



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

Mustafa KİRİCİ¹, Hakan KARSLI^{2*}

¹ Zimer Mühendislik, Trabzon, Türkiye

² Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, Trabzon, Türkiye

Anahtar Kelimeler	Öz
<i>Çok Kanallı Yüzey Dalgası Analizi, Elektrik Özdirenç Tomografi, Yer Radarı, Tünel.</i>	Tüm dünyada karayolu tünellerin yapımı sırasında ve sonrasında, jeolojik koşullardan kaynaklı pek çok mühendislik problemi ile karşılaşmaktadır. Bu çalışmada, Bursa İli Osmangazi-Orhangazi ilçeleri bağlantı karayolundaki Doğancı Tüneli'nin yan ve tavan duvarlarından su sızıntılarının ve ilişkili oluşan deformasyonların belirlenmesinde, üç farklı jeofizik yöntemin sağladığı katkılar incelenmiştir. Bu kapsamda, tünelin iç duvarlarında Yer Radarı (YR), Elektrik Özdirenç Tomografi (EÖT) ve Çok Kanallı Yüzey Dalgası Analizi (ÇKYDA), tünelin girişinde üst kotta ve çıkışındaki palye üstünde sadece EÖT ölçümleri yapılmıştır. Özdirenç değerleri 4-1000 Ohm.m ve S-dalga hızı değerleri 280-800 m/s arasında elde edilmiştir. Birbirine paralel YR profillerinden tünelin duvarlarının ve dış cephesinin üç boyutlu görüntüleri oluşturulmuştur. Tüm bulgular birlikte değerlendirildiğinde, genel olarak özdirencin ve S-dalga hızının düşük, YR genliklerinin ise görece yüksek olduğu tünel bölümleri su sızıntılarından kaynaklı deformasyonlarla ilişkilendirilmiştir. Sonuç olarak, birkaç jeofizik yöntemin birlikte kullanılmasının tünellerde gözlenen deformasyonların kaynağının belirlenmesinde son derece yararlı olduğu görülmüştür.

DETERMINATION OF ENGINEERING PROBLEMS ENCOUNTERED IN TUNNEL STRUCTURES USING GEOPHYSICAL METHODS: THE CASE OF DOĞANCİ TUNNEL IN BURSA PROVINCE

Keywords	Abstract
<i>Multichannel Analysis of Surface Wave, Electrical Resistivity Tomography, Ground Penetrating Radar, Tunnel.</i>	During and after the construction of highway tunnels all over the world, many engineering problems originating from geological conditions are encountered. In this study, the contributions of three different geophysical methods were investigated in determining the water leakages and related deformations from the side and ceiling walls of the Doğancı Tunnel on the Osmangazi-Orhangazi districts connection highway of Bursa Province. In this context, Ground Penetrating Radar (GPR), Electrical Resistivity Tomography (ERT) and Multi-Channel Surface Wave Analysis (MASW) were measured on the inner walls of the tunnel, and only the ERT measurements were made on the upper level at the entrance and on the berm at the exit of the tunnel. Resistivity values were obtained between 4-1000 Ohm.m and S-wave velocity values were between 280-800 m/s. Three-dimensional images of the tunnel walls and exterior facade were created from parallel ER profiles. When all the findings are evaluated together, the tunnel sections where the resistivity and S-wave velocity are generally low and the YR amplitudes are relatively high are associated with deformations caused by water leaks. As a result, it has been seen that the use of several geophysical methods together is extremely useful in determining the source of the deformations observed in the tunnels.

Alıntı / Cite

Kirici, M., Karşı, H., (2025). Tünel Yapılarında Karşılaşılan Mühendislik Problemlerinin Jeofizik Yöntemlerle Belirlenmesi: Bursa İli Doğancı Tüneli Örneği, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 13(2), 632-648.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

M. Kirici, 0009-0003-2563-1415
H. Karşı, 0000-0002-7758-1363

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	31.12.2024
Revizyon Tarihi / Revision Date	24.03.2025
Kabul Tarihi / Accepted Date	24.03.2025
Yayın Tarihi / Published Date	27.06.2025

* İlgili yazar / Corresponding author: hkarşı@ktu.edu.tr, +90-462-377-2020

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

Mustafa KİRİCİ¹, Hakan KARSLI^{2†}

1 Zimer Engineering, Trabzon, Türkiye

2 Karadeniz Technical University, Engineering Faculty, Department of Geophysical Engineering, Trabzon, Türkiye

Highlights

- Use of geophysical methods to detect the source of water leaks in tunnels
- Contributions of combined use of ERT, GPR and MASW methods in determining water leakage and deformations
- Demonstration of applicability of geophysical methods on concrete surfaces

Purpose and Scope

The aim of this study is to investigate the contributions of three different geophysical methods in determining water leakages and related deformations from the side and ceiling walls of the Doğancı Tunnel on the Osmangazi-Orhangazi districts highway in Bursa Province.

Design/methodology/approach

Within this scope, Ground Penetrating Radar (GPR), Electrical Resistivity Tomography (ERT), and Multi-Channel Analysis of Surface Waves (MASW) measurements were conducted on the right and left sidewalls and the roof of the tunnel. ERT measurements were also performed on the upper exterior surface and the bench at the tunnel's exit.

Findings

According to all geophysical sections, areas with generally low resistivity and S-wave velocity, along with relatively high GPR amplitudes, were associated with deformations caused by water leakage. As a result, it was concluded that the combined use of several geophysical methods is extremely effective in determining the source of water leakage.

Originality

This study is original in that it is one of the first academic studies in our country that presents the applicability and contributions of geophysical methods in tunnels and on concrete surfaces.

[†] Corresponding author: hkarsli@ktu.edu.tr, +90-462-377-2020

1. Giriş (Introduction)

Ulusal ve uluslararası ulaşımında zorlu coğrafik koşulların aşılmasında, karayolları, demiryolları ve su kanallarının önemli bir parçasını oluşturan tünellerin tasarımı sırasında yeterli düzeyde dikkate alınmayan jeolojik ve hidrojeolojik koşullar, kaya kütlelerinde meydana gelebilecek deformasyonlar 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 de hasarlar meydana gelmektedir. Bu tür hasarların tespit edilmesine yönelik olarak, tünel tavanı ve yan duvarlarındaki kırık ve çatlakların tespiti, boşlukların tanımlanması, kısmen veya tamamen su ile dolu olup olmadığı, su sızıntısının ve içeriğinin belirlenmesi, tünel duraylılığının incelenmesi gibi birçok konuda jeofizik yöntemler oldukça başarılı sonuçlar sağlamaktadır (Cardarelli vd., 2003; 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 (YR), elektrik öz direnç tomografi (EÖT), çok kanallı yüzey dalgası analizi (ÇKYDA) gibi tahribatsız jeofizik yöntemler yaygın olarak kullanılmaktadır (Lin vd. 2020; Sharma vd. 2021; Barbieri vd. 2023). Bu kapsamda, olası problemlerin tespiti ve çözümünde tek bir yöntem yerine birkaç yöntemin birlikte kullanımı ve yorumu daha başarılı sonuçlar elde edilmesine olanak sağlamaktadır (Cardarelli vd., 2003; Ghezzi vd., 2019; Pasierb ve Nawrocki, 2020).

Doğal veya yapay tünellerin ve boşlukların (hava ve/veya su dolu) varlığıyla ilişkili jeolojik risklerin en aza indirilmesine yönelik mühendislik ve çevre projesi çalışmalarında, EÖT ve YR uygulamaları önemli bir yere sahiptir. Tünel amaçlı yeraltı kazılarının yapıldığı yerlerde duraylılık sorunlarının, kaplama malzemelerinin düşme nedenlerinin, dolgu birimlerinin durumunun, boşlukların, kırıkların, su içeriğinin tespit edilmesinde ve konumlandırılmasında (Lin vd., 2020; Feng vd., 2020; Nie vd. 2023), önceki beton (precast)-dolgu beton-doğal zemin sınırlarının belirlenmesinde (Ergüven 2015), beton kalitesinin tespitinde (Sabbağ ve Uyanık, 2017, 2018), tünel içi dolguların yapısal durumu ve kırık-çatlak yerlerinin belirlenmesinde (Sezer, 2010), zeminin ve karstik boşlukların 3B'lu görüntülerinin oluşturulmasında (Capizzi vd., 2005; Aktürk, 2010; Kadioğlu ve Ulugergerli, 2012) EÖT ve YR yöntemleri önemli uygulama alanı bulmuştur. Bununla birlikte, literatürde birçok çalışmada (Özçep vd. 2010; Uyanık vd., 2013; Pamuk vd. 2017; Durdağ 2018; Uyanık, 2020; Aytaş vd., 2023; Karşlı vd. 2024a; Uyanık vd. 2024) yaygın olarak kullanılan ÇKYDA yöntemi, tünel, köprü, baraj gibi yapıların oturacağı zeminin geometrisinin, fiziksel özelliklerinin ve dinamik davranışlarının (büyütme, sıvılaşma, hakim titreşim frekansı), yeraltı boşluklarının, dolgu-zemin ve zemin-kaya ayırımının belirlenmesinde etkin bir jeofizik yöntem olarak kullanılmıştır.

Bu çalışma, Bursa İli Osmangazi İlçesi ile Orhanlı İlçesi arası karayolu güzergahındaki Doğancı köyünde, inşası 2024 yılında tamamlanmış olan Doğancı Tüneli'nin içerisinde, tünelin girişinde üst kotta ve tünelin çıkış tarafı palye (belirli yüksekliklerde şevlere uygulanan basamak sistemi) üzerinde üç farklı jeofizik (ÇKYDA, EÖT ve YR) yöntem uygulanmıştır. Bu kapsamda, zeminin su içeriğinin, S-dalgası hız (Vs) değişiminin ve dolayısıyla tünel duvarlarını etkileyebilecek unsurların (su gelimi, şişme, kırık, çatlak, vb.) tespitinin yapılması ve haritalanması hedeflenmiştir. Doğancı Tüneli'nin konumu ve tünelin geçtiği alanın genel jeolojisi, kullanılan jeofizik yöntemler ve gerçekleştirilen ölçümler hakkında bilgiler, elde edilen jeofizik parametrelerin değişimleri jeofizik bulgulara göre yapılan değerlendirmeler verilmiştir. Çalışmada kullanılan jeofizik yöntemlerin (YR, EÖT ve ÇKYDA) tünel yapılarında karşılaşılabilecek muhtemel su sızıntısı ve deformasyon problemlerinin belirlenmesinde birbirini destekleyici önemli katkılar sağladığı görülmüştür.

2. Çalışma Alanı ve Genel Jeolojisi (Study Area and General Geology)

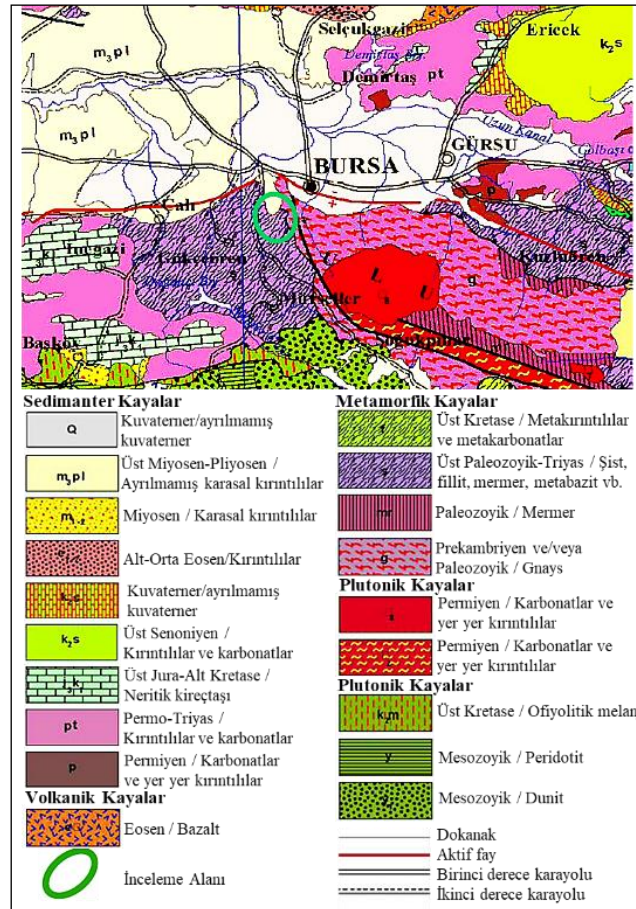
Doğancı Tüneli projesinin konum başlangıcı Km: 8+750.00 (Osmangazi-Orhanlı yolunun 8'nci kilometresinin-K 750'nci metresi-m) ve bitişi Km: 13+205.83 olarak belirlenmiştir. Bursa'nın Orhanlı ilçesini şehir merkezine bağlayan ve inşası 2024 Ocak ayında tamamlanmış olan tünel, Km: 10+420.00' da başlayıp, Km: 12+456.00' da sonlanmakta olup, tünel uzunluğu L=2036 m' dir. Bu tünelde R=2000 m olan yatay kurb (yol planında düz kısımlar arasındaki eğri kısımlar) yer almaktadır (Şekil 1). Tünelin giriş kotu deniz seviyesinden 290 m ve çıkış kotu 366 m olup, tünel güzergahı boyunca Karakaya Karmaşığı'na ait şist-kireçtaşı birimleri gözlenmiştir. Giriş tarafında çoğunlukla şist ve kireçtaşı birimlerinin ardalanması görülürken, çıkış tarafına doğru şist biriminin hakim olduğu raporlanmıştır (KGM, 2019).

Bölgede yüzeyleyen kayaların stratigrafik dağılımı incelendiğinde, Trias öncesi metasedimanter Kalabak Formasyonu, Çamlık Metagranodiyoriti ve Manyas Grubu birimlerini içeren ve Karakaya Karmaşığına ait metamorfik kayaç topluluklarından oluşan Kazdağ Grubunun egemen olduğu görülmektedir (Bingöl vd. 1973). Tektonik olarak Kazdağ Grubu Metamorfitleri Karakaya Karmaşığı'nın 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 Karmaşığı içinde 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 açılal uyumsuzluk ile Kuvaterner yaşlı yamaç molozu ve alüvyon birimi gelmektedir (Şekil 2).



Şekil 1. Doğancı Tüneli'nin konumu. Bursa İli merkez ilçesi Osmangazi'den Orhaneli İlçesi kara yolunun Km:8+750 ve Km:13+205.83 arasındaki Doğancı Köyü (The location of the Doğancı Tunnel. The Doğancı Village between Km: 8+750 and Km: 13+205.83 of the highway from Osmangazi, the central district of Bursa Province, to Orhaneli District)



Şekil 2. İnceleme alanı ve çevresinin genel jeoloji haritası (MTA, 1/500 000 ölçekli) (General geological map of the study area and its surroundings (MTA, 1/500 000 scale))

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. Yeniden kristalize olmuş 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 3).

ÜST SİSTEM	SİSTEM	SERİ	FORMASYON	SİNGE	LİTOLOJİ	AÇIKLAMALAR
			ÜYE			
SENOZOYİK	KUVATERNER		Alüvyon	Qal		Blok ve çakıldan 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 Permien – Orta Triyas	Karakaya Karmaşığı	TRkk		Rekristalize kireçtaşı, Fillit, Grovak, Diyabaz, Şist, Kloritşist ve Grafitikşist birimlerinden meydana gelmektedir.

Şekil 3. İnceleme alanının genelleştirilmiş stratigrafik kesiti (KGM, 2019))
(Generalized stratigraphic section of the study area)

3. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

3.1. Kullanılan Jeofizik Yöntemler (Used Geophysical Methods)

Doğancı Barajı Tüneli'n deki su sızıntısı sorununun kaynağını tespit etmek üzere tünelin sağ ve sol yan duvarları ile tünel tavanında, YR, EÖT ve ÇKYDA, tünel içi profillere ek olarak, tünelin üst kodunda ve çıkışındaki palye üstünde yerin su içeriği ve yapısal durumu hakkında bilgi edinmek için sadece EÖT ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

YR yöntemi, yeraltında gömülü nesnelerin ve litolojik arayüzeylerin konumunu belirlemek için elektromanyetik dalganın yayılma ilkelerini kullanır (Jol ve Smith, 1991; Annan, 2003). Farklı elektromanyetik özelliklere sahip gömülü tank, boşluklar, inşaata yönelik temel yapıları, sediman tabakalar, su tablası veya arkeolojik kalıntılar gibi nesnelerin farklı dielektrik sabitli olmasından kaynaklı olarak yer radarı yansımaları oluşmaktadır (Davis ve Annan, 1989). Yöntem farklı frekanslı (Birkaç 10 MHz'den birkaç GHz'e değişen) bir verici (Tx) bir alıcı (Rx) anten kullanarak, yakın yüzey yer altı jeolojik malzemelerin özelliklerini (dielektik sabiti ve geçirgenlik, hız, kırık, çatlak, gözenek, vb.) ve gömülü unsurları (mağara, boşluk, metal olan ve olmayan nesneler) herhangi bir kazıya gerek kalmadan hızlı, güvenli ve tahribatsız bir araştırma yapma imkânı sağlamaktadır. Bu kapsamda, YR 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. Yöntemde korumalı (verici ve alıcı anten muhafazalı bir sistem içinde) veya korumasız (verici ve alıcı anten açıkta tutulur) antenler yüzeyde bir profil boyunca ilerletilerek yer içindeki unsurlardan yansıma sinyalleri sürekli olarak kaydedilir. Bu yansıma izlerine radagram denilir ve bu izlerin yüzlercesi bir araya getirilerek 2-boyutlu (2B) radar kesitleri oluşturulur. Ayrıca, bir sahada birbirine paralel 2B'li radar profilleri birleştirilerek üç boyutlu olarak görüntülenmektedir (Kadioğlu, 2003).

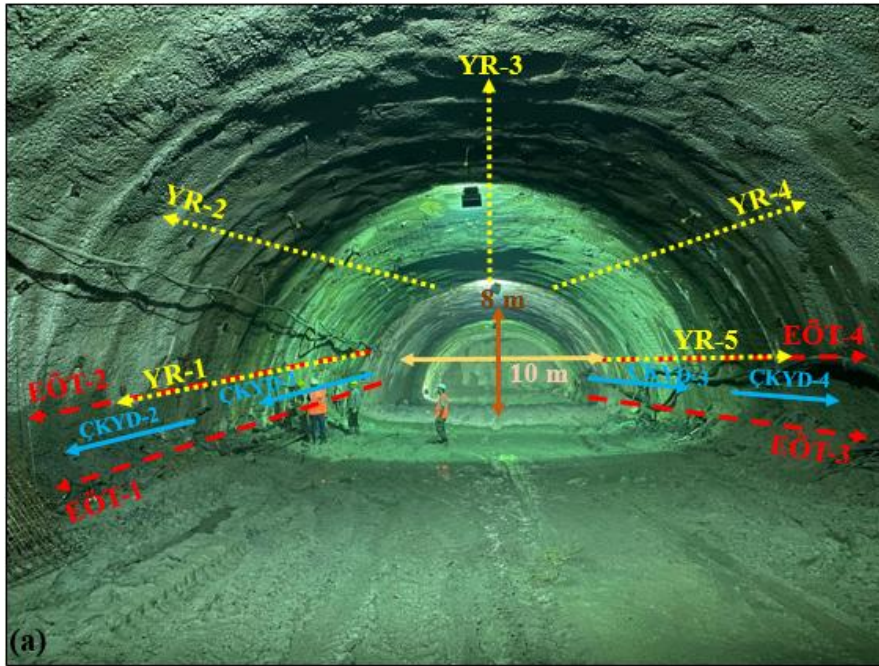
ERT yöntemi, yakın yüzey araştırmalar için en yaygın kullanılan yöntemlerden biridir (Dahlin, 2001; Loke vd., 2018) ve jeolojik malzemelerin elektriksel öz dirençlerindeki değişiklikleri haritalamayı sağlar. Bu nedenle birçok yeraltı yapısal, fiziksel ve kimyasal özellikleri araştırma ve jeoteknik projelerinde giderek daha önemli bir hale gelmiştir (Loke vd., 2013; Loke vd., 2018). Bunlar mineral arama (Irawan vd., 2013; Arifin vd., 2019), hidrokarbon arama (Bauman, 2005), kirliliğin izlenmesi (Chambers vd., 2006; Rucker vd., 2010), yeraltı suyunun araştırılması (Page, 1968; Yılmaz ve Yıldırım, 2021), tuzlu su girişiminin haritalanması (Wilson vd., 2006; Kaya vd., 2015; Babacan ve Ceylan, 2021), arkeolojik arama (Tsokas vd., 2008; Gündoğdu vd., 2017; Yılmaz vd., 2019; Yılmaz vd., 2021), katı atık depolama alanlarının yer seçimi (Karlı vd., 2024), yeraltı boşluklarının tespiti (Cardarelli vd., 2006; Funk vd., 2024; Alemdağ vd., 2024) gibi temel araştırma alanları olarak sıralanabilir. Bununla birlikte, ERT yöntemi jeolojik, çevresel, mühendislik ve hidrojeolojik sorunlarının tespitine ve çözümüne yönelik olarak

yeraltının 2B ve 3B'lu modellerin elde edilmesini sağladığı için (Griffiths ve Barker, 1993), jeoteknik proje çalışmalarında etkili ve yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Loke vd., 2013; Abdullah vd., 2018; Babacan ve Ceylan, 2021).

ÇKYDA yöntemi, sıkı jeofizik araştırmalarda S-dalga hızının (V_s) derinlik değişiminin pratik ve güvenilir olarak elde edilmesi için geliştirilen tahribatsız bir sismik yöntemdir ve son yirmi yıldır yakın yüzey yer altı karakterizasyonu için etkin ve geniş bir kullanım alanına sahiptir (Park vd., 1999; Miller vd., 1999; Socco ve Strobba, 2004; Park vd., 2004; Foti vd., 2011; Geraldine C vd., 2018; Karlı 2018; Karlı vd., 2024b). ÇKYDA yüzey dalgasının (esas olarak Rayleigh dalgası) dispersiyon özelliklerini (faz hızının frekansa bağlı değişimi) kullanır. Bu kapsamda, yöntem, üç temel aşama olan veri toplama (arazide veri kaydı), işleme (f-c görüntüsünün elde etme ve dispersiyon eğrisi pikleme) ve yorum (ters çözüm ile 1B'lu kayma dalgası hızı (V_s)-derinlik profilinin elde edilmesi) aşamalarını içerir. Böylece, V_s jeoteknik projelerde giderek daha fazla kullanım alanı bulan önemli bir fiziksel parametre olmuştur ve literatürde yaygın olarak yer almaktadır (Miller vd., 1999; Xia vd., 2002a, 2002b; Anbazhagan ve Sitharam, 2008; Park et al., 2018) ve zemin karakterizasyonu yapmak için gerekli olan VS30 değerinin (zemin sınıflamasında kullanılan 30 m derinlik için ortalama S-dalga hızı) hesaplanması, zeminin sıklık-katılık değerlendirmesi, zemin-kaya ayrımının yapılması, zemin ve kayaların dinamik elastik parametrelerinin hesaplanması (elastisite, kayma ve hacim modülleri) ve zeminin dinamik davranışlarının (emniyetli taşıma kapasitesi veya zemin emniyet gerilmesi, ani veya elastik oturma, zemin büyütmesi, zemin hakim titreşim periyodu, sıvılaşma) belirlenmesi için vazgeçilmezdir.

3.2. Veri Toplama ve İşleme (Data Acquisition and Processing)

Şekil 4 profillerin konumlarını göstermektedir. Buna göre, tünel içinde sağ ve sol duvarlardaki 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 2.0 m yükseklikten başlamak üzere eşit mesafelerde 5 profil olacak şekilde tünel eksenini boyunca ölçülmüştür. EÖT-2 ve YR-1, EÖT-4 ve YR-5 ölçümleri üst üste profillerdir (tünel tabanından 2.0 m yüksektedirler), gösterim amaçlı farklı çizilmiştir (Şekil 4a). Tünelin tabandan yüksekliği 8 m ve genişliği 10 m'dir. Tünel girişine yakın-üst kotta (Şekil 4b, EÖT-5) ve tünel çıkışı palye üstünde (Şekil 4c, EÖT-6) yamaçlardan tünel sahasına ve içine muhtemel su gelimi olup olmadığını anlamak ve yeraltı yapısal durumunu görüntülemek için sadece EÖT ölçümleri yapılmıştır. Her bir yöntemle ait ölçüm parametreleri Tablo 1'de verilmiştir. Şekil 4b'de temsili olarak gösterilen tünel güzergahı (TG) EÖT-5 profilinden yatayda yaklaşık 50 m daha uzaktan ve yaklaşık 25-35 m derinden geçmektedir.





Şekil 4. (a) Tünel içi , (b) giriş üst kotta ve (b) çıkış palye üstündeki jeofizik ölçümlere ait profil konumları. TG: Tünel Güzergahı. TG ile EÖT-5 arasında yatayda yaklaşık 50 m mesafe vardır ve TG yüzey topoğrafyasına bağlı yaklaşık 25-35 m arasında değişen derinliklerden geçmektedir. (Çizimler ölçeksizdir)

(Profile locations of geophysical measurements (a) inside the tunnel, (b) at the entrance upper level and (b) at the exit berm. TG: Tunnel Route. There is a horizontal distance of approximately 50 m between TG and ERT-5 and TG passes through depths varying between approximately 25-35 m depending on the surface topography. (Drawings are not to scale))

Tablo 1. Ölçüm yöntemleri, ekipmanlar ve parametreler
(Measurement methods, equipment and parameters)

Ölçüm Yöntemi	Ekipman ve Ölçüm Parametreleri
YR	Cihaz: GSSI Marka SIR3000, 270 MHz korumalı anten Profil Sayısı: 5 Yazılım: GPR-Slice (URL-1, 2023)
EÖT	Cihaz: Ambrogeo-Mangusta, Ambrogeo Instruments, ITALY Elektrot sayısı ve malzemesi: 48, çelik Elektrot dizilimi: Wenner-Schlumberger Elektrot aralığı: Tünel içi ve Palyede 2.0, Tünel girişi üst kotta 3.0 m Yazılım: ZondRes2d (URL-2, 2023)
ÇKYDA	Cihaz: PASI Marka, Gea-24 Model Kayıt süresi: 0.5 s Örnekleme zamanı: 0.5 ms Alıcı sayısı: 24 Alıcı frekansı: 4.5 Hz Alıcı aralığı: 2 m Kaynak ofseti: 8 m Düşey yığılma: 3 Kaynak: 9 kg balyoz Tabla: 20x20x5 cm metal Yazılım: SeisImager/SW (URL-3, 2023)

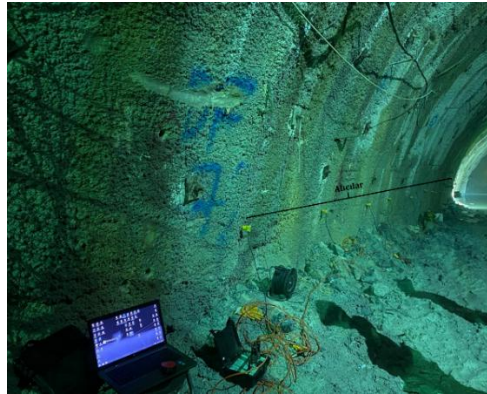
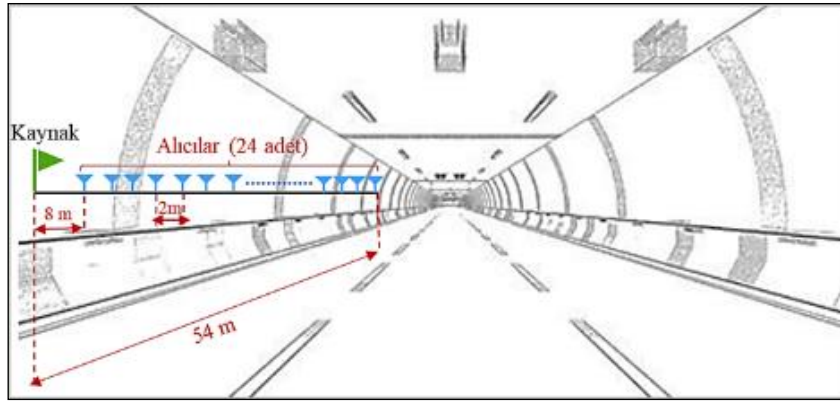
Tünelin içinde beton duvarların varlığından ve tavan yüksekliğinden kaynaklı olarak jeofizik ölçümlerin yapılabilmesi zorlaşmaktadır. Bu nedenle özel ölçü düzenekleri ve ölçüm işlemini kolaylaştıracak destekleri kullanmak gerekir. Şekil 5’de tünel yan duvarlarında ve tavanında sürekli YR ölçümlerinin alınabilmesi için sepetli bir araç kullanılmıştır. ERT verilerinin toplanmasında, tünel içindeki duvarlarda yer alan beton kaplamadan dolayı elektrotlar çakılabilmesi ve arkadaki zeminle kontakının sağlanabilmesi için belirlenen elektrot yerleri delici makina ile delinmiştir. Sonra, özel üretilen 120 cm uzunluğundaki uzun çelik elektrotlar kullanılmış olup, her bir elektrot yerine bentonit ile macun enjekte edilmiş ve bu sayede kontak direncin önüne geçilmiştir (Şekil 6). Benzer şekilde ÇKYDA analiz verilerinin duvar yüzeyinden toplanabilmesi için (tünelin yan duvarlarının kalınlığı 1m’dir) duvar matkap yardımı ile delinerek alıcılar sıkı bir şekilde ölçü hattı üzerine yerleştirilmiştir (Şekil 7).



Şekil 5. Tünel içerisinde sepetli araç kullanılarak YR verilerinin toplanması
(GPR data acquisition using a basket vehicle in the tunnel)



Şekil 6. EÖT’de kullanılan özel üretim elektrotların tünel duvarına yerleştirilmesi (solda) ve ölçü alımı (sağda)
(Placing the specially produced electrodes used in ERT on the tunnel wall (left) and measurements (right))



Şekil 7. Tünel içerisinde sismik veri toplamada kaynak-alıcı geometrisinin şematik gösterimi (üstte) ve alıcıların yan duvarlara yerleştirilmesi (altta) (Schematic representation of source-receiver geometry for seismic data collection inside the tunnel (top) and placement of receivers on side walls (bottom))

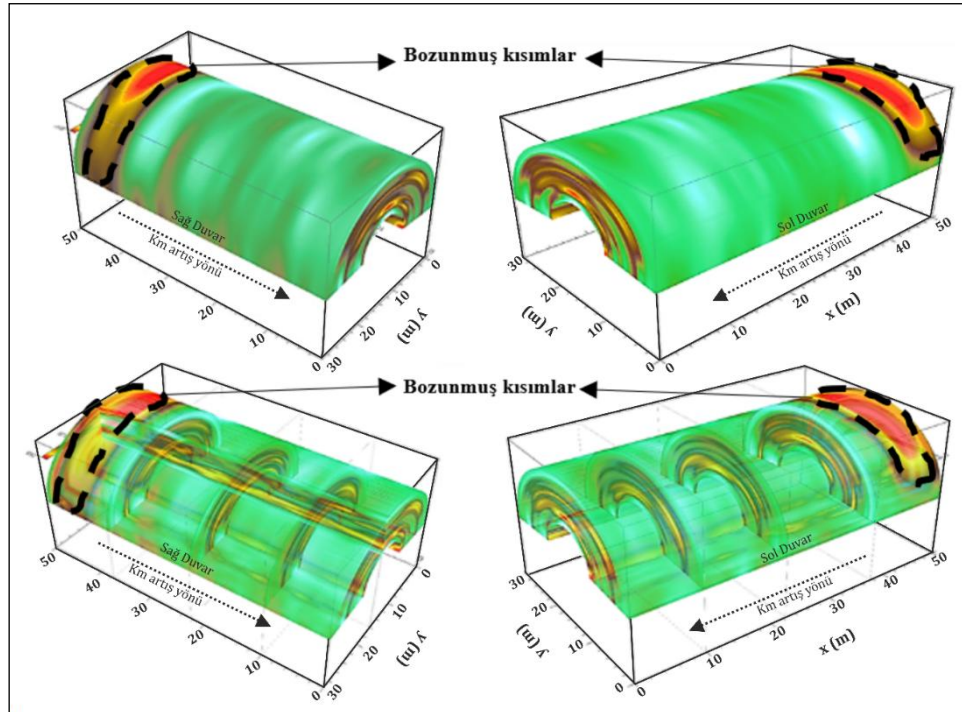
Çalışma kapsamında toplanan jeofizik veriler kendi teorik temelleri kapsamında işlenerek yoruma hazır hale getirilmiştir. Ham YR verilerinin işlenmesinde ve elde edilen radagramlardan tünele ait 3B'lu ve eşyüzey (katı model, eş yüzey/isosurface) haritalar/görüntülerin oluşturulması için lisanslı GPR-Slice yazılımı kullanılmıştır (URL-1, 2023). Verilerin işlenmesinde, ortam hızı, tüm radagram verileri üzerinde yapılan hiperbol (hız analizi) analizlerinden ortalama olarak 0.105 m/ns olarak belirlenmiş ve kullanılmıştır. Ham verilere sırası ile, arka plan gürültünün (veya sabit bileşen) kaldırılması (background removal), çok düşük frekanslı bileşenin kaldırılması (dewow), sıfır zaman düzeltilmesi, bant geçişli süzgeç (isteğe bağlı) ve genlik düzeltme/dengeleme işlemleri uygulanmıştır. Elde edilen görüntüler tünel içine sızan suyun geliş yolu hakkında (şekil, boyut, konum) sadece yüzeyssel değil aynı zamanda derinlik boyutunda bilgiler sunmuştur.

ERT verilerinin analizinde ZondRes2d yazılımı kullanılmıştır (URL-2, 2023). Yazılımın ters çözüm algoritması, ağ yöntemleri (Dey ve Morrison, 1979; Lowry vd. 1989) içinde daha iyi sonuçlar sağlayan sonlu elemanlar ağ yapısını kullanır. Genel olarak ERT verilerine özel bir veri işlem uygulanmamakla beraber, bazı ölçü noktalarına ait hatalı ölçüm olarak kabul edilen negatif değerler veriden ayıklanmıştır. Bu ayıklamadan sonra verilere doğrudan ters çözüm uygulanmıştır.

ÇKYDA verileri SeisImager/SW yazılımı ile değerlendirilmiştir. Arazi verilerine faz kayması tekniğini uygulanarak frekans-faz hızı dönüşümünü (f-c görüntüsü) elde edilmiş ve böylece, f-c görüntüsü üzerinden en geniş frekans aralığında ve yüksek ayrımlı olan temel mod dispersiyon eğrisi (frekansa karşılık faz hızı değişimi) piklenmiştir. Daha sonra, ölçülen ve hesaplanan dispersiyon eğrilerinin karşılaştırılma esasına dayanan ters çözüm işlemi için sönümlü en küçük kareler yaklaşımını (Levenberg, 1944; Marquardt, 1963) kullanılmıştır. Böylece, ters çözüm işlemiyle tünel içerisindeki ÇKYDA profillerine ait 1B-Vs-derinlik yapısı belirlenmiştir.

4. Bulgular (Findings)

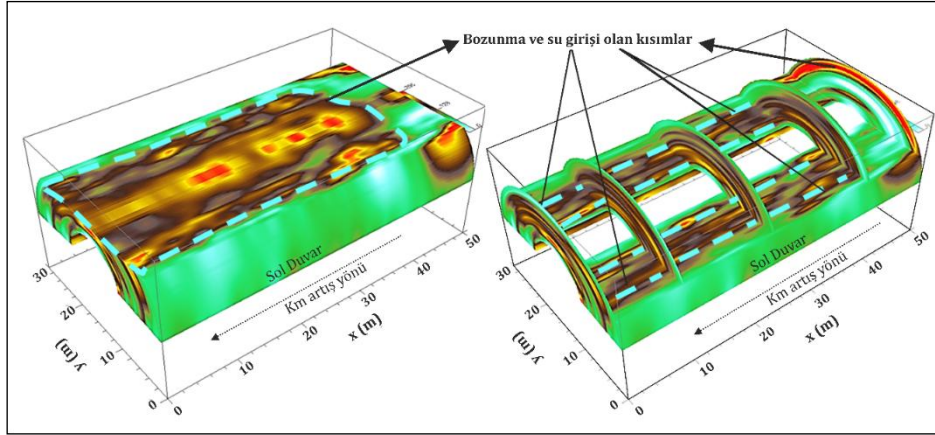
İşlenmiş 2B'lu radagramlar profil konumlarına uygun şekilde bir araya getirilerek tünelin 485. m ile 535. m arasındaki alanı kapsayacak şekilde ve tünelin geometrik yapısına uygun 3B'lu görüntüler hazırlanmıştır (Şekil 8'den 11'e). Bu modellerde kırmızı renk ve tonları (sıcak renkler), yeşil renk ve tonları (soğuk renkler) kısmen daha kuru ve bozunmamış alanları ifade etmektedir. Şekil 8 tünelin içine ait 3B'lu YR modellerinin farklı bakış açılarından ve saydamlıkta görüntülerini sunmaktadır.



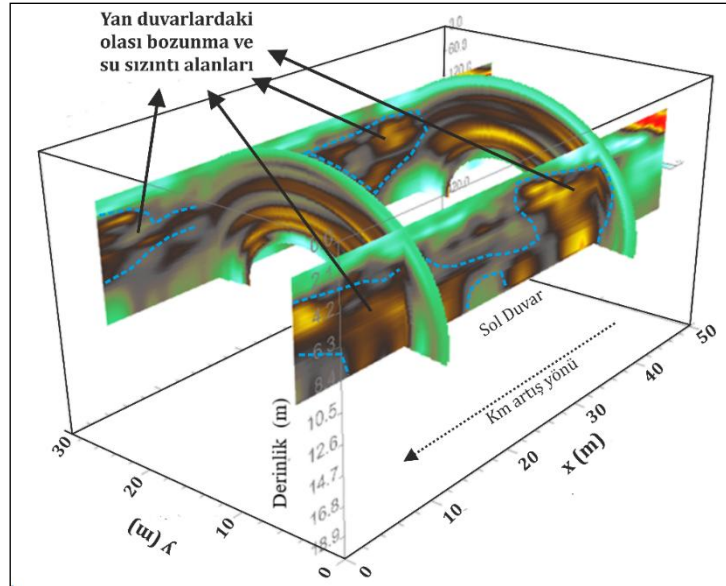
Şekil 8. Yer Radarı ölçümlerinden hazırlanan 3B'lu modeller üzerinde bozunmuş alanların (siyah kesikli çizgiler) farklı açılardan gösterimi (Representation of the degraded areas (black dashed lines) from different angles on 3D models prepared from Ground Penetrating Radar measurements)

Bu görüntülere göre, yüksek genlikli (Şekil 8a, b, c ve d'de kesikli siyah çizgi ile belirtilen alandaki kırmızı ve tonları) alan, tünelin 490. m'si ile 495. M'si arasında tünel tavanından itibaren ~8-10 metre yükseklikte olup, muhtemelen bozunmuş zemin (yoğun kırıklı-çatlaklı) ve içeriğinde yoğun olarak su bulunduğunu ve tünel üst kotlarından tünele doğru su girişinin olduğu konumu göstermektedir. YR 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 9 ve Şekil 10). Söz konusu anomali alanlarında (yüksek elektromanyetik yansımali alanlar, sıcak renkler) bozunmanın yüksek, su içeriğinin fazla olduğu belirlenmiştir.



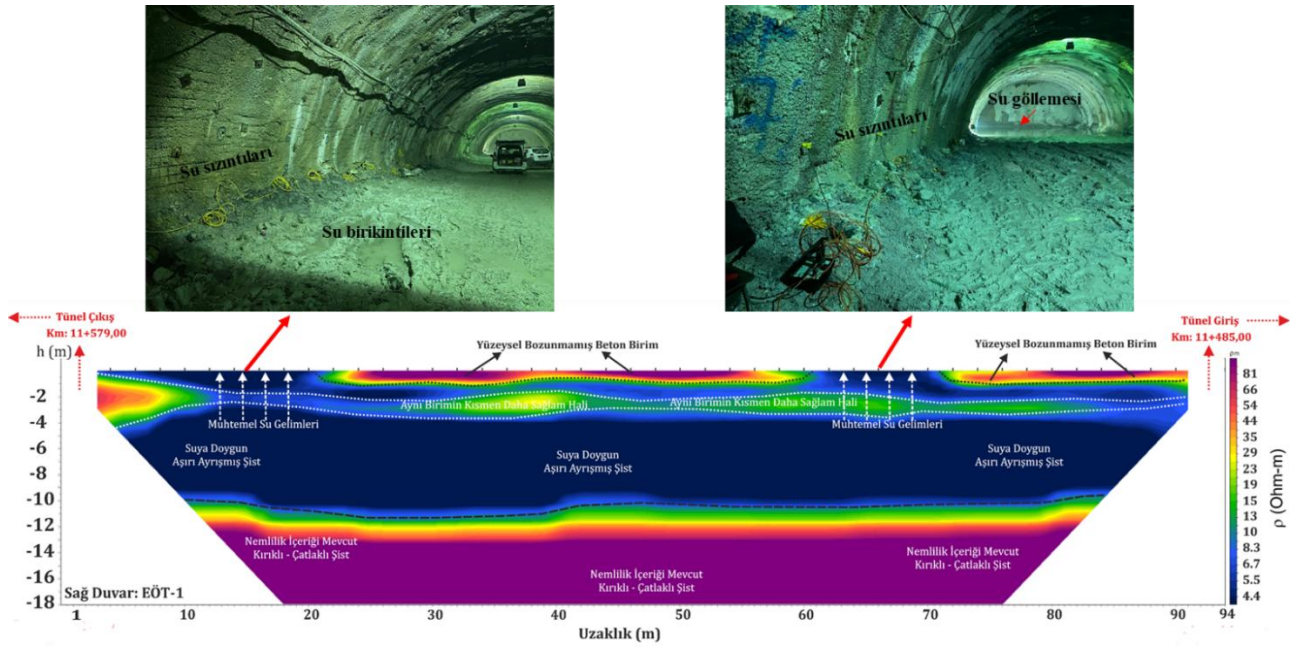
Şekil 9. Tünел tavanından itibaren 5.5 m yükseklikteki anomalilerin (kesikli mavi çizgili alanlar) 3B'lu model üzerindeki görüntüsü (The image of the anomalies (dashed blue lines) at a height of 5.5 m from the tunnel ceiling on the 3D model)



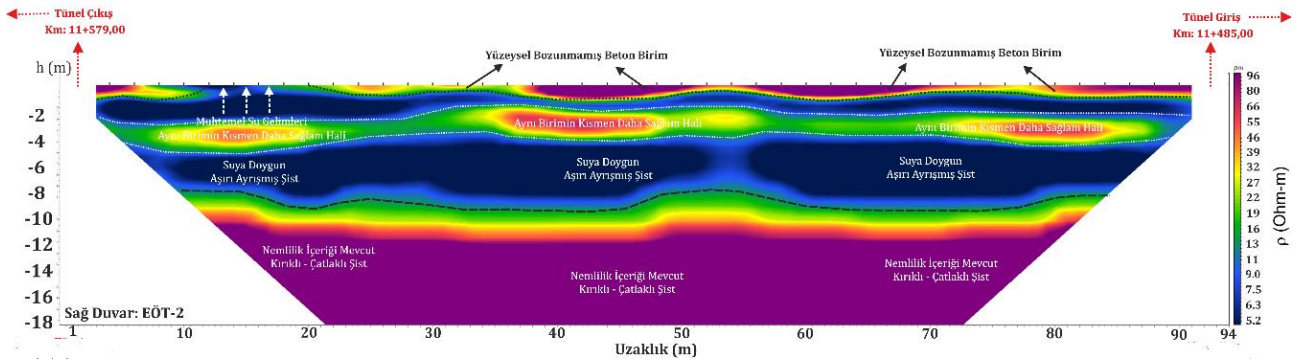
Şekil 10. Tünelin yan duvarlarına ait yüksek elektromanyetik yansımaların 3B'lu model üzerinde görüntülenmesi (Image of the high electromagnetic reflections of tunnel side walls on 3D model)

Şekil 11, 12, 13 ve 14 ters çözümünden elde edilen EÖT kesitlerinin yorumlanmış kesitlerini sunmaktadır. Şekillerdeki düşey eksenler, $h(m)$, tünел iç yüzeyinden zemin içine doğru olan uzaklığı (veya derinliği) göstermektedir. EÖT sonuçlarına göre özdirençlerin 4-100 Ohm.m arasında değişmektedir. Tünел içi ölçümlerde yanal yönde zemin içine doğru ortalama 18 m derinlik görüntülenebilmiştir. EÖT kesitlerinde, yüksek, orta ve düşük özdirençli bölgeler sırasıyla sarı-kırmızı-mor, yeşil ve mavi renkler ile temsil edilmiştir. EÖT kesitleri genel olarak tünел duvarından yanal yönde (şist birimi) içine doğru, sırasıyla ince yüksek düşük ve yüksek özdirenç değişimleri görülmektedir.

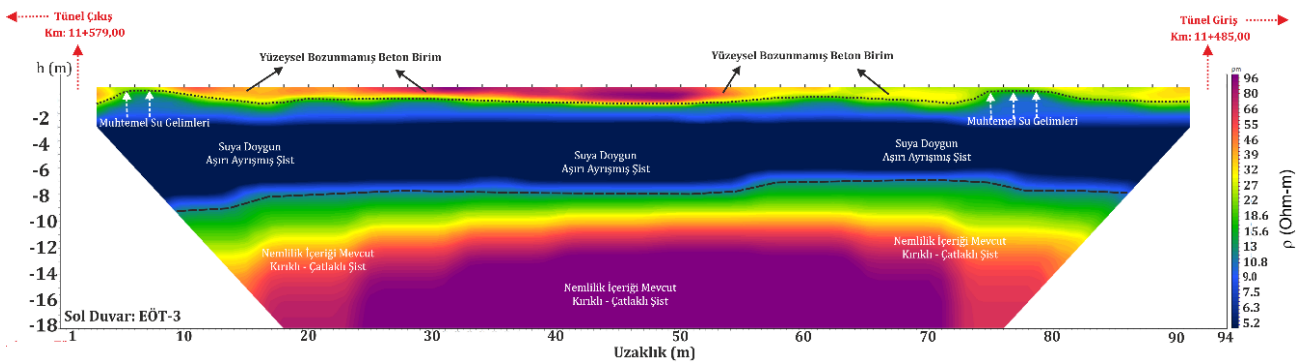
Tünelin sağ yan duvarındaki EÖT-1 ve EÖT-2 kesitlerinde (Şekil 11 ve 12) yüzeydeki sarı-kırmızı-mor renkler muhtemel beton birimin varlığına işaret etmektedir. Bu beton kaplamanın yanal yönde özelliğini kaybederek bozunduğu ve bu bölümlerden (düşey beyaz oklarla gösterilen) tünел içerisine su sızıntılarının olduğu değerlendirilmiştir (Şekil 11 ve Şekil 12). Bu sızıntıların tünел içinde yer yer oluşturduğu su birikintileri ve su gölcükleri ERT-1 profili (ERT-2 içinde uygundur) boyunca ilişkilendirilerek Şekil 11'de ERT-1 kesitinin üzerinde gösterilmiştir. Tünел duvarının hemen arkasındaki birimin suya doygun ve aşırı altere olduğu (mavi-koyu mavi (ya da lacivert) renkler) ve bu durum yaklaşık 10 m içeriye doğru (yanal derinlik) devam etmektedir. Diğer yandan, 10 m derinlikten sonra görülen yüksek özdirençlilik, birimin daha az kırık-çatlaklı olması ve su içeriğinin görece düşük olması ile ilişkilendirilmiştir. EÖT-1 ve EÖT-2 profillerinden elde edilen yer modellerinden birbirleri ile oldukça uyumlu olduğu görülmektedir.



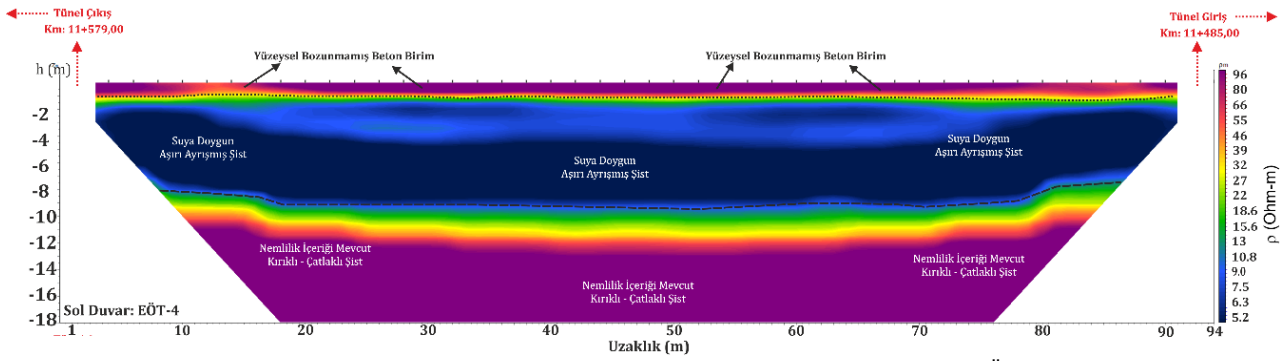
Şekil 11. Tünelin sağ duvarından elde edilen litoloji ile ilişkilendirilmiş 2B'lu EÖT-1 kesiti (altta) ve tünel içindeki su gelimi ile ilişkili görüntüler (üstte) (2D ERT-1 section associated with the lithology obtained from the right wall of the tunnel (below) and images related to the water flow inside the tunnel (above))



Şekil 12. Tünelin sağ duvarından elde edilen litoloji ile ilişkilendirilmiş 2B'lu EÖT-2 kesiti (2D ERT-2 section associated with the lithology obtained from the right wall of the tunnel)



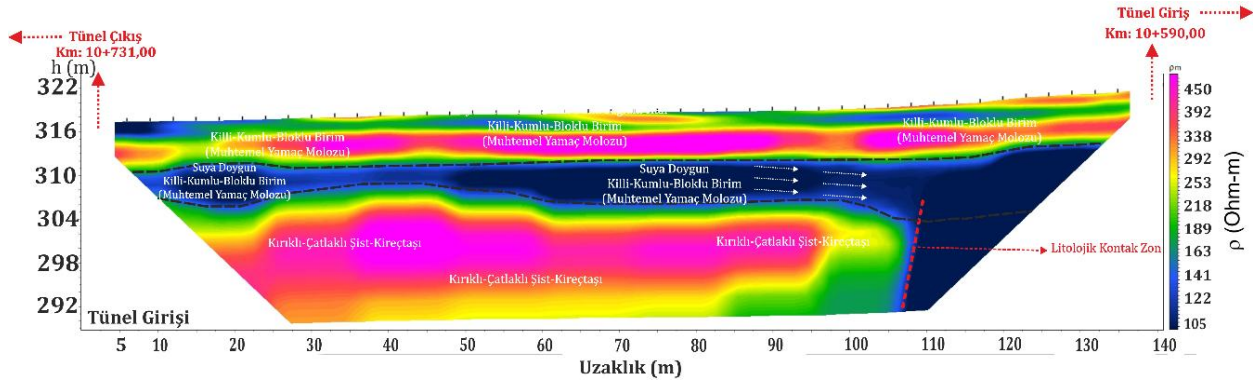
Şekil 13. Tünelin sol duvarından elde edilen litoloji ile ilişkilendirilmiş 2B'lu EÖT-3 kesiti (2D ERT-3 section associated with the lithology obtained from the left wall of the tunnel)



Şekil 14. Tünelin sol duvarından elde edilen litoloji ile ilişkilendirilmiş 2B'li EÖT-4 kesiti
(2D ERT-4 section associated with the lithology obtained from the left wall of the tunnel)

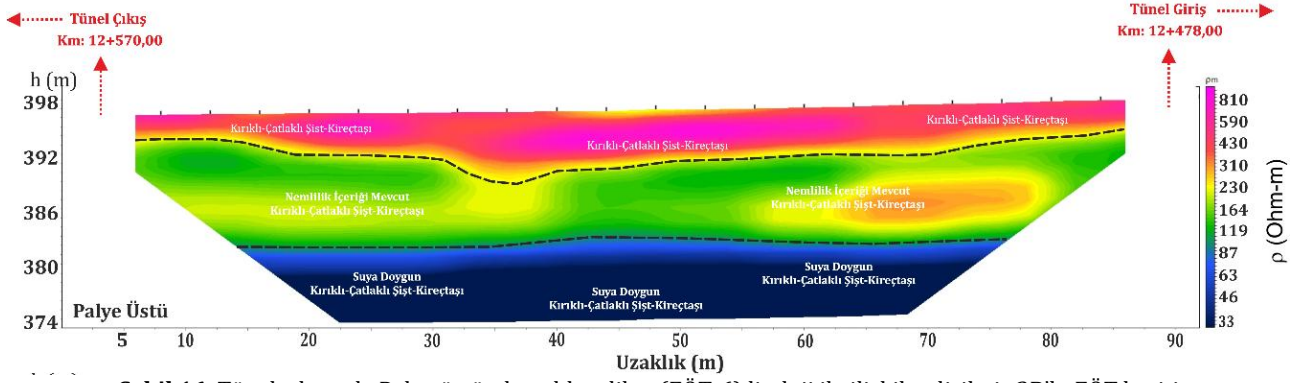
Tünelin sol yan duvarından elde edilen EÖT-3 ve EÖT-4 kesitleri Şekil 13 ve Şekil 14'de gösterilmektedir. EÖT-1 ve EÖT-2 kesitlerinde olduğu gibi yüzeyde yer yer özelliğini yitirmiş beton birimin yer aldığı ve tünel içerisinde su sızıntılarının varlığı izlenebilmektedir. Sol yan duvardaki her iki kesite göre, duvarın arkasından yanal yönde 8 m derinliğe kadar yer alan birimin suya doymuş ve aşırı altere olduğu anlaşılmaktadır. Bu seviyeden sonra daha az su içeriği ve kırık-çatlaklı yapıda olan yüksek öz dirençli bir birim tanımlanmıştır.

Tünel girişinde üst kottaki EÖT-5 kesitine göre, öz direnç değerleri 100-500 Ohm.m arasında değişmektedir (Şekil 15) ve düşey yönde ulaşılan derinlik ortalama 25 m'dir. Düşey eksen, h(m), kot değerlerini göstermekte olup yüzeyden düşey yöndeki derinliği göstermektedir. 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 doymuş 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.



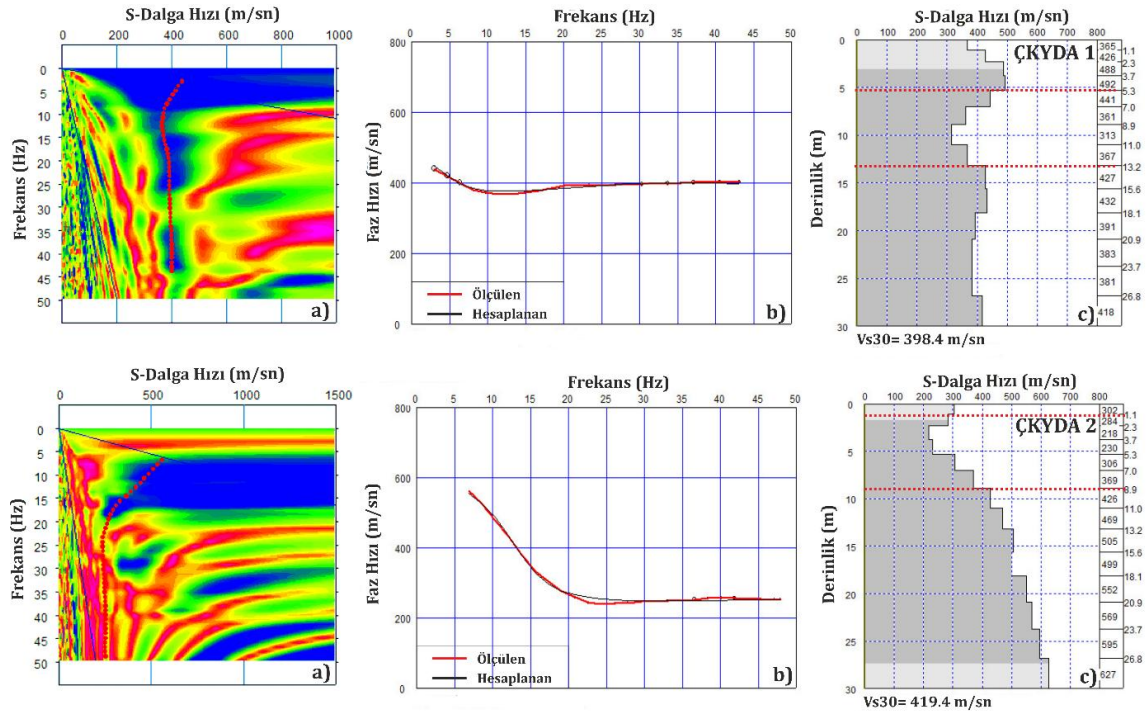
Şekil 15. Tünelin giriş tarafında üst kotta (EÖT-5) elde edilen litoloji ile ilişkilendirilmiş 2B'li EÖT kesiti
(2D ERT section associated with the lithology obtained at the upper level (ERT-5) on the entrance side of the tunnel)

Tünel çıkışında yer alan palyenin üzerinde elde edilen EÖT-6 kesitine göre, öz direnç değerleri 30-1000 Ohm.m arasında değişirken, ortalama ulaşılan derinlik 22 m'dir (Şekil 16). Düşey eksen, h(m), kot değerlerini göstermekte olup yüzeyden düşey yöndeki derinliği göstermektedir. Şekil 16'ya 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 izlenebilmektedir.

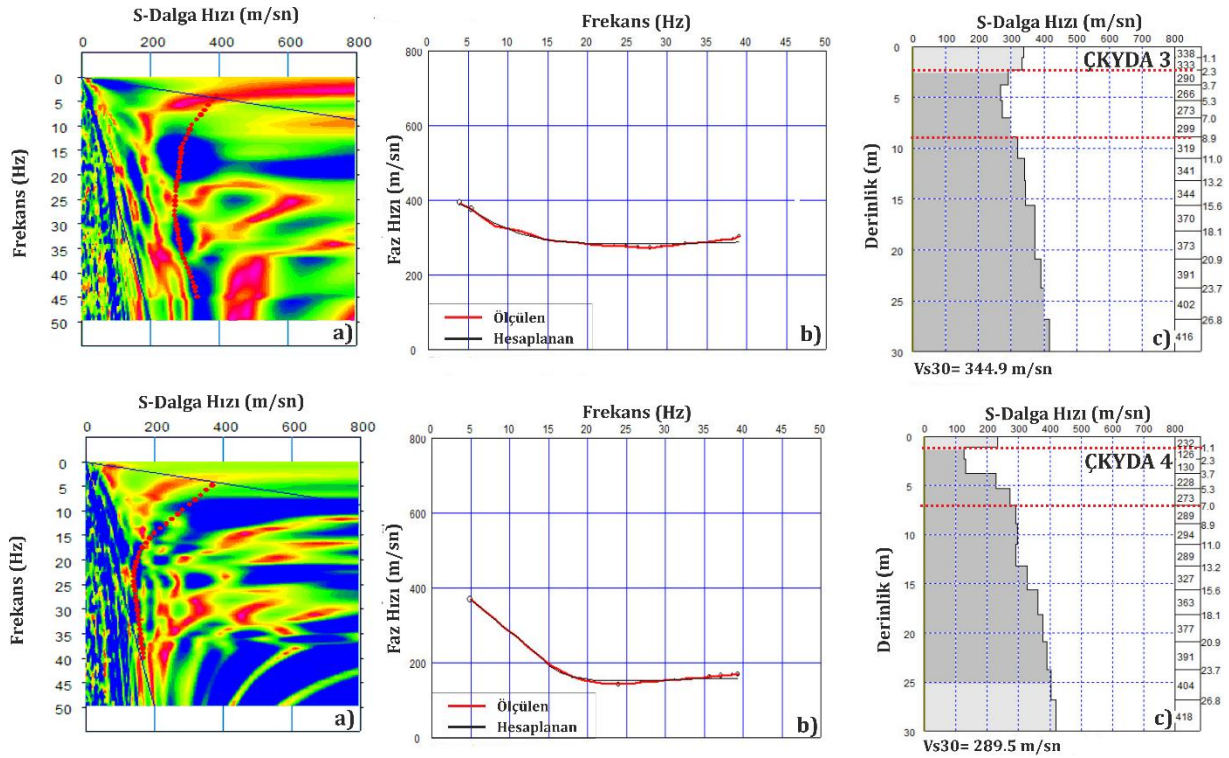


Şekil 16. Tünel çıkışında Palay üstünden elde edilen (EÖT-6) litoloji ile ilişkilendirilmiş 2B'lu EÖT kesiti (2D ERT section associated with the lithology obtained from the berm at the tunnel exit (ERT-6))

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 destekleyici bilgi sağlamaktır. Tünelin sağ ve sol duvarlarında alınan ÇKYDA verileri değerlendirilerek toplam 4 profile ait 1B Vs-derinlik modelleri elde edilmiştir (Şekil 17 ve Şekil 18). Her bir profil için kaydedilen ham verilerden elde edilen frekans-faz hızı (f-c) görüntüleri ve temel mod dispersiyon pikleri (Şekil 17a ve Şekil 18a), ölçülen (kırmızı) ve ters çözümden hesaplanan (siyah) dispersiyon eğrileri (Şekil 17b ve Şekil 18b) ve ters çözüm sonucu hesaplanan 1B Vs-derinlik profilleri (Şekil 17c ve Şekil 18c) Şekil 17'de (ÇKYDA-1 ve ÇKYDA-2) ve Şekil 18'de (ÇKYDA-3 ve ÇKYDA-4) gösterilmektedir. 1B Vs-derinlik profillerinin hepsinde birkaç m'den sonra kalınlıkları ~5-8 m arasında değişen birimlerde anlamlı hız düşüşlerinin (Şekil 17c ve Şekil 18c'deki kesikli kırmızı çizgiler arası) olduğu görülmektedir. Bu modellere göre tünel içerisinde sağ ve sol yan duvarlardaki S-dalgası hız değerleri 280-800 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 17. Tünelin sağ yan duvarındaki ÇKYDA-1 ve ÇKYDA-2 profiline ait (a) enerji alanı (b) dispersiyon eğrisi ve (c) 1B'lu S-dalgası hız-derinlik modeli ((a) energy field (b) dispersion curve and (c) 1D S-wave velocity-depth model of MASW-1 and MASW-2 profiles on the right side wall of the tunnel)



Şekil 18. Tünelin sol yan duvarındaki ÇKYDA-3 ve ÇKYDA-4 profiline ait (a) enerji alanı (b) dispersiyon eğrisi ve (c) 1B'lu S-dalgası hız-derinlik modeli ((a) energy field (b) dispersion curve and (c) 1D S-wave velocity-depth model of MASW-3 and MASW-4 profiles on the left side wall of the tunnel)

5. Sonuç (Result)

Bu çalışma kapsamında Doğancı Tüneli içerisinde Km: 11+485-11+579 arasında YR, EÖT ve ÇKYDA, tünel dışı üst kotta ise Km: 11+590-11+731 arasında ve tünel çıkışı palye üzerinde EÖT yöntemleri uygulanmıştır. Tünel içi ölçümlerde EÖT ve ÇKYDA'nın yapılamadığı tavan bölümünde YR ölçümleri Km: 11+485-11+535 arasında tünel eksenı 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 bozunmanın olduğu ve su içeriğinin yoğun olduğu kısımlar belirlenmiş olup, bu yapıların tünel içerisine kadar etki ettiği görülmüştür. Tünelin sağ ve sol yan duvarlarında alınan tüm ölçümlerde yüzeyde kalınlığı 1 m'ye ulaşan, yüksek özdirençli zonun (muhtemel beton) devamında oldukça düşük özdirençli 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 özdirenç değerlerinden (4-10 Ohm-m) anlaşılmaktadır. Sağ ve sol duvarda söz konusu derinliklerden sonra kısmen daha sağlam ve daha kuru birimler bulunmaktadır. Tünel girişindeki üst kotta toplanan EÖT kesitlerine, göre yamaç molozu birimi düşey yönde 10-11 m derinliğe kadar izlenmektedir. Bununla birlikte, aynı kesitin yatayda 105-110 m arasında belirgin bir litolojik kontak zonu belirlenmiştir. Tünel çıkışı palye üstünden elde edilen EÖT kesitine göre, yüksek özdirençli birimin, kırıklı-çatlaklı kaya birim olduğu ve su içermediği değerlendirilmiştir. Aynı birim, daha alt kotlarda düşük özdirençli sahiptir ve derinlere doğru daha nemli ve suya doygun olduğu anlaşılmıştır. EÖT kesitleri ve 1B-VS derinlik modelleri birlikte değerlendirildiğinde, EÖT kesitlerinde görülen aşırı altere ve suya doygun birimlerin S-dalgası hızlarının da düşük olduğu gözlenmiştir.

Bu çalışmada, mühendislik ve sanat yapılarının önemli ve ekonomik maliyeti yüksek olan tünel yapılarında karşılaşılabilecek muhtemel su sızıntısı ve deformasyon problemlerinin konumlarının ve nedenlerinin tespit edilmesinde ve çözüm önerilerinin sunulmasında jeofizik yöntemlerin (YR, EÖT ve ÇKYDA) sağladığı katkılar gösterilmiştir. Bununla birlikte, tek bir jeofizik yöntemin yerine birbirini destekleyecek birkaç jeofizik yöntemin birlikte kullanılmasının problemi tanımlamada son derece yararlı olduğu görülmüştür.

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu makale Mustafa KİRİCİ'nin Yüksek Lisans tezinden hazırlanmıştır. Yazarlar, verilerin toplanması sürecinde destek ve verilerin kullanılması için gerekli izinleri sağlayan Karayolları Genel Müdürlüğü'nün Bursa İli 14. Bölge Müdürlüğü'ne ve Bergiz Holding'e teşekkür ederler. ERT kesitlerin litoloji ile ilişkilendirilmesi sırasında kullanılan jeolojik bilgilerin temin edildiği Proyapı Mühendislik Müşavirlik A.Ş.'ne şükranlarımızı sunuyoruz.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar (References)

- 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.
- Alemdağ, H., Köroğlu, F., Aydın, Z.Ö., Şeren, A., Babacan, A.E., Fırat Ersoy, A., 2024. Deciphering of karst geomorphology and sinkhole (doline) structures using multiple geophysical and geological methods (Trabzon, NE Türkiye). *Bulletin of Engineering Geology and Environment*, 83, 286.
- Annan, P., 2003. Ground penetrating radar principles, procedures and applications. *Sensors and software*, 278.
- Anbazhagan, P., Sitharam, T.G., 2008. Site characterization and site response studies using shear wave velocity. *J. Seismol. Earthq. Eng.* 10 (2), 53-67.
- Arifin, M.H., Kayode, J.S., Izwan, M.K., Hasan Said, H.A., Hussin, H., 2019. Data for the potential gold mineralization mapping with the applications of electrical resistivity imaging and induces polarization geophysical surveys. *Data Brief* 2019 (22), 830-835.
- Aytas Z., Alpaslan N., Ozcep F., 2023. Evaluation of liquefaction potential by standard penetration test and shear wave velocity methods: a case study. *Natural Hazards*, 118(3), 2377-2417.
- Babacan, A.E., Ceylan, S., 2021. Evaluation of soil liquefaction potential with a holistic approach: a case study from Arakli (Trabzon, Turkey). *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*, 62(1), 173-198.
- 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.
- Bauman, P., 2005. 2-D resistivity surveying for hydrocarbons—a primer. *CSEG Recorder* 30 (04), 1-15.
- Benyassine, E.M., Lachhab, A., Dekayir, A., Parisot, J.C., Rouai, M., 2017. An application of electrical resistivity tomography to investigate heavy metals pathways. *J. Environ. Eng. Geophys.* 22 (4), 315-324.
- 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*, pp. 71-77, MTA Ankara.
- 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.
- Cardarelli, E., Di Filippo, G., Tuccinardi, E., 2006. Electrical resistivity tomography to detect buried cavities in Rome: a case study, *Near Surface Geophysics*, Vol. 4, 387-392.
- Chambers, J.E., Kuras, O., Meldrum, P.I., Ogilvy, R.D., Hollands, J., 2006. Electrical resistivity tomography applied to geologic, hydrogeologic, and engineering investigations at a former waste-disposal site. *Geophysics* 71 (6), B231-B239.
- 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.
- Dahlin, T., 2001. The development of DC resistivity imaging techniques. *Computers & Geosciences*, 27(9), 1019-1029.
- Davis, J. L., Annan, A. P., 1989. Ground-penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy 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.
- 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 counter measures 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., Parolai, S., Albarello, D., Picozzi, M., 2011. Application of surface-wave methods for seismic site characterization. *Surv. Geophys.* 32 (6), 777-825.
- Funk, B., Flores-Orozco, A., Steiner, M., 2024. Possibilities and limitations of cave detection with ERT, *Geomorphology*, 462, 109332, 1-10.
- Geraldine C., Anukwu, Amin E., Khalil, Mohd, Nawawi, Khiruddin, Abdullah, Fathi M., Abdullah, 2018. Multi-channel analysis of surface waves (MASW) using CMP analysis to identify soil problems threat on the heritage site at Georgetown, Malaysia. *SEG Glob. Meet. Abstr.* 1640-1643. <https://doi.org/10.1190/IGC2018-404>.
- 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., Barker, R. D., 1993. Two-dimensional resistivity imaging and modelling in areas of complex geology. *Journal of applied Geophysics*, 29(3-4), 211-226.
- Gündoğdu, N.Y., Candansayar, M.E., Genç, E., 2017. Rescue archaeology application: Investigation of Kuriki mound archaeological area (Batman, SE Turkey) by using direct current resistivity and magnetic methods. *J. Environ. Eng. Geophys.* 22 (2), 177-189.
- Irawan, D., Sumintadireja, P., Saepuloh, A., 2013. 2-D Subsurface imaging techniques for deep ore mineral mapping using geoelectrical and induced polarization (IP) methods. *Proc. Earth Planet. Sci.* 6, 139-144.
- 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.
- Kadioğlu, 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.
- Kadioğlu S., Uluggerli E. U., 2012. Imaging karstic cavities in transparent 3D volume of the GPR data set in Akkopru dam, Muğla, Turkey. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 27(3), 263-271.
- Karşı, H., 2018. Jeofizik-Jeoteknik İşbirliği Sürecinde Çok Kanallı Yüzey Dalgası Analiz (ÇKYDA) Yöntemi. *Jeofizik Bülteni*, 78, 14-48, JFMO, Ankara.
- Karşı, H., Babacan, A.E., Sayıl, N., Çoban K.H., Akın, Ö., 2024a. 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.
- Karşı H., Babacan A. E., Akın Ö., 2024b. Subsurface characterization by active and passive source geophysical methods after the 06 February 2023 earthquakes in Turkey. *Natural Hazards*, 120 (6), 5257-5286.
- Kaya, M.A., Özürlan, G., Balkaya, Ç., 2015. Geoelectrical Investigation of Seawater Intrusion in the Coastal Urban Area of Çanakkale, NW Turkey, *Environ Earth Sci*, 73, 1151-1160.
- KGM, 2019. Geoteknik Proje Raporu. Bursa. Karayolları 14. Bölge Müdürlüğü.
- 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.
- Loke, M.H., Chambers, J.E., Rucker, D.F., Kuras, O., Wilkinson, P.B., 2013. Recent developments in the direct-current geoelectrical imaging method. *J. Appl. Geophys.* 95, 135-156.
- 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.
- 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.
- 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.
- Page, L.M., 1968. Use of the electrical resistivity method for investigating geologic and hydrologic conditions in Santa Clara County, California. *Groundwater* 6 (5), 31-40.
- Pamuk E., Özdağ Ö. C., Özyalın Ş., Akgün M., 2017. Soil characterization of Tınaztepe region (İzmir/Turkey) using surface wave methods and nakamura (HVSr) technique. *Earthquake Engineering And Engineering Vibration*, 16(2), 447-458.
- Park, C. B., Miller, R. D., Xia, J., 1999. Multichannel analysis of surface waves. *Geophysics*, 64(3), 800-808.
- Park, C., Miller, R., Lafien, 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., Richter, J., Rodrigues, R., Cirone, A., 2018. MASW applications for road construction and maintenance. *Lead. Edge* 37 (10), 724-730.
- 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.
- Radlinger, 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 Tunneling*, 14(5), 654-660.
- Rucker, D.F., Loke, M.H., Levitt, M.T., Noonan, G.E., 2010. Electrical-resistivity characterization of an industrial site using long electrodes. *Geophysics* 75 (4), WA95-WA104.
- Sabbağ, N., Uyanık O., 2017. Prediction of Reinforced Concrete Strength by Ultrasonic Velocities. *Journal of Applied Geophysics*, 141, 13-23.
- Sabbağ N., Uyanık O., 2018. Determination of the reinforced concrete strength by apparent resistivity depending on the curing conditions. *Journal of Applied Geophysics*, 155, 13- 25.
- 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. 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.
- Socco, L.V., Strobbia, C., 2004. Surface-wave method for near-surface characterization: a tutorial. *Near Surf. Geophys.* 2 (4), 165–185.
- 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.
- Tsokas, G.N., Tsourlos, P.I., Vargemezis, G., Novack, M., 2008. Non-destructive electrical resistivity tomography for indoor investigation: the case of Kapnikarea Church in Athens. *Archaeol. Prospect.* 15 (1), 47–61.
- Uyanık O., İkinci B., Uyanık NA, 2013. Liquefaction Analysis from Seismic Velocities and Determination of Lagoon Limits Kumluca /Antalya Example. *Journal of Applied Geophysics*, 95, 90-103.
- Uyanık O, 2020. Soil liquefaction analysis based on soil and earthquake parameters. *Journal of Applied Geophysics*, 176, 104004.
- Uyanık, O., Öncü, Z., Uyanık, N. A., & Ekin, N., 2024. Seismic microzonation and geotechnical modeling studies considering local site effects for İnegöl Plain (Bursa-Turkey). *Earth and Space Science*, 11, e2023EA003460.
- Wilson, S.R., Ingham, M., McConchie, J.A., 2006. The applicability of earth resistivity methods for saline interface definition. *J. Hydrol.* 316 (1–4), 301–312.
- Xia, J., Miller, R. D., Park, C. B., 1999. Estimation of near-surface shear-wave velocity by inversion of Rayleigh waves. *Geophysics*, 64(3), 691-700.
- Xia, J., Miller, R.D., Park, C.B., Hunter, J.A., Harris, J.B., Ivanov, J., 2002a. Comparing shear-wave velocity profiles inverted from multichannel surface wave with borehole measurements. *Soil Dyn. Earthq. Eng.* 22 (3), 181–190.
- Xia, J., Miller, R.D., Park, C.B., Wightman, E., Nigbor, R., 2002b. A pitfall in shallow shear-wave refraction surveying. *J. Appl. Geophysics*. 51 (1), 1–9.
- Yılmaz, S., Oksum, E., Cakmak, O., Dogan, O., Tekelioğlu, E. 2018. Preliminary results of an integrated archaeo-geophysical survey on the basis of ancient finds unearthed by an illegal excavation at Kılıç Ören site (Isparta, Turkey). *Archaeological Prospection*, 25(3), 197-207.
- Yılmaz, S., Balkaya, Ç., Cakmak, O., Oksum, E. 2019. GPR and ERT explorations at the archaeological site of Kılıç village (Isparta, SW Turkey). *Journal of Applied Geophysics*, 170, 103859.
- Yılmaz, S. Yıldırım E., 2021. Emirdağ-Karaağaç yeraltı suyu potansiyelinin elektrik özdirenç yöntemler ile araştırılması. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi* 9(4), 1267-1275.
- URL-1. (2023, Aralık 24). <https://www.gpr-survey.com/>
- URL-2. (2023, Aralık 24). <https://geodevice.co/product/zondres2d/>
- URL-3. (2023, Ekim 17). <https://www.geometrics.com/software>