

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

JEOFİZİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

TÜNEL YAPILARINDA KARŞILAŞILAN MÜHENDİSLİK
PROBLEMLERİNİN JEOFİZİK YÖNTEMLERLE İNCELENMESİ: BURSA İLİ
DOĞANCI TÜNELİ ÖRNEĞİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mustafa KIRICI

HAZİRAN 2024

TRABZON



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

JEOFİZİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**TÜNEL YAPILARINDA KARŞILAŞILAN MÜHENDİSLİK
PROBLEMLERİNİN JEOFİZİK YÖNTEMLERLE İNCELENMESİ: BURSA İLİ
DOĞANCI TÜNELİ ÖRNEĞİ**

Mustafa KİRİCİ

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
"JEOFİZİK YÜKSEK MÜHENDİSİ"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 16 / 05 / 2024

Tezin Savunma Tarihi : 25 / 06 / 2024

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Hakan KARSLI

Trabzon 2024

ÖNSÖZ

“Tünel Yapılarında Karşılaşılan Mühendislik Problemlerinin Jeofizik Yöntemlerle İncelenmesi: Bursa İli Doğancı Tüneli Örneği” isimli bu tez çalışması Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Programı’nda hazırlanmıştır.

Bu tez çalışmasında, Bursa ili, Osmangazi ilçesi, Doğancı Köyü sınırları içerisinde yer alan ve inşası 2024 yılında tamamlanan Doğancı Tüneli çeperlerinde meydana gelen deformasyonların nedenlerini belirlemek için tünelin içinden geçtiği jeolojik birimlerin ve bu birimlere ait problemlerin Jeofizik yöntemler ile belirlenmesi amaçlanmıştır.

Bu tez çalışmasının hazırlanmasına kadar her aşamada yardım ve desteğini esirgemeyen, bilgi ve birikimleriyle her zaman yanımda olan ve tezime danışmanlık yapan değerli hocam Prof. Dr. Hakan KARSLI’ ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Söz konusu projede bizlere çalışma imkanı veren, arazi çalışmalarım sırasında yardımlarını esirgemeyen ve verilerin kullanılması için gerekli izinleri sağlayan Karayolları Genel Müdürlüğü’ ne bağlı 14. Bölge Müdürlüğü ile Bergiz Holding’e teşekkür ederim.

Yaşamımın her evresinde ve tez çalışmam süresince varlıklarını hep hissettiğim ve hissedeceğim aileme, her zaman ve her durumda olduğu gibi bu tez süresi boyunca sabır, hoşgörü ve anlayış gösteren, desteğini esirgemeyen sevgili eşim Gözde KİRİCİ’ ye ve çocuklarım M. Yaman ile M. Doğu’ ya ayrıca teşekkür ederim.

Mustafa KİRİCİ

Trabzon 2024

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Tünel Yapılarında Karşılaşılan Mühendislik Problemlerinin Jeofizik Yöntemlerle İncelenmesi: Bursa İli Doğancı Tüneli Örneği” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Hakan KARSLI’ nın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri kendim topladığımı, analizleri kendim yaptığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 25/06/2024

Mustafa KİRİCİ

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XII
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XIII
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Amaç ve Kapsam	5
2. TÜNELDE KULLANILAN JEOfİZİK YÖNTEMLER	6
2.1. Yer Radarı (YR) Yöntemi	6
2.1.1. Yer Radarı Kuramı	8
2.1.2. Yer Radarı Yönteminde Veri Toplama ve Veri İşlem.....	11
2.2. Elektrik Özdirenç Tomografi (EÖT) Yöntemi	15
2.2.1. Elektrik Özdirenç Tomografide Temel Tanımlamalar	17
2.2.2. Kayaçlar ve Minerallerin Özdirenci	17
2.2.3. Elektrik Özdirenç Tomografi Yönteminde Veri Toplama ve Veri İşlem	18
2.3. Çok Kanallı Yüzey Dalgası Analizi (ÇKYDA).....	21
2.3.1. Dispersiyon, Faz Hızı ve Grup Hızı	21
2.3.2. Çok Kanallı Yüzey Dalgası Analizinde Veri toplama ve Veri İşlem	23
3. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	27
3.1. Doğancı Tüneli.....	27
3.2. Tünel Hattı ve Çevresinin Genel Jeolojisi	28
3.3. Tünelde Uygulanan Jeofizik Ölçümler.....	31
3.3.1. Yer Radarı Ölçümleri	32
3.3.2. Elektrik Özdirenç Tomografi Ölçümleri	33
3.3.3. Çok Kanallı Yüzey Dalgası Analizi Ölçümleri.....	35

4. BULGULAR.....	37
4.1. Tünel İçi Yer Radarı Bulguları	37
4.2. Tünel İçerisinde, Tünel Üzerinde ve Çıkış Palye Üzerindeki Elektrik Özdirenç Tomografi Bulguları.....	43
4.3. Tünel İçi Çok Kanallı Yüzey Dalgası Analiz Bulguları.....	55
5. SONUÇLAR	57
6. ÖNERİLER.....	59
7. KAYNAKLAR	60
ÖZGEÇMİŞ	



Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

TÜNEL YAPILARINDA KARŞILAŞILAN MÜHENDİSLİK PROBLEMLERİNİN JEOFİZİK YÖNTEMLERLE İNCELENMESİ: BURSA İLİ DOĞANCİ TÜNELİ ÖRNEĞİ

Mustafa KİRİCİ

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Hakan KARSLI
2024, 66 Sayfa

Tüm dünyada tünel yapılarının tasarımında, jeolojik koşulların değişken olmasından kaynaklı pek çok mühendislik problemi ile karşılaşilmektedir. Bu çalışmanın amacı, Bursa İli Osmangazi ilçesi Doğancı köyündeki Doğancı Tüneli'nin yan duvarlarından ve tavanından muhtemel su gelişinin ve oluşan deformasyonların belirlenmesinde, üç farklı jeofizik ölçüm yönteminin sağladığı katkıların incelenmesi ve çözüm önerilerinin sunulmasıdır. Bu kapsamda, tünelin sağ, sol yan duvarlarında Yer Radarı (YR), Elektrik Öz direnç Tomografi (EÖT) ve Çok Kanallı Yüzey Dalgası Analizi (ÇKYDA), tavanında sadece YR, tünelin dış üst kotunda ve tünel çıkışındaki palye üstünde EÖT ölçümleri alınmıştır. Tünel içi ve dışı EÖT kesitlerine göre, öz direnç değerleri sırasıyla 4-100 Ohm.m ve 30-1000 Ohm.m arasında, ÇKYDA ölçümlerinden göre S-dalga hız değerleri 150-600 m/sn arasında elde edilmiştir. Birbirine paralel YR profillerinden tünel duvarlarının ve dış cephesinin üç boyutlu görüntüleri oluşturulmuştur. Tüm kesitler incelendiğinde, genel olarak öz direncin ve S-dalga hızının düşük, YR genliklerinin ise görece yüksek olduğu tünel bölümlerinin çoğunlukla su gelimi ile ilişkili önemli deformasyonlara karşılık geldiği değerlendirilmiştir. Bu sonuçlar, tünel yapımında ve sonrasındaki güçlendirme çalışmalarının jeofizik ölçümlere göre tasarlanmasının maliyet ve güvenlik açısından önemini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Çok Kanallı Yüzey Dalgası Analizi, Elektrik Öz direnç Tomografi, Yer Radarı, Tünel

Master Thesis

SUMMARY

INVESTIGATION OF ENGINEERING PROBLEMS ENCOUNTERED IN TUNNEL STRUCTURES USING GEOPHYSICAL METHODS: THE CASE OF DOĞANCI TUNNEL IN BURSA PROVINCE

Mustafa KİRİCİ

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Geophysical Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Dr. Hakan KARSLI
2024, 66 Pages

Many engineering problems are encountered in the design of tunnel structures all over the world due to variable geological conditions. The purpose of this study is to examine the contributions of three different geophysical measurement methods in determining the possible water inflow and deformations from the side walls and ceiling of the Doğancı Tunnel in the Doğancı village of Osmangazi district of Bursa Province and to present solution suggestions. In this context, Ground Penetrating Radar (GPR), Electrical Resistivity Tomography (ERT) and Multi-Channel Surface Wave Analysis (MASW) were taken on the right and left side walls of the tunnel, only GPR on the ceiling, ERT measurements were taken on the outer upper elevation of the tunnel and on the berm at the tunnel exit. According to ERT sections inside and outside the tunnel, resistivity values were obtained between 4-100 Ohm.m and 30-1000 Ohm.m, respectively, and according to MASW, S-wave velocity values were obtained between 150-600 m/sec. When all sections were examined, it was evaluated that the tunnel sections, where the resistivity and S-wave velocity were generally low and the GPR amplitudes were relatively high, mostly corresponded to significant deformations related to water inflow. These results show the importance of designing tunnel construction and subsequent reinforcement works according to geophysical measurements in terms of cost and safety.

Key Words: Multichannel Surface Waves Analysis, Electrical Resistivity Tomography, Ground Penetrating Radar, Tunnel

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. Yer radarı sisteminde elektromanyetik dalga yayılımı	7
Şekil 2. Yer radarı ölçüm modları (a) yansıyan veya saçılan enerji (b) malzeme üzerinden iletilen enerji (Jol, 2008).	8
Şekil 3. Dispersif olmayan fiziksel özelliklere sahip basit bir ortamda (a) hızdaki (b) sönümdeki değişim. c ve Z_0 boşluktaki hız ve empedansı ifade etmektedir (Jol, 2008).	11
Şekil 4. Yer radarı veri toplamada kullanılan (a) sabit aralıklı ölçüm düzeneği (b) ortak orta nokta ölçüm düzeneği (Annan, 2001'den değiştirilerek alınmıştır)	12
Şekil 5. Yer radarında veri toplama ve elde edilen radagram görüntüsü (URL-1, 2023).	12
Şekil 6. Yer yüzeyindeki unsurlardan saçılmalar sonucu oluşan hiperbolleri (kesikli mavi çizgiler) içeren radar profili. Havada EM dalga hızı 0,3 m/ns' dir.....	13
Şekil 7. Yer radarı veri işlem akış şeması (Jol'den (2008) düzenlenerek alınmıştır)	14
Şekil 8. Örnek bir radar profili ve işlem basamakları. (a) ham veri; (b) zaman kayması düzeltilmesi; (c) akım düzeltme; (d) enerji geciktirme; (e) ortalama değer temizleme; (f) hız analizi	15
Şekil 9. Bazı kayaçlar, mineraller ve zeminler için elektriksel özdirenç değer aralıkları (Palacky'den (1988) düzenlenerek alınmıştır)	18
Şekil 10. 2B ve 3B'lu elektrik özdirenç tomografi verisinin toplanması (Griffiths & Barker'dan (1993) düzenlenerek alınmıştır).....	19
Şekil 11. Elektrik özdirenç ölçümlerinde kullanılan elektrot dizilim türleri	20
Şekil 12. Yüzey dalgalarının derinlikle hız değişimine bağlı olarak; a) normal dispersiyon b) ters dispersiyon (Lay & Wallace'dan (1995) değiştirilerek alınmıştır).....	22
Şekil 13. Her bir frekans bileşeni için (a) grup hızı (b) faz hızı hesabı (Park vd. 2007)	23
Şekil 14. Çok kanallı yüzey dalgası analizinde beton üzerinde kullanılan ölçüm düzeneği (Xia'dan (2006) düzenlenerek alınmıştır)	24
Şekil 15. ÇKYDA yönteminde veri işlem adımları (Karşlı vd. (2024)'den düzenlenerek alınmıştır).....	26
Şekil 16. Doğançı Tüneli'nin yer bulduru haritası	27
Şekil 17. İnceleme alanı ve çevresinin genel jeoloji haritası (MTA, 1/500 000 ölçekli)	29
Şekil 18. İnceleme alanının genelleştirilmiş stratigrafik kesiti (KGM, 2019).....	30

Şekil 19.	Tünel içi jeofizik ölçümlere ait profiller	31
Şekil 20.	Yer radarı ölçümlerinde kullanılan GSSI marka SIR3000 radar cihazı	32
Şekil 21.	Tünel içerisinde yapılan yer radarı ölçümleri	32
Şekil 22.	Çok elektrotlu elektrik öz direnç tomografi ölçüm ekipmanı	33
Şekil 23.	EÖT’ de kullanılan özel üretim elektrotların tünel duvarına yerleştirilmesi	34
Şekil 24.	(a) Tünel yan duvarında, (b) tünel üstünde gerçekleştirilen elektrik öz direnç tomografi ölçümleri	34
Şekil 25.	Tünel içerisinde ÇKYDA uygulamasında kullanılan ölçüm ekipmanı	35
Şekil 26.	Tünel içindeki ÇKYDA yönteminin ölçüm düzeneği	36
Şekil 27.	Tünelin tavanındaki YR profilinden elde edilen radagram.....	37
Şekil 28.	Tünelin sol duvarındaki YR profilinden elde edilen radagram.....	37
Şekil 29.	Tünelin sağ duvarındaki YR profilinden elde edilen radagram	38
Şekil 30.	Yer radarı ölçümlerinden hazırlanan 3B’lu modeller üzerinde bozunmuş alanların (siyah kesikli çizgiler) farklı açılardan gösterimi.....	39
Şekil 31.	Tünel tavanından itibaren 5.5 m yükseklikteki anomalilerin (kesikli mavi çizgili alanlar) 3B’lu model üzerindeki görüntüsü	40
Şekil 32.	Tünelin yan duvarlarına ait yüksek elektromanyetik yansımaların 3B’lu model üzerinde görüntülenmesi.....	40
Şekil 33.	Farklı açılardan oluşturulan tünel yan duvarlarının 3B’lu modelleri	41
Şekil 34.	Tünel için farklı açılarda oluşturulan 3B’lu katı modeller.....	42
Şekil 35.	EÖT-1 profiline ait (a) ölçülen, (b) hesaplanan ve (c) ters çözüm modelleri	43
Şekil 36.	EÖT-2 profiline ait (a) ölçülen, (b) hesaplanan ve (c) ters çözüm modelleri	43
Şekil 37.	EÖT-3 profiline ait (a) ölçülen, (b) hesaplanan ve (c) ters çözüm modelleri	44
Şekil 38.	EÖT-4 profiline ait (a) ölçülen, (b) hesaplanan ve (c) ters çözüm modelleri	44
Şekil 39.	Tünelin sağ duvarından elde edilen (a) 2B’lu EÖT-1 kesiti, (b) litoloji ile ilişkilendirilmiş 2B’lu EÖT-1 kesiti	46
Şekil 40.	Tünelin sağ duvarından elde edilen (a) 2B’lu EÖT-2 kesiti, (b) litoloji ile ilişkilendirilmiş 2B’lu EÖT-2 kesiti	47
Şekil 41.	Tünelin sol duvarından elde edilen (a) 2B’lu EÖT-3 kesiti, (b) litoloji ile ilişkilendirilmiş 2B’lu EÖT-3 kesiti	48
Şekil 42.	Tünelin sol duvarından elde edilen (a) 2B’lu EÖT-4 kesiti, (b) litoloji ile ilişkilendirilmiş 2B’lu EÖT-4 kesiti	49
Şekil 43.	Tünelin üzerinde alınan EÖT profilinin konumu	50

Şekil 44.	Tünelin üzerindeki EÖT profiline ait (a) ölçülen, (b) hesaplanan ve (c) ters çözümden elde edilen modeller	50
Şekil 45.	Tünelin üstünden elde edilen (a) 2B'lu EÖT kesiti, (b) litoloji ile ilişkilendirilmiş 2B'lu EÖT kesiti	52
Şekil 46.	Tünel çıkışı palye üstünde alınan EÖT profilinin konumu	53
Şekil 47.	Tünel çıkışı palye üstündeki EÖT profiline ait (a) ölçülen, (b) hesaplanan ve (c) ters çözümden elde edilen modeller.....	53
Şekil 48.	Tünel çıkışı palye üstünden elde edilen (a) 2B'lu EÖT kesiti (b) litoloji ile ilişkilendirilmiş 2B'lu EÖT kesiti	54
Şekil 49.	Tünelin sağ yan duvarındaki ÇKYDA-1 ve ÇKYDA-2 profiline ait (a) dispersiyon eğrisi ve (b) 1B'lu S-dalgası hız modeli.....	56
Şekil 50.	Tünelin sol yan duvarındaki ÇKYDA-3 ve ÇKYDA-4 profiline ait (a) dispersiyon eğrisi ve (b) 1B'lu S-dalgası hız modeli.....	56

TABLÖLAR DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. Bazı materyallerin yayılım hızı ile dielektrik sabit değerleri (Davis & Annan, 1989'den düzenlenerek alınmıştır)	10
Tablo 2. Bazı jeolojik birimlere ait öz direnç değerleri (URL-2, 2023).....	16



SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

v	: Yayılma hızı
f	: Frekans
α	: Sönüm
Δt	: Zaman ortamı örnekleme aralığı
Δx	: Uzay ortamı örnekleme aralığı
x	: Uzaklık
t	: Zaman
d	: Derinlik
T_x	: Verici anten
R_x	: Alıcı anten
$\vec{E}$	: Elektrik alan vektörü
$\vec{H}$	: Manyetik alan yoğunluğu
$\vec{D}$	: Yer değiştirme vektörü
$\vec{J}$	: Elektrik akım yoğunluğu vektörü
$\vec{B}$	: Manyetik akı yoğunluk vektörü
q	: Elektrik yükü yoğunluğu
$\tilde{\sigma}$	: Elektriksel iletkenlik
$\tilde{\epsilon}$	: Dielektrik geçirgenlik
$\tilde{\mu}$	: Manyetik geçirgenlik
d_x	: Alıcı (offset) aralığı
D_{max}	: En büyük araştırma derinliği
k	: Dalga sayısı
c	: Işık hızı

Z	: Empedans
ω	: Açısal frekans
Z_0	: Boşluktaki empedans
ϵ_r	: Dielektrik sabiti
$c(\omega)$	: Faz hızı
$U(\omega)$	: Grup hızı
r	: Yarıçap
A	: Amper
R	: İletkenin direnci
ρ	: Özdirenç
I	: Akım
V	: Potansiyel fark
A	: Kesit alanı
L	: Uzunluk
V_s	: S-dalga hızı
$f - k$	: Frekans-dalga sayısı
$\tau - p$	: Eğim-yığma
Ωm	: Ohm.metre
km	: Kilometre
1B	: 1 boyutlu
2B	: 2 boyutlu
3B	: 3 boyutlu
ÇKYDA	: Çok Kanallı Yüzey Dalgası Analizi
DES	: Düşey Elektrik Sondaj
EÖT	: Elektrik Özdirenç Tomografi
KGM	: Karayolları Genel Müdürlüğü
MTA	: Maden Tetkik Arama

UÖ : Uzaysal Özilişki
YDSA : Yüzey Dalgalarının Spektral Analizi
YR : Yer Radarı
A, B : Akım elektrotları
M, N : Potansiyel elektrotları



1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Ulusal ve Uluslararası ulaşımda zorlu coğrafik koşulların aşılmasında, karayolları, demiryolları ve su kanallarının önemli bir parçasını oluşturan tünellerin tasarımı sırasında yeterli düzeyde dikkate alınmayan jeolojik koşullar, kaya kütlelerinde meydana gelebilecek değişimler veya heyelanlar farklı boyutlarda hasarlara neden olabilmektedir. Bunların yanı sıra, beton kaplı tünellerde destekleyici yapının eskimesi, zamanla deformasyona uğraması, hava koşulları veya uygunsuz inşaat teknikleri nedeniyle hasarlar meydana gelmektedir. Bu tür hasarların tünellerde gözlenmesi halinde, çevredeki toprak ve kaya kütlelerinin jeolojik ve jeoteknik koşulları dikkatlice değerlendirilmeli ve sorunun gerçek nedenlerinin belirlenmesi için detaylı çalışmalar yapılmalıdır. Bu amaçla, tünel tavanı ve yan duvarlarındaki kırık ve çatlakların tespiti, boşlukların tanımlanması, kısmen veya tamamen su ile dolu olup olmadığı, su sızıntısının ve içeriğinin belirlenmesi için birçok jeofizik yöntem kullanılmaktadır (Chen vd. 2020; Lyu vd. 2020; Fores vd. 2021; Izumotani vd. 2021; Radinger vd. 2021; Su vd. 2021; Ding vd. 2022; Liu vd. 2023). Uygulamada tünel yüzeyinden ve/veya içinden yapılan ölçümlerde yer radarı, elektrik özdirenç tomografi, çok kanallı yüzey dalgası analizi gibi tahribatsız jeofizik yöntemler yaygın olarak kullanılmaktadır (Lin vd. 2020; Sharma vd. 2021; Barbieri vd. 2023). Jeofiziksel açıdan zor problemlerin çözümünde birkaç yöntemin birlikte kullanımı ve birleşik yorumu daha başarılı sonuçlar elde edilmesine olanak sağlamaktadır.

Literatürde mevcut tünellerde ve tünel yapım aşaması öncesinde meydana gelmesi muhtemel su sızıntısı, su içeriği, süreksizlikler, kırık, çatlak gibi problemlerin tespitine yönelik gerçekleştirilen jeofizik çalışmaların bazıları aşağıda sunulmuştur. Bu çalışmaların çoğunda farklı jeofizik yöntemler bir arada kullanılarak elde edilen tüm sonuçlar birlikte yorumlanmıştır.

Cardarelli vd. (2003) İtalya’da içme suyu kaynağının toplama tünellerinde uyguladıkları sismik kırılma, sismik tomografi ve yer radarı yöntemlerini birlikte yorumlayarak tünel stabilitesini araştırmışlardır. Sismik tomografi ve yer radarı verilerinin yorumundan, bazı elastik özellikler değerlendirilmiş ve kayadaki süreksizlikler tespit edilmiştir.

Doğal veya yapay tünellerin ve boşlukların (hava ve/veya su dolu) varlığıyla ilişkili jeolojik risklerin en aza indirilmesine yönelik mühendislik ve çevre projesi çalışmalarında, Elektrik Öz direnç Tomografi (EÖT) ve Yer Radarı (YR) uygulamaları önemli bir yere sahiptir. Capizzi vd. (2005) Batı Sicilya'nın Marsala şehrinde bazı yapıların bulunduğu yeraltı kazılarının yapıldığı belirli bir bölgedeki boşlukları tespit etmek ve konumlandırmak için EÖT ve YR metodolojilerini kullanarak göreceli modellemenin güvenilirliğini doğrulamayı amaçlamışlardır. Marsala'da yürütülen araştırmada YR verilerinden yeraltı boşluklarının ve kırıkların tespit edilebildiği, EÖT verileri ile boşluklara ait doğru şekil ve boyutların tanımlanabileceği görülmüştür. Aktürk (2010) tünel inşasından kaynaklanan deformasyonların boyutuna yönelik yapmış olduğu çalışmada Kızılay-Çayyolu metro hattı, Necatibey İstasyonu (Ankara) kazıları esnasında yüzeyde ve yeraltı yapılarındaki olası hasar tespiti ve inceleme alanındaki zemin türlerinin ayırt edilmesi amacıyla EÖT ve YR yöntemlerini uygulamıştır. EÖT sonuçlarından metro istasyonunun temel zemininin oldukça heterojen olduğu, Ankara kili ile Dikmen vadisi alüvyonu arasındaki öz direnç farkının da alüvyonun sahip olduğu yüksek kil içeriği nedeniyle yüksek olmadığı belirlenmiştir.

Sezer (2010) yapmış olduğu çalışmada Zonguldak-Hisarönü istasyonları arasında bulunan 55 no' lu demiryolu tünelinin sorunlu olan ilk 500 metrelik bölümünde duraylılık sorunlarını, kaplama malzemelerinin düşme nedenlerini, dolgu birimlerinin durumunu, kırık ve boşlukların yerlerini belirlemek amacıyla YR yöntemini kullanmıştır. Radar profilleri tünel tavanında ve tünelin geçmiş olduğu yüzey bölgelerinde (yeryüzünde) alınmıştır. Elde edilen radar profillerinden suya doygun alanlar, tünele etkiyen başlıca kırıklar, tünel dolgu kaplama birimleri ve kalınlık değerleri belirlenerek yüzeyden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Tünelin bazı bölgelerinde duraylılığı olumsuz yönde etkileyebilecek derin kırıkların varlığı belirlenmiştir.

Tünel projelerinin her aşamasında tahribatsız test yöntemlerinden biri olan YR, yüksek hassasiyet, yüksek ayrımlılık ve sığ algılama özelliği ile yeraltı suyu sızıntısının, tünel kaplama beton kalitesinin, tünellerdeki problemlili yerlerin tespit edilmesinde etkin bir şekilde uygulanmaktadır. Ergüven (2015) iki farklı tünel projesi kapsamında tünel imalatında kalite kontrolü yapmak amacıyla yer radarı yöntemini uygulayarak test ölçümleri almıştır. YR ölçümlerinden elde edilen verilerden 2B ve 3B'lu radar kesitleri oluşturularak tüneldeki sorunlu bölgeler tespit edilmiştir.

Çok Kanallı Yüzey Dalgası Analizi (ÇKYDA) tünel, köprü, baraj gibi yapıların oturacağı zemine ait özelliklerin, zemin sıvılaşma potansiyelinin, yeraltındaki boşluklarının tespitinde yaygın olarak kullanılan jeofizik yöntemdir. Durdağ (2018) yaptığı çalışmasında ÇKYDA analizlerini kullanarak tünelde meydana gelen boşluk yapısını, dolgu-zemin ayırımını, sismik hızlardan dinamik/elastik parametreleri ve zemin-kaya ayırımını tespit etmeyi amaçlamıştır. Tünel uygulamasına ait sonuçlar, kayma dalgası (S-dalgası) hız değerinin (V_s) önemli oranda düştüğünü ve dolgu tabakalarında benzer hız düşmesinin olduğunu göstermiştir. Buna karşın, dolgu malzemesinin ve tünelin altındaki doğal zemin daha yüksek V_s değerine sahiptir. Dinamik, elastik parametrelerden edinilen bilgilere göre, tünel ve dolguda su içeriği yüksek olan bölgeler daha belirgin bir şekilde gözlemlenmiştir.

Ghezzi vd. (2019) Roma yakınlarında UNESCO (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization) Dünya Mirası listesinde yer alan Hadrianus Villası'nın farklı bölgelerini birbirine bağlayan yeraltı tünel sisteminin bir bölümünün ana hatlarını çizmek için manyetik, paleomanyetik, yer radarı ve elektrik özdirenç araştırmaları gerçekleştirmiştir. Elde edilen radar profilleri ve elektrik özdirenç ölçüm sonuçlarının birleşik yorumuyla, yaklaşık 2.5 m derinlikte büyük bir tünelin varlığı tespit edilmiştir. Bununla birlikte tüneli kısmen dolduran toprak yığınının üzerindeki 180 cm'lik boşluğun tabanı yer radarı profillerinden belirlenmiştir.

Polonya'nın en eski sıra dağlarından Owl dağlarının altında inşa edilmiş olan gizli Nazi Tünellerinin bulunduğu yeraltı kasabasının keşfini doğrulamak için, Pasierb & Nawrocki (2020) tarafından YR ve EÖT yöntemleri kullanılmıştır. Yapılan araştırmada YR verileri yeraltı yapılarının ve geniş salonların varlığını gösterirken, EÖT verilerinde gözlenen son derece yüksek özdirenç belirtileri (anomalileri) yeraltı tünellerinin varlığını işaret etmektedir.

Tünellerde astar yapısından olan sızıntı temel mühendislik sorunlarından biridir ve ağır ekonomik kayıplarla birlikte can kaybına da neden olmaktadır. Jinan'daki (Çin) Kaiyuan Tüneli'ndeki sızıntıyı doğru bir şekilde tespit edebilmek için Lin vd. (2020) kapsamlı bir jeofizik araştırma gerçekleştirmişlerdir. Bu araştırma kapsamında EÖT, YR ve geçici elektromanyetik yöntem kullanmışlardır. Mevcut topografik haritalar, jeolojik profil haritaları ve jeolojik analiz sonuçlarına göre iki havza ve kırıklı bir bölge tespit edilmiştir. Geçici elektromanyetik analiz sonuçları, kırık bölgelerin varlığını doğrularken, yer radarı sonuçları kayanın içerisinde ve çevresindeki suyun yönünün değiştiği alan ile kaya parçalanmalarının olduğunu göstermiştir. Ayrıca yer radarı ile tespit edilen su

yönlendirme alanının konumunun, tüneldeki sızıntı noktalarının konumuyla örtüştüğü görülmüştür. Su yönlendirme alanlarının çoğu birinci ve ikinci astar kaplama arasındaki arayüzde yer almaktadır. Dolayısıyla, iki astar arasındaki dolgunun yeterince sıkı olmadığı durumlarda sızıntı noktası meydana gelmektedir. Ayrıca su geçirmez levha astarının hasar görmesi ve drenaj sisteminin bakımsız olması, yağışlı mevsimde tünelde su sızıntılarına neden olmaktadır. Bu sızıntılar, zamanla dayanımın (mukavemetin) azalmasını, beton yapıların mekanik özelliklerinin etkilenmesini ve genel yapının güvenliğinin tehlikeye girmesine sebep olmaktadır.

Çin'in Shenzen şehrinde Jigongshan dağ tüneli, Xiaping Belediyesi Katı Atık (KKA) Depolama sahasının altından geçmek üzere tasarlanmıştır. Tünelin sızıntı suyuna karşı dayanıklı hale getirilmesinde uygun önlemlerin alınması amacıyla jeolojik koşullar, depolama sahası içindeki ve altındaki sızıntı suyu dağılımı Feng vd. (2020) tarafından tespit edilmiştir. Zeminde ve yeraltında EÖT, geçici elektromanyetik yöntem ve sondaj çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Sızıntının boyutunun yanı sıra tünel üzerindeki etkilerini değerlendirmek için sızıntı seviyeleri belirlenmiş ve sızıntı suyuna karşı ilgili önlemler de sağlanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, sızıntı suyunun depolama alanındaki astar sistemi tarafından iyi bir şekilde kapatıldığı, ancak depolama sahasının altında sızıntı suyu akışı için yol görevi görebilecek su içeren çatlak bölgeleri tespit edilmiştir.

Nie vd. (2023) tarafından Çin'in Yunnan eyaletindeki Gaoligongshan tünelinin inşaatı sırasında çok sayıda su baskını ve çamur patlaması felaketi meydana gelmesinden dolayı, tünel inşaatı ve işletmesinde güvenliği sağlamak amacıyla jeolojik analiz, laboratuvar deneyleriyle birlikte jeofizik incelemeler gerçekleştirilmiştir. Gaoligongshan tünelindeki laboratuvar deneyleri aracılığıyla farklı derecelerde ayrışmaya sahip, suya doymuş granit numuneleri ile özdirenç arasında ilişki kurulmuştur. Bununla birlikte, pilot tünelin yan duvarında gerçekleştirilen uzun EÖT profillerinden, ana tüneldeki jeolojik yapının elektriksel özellikler açısından diğer katmanlardan büyük ölçüde farklılık gösterdiği ve su açısından zengin, ayrışmış granit bölgesi olduğu belirlenmiştir. Ayrıca su kütlesinin yüksek elektrik iletkenliği nedeniyle çevredeki kayalarla net bir elektriksel farklılık (kontrast) oluşturduğu tespit edilmiştir.

1.2. Amaç ve Kapsam

Ulaşım tünelleri, genel anlamda karayolu veya demiryolu gibi ulaşımın daha kolay, hızlı ve güvenli bir şekilde sağlanmasını amaçlayan, belli standart ve şartnamelere dayanarak yer altının kazılmasıyla oluşturulan yapısal geçitler olarak tanımlanabilir. Tünel yapılarında, zaman içerisinde hava şartlarına, doğal yer hareketlerine ve dış etkenlere bağlı olarak birçok problem ortaya çıkabilir. Ulaşımı kolaylaştıran tünellerin tavanlarında ve yan duvarlarında kullanılan betonun kalitesi, betondaki kırık/çatlaklar, su sızıntısından kaynaklı betonda meydana gelen boşlukların yanı sıra tünelin yer aldığı hat boyunca olan jeolojik yapı da büyük önem taşımaktadır. Tünel projelerinde, uygulama yapılacak saha ve çevresindeki doğal risklerin farklı yeraltı disiplinlerinin bir araya gelmesiyle belirlenmesi gerekmektedir. Meydana gelebilecek risklerin en aza indirilmesi amacıyla mühendislik jeolojisi, jeofizik ve jeoteknik çalışmalar detaylı bir biçimde gerçekleştirilmelidir.

Bu çalışma Bursa İli Osmangazi ilçesi Doğancı köyünde, inşası 2024 yılında tamamlanmış olan Doğancı tünelinin içerisinde, tünelin üzerinde ve tünel çıkış palye (belli yüksekliklerde şevlere uygulanan basamak sistemi) üzerinde gerçekleştirilen üç jeofizik (çok kanallı yüzey dalgası analizi, elektrik özdirenç tomografi ve yer radarı) uygulamalarını kapsamaktadır. Bu kapsamda, çalışmanın hedefi, yatay-düşey değişimler, zeminin su içeriği, S-dalgası hız (Vs) değişimi ile tünel çeperlerini etkileyebilecek unsurların (su gelimi, su içeriği, kırık, çatlak, vb.) tespitinin yapılması ve haritalanmasıdır.

Yöntem isimleri kısaltmalarının literatürdeki yaygın kullanımları “Yer Radarı (Ground Penetrating Radar, GPR)”, “Elektrik Özdirenç Tomografi (Electrical Resistivity Tomography, ERT)”, “Çok Kanallı Yüzey Dalgası Analizi (Multichannel Analysis of Surface Waves, MASW)” olmakla birlikte, bu tez çalışmasında Yer Radarı için “YR”, Elektrik Özdirenç Tomografi için “EÖT” ve Çok Kanallı Yüzey Dalgası Analizi için “ÇKYDA” şeklindeki Türkçe kısaltmaları kullanılmıştır.

2. TÜNELDE KULLANILAN JEOFİZİK YÖNTEMLER

2.1. Yer Radarı (YR) Yöntemi

"Yer Radarı" veya "Yeraltına nüfuz eden radar" terimi, öncelikle yer yüzeyinin altında gömülü nesnelerin veya arayüzlerin konumunu belirlemek için elektromanyetik dalgayı kullanan bir tekniği ifade etmektedir. Yer radarı, herhangi bir kazıya gerek kalmadan hızlı aramalar gerçekleştirmek için güvenli ve tahribatsız bir uygulama sağlamaktadır. Yer radarı ile gerçekleştirilen jeofizik araştırmalar, farklı jeolojik tabakaların belirlenmesi, arkeolojik kazılar, inşaat ve inşaat mühendisliği endüstrileri, ulaşım sistemleri, polis ve adli tıp sektörleri ve güvenlik/istihbarat güçleri için temel olan keşif çalışmalarının verimliliğini önemli ölçüde artırmıştır.

Yer radarı uygulamalarında uzay ve zamanın bir fonksiyonu olarak elektromanyetik alan örneklenir ve kaydedilir. Belirli bir sinüzoidal frekans f için, zaman ve uzaysal örnekleme aralıkları olan Δt ve Δx , Nyquist örnekleme kriterlerini karşılamak için uygun seçilmelidir.

$$\Delta t \leq \frac{1}{2f} \quad (1)$$

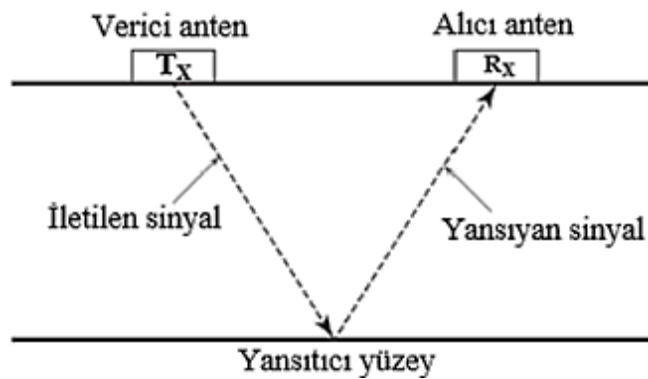
$$\Delta x \leq \frac{v}{2f} \quad (2)$$

Radar sinyallerinin seyahat süreleri nanosaniye (10⁻⁹) cinsinden belirlenmektedir. Çift yol seyahat zamanı olarak adlandırılan, iletilen ve yansıyan dalga arasındaki süre, yansıtıcı derinliğinin ve elektromanyetik dalga yayılım hızının bir fonksiyonudur (Neal, 2004; Jol & Smith, 1991). Yer Radarı, düşey eksen çift yol seyahat zamanı ve yatay eksen uzaklık (araştırma mesafesini) olmak üzere yeraltının sürekli bir profilinin elde edilmesini sağlar. Çift yol seyahat zamanı t , yayılma hızı v ile derinliğe (d) dönüştürülür:

$$d = \frac{v \times t}{2} \quad (3)$$

Yer Radarı sistemi, bir verici anten aracılığıyla yeraltına çok yüksek frekanslı elektromanyetik dalga enerjisinin iletimine dayanmaktadır (Jol & Smith, 1991; Holden vd.

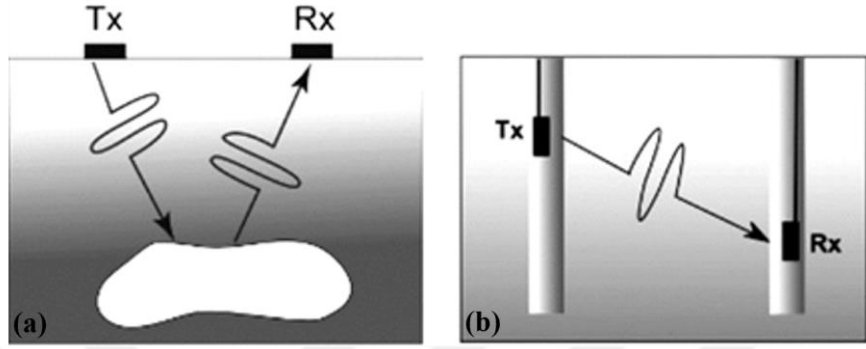
2002). Radar sinyalleri masif bir kütlenin içinden geçtiğinde, elektromanyetik dalgalarda saçılma meydana gelir. Radar sinyallerinin nüfuz edeceği derinlik anten frekansı ve uygulama alanındaki zeminin dielektrik özellikleri olmak üzere iki ana faktöre bağlıdır. Yer Radarı yöntemi genel olarak sismik yansıma yöntemi ile benzer özelliklere sahip olup hem tabaka sınırlarından hem de gömülü nesnelerden yansımalar kaydedilir. Farklı elektromanyetik özelliklere sahip gömülü tank, boşluklar, inşaata yönelik temel yapıları, sediman tabakalar, su tablası veya arkeolojik kalıntılar gibi nesnelerin aynı zamanda farklı dielektrik sabitli olmasından kaynaklı olarak Yer Radarı yansımaları oluşmaktadır. Ayrıca, anten seçiminde uygulama yapılacak sahadaki ortamın dielektrik özelliklerinin etkisi büyüktür. Elektromanyetik dalga enerjisinin seyahat ettiği ortam yoluyla yayılması, çeşitli malzeme özellikleri tarafından kontrol edilir. Bir malzemenin su içeriğine bağlı bir özellik olan dielektrik sabit (dielektrik geçirgenlik), elektromanyetik dalga hızını kontrol eden birincil faktördür (Comas vd. 2005). Elektromanyetik dalga yayıldıkça, farklı elektriksel özelliklere sahip malzeme veya materyal ile karşılaştığında dalga hızı değişmektedir (Neal, 2004). Radar sisteminde alıcı anten yansıyan elektromanyetik sinyali temsil ederken, dielektrik sabitindeki ani değişiklikler enerjinin bir kısmının yansıtılmasına neden olmaktadır. Verici (T_x) ve alıcı (R_x) antenlerden oluşan yer radarı sisteminde, verici antenler kısa süreli yüksek frekanslı radyo sinyalleri yayarlar (genelde polarize) ve sinyaller yeraltındaki herhangi bir nesneye/hedefe veya farklı dielektrik sabitine sahip tabaka sınırlarından yansıyarak alıcı antenlerce kaydedilirler (Şekil 1).



Şekil 1. Yer radarı sisteminde elektromanyetik dalga yayılımı

2.1.1. Yer Radarı Kuramı

Bu yöntemde iki ölçüm modu yaygındır. İlkinde yansıyan veya saçılan enerji tespit edilirken, ikincisinde ise, iletilen enerji üzerindeki etkiler gözlemlenmektedir (Şekil 2).



Şekil 2. Yer radarı ölçüm modları (a) yansıyan veya saçılan enerji (b) malzeme üzerinden iletilen enerji (Jol, 2008).

Yer radarı, elektromanyetik alanların dalga özelliklerinden yararlanmaktadır. Elektromanyetik (EM) alan teorisine dayanan yer radarı yönteminde Maxwell denklemleri, elektromanyetik alanların fizikini matematiksel olarak tanımlamaktadır (Jol, 2008). Matematiksel açıdan Maxwell denklemlerinin elektromanyetik alanları ve ilişkileri aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (4)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (5)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = q \quad (6)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (7)$$

burada $\vec{E}$ elektrik alan kuvveti vektörü (V/m), q elektrik yükü yoğunluğu (C/m^3), $\vec{B}$ manyetik akı yoğunluk vektörü (T), $\vec{J}$ elektrik akımı yoğunluk vektörü (A/m^2), $\vec{D}$ elektrik

yer değiştirme vektörü (C/m^2), t zaman (s) ve $\vec{H}$ manyetik alan yoğunluğu (A/m) olarak ifade edilmektedir.

Yer radarı için elektriksel ve manyetik özellikler önemlidir ve bunlar arasında kurulan ilişkiler bir malzemenin elektromanyetik alanlara tepkisini tanımlamaktadır. Bu bağıntılar şu şekilde verilir:

$$\vec{J} = \tilde{\sigma} \vec{E} \quad (8)$$

$$\vec{D} = \tilde{\epsilon} \vec{E} \quad (9)$$

$$\vec{B} = \tilde{\mu} \vec{H} \quad (10)$$

Elektriksel iletkenlik $\tilde{\sigma}$, bir elektrik alanı mevcut olduğunda serbest yük hareketini (elektrik akımı yaratan) karakterize eder. Dielektrik geçirgenlik $\tilde{\epsilon}$, bir malzeme yapısında sınırlandırılmış yükün bir elektrik alanının varlığına doğru yer değiştirmesini temsil eder. Yük yer değiştirmesi, malzemede enerji depolanmasıyla sonuçlanır. Manyetik geçirgenlik $\tilde{\mu}$, içsel atomik ve moleküler manyetik momentlerin, bir manyetik alana nasıl tepki verdiğini açıklar. Eğer herhangi bir serbest yük mevcutsa, bunlar uygulanan elektromanyetik alanının etkisi altında malzemenin içinden akarak (örneğin doymuş kumların gözenek sıvılarında olduğu) enerji kaybedecek ve sönümlenecektir. Gerçekte, tüm yeraltı malzemeleri iletken elektronlar ve iyonlar gibi bir tür serbest yüke sahiptir ve bu malzemeler, bir dereceye kadar elektromanyetik dalga sönümlemesi gösteren 'kayıplı dielektrikler' olarak tanımlanır. Başka bir durumda, yüksek derecede serbest yük içeren bir malzeme, iletim sürecinde elektromanyetik dalga enerjisinin çoğunluğunun ısı olarak kaybolacağı bir iletken olarak davranır. Yer Radarının yüksek iletkenliğe sahip ortamlarda (örneğin tuzlu koşullar ve yüksek kil içerikleri) etkisiz olmasının nedeni budur. Bir maddeye elektromanyetik yük uygulandığında depolayabildiği yükü gösteren nicelik dielektrik sabiti olarak ifade edilmektedir. Dielektrik sabiti,

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (11)$$

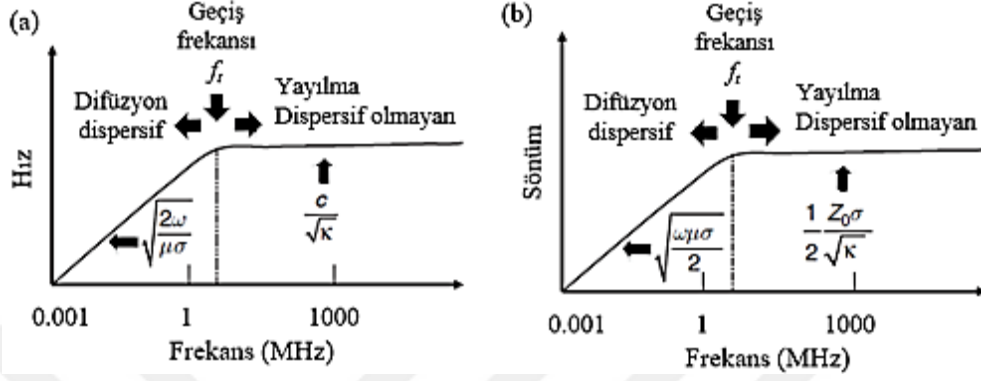
bağıntısı ile verilir. Burada v (cm/ns) elektromanyetik enerjinin maddeden geçiş hızı ve c (30 cm/ns=0.3 m/ns=300 km/s; ns: nanosaniye, s: saniyeyi ifade eder) ışık hızını ifade etmektedir. Radar frekanslarında, suyun dielektrik sabiti ~81 iken, kuru kayalar ~3–5 arasında değişir. Genel olarak kayaların dielektrik sabiti değerleri, içerdikleri su ile orantılı olarak ~6–30 arasında değişir. Tablo 1’de 100 MHz değerine göre bazı ortam ve jeolojik malzemelerin elektromanyetik hızları ve dielektrik sabitleri verilmektedir.

Tablo 1. Bazı materyallerin yayılım hızı ile dielektrik sabit değerleri (Davis & Annan, 1989’den düzenlenerek alınmıştır)

Materyal	Dielektrik sabiti, ϵ	Yayılım hızı (cm/ns)
Hava	1	30
Kuru kum	3 – 5	15
Kuru silt	3 – 30	5.5 – 17
Buz	3 – 4	15
Asfalt	3 – 5	15
Volkanik kül	4 – 7	11 – 15
Kireçtaşı	4 – 8	10 – 15
Granit	4 – 6	13
Buzul	4 – 5	13 – 15
Kömür	4 – 5	13 – 15
Şeyl	5 – 15	8 – 13
Kil	5 – 40	5 – 13
Beton	6	12
Doygun silt	10 – 40	5 – 10
Kuru kumlu kıyı bölgesi	10	10
Ortalama organik zengin toprak	12	8.5
Bataklık orman arazisi	12	8.5
Organik zengin tarım arazisi	15	8
Doygun kum	20 – 30	5.5 – 6.7
Tatlı su	80	3.3
Deniz suyu	81 – 88	3.3

Yer Radarı kuramında temel dalga alanı özellikleri hız (v), sönüm (α) ve empedans (Z) ile tanımlanmaktadır (Annan, 2003). Eğer sinüzoidal bir zaman değişimi olduğu varsayılırsa, sabit iletkenlik, geçirimsizlik ve dielektrik katsayıya sahip basit bir ortamdaki dalga özellikleri kolaylıkla tanımlanabilir. Hız ve sönümün sinüzoidal frekans olan f ’ye göre değişimi Şekil 3’te gösterilmektedir. Tüm dalga özellikleri benzer davranış sergilemektedir. Elektromanyetik dalga düşük frekanslarda dispersif yayılım göstererek difüzyon hareketi ile ilerlerken, yüksek frekanslarda dalga özellikleri frekansa bağlıdır ve dispersif olmayan yayılım gösterirler (Jol, 2008; Şekil 3a, 3b). Düşük frekanslarda dalga

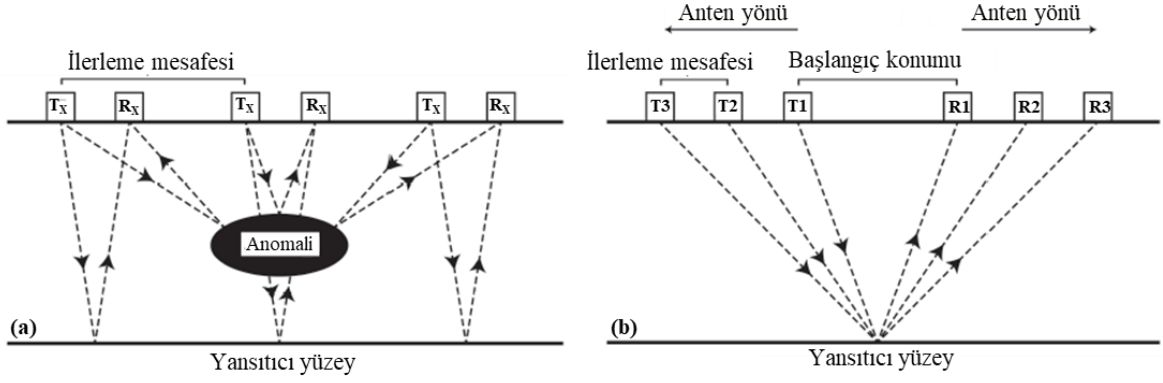
özellikleri, yayılma alanı davranışının göstergesi olan $\sqrt{\omega}$ 'ya bağlıdır. Eğer ε , μ ve σ frekanstan bağımsız ise yüksek frekanslarda, dalga özellikleri de frekanstan bağımsız hale gelir. Yüksek frekans davranışı YR için en önemli özelliktir (Jol, 2008).



Şekil 3. Dispersif olmayan fiziksel özelliklere sahip basit bir ortamda (a) hızdaki (b) sönümdeki değişim. c ve Z_0 boşluktaki hız ve empedansı ifade etmektedir (Jol, 2008).

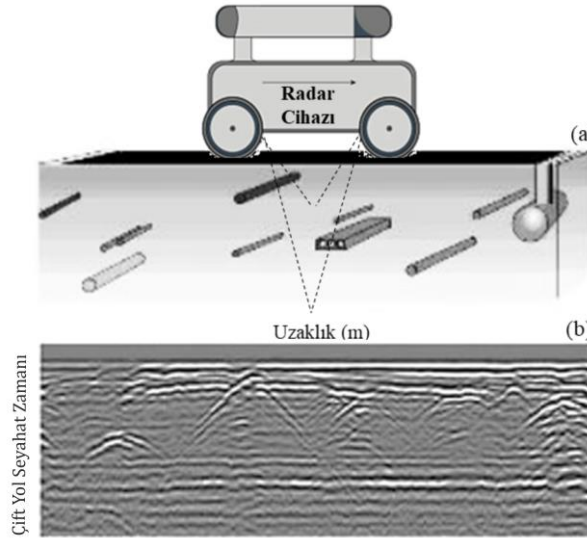
2.1.2. Yer Radarı Yönteminde Veri Toplama ve Veri İşlem

Yer Radarı yönteminde veri toplamada kullanılan çok sayıda anten düzeneği bulunmaktadır. Bunlardan en çok tercih edilenleri, sabit aralıklı ölçüm ve ortak orta nokta anten düzenekleridir. Sabit anten aralıklı ölçüm düzeneğinde, verici anten (T_x) ve alıcı anten (R_x) arasındaki uzaklık sabit tutularak ilerleme doğrultusunda hareket ettirilir (Şekil 4a). Bu düzendeki ölçümler tek kişi tarafından yapılabilirken, sabit aralıklı ölçümler hedefi yalnızca bir defa görmektedir. Ortak orta nokta ölçümünde ise, belirlenen sabit bir orta noktanın iki tarafına yerleştirilen T_x ve R_x antenler düzenli aralıklar ile birbirlerinden uzaklaştırılır (Şekil 4b). Ortak orta nokta ölçümleri genel olarak tabakaların hızlarını belirlemek için tercih edilir. Bununla birlikte, günümüzde korumalı antenler sabit aralıklı ölçümlerde, korumasız antenler ise ortak orta nokta ölçümlerinde kullanılmaktadır.



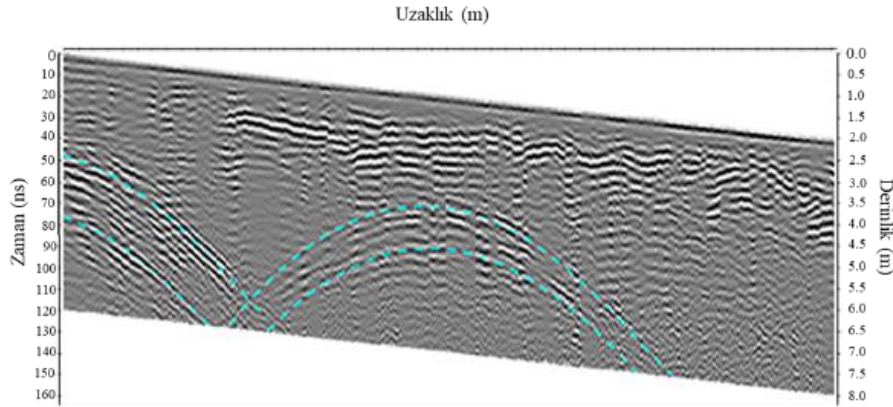
Şekil 4. Yer radarı veri toplamada kullanılan (a) sabit aralıklı ölçüm düzeneği (b) ortak orta nokta ölçüm düzeneği (Annan, 2001'den değiştirilerek alınmıştır)

Verici (T_x) ve alıcı (R_x) antenler özel malzemeden tasarlanmış muhafaza içerisine yerleştirilmiş yüzeyde ilerleyerek yeraltından verileri (radar izleri veya radagramlar) toplamakta ve bu izlerin binlercesi bir araya getirilerek 2-boyutlu radar profilleri oluşturulmaktadır. Ölçümler, bir profil üzerinde, önceden belirlenmiş ölçüm noktalarında gerçekleştirilir. Her ölçüm noktasındaki izler yan yana getirilerek radagram adı verilen radar kesitleri elde edilir (Şekil 5). Ayrıca, bir alan üzerinde çalışıldığında, arazide paralel profiller kullanılarak ölçümler alınır ve bu paralel profiller birleştirilerek üç boyutlu olarak görüntülenebilir (Kadioğlu, 2003).



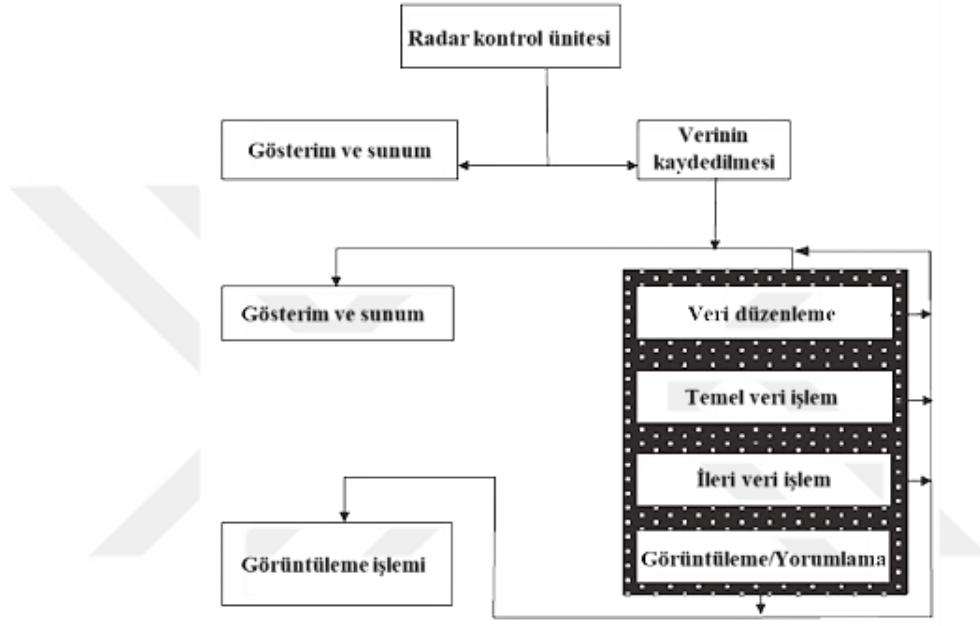
Şekil 5. Yer radarında (a) veri toplama (b) elde edilen radagram görüntüsü (URL-1, 2023).

Yer Radarı ekipmanının taşınabilir olması, çevreye herhangi bir zarar verici etki yapmaması, diğer jeofizik yöntemlerle karşılaştırıldığında çok daha hızlı veri toplanabilmesi ve yüksek çözünürlüklü yeraltı görüntülerin elde edilmesini sağlaması yöntemin en önemli üstünlükleridir. Bunun aksine, yüksek iletken bir ortamda derinlikle çözünürlük derecesinin azalması YR yöntemini kısıtlayan önemli bir nedendir. Radar etki derinliği ve herhangi bir derinlikteki hedef nesnenin belirlenebilmesi o bölgedeki malzeme özelliklerine bağlıdır. Dolayısıyla, yüksek iletkenliğe sahip malzeme yer radarı yönteminin etkinliğini zayıflatabilir. Yöntemin başarısı, aranan nesne ile çevre birim arasında yeterli dielektrik kontrastına bağlıdır. Yer Radarı yönteminde veri işlem, elde edilen sayısal verilerin yüksek kalitede yorumlanabilir görüntüler haline getirilmesini sağlar. Daniels'e (2004) göre veri işlem YR verilerindeki gürültülerin azaltılarak, sinyal/gürültü oranının artırılıp, kesitlerin görüntü kalitelerinin artırılması olarak tanımlanır. Mantıksal olarak, kaydedilen verinin sinyal/gürültü oranı araştırılan hedefin belirlenmesinde etkilidir. Çünkü YR verileri, genel olarak yüksek oranda gürültü içerir ve bu gürültüler kullanışlı sinyalleri maskeler. Dolayısıyla, bu gürültülerin en uygun ve doğru şekilde süzgeçlenmesi gerekmektedir. Gürültü zayıflatmak için kullanılan süzgeç algoritmaları farklı olabilmekle birlikte, süzgeçleme işlemi en uygun parametreler kullanarak ham veriye en az zarara uygulanmalıdır. YR verileri bazen yer üstünde bulunan nesnelerin (elektrik direkleri, güç hatları, metal çitler, ağaçlar, binalar vb.) neden olduğu gürültü sinyallerini (geri saçılma, kırılma, vb.) içerebilir (Şekil 6). Bu genel olarak radar profillerinde rastlanan hiperbollerin yeraltından mı, yoksa yer üstünden mi (elektrik hatları, metal çitler) olduğunu anlamanın ne kadar önemli olduğunu göstermektedir (Bano vd. 2000).



Şekil 6. Yer yüzeyindeki unsurlardan saçılmalar sonucu oluşan hiperboller (kesikli mavi çizgiler) içeren radar profili. Havada EM dalga hızı 0,3 m/ns' dir.

Yer Radarı verileri için uygulanan temel veri işlem adımları; veri düzenleme, temel veri işlem, ileri veri işlem ve görselleştirme/yorumlama olarak tanımlanmaktadır (Şekil 7). Yer Radarı verilerinde, doğrudan gelen dalgalar, hava dalgaları ve tünel yansımalarının yanı sıra çeşitli düzlemsel özelliklerden gelen çoklu yansımalar giderilebilmektedir. Genellikle radar verilerine, düşük frekanslı izlerin giderilmesi (Dewow), kazanç fonksiyonları ve çınlama (ringing) etkisinin kaldırılması işlemleri uygulanmaktadır.



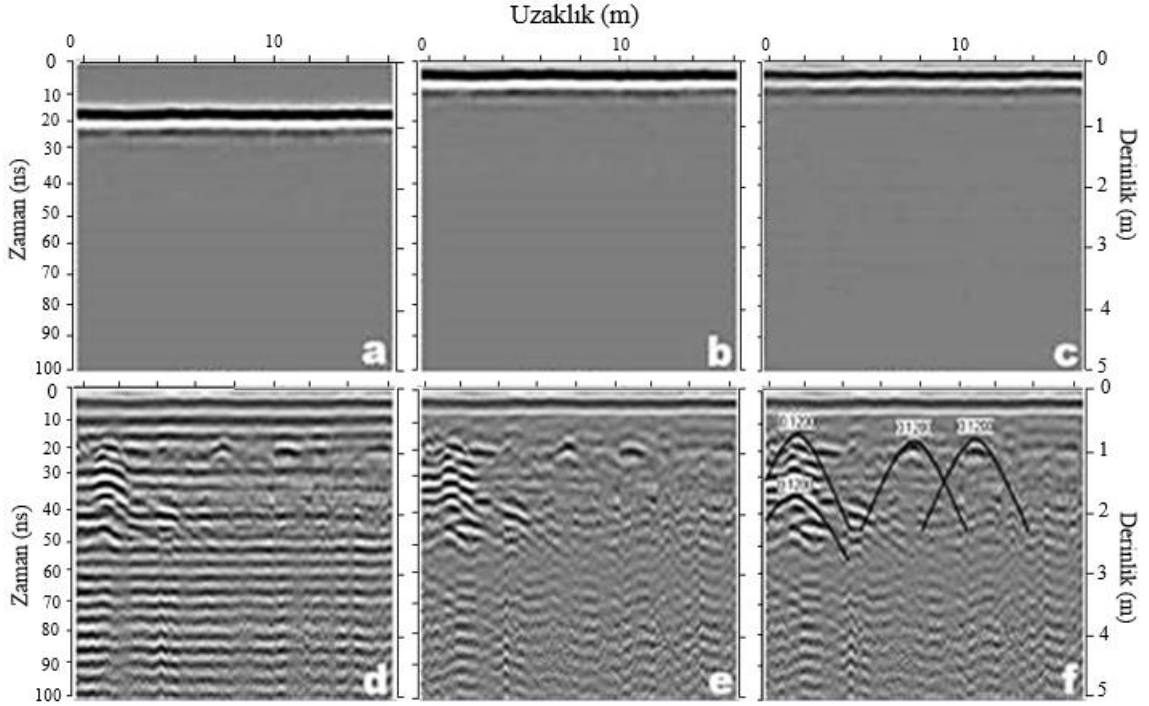
Şekil 7. Yer radarı veri işlem akış şeması (Jol'den (2008) düzenlenerek alınmıştır)

Yer radarı yöntemiyle elde edilen ham verilerin yorumlanması güç bir işlemdir. Dolayısıyla yorumlanabilir yüksek kalitede bir yer radarı kesitinin oluşması için bazı veri işlem adımları (Şekil 8) uygulamak gerekmektedir (Yalçın vd. 2009). Elde edilen radar verileri için uygulanan veri işlem basamakları şu şekilde özetlenebilir;

- i. Ham veri (Şekil 8a),
- ii. İlk zaman süzgeci: Bu süzgeç her iz için ayrı ayrı uygulanarak hava boşlukları en aza indirgenir ve diğer süzgeçleme işlemleri için ön hazırlık yapılır (Şekil 8b),
- iii. Akım düzeltmesi (Dewow): Bu süzgeç her iz için ayrı ayrı uygulanır. Tüm izlerden ortalama olarak doğru akım ile oluşmuş etkiler temizlenir (Şekil 8c),
- iv. Enerji Geciktirme: Bu süzgeç her iz için ayrı ayrı uygulanır. Süzgeç aktivitesi ile seçilen artış eğrisi “y” ekseninde tüm profile uygulanır ve enerjideki gecikmeler ortaya çıkartılır. Tüm gerçek değerler tabii ki kaybedilir. Ancak tüm profile uygulanan bu artış ve azalış

toplamda gerçekliği etkilememekte sadece görünürlüğü arttırmaktadır. Tüm işlemler sonucunda izlerdeki enerjiler sabit bir değer ile çarpılır (Şekil 8d),

- v. Ortalama değer temizleme (Background Removal): YR verisinde ilk varışlara paralel, yatay bantlar şeklinde olaylar gözlemlenmektedir. Bu olaylar YR cihazındaki sistem etkilerinden kaynaklanacağı gibi, TV, radyo ve cep telefonlarından gelen sinyallerden de kaynaklanabilmektedir. Bu etkiler genellikle uyumlu gürültünün genel bir çeşidi olan “ringing etkisi” olarak adlandırılmakta ve YR verisine yüksek geçişli süzgeçler uygulanarak ortadan kaldırılmaktadır (Şekil 8e),
 - vi. Hız analizi: Kırılma hiperbollerini ölçümlere uygulanarak hız değerleri okunur (Şekil 8f),
- Tüm bu işlemlere ek olarak gerek duyulduğunda radagramlara topografik düzeltme uygulanır.



Şekil 8. Örnek bir radar profili ve işlem basamakları. (a) ham veri; (b) zaman kayması düzeltmesi; (c) akım düzeltme; (d) enerji geciktirme; (e) ortalama değer temizleme; (f) hız analizi

2.2. Elektrik Özdirenç Tomografi (EÖT) Yöntemi

Elektrik özdirenç yönteminin, 2B’lu kesit oluşturmak için en fazla uygulanan şekli tomografi ölçüleridir. Bu yöntemle, yeraltındaki kayaçların özdirençlerine bağımlı olan

görünür öz direnç belirlenerek, yer içinin jeolojik yapısı elektrik (öz direnç) özelliğine göre haritalanmaktadır. Yöntem, maden, petrol, su, jeotermal, arkeolojik aramalar ve mühendislik jeolojisi problemlerinin çözümünde kullanılmaktadır (Candansayar, 2016). 2B'lu öz direnç görüntüleme son zamanlarda çoğunlukla klasik düşey elektrik öz direnç veya profil araştırmalarının karmaşık yeraltı jeolojisinin haritalanmasında yetersiz kaldığı durumlarda kullanılmaktadır (Griffiths & Barker, 1993). Bu yöntemin geliştirilmesiyle 1B'lu çalışmalarda karşılaşılan kısıtlamalar (örneğin, elektrotların aynı kotta olması) önemli oranda ortadan kalkmıştır (Aksu, 2006). Ayrıca, 2B'lu uygulamalar, ölçümlerin kısa sürede gerçekleştirilip değerlendirilmesiyle birlikte çözünürlüğün iyi derecede artmasına olanak sağlamıştır.

Sığ yapıların araştırılmasında genellikle yatay öz direnç taraması olarak adlandırılan profillemeye ölçüm tekniği kullanılmaktadır. Bu teknikte, seçilen elektrot dizilimine bağlı olarak her bir derinlik seviyesi için yapılan ölçümlerle yeraltının görünür öz direnç yapma kesiti (pseudo-section) elde edilir. Tek kanallı bir öz direnç cihazıyla bu şekilde bir ölçümün gerçekleştirilmesi çok zaman alacaktır. Oysa, sığ yapıların araştırılmasında hızlı, duyarlı ve kısa sürede ölçüm yapacak cihazlara gereksinim vardır. Tanımlanan özelliklere sahip olarak üretilen çok kanallı ve elektrotlu cihazlar, bu amaçlar doğrultusunda son yıllarda oldukça yaygın biçimde kullanılmaktadır (Dahlin, 2001).

Tablo 2. Bazı jeolojik birimlere ait öz direnç değerleri (URL-2, 2023)

Kayaçlar	Öz direnç Değeri (Ωm)	Kayaçlar	Öz direnç Değeri (Ωm)
Konglomeralar	$2 \times 10^3 - 10^4$	Andezit	$20 - 5 \times 10^7$
Kumtaşları	$1 - 6.4 \times 10^8$	Diyabaz	$20 - 5 \times 10^7$
Kireçtaşları	$50 - 10^7$	Gabro	$10^3 - 10^6$
Dolomit	$3.5 \times 10^2 - 5 \times 10^3$	Bazalt	$10 - 10^7$
Marn	3-70	Gnays	$7 \times 10^4 - 3 \times 10^6$
Alüvyon ve kumlar	10-800	Mermer	$10^2 - 2.5 \times 10^8$
Petrol kumları	4-800	Kuvarsit	$10 - 2 \times 10^8$
Granit	$3 \times 10^2 - 10^6$	Şeyl	$20 - 2 \times 10^3$
Diyorit	$10^2 - 10^6$	Anhidrit	10^9

Boşluklar, çatlaklı yapılar içerisinde bulundukları ortamdan daha yüksek öz direnç gösterirler. Bu tür jeolojik birimlerin yüksek öz direnç değerlerine sahip olması, bunların aranmasında jeofizik öz direnç yönteminin kullanımını olanaklı kılar (Başokur, 1999). Bazı jeolojik birimlere ait öz direnç değer aralıkları Tablo 2'de verilmiştir.

2.2.1. Elektrik Özdirenç Tomografide Temel Tanımlamalar

Elektrik özdirenç tomografide veriler genellikle profile dik 2B'lu geometri olarak adlandırılan dikey bir özdirenç kesitlerine dönüştürülür. Bir elektrik akımı I (Amper), düzgün kesiti A (m^2) ve uzunluğu L (m) olan doğrusal bir iletkeni akıyorsa, Ohm kanunu:

$$\Delta V = IR \quad (12)$$

bağıntısı ile verilir. Burada V iletkenin uçları arasındaki potansiyel fark (Volt) ve R iletkenin direncidir (Ohm). İletkenin fiziksel özelliği olan özdirenç (ρ) ise şu şekilde ifade edilir ve birimi Ohm-m (Ωm)'dir:

$$\rho = \frac{RA}{L} \quad (13)$$

Homojen ve izotropik bir yarı uzay göz önüne alındığında, akım elektrotları toprak yüzeyine yerleştirildiğinde elektriksel eşpotansiyeller yarım küre şeklindedir. Akım yoğunluğu J (Amper/ m^2) daha sonra tüm radyal yönler için aşağıdaki formülle hesaplanmalıdır:

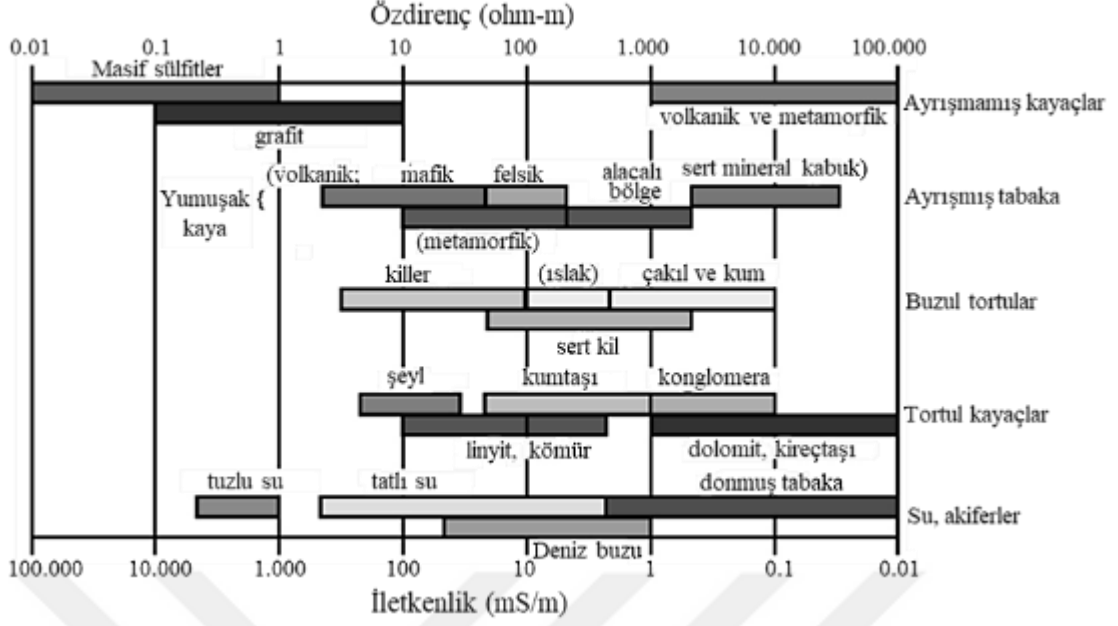
$$J = \frac{1}{2\pi r^2} \quad (14)$$

burada $2\pi r^2$, r yarıçaplı yarım kürenin alanıdır. Potansiyel V , aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$V = \frac{\rho I}{2\pi r} \quad (15)$$

2.2.2. Kayaçlar ve Minerallerin Elektriksel Özellikleri

Elektrik özdirenç kavramı, doğal kayaların ve çökeltilerin bir özelliğidir ve bir dizi faktöre bağlı olarak büyük ölçüde değişebilir. Çeşitli minerallerin miktarı ve birbirine bağlılığı önemli bir rol oynar. Şekil 9'da bazı materyallere ait tipik elektriksel özdirenç aralıkları verilmiştir.



Şekil 9. Bazı kayaçlar, mineraller ve zeminler için elektriksel özdirenç değer aralıkları (Palacky'den (1988) düzenlenerek alınmıştır).

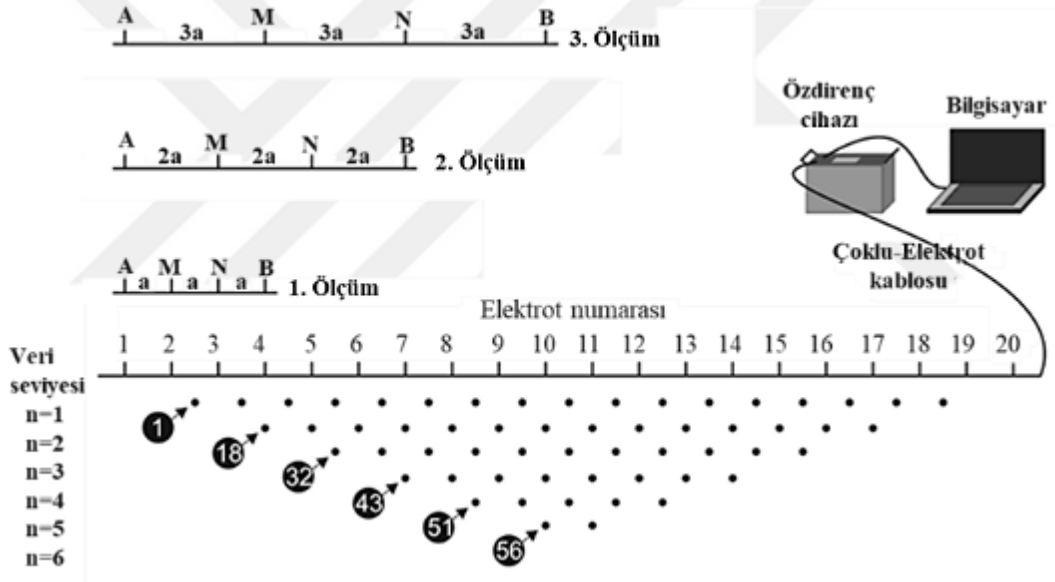
Metalik cevherler dışında, zemin ve kayaçları oluşturan mineraller iletken değildir. Bu sebeple zemin ve kayaçların özdirençleri üzerinde öncelikle gözenek suyu miktarı, gözenekteki suyun özdirenci ve gözenek yapısı etkilidir. Suyun özdirenci, çözünmüş iyonları sağlayan tuz doygunluğuna bağlıdır. Tatlı yeraltı suyunun özdirenci genellikle 10-100 Ω m aralığında iken, tuzlu su 100-1000 kat daha fazla iletken ve dolayısıyla özdirenci 0.1 Ω m değerine kadar düşebilir.

2.2.3. Elektrik Özdirenç Tomografi Yönteminde Veri Toplama ve Veri İşlem

Elektrik Özdirenç Tomografi (EÖT) yönteminde yeraltı 1B, 2B ve 3B'lu olarak incelenebilmektedir. İleri teknolojilerin kullanılmasıyla bu yöntem 2B ve 3B uygulamalarda oldukça iyi sonuçlar vermektedir. Gelişen teknoloji ile, bir doğrultu boyunca sondaj-profil ölçüsü alınmasına olanak sağlayan çok elektrotlu ölçüm teknikleri geliştirilmiştir (Özdemir, 2008). Çok elektrotlu özdirenç ölçü yöntemine ilişkin ilk çalışmalar Van Overmeeren & Ritsema (1988), Griffiths vd. (1990) ve Dahlin (1996) tarafından yapılmıştır. Bu sistemler, özdirenç cihazı, bilgisayar, elektrotları denetleyen bir anahtar devresi, elektrot kabloları ile bağlantıları ve elektrotlardan oluşmaktadır (Van Overmeeren & Ritsema, 1988; Griffiths vd. 1990; Griffiths & Barker, 1993; Dahlin, 2001).

Çok elektrotlu öz direnç yönteminin düzeneği, yere eşit aralıklarla çakılan akım ve potansiyel elektrotları ile, bu elektrotların bağlantısını sağlayan çoklu (birçok tel içeren) bir kablodan oluşmaktadır. Öz direnç ölçüm cihazı içerisinde, önceden tanımlanmış ölçü alım sıralamasına göre akım ve potansiyel elektrotları değiştiren ve saklayan bir hafızası vardır. Akım (A, B) ve potansiyel (M, N) elektrotlarının farklı dizilimleri ile karmaşık bir sondaj-profil kesiti, kablounun toplam boyuna bağlı olan en büyük araştırma derinliği ile elde edilmektedir (Bernard vd. 2004). Elektrot sayısı, çalışmanın amacına ve çalışılacak sahaya göre seçilmektedir. Ayrıca paslanmaz çelik malzemeden üretilmiş olan elektrotlar ve kablo sistemin en pahalı ekipmanlarıdır (Özdemir, 2008).

Çok elektrotlu ölçümde, belirlenen elektrot dizilimi için sıralı bir şekilde ölçüler alınır (Şekil 10). Bu özellik toplam ölçü süresini önemli oranda düşürmektedir.

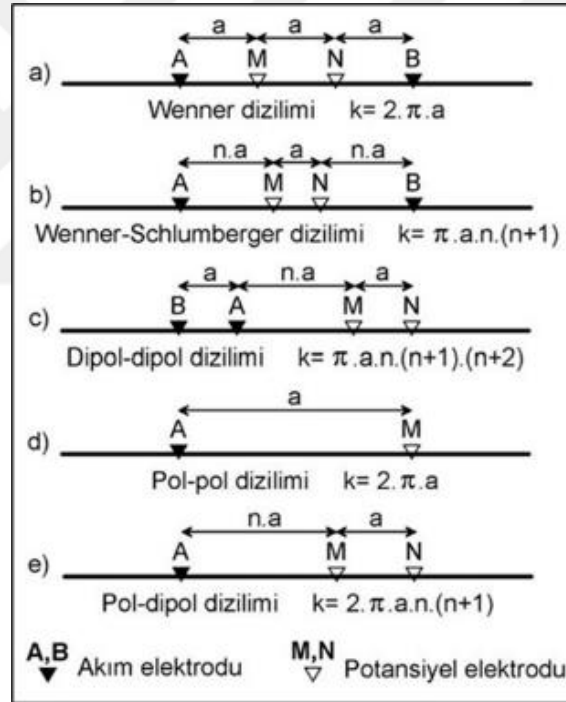


Şekil 10. 2B ve 3B'lu elektrik öz direnç tomografi verisinin toplanması (Griffiths & Barker'dan (1993) düzenlenerek alınmıştır)

Elektrik öz direnç tomografi yönteminde farklı jeolojik problemlerin çözümüne yönelik ölçüm teknikleri geliştirilmiştir. Bunlar, yeraltında düşey yöndeki değişimi izlemek için düşey elektrik sondaj (DES), yanal süreksizliklerin araştırılması için profil (yatay kaydırma), hem yanal hem de düşey yöndeki değişimlerin belirlenmesi amacıyla geliştirilen sondaj-profil ölçüm teknikleridir. Çok elektrotlu ölçüm cihazları, hızlı ve pratik ölçüm alma olanağı sağladığı için çok elektrotlu ölçü alımında sondaj-profil en çok tercih

edilen ölçü tekniği olmuştur. Bu teknikte elde edilen veriler, yeraltının düşey ve yatay yönde 2B'lu öz direnç yapısı hakkında bilgi vermektedir. Bu teknik ile hesaplanan görünür öz direnç değerleri yardımıyla yapma-kesit (psedou-section) oluşturularak nitel yorum yapılabilir. Görünür öz direnç yapma kesiti verilerinin ters çözümüyle nicel yorum yapılabilmektedir. Belli noktalarda ve belli AB/2 değerleri için ölçüm alınarak doğrudan sondaj profiline ait değerler elde edilmiş olur. Bu veriler kullanılarak incelenen alan için yapma kesit elde edilmektedir (Candansayar, 2005).

Mühendislik amaçlı uygulamalarda elektrik öz direnç ölçümleri için akım ve potansiyel elektrotlarının yerlerinin değiştirilmesiyle oluşturulan özel dizilimler kullanılmaktadır (Şekil 11). Araştırmanın amacına uygun bir biçimde karşılaşılan jeolojik problem dikkate alınarak en etkili sonucu vermesi beklenen dizilim seçilir.



Şekil 11. Elektrik öz direnç ölçümlerinde kullanılan elektrot dizilim türleri (URL-3, 2023)

Çok elektrotlu öz direnç tomografi yöntemiyle elde edilen görünür öz direnç verileri ters çözüm işlemine tabi tutulur. Ölçüm yapılan alan için gerçek öz direnç dağılımının 2B'lu modellere dönüştürülmesi için farklı ters çözüm teknikleri kullanılmaktadır. Bu teknik verinin değerlendirileceği yazılım programına göre değişiklik göstermektedir

(Yıldırım, 2021). Ters çözüm sonucu oluşturulan 2B'lu modellerden yanal ve düşey yöndeki öz direnç dağılımları değerlendirilmektedir.

2.3. Çok Kanallı Yüzey Dalgası Analiz Yöntemi (ÇKYDA)

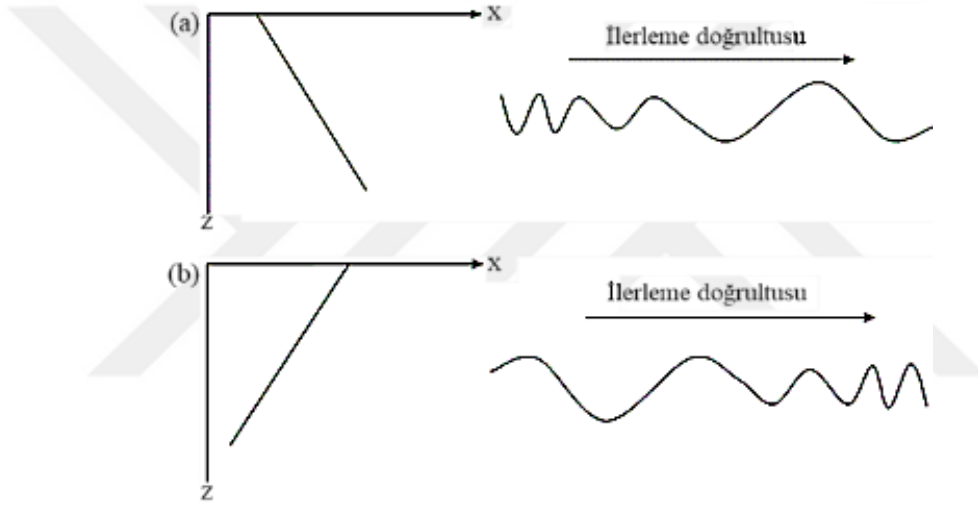
Mühendislik jeofiziği problemlerinin çözümünde ve jeoteknik amaçlı çalışmalarda S-dalgası hızı (V_s) oldukça önemli bir yer tutmaktadır. V_s 'nin derinlikle 1B'lu değişimini hesaplamak amacıyla kırılma yöntemi veya kuyu içi sismik yöntemler de kullanılmaktadır. Kırılma yöntemi hız terslenmesi (yüksek hızlı bir katmanın altında düşük hızlı katman bulunması) olan ortamlarda, düşük hızlı tabakaları görüntülenemez. Kuyu içi yöntemler ise, sondaj açılması ve gerekli teçhizatın bulunması koşullarında uygulanabilmektedir. Nazarian & Stokoe (1983) tarafından, yakın yüzey S-dalgası hız profillerini oluşturabilmek için Yüzey Dalgalarının Spektral Analizi (YDSA) yöntemi geliştirilmiştir. Sadece bir alıcı çiftinin kullanıldığı yöntemde farklı araştırma derinliklerine ulaşmak istendiğinde, alıcılar arası mesafenin ve alıcı ile kaynak arası mesafenin pek çok kez değiştirilmesi yöntemin dezavantajlarıdır. YDSA yöntemine alternatif olarak Park vd. (1999) tarafından Çok Kanallı Yüzey Dalgası Analizi (ÇKYDA) geliştirilmiştir. ÇKYDA yönteminde birden fazla alıcının tek seferde kullanılmasıyla kolayca kayıt alınabilmektedir. Yöntemin temeli, tabakalı yer altı modeli için Rayleigh dalgalarının oluşumunda etkin olan S-dalgası hızına dayanmaktadır.

ÇKYDA yönteminde S-dalgası hız profillerini elde etmek için dönüşmüş faz hızları ile derinliğe bağlı 1B'lu V_s hız fonksiyonu kullanılmaktadır. (Park vd. 2000). Gürültü kaynağı etkin bir şekilde kontrol edilebildiğinden, sinyal/gürültü oranı yüksek derecede sağlanabilmektedir. ÇKYDA yönteminin uygulaması aşamaları, sırasıyla, veri toplama, dispersiyon eğrisinin elde edilmesi ve ters çözümünden 1B'lu V_s derinlik profilinin belirlenmesini içermektedir.

2.3.1. Dispersiyon, Faz ve Grup Hızı

Yüzey dalgalarının en önemli fiziksel özelliklerinden birisi tabakalı ortamda dispersif olmalarıdır. Rayleigh dalgalarının dispersiyon göstermesi için izotropik yarı sonsuz bir ortama ihtiyacı yoktur, ancak Rayleigh dalgaları haricindeki tüm yüzey dalgaları, tabakalı yarı-sonsuz bir uzayda frekansa bağlı olarak yer yüzeyi boyunca görünür hız ile

dispersiyon gösterebilirler. Hemen hemen her sismik kaynak, sürekli bir frekans spektrumu içeren dalgaları harekete geçirir ve her harmonik bileşen, faz hızı $c(\omega)$ adı verilen bir hıza sahiptir (Lay & Wallace, 1995). Derinliğin artmasıyla hızdaki artışın ölçüsüne bağlı olarak, dalgaların yayılma hızları arasındaki fark o derece artacaktır. Derinlikle beraber hızın arttığı tabakalı ortamlarda, büyük periyotlu (veya dalga boylu) dalgalar daha derine nüfuz ederek kısa periyotlu dalgalardan önce kaydedilirler. Bu durum “normal dispersiyon” olarak tanımlanmaktadır. Bunun aksine, tabakalı ortamda artan derinlikle hız azalıyorsa kısa periyotlu dalgalar daha önce kaydedilirler ve bu duruma “ters dispersiyon” denir (Şekil 12).



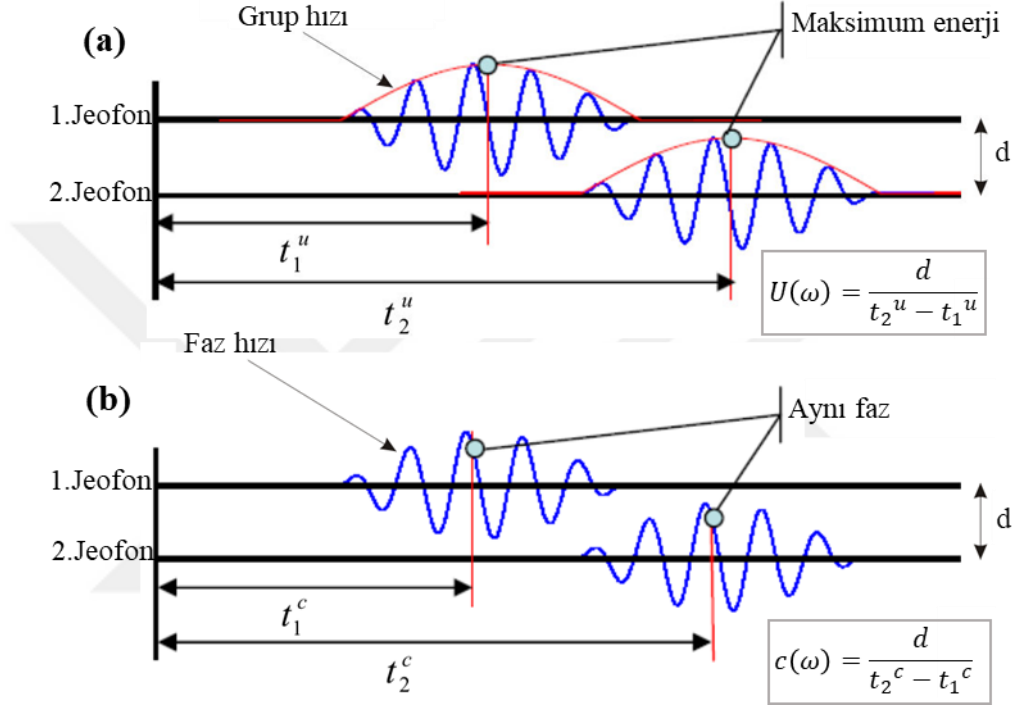
Şekil 12. Yüzey dalgalarının derinlikle hız değişimine bağlı olarak; a) normal dispersiyon b) ters dispersiyon (Lay & Wallace'dan (1995) değiştirilerek alınmıştır)

Yüzey dalgalarının dispersiyon özelliğinden dolayı, faz ve grup hızı olarak iki ayrı hız kavramından söz edilmektedir (Lay & Wallace, 1995). Faz hızı $c(\omega)$, bir dalga treni üzerindeki herhangi bir noktadaki frekans bileşeninin hızını ifade ederken, grup hızı $U(\omega)$, bu dalga zarfının hızını tanımlamaktadır (Şekil 13). Yarı sonsuz ortamdaki faz $c(\omega)$ ve grup hızı $U(\omega)$ ifadeleri şu şekilde verilir:

$$c(\omega) = \frac{\omega}{k(\omega)} \quad (16)$$

$$U(\omega) = \frac{\partial \omega}{\partial k(\omega)} \quad (17)$$

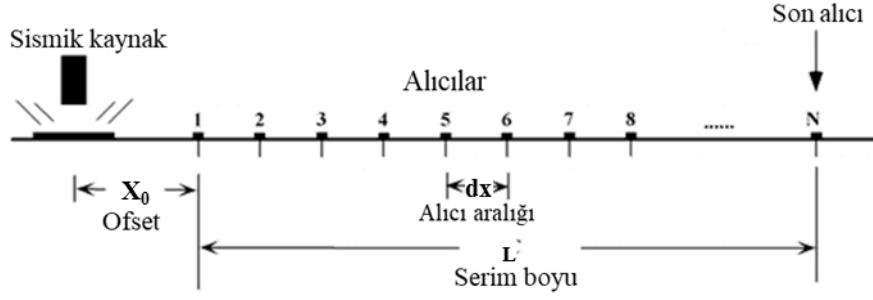
burada $\omega = 2\pi f$ açısal frekansı ifade eder. Faz hızı ve grup hızı, açısal frekans ω 'ya ve dalga sayısı k 'ya bağlıdır.



Şekil 13. Her bir frekans bileşeni için (a) grup hızı (b) faz hızı hesabı (Park vd. 2007).

2.3.2. Çok Kanallı Yüzey Dalgası Analizinde Veri Toplama ve Veri İşlem

ÇKYDA yönteminde veri toplama düzeneği sismik kırılma yöntemi ile hemen hemen aynıdır. Sadece veri toplamada gerekli olan parametre seçimleri sismik kırılmadan farklı ve daha avantajlıdır (Park vd. 1999; Xia vd. 1999; Miller vd. 1999). ÇKYDA veri toplamada kaynak olarak çoğunlukla balyoz, patlatma, vibroseis veya ağırlık düşürme kullanılmaktadır. Ölçüm düzeneğinde, tek bir profil üzerine doğrusal şekilde sabit aralıklarla alıcılar dizilir ve kaynaktan gönderilen enerji yardımıyla zaman-uzaklık (t-x) verisi kaydedilir (Şekil 14).



Şekil 14. Çok kanallı yüzey dalgası analizinde beton üzerinde kullanılan ölçüm düzeneği (Xia'dan (2006) düzenlenerek alınmıştır)

Veri toplamada, jeofon aralığı, profilin serim uzunluğu ve ofset mesafesinin seçimi dispersiyon eğrisini ve araştırma derinliğini etkileyen bu parametrelerin doğru bir şekilde belirlenmesi büyük önem taşımaktadır (Dikmen vd. 2009).

ÇKYDA'nın arazi düzeneklerinde dalga boyu ile inceleme derinliği ve yüzey dalgalarının dispersif özelliklerini yüksek kalitede elde edebilmek için aşağıdaki temel kabuller yapılmaktadır (Xia vd. 1999).

Yüzey dalgalarının oluşabilmesi ve dispersif özelliklerinin kaydedilebilmesi için, çoğu durumlarda en azından maksimum dalga boyunun yarısı kadar mesafeye ihtiyaç vardır. Dolayısıyla yakın ofsetin seçimi önemlidir (Karşlı, 2018).

$$X_0 \geq \lambda_{max}/2 \quad (18)$$

Homojen bir ortamdaki maksimum nüfuz derinliğinin en uzun dalga boyunun yarısı kadar olduğu genel bir kabuldür;

$$Z_{max} \approx \lambda_{max}/2 \quad (19)$$

$$\lambda_{max} = V_{max}/f_{min} \quad (20)$$

Hakim yüksek frekans bileşenlerini uzak alıcılarda kaydetmek için, kaynaktan en uzaktaki alıcı mesafesi (profil boyu, $D=X_0+L$) inceleme derinliğinin iki katı olacak şekilde seçilir (Karşlı, 2018);

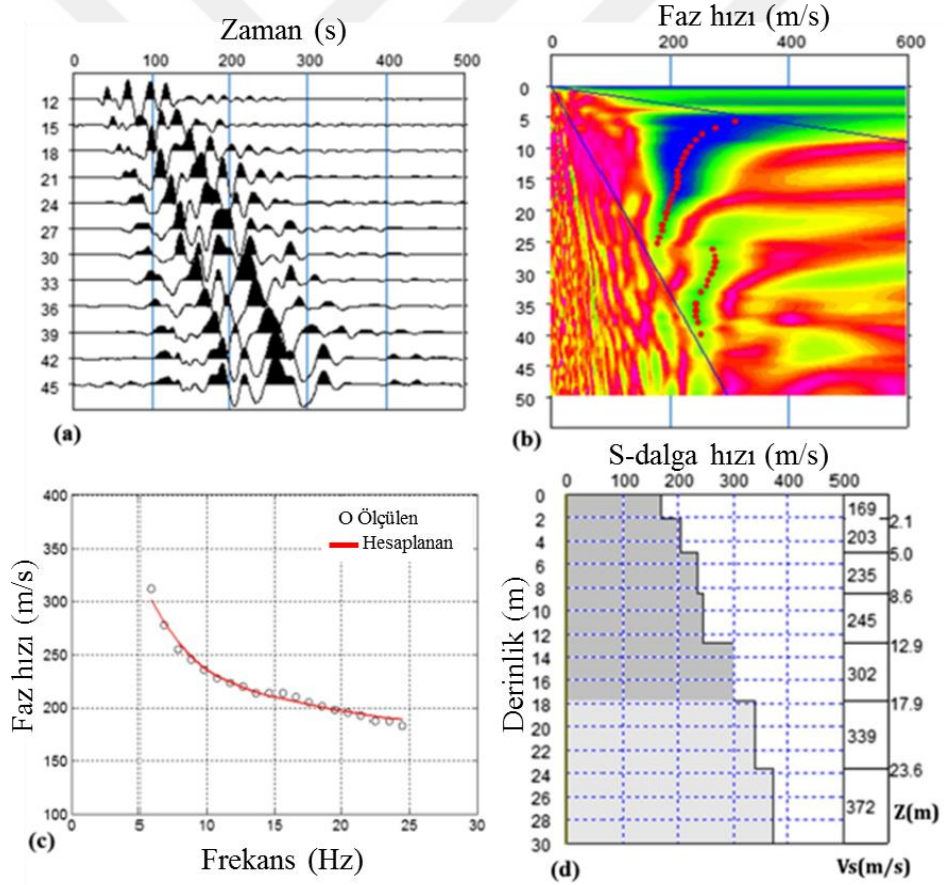
$$D \approx 2 * Z_{max} \quad (21)$$

$$P \approx \lambda_{max} \quad (22)$$

Uzaysal katlanmadan kaçınmak için, alıcı aralığı en kısa dalga boyunun yarısından daha büyük olmamalıdır (Karşlı, 2018);

$$\Delta x \leq \lambda_{min}/2 \quad (23)$$

ÇKYDA yöntemiyle toplanan verinin veri işlem adımını, dispersiyon görüntüsünün elde edilmesi ve dispersiyon eğrisinin hesaplanması oluşturmaktadır (Şekil 15).



Şekil 15. ÇKYDA yönteminde veri işlem adımları (Karşlı vd. (2024)'den düzenlenerek alınmıştır). (a) Veri toplama, (b) frekans-hız dönüşümü, (c) temel mod dispersiyon eğrisi ve (d) 1B Vs-derinlik profili

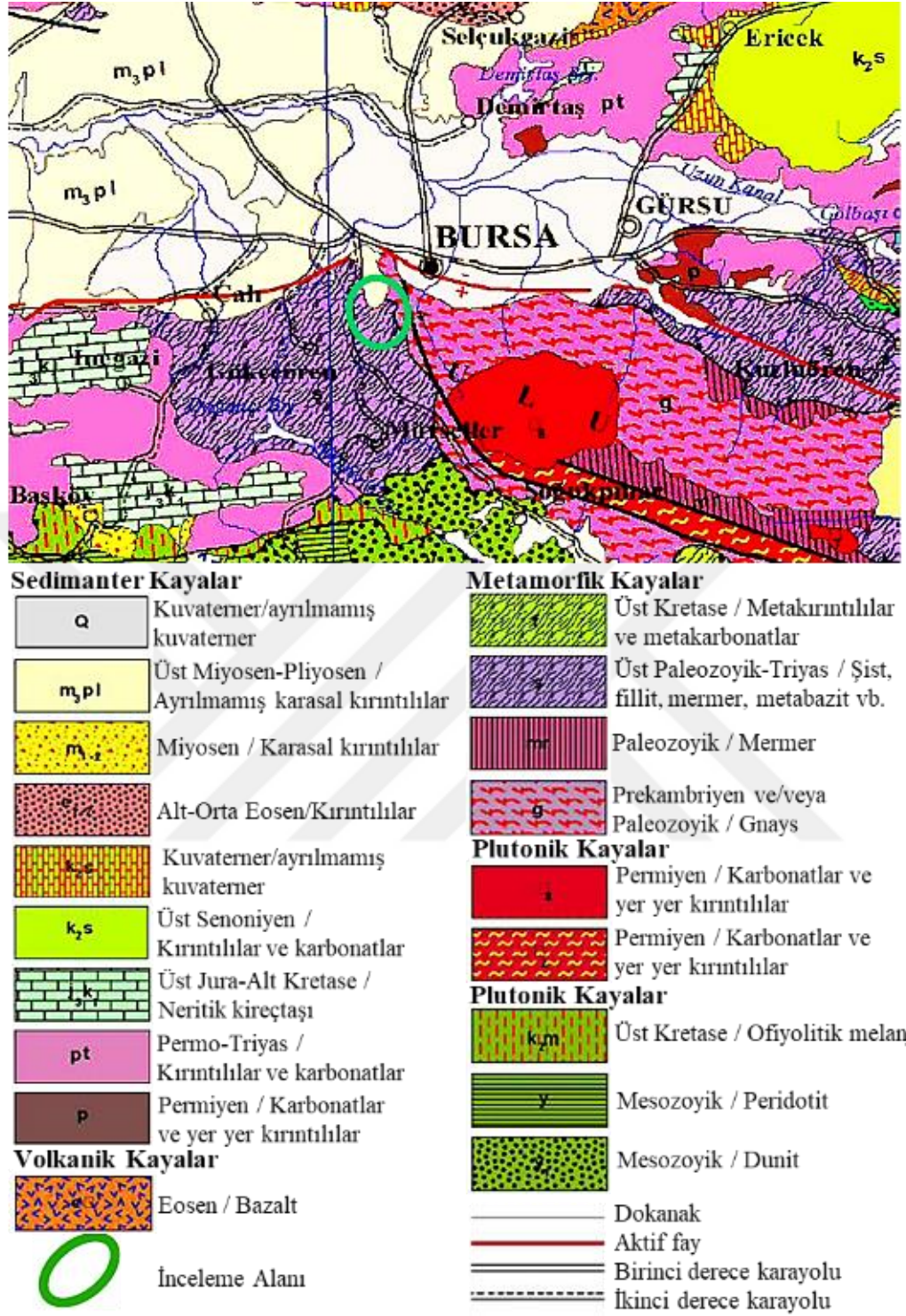
Dispersiyon görüntüsünün belirlenmesinde farklı araştırmacılar tarafından geliştirilen sayısal yöntemler kullanılmaktadır (Horike,1985; Thorson & Clearbout, 1985; Okada, 2003; Zywick, 1999; Foti, 2000; Hebel, 2001; Yoon & Rix, 2004; Park vd. 2004). Bu sayısal yöntemler, frekans-dalga sayısı (f-k), eğimli-yığıma (τ -p) dönüşümü, faz kaydırma veya uzaysal özilişki (UÖ) olarak sıralanabilir. Son olarak, 1B'lu S-dalgası hız yapısını elde etmek için, frekans dalga sayısı analizleriyle hesaplanan dispersiyon eğrilerine ters çözüm işlemi yani ölçülen jeofizik parametrelerden bir yer altı modeli elde etme işlemi uygulanmaktadır.



3.2. Tünel Hattı Çevresinin Genel Jeolojisi

Bölgede yüzeyleyen kayaçların stratigrafik dağılımı incelendiğinde, Trias öncesi metasedimanter Kalabak Formasyonu, Çamlık Metagranodiyoriti ve Manyas Grubu birimlerini içeren ve Karakaya Karmaşığın ait metamorfik kayaç topluluklarından oluşan Kazdağ Grubunun egemen olduğu görülmektedir (Bingöl vd. 1973). Tektonik olarak Kazdağ Grubu Metamorfikleri Karakaya Karmaşığının Nilüfer birimi ile örtülmüştür (Okay vd. 1990). Bununla birlikte, Jura-Orta Kretase yaşlı birimler olan Bayırköy Formasyonu üzerine uyumsuz olarak, Bilecik Kireçtaşı ve Vezirhan formasyonu gelmiştir. Diğer yandan, Karakaya Karmaşığında yer alan Hodul birimi Çamlık Metagranodiyoriti (Balıkesir-Havran kuzeydoğusundaki stratigrafik temel) üzerine uyumsuz olarak gelmiştir. Tüm bu istif Tersiyer yaşlı diğer birimler ile örtülmektedir. Tersiyer biriminin üzerine aşılal uyumsuzluk ile Kuvaterner yaşlı yamaç molozu ve alüvyon birimi gelmektedir (Şekil 17).

Nilüfer birimi Kuzey-Batı Anadolu'da Alt Karakaya Karmaşığının üyesidir ve foliasyonlu, metapsamik (metakumtaşı), metapelit (sleyt, fillit, şist) ve metakarbonat (metakireçtaşı, metadolomit, mermer) seviyeleri ile bu kayaçlarla ardalanmalı ve bozuşmuş, yeşil, yer yer tabakalanmalı ve kalın Karakaya Karmaşığının birimlerinden Hodul birimi, metamorfik bir temel üzerinde yer alan kumtaşı, şeyl, silttaşı; Bursa-Demirtaş yöresinde arkozik kumtaşları ile ara katkılı (meta-) pelitik (çamurtaşı, şeyl, sleyt, silttaşı ve metakireçtaşı blokları içermektedir (Akyüz & Okay, 1998). Orhanlar birimi, Balıkesir-Danişment mevkiinde yer almakta olup, birimin litolojisini sarı-kahve ve yeşil renkli kumtaşları, bol miktarda metamorfik ve volkanik kayaç parçaları oluşturmaktadır. Bu birim, Bursa-Orhaneli mevkiinde, metakireçtaşı blokları ve pelit, şeyl ara katkıları içeren kumtaşlarından oluşmaktadır. Diğer yandan, olistostromal kireçtaşı blokları içeren spilitik bazalt ve kırıntılılardan (çamurtaşı, şeyl, kumtaşı) oluşan Çal birimi Balıkesir-Çal köyünde yüzeylemektedir (Şanlıyüksek, 2007).



Şekil 17. İnceleme alanı ve çevresinin genel jeoloji haritası (MTA, 1/500 000 ölçekli).

İnceleme alanında yol güzergahı boyunca yaşlıdan gence doğru sırasıyla, Geç Permien-Orta Triyas yaşlı Karakaya Karmaşığı, Kuvaterner yaşlı yamaç molozları ve

dere alüvyonları geçiş göstermektedir. Karakaya Karmaşığı, yol güzergahı üzerinde en yaygın gözlenen birim olup inceleme alanının temelini oluşturmaktadır. Rekrystalize Kireçtaşı, Fillit, Grovak, Diyabaz, Şist, Kloritşist ve Grafitikşist birimlerinden ve bu kaya birimlerinin fiziksel şartların etkisiyle tamamen ayrışması neticesinde oluşmuş ayrışma ürünlerinden meydana gelmektedir (Şekil 18).

ÜST SİSTEM	SİSTEM	SERİ	FORMASYON	SİMGİ	LİTOLOJİ	AÇIKLAMALAR
			ÜYE			
SENOZOYİK	KUVATERNER		Alüvyon	Qal		Blok ve çakıllardan kum, ince kum, silt ve kil boyutunda tutturulmamış malzemeden oluşmaktadır.
			Yamaç Molozu	Qym		Kil, silt, kum, çakıl ve blok boyutunda malzemelerden meydana gelmektedir.
PALEOZOYİK	PERMİYEN - TRIYAS	Geç Permiyen – Orta Triyas	Karakaya Karmaşığı	TRkk		Rekrystalize kireçtaşı, Fillit, Grovak, Diyabaz, Şist, Kloritşist ve Grafitikşist birimlerinden meydana gelmektedir.

Şekil 18. İnceleme alanının genelleştirilmiş stratigrafik kesiti (KGM, 2019)

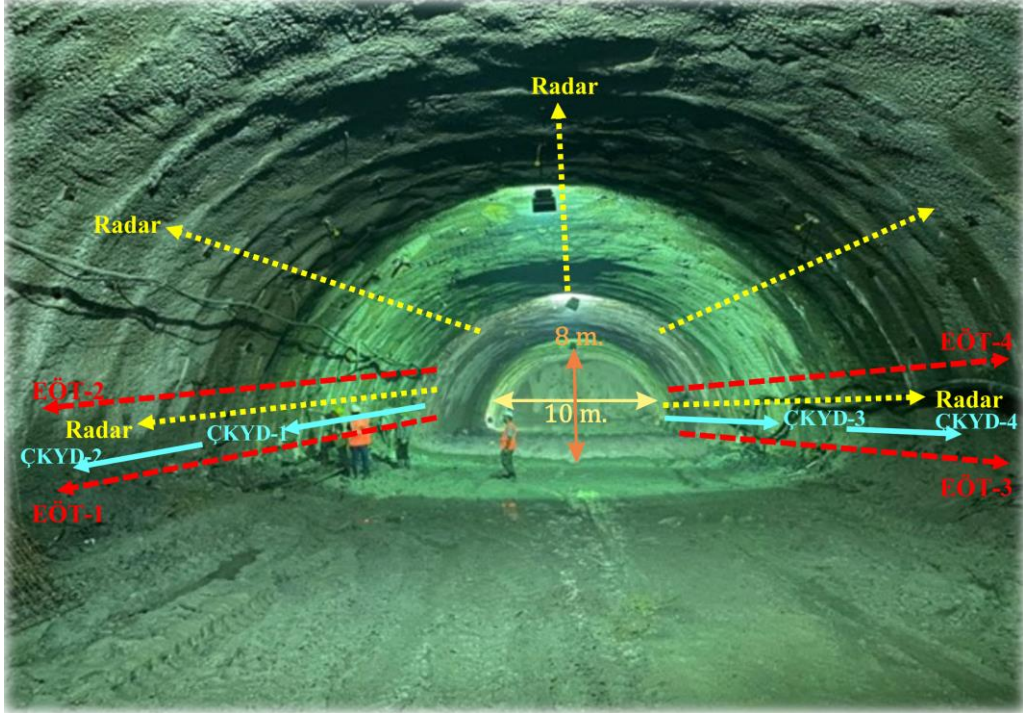
URL-4 (2023)'de belirtildiği gibi, inceleme alanı, Paleo-Tetis ve Neo-Tetis okyanuslarının kapanması sırasında gelişmiş olan tektonik olaylardan yoğun bir şekilde etkilenmiş, kıvrımlı ve kırıklı bir yapı kazanmıştır. Karakaya karmaşığı birimlerinde daha önce yapılan çalışmalarda, iki evrede gelişmiş deformasyon izleri belirlenmiştir. Birinci evrede Karakaya karmaşığı birimleri üst üste gelmiş ve derine gömülen birimler metamorfizmaya uğramış ve kıvrımlanmıştır. İkinci evrede ise, oluşan bu çökelim doğrultu atımlı faylanmaya bağlı olarak dik eğimli çatallanan makaslama zonları ile kesilmiş ve parçalanmıştır.

Bölgede gözlenen ilk yapısal doğrultular Doğu-Batı doğrultusunda kuzeye iç bükey bir yay yapmaktadır. Daha sonrakiler ise, Doğu/Kuzeydoğu-Batı/Güneybatı yönündedir.

Yapısal doğrultular ve kırılmalar büyük ölçekli hareketlerin sonucu oluşmuş ve eski masiflerin (Uludağ) etkisi ile belirli yönelim (oryantasyon) kazanmış ve böylece bu hareketler sonucunda masifler yükselmiştir. Bu hareketler sonucunda kısa zaman aralığında oluşan gerilmeler Triyas sonunda sönmülmüştür. Fakat daha sonra gelişen Jura çökel çanağında Doğu/Kuzeydoğu-Batı/Güneybatı yönlü olarak az da olsa Triyas çökel çanağına uyumlu olarak gelişmiştir.

3.3. Tünelde Uygulanan Jeofizik Ölçümler

Yapılan çalışma kapsamında Doğancı Barajı Tüneli'nin sağ ve sol yan duvarları ile tünel tavanında YR, EÖT ve ÇKYDA yöntemleri uygulanmıştır (Şekil 19). Bunlara ek olarak, tünel üstü ve çıkış palye üstünde EÖT ölçümleri alınmıştır. Tünelin sağ ve sol duvarındaki EÖT profillerinin konumları tünel tabanından 1,0 m (EÖT-1 ve EÖT 3) ve 2,0 m (EÖT-2 ve EÖT-4) olacak şekilde ayarlanmış olup, ÇKYDA profilleri, her iki duvardaki EÖT profillerinin tam arasına gelecek şekilde tünel tabanından 1.5 m yükseklikte konumlandırılmıştır. YR profilleri ise tabandan 2.00 m yükseklikten başlamak üzere eşit mesafelerde 5 profil olacak şekilde tünel eksenini boyunca ölçülmüştür.



Şekil 19. Tünel içi jeofizik ölçümlere ait profiller

3.3.1. Yer Radarı Arazi Ölçümleri

Tünel içerisinde gerçekleştirilen yer radarı ölçümlerinde GSSI Marka, korumalı antene sahip 270 MHz frekanslı SIR3000 radar cihazı kullanılmıştır (Şekil 20). Tünel içi radar ölçümleri, Proje başlangıcı Km: 8+750.00 ve Proje Sonu Km: 13+205.83, tünel başlangıcı Km: 10+420.00 ve tünel sonu Km: 12+456.00 baz alındığında Km: 11+485.00 ile Km: 11+535.00 arasında tünelin sağ ve sol yan duvarları ile tavanında sepetli araç yardımı ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 21).



Şekil 20. Yer radarı ölçümlerinde kullanılan GSSI marka SIR3000 radar cihazı



Şekil 21. Tünel içerisinde yapılan yer radarı ölçümleri

Tünel içindeki tüm ölçümler, sürekli olacak şekilde alınmış olup, verilerin değerlendirmesinde lisanslı GPR-Slice yazılımı kullanılmıştır (URL-5, 2023). Elde edilen radagramlardan tünele ait 3B'lu ve eşyüzey (katı model, eş yüzey/isosurface) haritalar/görüntüler oluşturulmuştur. Bu görüntüler sayesinde, ulaşılmak istenen hedef

yapı, su sızıntısı gibi problemler hakkında (şekil, boyut, konum) sadece yüzeysel değil aynı zamanda derinlik boyutunda da açıklayıcı bilgiler elde edilebilmektedir.

3.3.2. Elektrik Özdirenç Tomografi Arazi Ölçümleri

Tünelde yapılan tüm EÖT ölçümleri, Ambrogeo marka, Mangusta TMG255E model çok elektrotlu elektrik tomografi cihazı ile 48 elektrotlu düzenek kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 22). Tünel içi EÖT ölçümlerinde profil uzunluğu 94 m, tünel üzeri profillerde ise 141 m ve palye üzeri profilde ise 92 m'dir.



Şekil 22. Çok elektrotlu elektrik özdirenç tomografi ölçüm ekipmanı

Duvarlarda yer alan beton kaplamadan dolayı elektrotlar çakılabilmesi ve arkadaki zeminle kontağının sağlanabilmesi için belirlenen elektrot yerleri delici makina ile delinerek, özel üretilen uzun çelik elektrotlar yardımı ile ölçü alınmıştır. Ölçü alınmadan önce bentonitli çamur hazırlanmış, kontak direnci önlemek adına elektrotları çakmak için açılan deliklere yerleştirilmiştir (Şekil 23). Bu sayede elektrotların beton arkasındaki zemine daha iyi tutturulması ve kontak direncin önlenmesi sağlanmıştır.



Şekil 23. EÖT’de kullanılan özel üretim elektrotların tünel duvarına yerleştirilmesi

Elektrik özdirenç tomografi ölçümlerinde kullanılan elektrot aralığı tünel içinde 2 m ve tünel üzerinde 3 m olarak seçilmiştir. Tüm ölçümlerde veri kalitesi ve çalışma alanındaki sorunu hem yatay hem de düşey yönde daha iyi çözümlemek için Wenner-Schlumberger dizilim türü uygulanmıştır. Tünel içerisinde 485’nci m ile 579’ncü m arasında sağ duvarda EÖT-1 ve EÖT-2, sol duvarda ise EÖT-3 ve EÖT-4 ölçüleri alınmıştır (Şekil 24). Her bir ölçümün iki duvarda da başlama ve bitiş noktaları aynıdır. Özel üretim elektrot olarak normal elektrotlardan (40 cm) daha uzun, 120 cm uzunluğunda elektrotlar kullanılmış olup, her bir elektrot yerine bentonit ile macun yapıp yerleştirilmiş, bu sayede kontak direncin önüne geçilmiştir.

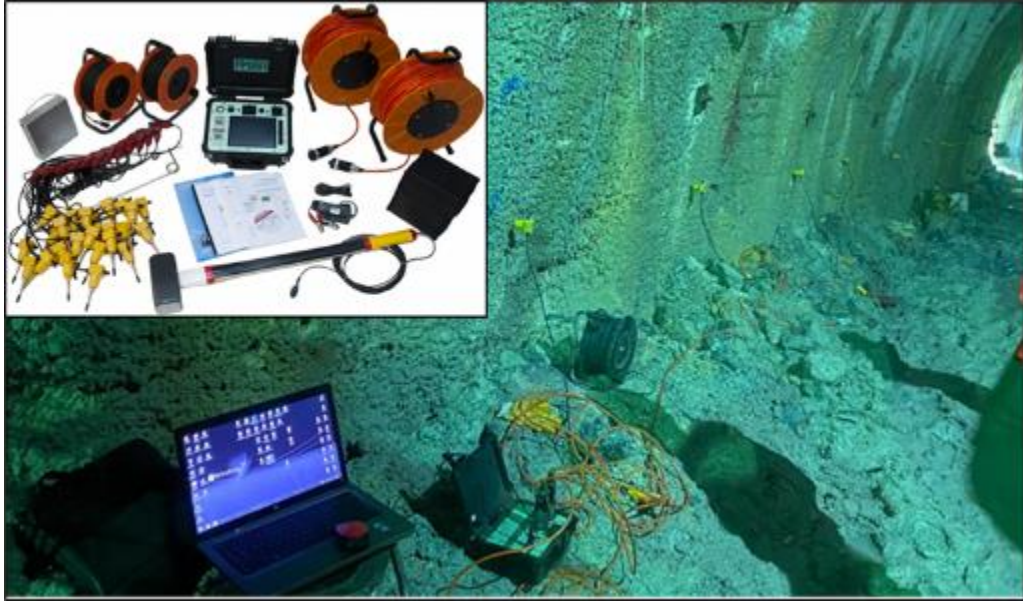


Şekil 24. (a) Tünel yan duvarında (b) tünel üzerinde gerçekleştirilen elektrik özdirenç tomografi ölçümleri

Tünel yan duvarlarından, tünel üstünden ve çıkış palye üstünden toplanan EÖT verileri ZondRes2d yazılımı kullanılarak 2B'lu olarak değerlendirilmiştir (URL-6, 2023). Zondres2d yazılımı, ileri (düz) ve ters çözüm için ızgara (grid) sistemine göre daha iyi sonuçlar veren sonlu elemanlar yönteminin matematiksel algoritmasını kullanmaktadır (Dey & Morrison, 1979; Lowry vd. 1989).

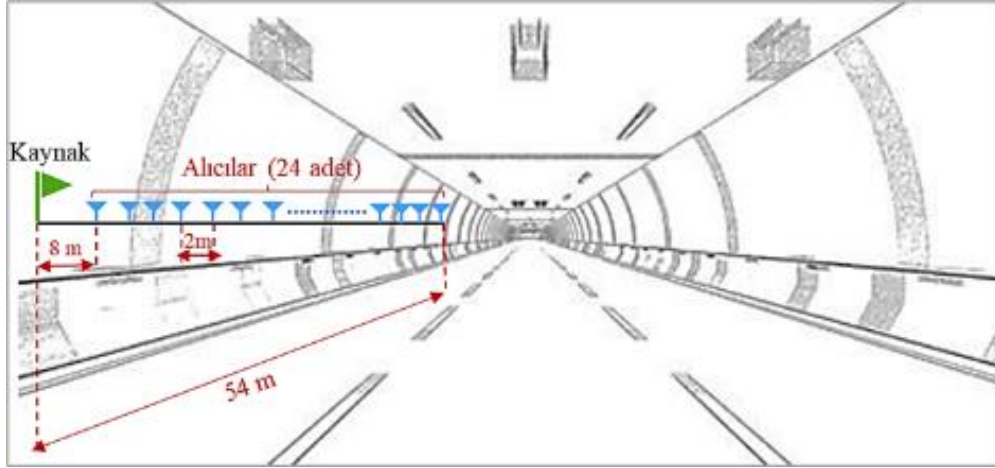
3.3.3. Çok Kanallı Yüzey Dalgası Analizi Arazi Ölçümleri

Tünel içerisinde gerçekleştirilen ÇKYDA ölçümlerinde PASI Marka, Gea-24 Model, 24 Kanallı sismograf ve 4.5 Hz'li alıcılar (jeofon) kullanılmıştır (Şekil 25). Tünelin yan duvarları içerisinde 1 m kalınlığa sahip beton yapısı bulunduğu için duvar matkap yardımı ile delinerek alıcılar sıkı bir şekilde ölçü hattı üzerine yerleştirilmiştir.



Şekil 25. Tünel içerisinde ÇKYDA uygulamasında kullanılan ölçüm ekipmanı

Tünelin yan duvarlarında gerçekleştirilen ölçümlerde kullanılan alıcı aralıkları 2 m, kaynak ile ilk alıcı arası mesafe (kaynak ofseti) 8 m olup, kaynak olarak balyoz ve metalik tabla (20x20x5) kullanılmıştır. Serim uzunluğu 54 m olan ölçüm hattında sadece ileri atış yapılmıştır (Şekil 26). Tüm profillerde sinyal/gürültü oranını arttırmak amacıyla her atışta 3'er adet düşey yığma yapılarak veriler kaydedilmiştir.



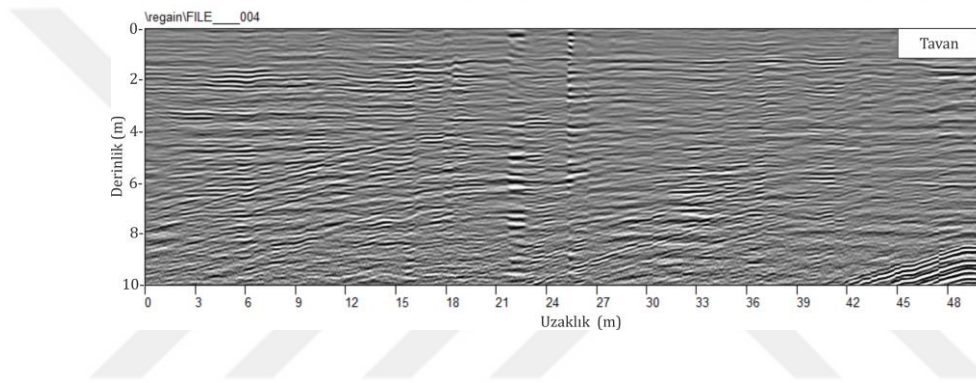
Şekil 26. Tünel içindeki ÇKYDA yönteminin ölçüm düzeneği

Tünel içi yan duvarlardan alınan ÇKYDA verilerinin analizinde SeisImager/Pickwin yazılımı kullanılmıştır (URL-7, 2023). SeisImager/SW yazılımı faz kayması tekniğini kullanarak frekans-faz hızı dönüşümünü (f-c görüntüsü) ve böylece, elde edilen f-c görüntüsü üzerinden dispersiyon eğrisinin (frekansa karşılık faz hızı değişimi) piklenmesini sağlar. Yazılım, ölçülen ve hesaplanan dispersiyon eğrilerinin karşılaştırılmasında, ters çözüm işlemi için “Sönümlü En Küçük Kareler” yaklaşımını (Levenberg, 1944; Marquardt, 1963) kullanmaktadır. Ters çözüm işlemiyle tünel içerisindeki ÇKYDA profillerine ait 1-B boyutlu S-dalgası hız ($1B-V_s$)-derinlik yapısı belirlenmiştir.

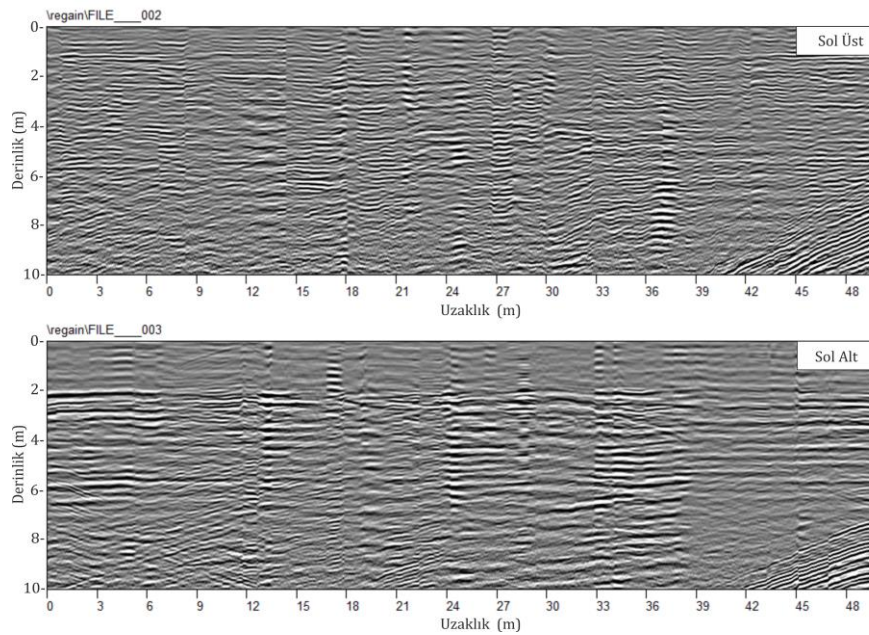
4. BULGULAR

4.1. Tünel İçi Yer Radarı Bulguları

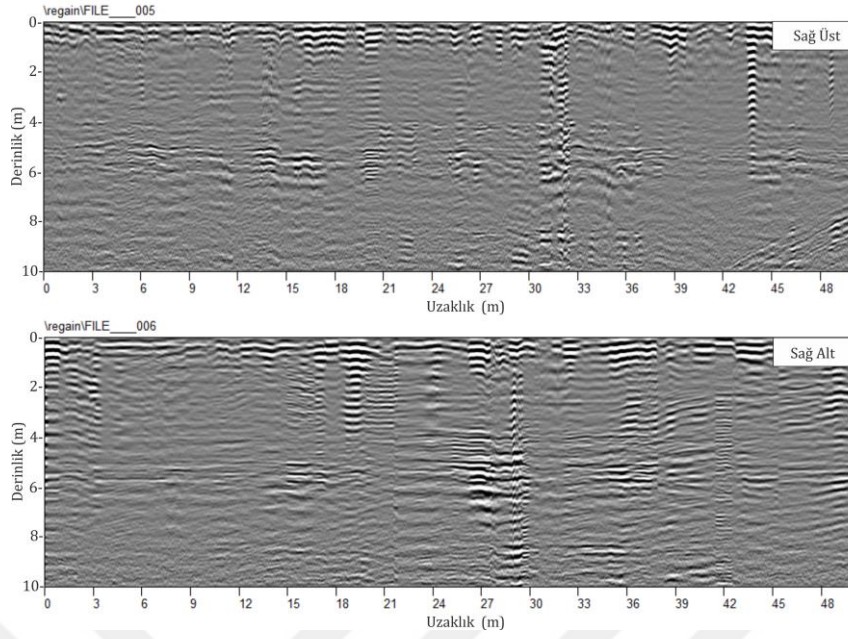
Tünel içi YR verileri işlendikten sonra tünelin sağ ve sol duvarları ile tavanındaki her bir profil için 2B'lu radagramlar oluşturulmuştur (Şekil 27-29). Ortam hızı, tüm radagram verileri üzerinde yapılan hiperbol (hız analizi) analizlerinden ortalama olarak 0.105 m/ns olarak bulunmuştur. Ham verilere sırası ile; dewow (akım düzeltmesi), background removal (ortalama değer temizleme), sıfır zaman düzeltmesi, bandpass filtre ve regain (genlik düzeltmesi) işlemleri uygulanmıştır.



Şekil 27. Tünelin tavanındaki YR profilinden elde edilen radagram

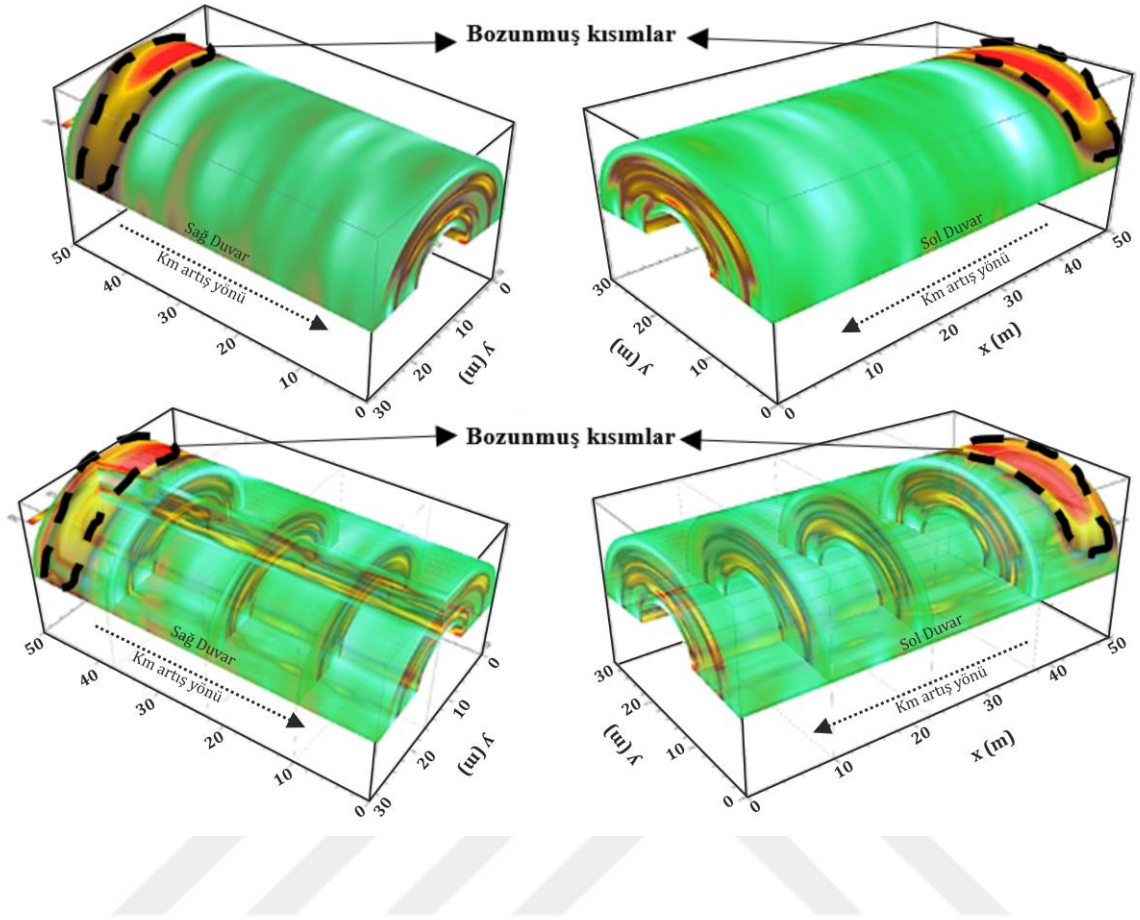


Şekil 28. Tünelin sol duvarındaki YR profillerinden elde edilen radagramlar.



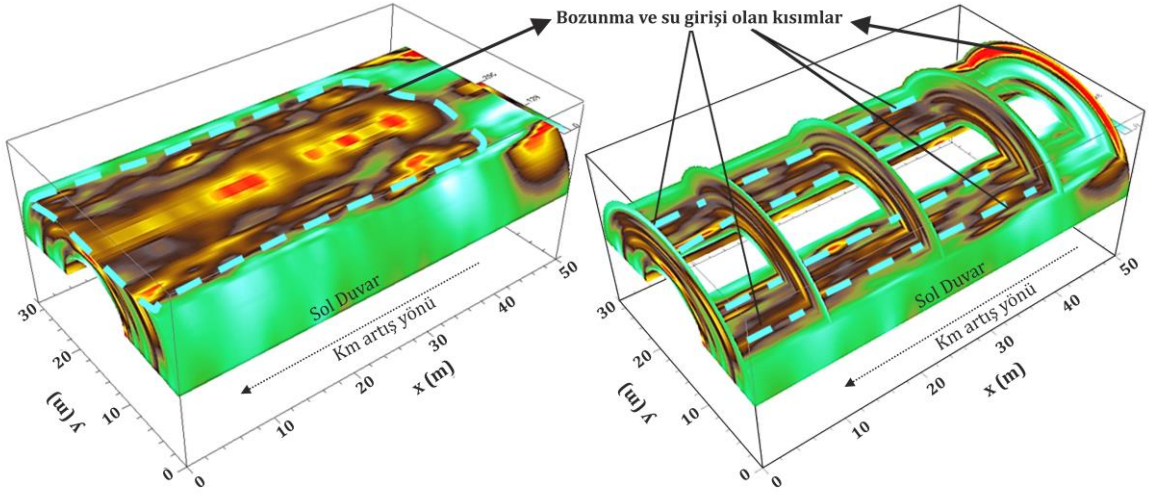
Şekil 29. Tünelin sağ duvarındaki YR profillerinden elde edilen radagramlar.

YR profillerine ait 2B'lu radagramlar kullanılarak tünelin 485. m ile 535. m arasındaki alanı kapsayacak şekilde tünelin geometrik yapısına uygun 3B'lu görüntüler hazırlanmış ve Şekil 30'dan 33'e kadar sunulmuştur. Bu modellerde kırmızı renk ve tonları (sıcak renkler), yeşil renk ve tonları (soğuk renkler) kısmen daha kuru ve bozuşmamış alanları ifade etmektedir. Şekil 30 tünelin içine ait 3B'lu YR modellerinden farklı bakış açılarından ve saydamlıkta görüntülerini göstermektedir.

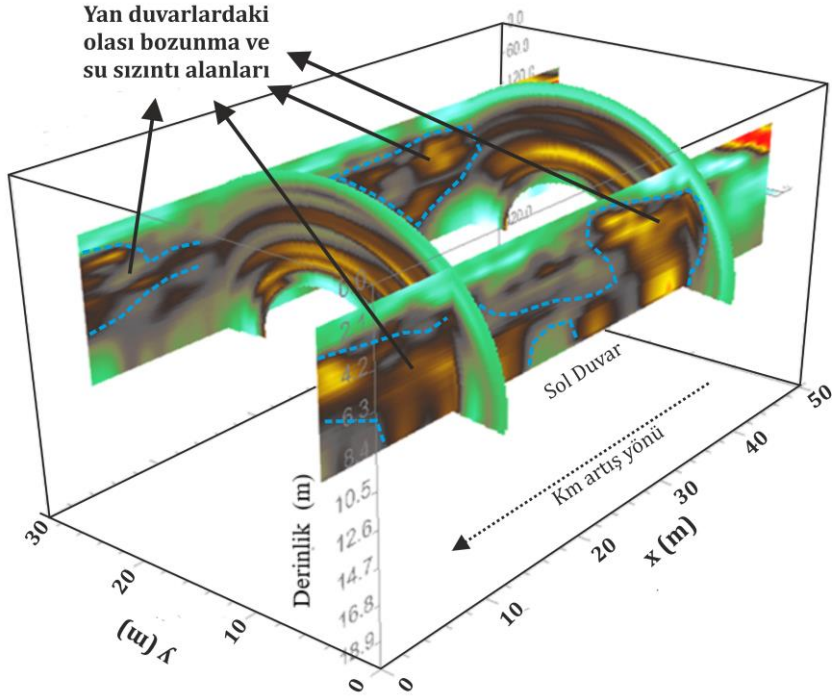


Şekil 30. Yer Radarı ölçümlerinden hazırlanan 3B’lu modeller üzerinde bozunmuş alanların (siyah kesikli çizgiler) farklı açılardan gösterimi

Bu görüntülere göre, yüksek genlikli (Şekil 30a, b, c ve d’de kesikli siyah çizgi ile belirtilen kırmızı ve tonları) alan, tünelin 490. m ile 495. m arasında tünel tavanından itibaren yaklaşık olarak 8 -10 metre yükseklikte olup, muhtemelen bozunmuş zemin (yoğun kırıklı-çatlaklı) ve içeriğinde yoğun olarak su bulunduğuna işaret etmekte olup, tünel üst kotlarından tünel yapısına su girişinin olduğu yeri göstermektedir.



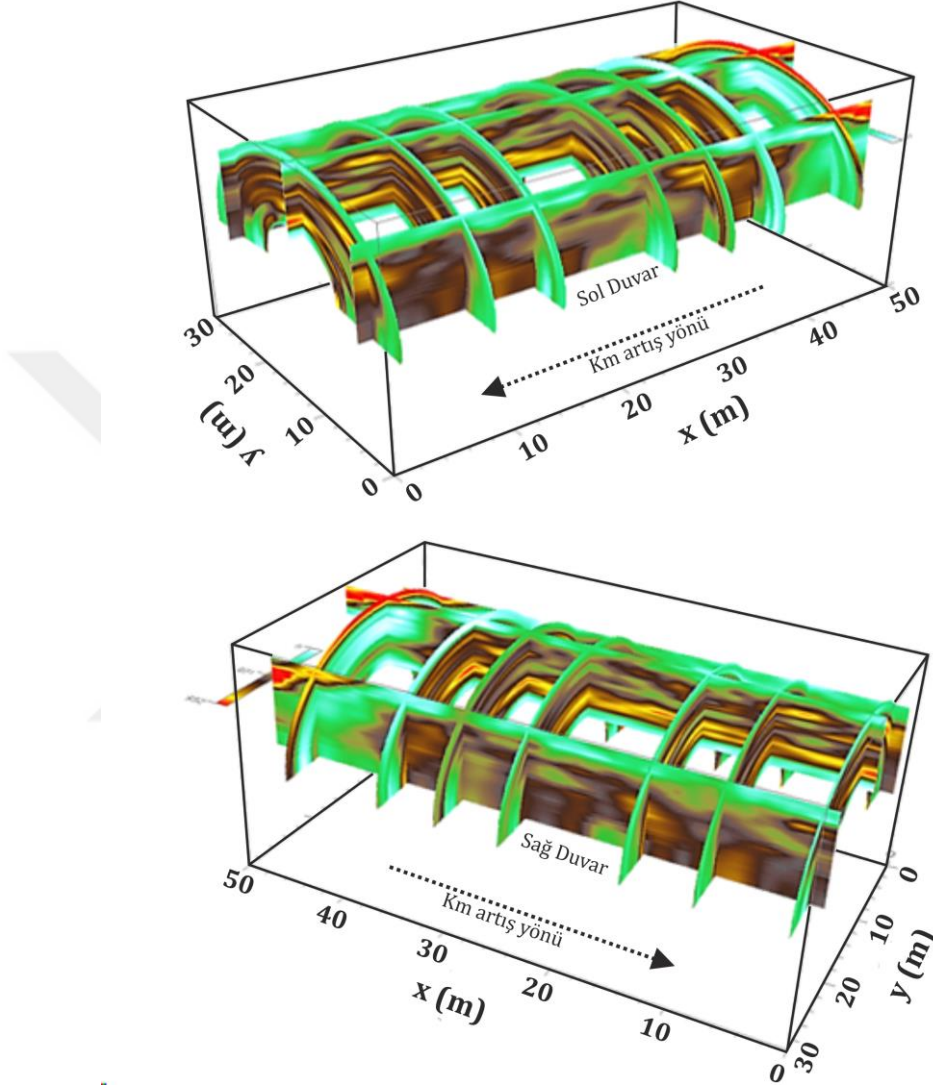
Şekil 31. Tünel tavanından itibaren 5.5 m yükseklikteki anomalilerin (kesikli mavi çizgili alanlar) 3B’lu model üzerindeki görüntüsü



Şekil 32. Tünelin yan duvarlarına ait yüksek elektromanyetik yansımaların 3B’lu model üzerinde görüntülenmesi

Yapılan ölçümler sonucunda elde edilen (Şekil 31a ve b ile Şekil 32’de görülen mavi kesikli çizgiler ile ayrımlanmış alanlar) modeller üzerinde görülen yüksek elektromanyetik

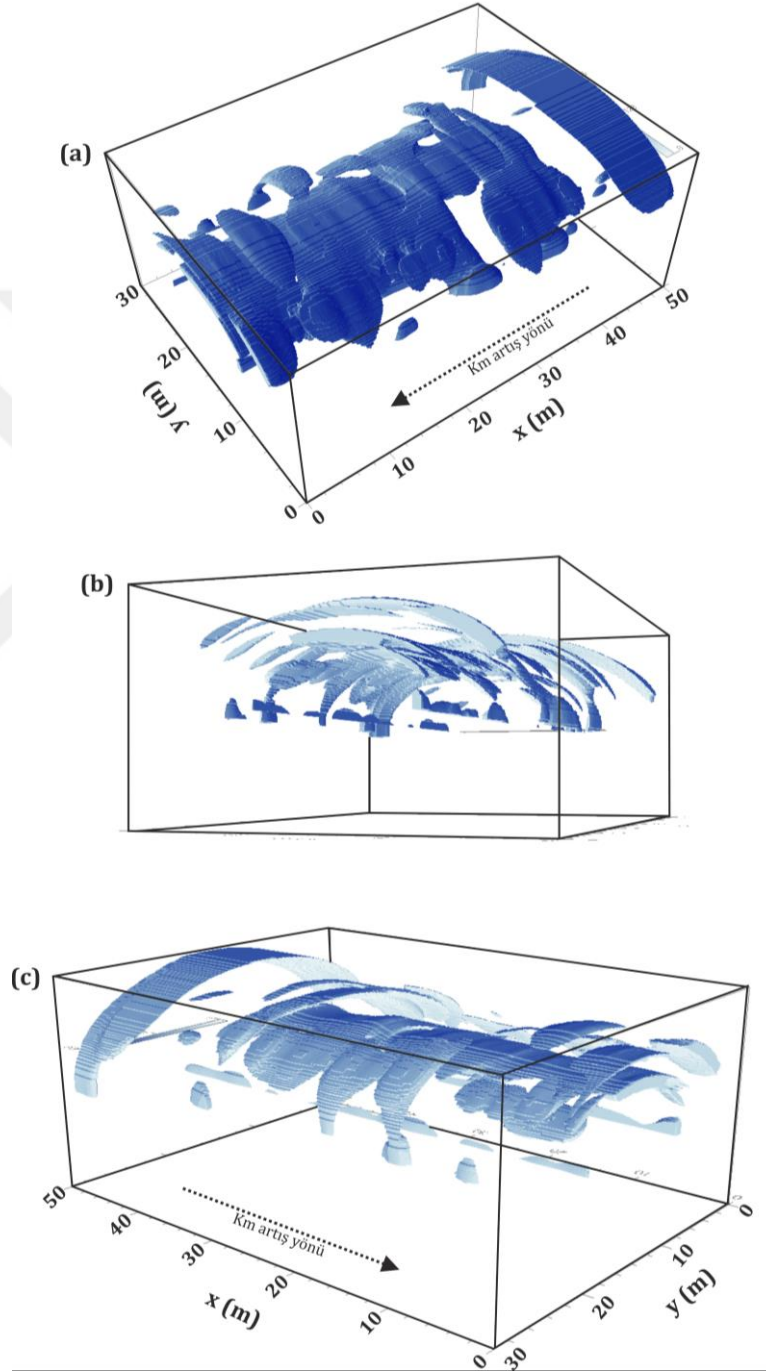
yansımali alanlar (sıcak renkler) muhtemelen ortamın bozunmuş (yoğun kırıklı-çatlaklı) olduğuna ve içeriğinde yoğun olarak su bulunduğuna işaret etmektedir.



Şekil 33. Farklı açılardan oluşturulan tünel yan duvarlarının 3B'lu modelleri

Yer radarı modellerinde dikkat çeken bir diğer husus, tünelin sağ ve sol yan duvarları içerisinde gözlenmiş olan anomalilerdir. Tünelin her iki yan duvarı içerisinde yüksek yansıma genlik anomalilerinin bozunmuş ortam ile su içeriğinden kaynaklandığı değerlendirilmiştir (Şekil 32 ve Şekil 33). Söz konusu anomali alanlarında (yüksek elektromanyetik yansımali alanlar, sıcak renkler) bozunmanın yüksek, su içeriğinin fazla olduğu belirlenmiştir. Ayrıca yer radarı verilerinden oluşturulan 3B'lu modellerin yanı sıra,

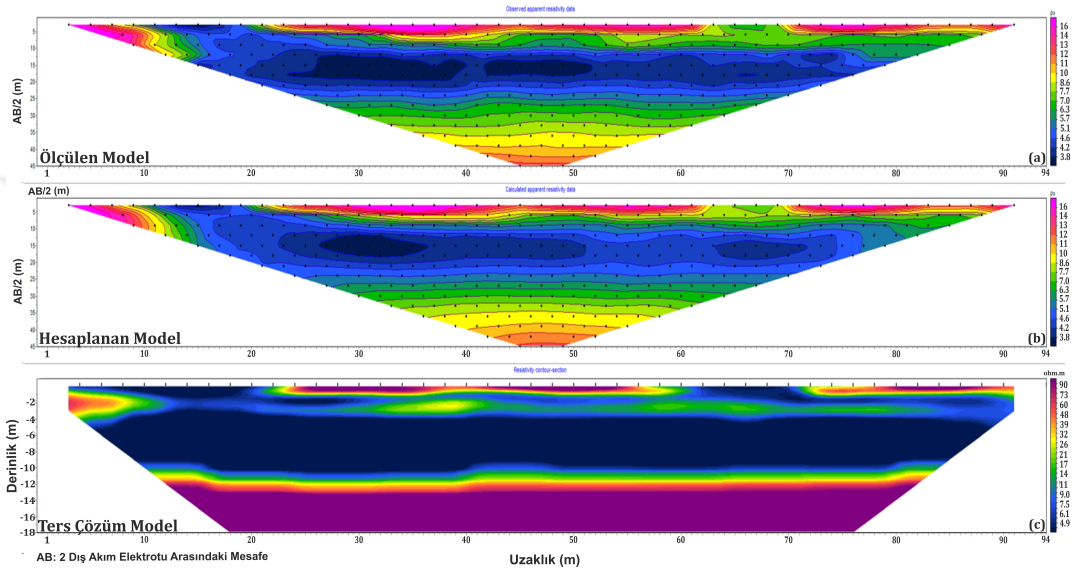
tünel için farklı açılara ait katı modeller oluşturulmuştur (Şekil 34). Bu modeller üzerinde katı olarak görülen alanlar, bozunmuş, su içeriği yoğun zeminin hacmini ifade etmektedir. Diğer bir bakış açısı ile, tünel çevresinde iyileştirilmesi gereken alanlara ait hacimsel gösterimdir.



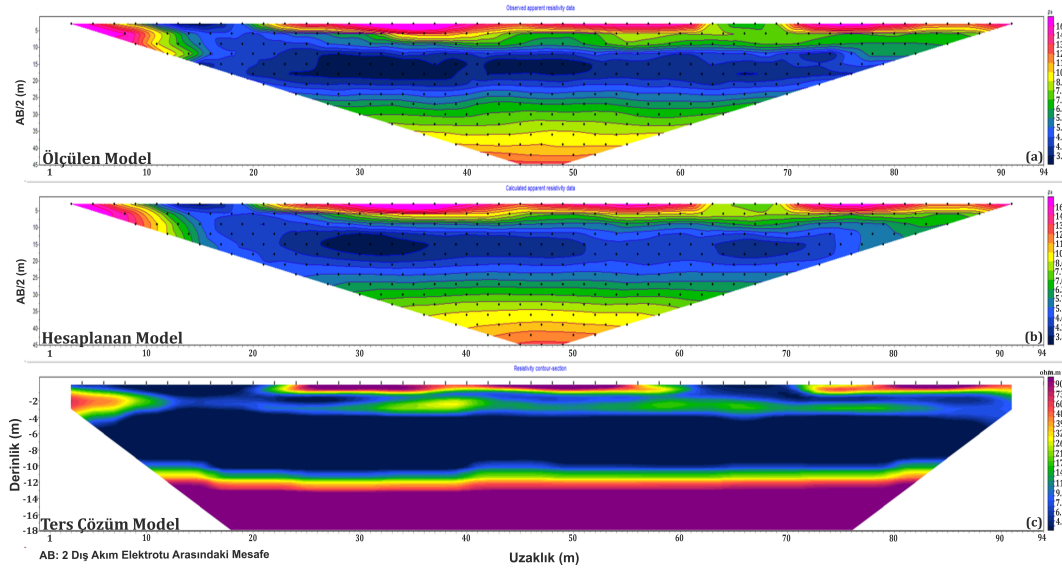
Şekil 34. Tünel için farklı açılarda oluşturulan (a) tünel tavanından (b) tünel girişinden (c) tünel yan duvarından 3B'lu katı modeller

4.2. Tünel İçinde, Tünel Üzerinde ve Çıkış Palye Üstündeki Elektrik Özdirenç Tomografi Bulguları

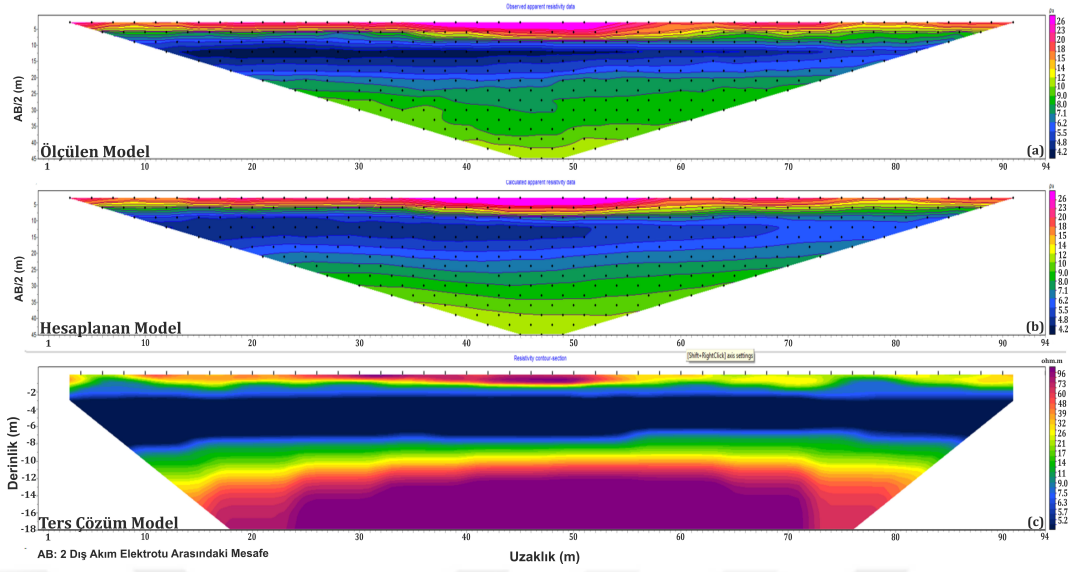
Şekil 35, 36, 37 ve 38 çok elektrotlu EÖT ölçümleri sonucunda tünelin sağ (EÖT-1 ve EÖT-2) ve sol (EÖT-3 ve EÖT-4) yan duvarlarına ait ölçülen, hesaplanan yapma kesit ve ters çözümü hesaplanan 2B'li EÖT kesitlerini göstermektedir. Şekil 39, 40, 41 ve 42, ters çözüm sonucu elde edilen EÖT kesitinin yorumlanarak oluşturulan litolojik modellerini sunmaktadır (Şekil 35-38).



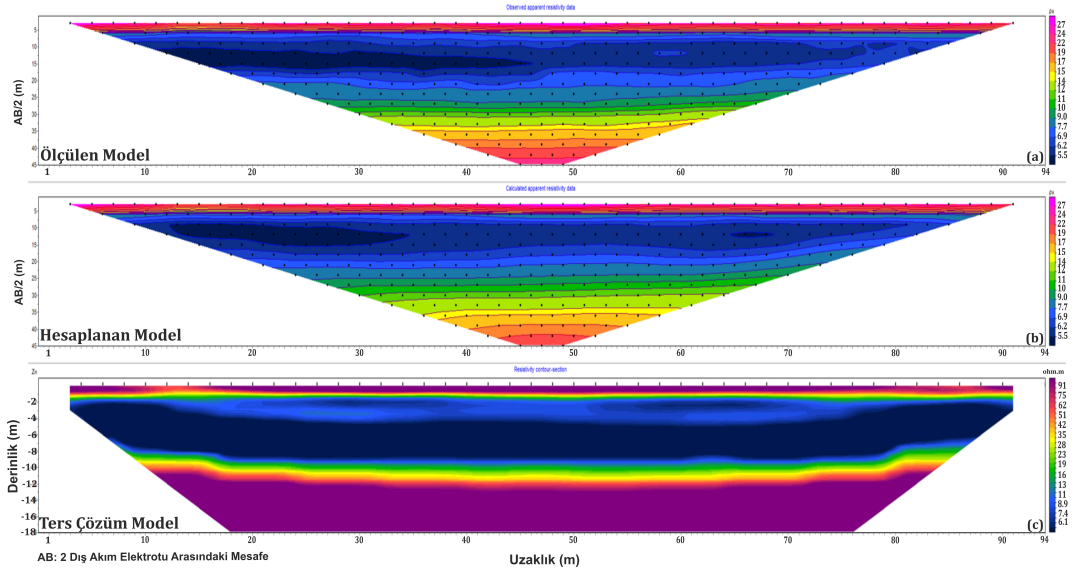
Şekil 35. EÖT-1 profiline ait (a) ölçülen, (b) hesaplanan ve (c) ters çözüm modelleri



Şekil 36. EÖT-2 profiline ait (a) ölçülen, (b) hesaplanan ve (c) ters çözüm modelleri



Şekil 37. EÖT-3 profiline ait (a) ölçülen, (b) hesaplanan ve (c) ters çözüm modelleri



Şekil 38. EÖT-4 profiline ait (a) ölçülen, (b) hesaplanan ve (c) ters çözüm modelleri

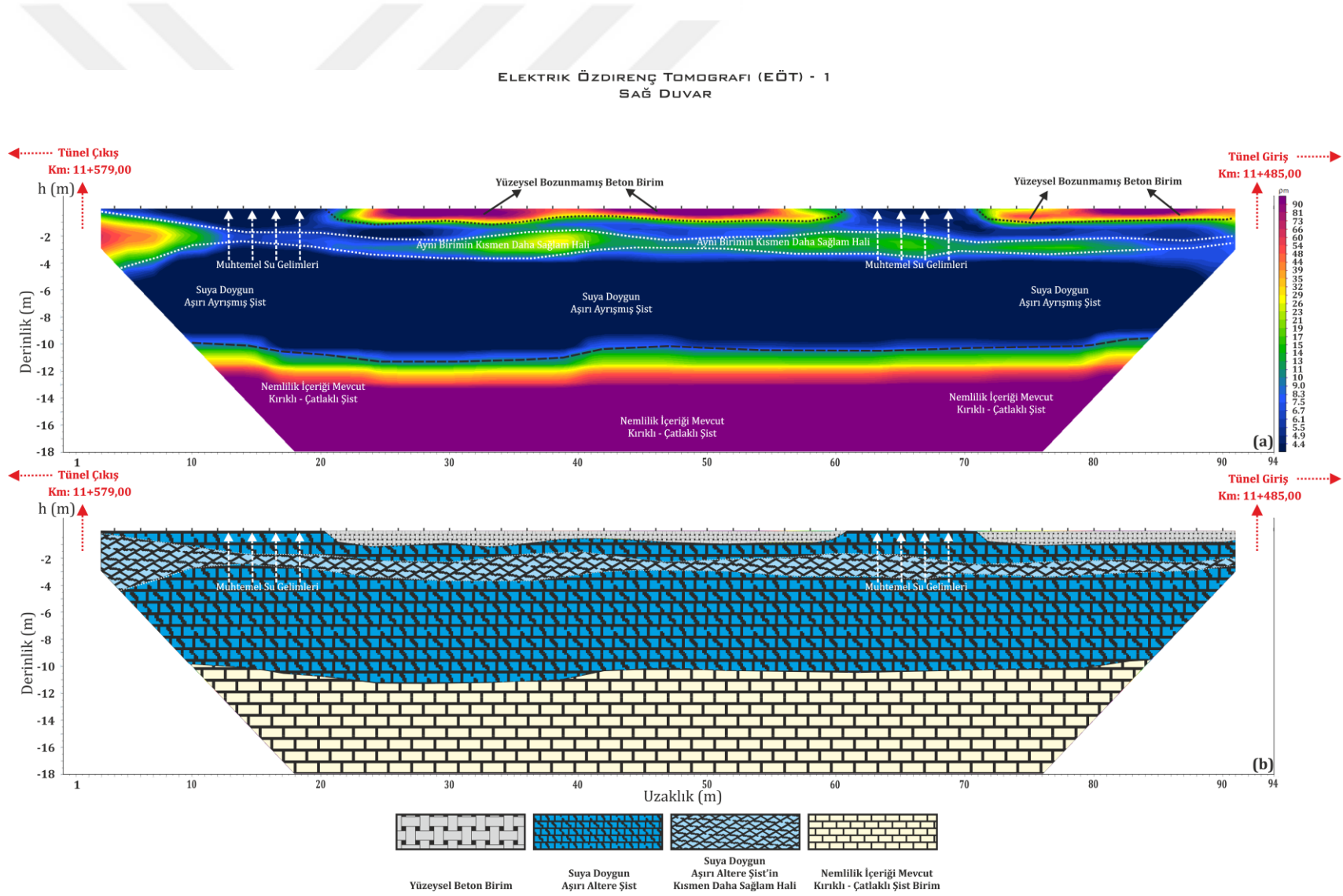
EÖT sonuçlarına göre öz direnç değerlerinin 4-100 Ohm.m arasında değişmektedir. Tünel içi ölçümlerde ortalama 18 m derinlik (Şekil 18'e göre yatay yönde zeminin içine doğru) görüntülenebilmiştir. EÖT kesitlerinde, yüksek, orta ve düşük öz dirençli bölgeler sırasıyla sarı-kırmızı-mor, yeşil ve mavi renkler ile temsil edilmiştir. Hem ölçülen hem de ters çözümden elde edilen EÖT kesitleri genel olarak düzenli bir yapıyı göstermektedir.

Buna göre tünel duvarından zemin içine doğru, sırasıyla ince yüksek özdirençli bir birim, düşük özdirençli birim ve en son yüksek özdirençli birimin varlığı görülmektedir.

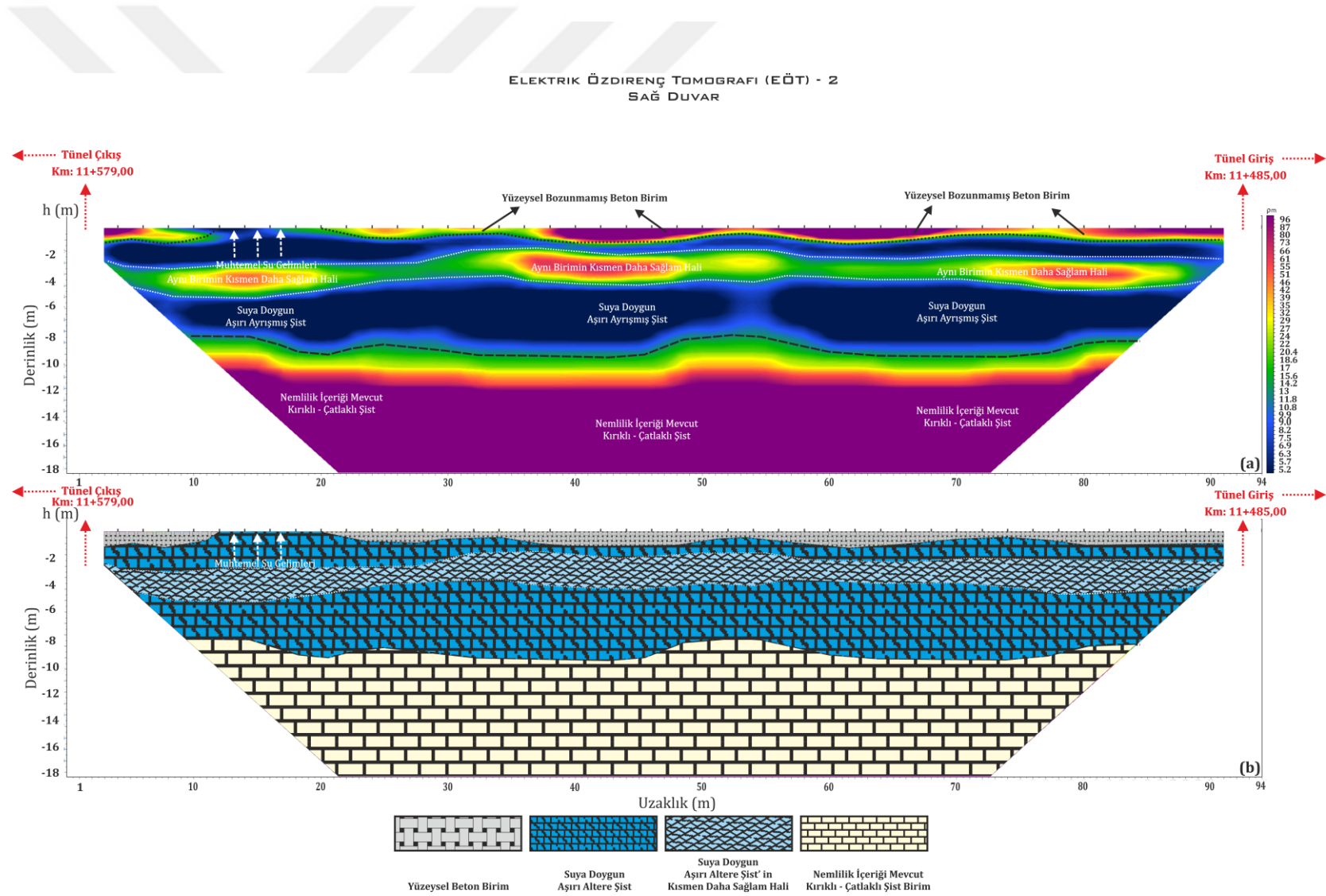
Ters çözümden elde edilen her bir ET kesiti (Şekil 35c, 36c, 37c ve 38c) özdirenç değişimleri dikkate alınarak yorumlanmış ve litoloji ile ilişkilendirilmiştir (Şekil 39-42). Tünelin sağ yan duvarındaki ET-1 ve ET-2 kesitlerinde (Şekil 35c ve 36c) yüzeydeki sarı-kırmızı-mor renkler muhtemel beton birimin varlığına işaret etmektedir. Bu beton kaplamanın yanal yönde özelliğini kaybederek bozunduğu ve bu bölümlerden de (düşey beyaz oklarla gösterilen) tünel içirisine su sızıntılarının olduğu değerlendirilmiştir (Şekil 39 ve Şekil 40). Bu yüzeysel birimin hemen altında ise, mavi-koyu mavi (ya da lacivert) renkle görülen suya doygun aşırı altere biriminin varlığı söz konusu olup, yaklaşık 10 m derinliğe kadar devam etmektedir. Diğer yandan, 10 m derinlikten sonra görülen yüksek özdirençli birim ise daha az kırık-çatlaklı ve su içeriği daha az birim olarak tanımlanmıştır. ET-1 ve ET-2 profillerinden elde edilen yer modellerinden birbirleri ile oldukça uyumlu olduğu görülmektedir.

Tünelin sol yan duvarından elde edilen ET-3 ve ET-4 kesitleri de litoloji ile ilişkilendirilmiştir (Şekil 41 ve Şekil 42). ET-1 ve ET-2 kesitlerinde olduğu gibi yüzeyde yer yer özelliğini yitirmiş beton birimin yer aldığı ve tünel içirisinde su sızıntılarının varlığı izlenebilmektedir. Sol yan duvardaki her iki kesite göre, yüzeysel birimin altında 8 m derinliğe kadar suya doygun, aşırı altere olmuş bir birimin bulunduğu anlaşılmaktadır. Bu seviyeden sonra daha az su içeriği ve kırık-çatlaklı yapıda olan yüksek özdirençli bir birim tanımlanmıştır.

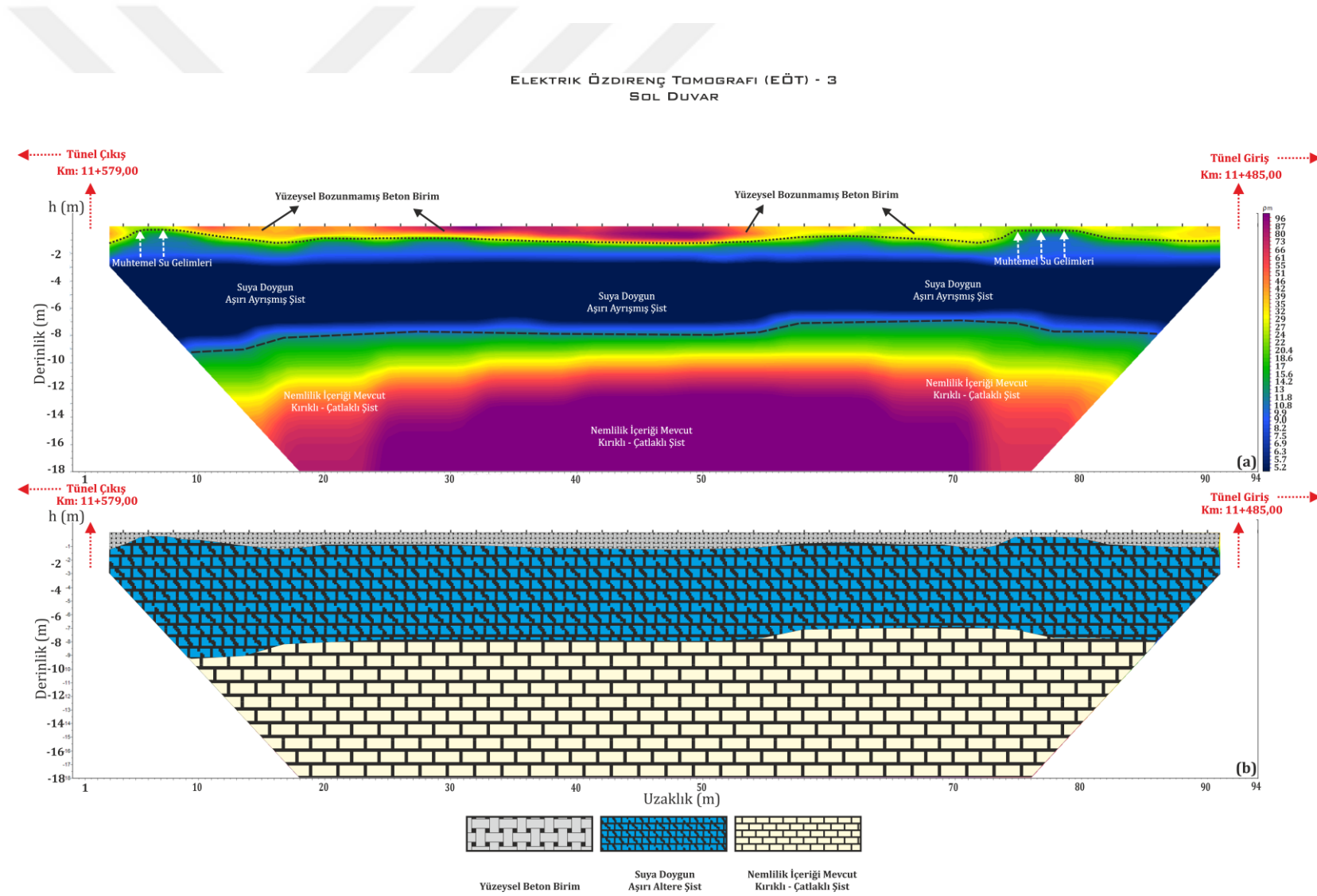
Kesitlerin litoloji ile ilişkilendirilmesi sırasında kullanılan jeolojik bilgiler, Proyapı Mühendislik Müşavirlik A.Ş. tarafından Doğancı Tüneli için hazırlanan Mühendislik Jeolojisi Raporu' ndan elde edilmiştir.



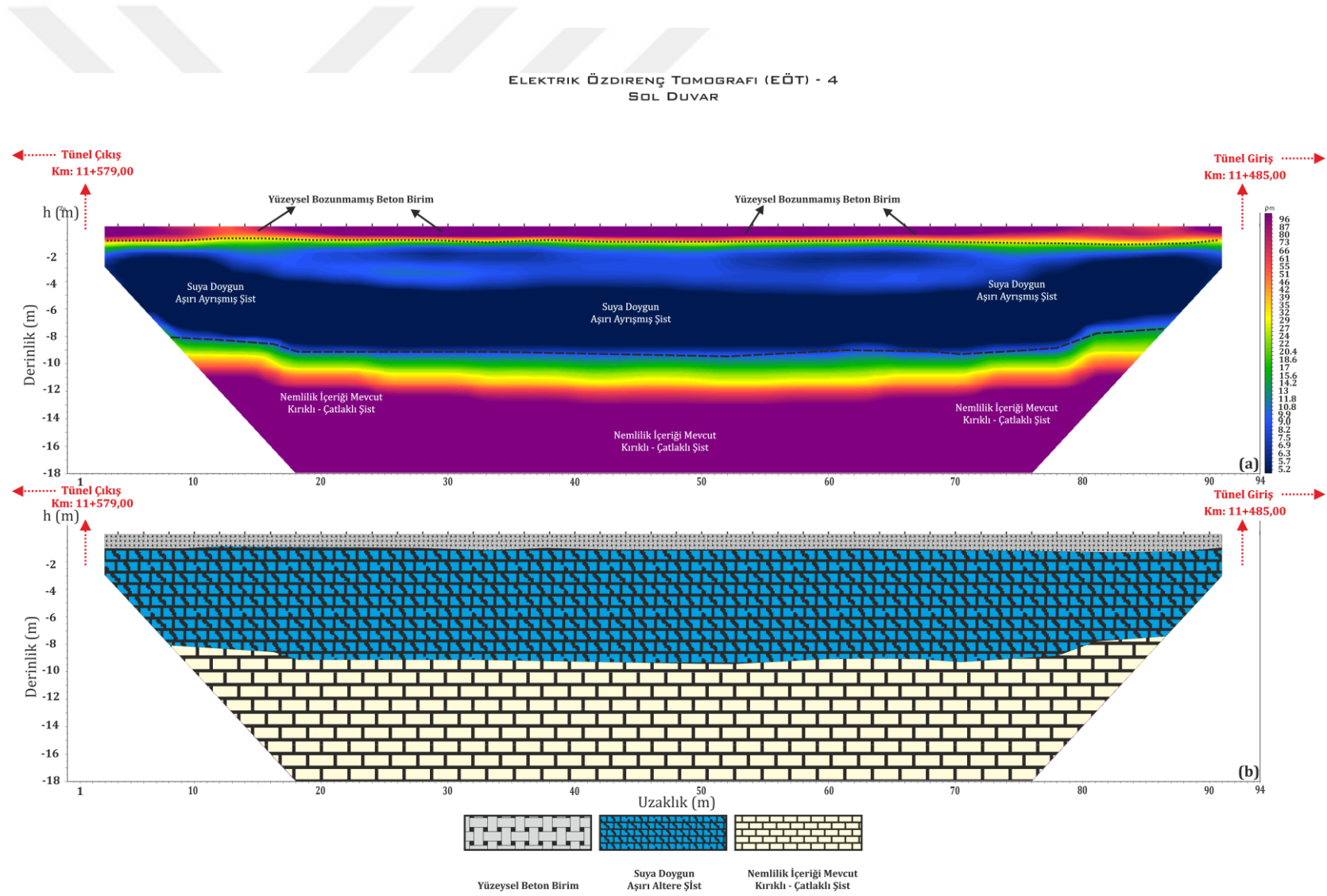
Şekil 39. Tünelin sağ duvarından elde edilen (a) 2B'lu EÖT-1 kesiti, (b) litoloji ile ilişkilendirilmiş 2B'lu EÖT-1 kesiti



Şekil 40. Tünelin sağ duvarından elde edilen (a) 2B'lu EÖT-2 kesiti, (b) litoloji ile ilişkilendirilmiş 2B'lu EÖT-2 kesiti



Şekil 41. Tünelin sol duvarından elde edilen (a) 2B'lu EÖT-3 kesiti, (b) litoloji ile ilişkilendirilmiş 2B'lu EÖT-3 kesiti



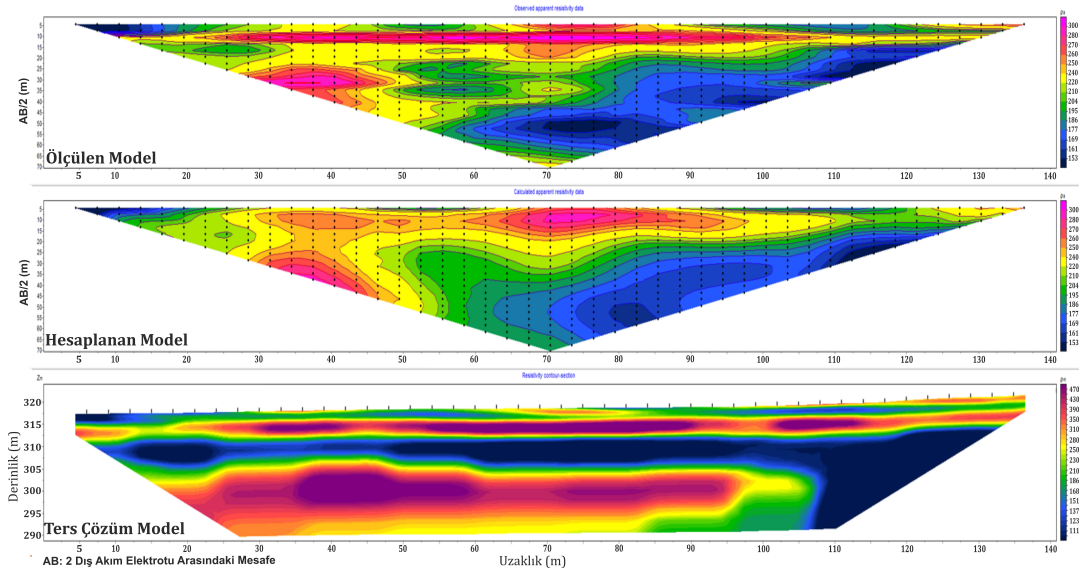
Şekil 42. Tünelin sol duvarından elde edilen (a) 2B'lu EÖT-4 kesiti, (b) litoloji ile ilişkilendirilmiş 2B'lu EÖT-4 kesiti

Tünel üzerinde elektrik özdirenç tomografi çalışması, yol güzergahı paraleli göz önüne alındığında 590. m ve 731. m aralığında gerçekleştirilmiştir (Şekil 43).



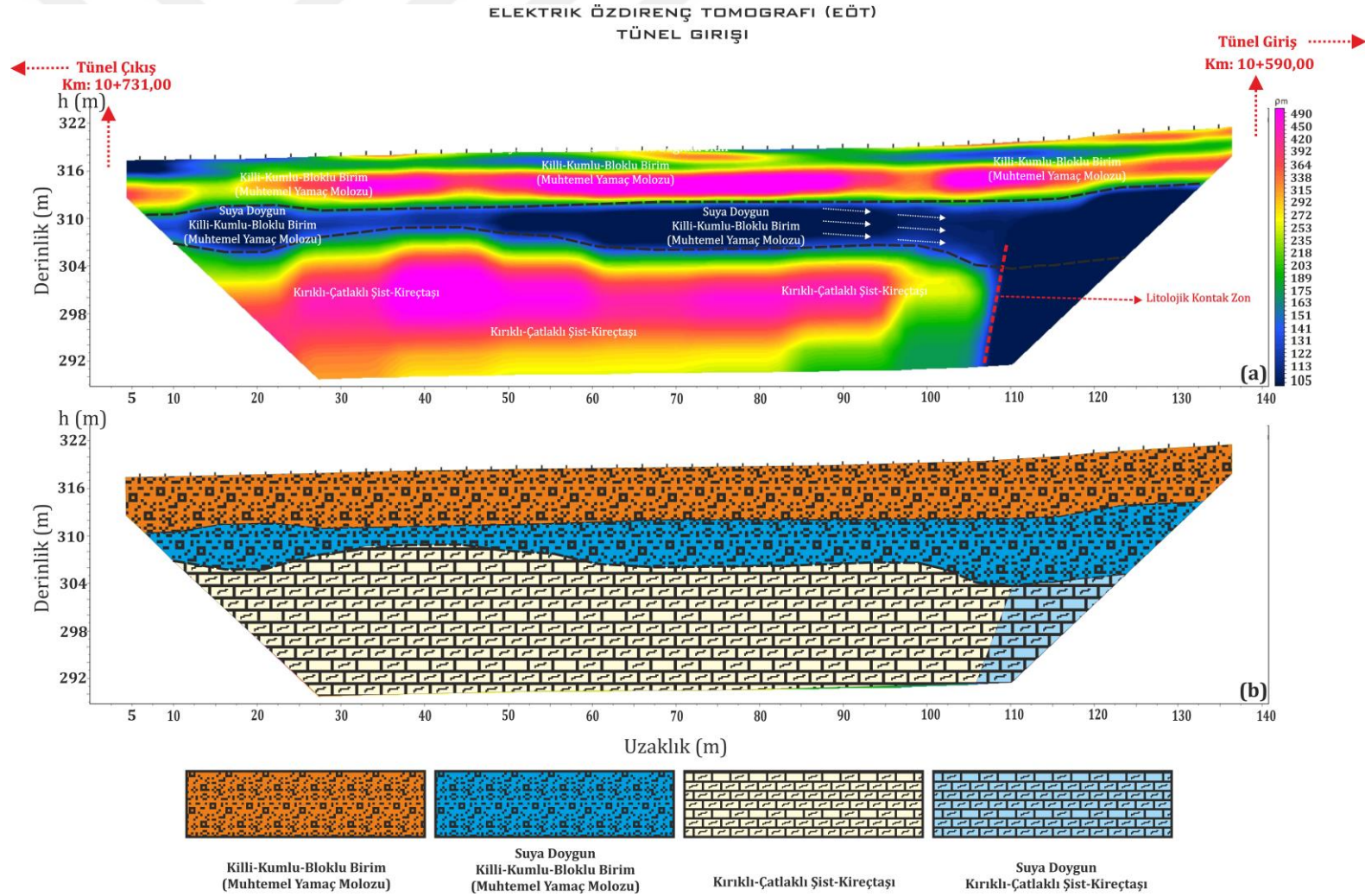
Şekil 43. Tünelin üzerindeki EÖT ölçüm profilinin konumu

Tünelin üzerindeki EÖT ölçüm sonucuna göre, özdirenç değerleri 100-500 Ohm.m arasında değişmektedir (Şekil 44) ve düşey yönde ulaşılan derinlik ortalama 28 m'dir. Diğer modellerde olduğu gibi, yüksek özdirençli bölgeler sarı-kırmızı-mor renklerle, orta özdirençli bölgeler yeşil ve düşük özdirençli bölgeler de mavi renklerle ayrılmıştır.



Şekil 44. Tünelin üzerindeki EÖT profiline ait (a) ölçülen, (b) hesaplanan ve (c) ters çözümden elde edilen 2B'li EÖT kesitleri

Elde edilen EÖT kesitinin (Şekil 44c) litoloji ile ilişkilendirilmesi Şekil 45’de yapılmıştır. Buna göre, yüzeyde sarı-kırmızı-mor renkle ayrımlanan bir birim yanal yönde içerdiği oldukça değişken öz dirençler sebebi ile, killi-kumlu-bloklu yani yamaç molozundan ibaret olduğu değerlendirilmiştir. Bu yamaç molozunun hemen altında, mavi renkle ayrımlanan birimin ise, yine yamaç molozu ancak suya doygun olduğu (100-150 Ohm.m) anlaşılmakta olup, yaklaşık 10-11 metre derinliğe kadar izlenebilmektedir. Bu birimin altında ise, mor renkler ile ayrımlanan yüksek öz dirençli (250-500 Ohm.m) kırıklı çatlaklı kaya birim yer almaktadır. Kesitte görülen en önemli ayrıntılardan biri ise kesit sonuna doğru, yatayda 105-110 metreler arasında görülen litolojik kontak zondur. Yüksek öz dirençli (250-500 Ohm.m) kaya biriminin içerisinde girişim yapan suyun etkisi ile öz direnç değerleri düşmüş (100-150 Ohm.m) ve aynı kaya birimin su içeriğinin yoğun olduğuna işaret etmektedir.

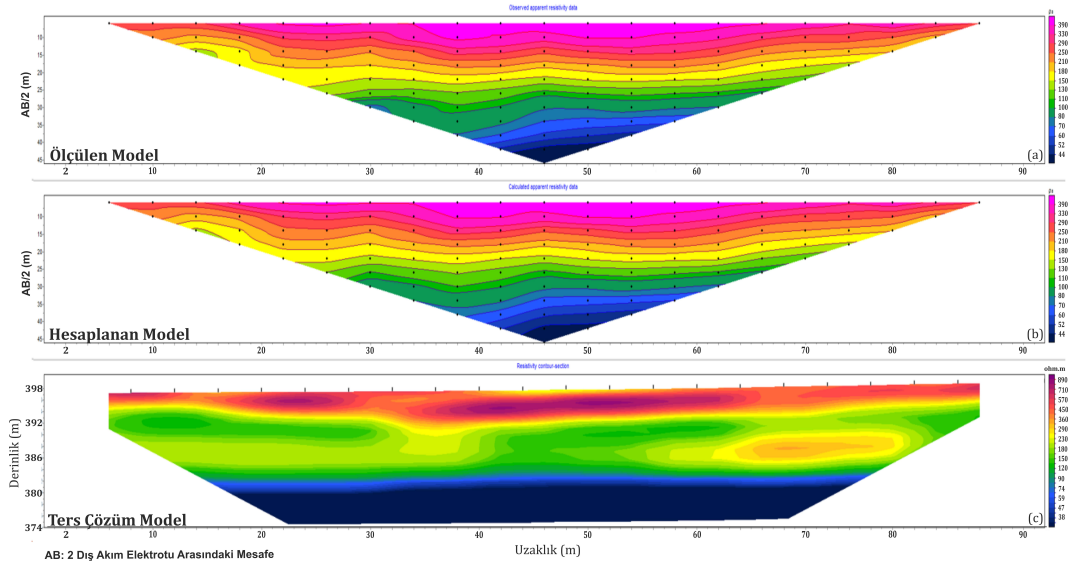


Şekil 45. Tünelin üstünden elde edilen (a) 2B'lu EÖT kesiti, (b) litoloji ile ilişkilendirilmiş 2B'lu EÖT kesiti

Tünel çıkışında yer alan palyelerin üzerinde EÖT ölçümü yapılmıştır (Şekil 46). EÖT kesitine göre, öz direnç değerleri 100-1000 Ohm.m arasında değişirken, ortalama ulaşılan derinlik 22 m'dir (Şekil 47).



Şekil 46. Tünel çıkışı palye üstünde alınan EÖT profilinin konumu

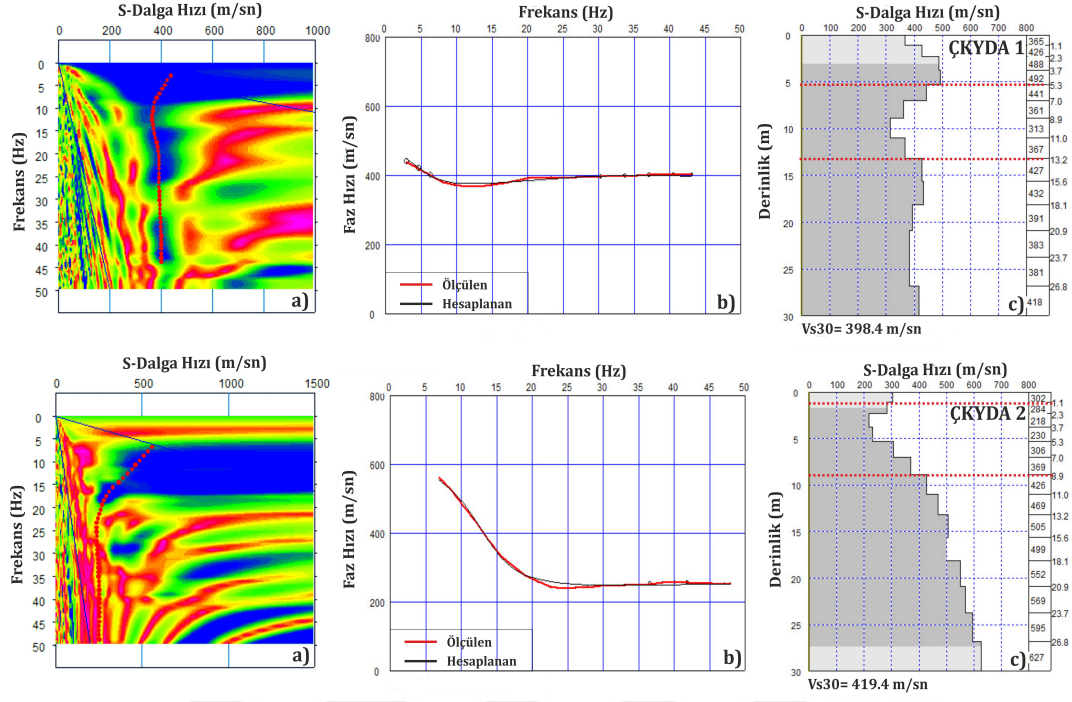


Şekil 47. Tünel çıkışı palye üstündeki EÖT profiline ait (a) ölçülen, (b) hesaplanan ve (c) ters çözümden elde edilen modeller

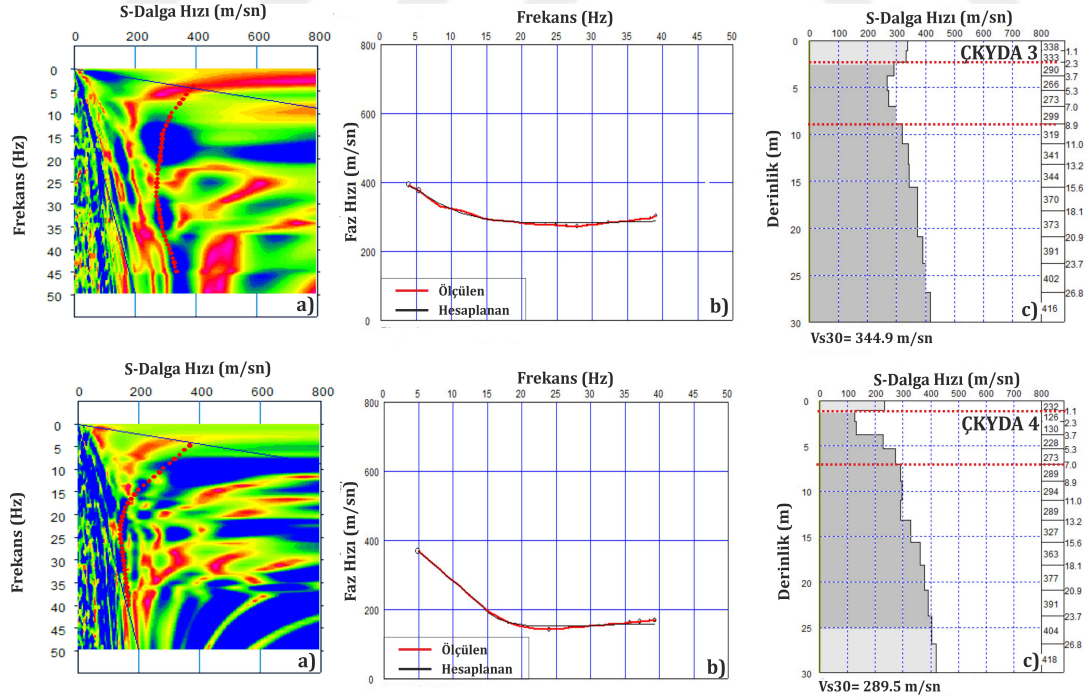
Şekil 48'e göre, yüzeyde sarı-kırmızı-mor renkle ayrımlanan yüksek öz dirençli kırıklı-çatlaklı ancak su içermeyen kaya birimin varlığı görülmektedir. Derinlere doğru inildikçe aynı birimin daha nemli ve suya doymuş olduğu dikkat çekmektedir. Kaya birim en alt kotlarda düşük öz direnç özelliği gösterip, mavi renkle ayrımlanmış ve suya doymuş kırıklı-çatlaklı kaya birim olarak adlandırılmıştır. Tünel içerisinde yapılan EÖT ölçümlerinde görülen su içeriği tünelin hemen çıkışında yer alan palye üzerinde yapılan ölçümlerde de görülmektedir.

4.3. Tünel İçi Çok Kanallı Yüzey Dalgası Analiz Bulguları

ÇKYDA ölçümleri tünelin sağ ve sol yan duvarlarında EÖT profillerinde gerçekleştirilmiştir. ÇKYDA ölçülerinin yapılma amacı, S-dalgası hızının derinlik ile değişimini belirlemek, altere ve sulu kesimlerde, S-dalga hızının azaldığı yerleri tespit etmektir ve böylece YR ve EÖT sonuçlarını desteklemektir. Tünelin sağ ve sol duvarlarında alınan ÇKYDA verileri değerlendirilerek toplam 4 profile ait 1B S-dalgası hız-derinlik modelleri elde edilmiştir (Şekil 49 ve Şekil 50). Bu modellere göre tünel içerisinde sağ ve sol yan duvarlardaki S-dalgası hız değerleri 150-600 m/sn arasında değişmektedir. Sağ ve sol yan duvarlardaki EÖT kesitlerinde 10 m ve 8 m derinliğe kadar aşırı altere ve suya doymuş olan birimin görüldüğü kısımlardan elde edilen S-dalgası hızlarında belirgin azalmaların saptanmış olması, EÖT ve ÇKYDA ölçüm sonuçları ile iyi bir korelasyon olduğunu göstermektedir.



Şekil 49. Tünelin sağ yan duvarındaki ÇKYDA-1 ve ÇKYDA-2 profiline ait (a) enerji alanı (b) dispersiyon eğrisi ve (c) 1B'lu S-dalgası hız modeli



Şekil 50. Tünelin sol yan duvarındaki ÇKYDA-3 ve ÇKYDA-4 profiline ait (a) enerji alanı (b) dispersiyon eğrisi ve (c) 1B'lu S-dalgası hız modeli

5. SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında Doğancı Tüneli içerisinde 11+485-11+579 m arasında YR, EÖT ve ÇKYDA, tünel üzerinde ise 11+590-11+731 m arasında ve tünel çıkışı palye üzerinde EÖT yöntemleri uygulanmıştır. Tünel içi ölçümlerde EÖT ve ÇKYDA'nın yapılamadığı duvar ve tavan kısımlarında YR yöntemi uygulanmıştır. Ölçümler km: 11+485,00 – 11+535,00 arasında tünel eksenine boyunca 50 m'lik bir kısımda gerçekleştirilmiştir. YR ölçüm sonuçları 3B'lu olarak görüntülenmiş ve tünel içi sorunlu bölgeler tespit edilmiştir. Ölçümlerden, tünel tavanı ile duvarlarında bozunma ve su içeriğinin bulunduğu kısımlar belirlenmiş olup, bu yapıların tünel içerisine kadar etkideği görülmüştür. Tünelin sağ ve sol yan duvarlarında alınan tüm ölçümlerde yüzeyde kalınlığı 1 m'ye ulaşan, yüksek öz dirençli zonun (muhtemel beton) altında oldukça düşük öz dirençli birim elde edilmiştir ve bu birimin kalınlığı tünel girişinden çıkışına doğru sağ duvarda yaklaşık 10 metre, sol duvarda ise yaklaşık 8 metredir. Söz konusu birimin aşırı altere olduğu ve bünyesinde yoğun miktarda su bulundurduğu ölçülerde görülen çok düşük öz direnç değerlerinden (4-10 Ohm-m) anlaşılmaktadır. Sağ ve sol duvarda söz konusu derinliklerden sonra kısmen daha sağlam ve daha kuru birimler bulunmaktadır. Tünel üzerinde toplanan EÖT verilerinden, zemine ait yanal/düşey değişimler ile zemin cinsi ve su içeriği hakkında bilgi edinilmeye çalışılmıştır. Tünel üzerine ait EÖT sonuçlarına göre, yamaç molozu birimi düşey yönde 10-11 m derinliğe kadar izlenmektedir. Bununla birlikte, aynı kesitin yatayda 105-110 m arasında açık bir litolojik kontak zonu belirlenmiştir. Tünel çıkışı palye üstünden elde edilen EÖT kesitine göre, yüksek öz dirençli birimin, kırıklı-çatlaklı kaya birim olduğu ve su içermediği değerlendirilmiştir. Aynı birim, daha alt kotlarda düşük öz dirence sahiptir ve derinlere doğru daha nemli ve suya doymuş olduğu anlaşılmıştır. EÖT kesitleri ve 1B-V_s derinlik modelleri birlikte değerlendirildiğinde, EÖT kesitlerinde görülen aşırı altere ve suya doymuş birimlerin S-dalgası hızlarının da düşük olduğu gözlenmiştir.

Sonuç olarak, bu tez çalışmasında, herhangi bir mühendislik ve özellikle de tünel gibi önemli yapılarda ortaya çıkması ve/veya çıkan yapısal problemlerin nedenlerinin tespit edilmesinde ve çözüm önerilerinin sunulmasında jeofizik yöntemlerin sağladığı katkılar gösterilmiştir. Bununla birlikte, tek bir jeofizik yöntemin yerine birbirini destekleyecek birkaç jeofizik yöntemin birlikte kullanılmasının problemi tanımlamada son derece yararlı

ve isabetli olduğu görölmüştür. Böylece, bu tez çalışması tünel yapıları gibi çok özel ve çok ekonomik maliyetli yüksek yapılarda mühendislik problemlerinin incelenmesinde YR, EÖT ve ÇKYDA yöntemlerinin nasıl kullanılacağı ve hangi sonuçlara ulaşılacağı hususlarında yapılacak diğer çalışmalara önemli bir altlık oluşturacağı düşünülmektedir.



6. ÖNERİLER

Tünel içi çalışmalarının ortak değerlendirilmesi sonucunda tünel girişinden çıkışına doğru tünelin sağ duvarında yaklaşık 10 m, sol duvarında yaklaşık 8 m derinliklere kadar aşırı altere ve suya doymuş birimin varlığı söz konusudur. Bu birim tünel tavanında da görülmekte olup, tünel sağlığını etkilemektedir. İleride tünel sağlığı açısından problem oluşturmaması adına tünel etrafında bulunan aşırı altere ve suya doymuş birim için gerekli geoteknik önlemler alınmalıdır. Tünel içerisine yerleştirilen blon (tünellerin tavan, yan duvar ve tabanlarında sistematik veya yerel olarak monte edilen tüm oval sürtünmeli sabitleyici, zemin çivisi) boyları, yapılacak olan jeofizik ölçümlere göre tasarlanmalıdır. Ayrıca, sağ ve sol yan duvarlarda sırasıyla 10 m ve 8 m derinliğe kadar görülen düşük öz dirençli mavi renklerle ayrımlanan birim mutlaka daha detaylı incelenmeli ve bünyesindeki suyun tünel duvarı ile bağlantısı kesilmelidir. Dolayısıyla bu alanın tünel eksenine olan ilişkisinin araştırılması gerekmektedir. Bununla birlikte, zemindeki yanal ve düşey yöndeki değişimler izlenerek sınırları belirlenmiş ve zemine ait problem tespit edilmiştir.

Ek olarak sonraki çalışmalarda, tünel çeper yapısı jeofizik çalışmalarla belirlenebilir ve yapılacak olan tünel elemanlarından blon boyları, jeofizik kesitlere göre hesaplanabilir.

7. KAYNAKLAR

- Aksu, T. F. (2006). Jeofizik elektrik yöntemlerinde 2 boyutlu tomografi ve arazi uygulamaları. *Yeraltı suyu Araştırmalarında Uygulanan Yöntemler ve Saha Uygulamaları Seminer Notları, Jeofizik Mühendisleri Odası*.
- Aktürk, Ö. (2010). *Tünel Çevresindeki Deformasyon Alanının 3-Boyutlu Sayısal Modeller ile Değerlendirilmesi (Necatibey Metro İstasyonu, Ankara, Türkiye)*. ODTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Ankara.
- Akyüz, H. S., & Al, O. (1998). Manyas güneyinin (Balıkesir) jeolojisi ve mavi şistlerin tektonik konumu. *MTA Dergisi*, 120, 105-120.
- Annan, A. P. (2001). GPR-trends, history, and future developments. In *Proceedings of the EAGE 2001 Conference*, Delft, Netherlands.
- Annan, P. (2003). Ground penetrating radar principles, procedures and applications. *Sensors and software*, 278.
- Bano, M., Marquis, G., Niviere, B., Maurin, J. C., & Cushing, M. (2000). Investigating alluvial and tectonic features with ground-penetrating radar and analyzing diffractions patterns. *Journal of Applied Geophysics*, 43(1), 33-41.
- Barbieri, A., Regala, F. T., Cascalheira, J., & Bicho, N. (2023). The sediment at the end of the tunnel: Geophysical research to locate the Pleistocene entrance of Gruta da Companheira (Algarve, Southern Portugal). *Archaeological Prospection*, 30(2), 117-134.
- Başokur, A. T. (1999). Automated 1D interpretation of resistivity soundings by simultaneous use of the direct and iterative methods. *Geophysical prospecting*, 47(2), 149-177.
- Bernard, J., Lemine, M., Diagana, B., & Ricolvi, M. (2004). Combination of electrical resistivity and magnetic resonance sounding data for mapping an aquifer layer in Mauritania. In *SEG International Exposition and Annual Meeting*, Houston.
- Bingöl, E., Akyürek, B., & Korkmazer, B. (1973). Geology of the Biga Peninsula and some characteristics of the Karakaya Formation. *Geological Congress, 50th Anniversary of Turkish Republic, MTA Ankara* (pp. 71-77).
- Candansayar, M. E. (2005). Investigation of the Roman defence wall by using multi-electrode resistivity system. In *4th Congress of the Balkan Geophysical Society* (pp. cp-26). Bükreş.
- Candansayar, M. E. (2016). *Doğru Akım Özdirenç Yöntemi*. Ankara: Ankara Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Jeofizik Mühendisliği Ders Notları.
- Capizzi, P., Cosentino, P. L., Fiandaca, G., Martorana, R., & Messina, P. (2005). 2D GPR and Geoelectrical Modelling–Tests on Man–Made Tunnels and Cavities. *Near*

Surface 2005-11th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, s. cp-13). European Association of Geoscientists & Engineers.

- Cardarelli, E., Marrone, C., & Orlando, L. (2003). Evaluation of tunnel stability using integrated geophysical methods. *Journal of Applied Geophysics*, 52(2-3), 93-102.
- Chen, L., Wang, H., Xu, X., Zhang, Y., Wang, C., Song, J., & Han, L. (2020). Geological exploration using integrated geophysical methods in tunnel: a case. *Geotechnical and Geological Engineering*, 38, 1111-1119.
- Comas, X., Slater, L., & Reeve, A. (2005). Stratigraphic controls on pool formation in a domed bog inferred from ground penetrating radar (GPR). *Journal of Hydrology*, 315(1-4), 40-51.
- Dahlin, T. (1996). 2D resistivity surveying for environmental and engineering applications. *First break*, 14(7).
- Dahlin, T. (2001). The development of DC resistivity imaging techniques. *Computers & Geosciences*, 27(9), 1019-1029.
- Daniels, D. J. (Ed.). (2004). *Ground penetrating radar* (Vol. 1). Iet.
- Davis, J. L., & Annan, A. P. (1989). Ground-penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy 1. *Geophysical prospecting*, 37(5), 531-551.
- Dey, A., & Morrison, H. F. (1979). Resistivity modelling for arbitrarily shaped two-dimensional structures. *Geophysical prospecting*, 27(1), 106-136.
- Ding, Y., Yang, B., Xu, G., & Wang, X. (2022). Improved Dempster-Shafer evidence theory for tunnel water inrush risk analysis based on fuzzy identification factors of multi-source geophysical data. *Remote Sensing*, 14(23), 6178.
- Dikmen, Ü., Başokur, A. T., Akkaya, İ., & Arısoy, M. Ö. (2009). Yüzey dalgalarının çok-kanallı analizi yönteminde uygun atış mesafesinin seçimi. *Yerbilimleri*, 31(1), 23-32.
- Durdağ, D. (2018). *Çok Kanallı Yüzey Dalgaları Analizi (Masw) ve Jeoteknik Uygulamaları*. DEÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İzmir.
- Ergüven, K. (2015). *Tünel İmalatında Yer Radarı Yöntemiyle Tahribatsız Test Uygulaması*. İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Feng, S. J., Zhao, Y., Zhang, X. L., & Bai, Z. B. (2020). Leachate leakage investigation, assessment and engineering countermeasures for tunneling underneath a MSW landfill. *Engineering Geology*, 265, 105447.
- Fores, B., Champollion, C., Lesparre, N., Pasquet, S., Martin, A., & Nguyen, F. (2021). Variability of the water stock dynamics in karst: insights from surface-to-tunnel geophysics. *Hydrogeology Journal*, 29(6), 2077-2089.

- Foti, S. (2000). *Multistation methods for geotechnical characterization using surface waves* (p. 229). na.
- Ghezzi, A., Schettino, A., Pierantoni, PP., Conyers, L., Tassi, L., Vigliotti, L., Schettino, E., Melfi, M., Gorrini, ME., & Boila, P. (2019). Reconstruction of a Segment of the UNESCO World Heritage Hadrian's Villa Tunnel Network by Integrated GPR, Magnetic–Paleomagnetic, and Electric Resistivity Prospections. *Remote Sensing*, 11(15), 1739.
- Griffiths, D. H., Turnbull, J., & Olayinka, A. I. (1990). Two-dimensional resistivity mapping with a computer-controlled array. *First break*, 8(4).
- Griffiths, D. H., & Barker, R. D. (1993). Two-dimensional resistivity imaging and modelling in areas of complex geology. *Journal of applied Geophysics*, 29(3-4), 211-226.
- Hebeler, G. L., & Rix, G. J. (2007). Site characterization in Shelby County, Tennessee using advanced surface wave methods. *MAE Center CD Release 06-02*.
- Holden, J., Burt, T. P., & Vilas, M. (2002). Application of ground-penetrating radar to the identification of subsurface piping in blanket peat. *Earth surface processes and landforms*, 27(3), 235-249.
- Horike, M. (1985). Inversion of phase velocity of long-period microtremors to the S-wave-velocity structure down to the basement in urbanized areas. *Journal of Physics of the Earth*, 33(2), 59-96.
- Izumotani, S., Takeuchi, M., Murayama, H., & Okazaki, K. (2021). Estimating rock properties using seismic refraction survey data: a case study in an abandoned road tunnel. *Exploration Geophysics*, 52(4), 409-418.
- Jol, H. M., & Smith, D. G. (1991). Ground penetrating radar of northern lacustrine deltas. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 28(12), 1939-1947.
- Jol, H. M. (Ed.). (2008). *Ground penetrating radar theory and applications*. elsevier.
- Kadıoğlu, S. (2003). “3D Ground Penetrating Radar-Data Acquisition, Processing, and Interpretation. *14th International Petroleum Congress and Natural Gas Congress and Exhibition, Bildiriler Kitabı*, s. 485-486. Ankara.
- Karşlı, H. (2018). Jeofizik-Jeoteknik İşbirliği Sürecinde Çok Kanallı Yüzey Dalgası Analiz (ÇKYDA) Yöntemi. *Jeofizik Bülteni*, 78, 14-48, JFMO, Ankara.
- Karşlı, H., Babacan, A.E., Sayıl, N., Çoban K.H., & Akın, Ö. (2024). An assessment of seismicity and near surface geophysical characteristics of potential solid waste landfill sites in the Eastern Black Sea Region of Türkiye. *Environ Sci Pollut Res* 31, 14156–14177.
- KGM (2019). Geoteknik Proje Raporu. Bursa. Karayolları 14. Bölge Müdürlüğü.
- Lay, T., & Wallace, T. C. (1995). *Modern global seismology*. Elsevier.

- Lee, Y. H., & Oh, T. (2016). The simple lamb wave analysis to characterize concrete wide beams by the practical masw test. *Materials*, 9(6), 437.
- Levenberg, K. (1944). A method for the solution of certain non-linear problems in least squares. *Quarterly of applied mathematics*, 2(2), 164-168.
- Lin, C., Wang, X., Nie, L., Sun, H., Xu, Z., Du, Y., & Liu, L. (2020). Comprehensive geophysical investigation and analysis of lining leakage for water-rich rock tunnels: A case study of Kaiyuan Tunnel, Jinan, China. *Geotechnical and Geological Engineering*, 38, 3449-3468.
- Liu, R., Sun, H., Liu, D., Wang, X., Zhou, X., Zhao, Y., ... & Sun, H. (2023). A joint application of semi-airborne and in-tunnel geophysical survey in complex limestone geology. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 82(6), 1-17.
- Lowry, T., Allen, M. B., & Shive, P. N. (1989). Singularity removal: A refinement of resistivity modeling techniques. *Geophysics*, 54(6), 766-774.
- Lyu, Y. Z., Wang, H. H., & Gong, J. B. (2020). GPR detection of tunnel lining cavities and reverse-time migration imaging. *Applied Geophysics*, 1-7.
- Marquardt, D. W. (1963). An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. *Journal of the society for Industrial and Applied Mathematics*, 11(2), 431-441.
- Miller, R. D., Xia, J., Park, C. B., & Ivanov, J. M. (1999). Multichannel analysis of surface waves to map bedrock. *The Leading Edge*, 18(12), 1392-1396.
- Nazarian, S., & Stokoe, K. H. (1983). *Evaluation of moduli and thicknesses of pavement systems by spectral-analysis-of-surface-waves method* (No. FHWA-TX-83-26+ 256-4 Intrm Rpt.). The Center.
- Nazarian, S., Stokoe II, K. H., & Hudson, W. R. (1983). *Use of spectral analysis of surface waves method for determination of moduli and thicknesses of pavement systems* (No. 930).
- Neal, A. (2004). Ground-penetrating radar and its use in sedimentology: principles, problems and progress. *Earth-science reviews*, 66(3-4), 261-330.
- Nie, L., Wang, C., Liu, Z., Xu, Z., Sun, X., Du, Y., & Wei, W. (2023). An integrated geological and geophysical approach to identify water-rich weathered granite areas during twin tunnels construction: A case study. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 135, 105025.
- Okada, H. (2003). The microtremor survey method: Geophysical Monograph Series, no. 12. *Society of exploration geophysicists*, 135.
- Okay, A. İ., Siyako, M., & Bürkan, K. A. (1990). Biga Yarımadası'nın jeolojisi ve tektonik evrimi. *Türkiye Petrol Jeologları Derneği Bülteni*, 2(1), 83-121.

- Özdemir, A. (2008). Çok-elektrotlu jeofizik resistivite ölçümlerinin yeraltısuyu ve jeotermal arama alanlarındaki uygulamalarının değerlendirilmesi. *Sondaj Dünyası Dergisi*, 6, 7-13.
- Palacky, G. J. (1988). Resistivity characteristics of geologic targets. *Electromagnetic methods in applied geophysics*, 1, 52-129.
- Park, C. B., Miller, R. D., & Xia, J. (1999). Multichannel analysis of surface waves. *Geophysics*, 64(3), 800-808.
- Park, C. B., Miller, R. D., Xia, J., & Ivanov, J. (2000). Multichannel seismic surface-wave methods for geotechnical applications. In *Proceedings of the First International conference on the application of geophysical methodologies to transportation facilities and infrastructure*, (pp. 11-15), St. Louis.
- Park, C., Miller, R., Laflen, D., Bennett, B., Ivanov, J., Neb, C., & Huggins, R. (2004). Imaging dispersion curves of passive surface waves. In *SEG International Exposition and Annual Meeting* (pp. SEG-2004). Houston.
- Park, C. B., Miller, R. D., Xia, J., & Ivanov, J. (2007). Multichannel analysis of surface waves (MASW)—active and passive methods. *The Leading Edge*, 26(1), 60-64.
- Pasierb, B., & Nawrocki, W. (2020). Not only the ‘Gold Train’—the ‘Underground Town’ of Riese (Poland)—the ambiguity of interpretation ERT and GPR methods. *Archaeological Prospection*, 27(4), 361-375.
- Radinger, A., Hofmann, T., Holzer, R., Fasching, F., & Kusnirak, D. (2021). Highly specialized geophysical methods for underground construction works—Semmering Base Tunnel, a practice report. *Geomechanics and Tunnelling*, 14(5), 654-660.
- Sezer, H. (2010). *Yer Radarı Yöntemi ile Zonguldak Demiryolu Tünelinin Duraylılığının ve Çevresel Etkilerinin Araştırılması*. Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara.
- Sharma, S., Thakur, S., & Sharma, T. (2021, November). Applications of Geophysical Methods in Tunnel and Oil Exploration. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 889, No. 1, p. 012015). IOP Publishing.
- Stokoe II, K. H., Wright, S. G., Bay, J. A. & Roesset, J. A. (1994). Characterization of geotechnical sites by SASW method, in *Geophysical Characterization of Sites, Technical Committee for XIII ICSMFE*, A. A. Balkema, Rotterdam, The Netherlands, 785–816.
- Su, M., Zhao, Y., Xue, Y., Wang, P., Xia, T., Zhang, K., & Li, C. (2021). Progressive fine integrated geophysical method for karst detection during subway construction. *Pure and Applied Geophysics*, 178, 91-106.
- Şanlıyüksel, D. (2007). *Kırkgecit (Biga-Çanakkale) jeotermal sahasının hidrojeokimyasal özelliklerinin incelenmesi*. ÇOMÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Çanakkale.

- Thorson, J. R., & Claerbout, J. F. (1985). Velocity-stack and slant-stack stochastic inversion. *Geophysics*, 50(12), 2727-2741.
- Van Overmeeren, R. A., & Ritsema, I. L. (1988). Continuous vertical electrical sounding. *First Break*, 6(10).
- Yalçın, C. Ç., Bano, M., Kadioglu, M., Karabacak, V., Meghraoui, M., & Altunel, E. (2009). New temple discovery at the archaeological site of Nysa (western Turkey) using GPR method. *Journal of Archaeological Science*, 36(8), 1680-1689.
- Yıldırım, E. (2021). *Afyonkarahisar-Emirdağ (Karaağaç) Yeraltı Suyu Potansiyelinin Elektrik Özdirenç Tomografi Yöntemi ile Araştırılması*. SDÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Isparta.
- Yoon, S., & Rix, G. J. (2004). Combined active-passive surface wave measurements for near-surface site characterization. In *17th EEGS Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*, (pp. cp-186), Colorado.
- Xia, J., Miller, R. D., & Park, C. B. (1999). Estimation of near-surface shear-wave velocity by inversion of Rayleigh waves. *Geophysics*, 64(3), 691-700.
- Xia, J. (2006). Delineating Subsurface Features with the MASW Method at Maxwell AFB in Montgomery, Alabama. *KGS Open-File Report 2006-1*, http://www.kgs.ku.edu/Geophysics/OFR/2006/OFR06_01/index.html.
- Zywicki, D. J. (1999). *Advanced signal processing methods applied to engineering analysis of seismic surface waves*. Georgia Institute of Technology.
- URL-1. (2024, Ocak 10). http://www.geotekalaska.com/geophys_svcs/ground_radar.html
- URL-2. (2023, Aralık 28) <https://web.itu.edu.tr/~caglari/jeotermal/jeoelek.html#5>
- URL-3. (2023, Aralık 29). <https://www.geoim.net/elektrik-resistivite-tomografi-ert-yontemi/>
- URL-4. (2023, Aralık 30). https://gemlik.bel.tr/dosyalar/imarplanlari/2016_324_PD_rapor.pdf
- URL-5. (2023, Aralık 25). <https://www.gpr-survey.com/>
- URL-6. (2023, Aralık 24). <https://geodevice.co/product/zondres2d/>
- URL-7. (2023, Ekim 17). <https://www.geometrics.com/software>

ÖZGEÇMİŞ

Mustafa KİRİCİ, ilk öğrenim hayatını İstanbul Saffet Simavi İlköğretim okulunda, orta öğrenim hayatını ise Trabzon Hasan Saka İlköğretim okulunda tamamladı. Lise eğitimini 2000-2004 yılları arasında Akçaabat Yabancı Dil Ağırlıklı Lisesi'nde geçirdi. 2006 yılında Cumhuriyet Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği lisans programına başladı. 2010 yılında ise lisans eğitimini tamamlayarak mezun oldu. 2012 yılından itibaren Zimer Mühendislik isimli firmada yönetici ve sahibi pozisyonunda olup, yurt içi ve yurt dışı birçok projede görev almıştır. Evli ve iki çocuk babasıdır.

