapılar arasındaki farkların, doğru bir şekilde modele dahil edilmesini sınırlandırabilir. Bununla birlikte, bu kısıtlamalara rağmen, elde edilen sonuçların genel bir değerlendirme sunması açısından yeterli olacağı düşünülmektedir. Yani, DES ölçümleri, yer altındaki derin yapıların ve öz direnç dağılımlarının değerlendirilmesine olanak sağlayacak temel veriyi sunmaktadır. Bu koşullar altında yapılan 2B ters çözüm, derin yapıların, örneğin su taşıyan akiferlerin veya geçirgen formasyonların elektriksel özellikleri hakkında bilgi verirken, yanal heterojenlikler ve yüzeysel varyasyonlar hakkında sınırlı bilgi sağlayacaktır.

Bu tez çalışması kapsamında DES veri kümelerinin 2B ters çözümü, Uchida ve Murakami (1990) tarafından geliştirilen bir kod kullanılarak gerçekleştirilmiştir. 2B ters çözüm kodu, günümüze değin jeotermal arama (Ushijima vd. 2000; Özurlan vd. 2006), arkeolojik prospeksiyon (El-Qady vd. 1999; Candansayar ve Başokur 2001), sığ yerelektrik yapısının araştırılması (Balkaya vd. 2009), mağara araştırmaları (Balkaya vd. 2012) ve deniz suyu girişiminin belirlenmesi (Kaya vd. 2015) gibi çeşitli jeofizik araştırma alanlarında etkin bir şekilde kullanılmıştır. Uchida'nın 2B öz direnç ters çözüm kodu, yeraltı yapısının 2B öz direnç modellerini elde etmek amacıyla Schlumberger DES verilerini değerlendirmek için geliştirilmiş kapsamlı bir yazılımdır. Kod, aşağıda detaylı bir şekilde açıklanan bir dizi temel ilke ve metodolojiye dayanmaktadır.

Kod, özellikle DAÖ araştırmalarında kullanılan bir elektrot dizilimi olan Schlumberger diziliminden elde edilen verilerle çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Bu dizilim, öz dirençteki düşey değişimlere karşı duyarlılığı ile bilinmektedir. Düz çözüm,

bir 2B yer modeli üzerinde Poisson denklemi kullanılarak çözülmektedir. Denklem, iletkenlikteki karmaşık geometriler ve varyasyonları dikkate alabilmek için sonlu elemanlar yöntemiyle ayrıklaştırılmaktadır. Potansiyel dağılımı, 2B problemine etkin bir şekilde yaklaşabilen Fourier dönüşümü yöntemiyle hesaplanmaktadır. Ters çözüm, doğrusal olmayan en küçük kareler yöntemi kullanılarak gerçekleştirilir. Bu süreç, gözlemlenen görünür öz dirençler ile modelden hesaplanan değerler arasındaki çakışmazlığı minimize etmeyi içerir. Amaç fonksiyonu aşağıda verilmiştir.

$$\min_{\rho} \left[\sum_{i=1}^N \left(\frac{\rho_i^{hes} - \rho_i^{olc}}{\sigma_i} \right)^2 + \alpha J(\rho) \right] \quad 5.14$$

Burada, ρ^{hes} ve ρ^{olc} hesaplanan ve ölçülen görünür öz direnç değerleri, σ ölçülen verideki gürültünün standart sapması, N toplam veri sayısı, i ölçü numaralarının sayacı, $J(\rho)$ model düzgünlüğünü temsil eden bir düzenleme terimidir. α ise ABIC (Akaike's Bayesian Information Criterion) kullanılarak belirlenir. ABIC, modelin uyumunu ve karmaşıklığını dengeleyen istatistiksel bir ölçüttür ve aşırı uyum (overfitting) riskini azaltmaya yardımcı olur. Çakışmazlık, DAÖ verilerinin özelliklerine daha iyi uyum sağlaması için logaritmik bir ölçekle ifade edilir. Kod, iki tür ızgara (mesh) kullanır: ileri modelleme için bir hesaplama ızgarası ve öz direnç yapısını tanımlamak için bir model ızgarası. Hesaplama ızgarası, geniş bir elektrot aralığı yelpazesini ($AB/2$ varyasyonlarını) işleyebilecek şekilde tasarlanmış olup, topoğrafik değişimleri de hesaba katabilmektedir. Model ızgarası ise yer altını dikdörtgen bloklara ayırarak her bir bloğa sabit bir öz direnç değeri atar. Gerçekçi ve düzgün bir öz direnç dağılımı sağlamak amacıyla, kod ters çözüm işlemi sürecinde bir Laplasyen filtre operatörü uygular. Bu, komşu bloklar arasındaki öz dirençteki ani değişimlerin azaltılmasına yardımcı olur. Görünür öz dirençlerin model parametrelerine göre kısmi türevlerinin hesaplanması, ters çözüm sürecinde kritik bir adımdır. Kod, model parametrelerini güncellemek için gerekli olan bu türevleri verimli bir şekilde hesaplayan bir algoritma kullanır. Ters çözüm süreci iteratif bir yapıya sahiptir; her iterasyonda model, uyumsuzluk ve kısmi türevler temel alınarak güncellenir. Süreç, uyumsuzluk belirli bir eşiğin altına inene kadar devam eder. Kod, araştırma doğrultusu boyunca topoğrafyayı dikkate alarak, ızgara düğümlerini yükseltir

verilerine göre ayarlar günceller (Uchida ve Murakami 1990). Kodun genel akışı izleyen şekildedir.

1. **Veri Girişi:** Program, görünür özdirençler ve topografya bilgileri dahil olmak üzere gözlemlenen verileri okur.
2. **Başlangıç Modelinin Oluşturulması:** İlk model, tipik olarak homojen bir yarı-uzay olarak oluşturulur. Bu model ilk düz çözüm hesaplamasında kullanılır.
3. **Düz Çözüm:** Başlangıç modeline göre görünür özdirençler hesaplanır ve çakışmazlık değerleri belirlenir.
4. **Kısmi Türev Hesaplama:** Her bir bloğun özdirencine göre görünür özdirençlerin kısmi türevleri hesaplanır.
5. **Model Güncelleme:** Model, uyumsuzluk ve kısmi türevler dikkate alınarak en küçük kareler yöntemi ve ABIC kriteri kullanılarak güncellenir.
6. **Yineleme:** Düz çözüm, kısmi türev hesaplama ve model güncelleme süreçleri, uyumsuzluk minimize edilene ve model yakınsaklık gösterene kadar tekrarlanır.
7. **Çıktı:** Son model, çakışmazlık ve diğer ilgili bilgilerle birlikte çıktı olarak sunulur.

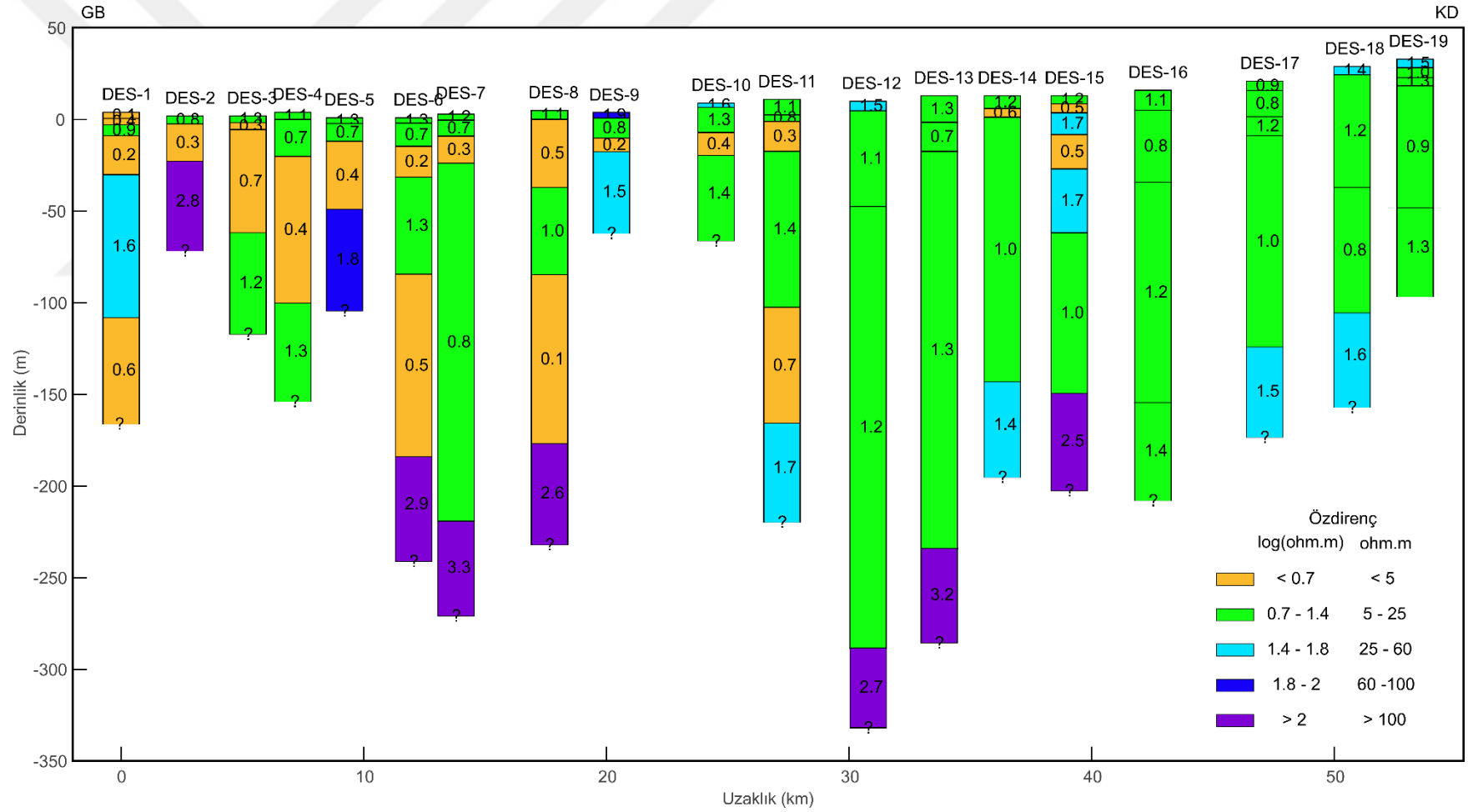
6. ARAŞTIRMA BULGULARI

6.1. 1B Ters Çözüm Sonuçları

Bu tez çalışması kapsamında Söke Alt Havzası'nda DAÖ yöntemi kullanılarak DES tekniği ile toplanan veri kümelerinin öncelikle 1B ters çözümleri gerçekleştirilmiştir. DES-1 ölçü noktası Senozoik yaşlı Konaklı ve Kuşadası Formasyonları üzerinde yer alırken diğer DES noktaları Kuvaterner yaşlı Alüvyon birim üzerinde konumlanmaktadır. 1B ters çözüm ile her bir DES noktası için elde edilen katman parametreleri bir önceki bölümde açıklandığı gibi düşey sondajlar şeklinde oluşturularak Şekil 6.1'de sunulmuştur.

DES-1 için gerçekleştirilen 1B ters çözüm değerlendirmesinde 33.7 metre derinliğe kadar uzanan çok düşük öz dirençli (0.4–8.3 ohm.m) değerler saptanmıştır. Bu öz direnç değerlerinin tuzlu su içeren killi birimlerle ilişkili olduğu değerlendirilmektedir. 33.7–111.3 m derinlik aralığında öz direnç değerlerindeki artışın (42.3 ohm.m) görece yüksek çakıl içeriğine sahip bir tabakanın varlığından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu derinlik seviyesinden sonra tekrar çok düşük öz dirençli (0.2 ohm.m) tuzlu su içeren killi birimlerin devam ettiği tespit edilmiştir. Bununla birlikte, bu ölçüm sonuçlarını doğrulayabilecek yakınlıkta bir sondaj verisi bulunmamaktadır.

DES-2 ölçüm noktası için 1B ters çözümden 24.9 m derinliğe kadar çok düşük öz direnç değerlerine (0.5–6.6 ohm.m) sahip tabakalar tespit edilmiştir. Bu düşük değerlerin, tuzlu su içeriği yüksek olan killi birimlerden kaynaklandığı tahmin edilmektedir. Öz direnç eğrisinde, AB/2 mesafesinin yaklaşık 50 m'yi aşmasıyla birlikte eğimin artması, bu ölçüm noktaları için sağlıklı bir değerlendirme yapılmasını güçleştirmiştir. Ancak, 24.9 m derinliğin ardından gözlemlenen öz direnç değerindeki belirgin artışın (688.4 ohm.m), kum ve çakıl içeriği yüksek tabakalarla ilişkili olduğu düşünülmektedir. Bununla birlikte, ölçüm sonuçlarının korelasyonunun sağlanabileceği yakın mesafede bir sondaj bulunmamaktadır.



Şekil 6.1. Söke Alt Havzası'nda DAÖ yöntemi kullanılarak DES tekniği ile toplanan veri kümelerinin 1B ters çözümlerinden elde edilen katman parametreleri

DES-3 eğrisi dört farklı tabaka olarak değerlendirilmiştir. Belirlenen tabakalar sırasıyla, 3.7 metre derinliğe kadar 18.8 ohm·m, 3.7–7.4 metreler arasında 2 ohm·m, 7.4–63.9 metreler arasında 5 ohm·m, ve son olarak en derindeki tabaka 17.6 ohm·m özdirenç değerine sahiptir. Bu tabakaların genel olarak siltli, killi ve siltli-killi seviyeler olduğu görece çok düşük özdirencin ise tuzlu su içeriğinden kaynaklandığı düşünülmektedir. AB/2'nin 300–400 metre seviyelerinden sonraki ani özdirenç artışı değerlendirme dışında bırakılmış olup, bu artışın çakıltası ve kireçtaşı birimlerini işaret ettiği öngörülmektedir.

DES-4 ölçüm noktasından elde edilen görünür özdirenç eğrisi dört tabaka olarak değerlendirilmiştir. Belirlenen tabakalar sırasıyla; 3.9 metre derinliğe kadar 13.8 ohm·m, 3.9–24 metreler arasında 5.5 ohm·m, 24–10.41 metreler arasında 2.8 ohm·m özdirenç değerine sahiptir. Son tabakanın özdirenci ise 20.3 ohm·m olarak hesaplanmıştır. Bu tabakaların genel olarak DES-3 ölçü noktası gibi siltli ve killi seviyelerden oluştuğu ve tuzlu su içerdiği öngörülmektedir. Ancak, alınan ölçü ile karşılaştırılabilecek yakın mesafede sondaj verisi bulunmamaktadır.

DES-5 eğrisi DES-3 ve DES-4 noktalarına benzer şekilde dört tabaka olarak değerlendirilmiş olup, özdirenç dağılımı açısından benzer özellikler göstermektedir. Buna göre, belirlenen tabakalar sırasıyla; 3.1 metre derinliğe kadar 20.7 ohm·m, 3.1–12.8 metreler arasında 5.5 ohm·m, 12.8–50 metreler arasında 2.8 ohm·m özdirenç değerine sahiptir. Son tabakanın özdirenci ise DES-3 ölçüm noktasına kıyasla artış göstererek 61.5 ohm·m değerine ulaşmıştır. Her üç DES noktasında da örtü tabakasının altında yer alan görece düşük özdirençli tabakaların, tuzlu su içeriğinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Buna karşılık, görece yüksek özdirenç değerine sahip olan son tabakanın, çakıl içeriği yüksek bir birim olarak değerlendirilmiştir. Ancak, alınan ölçümler ile karşılaştırılabilecek yakın mesafede bir sondaj verisi bulunmamaktadır.

DES-6 eğrisi önceki DES noktalarından farklı olarak altı tabaka olarak değerlendirilmiştir. Belirlenen özdirenç değerleri incelendiğinde, tabakaların kil, kum ve çakıl birimlerinin farklı bileşimlerinden oluştuğu öngörülmüştür. Yapılan değerlendirmeler, 3.4–21.7 ohm.m arasında değerler gösteren alüvyon serisinin 185 metre derinliğe kadar devam ettiğini göstermektedir. Bu derinlikten sonra görece

yüksek öz direnç değerine sahip (860.2 ohm·m) temel seviye olabilecek bir birim belirlenmiştir. Bu DES noktasında, yaklaşık 40–80 metre derinlik aralığında çakıllı seviyelerin varlığı gözlemlenmiş ve bu seviyelerin tabanına doğru, özellikle 70 metre civarında gerçekleştirilecek bir sondajdan su temin edilebileceği öngörülmüştür. Ölçüm noktasına en yakın sondaj çalışması 2.8 km uzaklıkta olup, bu sondaj kuyusunun 293 metre derinliğinde olduğu kaydedilmiştir. Ancak, sondaj logunun mevcut olmaması ve uzaklığının korelasyon için uygun olmaması nedeniyle değerlendirmede kullanılmamıştır.

DES-7 için gerçekleştirilen 1B değerlendirmesine göre, kum ve çakıl içerikli killerden oluşan alüvyon serisinin 222.1 metre derinliğe kadar devam ettiği belirlenmiştir. Alüvyon içinde, 8.8 metre derinlikten itibaren gözlemlenen görece düşük öz direnç değerlerinin (2–6.9 ohm·m), tuzlanma etkisinden kaynaklandığı düşünülmektedir. 222.1 metre derinlik seviyesinden sonra ise görece yüksek öz direnç değerine sahip (1809.3 ohm·m) bir birim belirlenmiş olup, bu birimin şist özellikli olduğu öngörülmektedir.

DES-8 eğrisinin 1B ters çözüm değerlendirmesine göre, kil içerikli alüvyon birimlerinin 181.8 metre derinliğe kadar devam ettiği tespit edilmiştir. Bu derinlik seviyesinden sonra, görece yüksek öz direnç değerine sahip (409.3 ohm·m) bir birim belirlenmiş olup, 181.8 metre derinliğin ötesinde gnays birimlerinin bulunduğu öngörülmektedir. Alınan ölçüye yakın mesafede karşılaştırma yapılabilecek bir sondaj verisi bulunmamaktadır.

DES-9 ölçüm noktası civarında alt seviyelerde Permian-Karbonifer yaşlı Menderes Masifi'ne ait gnays ve mikaşist birimlerinin bulunduğu düşünülmektedir. 1B değerlendirme sonuçlarına göre, yüzeyi kaplayan alüvyon birimlerine ait tabakalar tespit edilmiştir. Alüvyon tabakası içerisinde, 3.2 metre derinliğe kadar nebati toprak devam etmektedir. Bu seviyeden sonra, 21.6 metre derinliğe kadar düşük öz direnç (0.6-6.6 ohm·m) değerleri gösteren ve tuz içeriği yüksek kil birimleri yer almaktadır. Bu tabakaların altına geçildiğinde ise kumlu ve çakıllı kil birimlerinin varlığı öngörülmektedir. Söz konusu ölçüm noktasına yakın sondaj verisi bulunmamakla birlikte, mevcut veriler ışığında alandaki birimlerin nitelikleri yorumlanmıştır. İleride

yapılacak sondaj çalışmaları, bu değerlendirmelerin doğruluğunu sınamak ve jeolojik modelin netleştirilmesini sağlayacaktır.

DES-10 ölçüm noktası için gerçekleştirilen 1B ters çözüm değerlendirmesi sonucunda, 2.4 metre kalınlığında ve görece yüksek öz direnç değerine sahip (736.8 ohm.m) bir örtü tabakasının varlığı tespit edilmiştir. Bu tabakanın altında, 16 metre derinliğe kadar uzanan kumlu-siltli kil birimi yer almaktadır. 16 ile 28.7 metreler arasında, tuz içeriği olabileceği değerlendirilen bir kil birimi bulunmaktadır. Daha derin seviyelerde, 23.4 ohm.m öz direnç değerine sahip çakıl içerikli kil biriminin var olduğu öngörülmüştür.

DES-11 ölçüm noktasında gerçekleştirilen ölçümlerden elde edilen görünür öz direnç eğrisinin değerlendirilmesinde, 13.5 ohm.m öz direnç değerine sahip örtü tabakasının altında killi (1.8 ve 6.9 ohm.m) ve çakıllı kil (22.7 ohm.m) birimlerinden oluşan alüvyon birimlerin 177.2 metre derinliğe kadar uzandığı tespit edilmiştir. Bu derinlik seviyesinin ardından, 50.9 ohm.m öz direnç değerine sahip şist ve metabazik birimlerin yer aldığı öngörülmektedir. Ancak, elde edilen ölçümlere yakın bir sondaj verisi bulunmadığı için bu yorumlar saha verilerinin sınırlılıkları çerçevesinde yapılmıştır.

DES-12 ölçüm noktasında yapılan ölçümlerin değerlendirilmesi ince bir örtü katmanının (31.1 ohm.m) varlığını ortaya koymuştur. Bu tabakanın altında, kil içerikli alüvyon birimlerinin (11.5 ve 15.4 ohm.m) yaklaşık 300 metre derinliğe kadar devam ettiği belirlenmiştir. Alüvyon birimlerinin alt seviyelerinde, 515 ohm.m ile görece yüksek öz direnç değerine sahip bir tabaka gözlemlenmiştir. Bu tabakanın çakıl içerikli bir birim olduğu öngörülmektedir.

DES-13 ölçüm noktasında elde edilen görünür öz direnç eğrisi, dört tabaka olarak değerlendirilmiştir. İlk tabaka, 14.5 metre kalınlığında ve 19.9 ohm.m öz direnç değerine sahip bir örtü tabakasıdır. Bu tabakanın altında, DES-12 ölçüm noktasında olduğu gibi, kil içerikli alüvyon birimlerin hakimiyeti gözlemlenmiştir. Bu alüvyon birimlerinin öz direnç değerleri 5.3 ohm.m ile 21.2 ohm.m arasında değişmekte ve 247.1 metre derinliğe kadar uzanmaktadır. En alt tabaka, görece yüksek öz dirençli (1606.7 ohm.m) birim olarak tanımlanmıştır. Bu birimin kum ve çakıl içerikli bir yapı sergilediği öngörülmektedir.

DES-14 ölçüm noktası için gerçekleştirilen değerlendirmeler, bölgenin genel olarak kil içerikli alüvyon birimlerden oluştuğunu göstermektedir. İlk olarak, 6.99 metre kalınlığında ve 15 ohm.m öz direnç değerine sahip bir örtü tabakası tespit edilmiştir. Bu tabakanın altında, 156.2 metre derinliğe kadar uzanan görece düşük öz direnç değerlerine sahip tabakalar belirlenmiştir. Bu tabakaların öz direnç değerleri sırasıyla 4.3 ohm.m ve 10.3 ohm.m olarak belirlenmiştir. Son tabaka, 25.3 ohm.m öz direnç değeri ile diğer birimlerden farklılık göstermekte olup, daha geçirgen bir yapı sergilediği düşünülmektedir.

DES-15 ölçüm noktasında elde edilen görünür öz direnç eğrisi, yedi tabaka olarak değerlendirilmiştir. Bu değerlendirmeye göre, alüvyon serisi 161.8 metre derinliğe kadar devam etmektedir. Alüvyon içerisinde, 4.8-9.3 metre ve 21.1-39.9 metre seviyelerinde, yaklaşık 3 ohm.m öz direnç değerine sahip görece düşük öz dirençli kil içerikli tabakalar bulunmaktadır. 9.3-21.1 metre ve 39.9-74.7 metre aralığında ise sırasıyla 51.8 ohm.m ve 49.4 ohm.m öz direnç değerleriyle karakterize edilen, kumlu ve çakıllı seviyeler olduğu düşünülmektedir. Alüvyon serisinin altında, 312.3 ohm.m öz direnç değerine sahip son tabaka yer almaktadır. Bu tabaka, çakıltaşı içerikli bir birim olarak değerlendirilmiştir.

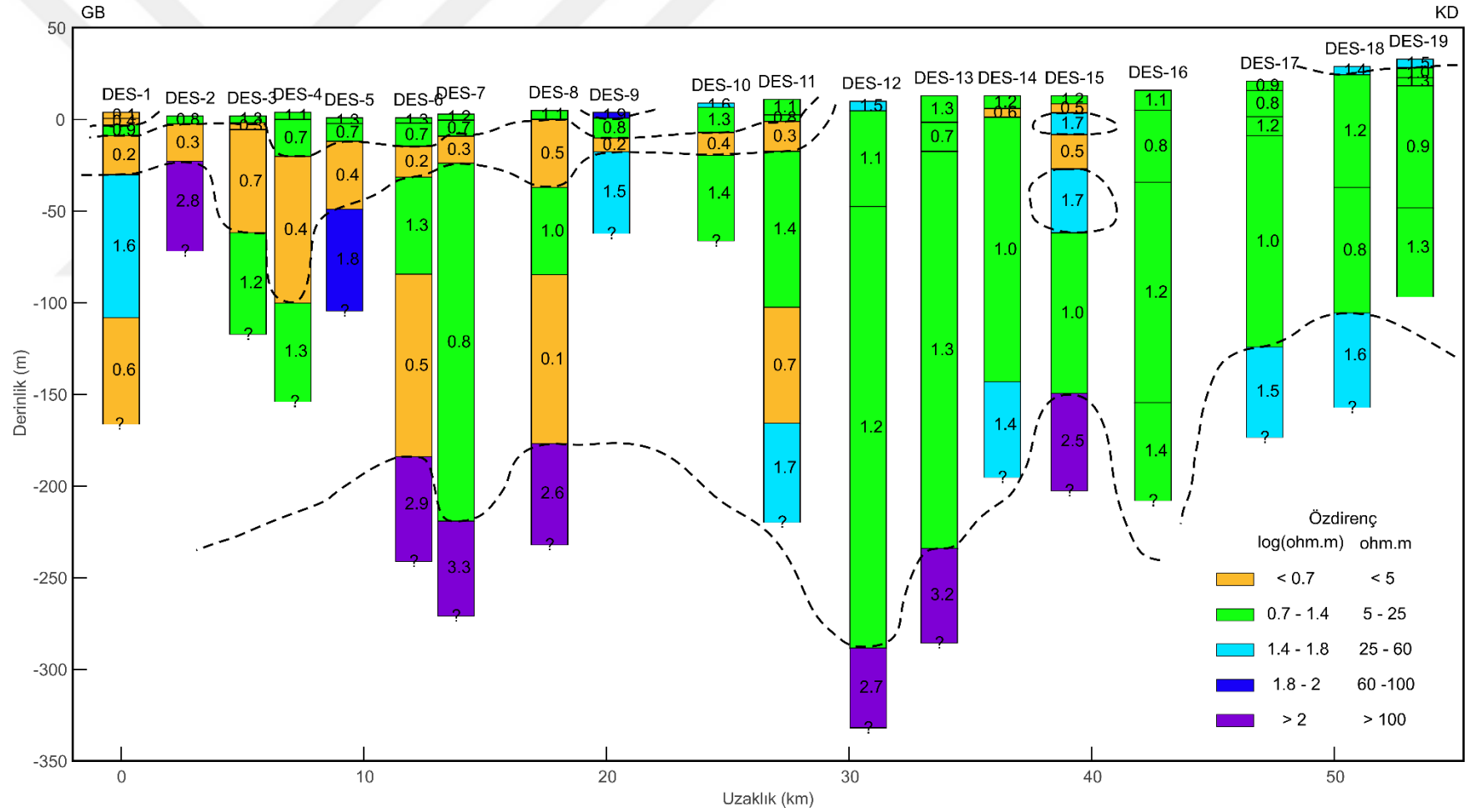
DES-16 ölçüm noktasında yapılan değerlendirme sonucunda, dört tabakalı bir model elde edilmiştir. İlk tabaka, 10.9 metre kalınlığında ve 13.4 ohm.m öz direnç değerine sahip bir örtü tabakasıdır. Bu tabakanın altında, sırasıyla yaklaşık 40 metre ve 120 metre kalınlıklarındaki iki farklı birim tanımlanmıştır. Bu birimlerin öz direnç değerleri sırasıyla 6.7 ohm.m ve 14.3 ohm.m olarak belirlenmiştir. Bu seviyelerdeki alüvyon içeriğinin killi ve siltli olduğu düşünülmektedir. En alt tabaka, 23.4 ohm.m öz direnç değerine sahiptir ve silt ile kum içerikli çakıl birimi olarak öngörülmüştür. Ancak, elde edilen verilere yakın bir sondaj çalışması bulunmadığı için bir korelasyon gerçekleştirilememiştir.

DES-17 ölçüm noktasında yapılan değerlendirme, yüzeyden araştırma derinliğinin sonuna kadar genel olarak kil, kum ve çakıl içerikli alüvyon birimlerin devam ettiğini göstermektedir. Beş tabaka olarak değerlendirilen bu birimlerin öz direnç değerleri sırasıyla 8.5 ohm.m, 7 ohm.m, 14.6 ohm.m, 10.5 ohm.m ve 35.3 ohm.m olarak belirlenmiştir. Bu değerler, alüvyon birimlerin killi, kumlu ve çakıllı içeriklere sahip

olduğunu düşündürmektedir. Ancak, ölçüm noktasına yakın bir sondaj verisi bulunmamaktadır.

DES-18 ölçüm noktasında yapılan değerlendirme, tıpkı DES-17 ölçüm noktasında olduğu gibi, araştırma derinliğinin sonuna kadar kil içerikli alüvyon birimlerin devam ettiğini göstermektedir. Yüzeyden 4.5 metre derinliğe kadar, 25.7 ohm.m öz direnç değerine sahip bir örtü tabakası tespit edilmiştir. Bu tabakanın altında, 66 metre derinlik seviyesine kadar 17.3 ohm.m öz direnç değerine sahip birim, kum ve çakıl içerikli kil olarak öngörülmektedir. 66 metrenin altında, 134.6 metre derinliğe kadar uzanan tabaka, 6.2 ohm.m öz direnç değeri ile kil birimi olarak değerlendirilmiştir. Bu seviyenin altında ise, 42.5 ohm.m öz direnç değerine sahip, killi kumlu çakıl biriminin yer aldığı düşünülmektedir. Ancak, bu değerlendirmelerin doğruluğunu teyit edebilmek için ölçüm noktasına yakın bir sondaj verisi bulunmamaktadır. Daha kesin sonuçlar için ek sondaj çalışmaları gereklidir.

Son DES ölçüm noktası olan DES-19'da toplanan görünür öz direnç veri kümesi, beş tabaka olarak değerlendirilmiştir. Bu noktada da, diğer ölçüm noktalarına benzer şekilde, kil içerikli alüvyon birimler içerisinde kalınmıştır. Örtü tabakası, 30.4 ohm.m öz direnç değeri ile görece yüksek bir değer sergilemektedir. Bu tabakanın altında, 7.9 ohm.m ile 21.3 ohm.m arasında değişen öz direnç değerlerine sahip birimler belirlenmiştir. DES-19 ölçüm noktasına yakın bir sondaj verisi bulunmamaktadır. Şekil 6.1'de sunulan ve her bir DES noktası için yukarıda genel olarak açıklanan katman parametreleri, ölçüm doğrultusu boyunca yorumlanarak bir 1B yeraltı modeli oluşturulmuştur. Bu model, Şekil 6.2'de sunulmaktadır.

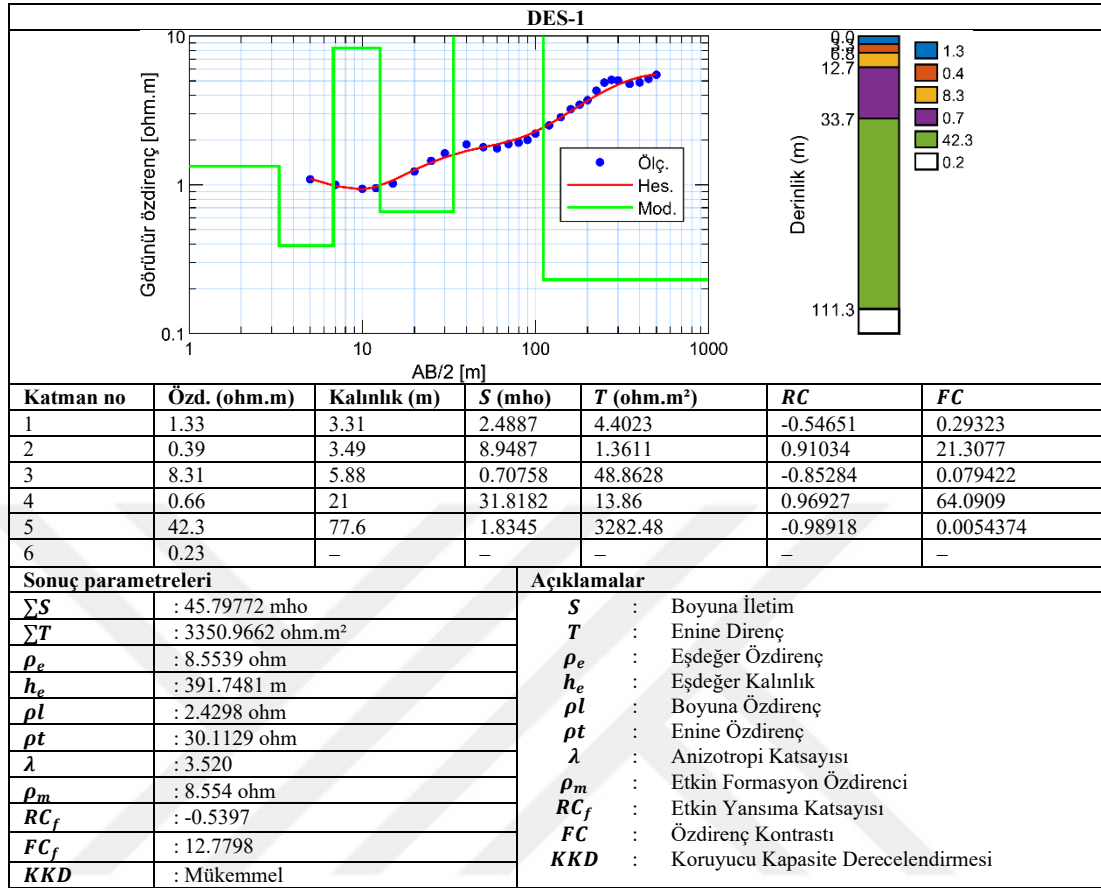


Şekil 6.2. Söke Alt Havzası'nda DAÖ yöntemi kullanılarak DES tekniği ile toplanan veri kümelerinin 1B ters çözümlerinden elde edilen katman parametrelerinin yorumu

Şekil 6.2’de sunulan yeraltı modelinde, toplanan DES verilerinin 1B ters çözümünden elde edilen sonuçlara göre, yaklaşık 200 metre derinlik seviyesine kadar, <5 ohm.m ile 60 ohm.m arasında değişen görece düşük özdirenç değerlerine sahip ve genel olarak kil içerikli alüvyon birimler tespit edilmiştir. Yerelektrik kesit üzerindeki siyah kesikli çizgiler, yanal ve düşey yöndeki birim geçişlerini göstermektedir. Araştırma alanlarının konumlandığı bölgeler, jeolojik olarak deniz altında olan ve zaman içinde denizin çekilmesiyle bugünkü kıyı sınırlarına ulaşan alanlardır. Bu durum, özellikle DES verilerinin değerlendirilmesiyle elde edilen, doğal olarak tuz içeriğinden kaynaklandığı düşünülen çok düşük özdirençli birimleri açıklamaktadır. Bu bölgeler, önceden deniz altı ortamında olup, uzun süre yoğun su kütlesinin baskısı altında kalmış ve bu süreç doğal olarak tuz içerikli bir bozuşmuş zonun oluşmasına yol açmıştır. GB-KD doğrultulu araştırma alanında, >100 ohm.m özdirenç değerleri genellikle 150 metre derinlik seviyesinin altındadır ve DES noktaları 6, 7, 8, 12, 13 ve 15’te tespit edilmiştir. DES-10 noktasından itibaren, yerelektrik kesitte 5-25 ohm.m arasında görece düşük özdirenç değerine sahip birimler baskın hale gelmektedir. Ayrıca, kesitin GB tarafına doğru, araştırma derinliği KB tarafına kıyasla daha düşük değerlerde kalmaktadır, bu da batıya doğru bir alüvyon kalınlığının varlığını göstermektedir.

Her bir DES noktası için, 1B ters çözümünden elde edilen katman parametreleri temel alınarak hesaplanan tüm parametreler hem grafiksel sunumlarla hem de katman bazında sayısal değerlerle ayrıntılı olarak çizelgelerde sunulmuştur. Çizelge 6.1, DES-1 noktası için elde edilen sonuçları göstermektedir.

Çizelge 6.1. DES-1 eğrisi, 1B ters çözümü ve ters çözünden elde edilen katman parametreleri temel alınarak hesaplanan diğer parametreler



Bu DES noktası için görece yüksek boyuna iletim S değeri (45.79772 mho) akiferin yüksek iletkenliğe sahip olduğunu, yer altı suyu akışının kolay olduğunu ve suyun mineral içeriğinin yüksek olabileceğini işaret etmektedir. Aynı şekilde yüksek bir enine direnç T değeri (3350.9662 ohm.m²), akiferin kalın ve/veya yüksek öz dirençli malzemelerle dolu olduğunu göstermektedir. Bu, akiferde kalın suya doymun bir tabaka bulunduğunu ancak bu tabakanın ya daha düşük mineral içeriğine sahip olduğunu ya da öz direncin çeşitli faktörlerden etkilenmiş olabileceğini düşündürmektedir. Her iki parametrenin birleşik değerlendirmesi, bölgedeki akifer sisteminin hem kalın suya doymun tabaka içerdiğini hem de bu tabakaların oldukça geçirgen olduğunu gösterir. Bu durum, yer altı suyunun bol miktarda bulunduğuna ve suyun etkili bir şekilde taşındığına işaret eder. Görece düşük/orta bir değer sunan eşdeğer öz direnç ρ_e (8.5539 ohm) yeraltı formasyonunun iletkenliği artıran su içeriği veya mineralize maddeler içerdiğini gösterebilir. Jeolojik olarak ortamda, ortalama düzeyde iletken birimler olan kum, bazı kil türleri veya tuzlu su içeren formasyonları işaret edebilir. Bu, bölgedeki yer altı suyu sistemlerinin varlığına veya varsa tuzlu

suyun etkilerine dair ipucu verebilir. Görece yüksek eşdeğer kalınlık h_e (391.7481 m) oldukça kalın bir iletken tabakanın varlığına işaret eder. Böylesine kalın bir birim, büyük hacimlerde su depolama kapasitesine sahip olabilir. Hidrojeolojik olarak bu, geniş bir akifer sisteminin varlığına işaret edebilir. Ayrıca, sulu bir formasyonun çok sayıda tabaka içerdiğini veya belirli jeolojik süreçlerle önemli ölçüde kalınlaşmış olduğunu gösterebilir. Eşdeğer öz direnç ρ_e ve etkin formasyon öz direnç değerlerinin (8.554 ohm.m) aynı olması formasyonun genel özelliklerinin homojen olduğu ve su içerikli yapılarla dengede olduğu sonucuna varabiliriz. Bu, su taşıyan birimler içinde dengeli iletkenlik karakteristiğini gösterir. Anizotropi katsayısı λ , 3.52 olarak hesaplanmıştır. Bu katsayının 1'den büyük olması, ortamın elektriksel olarak anizotropik olduğunu ve yanay ve düşey yönlerde öz dirençlerin farklı olabileceğini gösterir. Bu durum, tabakalaşmanın ve jeolojik süreçlerin su akışını farklı yönlerde farklı oranlarda etkilediğini düşündürmektedir. Negatif etkin yansıma katsayısı RC_f , geleneksel olarak üstteki formasyondan daha iletken bir alt formasyonun varlığına işaret eder. Bu, altta bulunan tabakaların daha iletken olduğunu, dolayısıyla yer altı sularının bu alt tabakalarda depolandığını ve hareket ettiğini göstermektedir. Yüksek etkin öz direnç kontrast FC_f (12.78) değeri farklı iletkenlik özelliklerine sahip katmanların varlığını ve belirgin tabakalaşmayı gösterir. Bu, tabakaların farklılık gösterdiği ve potansiyel olarak değişen su içeriklerine dair bilgi vermektedir. Son olarak, mükemmel KKD derecelendirmesi formasyonun yer altı suyunun korunması açısından yüksek derecede etkililiğe sahip olduğunu gösterir. Yani, su taşıyan tabakaların kirlilik gibi dış etkenlere karşı oldukça iyi bir şekilde korunduğu sonucuna varılabilir.

Diğer kalan 18 DES noktasına ait sonuçlar EK A'da sunulmuştur. Tüm DES noktaları için DAÖ yönteminden belirlenen ortak parametreler çalışılan alanın genel hidrojeolojik özelliklerinin tartışılması amacıyla izleyen çizelgede özetlenmiştir.

Çizelge 6.2. Söke Alt Havzası DAÖ DES uygulamasından belirlenen parametreler ve 19 DES noktası için istatistiksel değerleri

DES	ΣS	ΣT	ρ_e	h_e	ρl	ρt	λ	ρ_m	RC_f	FC_f	KKD
1	45.80	3350.97	8.55	391.75	2.43	30.11	3.52	8.55	-0.54	12.78	M
2	45.35	38.34	0.92	41.70	0.55	1.54	1.67	0.92	0.67	1235.13	M
3	13.38	358.57	5.18	69.28	4.77	5.61	1.08	5.18	0.47	3.27	M
4	32.74	387.34	3.44	112.61	3.18	3.72	1.08	3.44	0.50	5.73	M
5	15.34	221.46	3.80	58.29	3.26	4.42	1.17	3.80	0.58	16.63	M
6	45.36	1646.74	6.03	273.32	4.08	8.90	1.48	6.03	0.36	136.11	M
7	37.61	1473.74	6.26	1473.74	5.91	6.64	1.06	6.26	0.89	230.50	M
8	95.03	714.66	2.74	260.61	1.91	3.93	1.43	2.74	0.39	175.05	M
9	13.51	328.67	4.93	66.63	1.60	15.19	3.08	4.93	-0.20	16.44	M
10	6.12	2019.91	18.17	111.14	4.69	70.38	3.87	18.174	-0.09	4.46	Çİ
11	27.90	2395.95	9.27	258.54	6.35	13.53	1.46	9.27	0.03	5.25	M
12	20.37	4472.60	14.82	301.84	14.65	14.99	1.01	14.82	0.78	27.25	M
13	13.90	4978.68	18.93	263.05	17.77	20.15	1.07	18.93	0.86	66.61	M
14	15.54	1619.78	10.21	15.64	10.06	10.37	1.02	10.21	0.38	2.35	M
15	18.39	3260.02	13.32	244.4	8.80	20.15	1.51	13.32	0.41	20.85	M
16	15.05	2133.91	11.91	179.23	11.32	12.52	1.05	11.91	0.23	1.68	M
17	14.33	1506.24	10.25	146.94	10.12	10.38	1.01	10.25	0.45	2.96	M
18	14.78	1603.50	10.42	153.93	9.11	11.91	1.14	10.42	0.16	3.68	M
19	9.40	814.59	9.31	87.52	8.64	10.03	1.08	9.30	0.29	2.07	Çİ
İstatistik											
Min.	6.12	38.34	0.92	15.64	0.55	1.54	1.01	0.92	-0.54	1.68	Çİ
Maks.	95.03	4978.68	18.93	1473.74	17.77	70.38	3.87	18.93	0.89	1235.13	M
Ort.	26.31	1753.98	8.87	237.38	6.8	14.45	1.57	8.87	0.35	103.62	M

Çizelgede, katmanların elektriksel akı iletme yeteneğini gösteren boyuna iletim değerleri dikkate alındığında yüksek boyuna iletim, ortamın hidrojeolojik olarak daha geçirgen ve su taşıma kapasitesinin yüksek olduğuna işaret eder. Bu açıdan, görece düşük ΣS değerleri, DES 10: 6.12 ve DES 19: 9.40 gibi, düşük geçirgenlikli ve su taşıma kapasitesi az olan formasyonları ifade eder. Bu bölgelerde, genellikle yer altı suyu akışını sınırlayan, sert kayaçlar veya geçirimsiz tabakalar olabilir. Yüksek ΣS değerleri, DES 8: 95.03 ve DES 6: 45.36 gibi, daha geçirgen akiferler ve su taşıyan tabakaların varlığına işaret eder. Bu katmanlar suyun daha hızlı hareket etmesine izin veren gevşek tabakalara sahip olabilir.

Enine direnç, katmanların elektriksel iletkenliğini ölçerken, özellikle yanal yöndeki özellikleri değerlendirir. Enine direnç, yer altı suyu taşıyan katmanların yönsel elektriksel iletkenliğini anlamamıza yardımcı olur. Görece düşük ΣT değerleri, DES 2: 38.34, DES 9: 814.59 gibi, yer altı suyu taşıyan katmanların yatay yönde daha az geçirgen olduğunu, yani daha sıkı veya yoğun yapıların varlığını gösterir. Bu tür katmanlar, yer altı suyu hareketini sınırlayan kil gibi jeolojik birimlerle ilişkili olabilir. Yüksek ΣT değerleri, DES 13: 4978.68 ve DES 6: 1646.74 gibi, suyun yatay yönde

daha iyi taşındığı, gevşek, kumlu veya çakıllı tabakaların varlığını gösterir. Bu tür katmanlar, iyi verimli akiferleri işaret edebilir.

Eşdeğer özdirenç, ortamın genel elektriksel iletkenliğini temsil eder. Bu parametre, hidrojeolojik olarak su taşıyan katmanlar ve geçirimsiz katmanlar arasındaki farkları gösterir. Düşük ρ_e değerleri, DES 2: 0.92 ve DES 19: 9.31 gibi, genellikle su taşıyan geçirgen ve nemli formasyonları ifade eder. Bu, özellikle akiferlerin su taşıma kapasitesinin yüksek olduğunu gösterir. Görece yüksek ρ_e değerleri, DES 13: 18.93, DES 10: 18.17 gibi, su taşımayan veya çok düşük su taşıma kapasitesine sahip formasyonları işaret eder. Bu tür katmanlar, kuru, sert veya geçirimsiz tabakalar olabilir.

Eşdeğer kalınlık, bir katmanın etkin kalınlığını temsil eder ve elektriksel iletkenliğini etkileyen fiziksel parametrelerle ilişkilidir. Düşük h_e değerleri, DES 14: 15.64 ve DES 19: 87.52 gibi, yer altı suyu taşıyan katmanların kalınlığının az olduğunu, suyun sınırlı hareket edebileceğini ve katmanın geçirgenliğinin düşük olduğunu işaret eder. Yüksek h_e değerleri, DES 8: 1473.74 ve DES 6: 273.32 gibi, su taşıyan çok kalın akiferlerin varlığını gösterir. Bu durum, akiferin geniş ve derin olduğu, yer altı suyu temini için uygun bir bölge olduğunu gösterir.

Boyuna özdirenç, elektriksel iletkenliğin düşey yöndeki özelliğini ölçer. Bu parametre, yer altı suyu akışının yönsel özelliklerini belirlemede kullanılır. Düşük ρ_l değerleri, DES 2: 0.55 ve DES 1: 2.43 gibi, suyun kolayca hareket ettiği geçirgen katmanları gösterir. Bu tür katmanlar, akiferlerin verimli olduğu yerlerde bulunabilir. Yüksek ρ_l değerleri, DES 13: 17.77 ve DES 12: 14.65 gibi, suyun düşey yönde zor hareket ettiği ve geçirimsizliği düşük olan veya mineralize tabakalara işaret eder.

Enine özdirenç, elektriksel iletkenliğin yanal yöndeki özelliklerini gösterir. Enine özdirenç, yanal yöndeki su taşıma kapasitesini anlamamıza yardımcı olur. Düşük ρ_t değerleri, DES 2: 1.54 ve DES 19: 10.03 gibi, yer altı suyu taşıyan ve geçirgen olan tabakaların varlığını gösterir. Bu katmanlar, suyun yanal yönde kolayca hareket etmesine imkan verir. Yüksek ρ_t değerleri, DES 10: 70.38 ve DES 13: 20.15 gibi, yatnal yönde geçirimsiz veya daha az geçirgen formasyonların bulunduğunu gösterir.

Anizotropi katsayısı, bir katmanın elektriksel iletkenliğinin farklı yönlerdeki farklarını gösterir. Yüksek λ değeri, katmanın elektriksel özelliklerinin yönsel olarak farklılık gösterdiğini işaret eder. Düşük λ değerleri, DES 1: 1.01 ve DES 2: 1.01 gibi, daha homojen katmanları ve suyun serbestçe hareket edebileceği geçirgen formasyonları işaret eder. Yüksek λ değerleri, DES 10: 3.87 ve DES 13: 3.08 gibi elektriksel iletkenliğin belirli yönlerde daha belirgin farklar gösterdiğini ve yer altı suyu akışının yanal ve düşey yönlerde farklı hızlarda gerçekleşebileceğini gösterir.

Etkin formasyon öz direnci, yer altı suyu taşıyan katmanların etkin elektriksel iletkenliğini gösterir. Bu parametre, yer altı suyu akışının hidrojeolojik verimliliğini belirlemede önemli bir rol oynar. Düşük ρ_m değerleri, DES 2: 0.92 ve DES 19: 9.30 gibi, su taşıyan geçirgen katmanların varlığını işaret eder. Yüksek ρ_m değerleri, DES 13: 18.93 ve DES 10: 18.17 gibi, su taşıma kapasitesinin düşük olduğu, mineralize olmuş veya sert tabakalar ile ilişkili olabilir.

Yansıma katsayısı, farklı elektriksel iletkenliklere sahip katmanlar arasındaki farkları ölçer. Bu, katmanlar arasında suyun hareketiyle ilgili önemli bilgiler sunar. Negatif RC_f değerleri, DES 1: -0.54 ve DES 9: -0.20 gibi, yer altı suyu taşıyan tabakaların daha düşük geçirgenlik gösterdiğini veya katmanlar arasında su hareketini sınırlayan geçirimsiz tabakaların bulunduğunu işaret eder. Bu durum, suyun akışını engelleyen tabakaların varlığına işaret eder ve yer altı suyu rezervuarının sınırlı olabileceği anlamına gelir. Pozitif RC_f değerleri, DES 13: 0.89 ve DES 8: 0.39 gibi, yer altı suyu taşıyan katmanlar arasında geçirgenlik farklarının belirgin olduğunu ve suyun bu katmanlar arasında rahatça hareket edebileceğini gösterir. Bu durum, özellikle akiferlerin verimli olduğu ve yer altı suyu hareketinin hızlı olabileceği alanları işaret eder.

Özdirenç kontrastı FC , katmanlar arasındaki elektriksel iletkenlik farkını ifade eder ve bu fark, hidrojeolojik analizlerde katmanların geçirgenlik ve geçirimsizlik özelliklerinin ne kadar farklı olduğunu anlamamıza yardımcı olur. Özdirenç kontrastı, katmanlar arasında suyun geçiş kapasitesini ve akış hızını belirlemede önemli bir parametre olarak kullanılır. Düşük FC değerleri, DES 1: -0.54 ve DES 9: -0.20 gibi, katmanlar arasında geçirgenlik farkının çok belirgin olmadığını gösterir. Bu durum, yer altı suyu taşıyan katmanların birbirine benzer elektriksel iletkenlik değerlerine

sahip olduğu ve suyun bu katmanlar arasında sınırlı hareket ettiği anlamına gelir. Bu, yer altı suyu akışının daha homojen olduğu veya geçirimsiz tabakaların çok belirgin olmadığı bir durumu ifade edebilir. Yüksek *FC* değerleri, DES 2: 1235.13 ve DES 12: 27.25 gibi, katmanlar arasında büyük elektriksel iletkenlik farkları olduğunu gösterir. Bu, yer altı suyu taşıyan geçirgen katmanlar ile geçirimsiz katmanlar arasındaki geçişin çok belirgin olduğunu ve yer altı suyu akışının bu katmanlar arasında kesildiğini işaret eder. Bu tür katmanlar, özellikle su taşıyan akiferlerin çevresindeki sert ya da geçiş tabakalarıyla ilişkili olabilir.

Eşdeğer özdirenç, katmanların genel elektriksel iletkenliğini gösterdiği için su içeriği, mineralizasyon ve geçirgenlik hakkında ipuçları verir. Batıdan doğuya doğru özdirenç değerleri dalgalı bir şekilde değişmekte; özellikle DES 2 (0.92) gibi düşük değerler, batıda yer alan katmanların daha geçirgen ve su içeriği yüksek olabileceğini düşündürürken, DES 13 (18.93) gibi yüksek değerler, doğuya doğru daha az geçirgen, su taşıma kapasitesi düşük katmanların varlığını işaret eder. Batıda daha geçirgen ve su taşıyan tabakalar (düşük özdirenç), doğuya gidildikçe suyun sıkıştığı veya daha az geçirgen olan katmanlar (yüksek özdirenç) bulunabilir. Bu, batıda daha iyi su taşıma kapasitesine sahip akiferlerin, doğuda ise daha sert veya geçirimsiz tabakalarla sınırlanmış akiferlerin olduğunu gösterebilir.

Anizotropi katsayısının batıdan doğuya doğru arttığı gözlemlenmiştir, (özellikle DES 10: 3.87 gibi. Bu, doğuya doğru katmanlar arasında elektriksel iletkenlik farklarının daha belirgin olduğunu ve yer altı suyu akışının daha heterojen hale geldiğini gösterir. Batıda ise daha homojen bir yapı mevcut olabilir, bu da suyun daha rahat hareket etmesine olanak tanır. Doğuda yer altı suyu hareketinin daha sınırlı ve yönlü olduğu, katmanların farklı geçirgenlik özelliklerine sahip olduğu ve suyun yanal ve düşey yönlerde farklı hızlarda hareket edebileceği anlamına gelir.

Yansıma katsayısının batıda negatif değerleri (DES 1: -0.54) ile karşılaşılmakta, bu da geçirimsiz veya düşük geçirgenliğe sahip tabakaların varlığını işaret eder. Bu tabakalar, suyun hareketini kısıtlayabilir. Doğuya doğru ise pozitif değerler, DES 13: 0.89 gibi, artmakta, bu da katmanlar arasındaki elektriksel iletkenlik farklarının belirginleştiğini ve suyun bu katmanlar arasında daha hızlı hareket ettiğini düşündürmektedir. Batıdaki negatif değerler, batıdaki katmanların geçirimsiz ya da

düşük geçirgenli olabileceğini ve bu katmanlar arasında suyun hareketinin sınırlı olduğunu gösterir. Doğuda ise pozitif değerler bulunması, suyun hareketinin daha aktif ve katmanlar arasında geçirgenliğin daha yüksek olduğunu düşündürür.

Özdirenç kontrastı batıda düşük değerler alırken, doğuda bu fark büyük ölçüde artmaktadır (DES 2: 1235.13). Bu, batıda katmanlar arasında çok büyük bir elektriksel iletkenlik farkı olmadığını, dolayısıyla suyun geçişinin daha homojen ve sürekli olduğunu gösterir. Ancak doğuya doğru, özdirenç kontrastının artması, yer altı suyu taşıyan katmanlar ile geçirimsiz tabakalar arasındaki farkların daha belirgin hale geldiğini ve suyun bu farklı katmanlar arasında kesintili hareket ettiğini işaret eder.

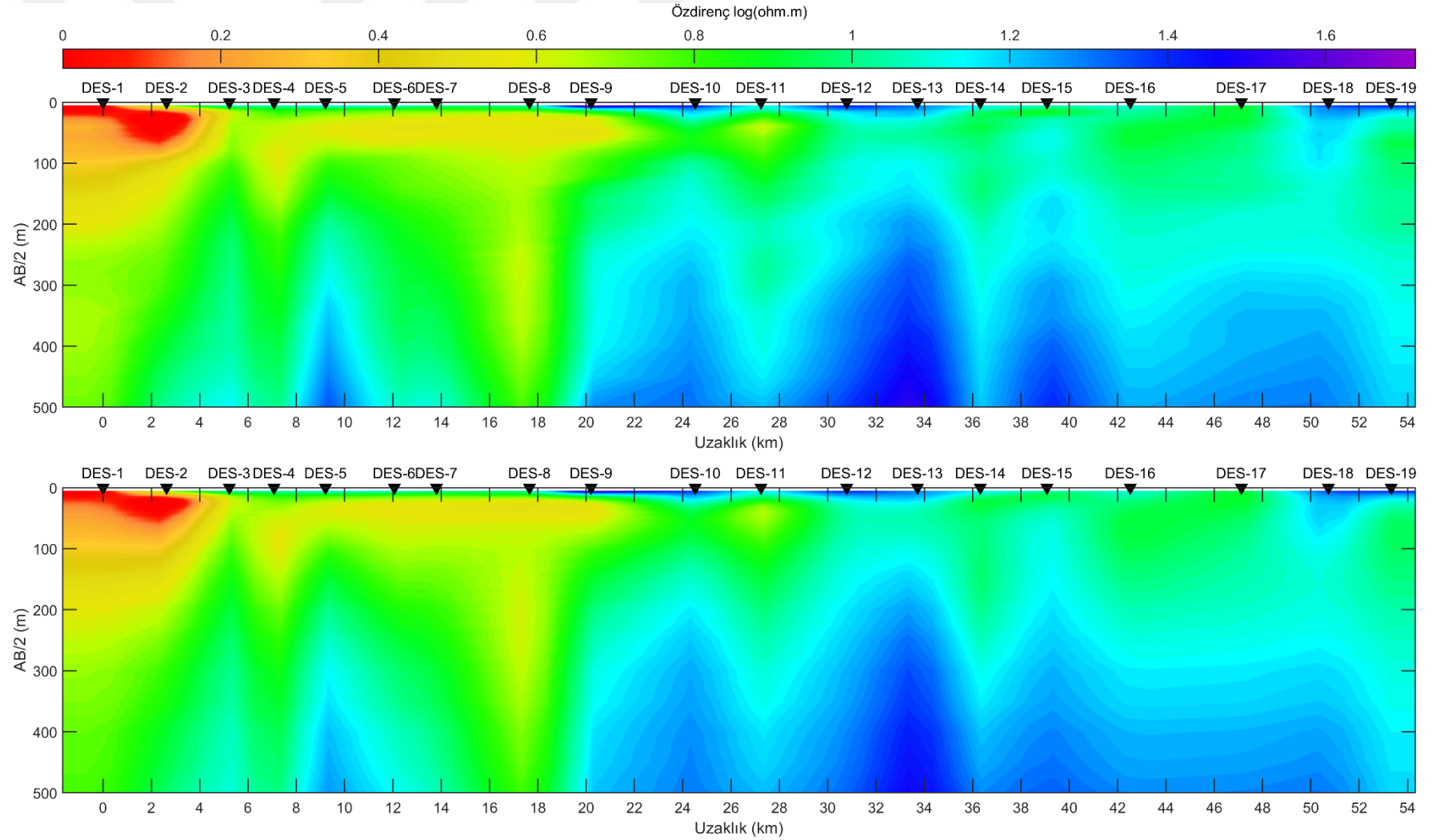
Etkin formasyon özdirencinin batıdaki düşük değerleri, bu bölgede yer altı suyu taşıyan katmanların daha geçirgen ve su içeriği yüksek olduğunu gösterir. Doğuda ise yüksek değerleri, su taşıma kapasitesinin düşük olduğu katmanları işaret eder. Bu da su içeriği ve geçirgenlik açısından batıdan doğuya doğru azalan bir eğilim olduğunu düşündürür.

Genel olarak GB-KD yönünde tüm bu bulgular yorumlandığında geçirgenlik ve su taşıma kapasitesi için batıdan doğuya doğru geçirgenlik azalmakta, dolayısıyla suyun hareketi de sınırlanmakta denilebilir. Batıdaki katmanlar, su taşıma kapasitesine sahip geçirgen akiferleri işaret ederken, doğuda daha sert ve geçirimsiz katmanların varlığı hidrojeolojik verimliliği düşürmektedir. Tuzluluk ve mineralizasyon açısından eşdeğer özdirenç ve etkin formasyon özdirenci değerlerinin artması, doğuda daha fazla mineralize olmuş veya tuzlu su içeren katmanların varlığına işaret edebilir. Ayrıca, batıda daha homojen bir hidrojeolojik yapının hakim olması, yer altı suyu akışının daha serbest ve sürekli olduğunu, doğuda ise heterojen yapıların yer alması su hareketinin daha sınırlı ve kesintili olduğunu gösterir. Özetle, Söke Alt Havzasındaki GB-KD doğrultusunda elde edilen jeofizik parametreler, batıdan doğuya doğru hidrojeolojik koşulların farklılaştığını göstermektedir. Batıdaki akiferler daha geçirgen, su taşıma kapasitesi yüksek ve su içeriği fazla iken, doğuya doğru daha sıkışmış, geçirimsiz ve mineralize olmuş katmanlar ortaya çıkmaktadır. Bu da hidrojeolojik verimliliğin doğuda azaldığını ve su taşıma kapasitesinin sınırlandığını düşündürmektedir.

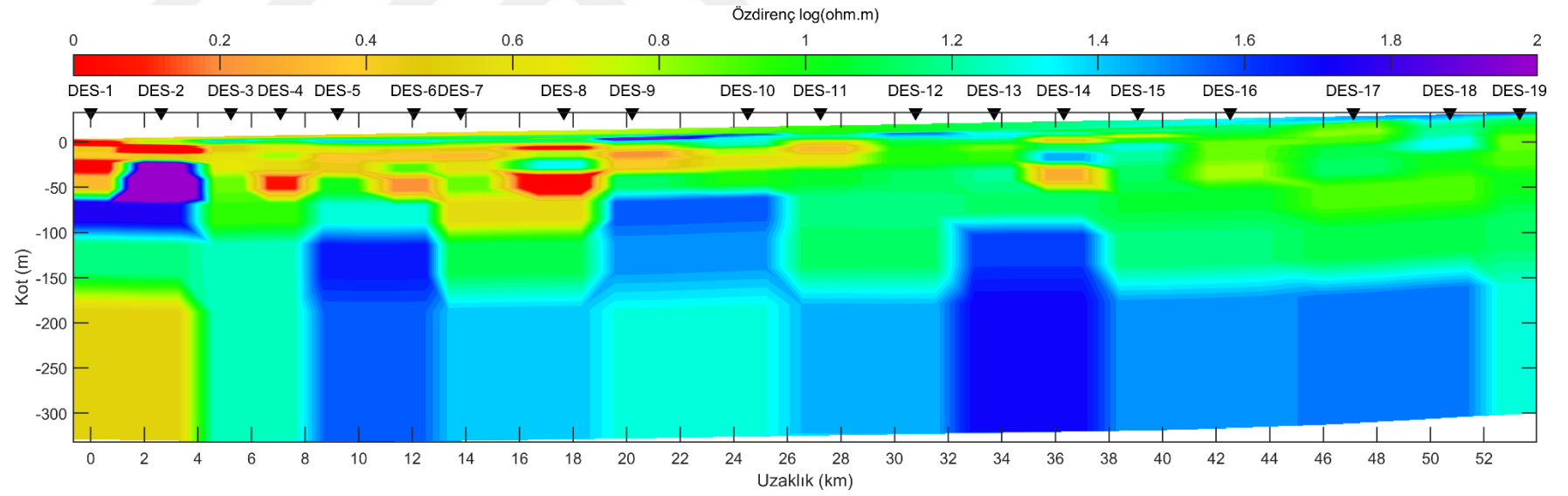
KKD değerleri dikkate alındığında, KKD'nin yüksek ya da düşük olması, akiferlerin hidrojeolojik yapılarını ve bu yapıların yer altı suyu kirlenmesine karşı ne kadar koruyucu olduğunu belirler. Bu durumu daha iyi analiz edebilmek için, KKD değerlerinin yer aldığı DES noktalarını göz önünde bulundurarak, bölgedeki genel su kalitesi ve kirlenmeye karşı koruma hakkında yorum yapılabilir. KKD'nin "Mükemmel" olarak derecelendirildiği noktalar genellikle yüksek koruma kapasitesine sahip ve suyu dış etkenlerden (özellikle kirleticilerden) iyi koruyabilen tabakalara işaret eder. Bu katmanların yer altı suyu koruyucu özellikleri güçlüdür. Bu tabakalar, kil gibi su geçirmez veya düşük geçirgenlikli olabilir. Kirlenmeye karşı yüksek direnç gösterirler ve suyu dış etkenlerden iyi korurlar. Çok İyi (Çİ) olarak derecelendirilen noktalar koruma kapasitesinin yine yüksek, ancak "Mükemmel" kadar güçlü olmadığı alanlardır. Bu katmanlar, koruyuculuk açısından çok iyi olmakla birlikte, dış etkenlere karşı bazen daha hassas olabilirler. Geçirgenlik seviyesi çok yüksek olmasa da, suyun geçişini engelleyen katmanlar daha güçlü değildir. Kirlenmeye karşı direnç oldukça yüksektir, ancak bazı dış kirleticiler bu tabakalarda daha kolay geçiş yapabilir. Örneğin, DES 10'daki Çİ değeri, bölgedeki su koruma kapasitesinin çok iyi olduğunu ancak tam olarak mükemmel seviyede olmadığını gösterir. Özetle, KKD'nin yüksek olduğu noktalar (özellikle "Mükemmel") bölgesinde, su koruma yönetimi açısından daha az müdahale gereklidir çünkü bu alanlar, kirlenmeye karşı daha dirençlidir. Çok İyi (Çİ) değerleri, daha dikkatli izleme ve koruma gerektirebilir çünkü bu tür katmanlar, suyun dış etkenlerden gelen kirleticilerden korunmasında mükemmel seviyede olmayabilir.

6.2. 2B Ters Çözüm Sonuçları

Söke Alt Havzasında gerçekleştirilen DAÖ DES çalışmasında toplanan veri kümelerinin 1B ters çözümlerinin ardından 2B ters çözümleri de gerçekleştirilmiştir. 2B ters çözümde kullanılan ve alan çalışmasında her bir DES noktasından elde edilen görünür öz direnç değerlerinin oluşturduğu kesit Şekil 6.3'ün üst panelinde sunulmuştur. Alt panelde görülen kesit ise bu veri kümelerinin 2B ters çözümünden hesaplanan görünür öz dirençlerin bir dağılımını göstermektedir. Bu dağılım, yeraltı yapısını yaklaşık olarak 0.7-50 ohm.m arasında değişen görünür öz direnç değerleri ile temsil etmektedir. DES verilerinin 2B ters çözümünden elde edilen yeraltı öz direnç dağılımı ise Şekil 6.4'te gösterilmiştir.

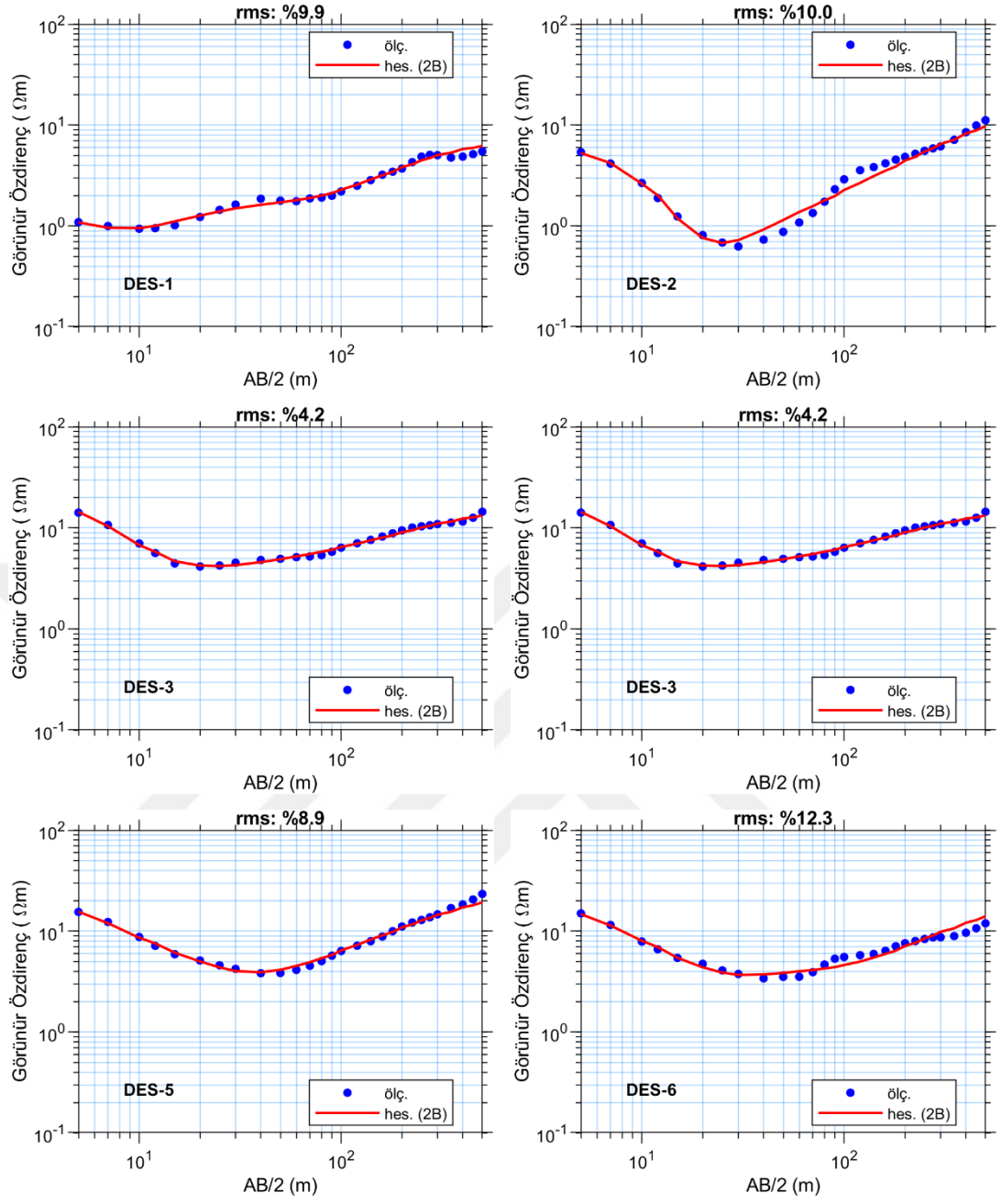


Şekil 6.3. AB/2 değerlerine karşılık gelen ve alan çalışmasından tüm DES noktaları için elde edilen görünür öz dirençlerin yeraltı dağılımı (üstte) ve 2B ters çözümünden elde edilen görünür öz dirençlerin yeraltı dağılımı (altta)

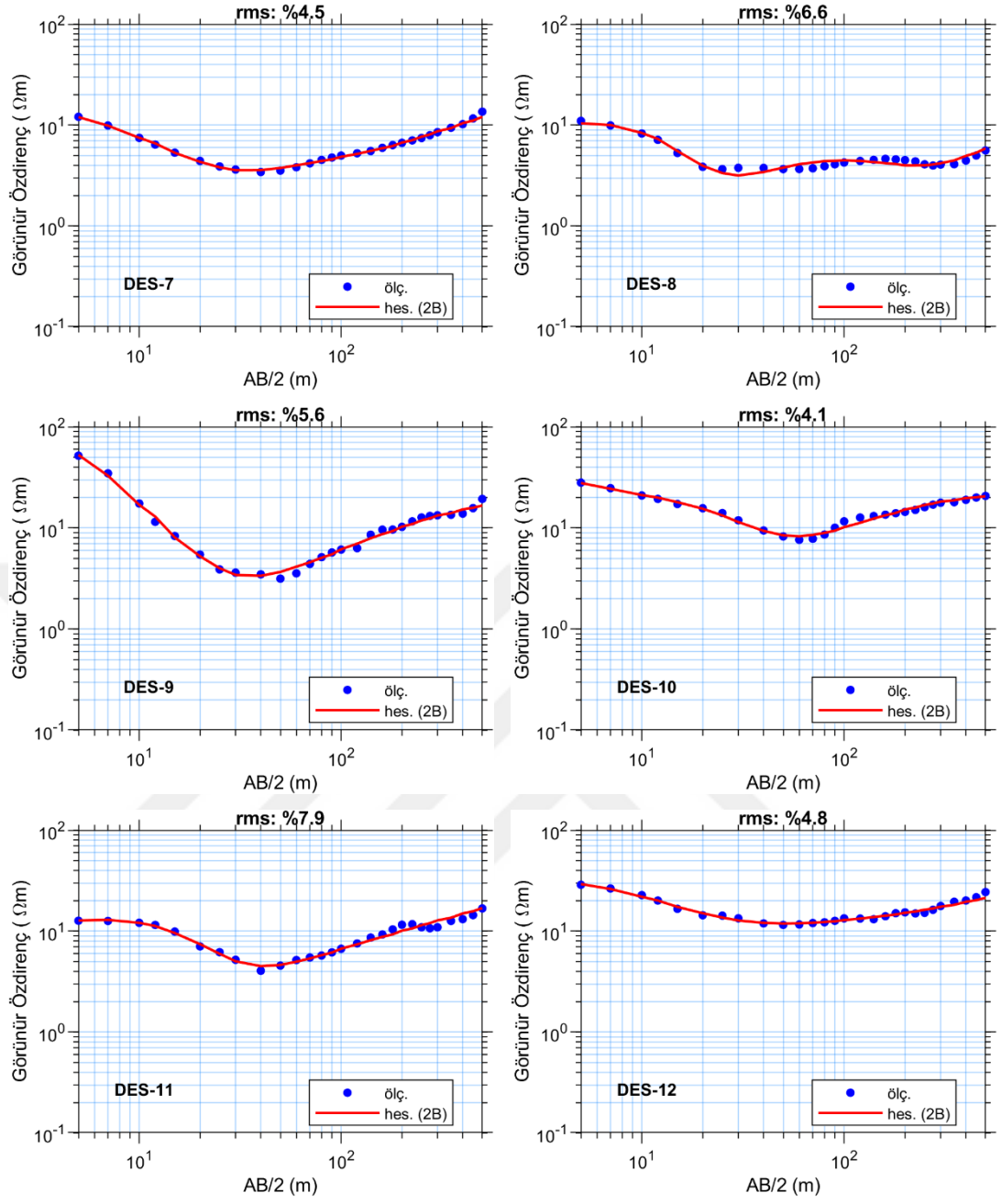


Şekil 6.4. DES verilerinin 2B ters çözümünden elde edilen yeraltı özdirenç dağılımı

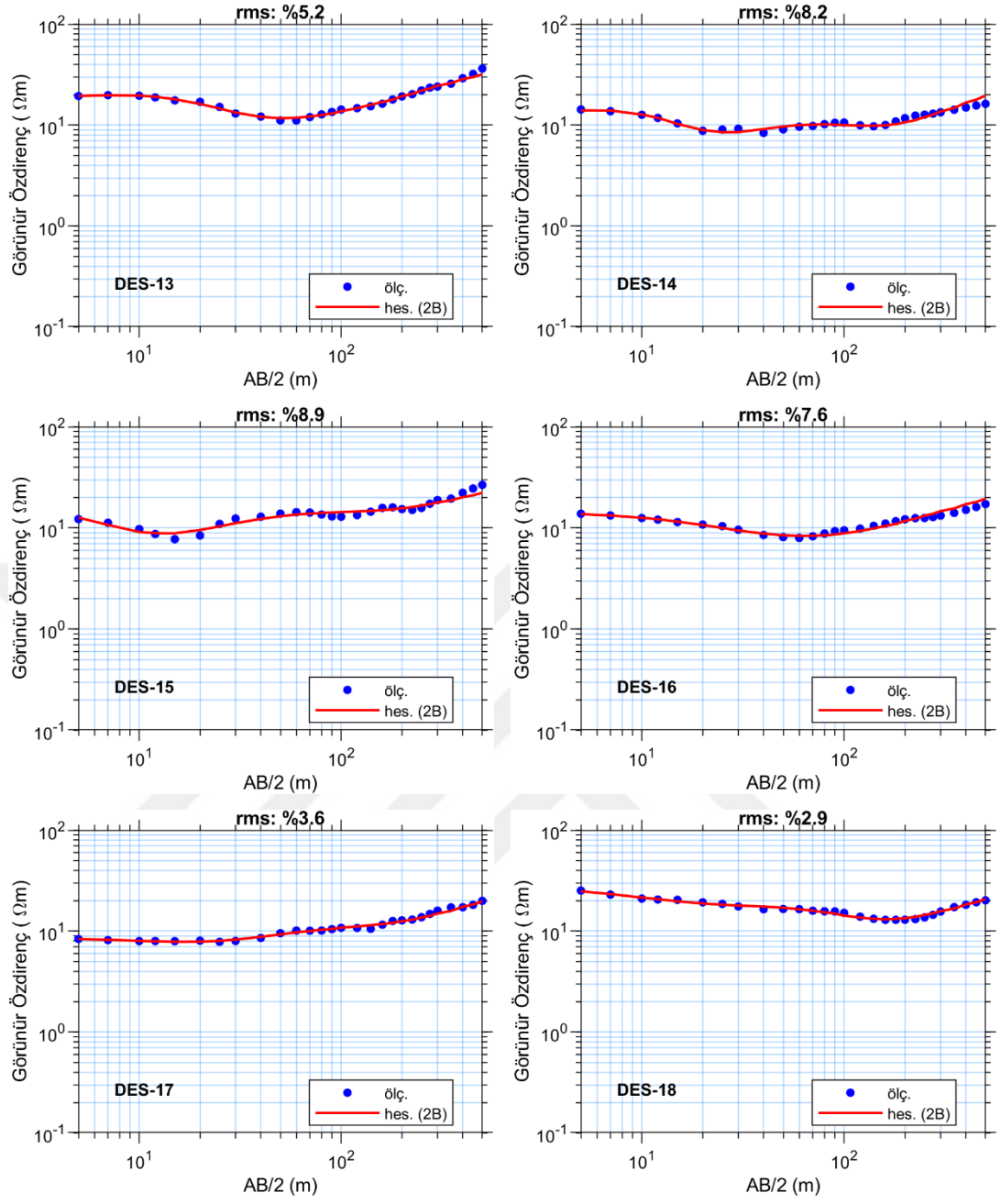
Şekil 6.4'te sunulan yeraltı öz direnç dağılımı 2B ters çözümden 10 yineleme sonunda elde edilmiştir. Bu modelleme, yeraltındaki farklı litolojik birimlerin öz direnç değerlerinin görsel bir temsilini sunarak, alandaki jeolojik yapının daha iyi anlaşılmasına olanak sağlamaktadır. Araştırma alanı, DES-2 noktasındaki lokal görece yüksek öz direnç değerli birim, $>2 \log(\text{ohm.m})$, dikkate alınmadığında aslında görece düşük öz direnç değerlerine sahip bir dağılım göstermektedir. Yukarıda açıklandığı üzere çalışma alanının geçmiş dönemlerde deniz altında olmasından dolayı tuz içeriğinin yüksek olması ve ortamın genel jeolojik biriminin kil içerikli malzemeden oluşması nedeniyle bu öngörülebilir bir sonuçtur. Kesitte ayrıca DES noktaları 1-11 arasında düşey yönde yaklaşık 50 m derinlik seviyesinden yatay yönde yaklaşık 30 km uzaklığa kadar gözlemlenen görece düşük öz dirençli ($<0.7 \log(\text{ohm.m})$) uzanım Şekil 6.2'de sunulan 1B yeraltı modeliyle de uyumludur. DES-5 ve DES-15 arasında yaklaşık yatay yönde 8 ve 38. km'ler arasında 30 km uzunluğundaki alanda öz direnç değerlerinin ani yükselmesi ve düşmesinden kaynaklı ondülasyonlu yanal yönde bir yapı değişimi gözlemlenmektedir. DAÖ DES uygulamasında maksimum AB/2 değeri olan 500 m uzaklığı dikkate alındığında gerçekleştirilen çalışmada elektrik temel seviyeye ulaşılmamıştır. Bu da alüvyonun kalınlığının burada daha fazla olduğunun göstermektedir. İzleyen dört şekil, Şekiller 6.5, 6.6, 6.7 ve 6.8, DAÖ çalışmasında elde edilen görünür öz direnç değerleri ile DES noktaları için 2B ters çözümünden elde edilen sonuçların bir karşılaştırmasını göstermektedir. Aralarındaki görece iyi uyum kullanılan algoritmanın ürettiği yeraltı modelinin güvenilirliğinin bir göstergesidir. Ancak, yukarıda da açıklandığı üzere, DES noktaları arasındaki mesafenin DES uygulamasındaki serimde görece fazla olması daha detaylı ve güvenilir bir yorumun, özellikle yanal yöndeki öz direnç değişimleri için, gerçekleştirilmesini engellemiştir.



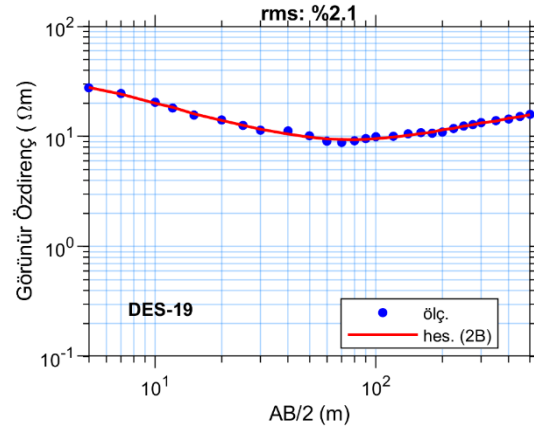
Şekil 6.5. DAÖ çalışmasında elde edilen görünür öz direnç değerleri ile DES noktaları 1-6 için 2B ters çözümünden elde edilen sonuçların karşılaştırılması



Şekil 6.6. DAÖ çalışmasında elde edilen görünür öz direnç değerleri ile DES noktaları 7-12 için 2B ters çözümünden elde edilen sonuçların karşılaştırılması



Şekil 6.7. DAÖ çalışmasında elde edilen görünür öz direnç değerleri ile DES noktaları 13-18 için 2B ters çözümünden elde edilen sonuçların karşılaştırılması



Şekil 6.8. DAÖ çalışmasında elde edilen görünür öz direnç değerleri ile DES-19 için 2B ters çözümünden elde edilen sonuçların karşılaştırılması

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında, Söke Alt Havzasının sığ yer elektrik yapısı DAÖ yöntemiyle araştırılmıştır. Alan çalışması DSİ tarafından gerçekleştirilmiştir. Uygulama, 10 ölçüm profili üzerinde Schlumberger elektrot dizilimi kullanılarak DES tekniği ile gerçekleştirilmiştir. Toplanan görünür özdirenç verileri, 1B ve 2B ters çözüm teknikleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Genel olarak bu kapsamda; Söke Alt Havzası'nın sığ yerelektrik yapısının belirlenmesi ve 1B ters çözümden elde edilen parametreler ile de araştırılan alanın hidrojeolojik özelliklerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda elde edilen bulgular tartışılmıştır.

DES uygulamasından elde edilen görünür özdirenç verilerinin 1B ters çözümü, Söke Alt Havzasının araştırılan alanlarında görece sığ yeraltının genel olarak görece düşük özdirenç dağılımına sahip olduğunu göstermiştir. Bu kapsamda, havzanın deniz suyundan uzak kuzeydoğu kesimlerinde, özdirenci yaklaşık 10 ohm.m civarında olan, oldukça düşük dirençli bölgeler bulunmaktadır. Son yıllarda gerçekleştirilen sondajlar, bu bölgelerin bataklık çamuru (organik içerikli mavimsi gri kil) ile oluştuğunu ortaya koymuştur. Özdirenç kesitinin bu bölümlerinde ve görece derin seviyelerde gözlemlenen özdirenç düşüşlerinin termal kaynaklardan mı yoksa yer altı su hareketlerinden veya litolojik değişikliklerden mi kaynaklandığı üzerine ek çalışmalar yapılmalıdır.

Havzanın güneybatısında konumlanan DES ölçüm noktalarında uygulanan açılım uzaklığı ($AB/2 = 500$ m) ile elde edilen ters çözüm, kuzeydoğuya kıyasla daha sığ derinliklerde çözümleme yapıldığını göstermektedir. Bu durum, makro düzeyde, havzanın alüvyon kalınlığının doğudan batıya doğru artmakta olduğunu işaret etmektedir. Bu bölgede, özdirenç kesitinin ilk 25-30 km mesafelerinde, yaklaşık 30-50 m derinliklerde çok düşük özdirençli bir zon belirlenmiştir. Bu zon, bölgenin Arkaik dönemde deniz altında bulunmuş olması ve zamanla denizin çekilerek günümüz kıyı sınırlarını oluşturduğu süreçte deniz suyu baskısı altında kalmasından kaynaklanan, tuz içeriği yüksek bozuşmuş bir alanı temsil etmektedir. Ayrıca, bu zon içerisinde şist ve gnays oluşumlarına yakın alanlarda özdirencin görece düşük olduğu bölgelerde açılmış sondaj kuyularında suyun kokulu olduğu belirtilmiş ve bu durum,

söz konusu düşük öz dirençli alanlarda su kalitesinin olumsuz yönde etkileyebileceğini göstermektedir.

DES verilerinin 2B ters çözümünden elde edilen yeraltı modeli, görece sığ bölgelerde düşük öz direnç dağılımı gösteren bir yapıyı ortaya koymuştur. Bu bağlamda, 2B sonuçlar, 1B sonuçlarla uyumlu bir şekilde değerlendirilmiştir. Benzer şekilde, yukarıda açıklanan bozuşmuş zon, 2B kesitte de belirlenmiştir. Kesitte, DES-5 ve DES-15 ölçüm noktaları arasında, yaklaşık 8 km ile 38 km mesafelerinde yer alan 30 km uzunluğundaki alanda öz direnç değerlerinde ani yükselmeler ve düşüşler gözlemlenmekte olup, bu durum alanda genel olarak yanal yönde ondülasyonlu bir öz direnç değişimi olduğunu göstermektedir. DES ölçüm noktaları arasındaki mesafenin toplam açılım değerine kıyasla görece fazla olması nedeniyle, 2B sonuçların daha kapsamlı bir şekilde yorumlanması kısıtlanmıştır. Ancak, DES verilerinin 2B ters çözümünden hesaplanan ve alan ölçümlerinden elde edilen görünür öz direnç eğrileri arasında oldukça yüksek bir uyum gözlemlenmiştir.

Söke Alt Havzası'nda gerçekleştirilen DAÖ DES çalışmasında toplanan veri kümelerinin 1B ters çözümünden elde edilen katman parametreleri kullanılarak Dar-Zarrouk parametreleri (S ve T), yansıma katsayısı (RC) ve öz direnç kontrastı (FC) her bir belirlenen katman için hesaplanmıştır. Ayrıca, eşdeğer (ρ_e) öz direnç ve kalınlıklar, (ρ_e , h_e), boyuna ve enine öz dirençler (ρ_l ve ρ_t), anizotropi katsayısı (λ), etkin formasyon öz direnci (ρ_m) ve yansıma katsayısı (RC_f), öz direnç kontrastı (FC) ve koruyucu kapasite derecelendirmesi (KKD) gibi yeraltı formasyonlarının fiziksel özelliklerini anlamak ve yeraltı yapılarını modellemek için oldukça önemli olan diğer parametreler de hesaplanmıştır.

Elektriksel iletkenliğin bir ölçüsü olan ve kayaçların elektriksel iletkenliğini temsil eden boyuna iletim parametresi (ΣS) tüm DES ölçümleri dikkate alındığında 6.12 ve 95.03 mho arasında değişmektedir. Ortalama değer 26.31'dir. Bu değer, havzadaki farklı derinliklerdeki kayaçların elektriksel iletkenlik özelliklerinde ciddi farklılıklar olduğunu göstermektedir. Yüksek boyuna iletim değerleri, genellikle su içeriği fazla veya yüksek iletkenliğe sahip minerallerin varlığını gösterir. En yüksek değer 95.03 (DES-8), büyük olasılıkla daha geçirgen ve iletken formasyonları, örneğin yer altı suyu barındıran alanları işaret etmektedir.

Elektrik akımının kayaçlar boyunca hareket etmesini engelleyen bir direnç türü olan enine direnç (ΣT) değerleri, 38.34 ile 4978.68 ohm.m² arasında değişiyor ve ortalama değer 1753.98 ohm.m² olarak hesaplanmıştır. Bu parametre, alt havzadaki kayaçların elektriksel direncini ve dolayısıyla yer altı yapılarını anlamada önemli bir rol oynamaktadır. Enine direnç yüksekliği (DES-8 gibi), kayaçların elektriksel iletkenliğinin azaldığını ve dolayısıyla su içeriklerinin düşük olduğu formasyonların varlığını göstermektedir.

Eşdeğer öz direnç (ρ_e), formasyonların genel elektriksel özelliklerinin bir ölçüsüdür. Tüm DES noktaları için elde edilen göre ρ_e değerleri 0.92 ohm ile 18.93 ohm arasında değişmektedir. Ortalama değer 8.87 ohm'dur. Bu parametre, havzadan elde edilen verilerin, genellikle heterojen bir yeraltı yapısına işaret ettiğini göstermektedir. Düşük eşdeğer öz direnç değerleri (DES-2 gibi) geçirgen ve nemli formasyonları, yüksek değerler (DES-13 gibi) ise daha kuru ve az geçirgen formasyonları işaret eder.

Eşdeğer kalınlık (h_e), yer altı formasyonlarının kalınlık özelliklerini belirler ve yer altında su barındıran katmanların kalınlıklarını anlamak için kritik öneme sahiptir. Değerler 15.64 m ile 1473.74 m arasında değişmekte olup ortalama değer 237.38 m'dir. Bu büyük fark, havzadaki kayaçların oldukça değişken kalınlıklara sahip olduğunu ve belirli bölgelerde (DES-7 ve DES-12 gibi) daha kalın formasyonların bulunduğunu gösterir.

Boyuna öz direnç (ρ_l), formasyonun elektriksel direnç özelliklerini bir yönde ölçer ve kayaçların düşey yönde elektriksel dirençlerinin varlığını gösterir. ρ_l değerleri 0.55 ohm ile 17.77 ohm arasında belirlenmiştir. Ortalama değeri 6.8 ohm olarak hesaplanmıştır. Düşük değerler (DES-2 gibi), su içeriği fazla ve geçirgen formasyonları gösterirken, yüksek değerler (DES-13 gibi) kuru ve düşük geçirgen formasyonları göstermektedir.

Enine öz direnç (ρ_t), kayaçların yatay yönde elektriksel direnç özelliklerini ölçer ve yer altı formasyonlarının yatay yöndeki elektriksel dirençlerinin varlığını gösterir. DES'lerde, ρ_t değerleri 1.54 ohm ile 70.38 ohm arasında değişmekte ve ortalama 14.45 ohm değer göstermektedir. Yüksek enine öz direnç değerleri (DES-10 gibi), kayaçların daha az geçirgen ve daha kuru olduğunu göstermektedir.

Anizotropi katsayısı (λ), yer altı formasyonlarının elektriksel özelliklerinin yönsel farklarını belirler ve bu çalışmada λ değeri, 1.01 ile 3.87 arasında belirlenmiştir. Ortalama değeri 1.57'dir. Bu değerler, kayaçların elektriksel özelliklerinde belirgin bir yönsel fark olduğunu, yani kayaçların her yönde eşit iletkenlik göstermediğini dolayısıyla yer altı yapılarının heterojen ve çok yönlü olabileceğini göstermektedir.

Eşdeğer yansımaya katsayısı (ρ_m), yer altı yapılarının yüzeyden yansıyan elektriksel özelliklerinin bir ölçüsüdür. Bu çalışmada ρ_m değerleri 0.92 ohm ile 18.93 ohm arasında değişmiştir. Ortalama değer 8.87 ohm'dur ve bu bize havzanın büyük kısmında farklı yansımaya koşullarına sahip formasyonların bulunduğunu göstermektedir.

Özdirenç kontrastı (RC_f), farklı kayaçlar arasındaki elektriksel direnç farklarının bir ölçütüdür. Değerler -0.54 ile 0.89 arasında değişmektedir. Ortalama değeri 0.35'tir. Bu parametre, yer altı formasyonları arasında belirgin elektriksel direnç farklarının olduğunu, dolayısıyla heterojen yapıların bulunduğunu ortaya koymaktadır.

Koruyucu kapasite derecelendirmesi (KKD), yer altındaki su taşıyan formasyonların su koruma kapasitesini ölçen bir parametredir ve değerleri 1.68 ile 1235.13 arasında bulunmuştur. “Mükemmel” KKD değerleri, havzanın su taşıma kapasitesinin yüksek olduğunu ve suyun korunması için uygun formasyonların bulunduğunu göstermektedir.

Elde edilen bu parametreler, Söke Alt Havzası'ndaki yer altı formasyonlarının oldukça heterojen olduğunu ve farklı elektriksel özellikler gösterdiğini ortaya koymaktadır. Özellikle, boyuna iletim ve enine direnç gibi parametrelerdeki büyük değişiklikler, yer altındaki su içeriği ve geçirgenlik farklılıklarına işaret etmektedir. Yüksek eşdeğer özdirenç ve düşük boyuna iletim değerleri, yer altındaki kuru ve geçirgen olmayan kayaçlara karşılık gelirken, düşük eşdeğer özdirenç ve yüksek boyuna iletim değerleri su barındıran ve geçirgen formasyonları işaret etmektedir. Yer altı yapılarının heterojenliği, su kaynaklarının korunması ve yönetimi açısından büyük önem taşımaktadır. Özellikle koruyucu kapasite derecelendirmesi ve özdirenç kontrastı

parametreleri, su yönetimi ve yeraltı suyu potansiyelinin değerdendirilmesi için kritik parametrelerdir. Sonuç olarak, bu tür detaylı jeofiziksel analizler, yer altı yapılarının daha doğru bir şekilde haritalanmasına ve su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimi ve korunması için nasıl kullanılacağına dair stratejiler geliştirilmesinde katkı sağlayacaktır.



KAYNAKLAR

- Alabi, A.A., Ganiyu, S.A., Idowu, O.A., Ogabi, A.F., Popoola, O.I., 2021. Investigation of Groundwater Potential using Integrated Geophysical Methods in Moloko-Asipa, Ogun State, Nigeria. *Applied Water Science*, 11(4), 70.
- Alabi, O.O., Ojo, A.O., Akinpelu, D.F., 2016. Geophysical Investigation for Groundwater Potential and Aquifer Protective Capacity around Osun State University (UNIOSUN) College of Health Sciences. *American Journal of Water Resources*, 4(6), 137–143.
- Balkaya, Ç., Göktürkler, G., Erhan, Z., Ekinci, Y.L., 2012. Exploration for a Cave by Magnetic and Electrical Resistivity Surveys: Ayvacık Sinkhole Example, Bozdağ, İzmir (Western Turkey). *Geophysics*, 77(3), B135–B146.
- Balkaya, Ç., Kaya, M.A., Göktürkler, G., 2019. Delineation of Shallow Resistivity Structure in the city of Burdur, SW Turkey by Vertical Electrical Sounding Measurements. *Environmental Geology*, 57, 571–581.
- Bello, R., Balogun, A.O., Nwosu, U.M., 2019. Evaluation of Dar Zarrouk Parameters of Parts of Federal University of Petroleum Resources, Effurun, Nigeria. *Journal of Applied Sciences and Environmental Management*, 23(9), 1709–1715.
- Başokur, A.T., 2004. Düşey Elektrik Sondajı Verilerinin Yorumu. Ankara Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları, 68s. Ankara.
- Başokur, A.T., 2021. Türev Tabanlı Parametre Kestirim Yöntemleri. TMMOB Jeofizik Mühendisleri Odası Eğitim Yayınları No: 22, Ankara.
- DSİ, 2021. DSİ 2021 Yılı Faaliyet Raporu. Erişim Tarihi: 21.11.2024. <https://www.dsi.gov.tr/Sayfa/Detay/759>
- DSİ, 2023. DSİ 2023 Yılı Faaliyet Raporu. Erişim Tarihi: 21.11.2024. <https://www.dsi.gov.tr/Sayfa/Detay/759>
- Candansayar, M.E., Başokur, A.T., 2001. Detecting Small-Scale Targets by the 2D Inversion of Two-Sided Three-Electrode Data: Application to an Archaeological Survey. *Geophysical Prospecting*, 49, 13–25.
- Candansayar, M.E., 2014. Doğru Akım Elektrik Öz direnç Yöntemi ve DAÖ Yönteminde Çok-Elektrotlu Ölçü Sistemi ile Veri Toplama 2B/3B Ters Çözüm Uygulamaları. JFM316 Elektrik Yöntemler Lisans Ders Notu, Ankara.
- Dora, O.Ö., Kun, N., Candan, O., 1992. Türkiye Jeoloji Bülteni, 35(C), 1–14.
- El-Qady, G., Sakamoto, C., Ushijima, K., 1999. 2-D Inversion of VES Data in Saqqara Archaeological Area, Egypt. *Earth Planets Space*, 51, 1091–1098.

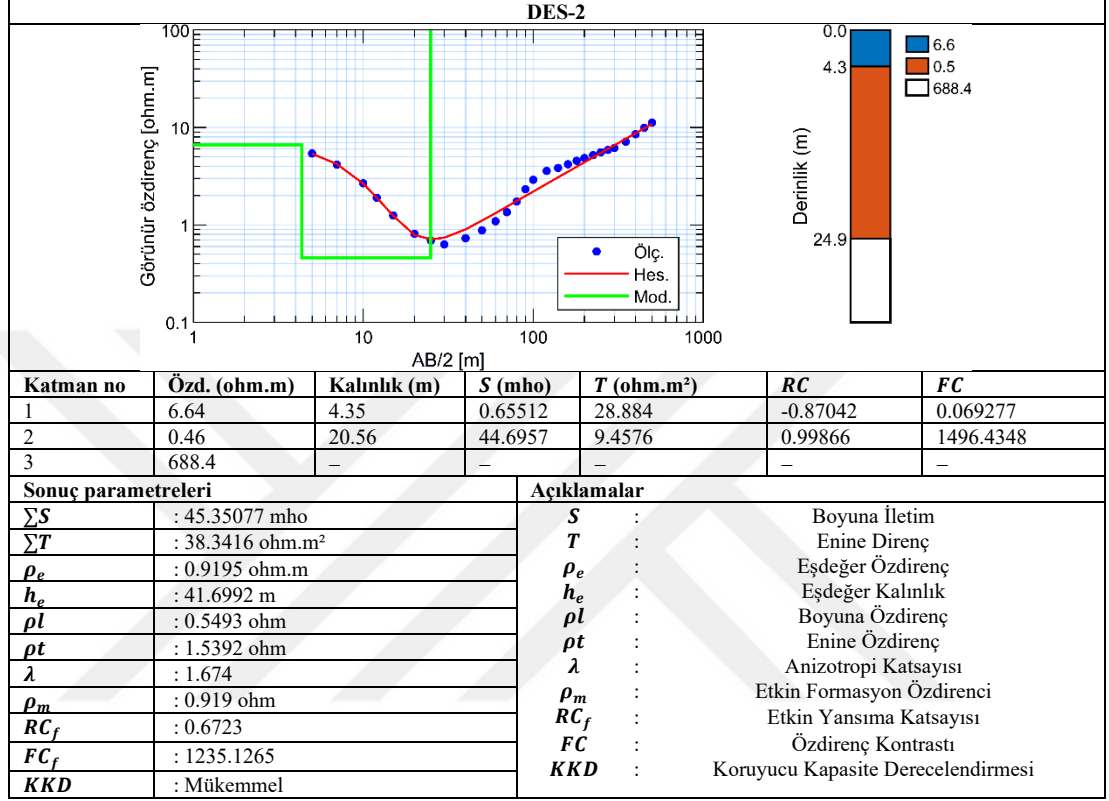
- Emmanuel F., A., Veronica M., A., Udemé U.I., 2020. Geoelectrical Investigation of Groundwater Quality Through Estimates of Total Dissolved Solids and Electrical Conductivity in Parts of Akwa Ibom State, Southern Nigeria. *Malaysian Journal of Geosciences*, 4(1), 32–37.
- Ewusi, A., Attobrah, B.N., Seidu, J., 2024. Estimation of Aquifer Transmissivity at Gushiegu and Karaga Districts of Northern Ghana using Dar-Zarrouk Parameters. *International Journal of Energy and Water Resources*, 8(1), 55–71.
- Gharakhani, Z., 2024. Yeraltı Suyu Araştırmalarında Jeofizik Özdirenç Yönteminin Uygulanması: Sultan Sazlığı-Develi Bölgesi Örneği. *Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi*, 29s, Edirne.
- Gökkur, S., 2016. Yeraltı Su Kaynaklarımızın Önemi. *Apelasyon*, 29. Erişim Tarihi: 21.11.2024. <https://apelasyon.com/yazi/29/yeralti-su-kaynaklarimizin-onemi>
- Göktürkler, G., Balkaya, Ç., Erhan, Z., Yurdakul, A., (2008a). Investigation of a Shallow Alluvial Aquifer using Geoelectrical Methods: a Case from Turkey. *Environmental Geology*, 54, 1283–1290.
- Göktürkler, G., Balkaya, Ç., Erhan, Z., 2008. Geophysical Investigation of a Landslide: The Altındağ Landslide Site, İzmir (Western Turkey). *Journal of Applied Geophysics*, 65(2), 84–96.
- Gürbüz, A., Kazancı, N., 2019. The Büyük Menderes River: Origin of Meandering Phenomenon. In Kuzucuoğlu, C., Çiner, A., Kazancı, N. (Eds), *Landscapes and Landforms of Turkey* (509–519). World Geomorphological Landscapes. Springer, Cham.
- Karabulut, S., Cengiz, M., Balkaya, Ç., Aysal, N., 2021. Spatio-Temporal Variation of Seawater Intrusion (SWI) inferred from Geophysical Methods as an Ecological Indicator; A Case Study from Dikili, NW İzmir, Turkey. *Journal of Applied Geophysics*, 189, 104318.
- Kaya, M.A., Özürlan, G., Balkaya, Ç., 2015. Geoelectrical Investigation of Seawater Intrusion in the Coastal Urban Area of Çanakkale, NW Turkey. *Environmental Earth Sciences*, 73, 1151–1160.
- Kazancı, N., Gürbüz, A., Boyraz, S., 2011. Büyük Menderes Nehri'nin Jeolojisi ve Evrimi. *Türkiye Jeoloji Bülteni*, 54(1-2), 25–56.
- Maillet, R., 1947. The Fundamental Equations of Electrical Prospecting. *Geophysics*, 12(4), 529–562.
- Nyman, D.C., Landisman, M., 1977. VES Dipole-Dipole Filter Coefficients. *Geophysics*, 42(5), 1037–1044.
- Okat, S., 2007. Büyük Menderes Grabeni Tortul Kalınlığının Jeofizik Yöntemlerle Araştırılması. *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, 38s, İzmir.

- Oladapo, M., Mohammed, M., Adeoye, O., Adetola, B., 2004. Geoelectrical Investigation of the Ondo State Housing Corporation Estate Ijapo Akure, Southwestern Nigeria. *Journal of Mining and Geology*, 40(1), 41–48.
- Özdemir, A., Palabıyık, Y., 2019. Güney (Denizli) Civarında Jeotermal Enerji Arama: Derin Düşey Elektrik Sondaj (DES) Ölçümlerinin Jeofizik ve Jeolojik Yorumu. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 17, 1198–1214.
- Özürlan, G., Candansayar, M. E., Şahin, M.H., 2006. Deep Resistivity Structure of the Dikili-Bergama Region, West Anatolia, revealed by Two-Dimensional Inversion of Vertical Electrical Sounding Data. *Geophysical Prospecting*, 54(2), 187–197.
- Pattantyús-Á., M., 1986. Geophysical Results in Archaeology in Hungary. *Geophysics*, 51(3) 561–567.
- Seidel, K., Lange, G., 2007. Direct Current Resistivity Methods. In Knöckdel, K., Lange, G., Voigt, H.-J. (Eds.), *Environmental Geology - Handbook of Field Methods and Case Studies*, pp. 205–237.
- Taşdelen, S., Güngör, M., Aydın, A., 2016. Çukurköy (Denizli) dolayının sığ yeraltı suyu hidrojeoloji incelemesi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 22(3), 206–212.
- Uchida, T., Murakami, Y., 1990. Development of a Fortran Code for the Two Dimensional Schlumberger Inversion. *Geological Survey of Japan Open-File Report*, 150.

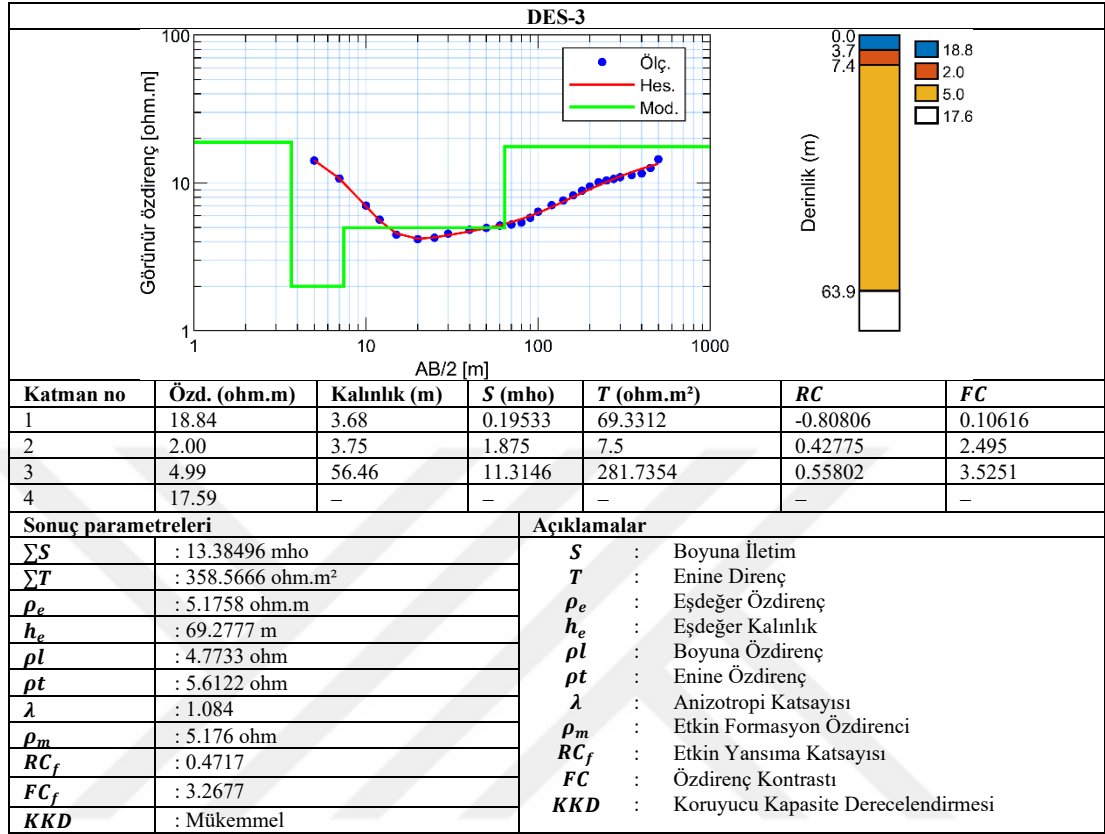
EKLER

EK A. Çizelgeler

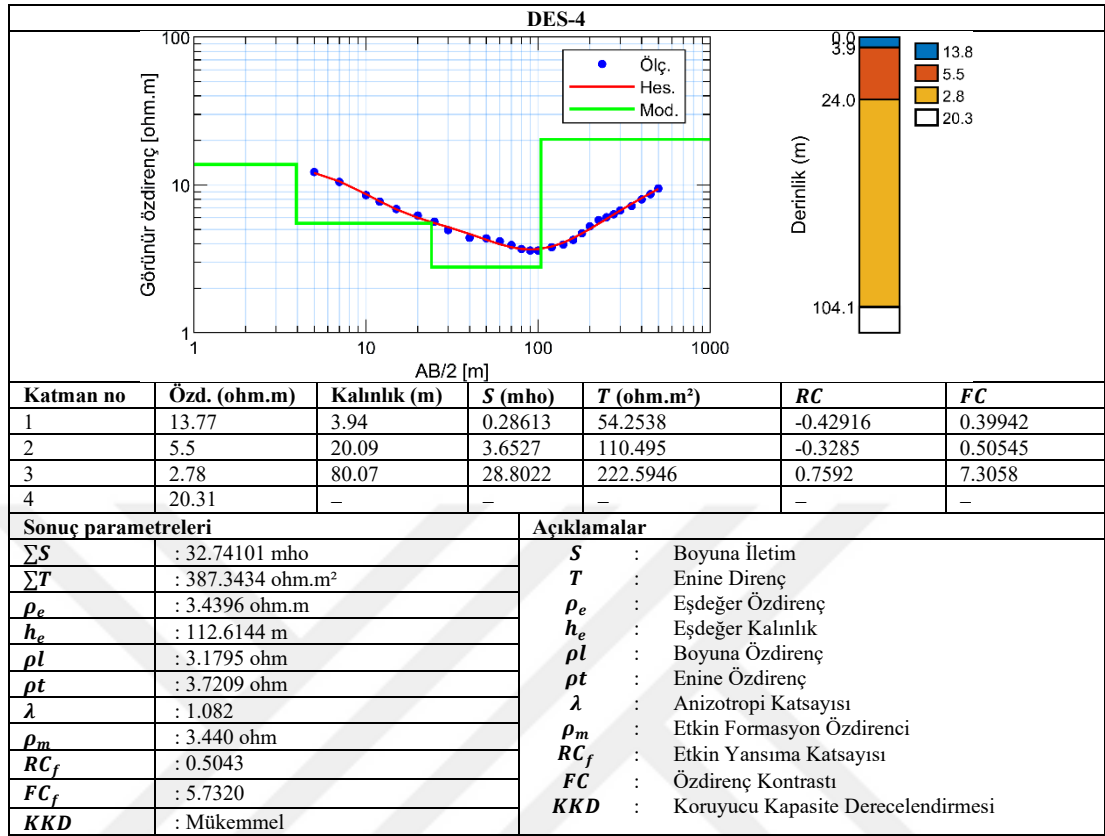
Çizelge A.1. DES-2 eğrisi, 1B ters çözümü ve ters çözümünden elde edilen katman parametreleri temel alınarak hesaplanan diğer parametreler



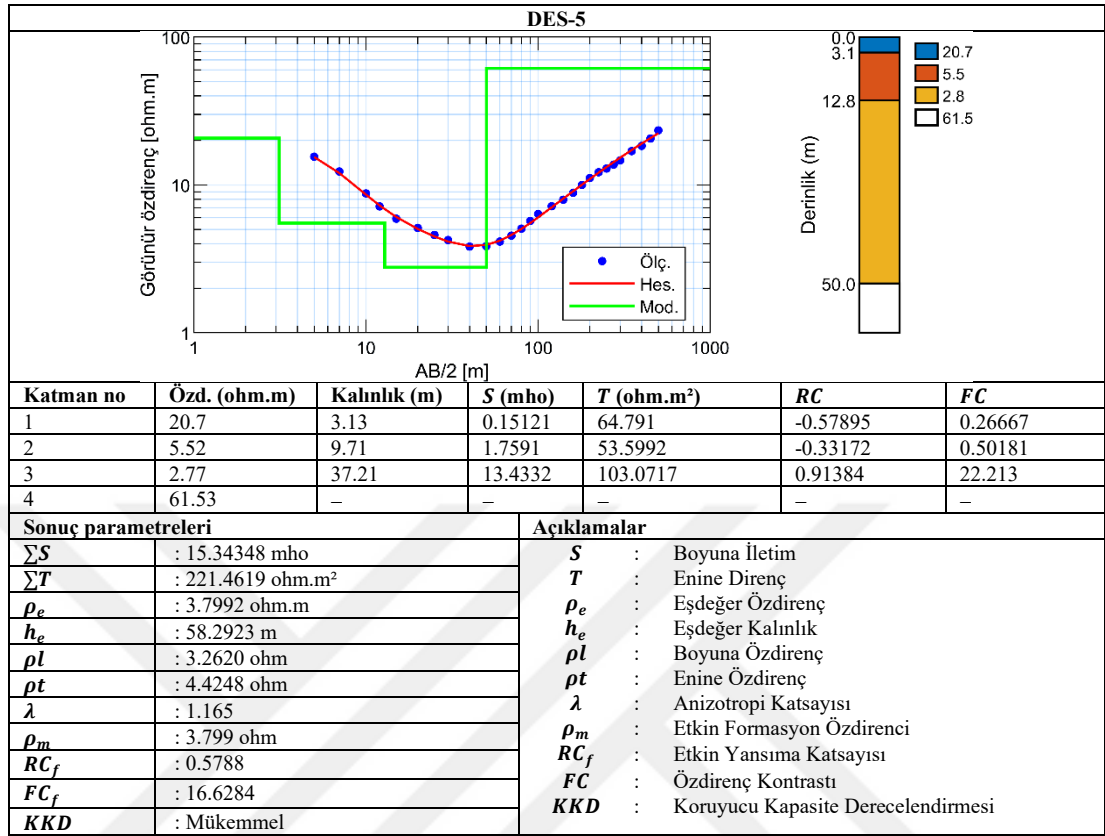
Çizelge A.2. DES-3 eğrisi, 1B ters çözümü ve ters çözümünden elde edilen katman parametreleri temel alınarak hesaplanan diğer parametreler



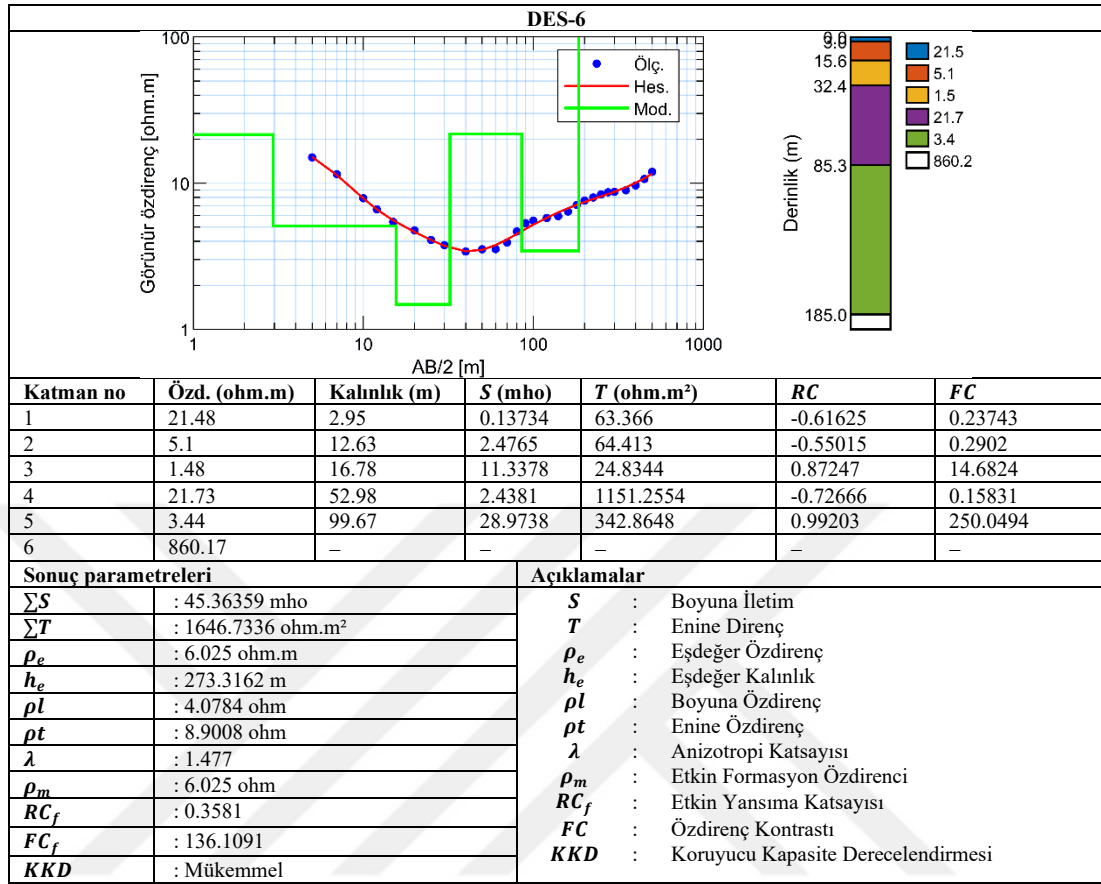
Çizelge A.3. DES-4 eğrisi, 1B ters çözümü ve ters çözümünden elde edilen katman parametreleri temel alınarak hesaplanan diğer parametreler



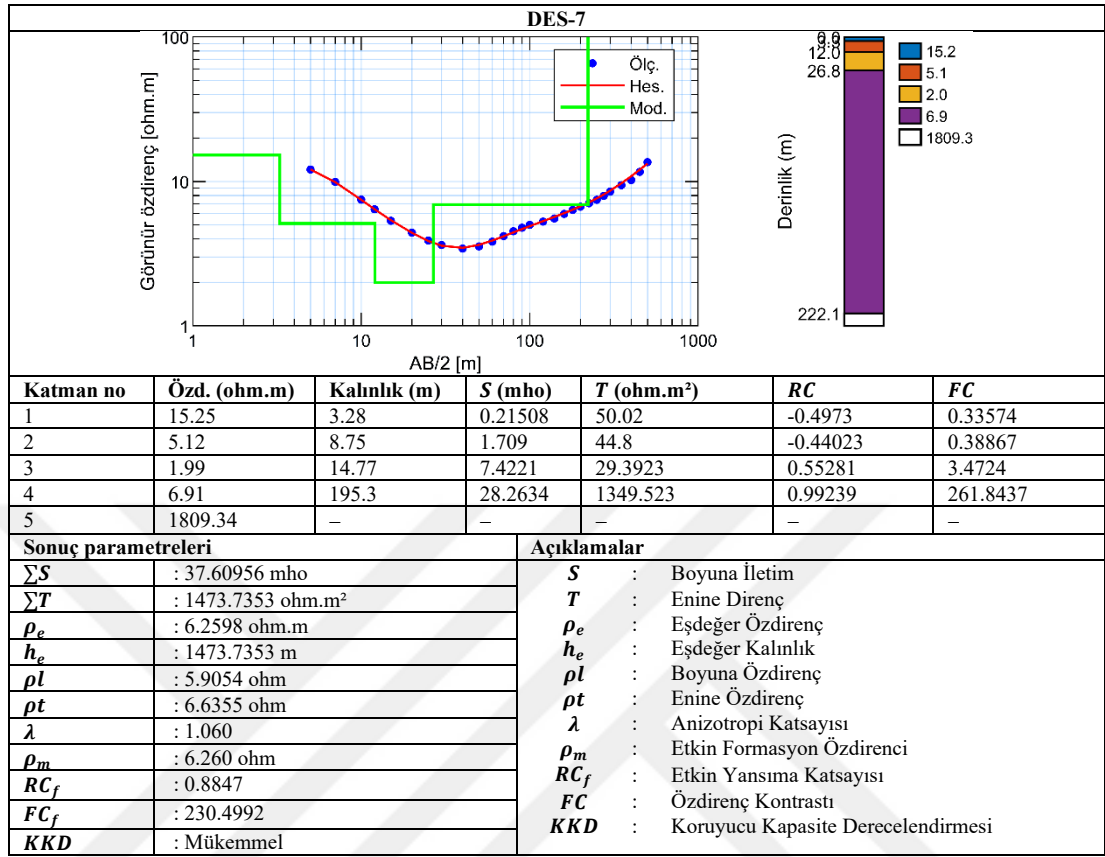
Çizelge A.4. DES-5 eğrisi, 1B ters çözümü ve ters çözümünden elde edilen katman parametreleri temel alınarak hesaplanan diğer parametreler



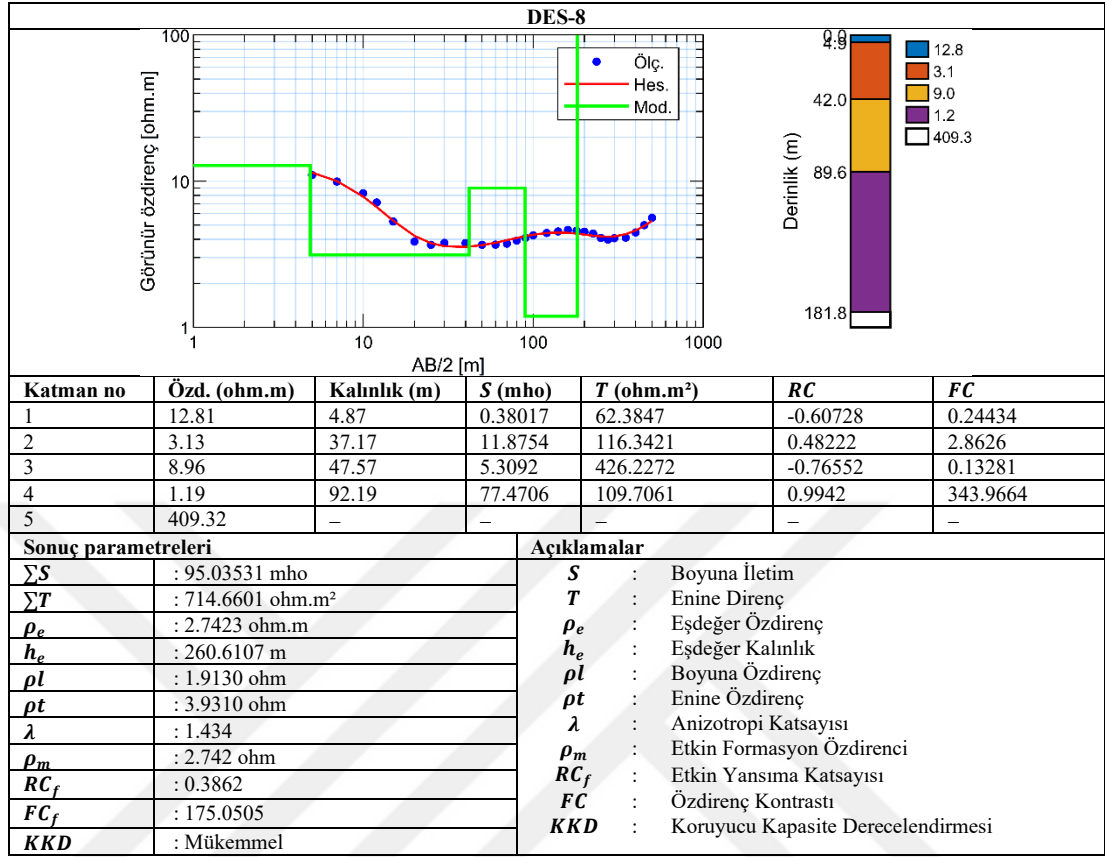
Çizelge A.5. DES-6 eğrisi, 1B ters çözümü ve ters çözünden elde edilen katman parametreleri temel alınarak hesaplanan diğer parametreler



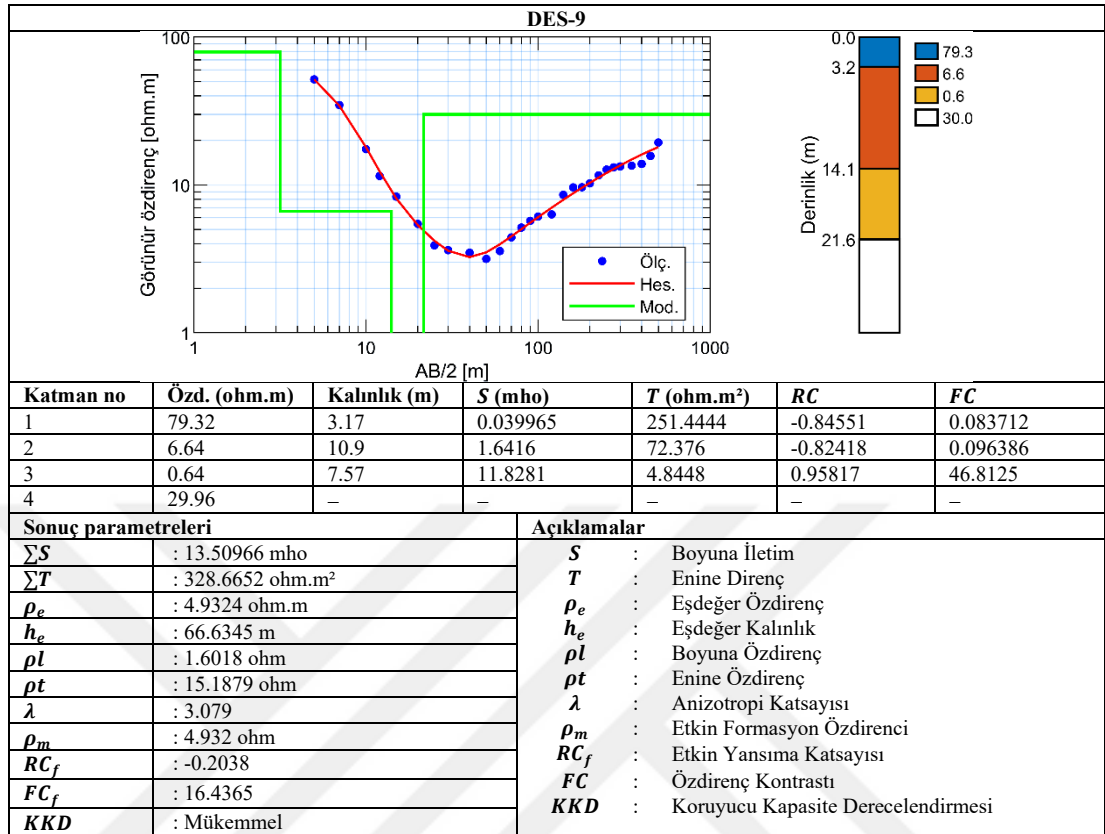
Çizelge A.6. DES-7 eğrisi, 1B ters çözümü ve ters çözümünden elde edilen katman parametreleri temel alınarak hesaplanan diğer parametreler



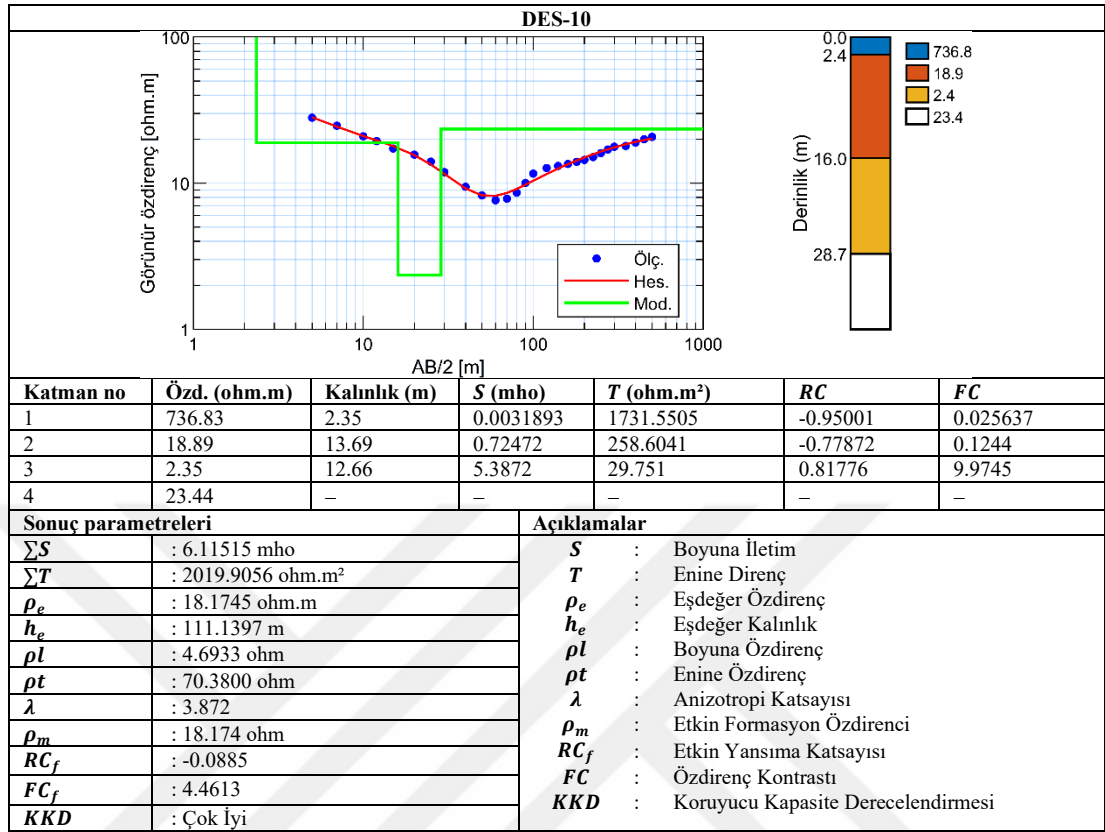
Çizelge A.7. DES-8 eğrisi, 1B ters çözümü ve ters çözünden elde edilen katman parametreleri temel alınarak hesaplanan diğer parametreler



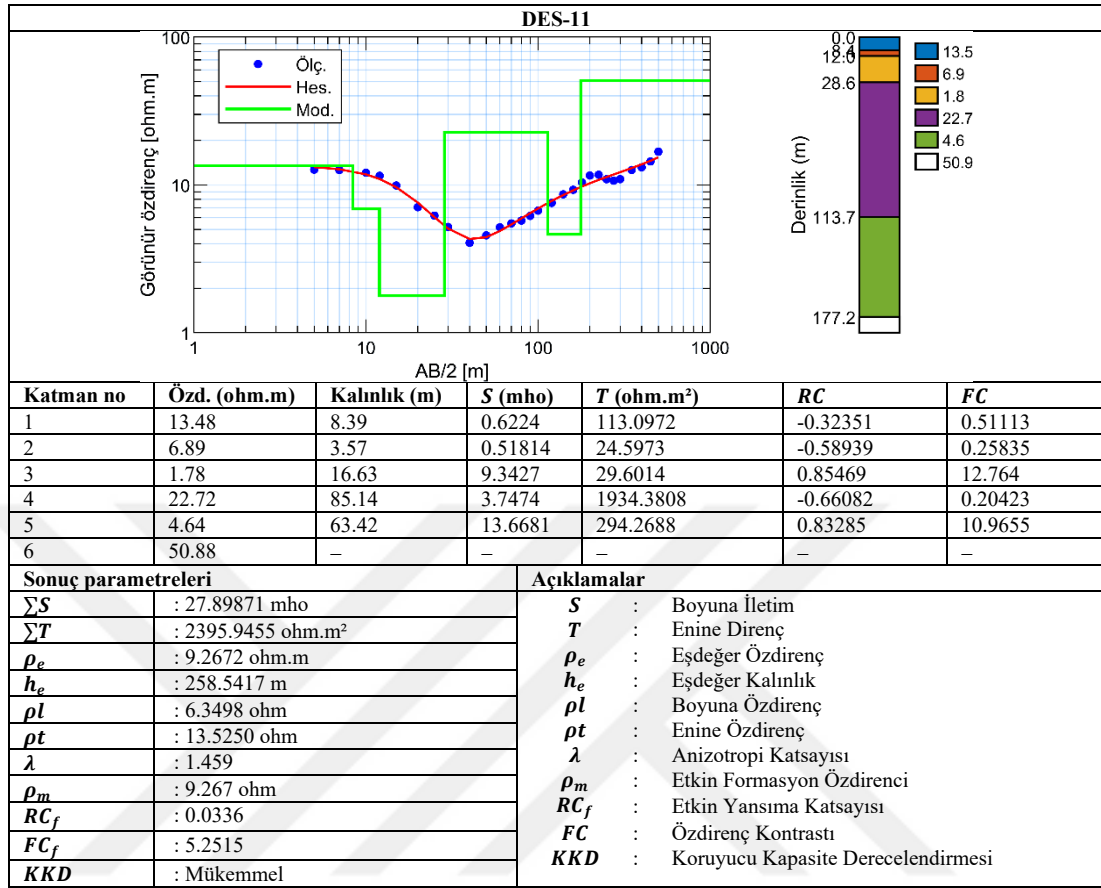
Çizelge A.8. DES-9 eğrisi, 1B ters çözümü ve ters çözümünden elde edilen katman parametreleri temel alınarak hesaplanan diğer parametreler



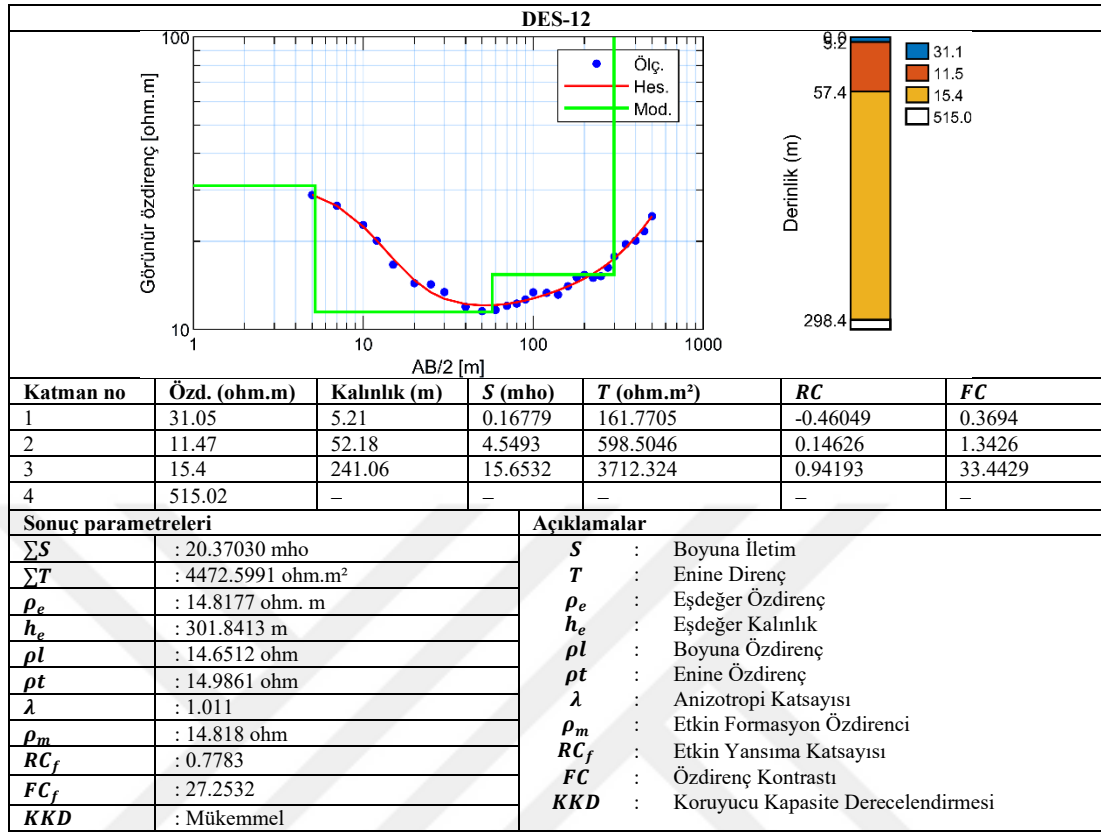
Çizelge A.9. DES-10 eğrisi, 1B ters çözümü ve ters çözünden elde edilen katman parametreleri temel alınarak hesaplanan diğer parametreler



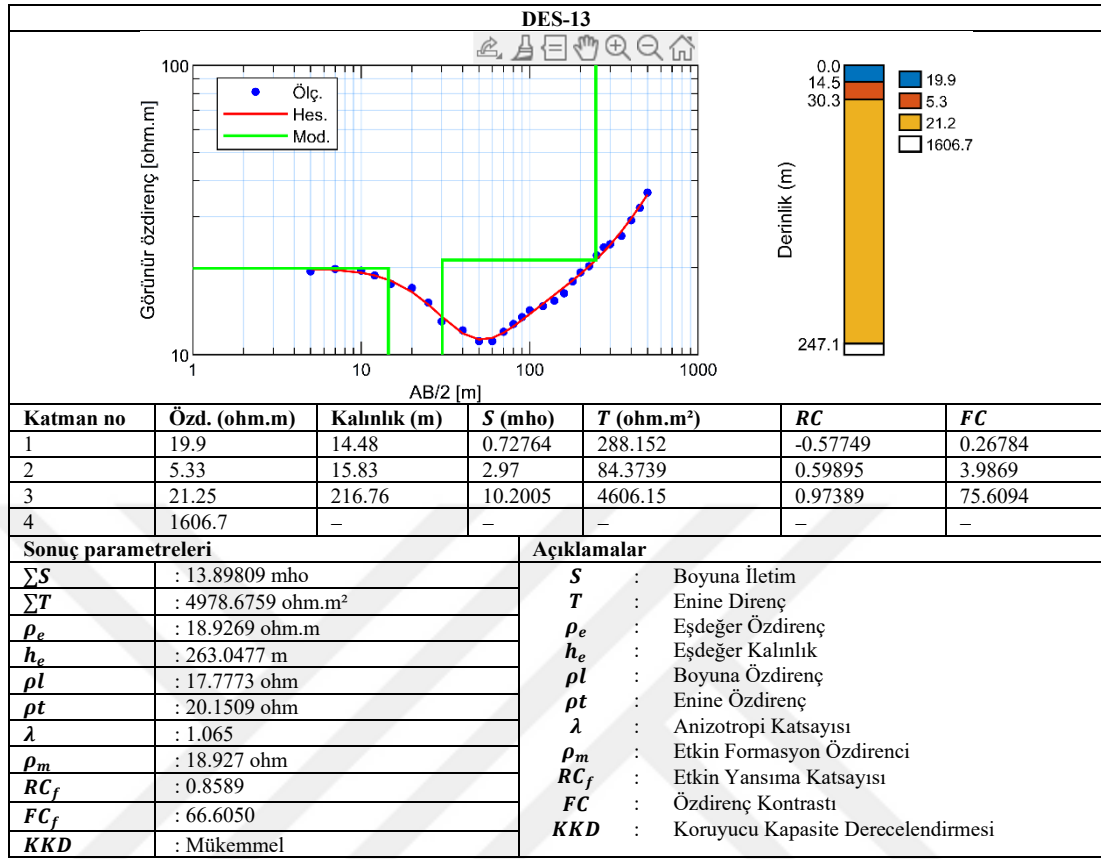
Çizelge A.10. DES-11 eğrisi, 1B ters çözümü ve ters çözümünden elde edilen katman parametreleri temel alınarak hesaplanan diğer parametreler



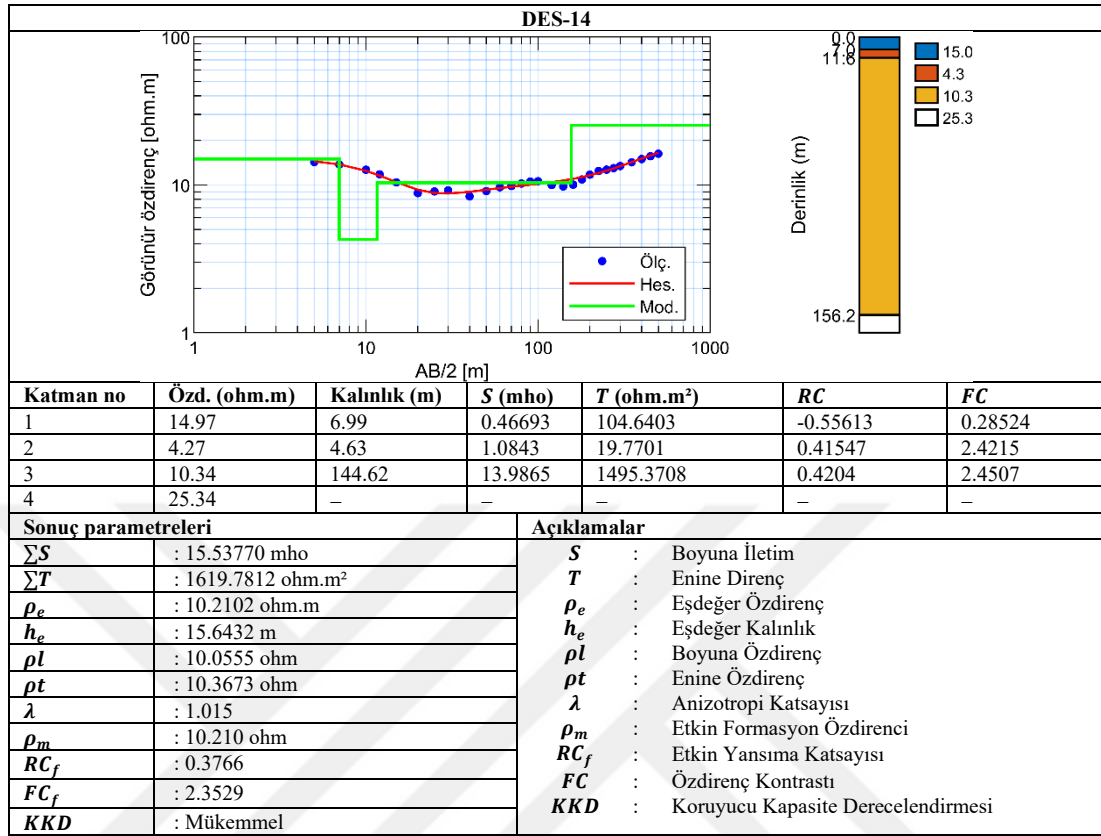
Çizelge A.11. DES-12 eğrisi, 1B ters çözümü ve ters çözümünden elde edilen katman parametreleri temel alınarak hesaplanan diğer parametreler



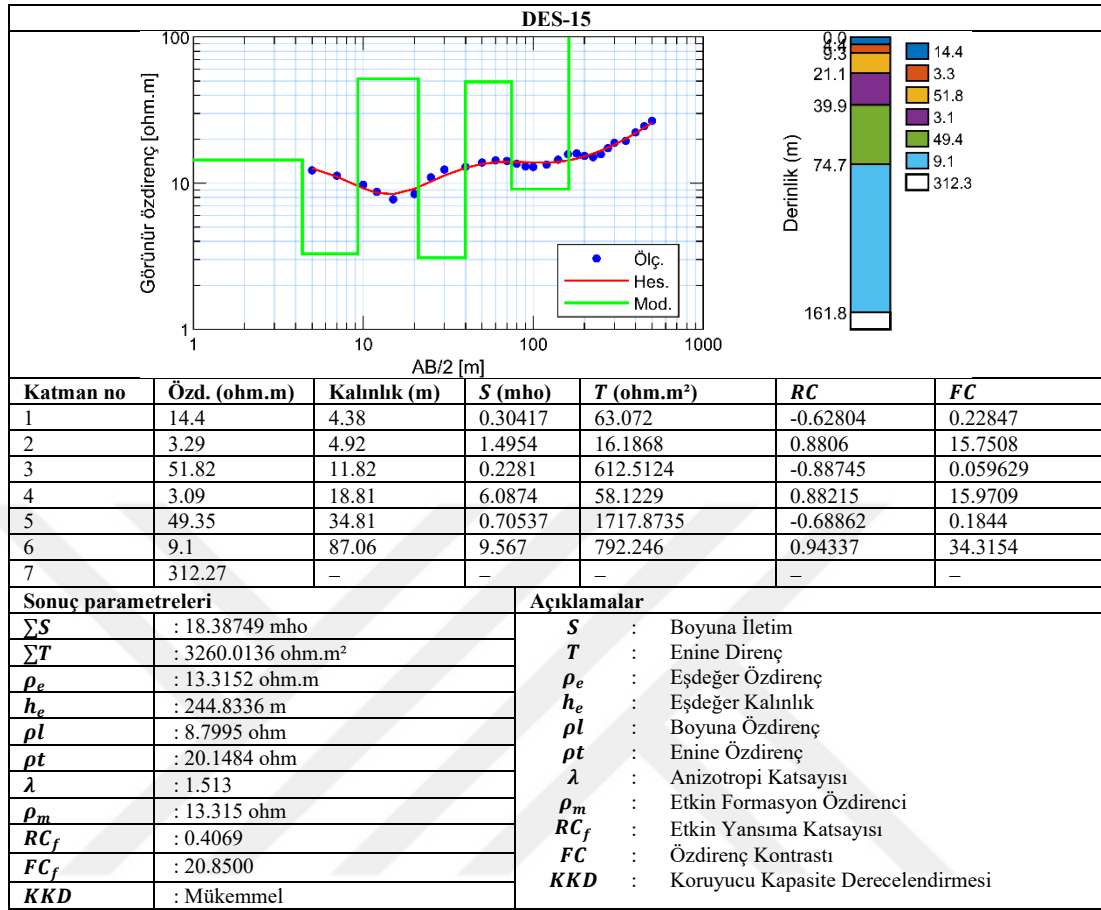
Çizelge A.12. DES-13 eğrisi, 1B ters çözümü ve ters çözümünden elde edilen katman parametreleri temel alınarak hesaplanan diğer parametreler



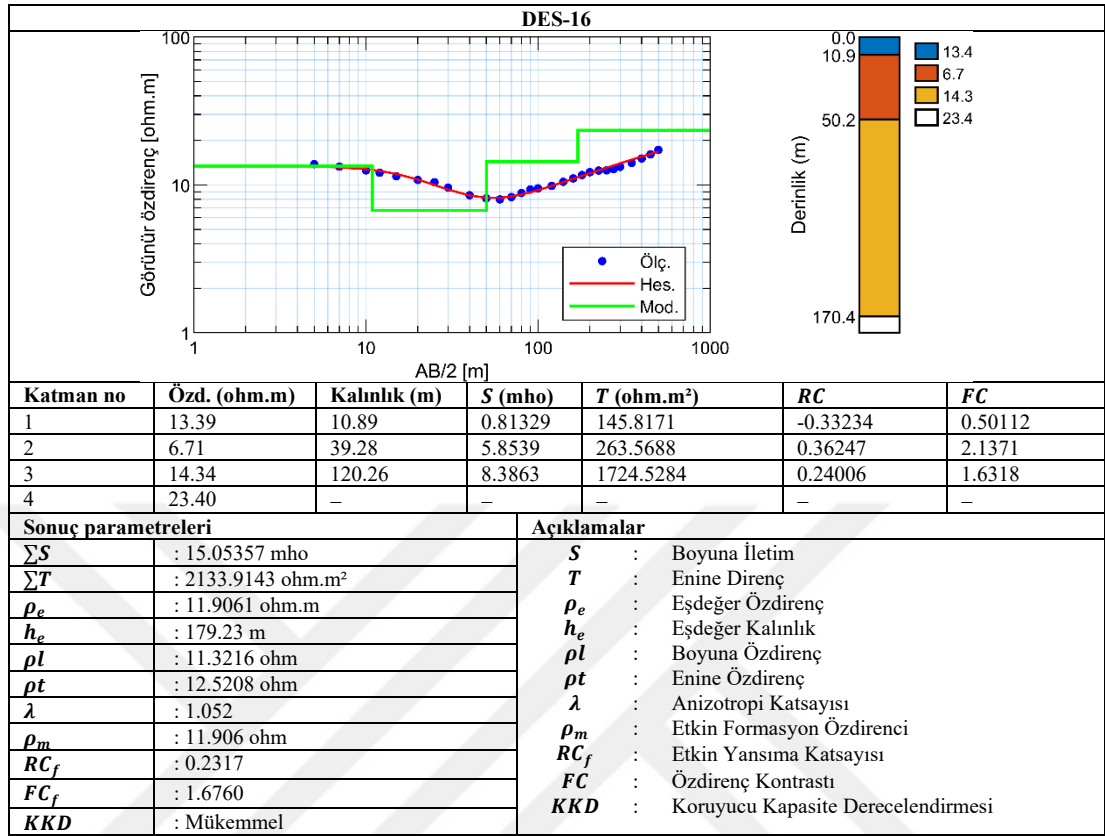
Çizelge A.13. DES-14 eğrisi, 1B ters çözümü ve ters çözümünden elde edilen katman parametreleri temel alınarak hesaplanan diğer parametreler



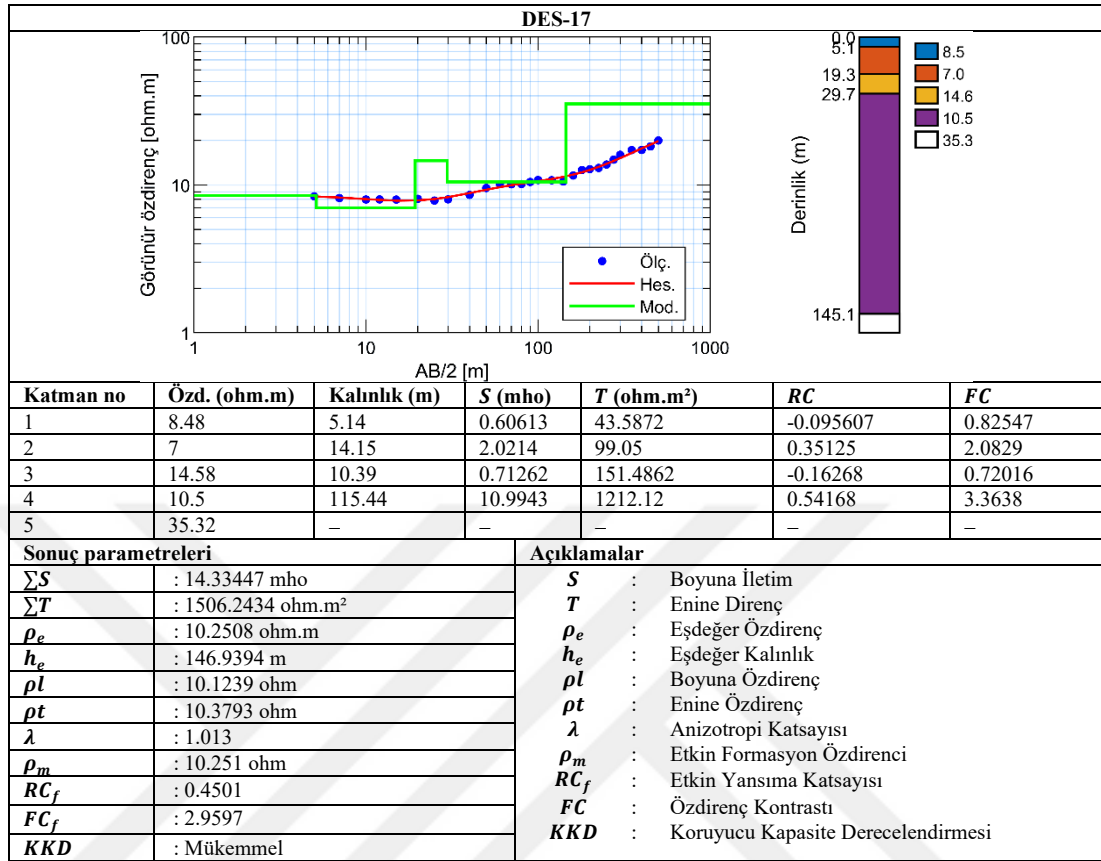
Çizelge A.14. DES-15 eğrisi, 1B ters çözümü ve ters çözümünden elde edilen katman parametreleri temel alınarak hesaplanan diğer parametreler



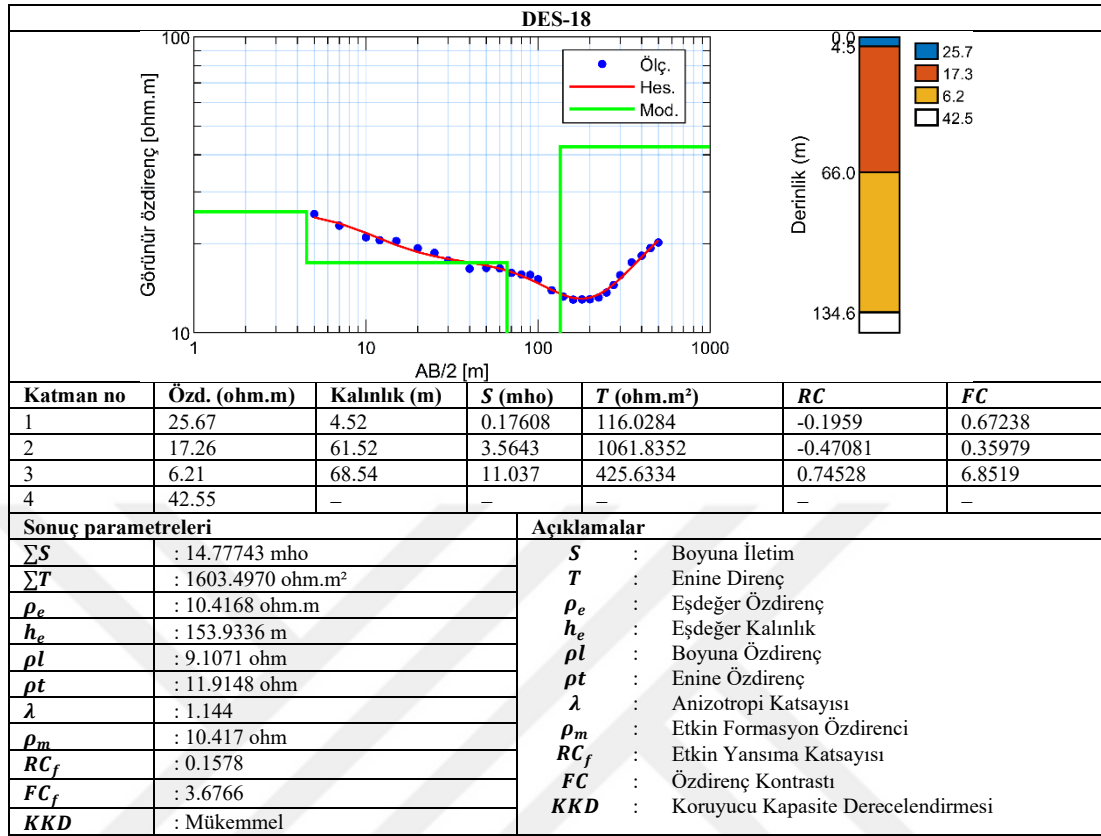
Çizelge A.15. DES-16 eğrisi, 1B ters çözümü ve ters çözümünden elde edilen katman parametreleri temel alınarak hesaplanan diğer parametreler



Çizelge A.16. DES-17 eğrisi, 1B ters çözümü ve ters çözümünden elde edilen katman parametreleri temel alınarak hesaplanan diğer parametreler



Çizelge A.17. DES-18 eğrisi, 1B ters çözümü ve ters çözümünden elde edilen katman parametreleri temel alınarak hesaplanan diğer parametreler



Çizelge A.18. DES-19 eğrisi, 1B ters çözümü ve ters çözümünden elde edilen katman parametreleri temel alınarak hesaplanan diğer parametreler

