



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI

BİLDİRİ ÖZETLERİ KİTABI

16-18 MAYIS 2022
KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
OSMAN TURAN KÜLTÜR VE KONGRE MERKEZİ TRABZON





8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



**BİLDİRİ ÖZETLERİ KİTABINDA YER ALAN ÖZETLERİN, BASIM HATASI
DIŞINDAKİ YANLIŞLIKLARDAN YAZARLARI SORUMLUDUR.**



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



Değerli Katılımcılar,

Jeofizik Mühendisliği dalının elektrik-elektromanyetik konuları ile ilgilenen araştırmacıları bir araya getiren Yer Elektrik Çalışma Grubu, bu yöntemlerin ve değerlendirme tekniklerinin geliştirilmesi, bunların paylaşılarak kullanımlarının yaygınlaştırılmasını amaçlamaktadır. Bu amaçla 2006 yılında Boğaziçi Üniversitesi tarafından Manyetotellürik Seminerleri adı altında toplanarak ilk çalıştayı gerçekleştirmiştir. Etkinlik, 2008 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Jeofizik Mühendisliği tarafından Manyetotellürik ve Jeoelektrik Çalıştayı (MT'08) olarak İstanbul'da, 2010 yılı ile birlikte Yer Elektrik Çalıştayı olarak sırasıyla 2010 yılında Ankara, 2012'de Dokuz Eylül, 2014'te İstanbul, 2016'da Kocaeli, 2018'de ise Süleyman Demirel üniversiteleri tarafından düzenlenmiştir. 2020 yılında gerçekleştirilmesi planlanan ve tüm dünyayı etkisi altına alan Covid-19 salgını sebebiyle 2020 yılında gerçekleştirilemeyen 8. Yer Elektrik Çalıştayına hoşgeldiniz. 16-18 Mayıs tarihleri arasında üç gün boyunca sürecek olan çalıştayımızda 25 sözlü ve 9 poster bildiri sunumu yapılacaktır. Çalıştayı son oturumundan sonra 9. Yer Elektrik Çalıştayı'nın yerinin belirleneceği ve siz değerli katılımcılarımız tarafından önerilecek konuların tartışmaya sunulacağı bir oturum da yapılacaktır. Bu kitapçık, çalıştay bilgileri, programı ve çalıştayda sunulacak olan çalışmaların özetlerini içermektedir. Karadeniz Teknik Üniversitesi Jeofizik Mühendisliği Bölümü olarak 8. Yer Elektrik Çalıştayı'na ev sahipliği yapmaktan ve siz değerli katılımcıları aramızda görmekten mutluluk duyuyoruz. 8. Yer Elektrik Çalıştayı'na katılımınız ve katkılarınız için teşekkür ederiz.

Çalıştay Düzenleme ve Yürütme Kurulu Adına

Prof. Dr. Hakan KARSLI



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



ÇALIŞTAY DÜZENLEME ve YÜRÜTME KURULU

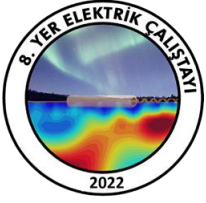
Prof. Dr. Hamdullah ÇUVALCI
Prof. Dr. Nilgün Sayıl
Prof. Dr. Hakan KARSLI
Prof. Dr. Aysel ŞEREN
Doç. Dr. Ali ELMAS
Doç. Dr. Murat ÖZKAPTAN
Doç. Dr. Ali Erden BABACAN
Dr. Öğr. Üy. Mustafa ŞENKAYA
Arş. Gör. Dr. Özlem HACIOĞLU
Dr. Zeynep ÖĞRETMEN AYDIN
Arş. Gör. Hilal ALEMDAĞ
Arş. Gör. Ebru ÖZCAN

Rektör, Onursal Başkan
Düzenleme Kurulu Başkanı
Yürütme Kurulu Başkanı
Düzenleme ve Yürütme Kurulu Üyesi
Düzenleme ve Yürütme Kurulu Üyesi
Düzenleme ve Yürütme Kurulu Üyesi
Düzenleme ve Yürütme Kurulu Üyesi
Düzenleme ve Yürütme Kurulu Üyesi
Düzenleme ve Yürütme Kurulu Üyesi
Düzenleme ve Yürütme Kurulu Üyesi
Düzenleme ve Yürütme Kurulu Üyesi

BİLİMSEL KURUL (Soyadına göre alfabetik sırada yazılmıştır)

İrfan AKCA
Ali Erden BABACAN
Çağlayan BALKAYA
Ahmet T. BAŞOKUR
M. Emin CANDANSAYAR
İlyas ÇAĞLAR
Ali ELMAS
Ahmet ERCAN
Kenan GELİŞLİ
Gökhan GÖKTÜRKLER
Aysan GÜRER
O. Metin İLKIŞIK
Selma KADIOĞLU
Hakan KARSLI
Mehmet ALI KAYA
Cemal KAYA
Gülçin ÖZÜRLAN AĞAÇGÖZGÜ
Ertan PEKŞEN
Coşkun SARI
Mustafa ŞENKAYA
Aysel ŞEREN
Bülent TEZKAN
Emin U. ULUGERGERLİ

AÜ
KTÜ
SDÜ
AÜ
AÜ
İTÜ
KTÜ
Yeraltı Aramacılık
KTÜ
DEÜ
İÜ
Anadolu Yer Bilimleri
AÜ
KTÜ
TÜ
KayaC Yer Bilimleri
İTÜ
KOÜ
DEÜ
KTÜ
KTÜ
University of Cologne
ÇOMÜ

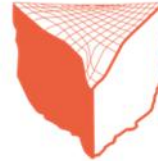


8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



SPONSORLAR

Düzenleme ve Yürütme Kurulu, 8. Yer Elektrik Çalıştayı'na destek veren tüm kurum ve kuruluşlara teşekkür eder.



YFA YERBİLİMLERİ
MÜHENDİSLİK HİZMETLERİ





8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI GENEL BİLGİLER

CALIŞTAY YERİ

Karadeniz Teknik Üniversitesi Osman Turan Kültür ve Kongre Merkezi

KTÜ Kanuni Kampüsü A Kapısı Yanı Ortahisar/TRABZON

Telefon: +904623774025

Faks: +904623253238

Web: <https://www.ktu.edu.tr/kongremerkezleri-profdrosmanturankulturvekongremerkezi>

KAYIT SAATLERİ

16 / 05 / 2022 Pazartesi 08:00 – 17:00

SÖZLÜ VE POSTER BİLDİRİ SUNUM SAATLERİ

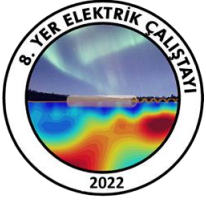
		SÖZLÜ BİLDİRİLER	POSTER BİLDİRİLER
16 / 05 / 2022	Pazartesi	09:00 – 15:10	
17 / 05 / 2022	Salı	09:30 – 12:50	01:30 – 17:05
18 / 05 / 2022	Çarşamba	09:30 – 13:00	09:30 – 13:00

GALA YEMEĞİ

17 / 05 / 2022 Salı 19:30–23:00

YEMEK

Öğle Yemeği	13:00 – 14:00	KTÜ Sahil Tesisleri
Akşam Yemeği	19:00 – 21:00	KTÜ Sahil Tesisleri



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



İÇİNDEKİLER

16/05/2022 PAZARTESİ

Eşit Aralıklı Örneklenmemiş Verilerin Logaritmik Uzayda Hilbert Dönüşümü ve Manyetotellürik Veriye Uygulanması <i>Ahmet T. BAŞOKUR</i>	1
Tünel Problemlerinde Yer Elektrik Yöntemler ve Saha Uygulamaları <i>Erhan İÇÖZ, Ecevit G. YURTKAL</i>	6
CSRMT: A new innovative near surface exploration technique <i>Bülent TEZKAN, I. MUTTAQUİEN, A. SARAEV</i>	13
Manyetotellürik, Gravite Yöntemleri ve Sismolojik Analizlerle Yalova-Termal Bölgesinin Üst Kabuk Yapısının Araştırılması <i>Ertan PEKŞEN, Deniz ÇAKA, Berna TUNÇ, Bülent ORUÇ, Emrah BUDAKOĞLU, Taylan TÜRKMEN, Fatih SEVİM, Doğukan DURDAĞ, Kader ZENGİN, Mahmure Ezgi ERKAN, Gamze DURDAĞ, Şerif BARIŞ</i>	14
Kıtasal Levha-içi Volkanik Bir Sistemin Elektriksel Yapısı: Karadağ Stratovulkani, Orta Anadolu Volkanik Bölgesi (Türkiye) <i>Özlem HACIOĞLU, Ahmet T. BAŞOKUR, Ali KOÇYİĞİT, Halil İbrahim ARSLAN, Naser MEQBEL</i>	19
Sultandağı Fayının Derin Yapısının Manyetotellürik, Gravite, GNSS ve Tektonik Çalışmalarla Araştırılması; İlk Sonuçlar <i>Özcan ÖZYILDIRIM, İsmail DEMİRCİ, Çağlar ÖZKAYMAK, Özcan BEKTAŞ, Can BAŞARAN, İbrahim TİRYAKİOĞLU, Doğukan Mert ÖZCAN, Ahmet YILDIZ</i>	24
İç Sularda Yürütülen Bütünleşik Jeofizik Çalışmalar: Mogan Gölü (Ankara) Örneği <i>İrfan AKCA, Sinan AKISKA, Şebnem ARSLAN, Elif AKISKA, Devrim TEZCAN</i> ...	29
Yer-Elektrik Haritalarında Görüntü İşleme Temelli Gürültü Giderme <i>Şerif Murat GÖLEBATMAZ, İrfan AKCA</i>	34
Doğal Potansiyel Anomalilerinden Gömülü Kutuplaşmış Bir Yapının Yapı Faktörü ve Parametrelerinin Regula Falsi ve İkiye Bölme Yöntemleriyle Saptanması <i>Coşkun SARI, Emre TİMUR</i>	43
Seleukeia Sidera Antik Kenti (Atabey, Isparta) Jeofizik Araştırmaları <i>Hatice Evrim TÜTÜNSATAR, Olcay ÇAKMAK, Bilge HÜR MÜZLÜ KORTHOLT, Çağlayan BALKAYA</i>	48



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



Kuzey Anadolu Fayı yüzey kırığının VLF-R ölçümleriyle görüntülenmesi <i>Gökhan KARCIOĞLU, Anisya B. TEKKELI, Ümit AVŞAR, Karya AKYÜZ, Feyza GÜNAYDIN, Oğuz ALTINTAŞ.....</i>	105
Karşıt-Kuyu Radar Yönteminde Occam Ters Çözüm Yöntemi ile Seyahat Zamanı Tomografisi <i>Esra Ezgi BAKSI, Selma KADIOĞLU</i>	110
Maden Araştırmasında DAÖ ve RMT Verilerinin Düzensiz Ağ Kullanılarak 2B Birleşik Ters Çözümü <i>Özcan ÖZYILDIRIM, İsmail DEMİRCİ, N. Yıldırım GÜNDOĞDU, M. Emin CANDANSAYAR</i>	115
Düşey Elektrik Sondaj ve SPAC Yöntemleri ile Jeotermal Amaçlı Derin Yeraltı Yapının Belirlenmesi <i>Olçay ÇAKMAK, Osman UYANIK</i>	120
Boksit ve Zımpara Taşı (Korund) Araştırmalarında Yer Elektrik Yöntemler <i>Erhan İÇÖZ, Coşkun SARI, Ecevit G. YURTKAL, Emre TİMUR</i>	126



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



17/05/2022 SALI (Poster Bildiriler)

Yapı Elemanları Üzerinde Küçük Ölçekli Doğru Akım Özdirenç Yönteminin Uygulanabilirliğinin Araştırılması

Cansu ARICAN, M. Emin CANDANSAYAR, N. Yıldırım GÜNDOĞDU..... 133

Şeref Höyük / Komama (Bucak) Arkeojeofizik Araştırmaları

Olca ÇAKMAK, Çağlayan BALKAYA, Ralf H. BECKS, B. Ayça POLAT BECKS 138

Sındırgı-Hisaralan (Balıkesir) Jeotermal Sahasında, Jeotermal Akışkanın Olası Konumu ve Fay Sistemlerinin Elektrik Rezistivite Tomografi (ERT) Yöntemi İle Belirlenmesi

Ziya Orhan DERİNSU, Züheyr KAMACI, Serdar KAPUCU, İbrahim ACAR..... 143

İzmir İli, Torbalı İlçesi, Pancar Organize Sanayi Bölgesi İçerisindeki Kontrolsüz Dolgu Alanlarının Geometrisinin Elektrik Rezistivite Tomografi Yöntemiyle Tespiti

Serdar KAPUCU, Züheyr KAMACI, Ziya Orhan DERİNSU, Ahmet AKDEMİR 150

Tarihi Tabakhane Köprüsü ve Çevresinin Arkeolojik Yapısının Yer Radarı (GPR) Yöntemiyle Araştırılması

O.Serhat KARAÇAL, Emre ÖZÇELİK 157

Yeşilyurt Köyü (Isparta) Heyelanının İncelenmesi

Olca ÇAKMAK, Çağlayan BALKAYA, Erhan ŞENER, Ali YALÇIN..... 162

Tarihi Ambarlık Taş Kemer Köprüsü'nün Bulunduğu Alanda Jeofizik Yöntemlerle Zemin Yapısının İncelenmesi

Emre ÖZÇELİK, Hakan KARSLI, O. Serhat KARAÇAL 166

Sagalassos Antik Kenti (Burdur) 2021 Yılı Jeofizik Araştırmaları

Hatice Evrim TÜTÜNSATAR, Olca ÇAKMAK, Peter TALLOEN, M. Nuri DOLMAZ, Çağlayan BALKAYA 171

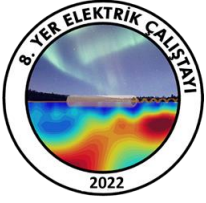
Menderes Mahallesi (Eğirdir, Isparta) Heyelan Alanı Jeofizik Araştırmaları

M. Metin Ünyay, Olca ÇAKMAK, Erkan KARAKURT, Çağlayan BALKAYA 176



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI





8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI PROGRAMI

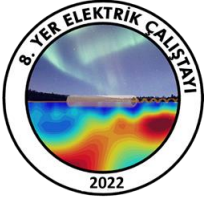
SAAT	16 MAYIS 2022/PAZARTESİ
08:00-09:00	KAYIT
	HOŞGELDİNİZ AÇILIŞ KONUŞMALARI
09:00-10:00	Hakan KARSLI <i>Yürütme Kurulu Başkanı</i>
	Nilgün L. SAYIL <i>Düzenleme Kurulu Başkanı</i>
	Protokol Konuşmaları
	ÇAĞRILI KONUŞMALAR Oturum Başkanı: Hakan KARSLI, Çağlayan BALKAYA
10:00-10:30	Ç-1 Eşit Aralıklı Örneklenmemiş Verilerin Logaritmik Uzayda Hilbert Dönüşümü ve Manyetotellürik Veriye Uygulanması <i>Ahmet Tuğrul BAŞOKUR</i>
10:30-11:00	Ç-2 Tünel Problemlerinde Yer Elektrik Yöntemler ve Saha Uygulamaları <i>Erhan İÇÖZ, Ecevit G. YURTKAL</i>
11:00-11:30	Çay/Kahve Arası
	Prof. Dr. ÖZER KENAR OTURUMU ELEKTROMANYETİK YÖNTEMLER-1 Oturum Başkanları: Ahmet Tuğrul BAŞOKUR, Ertan PEKŞEN
11:30-11:50	S-1 CSRMT: A new innovative near surface exploration technique <i>Bülent TEZKAN, I. MUTTAQUİEN, A. SARAEV</i>
11:50-12:10	S-2 Manyetotellürik, Gravite Yöntemleri ve Sismolojik Analizlerle Yalova-Termal Bölgesinin Üst Kabuk Yapısının Araştırılması <i>Ertan PEKŞEN, Deniz ÇAKA, Berna TUNÇ, Bülent ORUÇ, Emrah BUDAKOĞLU, Taylan TÜRKMEN, Fatih SEVİM, Doğukan DURDAĞ, Kader ZENGİN, Mahmure Ezgi ERKAN, Gamze DURDAĞ, Şerif BARIŞ</i>
12:10-12:30	S-3 Kıtasal Levha-içi Volkanik Bir Sistemin Elektriksel Yapısı: Karadağ Stratovulkanı, Orta Anadolu Volkanik Bölgesi (Türkiye) <i>Özlem HACIOĞLU, Ahmet T. BAŞOKUR, Ali KOÇYİĞİT, Halil İbrahim ARSLAN, Naser MEQBEL</i>
12:30-12:50	S-4 Sultandağı Fayının Derin Yapısının Manyetotellürik, Gravite, GNSS ve Tektonik Çalışmalarla Araştırılması; İlk Sonuçlar <i>Özcan ÖZYILDIRIM, İsmail DEMİRCİ, Çağlar ÖZKAYMAK, Özcan BEKTAŞ, Can BAŞARAN, İbrahim TİRYAKİOĞLU, Doğukan Mert ÖZCAN, Ahmet YILDIZ</i>
13:00-14:00	Öğle Yemeği (KTÜ Sahil Tesisleri)



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



	Doç. Dr. Ahmet YILMAZTÜRK OTURUMU ELEKTRİK YÖNTEMLER-1 Oturum Başkanları: Bülent TEZKAN, Özlem HACIOĞLU
14:30-14:50	S-5 İç Sularda Yürütülen Bütünleşik Jeofizik Çalışmalar: Mogan Gölü (Ankara) Örneği <i>İrfan AKCA, Sinan AKISKA, Şebnem ARSLAN, Elif AKISKA, Devrim TEZCAN</i>
14:50-15:10	S-6 Yer-Elektrik Haritalarında Görüntü İşleme Temelli Gürültü Giderme <i>Şerif Murat GÖLEBATMAZ, İrfan AKCA</i>
15:10-15:30	S-7 Doğal Potansiyel Anomalilerinden Gömülü Kutuplaşmış Bir Yapının Yapı Faktörü ve Parametrelerinin Regula Falsi ve İkiye Bölme Yöntemleriyle Saptanması <i>Coşkun SARI, Emre TİMUR</i>
15:30-15:50	S-8 Seleukeia Sidera Antik Kenti (Atabey, Isparta) Jeofizik Araştırmaları <i>Hatice Evrim TÜTÜNSATAR, Olcay ÇAKMAK, Bilge HÜR MÜZLÜ KORTHOLT, Çağlayan BALKAYA</i>
15:50-16:10	Çay/Kahve Arası
16:10-18:00	EKİPMAN TANITIMI Rıza Çetin Türkmen (Jeofizik Ekipman) Seçkin Sertaç Lallı (Lares)
19:00-21:00	Akşam Yemeği (KTÜ Sahil Tesisleri)



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



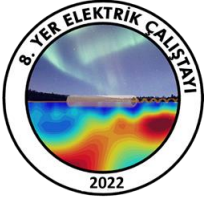
17 MAYIS 2022/SALI	
SAAT	Doç. Dr. CEMAL KAYA OTURUMU ELEKTROMANYETİK YÖNTEMLER-2 Oturum Başkanları: M. Emin CANDANSAYAR, Ali Erden BABACAN
09:30-09:50	S-9 Betonarme Elemanlardaki Nem İçeriğinin Yer Radarı Tomografi Uygulaması ile Belirlenmesi <i>Muhammet Ertuğrul KARA, Aysel ŞEREN, Hilal ALEMDAĞ</i>
09:50-10:10	S-10 Sümela Manastırı Kaya Yamacında Gerçekleştirilen Jeofizik, Jeolojik ve Jeoteknik Çalışmalar <i>Zeynep ÖĞRETMEN AYDIN, Ali Erden BABACAN, Aysel ŞEREN, Kenan GELİŞLİ, Hakan ERSOY, Murat KARAHAN, Muhammet Oğuz SÜNETÇİ</i>
10:10-10:30	S-11 FloatTEM: Transientelectromagnetics on lakes <i>Bülent TEZKAN, M. KÜPPER, P. YOGESHWAR</i>
10:30-10:50	S-12 Doliche Antik Kenti (Gaziantep) 2020-2021 Jeofizik Araştırmaları <i>Çağlayan BALKAYA, Yunus Levent EKİNCİ, Olcay ÇAKMAK, M. Ali KAYA, Michael BLÖMER, Dilek COBANOGLU</i>
10:50-11:10	Doç. Dr. CEMAL KAYA'YI ANMA <i>(M. Emin CANDANSAYAR'dan Doç. Dr. Cemal KAYA)</i>
11:10-11:30	Çay/Kahve Arası
	Doç. Dr. HAKAN ÇINAR OTURUMU ELEKTRİK- ELEKTROMANYETİK YÖNTEMLER -1 Oturum Başkanları: Coşkun SARI, Ali ELMAS
11:30-11:50	S-13 Yer Radarı Yönteminde Radargramlara ait Dielektrik Katsayısı, Hacimsel Su İçeriği ve Öz direnç Haritalarının Görüntülenmesi <i>Selma KADIOĞLU</i>
11:50-12:10	S-14 Zonguldak, Kocaeli, Uşak ve Konya Sınırlarında Kalan Bölgenin Litosfer Yapısının Uzun Periyod Manyetotellürik Yöntem İle Araştırılması: Uzak kalite kontrolü ile veri toplama <i>M. Emin CANDANSAYAR, İsmail Demirci, N. Yıldırım GÜNDOĞDU</i>
12:10-12:30	S-15 Yer Radarı Yöntemi ile Tünel İçi Yapı Elemanlarının Görüntülenmesi ve Denetlenmesi: Ermenek Barajı Yeşilköy Bağlantı Yolu Tüneli Örneği <i>Selma KADIOĞLU</i>
12:30-12:50	S-16 Arkeolojik Belgelemede Jeofiziğin Değeri: Kremna Antik Kenti Örneği <i>Mehmet Ali KAYA, Çağlayan BALKAYA, Olcay ÇAKMAK, B. Ayça POLAT BECKS, Ralf H. BECKS</i>
13:00-14:00	Öğle Yemeği (KTÜ Sahil Tesisleri)



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



14:30-15:30	POSTER SUNUMLARI-1 Oturum Başkanı: Selma KADIOĞLU, Özcan ÖZYILDIRIM
	P-1 Yapı Elemanları Üzerinde Küçük Ölçekli Doğru Akım Özdirenc Yönteminin Uygulanabilirliğinin Araştırılması <i>Cansu ARICAN, M. Emin CANDANSAYAR, N. Yıldırım GÜNDOĞDU</i>
	P-2 Şeref Höyük / Komama (Bucak) Arkeojeofizik Araştırmaları <i>Olca ÇAKMAK, Çağlayan BALKAYA, Ralf H. BECKS, B. Ayça POLAT BECKS</i>
	P-3 Sındırgı-Hisaralan (Balıkesir) Jeotermal Sahasında, Jeotermal Akışkanın Olası Konumu ve Fay Sistemlerinin Elektrik Rezistivite Tomografi (ERT) Yöntemi İle Belirlenmesi <i>Ziya Orhan DERİNSU, Züheyr KAMACI, Serdar KAPUCU, İbrahim ACAR</i>
	P-4 İzmir İli, Torbalı İlçesi, Pancar Organize Sanayi Bölgesi İçerisindeki Kontrolsüz Dolgu Alanlarının Geometrisinin Elektrik Rezistivite Tomografi Yöntemiyle Tespiti <i>Serdar KAPUCU, Züheyr KAMACI, Ziya Orhan DERİNSU, Ahmet AKDEMİR</i>
15:30-15:50	Çay/Kahve Arası
15:50-17:05	POSTER SUNUMLARI-2 Oturum Başkanı: Aysel ŞEREN, İsmail DEMİRCİ
	P-5 Tarihi Tabakhane Köprüsü ve Çevresinin Arkeolojik Yapısının Yer Radarı (GPR) Yöntemiyle Araştırılması <i>O. Serhat KARAÇAL, Emre ÖZÇELİK</i>
	P-6 Yeşilyurt Köyü (Isparta) Heyelanının İncelenmesi <i>Olca ÇAKMAK, Çağlayan BALKAYA, Erhan ŞENER, Ali YALÇIN</i>
	P-7 Tarihi Ambarlık Taş Kemer Köprüsü'nün Bulunduğu Alanda Jeofizik Yöntemlerle Zemin Yapısının İncelenmesi <i>Emre ÖZÇELİK, Hakan KARSLI, O.Serhat KARAÇAL</i>
	P-8 Sagalassos Antik Kenti (Burdur) 2021 Yılı Jeofizik Araştırmaları <i>Hatice Evrim TÜTÜNSATAR, Olca ÇAKMAK, Peter TALLOEN, M. Nuri DOLMAZ, Çağlayan BALKAYA</i>
	P-9 Menderes Mahallesi (Eğirdir, Isparta) Heyelan Alanı Jeofizik Araştırmaları <i>M. Metin ÜNYAY, Olca ÇAKMAK, Erkan KARAKURT, Çağlayan BALKAYA</i>
17:05-18:35	EKİPMAN TANITIMI Rıza Çetin Türkmen (Jeofizik Ekipman) Seçkin Sertaç Lallı (Lares)
19:30-23:00	GALA Yemeği



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



18 MAYIS 2022/ÇARŞAMBA	
SAAT	Prof. Dr. ÜMİT YALÇIN KALYONCUOĞLU OTURUMU ELEKTRİK-ELEKTROMANYETİK YÖNTEMLER-2 Oturum Başkanları: Mehmet Ali KAYA, Zeynep ÖĞRETMEN AYDIN
09:30-09:50	S-17 Akım ve Gerilim Elektrotlarının Paralel Doğrultularda Kullanımı ile Yeraltı Öz direnç Modelinin Belirlenmesi <i>N. Yıldırım GÜNDOĞDU, Gökhan Eren KARAKULAK, M. Emin CANDANSAYAR</i>
09:50-10:10	S-18 Havadan Yapay Kaynaklı Elektromanyetik Yöntem Verilerinin GPU Platformunda 3-B Düz Çözümü <i>İsmail DEMİRCİ</i>
10:10-10:30	S-19 Kuzey Anadolu Fayı yüzey kırığının VLF-R ölçümleriyle görüntülenmesi <i>Gökhan KARCIOĞLU, Anisya B. TEKKELİ, Ümit AVŞAR, Karya AKYÜZ, Feyza GÜNAYDIN, Oğuz ALTINTAŞ</i>
10:30-10:50	Çay-Kahve Arası
	ELEKTROMANYETİK YÖNTEMLER OTURUMU-3 Oturum Başkanları: Kenan GELİŞLİ, N. Yıldırım GÜNDOĞDU
10:50-11:10	S-20 Karşıt-Kuyu Radar Yönteminde Occam Ters Çözüm Yöntemi ile Seyahat Zamanı Tomografisi <i>Esra Ezgi BAKSI, Selma KADIOĞLU</i>
11:10-11:30	S-21 Maden Araştırmasında DAÖ ve RMT Verilerinin Düzensiz Ağ Kullanılarak 2B Birleşik Ters Çözümü <i>Özcan ÖZYILDIRIM, İsmail DEMİRCİ, N. Yıldırım GÜNDOĞDU, M. Emin CANDANSAYAR</i>
11:30-11:50	S-22 Düşey Elektrik Sondaj ve SPAC Yöntemleri ile Jeotermal Amaçlı Derin Yeraltı Yapının Belirlenmesi <i>Olçay ÇAKMAK, Osman UYANIK</i>
11:50-12:10	S-23 Boksit ve Zımpara Taşı (Korund) Araştırmalarında Yer Elektrik Yöntemler <i>Erhan İÇÖZ, Coşkun SARI, Ecevit G. YURTKAL, Emre TİMUR</i>
	GÜNDEM ve TARTIŞMA Oturum Başkanı: İrfan AKÇA
12:10-12:35	25th Electromagnetic Induction Workshop (EMIW2022) hakkında bilgilendirme (Prof.Dr. Ahmet Tuğrul BAŞOKUR)
12:35-13:00	KAPANIŞ 9. Yer Elektrik Çalıştayı Yeri ve Takviminin Belirlenmesi
13:00-14:30	Öğle Yemeği (Körfez Köfte/Akçaabat)



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



Ç1	Eşit Aralıklı Örneklenmemiş Verilerin Logaritmik Uzayda Hilbert Dönüşümü ve Manyetotellürik Veriye Uygulanması
	Hilbert Transform of Unequally Sampled Data in Logarithmic Space and Application to the Magnetotelluric Data

Ahmet T. BAŞOKUR

Lemnis Yerbilimleri, Ankara Üniversitesi Teknoloji Geliştirme Bölgesi, Gölbaşı, Ankara, Türkiye

E-posta: basokur@ankara.edu.tr

ÖZ

Önbilmez bir sinyalin Fourier dönüşümünün gerçel ve sanal bölümleri Hilbert dönüşümü ile birbirlerinden elde edilebilmektedir. Bu özellik manyetotellürik verinin sadece doğal elektromanyetik alandan kaynaklandığını kanıtlayarak, veri niteliğinin onaylanmasını sağlar. Eşit aralıklı veri için Hilbert dönüşümü, Fourier dönüşümünden yararlanılarak hesaplanabilir. Ancak, manyetotellürik veri daha az gürültülü veri noktaları arasından seçildiği için genellikle eşit aralıklı değildir. Eşit aralıklı olmayan verilerin logaritmik uzayda Hilbert dönüşümü için bir algoritma ve Python yazılımı geliştirilmiş ve frekans dengelenmiş direnç verisinin gerçel ve sanal bölümlerine uygulanmıştır. Yöntem ölçülen verinin analitik bir fonksiyonun doğrusal bileşimine yaklaştırılmasını içermektedir. Belirli sayıda ara değer bulma fonksiyonu yatay eksen boyunca dağıtılır. Ölçülen veri, ara değer bulma fonksiyonlarının ağırlıklı toplamı ile yeniden kurulur. Ölçülen ve yeniden kurulan verilerin çakışmasını sağlayan ayrışım katsayıları en-küçük kareler yöntemi ile çözülür. Son olarak, herhangi bir yatay eksen değeri için ayrık Hilbert dönüşümü ara değer bulma fonksiyonunun analitik Hilbert dönüşümünden bir önceki adımdaki ayrışım katsayıları kullanılarak kurulur.

Anahtar Kelimeler: Manyetotellürik, Önbilmez sistemler, Dispersiyon ilişkileri, Hilbert dönüşümü, Eşit aralıklı örneklenmeyen veri.

ABSTRACT

The real and imaginary parts of the Fourier transform of a causal signal can be obtained from each other by the Hilbert transform. This proves that the magnetotelluric data are derived from only natural electromagnetic field and verifies the data quality. The numerical computation can be carried by the Fast Fourier Transform for equally spaced data. However, magnetotelluric data are usually unequally sampled because the data points with less noise contribution are selected for the inversion. An algorithm and Python software are developed for the Hilbert transformation of unequally sampled data and applied to the real and imaginary part of the frequency normalized impedance to examine if the dispersion relations are satisfied for a given impedance tensor. The method involves the reconstruction of the measured data by a linear combination of an analytic interpolation function. A fixed number of the interpolation function is distributed along the logarithmic horizontal axis. The sum of interpolation functions reconstructs an approximation to the measured data. The decomposition coefficients that provide a fit between the measured and the reconstructed data are solved by the linear least-squares method. Finally, the discrete Hilbert transformed



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



data are constructed at any desired abscissa values by the sum of the analytical Hilbert transform of the interpolation function using the solved decomposition coefficients in the previous step. Examples from the synthetic and field data are given.

Keywords: Magnetotellurics, Causal systems, Dispersion relations, Hilbert transform, Unequally sampled data.

GİRİŞ

Önbilmez (causal) bir sinyalin Fourier dönüşümünün gerçel ve sanal bölümleri arasında Hilbert dönüşümü ilişkisi olduğu sinyal analizin ilk yıllarından bu yana bilinmektedir (Krönig, 1926; Kramers, 1927). Manyetotellürik verilere ilk uygulama Kaufman(1960) and Vanyan et al.(1961) tarafından gerçekleştirilmiştir. Boehl et al.(1977) direntinin logaritmasından fazı hesaplamışlardır. Birçok araştırmacı görünür özdirenç değerlerinden direnti fazının hesaplanması için sayısal yöntem önermişlerdir. Zorin et al.,(2020a, 2020b), görünür özdirenç ve faz arasındaki dispersiyon ilişkisinin sadece bir-boyutlu ortam için geçerli olduğunu göstermiş ve Başokur(1994) frekans dengelenmiş direnti (frequency normalized impedance-FNI) fonksiyonunun çok özel durumlar dışında dispersiyon ilişkisini sağladığını kanıtlamışlardır. Hesaplama için eşit aralıklı FNI verisine uygulanabilen bir evrişim işleci geliştirmişlerdir. Bu çalışmada eşit aralıklı olmayan FNI verisinde dispersiyon ilişkisini denetleyen bir hesaplama yöntemi önerilmektedir. Ölçülen MT verisi saçılmamış bir veri oluştursa bile dispersiyon ilişkisini sağlamadığı sürece MT verisi olarak onanması doğru bir yaklaşım olmayacaktır.

ÖNBİLMEZLİK VE DISPERSİYON İLİŞKİLERİ

Eğer bir sistem sadece şimdiki ve geçmiş değerlere bağlı ve gelecekteki değerlerinden bağımsız ise önbilmez olarak adlandırılır. Önbilmez sistemlerde, sinyal tek-yanlı, yani zamanın sıfırdan küçük değerleri için birim dürtü yanıtı sıfır olmalıdır ($f(t)=0$ $t < 0$). Önbilmez sinyal, çift ve tek parçalara ayrılıp, eksi ve artı sonsuz aralığında izleyen şekilde tanımlanabilir:

$$f_e(t) = [f(t) + f(-t)] / 2,$$

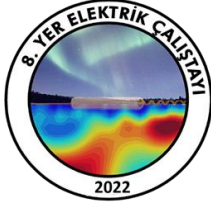
$$f_o(t) = [f(t) - f(-t)] / 2.$$

$$f(t) = f_e(t) + f_o(t) \quad -\infty < t < \infty.$$

Burada, $f_e(t)$ ve $f_o(t)$ sırası ile $f(t)$ sinyalinin çift ve tek bölümleridir. Çift ve tek bölümler arasındaki ilişki ise

$$f_e(t) = f_o(t) \operatorname{sgn}(t),$$

(1)



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



$$f_o(t) = f_e(t) \operatorname{sgn}(t) \quad (2)$$

şeklinde yazılabilir. Çift ve tek fonksiyonların Fourier dönüşümleri sırası ile gerçel ve sanal olduklarından,

$$f_e(t) \leftrightarrow F_r,$$

$$f_o(t) \leftrightarrow i F_i,$$

$$f(t) \leftrightarrow F_r(f) + i F_i(f)$$

elde edilir. Burada, $i = \sqrt{-1}$ ve çift ok ise Fourier dönüşüm çiftini göstermektedir. (1) ve (2) eşitlikleri frekans bölgesinde yazılır ise

$$f_e(t) = f_o(t) \operatorname{sgn}(t) \leftrightarrow F_r(f) = i F_i(f) * \frac{-i}{\pi f},$$

$$f_o(t) = f_e(t) \operatorname{sgn}(t) \leftrightarrow F_i(f) = F_r(f) * \frac{-i}{\pi f}$$

$$\operatorname{sgn}(t) \leftrightarrow -\frac{i}{\pi f}$$

bulunabilir. Üstteki iki denklemin açık yazılışı ile gerçel ve sanal bölümlerin birbirlerinden evrişim integrali ile hesaplanabileceği görülebilir.

$$F_r(f) = \frac{1}{\pi} P \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{F_i(y)}{f-y} dy, \quad (3)$$

$$F_i(f) = k + \frac{1}{\pi} P \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{F_r(y)}{f-y} dy. \quad (4)$$

Burada P , $f=y$ noktasındaki tekillik nedeni ile Cauchy asıl değerini göstermektedir. (4) denklemindeki k değeri, sıfır zamanında birim impuls bulunduğunda sıfırdan farklı değer alır.

EŞİT ARALIKLI OLMAYAN VERİNİN HİLBERT DÖNÜŞÜMÜ

Ölçülen FNI değerleri, yatay eksen boyunca ε_j noktalarına yerleştirilmiş bir $g(x)$ bant-sınırlı bir ara değer bulma fonksiyonun doğrusal bileşimine yaklaştırılabilir (Başokur ve diğ. 1997):

$$f_d(x_i) = \sum_{j=1}^m b_j g(x_i; \varepsilon_j) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



veya yukarıdaki toplam düzey çarpımı olarak yazılabilir:

$$f_d = \mathbf{G}\mathbf{b} \quad i = 1, 2, \dots, n.$$

Burada, n ve m sırası ile veri sayısı ile kullanılan ara değer bulma fonksiyonunun sayısıdır. $g(x_i; \varepsilon_j)$ ara değer bulma fonksiyonu ve \mathbf{G} onu kapsayan $n \times m$ boyutundaki dizeydir. Bilinmeyen b_j katsayıları, \mathbf{b} yöneyine ve $f_d(x_i)$ değerleri ise f_d yöneyine yerleştirilir ise izleyen yanılıgı enerjisi fonksiyonunun en küçüklenmesi ile katsayılar çözülebilir:

$$E(\mathbf{b}) = [\mathbf{W}(f_d - \mathbf{G}\mathbf{b})]^T [\mathbf{W}(f_d - \mathbf{G}\mathbf{b})] \rightarrow \text{minimum}.$$

En-küçük kareler çözümü izleyen şekilde verilebilir:

$$\mathbf{b} = [\mathbf{G}^T \mathbf{W}^T \mathbf{W} \mathbf{G}]^{-1} \mathbf{G}^T \mathbf{W}^T \mathbf{W} f_d = [\mathbf{G}^T \mathbf{W}_e \mathbf{G}]^{-1} \mathbf{G}^T \mathbf{W}_e f_d.$$

b_j katsayıları çözüldüğünde, (5) denkleminin yardımı ile ölçülen veriye bir yaklaşım oluşturan fonksiyon yeniden kurulabilir. (5) denkleminin Hilbert dönüşümü ise izleyen şekilde verilebilir:

$$f_{Hi}^*(x) = H \left\{ \sum_{j=1}^m b_j g(x; \varepsilon_j) \right\} = \sum_{j=1}^m b_j H [g(x; \varepsilon_j)] = \sum_{j=1}^m b_j g_{Hi}(x; \varepsilon_j).$$

Burada, H Hilbert dönüşüm işlecini göstermektedir. $g_{Hi}(x; \varepsilon_j)$ fonksiyonu, $g(x; \varepsilon_j)$ ara değer bulma fonksiyonunun Hilbert dönüşümüdür. $f_{Hi}^*(x)$, yeniden kurulan fonksiyonun ve dolayısı ile ölçülen verinin Hilbert dönüşümüdür. Yukarıdaki eşitlik düzey çarpımı olarak,

$$f_{Hi}^* = \mathbf{G}_{Hi} \mathbf{b}$$

şeklinde verilebilir.

SONUÇLAR

Eşit aralıklı olmayan verinin logaritmik uzayda Hilbert dönüşümü için bir yöntem geliştirilmiştir. Böylelikle manyetotellürik verinin doğal elektromanyetik alan tarafından oluşturulup, oluşturulmadığı ve veri geçerliliği test edilebilir. Ayrıca, zaman verilerinin Fourier dönüşümü ile frekans ortamına dönüştürülmesi aşamasında veri seçimi amacı ile de kullanılabilir.



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



KAYNAKLAR

- Başokur, A. T., 1994, Definitions of apparent resistivity for the presentation of magnetotelluric sounding data, *Geophysical Prospecting*, 42, 141-149.
- Başokur, A. T., Kaya, C. and Ulugergerli, E. U., 1997a, Direct interpretation of magnetotelluric sounding data based on the frequency-normalized impedance, *Geophysical Prospecting*, 45, 21-37.
- Boehl, J. E., F. X. Bostick and H. W. Smith, 1977, An application of the Hilbert transform to the magnetotelluric method: Tech. Rep. Electr. Geophys. Res. Lab., University of Texas, Austin.
- Kaufman, A. A. 1960, On the study of the amplitude and phase characteristics of field in low-frequency electric exploration, *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved., Ser. Geol. Geofiz.* 6, 34-41.
- Kramers, J. A., 1927, Le diffusion de la lumiere par les atomes, *Atti Cong. Intern. Fisica, Como 2*, 545-557.
- Krönig, R. 1926, On the theory of dispersion of X-rays: *J. opt. Soc. Am.*, 547-557.
- Vanyan, L. L., Kaufman, A. A., and Terekhin, E. I., 1961, Calculation of the phase curves of frequency sounding by the transformation method, *Prikl. Geofiz.* 30, 103-113.
- Zorin, N., E. Aleksanova, H. Shimizu, and D. Yakovlev, 2020a, Validity of the dispersion relations in magnetotellurics: Part I-theory: *Earth, Planets and Space*, 72: 9. doi.org/10.1186/s40623-020-1133-4.
- Zorin, N., D. Alekseev, D. Epishkin, H. Shimizu, D. Yakovlev, and S. Zaytsev, 2020b, Validity of the dispersion relations in magnetotellurics: Part II-synthetic and field data: *Earth, Planets and Space*, 72:139. doi.org/10.1186/s40623-020-01273-4.



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



Ç2	Tünel Problemlerinde Yer Elektrik Yöntemler ve Saha Uygulamaları
	Geo-Electrical Methods and Field Applications in Tunnel Problems

Erhan İÇÖZ^{*1}, Ecevit G. YURTKAL¹

¹ SUMET Yerbilimleri, Narlıdere İZMİR

erhanicoz@gmail.com

^{*}Sunumu yapacak yazar

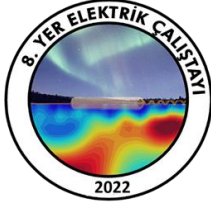
ÖZ

İnşaat ve maden mühendisliği alanında Tünel açma çalışmaları artan talep ve teknolojilere koşut olarak hızlı ve sürekli bir şekilde gelişmektedir. Günümüzde 100 kilometreden uzun tünellerin yapıldığı bilinmektedir. Ancak, bu tünellerin gerek yapım öncesi ve gerekse yapım sonrası bazı sorunlarla karşılaştığı da bir gerçekliktir. Yapım öncesinde, doğru bir projelendirme için tünelin geçeceği derinliğin jeolojisi ve tektoniği ile jeoteknik özelliklerinin bilinmesi gerekir. Çok sayıda tünelin derinliği yüzlerce metreyi bulabilmektedir. Bu nedenle de yeterince sık sondaj yapılarak bu bilgilerin sağlanması yüzbinlerce ve hatta milyonlarca liraya mal olmaktadır. Oysa, tünel açılacak güzergahlar boyunca uygulanacak jeofizik yöntemler, bu maliyetleri olağanüstü düşürerek büyük ekonomik katkılar sağlar. Yapımı tamamlanmış ve kullanımda olan tünellerde ise, göçmeler, çatlaklar oluşabildiği gibi bazen de yapımı üstlenen şirket ile tüneli yaptırtan şirket ya da kurum arasında ihtilaflar oluşabilmektedir. Tüm bu sorunların araştırılması ve çözümünde jeofizik yöntemler (özellikle yerelektrik) önemli katkılar sağlayabilmektedir. Bu çalışmada, tünel açılma öncesi ve sonrasında gerçekleştirilen jeofizik araştırmalardan örnekler sunulacak, sonuçları değerlendirilecektir.

Anahtar Kelimeler: Tünel, İnşaat, jeofizik yöntemler, yerelektrik yöntemler,

ABSTRACT

Tunnel construction works in the field of civil and mining engineering are developing rapidly and continuously in parallel with the increasing demands and technologies. It is known that tunnels longer than 100 kilometers are built today. However, it is a reality that these tunnels face some problems both before and after construction. Before the construction, the geology and tectonics and geotechnical properties of the depth at which the tunnel will pass should be known for a correct project. The depth of many tunnels can reach hundreds of meters. For this reason, providing this information by drilling frequently enough costs hundreds of thousands and even millions of liras. However, the geophysical methods to be applied along the routes to be tunneled provide great economic contributions by reducing these costs tremendously. On the other hand, collapses and cracks may occur in tunnels that have been completed and are in use, and sometimes conflicts may arise between the company that undertook the



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



construction and the company or institution that had the tunnel built. Geophysical methods (especially geoelectric methods) can make important contributions to the research and solution of all these problems. In this study, examples from geophysical surveys carried out before and after tunnel construction will be presented and the results will be evaluated.

Key Words: Tunnel, Construction, Geophysical methods, Geoelectric methods

GİRİŞ

Ulaşım sektöründe gerçekleşen gelişmelere bağlı olarak karayolu ve demiryolu taşımacılığı hızla artış göstermektedir. Artan taşıt sayısı ve yüksek kapasiteli taşıtların daha hızlı ulaşması için de kara ve demiryollarının da gelişmesi gerekmiştir. Yolların kısalması için, yüksek dağların etrafından dolaşmak yerine giderek daha uzun tüneller açılmaya başlanmıştır. Bu da, tünel projelendirilmesinde çoklu problemleri beraberinde getirmiştir. Tünelin geçeceği derinlikteki jeolojik birimlerin cinsi ve yapısı, yanal süreksizlikler, olası su boşalmaları, göçme riski olan yerler, jeoteknik özellikler vb bilinmeden doğru projelendirme yapılamayacağı açıktır. Diğer yandan, açılmış tünellerde de çok çeşitli sorunlar yaşanabilmektedir. Bazı tünellerde göçmeler oluşur. bu göçmenin boyutları ve yapısı bilinirse onarımı için de doğru yöntem belirlenebilir.

UYGULANAN YÖNTEMLER

Bu sunumun amacı, Sunumun konusu, birkaç farklı tüneli kapsamaktadır. Her bir tünelde, problem göre yöntemler uygulanmıştır. Bu çalışmalar, öz direnç, AMT, SP ve GPR ölçümleriyle gerçekleştirilmiştir. Yöntemlerin kuramsal açıklamalarına burada değinilmeyecektir. Öz direnç ölçümleri, en çok kullanılan düşey elektrik sondajı (DES) uygulamayla alınmıştır. AMT yöntemi, 1.5 saatlik ölçümlerle gerçekleştirilirken GPR yöntemi 500 MHz anten ile tünel eksenine paralel profiller şeklinde kullanılmıştır.

Elde edilen verilerin yorumu

Zigana ve Sakaltutan tünellerinde, tünel derinliklerindeki jeolojik yapılar ortaya çıkarılmış, tünelin nerelerde hangi jeolojik ortamdan geçeceği, nerelerde süreksizliklerle karşılaşabileceği belirlenmiştir. Yahşihan'daki T15 demiryolu tüneline oluşan göçüğün geometrisi ve boyutları ortaya çıkartılarak onarımının sağlıklı yürütülmesi ve gerekli önlemlerin alınması sağlanmıştır. İki tünelde ise, müteahhit ile tüneli yaptıran şirket arasında, yeterli donatı, bulon ve süren kullanılıp kullanılmadığına yönelik ihtilaf mahkemeye intikal etmiştir. Kullanılan malzemenin boyut ve yerlerini belirlemek amacıyla, GPR yöntemi uygulanmıştır. Tünellerin tavanındaki dairesel bölgede, birbirine paralel 14 hat boyunca alınan ölçülerle, donatı, bulon ve süren yerleri belirlenerek raporlanmıştır. Afganistan'daki Salang tüneline ise Taliban tarafından gerçekleştirilen patlatmalar sonucu, tünelin betonunda, donatılarında ve beton ardındaki granitlerde oluşan bozulmalar ortaya çıkarılarak, iyileştirilmeleri için gerekli veriler sağlanmıştır.



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Zigana Tünelinde, ekteki kesitte de görüleceği üzere, güzergahı kesen iki keskin ve bir olası fay saptanmıştır (Şekil 1). Bunlardan en önemlisi, kireçtaşı litolojisindeki Bardiga formasyonunu kesen faydır. Bu faydan, çok yüksek debili su boşalimleri beklenir. Sakaltutan tüneline, tünelin büyük bölümünün metaofiyolitlerden geçeceği belirlenmekle birlikte, doğu bölümünde yer yer temeldeki fillatlardan geçme olasılığının da bulunduğu görülmektedir (Şekil 2). Bu tünelde ayrıca birkaç gömülü fayın varlığı da belirlenmiştir. Yahşihan T15 demiryolu tünelineki göçüğün geometrisi aydınlatılmıştır (Şekil 3). İlerleyen zamanlarda, bu göçük jeofizik verilerin ışığında doldurulmuş ve tehlikesiz hale getirilmiştir. Afganistan'daki Salang Tüneli'nde belirlenen riskler (Şekil 4), daha sonraki onarımların hem güvenli yapılması ve hem de onarım giderlerinde büyük ekonomi sağlanmıştır. İhtilafa konu olan tünelde gerçekleştirilen GPR çalışmalarıyla, uygulamada kullanılan donatı, bulon ve süren yerleri belirlenerek sunulmuştur (Şekil 5). Böylece, iki taraftan hangisinin haklı olduğu saptanmıştır.

Yukarıda sıralanan örneklere ek olarak, son zamanlarda art arda ihaleleri yapılan çok sayıdaki Yüksek Hızlı Tren projelerinde de yoğun bir jeofizik program yer almaktadır. Bu programlar içerisinde, yukarıda değindiğimiz yöntemler dışında, mikrotremör ölçümleri, arkeojeofizik amaçlı GPR ölçümleri, SP, sismik kırılıma, MASW gibi diğer jeofizik yöntemler de yer almaktadır. Bu bildirin süresi yetmeyeceği için diğer yaptığımız uygulamalara değinemedik. Böylece jeofizik yöntemlerle, hızlı, güvenilir ve ekonomik olarak, Hızlı Tren projelerinde, tüneller ve güzergahın diğer bölümleri için önemli katkılar sunulabilmektedir.

Bu çalışmalar, jeofizik yöntemlerin, pek çok konuda olduğu gibi çeşitli tünel problemlerinde de ne kadar fazla çözüm sunduğunu, ekonomi sağladığını açıkça ortaya koymaktadır.

KAYNAKLAR

Başokur, A. T. (2009), Manyetotellürik Yöntem ve Jeotermal Aramalarda Kullanımı TMMOB Jeotermal Kongresi

Başokur, A. T. 1999, Automated 1-D interpretation of resistivity soundings by simultaneous use of the direct and iterative methods, Geophysical Prospecting, 47, 149-177.

Chen Zhiping, Chen Dejiu, Zhang Zhaoxiu, Ye Xingjun (2010) Application of High Frequency Magnetotelluric Method in Chimushan Tunnels (Chongqing Civicism Exploration arul Design Research Institu) Davis JL and Annan AP (1989) Ground-penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy: Geophysical Prospecting, 37, 531-551.

İçöz, E. ve Yurtkal, E.G. (2012) Zigana Tüneli Jeofizik AMT Etüt Raporu (Sumet Yerbilimleri, yayımlanmamış).

İçöz, E. ve Yurtkal, E.G. (2018) Afganistan Salang Tüneli Jeofizik GPR Etüt Raporu (Sumet Yerbilimleri (yayımlanmamış)).



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



İçöz, E. ve Yurtkal, E.G. (2019) Sivas- Erzincan Hızlı Tren Projesi, Sakaltutan Tüneli Jeofizik AMT Etüt Raporu (Sumet Yerbilimleri (yayımlanmamış).

İçöz, E. ve Yurtkal, E.G. (2019) Ankara Sivas Hızlı Tren Projesi, Yahşihan T15 Tüneli Jeofizik Etüt Raporu (Sumet Yerbilimleri (yayımlanmamış).

Jung, K. (1961) Schwerkraftverfahren in Der Angewanten Geophysik, Leipzig Res2Dinv ver.3.4 yazılımı, 2D Resistivity and IP Inversion, Geotomo Software,

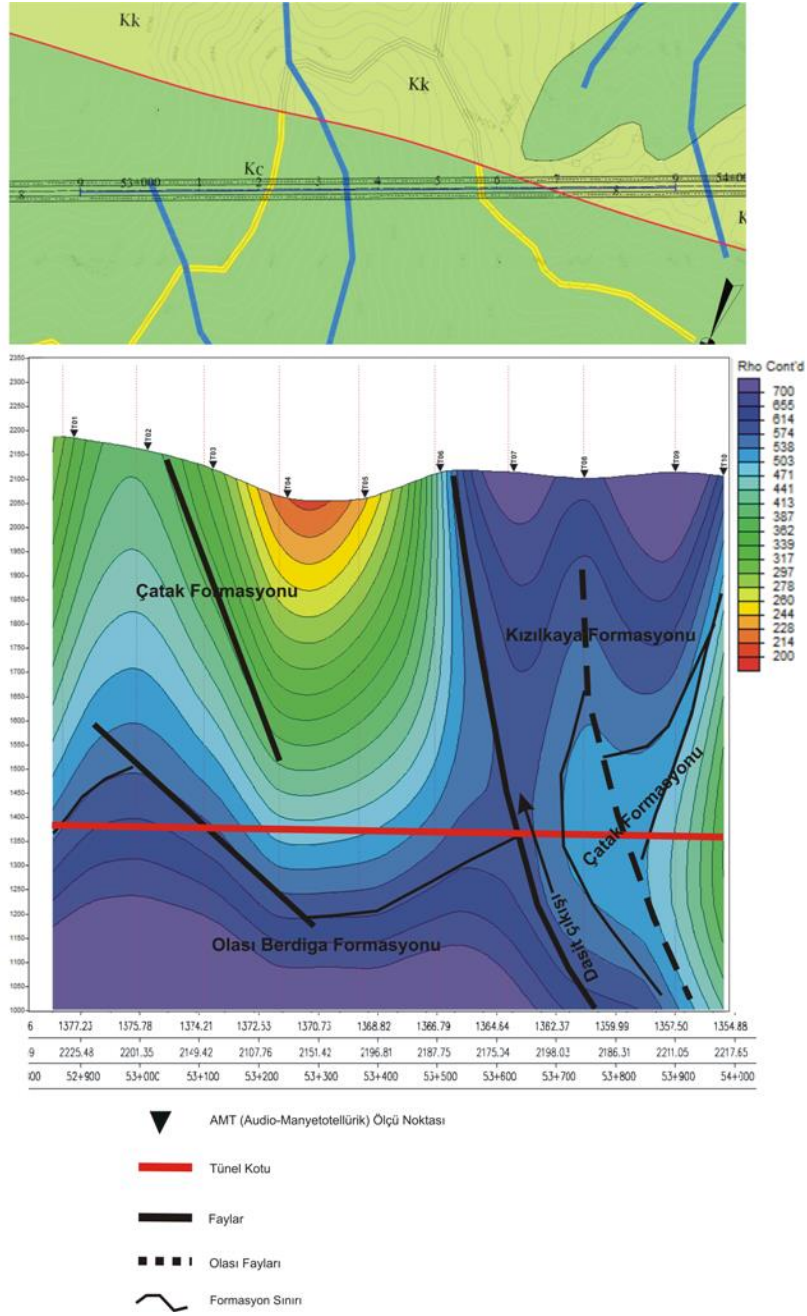
Kadioğlu S (2003) 3D Ground Penetrating Radar-Data Acquisition, Processing, and Interpretation, 14th International Petroleum Congress and Natural Gas Congress and Exhibition of Turkey,

Özdemir, H. (1981) Jeofizik Prospeksiyon Ders Notları İTÜ Maden Fakültesi yayını

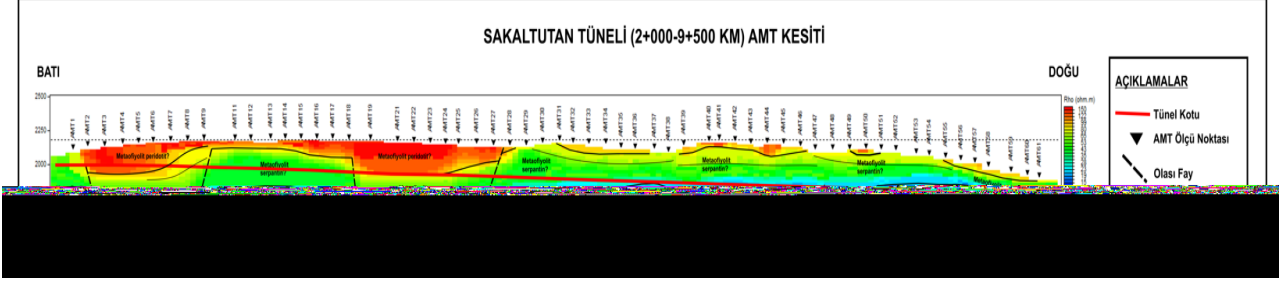
Öztürk, K. Jeofizikte Elektrik Alanlar (İ.Ü. Yayınları) Phoenix Geophysics JOournal (2011) Phoenix AMT for Tunnel Survey ST. Petersburg State University - Application of the AMT method to study of railway tunnel route, Geological faculty Center of Electromagnetic methods AnkaraTURKEY, Proceedings, p.485-486.

Yalçiner CÇ, Bano M, Kadioğlu M, Karabacak V, Meghraoui M, Altunel E (2008) New temple discovery at the archaeological site of Nysa (western turkey) using GPR method, Journal of Archaeological Science, 36(8),1680-1689.

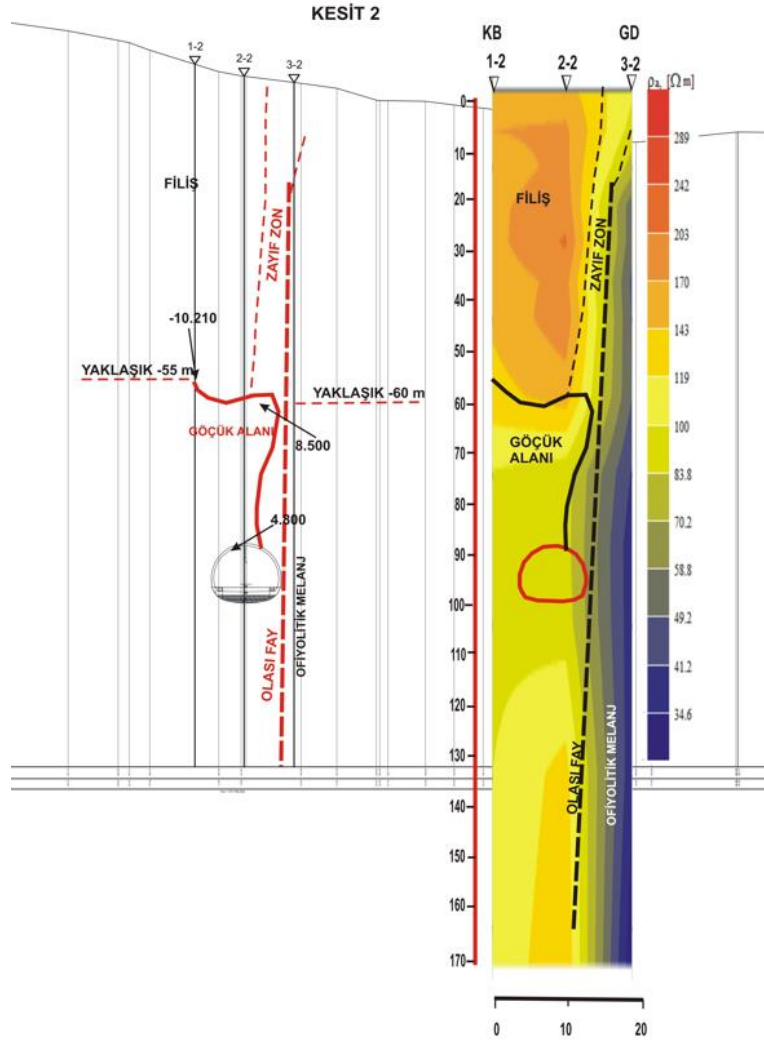
Yüksel Proje (2011) Kayaş-Yerköy Demiryolu Kesim 1 (Km 12+263 – 74+100) Jeolojik Jeoteknik Araştırma Raporu



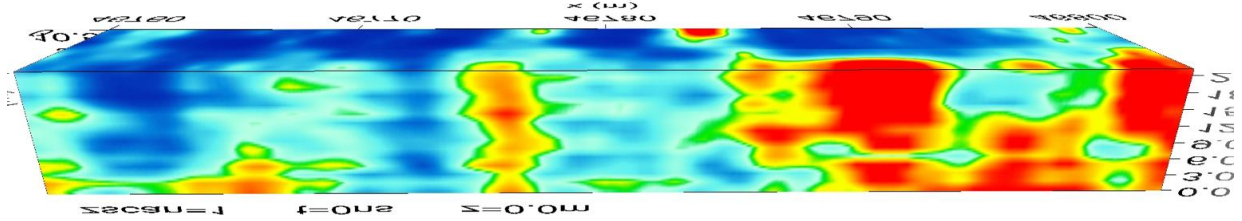
Şekil 1: Zigana Tüneli jeoloji Haritası ve AMT Kesiti



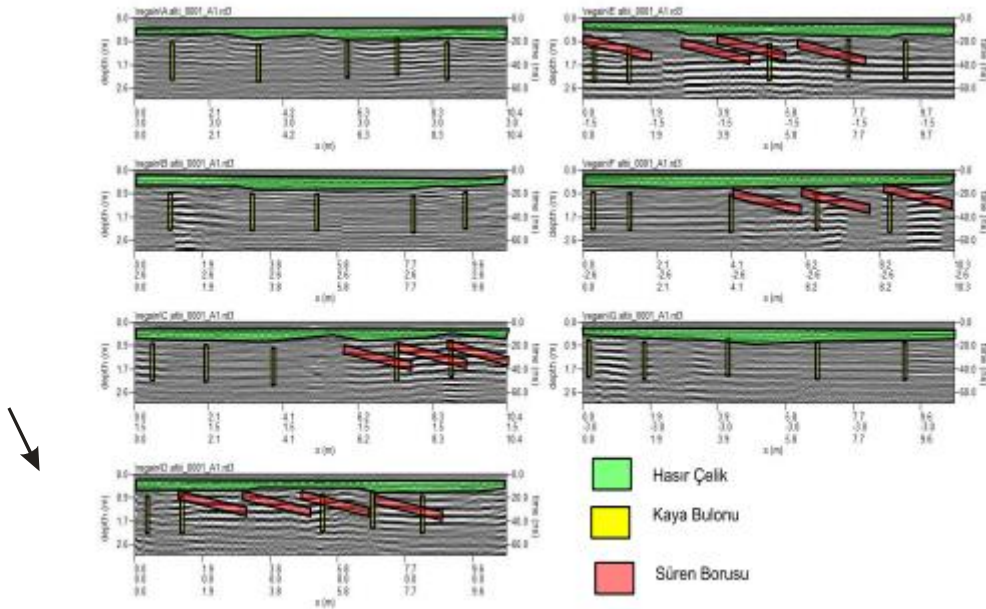
Şekil 2: Sakaltutan Tüneli AMT Kesiti



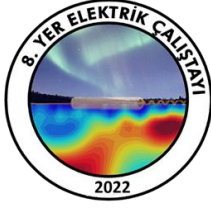
Şekil 3: Yahşihan T15 Tüneli Göçük Geometrisi



Şekil 4: Salang Tüneli'nde Patlama Sonucu Oluşan Bozuklukların 3 Boyutlu Gösterimi



Şekil 5: Araştırma Yapılan Tünelde saptanan Süren ve Bulon Yerleri Örneği



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



S1

CSRMT: A new innovative near surface exploration technique

B.Tezkan*¹, I. Muttaquien^{1,2}, A. Saraev³

¹ *Institute of Geophysics and Meteorology, University of Cologne, Germany*

² *Department of Physics, UIN SGD, Bandung, Indonesia*

³ *Institute of Earth Sciences, St. Petersburg State University, Russia*

E-posta:tezkan@geo.uni-koeln.de

**Sunumu yapacak yazar*

ABSTRACT

The control source radiomagnetotellurics (CSRMT) with a horizontal electric dipole as a source is a modified version of the well known radiomagnetotelluric (RMT) method. The CSRMT transmitter is connected to a grounded electric dipole. The length of the dipole varies between 100 and 1000 m. The CSRMT-transmitter generates a rectangular signal with base frequencies between 1 and 150 kHz. The advantage of the rectangular signal produced by the transmitter is that their odd harmonics can be observed together with the main frequencies. It is therefore enough to inject signals with 3-4 frequencies to cover the whole frequency range between 1 kHz and 1 MHz. A new processing algorithm is developed to analyse the data in both scalar and tensor mode. A new 5 channel RMT receiver allows also to measure the vertical magnetic field. We observe horizontal electric and magnetic components as a function of time usually in the far field zone and apparent resistivity and phase can be derived by from the observed time series of the electric and magnetic fields. In addition, we observe the vertical component of the magnetic field so that the transfer functions between the vertical and horizontal component of the magnetic field can be calculated, so that tipper data can be estimated.

The tipper observation with the new device was tested on a pipeline in Cologne and received good results. The tipper data together with the apparent resistivities and phases can be inverted using the conventional 2D inversion algorithms of magnetotellurics. A field example from Russia will be presented. Reliable and smooth transfer functions as a function of frequency were observed which could be interpreted by a 2D conductivity model.



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



S2	Manyetotellürik, Gravite Yöntemleri ve Sismolojik Analizlerle Yalova-Termal Bölgesinin Üst Kabuk Yapısının Araştırılması
	Investigation Of Upper Crust Structure Of Yalova-Termal Region By Magnetotelluric, Gravity Modelling And Seismological Analyses

Ertan PEKŞEN^{*1}, Deniz ÇAKA², Berna TUNÇ³, Bülent ORUÇ⁴, Emrah BUDAKOĞLU⁵, Taylan TÜRKMEN⁶, Fatih SEVİM⁷, Doğukan DURDAĞ⁸, Kader ZENGİN⁹, Mahmure Ezgi ERKAN¹⁰, Gamze DURDAĞ¹¹, Şerif BARIŞ¹²

¹ertanpeksen@kocaeli.edu.tr, ²caka@kocaeli.edu.tr, ³berna@kocaeli.edu.tr,
⁴bulent.oruc@kocaeli.edu.tr, ⁵ebudakoglu@sakarya.edu.tr, ⁶taylanturkmen@gmail.com,
⁷fatih.sevim@tubitak.gov.tr, ⁸dogukan.durdag@kocaeli.edu.tr, ⁹zenginkaderr@gmail.com,
¹⁰eezgibakir@gmail.com, ¹¹gamzeayhandurdag@gmail.com, ¹²sbaris@kocaeli.edu.tr

ÖZ

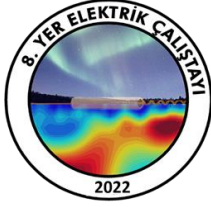
Bu çalışmada, Termal ilçesi ve civarının hız, özdirenç ve yoğunluk yapısı araştırılmıştır. Bölgenin sismik aktivitesi üç yıl boyunca izlenmiştir. Bu dönem içerisinde 4792 adet deprem verisi okunmuştur. Bölgenin 3B tomografisinin belirlenmesi çalışmasında LOTOS yazılımı kullanılmıştır. Bu sayede sismik dalga hızlarının yanıl ve düşey dağılımları ile Vp/Vs oranı dağılımları belirlenmiştir. Termal ilçesi civarında ölçülen 39 adet MT ve TEM ölçüsünden bölgenin 4 km derinliklerine kadar üç boyutta özdirenç dağılımı elde edilmiştir. Gravite yöntemi için 268 noktada ölçülen gravite verileri kullanılarak üç boyutta taban topoğrafyası 1,1 km ye kadar çıkarılmıştır. Gravite verilerinin yoğunluk kesitleri ters çözüm ile elde edilmiştir. Çalışma sahasında gerçekleştirilen üç farklı jeofizik yöntemin ayırım gücü farklı olmasına rağmen sonuçları birbirlerini desteklemektedir.

Anahtar Kelimeler: Yerel Deprem Tomografisi, Manyetotellürik, Gravite

ABSTRACT

In this study, velocity, resistivity, and density structure of Termal district and its surroundings were investigated. The seismic activity of the region was monitored for three years. During this period, 4792 earthquake data were read. 3D tomography of the region was obtained with by performing the LOTOS program. Thus, the lateral and vertical distributions of seismic wave velocities were obtained from local earthquake tomography studies as well as Vp / Vs ratios. Resistivity distributions in three dimensions from 39 MT and TEM data were obtained in the vicinity of Termal district. The depth was approximately 4 km. For the gravity method, the topography of basement in three dimensions was obtained up to 1.1 km using gravity data measured at 268 points. Density distributions of the corresponding area were estimated by an inversion method with the gravity data. Although the resolution of the three different geophysical methods performed in the study area varies, their results support each other.

Keywords: Local Earthquake Tomography, Magnetotelluric, Gravity



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI

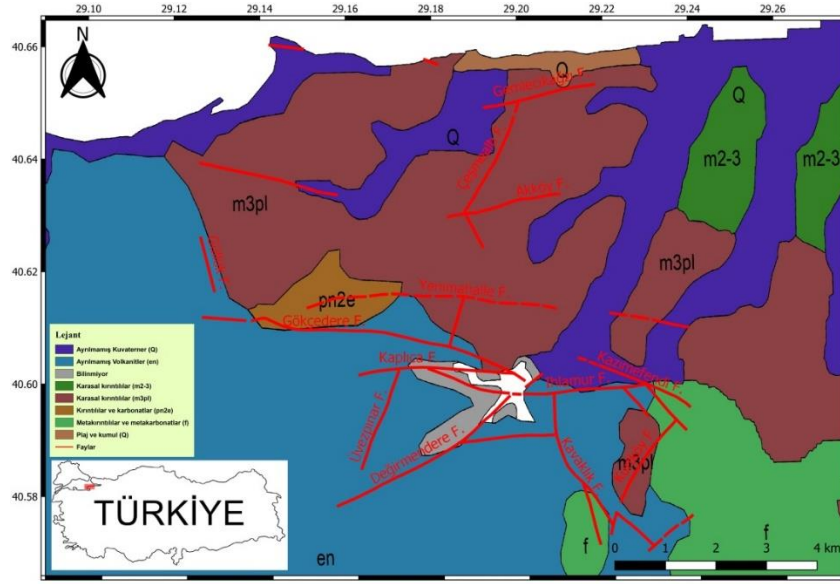


GİRİŞ

Armutlu Yarımadası'nda Termal ilçesi ve civarının 3 yıl boyunca deprem aktivitesi bölgedeki ARNET deprem istasyon ağı kullanılarak izlenmiştir. Bu çalışma kapsamında ağı 8 adet geçici istasyon ilave edilerek bu işlemler gerçekleştirilmiştir. İstasyon kurulacak yerler özel olarak belirlenmiş ve buralarda ölçüler alınarak seçilen yerlerin deprem istasyonu için uygun olup olmadığı analiz edilmiştir. Uygun olmayan deprem istasyonları için ise yeni istasyon yerleri seçilerek bu yeni yerlerde de ölçüler alınmıştır. Yerler belirlendikten sonra deprem istasyonlarının kurulumu tamamlanmıştır. Çalışma sahasında geçici elektromanyetik (TEM), manyetotellürik (MT) ve gravite ölçüleri alınmıştır. MT ölçülerinin veri analizi yapılarak standart MT (EDI) dosyaları oluşturulmuştur. Arazide alınan MT ölçülerindeki durağan kayma etkisi TEM ölçüleri kullanılarak giderilmiştir. Daha sonra MT verileri (empedanslar) kullanılarak 3B modellemesi ModEM yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Gravite verileri ölçülmüş ve Bouguer anomali haritası yapılmıştır. Gravite verilerinden 3B gravite ters çözümü ve 2B gravite yoğunluk ters çözümü yapılmıştır. Deprem verileri belirli periyotlarla istasyonlardan toplanmış ve okunmuştur. Deprem verileri kullanılarak tomografi sonuçları elde edilmiştir. Bütün bu yöntemler kullanılarak bölge hakkında yorumlar yapılmıştır. Gravite yöntemiyle sedimanter ortamların temel kaya haritalaması ve termal etkilerinden ortaya çıkan alterasyon zonları, fay ve dayk sistemleri ve olası ısı kaynakları ile ilişkili intrüzif sokulumlar yoğunluk değişimlerine bağlı olarak modellenmiştir.

JEOLJİ

Çalışma sahasının jeoloji haritası Şekil 1.'de gösterilmektedir. Armutlu Yarımadası Termal ilçesi ve civarının neotektonik özellikleri Yiğitbaş vd. (2006) tarafından detaylı bir şekilde çalışılmıştır. Çalışma alanındaki faylar ve jeoloji haritası ile birlikte verilmiştir. Termal ilçesinde bulunan Termal sıcak su kaynağı Gemiciköy formasyonu ve Kızderbent Volkaniti sınırındadır. Çalışma sahasının sınırları genel olarak Armutlu Yarımadası jeoloji haritasına göre bu iki birimde yer almaktadır. Çalışma sahasımız Eosen'den genç birimler ve Eosen yaşlı birimlerden oluşmaktadır. Eosen yaşlı kayalar ise andezitik ve bazaltik volkaniklerdir (Akbayram, 2011; Genç vd, 2004).



Şekil 1. Armutlu Yarımadası, Termal ilçesi civarının jeoloji haritası [1]. Kırmızı sürekli çizgiler fayların yerini, kesikli çizgiler olası fayların yerini göstermektedir (Faylar Yiğitbaş vd (2006) dan derlenmiştir).

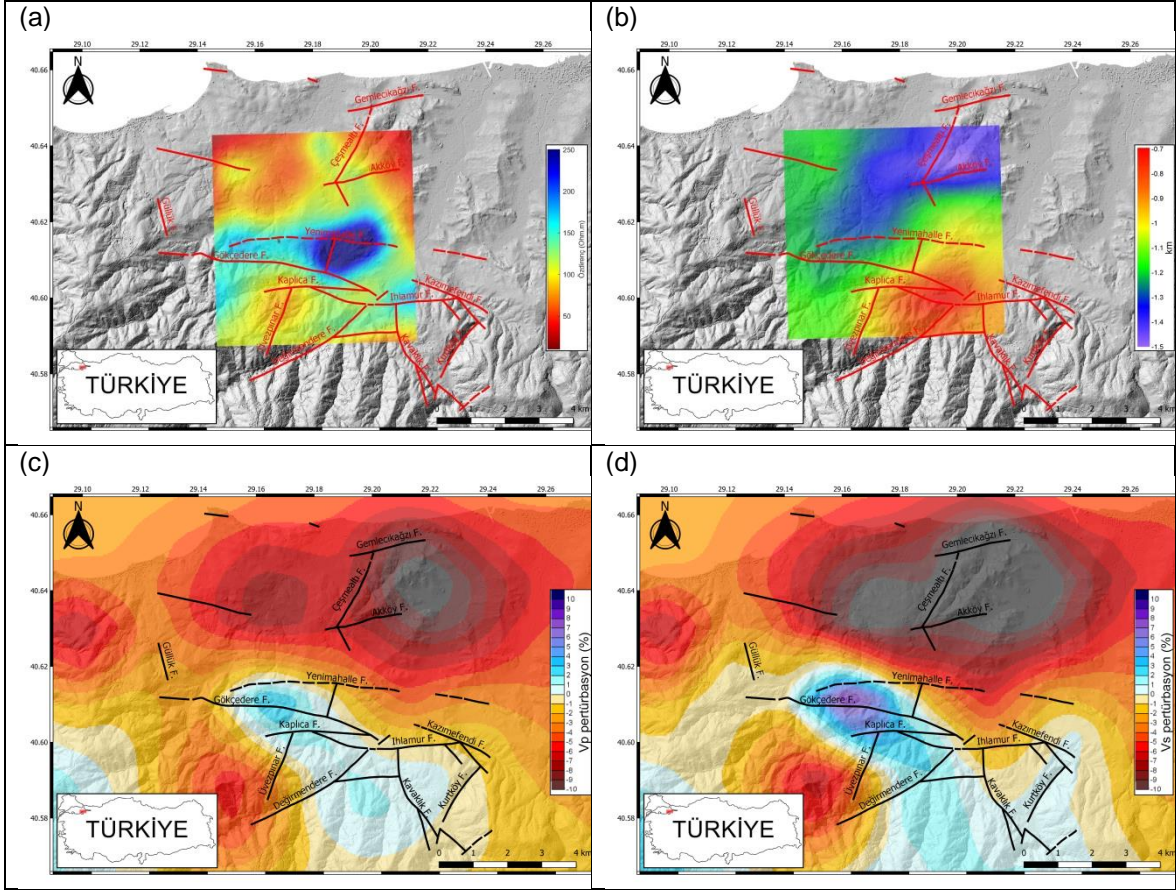
YÖNTEM

Armutlu Yarımadası'nda kurulu olan deprem istasyon ağı ARNET tarafından bölge uzun zamandan beri izlenmektedir. Bu çalışma ile bölgenin yer altı yapısı yerel deprem tomografi, manyetotellürik ve gravite yöntemleri ile araştırılmıştır.

Tomografi yönteminde, Ml büyüklükleri 0,1-4,9 arasında değişen 5228 adet deprem kullanılmıştır. Veri seti, 49232 adet P ve 43410 adet S okuması olmak üzere toplam 92642 adet faz okuması içermektedir. Yerel deprem tomografisi çalışması, LOTOS algoritması kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Koulakov, 2009). Böylelikle çalışma sahasının hız yapısı elde edilmiştir.

Çalışma sahasında gerçekleştirilen MT ölçüleri ModEM programı kullanılarak modellenmiştir. Bu sayede Termal ve civarının öz direnç derinlik yapısı elde edilmiştir (Kelbert vd., 2014; Egbert ve Kelbert, 2012).

Çalışma sahasında ölçülen gravite verileri kullanılarak taban topoğrafyası Parker-Oldenburg algoritması ile gerçekleştirilmiştir (Oldenburg 1974). OCCAM ters çözüm yöntemi kullanılarak ise çalışma sahasının çeşitli yerlerinden alınan kesitlerin yoğunluk modellenmesi yapılmıştır (Constable vd 1987).



Şekil 2. MT öz direnç (a), gravite taban topoğrafyası (b), Vp değişimi (c) ve Vs değişimi (d) 1,1 km derinlik seviyesi için gösterilmektedir.

SONUÇLAR

MT ve gravite yöntemleri ile toplanan verilerin işlenmesi, yorumlanması ve modellenmesi ve yerel deprem tomografi çalışmasıyla sismik Vp, Vs hızları ve Vp/Vs oranları haritalanmıştır. Bu üç yöntemin ortak amacı Termal ilçesi ve civarının üst kabuk yapısı içinde jeotermal süreçleri ve deprem aktivitesini denetleyen fayları, elektrik öz direnç, yoğunluk farkı ve sismik hızların yanal ve düşey değişimlerine göre anlaşılmasını sağlamaktır. Yerel deprem tomografi çalışmasıyla bölgenin sismik hız yapısı ayrıntılı bir şekilde ortaya çıkarılmıştır. Bununla birlikte bölgenin sıcak suya doygunluğundan hareketle Vp/Vs dağılımlarının yüksek değerlerde beklenmesine rağmen özellikle yaklaşık 1 km derinliğinde düşük Vp/Vs oranları elde edilmiştir. Aynı derinliklerde deprem odak derinliklerinin, Vp/Vs oranlarının yanal olarak keskin değişim gösterdiği bölgelerde yoğunlaşması da dikkat çekmektedir. MT verilerinden modellenen elektrik öz direnç kesitleri, yerel deprem tomografi hız kesitlerinde değişime neden olan jeotermal kaynakların ağırlıklı dağılım gösterdiği 3,5 km derinliğe kadar çözüm sunmuştur. Gravite anomalileri proje alanının sığ çizgiselliklerinin görüntülenmesi ve yoğunluk farkları dağılımına yönelik çözümler sunmuştur. Bouguer anomalilerin spektral analizi metamorfik temel kayanın ortama derinliğini 1,15 km olarak vermiştir. Temel kayanın Parker-Oldenburg algoritmasıyla modellenen geometrik yapısı 0,75-1,5 km aralığında değişmektedir. Lokal sahalarda bu



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



türden derinlik değişimleri hızlı (keskin) değişimler olarak kabul edilebilir. Bu özellik temel kayanın yapısal deformasyonunda tektonik kuvvetlerin ve derinde jeotermal süreçleri besleyen magma aktivitesinin önemini ortaya koymaktadır.

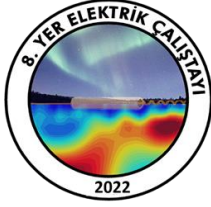
TEŞEKKÜR

Bu çalışma TÜBİTAK tarafından 117Y184 nolu proje olarak desteklenmiştir. Desteklerinden dolayı TÜBİTAK'a teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

[1] <http://yerbilimleri.mta.gov.tr/> erişim 19 Ocak 2022.

- Akbayram K 2011, İstanbul ile Sakarya Zonları Arasındaki Potid-İçi Kenedinin Armutlu Yarımadası Doğusu'ndaki Evrimi: *İTÜ Avrasya Yerbilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi*.
- Constable SC, Parker RL, and Constable CG 1987, Occam's inversion: A practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data: *Geophysics*, **52**, 289-300.
- Genç C, İşseven T, Keskin M ve Tüysüz O 2004, Armutlu Yarımadası (KB) Eosen manyetik kayalarının petrolojik evrimi ve paleomanyetizma özelliklerinin araştırılması: *TÜBİTAK Proje No: 102Y032*.
- Egbert GD and Kelbert A 2012, Computational recipes for electromagnetic inverse problems: *Geophysical Journal International*, **189**, 251–267.
- Kelbert A, Meqbel N, Egbert GD, and Tandon K, 2014, ModEM: A modular system for inversion of electromagnetic geophysical data: *Computers & Geosciences*, **66**, 40-53.
- Koulakov I 2009, LOTOS code for local earthquake tomographic inversion. Benchmarks for testing tomographic algorithms: *Bulletin of the Seismological Society of America*, **99**, 194-214.
- Oldenburg DW 1974, The inversion and interpretation of gravity anomalies: *Geophysics*, **39**, 526-536.
- Yiğitbaş E, Bozcu M, Aylan E, Gürer ÖF ve Yılmaz K, 2006, Armutlu Yarımadasının Yalova Batısında kalan kesminin morfotektonik-jeolojik niteliklerinin incelenmesi: *TÜBİTAK Proje No:101Y068*.



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



S3	Kıta-ıçi Volkanik Bir Sistemin Elektriksel Yapısı: Karadağ Stratovulkanı, Orta Anadolu Volkanik Bölgesi (Türkiye)
	Electrical Structure of a Continental Intraplate Volcanic System: the Karadağ Stratovolcano, Central Anatolian Volcanic Province (Turkey)

Özlem HACIOĞLU ^{*1}, Ahmet T. BAŞOKUR², Ali KOÇYİĞİT³, Halil İbrahim ARSLAN², Naser MEQBEL⁴

¹ Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Müh. Böl., Trabzon, Türkiye

² Lemnis Yerbilimleri, Ankara Üniversitesi Teknoloji Geliştirme Bölgesi, Gölbaşı, Ankara, Türkiye

³ Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Jeoloji Müh. Böl., Çankaya, Ankara, Türkiye

⁴ National Observatory Rua General José Cristino, 77 São Cristóvão, Rio de Janeiro, RJ, Brazil

E-posta: ozlem.hacioglu@ktu.edu.tr

*Sunumu yapacak yazar

ÖZ

Karadağ stratovulkanı Orta Anadolu Volkanik Bölgesi'nin sönmüş Kuaterner volkanlarından biridir. Karadağ stratovulkanının altında olası bir hidrotermal sistemin varlığını ve ergime içeren herhangi bir magmatik zonun var olup olmadığını incelemek amacı ile bir manyetotellürik (MT) çalışma yürütülmüştür. Startovulkanın üç-boyutlu elektriksel özdirenç modelini oluşturmak için 124 farklı noktada geniş bant (0.0001-251 s) MT verisi toplanmıştır. Hesaplanan özdirenç modeli Karadağ stratovulkanının altında, üç farklı düşük elektriksel özdirençli belirtiye işaret etmektedir. Bunlar: (i) stratovulkanın krater merkezinin hemen altında yer alan ve eski bir krater gölüne ait sedimanlarla ilişkilendirilen yüzeye yakın düşük özdirençli bir zon, (ii) stratovulkanın doğusunda yer alan ve büyük olasılıkla hidrotermal alterasyonun neden olduğu sıg-düşük özdirençli bir zon ve (iii) üst kabuğa yerleşmiş (2-7 km) silisce zengin kristal-kısmi olarak ergimmiş bir magma rezervuarı ile açıklanan, geniş ve derin bir düşük özdirenç zonu şeklindedir. Yüzeyde geniş bir alana yayılan, yüksek özdirençli sahip tabaka Karadağ adakitik volkanik kayaların ve piroklastiklerin yüzey dağılımlarıyla uyumludur. Volkanın uçlarında yer alan yüksek özdirençli taban kaya Prekambriyen-Mezozoik yüksek- ve orta-dereceli metamorfik kayalarla ilişkilendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: manyetotellürik, elektriksel özdirenç, hidrotermal sistemler, magma rezervuar, Karadağ stratovulkanı



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



ABSTRACT

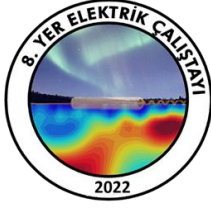
Karadağ is one of the dormant Quaternary stratovolcanoes of the Central Anatolian Volcanic Province (Turkey). A magnetotelluric (MT) study was performed in order to describe a possible hydrothermal system and reveal whether any melt-bearing magma body could reside beneath the stratovolcano. We acquired broadband MT data in the period range 0.0001-251 s at 124 locations to obtain a three-dimensional electrical resistivity model of the stratovolcano. The resistivity model brings out three low resistivity anomalies, namely (i) a near surface low resistivity zone directly beneath the crater center interpreted to be lacustrine sediments of an extinct crater lake, (ii) a shallow low resistivity zone of probable hydrothermal alteration in the eastern part of the stratovolcano, and (iii) a deep and large zone of low resistivity attributed to a shallow (2-7 km) seated magma reservoir containing silicic crystal mush within the upper crust beneath the volcanic edifice. A resistive surficial layer is consistent with the distribution of the Karadağ adakitic volcanics and pyroclastics, and a resistive basement on the flanks of the stratovolcano also corresponds to Precambrian to Mesozoic high- and medium-grade metamorphic rocks.

Keywords: magnetotellurics, electrical resistivity, hydrothermal systems, magma reservoir, Karadağ stratovolcano

GİRİŞ

Dünya üzerindeki volkanik merkezlerin büyük çoğunluğu (~%95) yaklaşan (dalma batma zonları) ve uzaklaşan (okyanus ortası sırtları ve kıtasal açılma zonları) levha sınırlarıyla ilişkilendirilmektedir (Decker ve Decker 2005). Ancak, daha az sayıda, tektonik levha sınırlarından daha uzakta ve levhaların içlerinde meydana gelen Kuarterner-Neojen yaşlı volkanizmaya doğu Asya ve Anadolu gibi bazı bölgelerde rastlanmaktadır. Levha sınırlarındaki volkanizma sayıca çok olmalarıyla ilişkili olarak, levha-içlerinde meydana gelen volkanizmaya göre iyi çalışılmış ve anlaşmıştır. Levha içlerinde meydana gelen volkanizma ve özellikle astenosferden yüzeye ya da üst-kabuksal derinliklere ulaşan magmanın izlediği yol tam olarak anlaşılmamakla birlikte, astenosfer kaynaklı sıcak magma yükselimi ya da dalan bir levhadan yükselen sıvıların neden olduğu mantodaki ergime sürecinin bir sonucu ile ilişkilendirilmiştir (Chen vd 2017; Li vd 2021; Comeau vd 2022).

Manyetotellürik (MT) yöntem yerkabuğu içerisindeki jeotermal rezervuar (örneğin; Başokur vd 2019; Hacıoğlu vd 2020; 2021; Cheng vd 2021), kısmi ergime zonları (örneğin; Unsworth vd 2005; Türkoğlu vd 2008) ve kabuksal akma zonları (örneğin; Unsworth 2010; Hacıoğlu vd 2018) gibi akışkan bölgelerin görüntülenmesinde başarılı bir şekilde uygulanmıştır. Ayrıca, volkanlar üzerinde yürütülen MT çalışmaları ile düşük özdirenç değerleri ile ayırt edilen hidrotermal sistemler ve bu sistemlere ait bileşenler, volkanların güncel durumları ve gelecekteki davranışları da araştırılmıştır (örneğin; Hill vd 2015; Matsushima vd 2020). Bu çalışma kapsamında, Karadağ stratovolkanının üst kabuk yapısını betimleyen elektriksel özdirenç modelini elde etmek amacıyla volkanın üzerinde ve eteklerinde 124 farklı noktada MT verisi toplanmış ve bu veriler üç-boyutlu olarak modellenmiştir.



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



JEOLOJİ

Orta Anadolu, kuzeyde Ponditler ve güneyde orta Toroslar ile sınırlandırılmış bir bölgede yer alan, Kıbrıs dalma-batma zonasıyla ilişkili yay-ardı havzada yer alan orojenik bir platodur. Bölgedeki tektonik yükselmenin etkisi geç Miyosenden beri devam etmekle birlikte, özellikle Kuaterner dönemin başından itibaren genişlemeli tektonik rejim etkisinde çeşitli morfolojik ve hidrolojik değişimler görülmektedir (örneğin; Koçyiğit, 1984; Melnick vd., 2017; Koçyiğit and Doğan, 2016). Bölgede egemen olan genişlemeli tektonik rejimin sonucu olarak çok sayıda çökme bölgesi oluşmuştur. Bu bölgelerin en önemlilerinden biri, Konya-Niğde grabenidir.

Bu çalışmanın konusu olan Karadağ startovolkanı Orta Anadolu Volkanik Bölgesi'nde Konya-Niğde grabeninde yer almaktadır. Karadağ, Anadolu levhacığı içerisinde yaklaşık olarak 2288 m yüksekliğinde bir volkanik yapıdır. Traziandezit ve andezit-dasit içerikli lavların ve tüf, volkan breşi gibi piroklastikleri oluşturduğu çok sayıda dom, volkan konisi ve kaldera gibi yapıları içermektedir. Volkanik örtünün toplam kalınlığı yaklaşık olarak 1.1 km'dir. Karadağ stratovolkanının oluşumu, kuzeye doğru Anadolu levhacığının altına dalan Afrika levhasının kopması ve bununla ilişkili olarak litosferik mantonun kısmi ergimesi ile birlikte eriyiklerin kabuk ölçeğindeki grabeni sınırlayan faylarca taşınması ile ilişkilendirilmiştir (Çoban vd 2019; 2020).

YÖNTEM

Manyetotellürik yöntemde yapay bir kaynaktan yayılan elektromanyetik (EM) dalgalar yerine, yerin doğal EM alanı kullanılmaktadır ve bununla ilişkili olarak yer içerisinde doğal olarak var olan EM dalgaların dalga boyları ve yeraltındaki kayaç gruplarının elektriksel iletkenlik özelliklerine de bağlı olarak araştırma derinliği diğer jeo-elektromanyetik yöntemlere göre çok daha derindir (Chave ve Jones 2012). Bu nedenle MT yöntemi çok geniş bir ölçekte çeşitli amaçlarla yaygın olarak kullanılmaktadır.

Geniş bant MT verisinin toplanması her bir ölçüm istasyonunda elektromanyetik alanın iki elektrik bileşeninin (E_x , E_y) ve üç manyetik bileşeninin (H_x , H_y , H_z) zamanın bir fonksiyonu olarak kaydedilmesi şeklindedir. Zaman ortamında ölçülen bu alan bileşenleri, farklı örnekleme aralıklarında kaydedilerek zaman serisi verileri elde edilmektedir. Her bir istasyonda, farklı örnekleme aralıklarındaki tüm alan bileşenleri zaman ortamında düzeltilmektedir. Daha sonra ise ölçülen veriler frekans ortamına Fourier dönüşümü ile taşınmaktadır. Frekans ortamında elektrik alan ve manyetik alan bileşenlerinin bir birlerine oranı ise frekansa bağlı karmaşık bir fonksiyon olan MT empedans tensörünü tanımlanmaktadır. Empedans tensörünün genlik ve faz bilgileri yine her bir bileşen ve farklı frekanslar için görünür özdirenç ve empedans faz bilgilerini vermektedir. MT verisine düz-ve ters-çözüm işlemlerinin uygulanması ile de frekans ortamı empedans verisi derinliğin bir fonksiyonu olan yer-elektrik modele dönüştürülmektedir. Bu çalışmada toplanan MT veri ModEM algoritması (Kelbert vd 2014; Egbert ve Kelbert 2012) kullanılarak üç-boyutlu olarak modellenmiş ve ilgili testler yapılmıştır.



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI

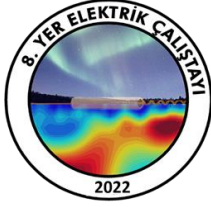


SONUÇLAR

Karadağ stratovolkanının üstünde ve eteklerinde 124 farklı noktada toplanan geniş-bant MT verisi kullanılarak geliştirilen üç-boyutlu elektriksel özdirenç modeli, stratovolkanın altında olası bir hidrotermal sisteme, bu sisteme ait bileşenlere ve sığ derinliklerde bulunan magmatik bir rezervuarın varlığına işaret etmektedir.

KAYNAKLAR

- Başokur AT, Meqbel N, Hacıoğlu Ö, Arslan H. İ. and Efeçinar T 2019, A hidden caldera revealed from magnetotelluric data in Cappadocia region of central Turkey: *10th Congress of the Balkan Geophysical Society*.
- Chave A, Jones A (Eds.) 2012, *The Magnetotelluric Method: Theory and Practice*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Chen C, Zhao D, Tian Y, Wu S, Hasegawa A, Lei, J, Park JH, Kang IB 2017, Mantle transition zone, stagnant slab and intraplate volcanism in Northeast Asia: *Geophysical Journal International*, **209**, 68-85.
- Cheng, Y, Pang Z, Di Q, Chen X, Kong Y 2021, Three-dimensional resistivity structure in the hydrothermal system beneath Ganzi Basin, eastern margin of Tibetan Plateau: *Geothermics* **93**, 102062.
- Comeau MJ, Becken M, Alexander VG, Käüfl JS, Kuvshinov AV 2022, The geophysical signature of a continental intraplate volcanic system: From surface to mantle source: *Earth, Planet. Science Letters*, **578**, 117307.
- Çoban H, Karsli O, Caran Ş, Yılmaz K 2019, What processes control the genesis of absorkite to shoshonite-banakite series in an intercontinental setting, as revealed by geochemical and Sr-Nd-Pb isotope data of Karadağ Stratovolcano in Central Anatolia, Turkey: *Lithos*, **324-325**, 609-625.
- Çoban H, Karsli O, Caran Ş, Yılmaz K 2020, Sediment-derived melt-related metasomatised mantle wedge as a source of post-subduction Quaternary adakitic porphyries associated with absarokiteshoshonite from the Karadağ stratovolcano (Karaman, Central Anatolia, Turkey): *Journal of Asian Earth Science*, **196**, 104380.
- Decker R, Decker B 2005, *Volcanoes*. WH Freeman & Co, New York.
- Egbert G, Kelbert A 2012, Computational recipes for electromagnetic inverse problems. *Geophysical Journal International*, 189, 251-267.
- Hacıoğlu Ö, Başokur AT, Tolak-Çiftçi E (2018), Crustal structure of a young collision zone: the Arabia–Eurasia collision in northeastern Turkey investigated by magnetotelluric data: *Earth, Planets and Space*, **70:161**,
- Hacıoğlu Ö, Başokur AT, Diner Ç, Meqbel N, Arslan Hİ, Oğuz K 2020, The effect of active extensional tectonics on the structural controls and heat transport mechanism in the Menderes Massif geothermal province: Inferred from three-dimensional electrical resistivity structure of the Kurşunlu geothermal field (Gediz Graben, western Anatolia): *Geothermics*, **85**, 101708.
- Hacıoğlu Ö, Başokur AT, Diner Ç 2021, Geothermal potential of the eastern end of the Gediz basin, western Anatolia, Turkey revealed by three-dimensional inversion of magnetotelluric data: *Geothermics*, **91**, 102040.
- Hill GJ, Bibby HM, Ogawa Y, Wallin ER, Bennie, SL, Caldwell TG, Keys H, Bertrand EA, Heise W 2015, Structure of the Tongariro Volcanic system: Insights from magnetotelluric imaging. *Earth Planetary Science Letters*, **432**, 115-125.
- Kelbert A, Meqbel N, Egbert GD 2014, ModEM: A modular system for inversion of electromagnetic geophysical data: *Computers and Geoscience*, **66**, 40-53.



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



- Koçyiğit A 1984, Güneybatı Türkiye ve yakın dolayında levha içi yeni tektonik gelişim. Türkiye Jeoloji Kurumu Bülteni, **27**, 1-16.
- Koçyiğit A, Doğan U 2016, Strike-slip neotectonic regime and related structures in the Cappadocia region: a case study in the Salanda basin, Central Anatolia, Turkey. *Turkish Journal of Earth Sciences*, **25**, 293-417.
- Li Y, Weng A, Xu W, Zou Z, Tang Y, Zhou Z, Li S, Zhang Y, Ventura G 2021, Translithospheric magma plumbing system of intraplate volcanoes as revealed by electrical resistivity imaging. *Geology*, **49**, 1337-1342.
- Matsushima N, Utsugi M, Takakura S, Yamasaki T, Hata M, Takeshi H, Uyeshima M 2020, Magmatic–hydrothermal system of Aso Volcano, Japan, inferred from electrical resistivity structures. *Earth, Planets and Space*, **72:57**.
- Melnick D, Yıldırım C, Hillemann C, Garcin Y, Çiner A, Perez-Gussinyé M, Strecker MR 2017, Slip along the Sultanhanı Fault in Central Anatolia from deformed Pleistocene shorelines of palaeo-lake Konya and implications for seismic hazards in low-strain regions: *Geophysical Journal International*, **209**, 1431–1454.
- Türkoğlu E, Unsworth M, Çağlar İ, Tuncer V, Avşar Ü 2008, Lithospheric structure of the Arabia–Eurasia collision zone in eastern Anatolia: magnetotelluric evidence for widespread weakening by fluids? *Geology*, **36**, 619–622.
- Unsworth M, Jones AG, Wei W, Marquis G, Gokarn S, Spratt JE, INDEPTH-MT team 2005, Crustal rheology of the Himalaya and southern Tibet inferred from magnetotelluric data. *Nature*, **438**, 78–81.
- Unsworth M 2010, Magnetotelluric studies of active continent–continent collisions. *Surveys in Geophysics*, **31**, 137–161.



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



S4	Sultandağı Fayının Derin Yapısının Manyetotellürik, Gravite, GNSS ve Tektonik Çalışmaları Araştırılması; İlk Sonuçlar
	Investigation of Deep Structure of Sultandağı Fault by Magnetotelluric, Gravity, GNSS, and Tectonic studies; First Results

Özcan ÖZYILDIRIM^{*,1}, İsmail DEMİRCİ², Çağlar ÖZKAYMAK^{3,4}, Özcan BEKTAŞ⁵, Can BAŞARAN^{1,3}, İbrahim TIRYAKIOĞLU^{4,6}, Doğukan Mert ÖZCAN⁷, Ahmet YILDIZ^{1,3}

¹Afyon Kocatepe Üniversitesi, Jeotermal ve Maden Kaynakları Uygulama ve Araştırma Merkezi, Afyonkarahisar

²Ankara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, Ankara

³Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Afyonkarahisar

⁴Afyon Kocatepe Üniversitesi, Deprem Uygulama ve Araştırma Merkezi, Afyonkarahisar

⁵Cumhuriyet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, Sivas

⁶Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Afyonkarahisar

⁷Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyonkarahisar

E-Posta: ozyildirim@aku.edu.tr

ÖZ

Afyon Akşehir Grabeni Anadolu'nun sismik olarak en aktif neotektonik yapılarından birisidir. Grabenin sismik olarak en aktif ana kenar fayı olan Sultandağı Fayı'na ait fay segmentlerinin yüzey geometrileri, jeomorfolojileri, kinematik ve aktif tektonik özellikleri hakkında daha önceden yapılmış bilimsel çalışmalar vardır. Ancak bu fayların kabuk ölçeğinde derinlikleri ve yeraltı geometrileri üzerine yapılan çalışmalar yok denecek kadar azdır. Son yıllarda Sultandağı Fayı üzerinde meydana gelen yıkıcı depremler, bu faya ait segmentlerin diri olduğunu, sismojenik zonun 15 kilometrelere kadar ulaştığını ve bu fayların kabuk ölçeğinde derinlerdeki geometrilerinin jeofizik, jeolojik ve jeodezik yöntemlerle detaylı bir şekilde araştırılması gerektiğini göstermektedir. Bu çalışma kapsamında, bölgedeki en önemli sismojenik kuşaklardan birisi olan Sultandağı Fayı üzerinde fay segmentlerinin aktif tektonik özelliklerini analiz etmek için yüzey Jeolojisi, segmentlerin güncel tektonik aktivitelerini izlemek için GNSS tabanlı Jeodezi, ve segmentlerin derin yapılarını yorumlamak amacıyla faya dik doğrultuda alınan profiller boyunca manyetotellürik veriler ölçülmüştür. Çalışmanın ilk aşamalarında elde edilen veriler, öncelikle geleneksel iki boyutlu modelleme ve ters çözüm algoritmalarıyla yorumlanarak bu çalışma kapsamında tartışılmıştır. Elde edilen ön bulgular, eğim atımlı normal fay karakterinde çalışan KB-GD uzanımlı ve kuzeydoğuya eğimli Sultandağı Fayı'nın Sultandağı ile Ilgın arasında KD-GB yönlü genişleme kuvvetleri altında şekillenmekte olduğunu, graben içerisinde Sultandağı Fayı'na yaklaşık paralel uzanan sentetik ve antitetik fay kollarının yer aldığı ve fayın ortalama 70° açı ile en az 10 km derinliğe sahip olduğuna işaret etmektedir.

Anahtar Kelimeler: Manyetotellürik, Modelleme, Ters Çözüm, Gravite, GNSS, Tektonik, Sultandağı Fayı



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



ABSTRACT

There are previous studies on the surface geometries, kinematic and paleo-seismological features of active faults in Sultandağı. However, studies on the deep geometries of these faults are scarce at a crustal-scale. The devastating earthquakes that have taken place in recent years show that the Sultandağı normal faults are seismically active, the seismogenic zone reaches up to 15 kilometers, and the deep geometries of these faults at a crustal scale should be investigated in detail with geophysical geological and geodetic methods. Within the scope of this study, magnetotelluric data were measured on the Sultandağı fault system, which is one of the most important seismogenic belts in the region. The data obtained in the first stages of the study will be discussed within the scope of this study, primarily by interpreting it with traditional two-dimensional modeling and inversion algorithms. It has been shown that the first models and findings obtained from Magnetotelluric, Gravity, Tectonics, and GNSS studies are compatible with previous studies and each other.

Keywords: Magnetotelluric, Modeling, Inversion, Gravity, GNSS, Tectonics, Sultandağı Fault

GİRİŞ

Sultandağı Fayı yaklaşık 90 km uzunluğunda eğim atımlı normal faydır. Batıda Çay ile doğuda Doğanhisar arasında çizgisel bir gidiş sunan morfolojik olarak belirgin sarpıklar boyunca takip edilebilir, dağ önü boyunca iyi gelişmiş alüvyal yelpazeler tipiktir (Koçyiğit vd 2000, Emre vd 2011, Tiryakioğlu vd 2015, Özkaymak vd 2017). Grabenin kuzeydoğusunda yer alan kuzey kenar fayları, en-eşelon dizilimlidirler ve batıdan doğuya doğru Bolvadin Fayı, Büyük Karabağ Fayı, Çukurcak Fayı, Yunak Fay Zonu, gibi KD-GB uzanımlı eğim atımlı normal faylar ile temsil edilirler (Emre vd 2011, Özkaymak vd 2017). Sismik açıdan oldukça hareketli olan Sultandağı Fayı üzerinde aletsel dönem içerisinde, 26 Eylül 11921 Argıthanı-Akşehir Depremi (M:5.9), 21 Şubat 1946 Ilgın-Argıthanı (M:5.7), 15 Aralık 2000 Sultandağı Depremi (Mw:6.0), ve son olarak 3 Şubat 2002 tarihinde Çay depremleri (Mw: 6.0 ve 6.3) meydana gelmiştir. Simav Fayı üzerinde belirlenen sağ yanal GPS kayma hızı 3.9 mm/ yıla iken Sultandağı Fayı üzerinde ölçülen GPS' dayalı açılma hızı değeri 3.4 mm/yıldır (Aktuğ vd 2013, Duman vd 2018).

Jeofizik yöntem destekli tektonik çalışmalar sınıflandırıldığında, genel olarak dünyada daha çok deprem üreten doğrultu atımlı faylar incelenmektedir (Stanley vd 1990, Ogawa vd 2001, Gürer vd 2004, Tank vd 2005, Türkoğlu vd 2008, Kaya vd 2013, Xiao vd 2015). Genellikle Türkiye'nin batısında da yer alan ve Horst graben yapılarına neden olan normal faylar ise daha çok jeotermal açıdan incelenmektedir (Erdoğan ve Candansayar 2017). Normal faylar, manyetotellürik gibi elektromanyetik yöntemlerle yapılan çalışmalarda, tektonik ve deprensellik açısından Kuzey Anadolu ve Doğu Anadolu Fay Sistemi gibi doğrultu-atımlı faylara nazaran daha nadir incelendiği görülmektedir. Fakat son yıllarda meydana gelen depremler Batı Anadolu bölgesinde yer alan normal fayların derin yapılarının jeofizik yöntemlerle detaylı bir şekilde araştırılması gerektiğini göstermektedir. Bu çalışmada literatürdeki bu eksikliği gidermek amacıyla yapılmıştır.

Çalışmada Sultandağı Fayı üzerinde alınan MT verileri ilk yazarın doktora tezinde geliştirdiği düzensiz ağ kullanan 2B MT algoritması ile ters çözüm yapılarak 2B öz direnç modelleri elde edilmiştir. Modeller, sahada yapılan tektonik çalışmalar ve gravite verileri ile karşılaştırmalı olarak yorumlanarak oluşturulmuştur. Ayrıca, bu çalışma kapsamında, bölgede yer alan fay segmentlerinin güncel kayma hızları, üzerindeki gerinim



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



miktarları ve yönleri GNSS tekniği kullanılarak ölçülmekte; proje kapsamında gerçekleştirilen Jeolojik ve Jeofizik çalışmalardan elde edilen bulgular ile karşılaştırılarak bölgenin jeodinamik yapısı değerlendirilmektedir.

YÖNTEM

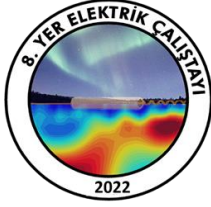
Sultandağı Fayı boyunca, Afyon K25, K26, L26 numaralı 1/100.000 'lik paftaları ile kesişen kısmının derin yapısının görüntülenebilmesi için belirlenen sahada (Şekil 1) tektonik ve GNSS çalışmalarının yanı sıra Manyetotellürik (MT) verilerin ölçülmesi planlanmıştır. Proje sahası, yaklaşık 30 x 80 km'lik bir alandan oluşmaktadır (yaklaşık 2400 km²). MT doğrultularının birbirine uzaklığı 3-3.5 km ve 24 adet doğrultudan oluşmaktadır (Şekil 1). Her doğrultuda, birbirine uzaklığı yaklaşık 2.5 km olan 10 MT noktası belirlenmiştir. Bu çalışma kapsamında Sultandağı Fayı'nı kapsayan alanlar ele alınmış ve veriler 2B olarak değerlendirilmiştir.

Tektonik çalışmalar genel olarak saha çalışmaları şeklinde yürütülmüştür. Çalışmada, Sultandağı fayının yüzey geometrileri, segmentasyon özellikleri, kinematik analizleri ile tavan/tabana blok jeolojisi üzerine veriler toplanmıştır. Bu sayede bölgenin kinematik özelliklerini ve gerilme rejimi geçişini belirlemek amacıyla kinematik analiz çalışmaları yapılmıştır. Bölgede yer alan fayların güncel tektonik hareketlerinin belirlenmesi için GNSS ölçüsü yapılması planlanmıştır. GNSS ölçüsü günümüzdeki fay hareketlerini belirlemek için kullanılan yaygın jeodezik ölçü yöntemlerinden bir tanesidir. Çalışma kapsamında elde edilecek hız alanlarından kaynak fay parametreleri elde edilmeye çalışılmıştır. Bu çalışmada diğer çalışmalardan farklı olarak MT çalışmalarından elde edilen fay derinlikleri ve eğimleri girdi olarak kullanılarak ana faylar üzerindeki kayma miktarları hesaplanmıştır.

Yer altında farklı derinlik, boyut ve yoğunluk dağılımına sahip jeolojik birim ve kayalar, yer yüzünde ölçülebilir gravite ivmesinde farklılıklar oluşturmaktadır. Bu verilerin ölçülmesi, düzeltilmesi, haritalanması, filtrelenmesi, modellenmesi ve ters çözümü gravite yönteminin işlem adımlarıdır. Bu yöntem özellikle yoğunluk farklarının olduğu, madenler, sedimanter havzalar, fay zonları ve gömülü jeolojik yapıların belirlenmesinde etkin bir yöntemdir. Yöntemde yüksek frekanslı yüzey yoğunluk farklarından sığ derinlikte sınırlar bulunabilirken, daha düşük frekanslı verilerden daha derin bilgilerin elde edildiği varsayımı yapılmaktadır. Gravite yöntemi eksik tanımlı olmasından kaynaklı literatürde ters çözümde ziyade modelleme işlemi yapılmakta, filtreleme çalışmaları ile derin ve yüzeysel tektonik hatların belirlenmektedir. Bu çalışma kapsamında saha ile ilgili gravite verileri MT çalışmalarına bir altlık oluşturmuştur.

SONUÇLAR

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen Jeolojik saha çalışmalarında Sultandağı fayının geometrisi, kinematik analizi ve aktif tektonik özellikleri gibi yüzey verileri toplanmıştır. Sultandağı ile Iğın arasında gerçekleştirilen çalışmalarda elde edilen ön bulgular, Sultandağı Fayı'na ait segmentlerin eğim atımlı normal fay karakterinde çalıştığına, KD-GB yönlü genişleme kuvvetleri altında şekillenmekte olduğuna, özellikle Sultandağı ile Akşehir arasında çizgisel gidişli dağ önü ile tipik olduğuna işaret etmektedir. KB-GD uzanımlı ve kuzeydoğuya eğimli fay düzlemlerinden ölçülen eğim açıları 65° ile 75° arasında değişmektedir. Bununla beraber Jeofizik çalışmalar kapsamında toplanan MT verileri Özyıldırım vd (2017) tarafından geliştirilen 2B ters çözüm algoritması ile değerlendirilerek özdirenç modelleri elde edilmiştir. İlgili doğrultular boyunca ölçülen gravite verileri için de ön



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



değerlendirmeler yapılarak fay zonları ve gömülü jeolojik birim ve yapılar için yoğunluk kesitleri elde edilmiştir. Elde edilen öz direnç modelleri, gravite modelleri, tektonik çalışmalar ışığında yorumlanmıştır. Elde edilen ön bulgular, Sultandağı Fayı'nın tavan bloğu içerisinde gömülü olan ana faya yaklaşık paralel uzanan sentetik ve antitetik fay kollarının varlığına ve fayın ortalama 70° açı ile en az 10 km derinliğe sahip olduğuna işaret etmektedir.

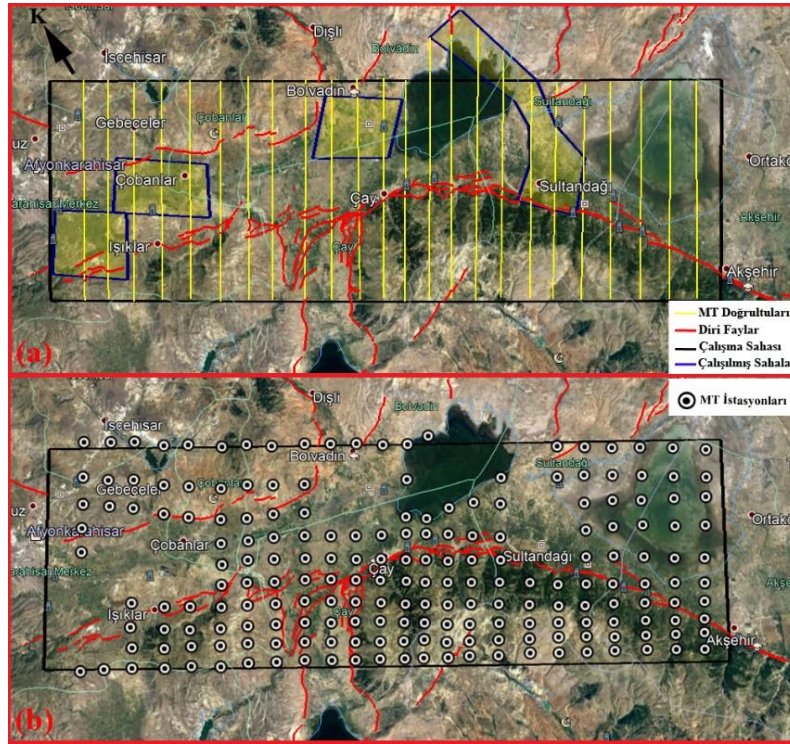
TEŞEKKÜR

Bu çalışma, 121Y021 numaralı TÜBİTAK ile 22.FEN.BİL.03 ve 22.FEN.BİL.06 numaralı Afyon Kocatepe Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) tarafından desteklenmektedir.

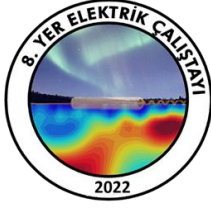
KAYNAKLAR

- Aktuğ B, Parmaksız E, Kurt M, Lenk O, Kılıçoğlu A, Gürdal MA and Özdemir S 2013, "Deformation of central anatolia: GPS implications: Journal of Geodynamics, 67, 78-96.
- Duman TY, Çan T, Emre Ö, Kadıroğlu FT and Başarır Baştürk N 2018, Seismotectonic database of Turkey: Bulletin of Earthquake Engineering 16 (8), 3277-3316.
- Emre Ö, Duman TY, Özalp S, Olgun Ş and Elmacı H 2011, 1:250.000 scale active fault map series of Turkey, Afyon (NJ 36-5) Quadrangle. Serial number: 16, General Directorate of Mineral Research and Exploration, Ankara, Turkey.
- Erdoğan E and Candansayar ME 2017, The conductivity structure of the Gediz Graben geothermal area extracted from 2D and 3D magnetotelluric inversion: Synthetic and field data applications: Geothermics, 65, 170-179.
- Gürer A, Bayrak M and Gürer ÖF 2004, Magnetotelluric images of the crust and mantle in the southwestern Taurides, Turkey: Tectonophysics, 391(1-4), 109-120.
- Kaya T, Kasaya T, Tank SB, Ogawa Y, Tunçer MK, Oshiman N and Matsushima M 2013, Electrical characterization of the North Anatolian Fault Zone underneath the Marmara Sea, Turkey by ocean bottom magnetotellurics: Geophysical Journal International, 193(2), 664-677.
- Koçyiğit A, Ünay E and Saraç G 2000, Episodic graben formation and extensional neotectonic regime in west Central Anatolia and the Isparta Angle: a case study in the Akşehir-Afyon Graben, Turkey: Geological Society of London Special Publication, 173, 405-421.
- Ogawa Y, Mishina M, Goto T, Satoh H, Oshiman N, Kasaya T and Matsushima M 2001, Magnetotelluric imaging of fluids in intraplate earthquake zones, NE Japan back arc: Geophysical research letters, 28(19), 3741-3744.
- Özyıldırım Ö, Candansayar ME, Demirci İ and Tezkan B 2017, Two-dimensional inversion of magnetotelluric/radiomagnetotelluric data by using unstructured mesh: Geophysics, 82(4), E197-E210.
- Özkaymak Ç, Sözbilir H, Tiryakioğlu İ and Baybura T 2017, Bolvadin'de (Afyon-Akşehir Grabeni, Afyon) Gözlenen Yüzey Deformasyonlarının Jeolojik, Jeomorfolojik ve Jeodezik Analizi: Türkiye Jeoloji Bülteni, 60(2), 169-189.
- Stanley WD, Labson VF, Nokleberg WJ, Csejtesy JB and Fisher MA 1990, The Denali fault system and Alaska Range of Alaska: Evidence for underplated Mesozoic flysch from magnetotelluric surveys: Geological Society of America Bulletin, 102(2), 160-173.
- Tank SB, Honkura Y, Ogawa Y, Matsushima M, Oshiman N, Tunçer MK and Işıkara AM 2005, Magnetotelluric imaging of the fault rupture area of the 1999 Izmit (Turkey) earthquake: Physics of the Earth and Planetary Interiors, 150(1-3), 213-225.

- Tiryakioğlu İ, Baybura T, Özkaymak Ç, Sözbilir H, Sandıkçioğlu A, Erdoğan S, Yılmaz İ, Uysal M, Yılmaz M, Yıldız A, Dereli MA, Yalçın M, Dumrupınar İM, Yalın H and Ertuğrul O 2015, Sultandağı Fayı Batı Kısmı Fay Aktivitelerinin Multidisipliner Çalışmalarla Belirlenmesi: Harita Teknolojileri Elektronik Dergisi, 7(1), 7-16.
- Türkoğlu E, Unsworth M, Çağlar İ, Tuncer V and Avşar Ü 2008, Lithospheric structure of the Arabia-Eurasia collision zone in eastern Anatolia: Magnetotelluric evidence for widespread weakening by fluids?: Geology, 36(8), 619-622.
- Xiao Q, Shao G, Liu-Zeng J, Oskin ME, Zhang J, Zhao G and Wang J 2015, Eastern termination of the Altyn Tagh Fault, western China: Constraints from a magnetotelluric survey: Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 120(5), 2838-2858.



Şekil 1 a) Google Earth uydu görüntüsü üzerinde çalışma sahasının yeri, bölgede tanımlanmış olan diri faylar (Emre vd., 2011) ve **b)** MT istasyon konumları



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



S5	İç Sularda Yürütülen Bütünleşik Jeofizik Çalışmalar: Mogan Gölü (Ankara) Örneği
	Integrated Geophysical Studies Carried out in Inland Waters: Mogan Lake (Ankara) Example

*İrfan AKCA¹, Sinan AKISKA², Şebnem ARSLAN², Elif AKISKA², Devrim TEZCAN³

¹ Ankara Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Jeofizik Mühendisliği Bölümü Gölbaşı Ankara

² Ankara Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü Gölbaşı Ankara

³ ODTU Deniz Bilimleri Enstitüsü, Erdemli Mersin

E-posta: iakca@eng.ankara.edu.tr

ÖZ

Jeofizik çalışmalar çok çeşitli alanlardaki problemlerin çözümüne yönelik olarak çok farklı koşul ve ortamlarda kullanılabilir. Deniz ve iç sularda taban tortullarının araştırılması, gömülü doğal ya da insan yapımı hedeflerin aranması, tatlı tuzlu su girişimleri, mühendislik çalışmaları gibi konulara yönelik olarak jeofizik araştırmalar yürütülmektedir. Bu çalışmada, jeofizik yöntemlerden doğru akım özdirenç, yer radarı; jeolojik çalışmalardan jeokimya, su kimyası, kirlilik ölçümleri ve destekleyici olarak sonar taramaları gibi uygulamalar içeren bütünleşik bir araştırmanın ilk sonuçları sunulmaktadır. Tüm uygulamalar TÜBİTAK destekli bir proje çerçevesinde yapılırken çalışmada kullanılan doğru akım özdirenç ölçüm sistemi de aynı proje kapsamında geliştirilmiştir. Uygulama Ankara ili Gölbaşı ilçesi sınırları içerisinde yer alan Mogan Gölü'nde yürütülmektedir. Bütünleşik uygulama yaklaşımı ile gölün taban batimetresi, suyun kimyasal özellikleri, taban çamurunun özellikleri, tabanın altında yaklaşık 5m kalınlığındaki istifin durumu gibi bilgiler edinilmiştir. Çalışmaların devamında gölün tamamının üç boyutlu elektrik özdirenç modeli ortaya konulacaktır.

Anahtar Kelimeler: Su ortamı özdirenç, İç Sularda Jeofizik, Jeokimya, Mogan

ABSTRACT

Geophysical studies can be used in very different conditions and environments to solve problems in a wide variety of fields. Geophysical researches are carried out on subjects such as the investigation of bottom sediments, the search for buried natural or man-made targets, fresh salt water initiatives, engineering studies in sea and inland waters. In this study the preliminary results of an integrated survey involving geophysical surveys of direct current resistivity and ground penetrating radar; geological studies such as geochemistry, water chemistry, pollution measurements and sonar scanning as a supplementary method are presented. While all applications were carried out within the framework of a TÜBİTAK supported project, the direct current resistivity measurement system used in the study was also developed within the scope of the same project. The application is carried out in Mogan Lake, which is located within the borders of Gölbaşı district of Ankara province. With the integrated application approach, information such as the bottom bathymeter of the lake, the



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



chemical properties of the water, the characteristics of the bottom mud, and the status of the 5m-thick stratigraphy under the floor were obtained. In the continuation of the studies, the three-dimensional electrical resistivity model of the entire lake will be presented. The abstract should be written here as mentioned above.

Keywords: Marine Resistivity, Geophysics in Inland Waters, Geochemistry, Mogan

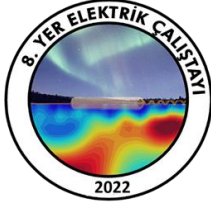
GİRİŞ

Doğru akım özdirenç yöntemi karada yürütülen ölçümler ile çok farklı alanlardaki problemlere çözüm bulmak için kullanılmaktadır. Son dönemde artan sayılarla deniz ve iç sularda da uygulanmaktadır. Bu alandaki ilk uygulama 1930'lu yılların ortalarında görülmektedir (Schlumberger et al., 1934). Deniz ve iç sular ile su tabanı altındaki birçok probleme çözüm üretme potansiyeli bulunan yöntem suda da karadaki uygulamasına benzer şekilde yürütülebilmektedir. Ölçüm sisteminin su yüzeyinde ya da su tabanında yer alması nedeni ile cihaz ve donanımlarda su ortamında çalışabilir olacak şekilde bir dizi uyarılama yapılması gerekmektedir (Corwin et al. 1985; Loke et al. 2013). Tatlı ve tuzlu su ortamlarında uygulama ve donanımlar açısından da farklılıklar görülmektedir. Özellikle tuzlu suda kablo ve akım elektrotlarının korozyona uğrama riskini ortadan kaldırmaya yönelik olarak grafit veya titanyum elektrotların kullanılması bunlara örnek olarak verilebilir (AGI, U.S. Patent 6,674,286). Bunun dışında elektrotların su yüzeyinde yüzdürülmesi ve/veya su tabanında tutulması için gerekli düzenlemelerin de yapılması gerekmektedir. Karada karşılaşılan yer-elektrot kontağı problemleri, bağlantı zayıflıkları su ortamında daha az etkindir. Suda yapılan çalışmalarda konum değiştirme teknenin ileri yönlü hareketi ile sağlandığından teknenin hızına bağlı olarak sürekli bir tarama yapılabilen elektrot çakıp sökme ve yer değiştirme işlemlerine gerek bulunmamaktadır. Sistemde kullanılan elektrot sayısı sınırlı tutularak görünür özdirenç ölçümleri sürekli ölçüm modu ile (CRP: Continuous Resistivity Profiling) teknenin ileri yönlü hareketine bağlı olarak gerçekleştirilmektedir (ör: Dunbar et al., 2008; Okyar et al., 2013).

Bu çalışmada bir iç su ortamı olarak Ankara Mogan Gölü'nde yürütülen bütünleşik jeofizik ve jeolojik çalışmaların ilk sonuçları sunulmuştur. Çalışmada jeofizik yöntemlerden doğru akım özdirenç ve yer radarı uygulanmış, bu çalışmalar sonar ölçümleri ile desteklenmiştir. Çalışmada kullanılan doğru akım özdirenç sistemi TÜBİTAK tarafından desteklenen bir proje kapsamında proje araştırmacılarınca geliştirilmiştir. Ayrıca göl suyu ve sedimanları üzerinde kimyasal incelemeler ve petrografik araştırmalar da yapılmıştır. Bu çalışmaların amacı göldeki kirlilik düzeyinin ve dipte biriken çamurun özelliklerinin ortaya konulmasıdır. Çalışmada elde edilen bulgular ile proje kapsamında üretilen doğru akım özdirenç sisteminin istenildiği gibi çalıştığı, yer radarı yönteminin su iletkenliğinin beklenenden yüksek olması nedeni ile yanıt vermediği, su analizlerden göl suyu ve çamurunda kirliliğine dair belirtiler bulunduğu sonuçları ortaya konulmuştur.

ÖLÇÜMLER

Mogan Gölü'nde yürütülen çalışmalar başlıca doğru akım özdirenç, yer radarı ve sonar ölçümleri ile göl suyu ve sedimanlarının analizini kapsamaktadır. Burada kullanılan doğru akım özdirenç sisteminin teknik tasarımı, üretimi ve işletme yazılımı da çalışmaların



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



desteklendiği proje kapsamında araştırmacılar tarafından gerçekleştirilmiştir. Doğru akım özdirenç ölçümleri 9 gerilim elektrotu ile bir çift akım elektrotundan oluşan bir ölçüm düzeneği ile dipol-dipol dizilimi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu düzenek su yüzeyinden yüzdürülerek ölçümler yapılmıştır. Akım dipolünün uzunluğu 10m, gerilim elektrotlarının arası ise 5m olarak belirlenmiştir. İlerleme hızına bağlı olarak yatay yöndeki ölçüm aralığı 2.5m olarak gerçekleştirilmiştir. Ölçüm düzeneğinin su yüzeyindeki görünümü ile elde edilen veriler Şekil 1'de verilmiştir. Örnek olması açısından verilen 200m uzunluğundaki bir profile ait veriler değerlendirilmiş ve ters çözüm sonucu da Şekil 1d'de sunulmuştur. Göl suyunun elektrik iletkenliği su numuneleri üzerinde yapılan EC ölçümlerinde ortalama $3700\mu\text{S}/\text{cm}$ olarak belirlenmiştir (özdirenç 2.70 ohm.m). Bu iletkenlik değeri tatlı su için oldukça yüksek bir değerdir. DAÖ yöntemi ile elde edilen su özdirenci ise 4-5 ohm.m dolayındadır ($2250\mu\text{S}/\text{cm}$).

Mogan gölünde 50,200 ve 500MHz frekanslarında çalışan antenler ile radar ölçümleri de gerçekleştirilmiştir. Ancak göl suyunun iletkenliğinin yüksek olması nedeni ile gerekli EM dalga penetrasyonu sağlanamamış ve sonuç alınamamıştır. Projede DAÖ ve GPR yöntemlerinin veri işlem aşamasında destek sağlaması ve göl tabanının derinlik haritasının elde edilmesi ve yanında taban morfolojisinin belirlenmesi amacı ile yandan taramalı sonar ölçümleri de yapılmıştır. SONAR ölçüm sonuçları ve örnek bir radargram sırasıyla Şekil 2 ve Şekil 3'de verilmiştir.

SONUÇLAR

Ankara ili Gölbaşı ilçesi sınırları içerisinde yer alan bir iç su olan Mogan Gölü'nde jeofizik yöntemlerden doğru akım özdirenç ve yer radarı ve destekleyici olarak SONAR ölçümleri yapılmıştır. Ölçümlerde kullanılan 8 kanallı ve 5A çıkış gücündeki ölçüm sistemi proje çalışanlarınca geliştirilmiştir. Sürekli ölçüm modu ile yüzen ve yarı batmış elektrotlar ile doğru akım özdirenç ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Ölçümlerde göl suyu, taban altı çamur tabakası ve bunların altında yer alan görece daha sağlam bir birim ayırt edilmiştir. Göl suyu tatlı su için beklenen değerlere göre daha iletkenidir. Bu nedenle radar ölçümlerinden istenilen sonuçlar elde edilememiştir. Yardımcı bir yöntem olan SONAR ile göl batimetrisi elde edilmiştir. Buna göre gölün en derin noktası 4.5m dolayında olup ortalama 3m derinlik gözlenmiştir. Geliştirilen ölçüm sistemi 2A akım çıkışı ile sürekli modda ölçümü sorunsuz şekilde tamamlamıştır. Dipol-dipol diziliminin doğası gereği 7 ve 8. Seviye ölçümleri nispeten gürültülüdür. Ancak ölçümlerin çoğunda bu seviyelerden de değerlendirmeye uygun kalitede veri elde edilebilmiştir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma 119Y547 numaralı TUBITAK projesi ile desteklenmiştir. Projede bursiyer olarak yer alan Murat Şerif Gölebatmaz, Bengisu Akdeniz ve Seçkin Sertaç Lallı'ya çalışmalarına katkıları nedeni ile teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

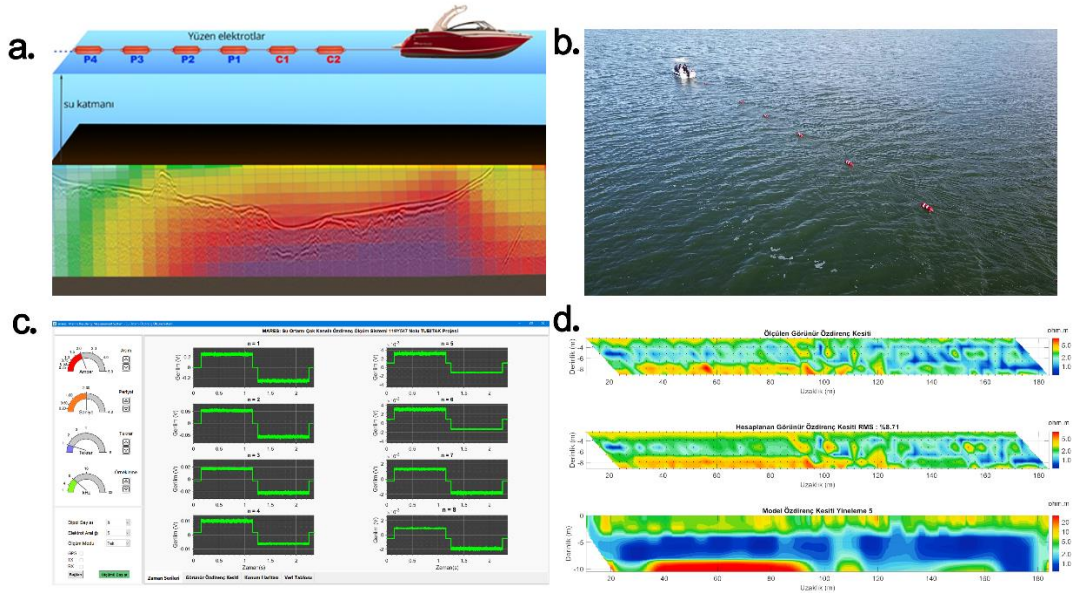
- Corwin, R.F., Turnross, J.L., Harding Jr., R.S., 1985. Offshore applications of the directcurrent resistivity method. SEG Expanded Abstracts 4 (1), 230–231.
- Dunbar, J.A., Amidu, S.A., Allen, P.M. 2008. A study of seasonal salinity variation in Lake Whitney, Texas using continuous resistivity profiling. EEGS - 21st Symposium on

the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems, 2, 1048-1058.

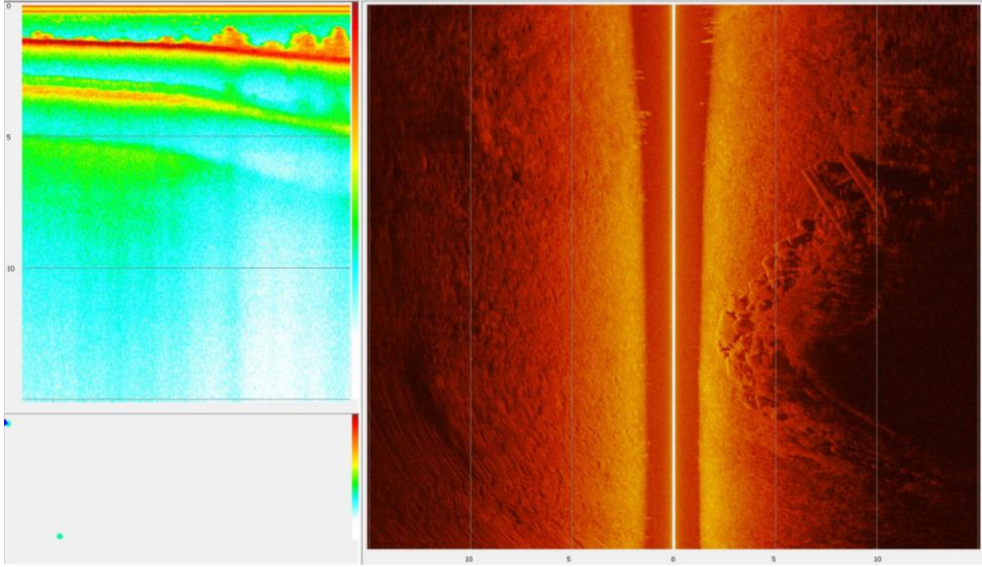
Loke, M.H., Chambers, J.E., Rucker, D.F., Kuras, O., Wilkinson, P.B.. 2013. Recent developments in the direct-current geoelectrical imaging method, Journal of Applied Geophysics, 95, 135-156.

Okyar, M., Yılmaz, S., Tezcan, D., Çavaş, H. 2013. Continuous resistivity profiling survey in Mersin Harbour, Northeastern Mediterranean Sea. Marine Geophysical Research, 34 (2), 127-136.

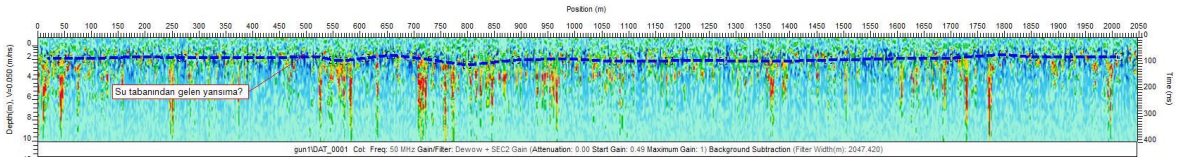
Schlumberger, C., Schlumberger, M., Leonardon, E.G., 1934. Electrical exploration of water-covered areas. Transactions of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers 110, 122–134.



Şekil 1 Doğru akım öz direnç ölçümlerinde kullanılan ölçüm sisteminin su üzerindeki konumu (a ve b), veri ölçümünde kullanılan arayüz (c) ve yaklaşık 200m uzunluğunda bir profile ait veriler ile elde edilen yer elektrik modeli.



Şekil 2 Mogan Gölünde yürütülen SONAR ölçümlerine ait görüntüler



Şekil 3 Mogan Gölü'nde 50MHz anten ile yürütülen yer radarı ölçümlerinden elde edilen işlenmiş radargram



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



S6	Yer-Elektrik Haritalarında Görüntü İşleme Temelli Gürültü Giderme
	Image Processing based Denoising on Electrical Resistivity Maps

Şerif Murat GÖLEBATMAZ^{*1}, İrfan AKCA²

Ankara Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, 50. Yıl Yerleşkesi Gölbaşı, Ankara

smgolebatmaz@ankara.edu.tr

**Sunumu yapacak yazar*

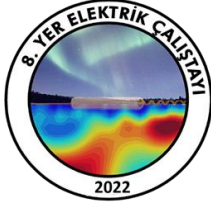
ÖZ

Elektrik Yöntemler ile yer içindeki doğal yollarla oluşan sinyaller kaydedilir veya yapay olarak üretilmiş sinyallere yer kürenin tepkisi ölçülür. Ölçülen veriler ters çözüm işleminden geçirilerek değerlendirilir ve yer içinin öz direnç parametresine bağlı bir görüntüsü elde edilir. Yöntemin ve sayısal işlemlerin doğası gereği elde edilen sonuçlarda asıl belirtiyi örten gürültüler görülebilir. Jeofizik haritaları daha anlaşılır ve kolay yorumlanabilir hale getirmek amacıyla görüntü işleme temelli gürültü giderme işlemlerinden faydalanmak mümkündür. Gürültü giderme işlemleri uzamsal ortamda ve dönüşüm uzayında yapılan işlemler olarak ikiye sınıfa ayrılabilir. Her iki sınıfta da doğrusal ve doğrusal olmayan araçlar bulunmaktadır. Bu çalışmada uzamsal ortamda Gaussian, ortalama, orta değer, disk ve yerel olmayan ortalama süzgeci doğrudan parametre değerlerine olmak üzere öz direnç haritasına uygulanmıştır. Dönüşüm uzayı ortamında ise öz direnç haritası, piksel değerleri 0-255 arasında değişen görüntüye dönüştürülüp ayrık Fourier dönüşümü alınarak alçak ve yüksek geçişli süzgeç uygulaması yapılmıştır. Uygulamaların sonucunda uzamsal ortamdaki doğrusal süzgeçlerin Fourier ortamında alçak geçişli süzgeçlere karşılık geldiği gösterilmiş ve gürültü giderme yapılırken görüntüdeki yapıların korunması konusundaki en başarılı süzgecin uzamsal ortamda yerel olmayan ortalama süzgeci olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Elektrik Yöntemler, Görüntü İşleme, Gürültü giderme, Yerel Olmayan Ortalama

ABSTRACT

With electrical methods signals naturally generated in earth are recorded or the earth's response to the artificially produced signals is measured. The measured data is evaluated by the inversion process and the image of the interior ground depending on the resistivity parameter is obtained. Due to the nature of the method and the numerical operations, noises can be cover anomalies. In order to make geophysical maps more understandable and easy to interpret, it is possible to use image processing tools for noise removing. Noise removal operations can be divided into two classes as spatial and transform space operations. There are linear and non-linear tools in both classes. In this study, Gaussian, mean, median, disk and non-local means filter were applied to the resistivity map in the spatial domain. In the transform space domain, firstly the resistivity map is transformed into an image whose pixel values vary between 0-255, secondly discrete fourier transform applied to carry out low-pass and high pass filters in the frequency domain. As a result of the



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



applications, it has been shown that the linear filters in the spatial domain correspond to the low-pass filters in the Fourier domain, and it has been concluded that the most successful filter in protecting the structures in the image while removing the noise is the nonlocal mean filter in the spatial domain.

Keywords: Electrical Methods, Image Processing, Noise Removal, Non-Local Means

GİRİŞ

Elektrik yöntemlerin uygulanması ile elde edilen verilerin ters çözümü ile yer içinin öz direnç parametresi elde edilir. Paralel hatlar boyunca toplanmış sondaj-profil verileri ters çözümde kullanılırsa belirli bir derinlik seviyesi için öz direnç seviye haritaları elde edilebilir. Ölçülen veriyi üretecek tek bir yealtı modeli olmadığı için verinin değerlendirilmesi sırasında kullanıcı yorumuna da ihtiyaç duyulur. Önemli kararlar alınan bu noktada jeofizik model veya görselin istenmeyen etkilerden arındırılmış olması yorumcunun işini kolaylaştıracaktır.

Doğru akım öz direnç (DAÖ) özellikle sığ araştırmalar için çok kullanılan jeofizik yöntemlerden birisidir (örn. Overmeeran and Ritsema 1988, Dahlin 1996, Candansayar ve Başokur 2001, Akca vd. 2019). DAÖ yönteminin uygulanması tipik olarak iki akım elektrotundan akım verilmesi ve iki gerilim elektrotundan oluşan gerilim farkı değerlerinin okunması esasına dayanır. Öz direnç haritaları, belirtilerin aranan nesnelere karşılık geldiği iki görüntüler olarak ele alınabilirler. Bu görüntülerin istenmeyen etkilerden arındırılması ve belirtileri ortaya çıkaran süzgeçlerin uygulanması görüntünün iyileştirilmesine karşılık gelir. Görüntü işleme tekniklerinin jeofizik verilerine uygulanması ile ilgili literatürde bazı çalışmalar mevcuttur. Morozov ve Smithson (1996) histogram dengeleme tekniğini sismik sinyallere uygulamıştır. Bergeron ve Yuen (2000) dalgacık dönüşümü ile üç boyutlu sismik verilerde baca tipi yapıların ayrıştırılabilmesini sağlamıştır. Başka bir örnek ise Al-Nuaimy ve diğ. (2000) ile Carter ve Lines (2001) tarafından görüntü işleme algoritmaları ile sismik ve elektrik verilerinde fay yapılarının otomatik olarak belirlenmesinin sağlanmasıdır. Gürültü giderme işlemi görüntü işlemenin en temel uygulamalarından olsa da kendi içerisinde birçok zorluk barındırmaktadır. Gürültünün gerçek sinyalden ayrılması sırasında istenmeyen yapılar oluşabilir ya da görüntü bulanıklaşabilir. Bu sorunların üzerinden gelebilmek adına görüntü giderme üzerinde hala üzerinde çalışılan bir konudur.

Bu çalışmada Side antik kentinde gerçekleştirilmiş arkeojeofizik çalışmalarından elde edilen haritalara görüntü işleme gürültü giderme teknikleri uygulanarak iyileştirilmeye çalışılmıştır.

YÖNTEM

Görüntüler sayısal ortamda iki boyutlu dizeler olarak kaydedilirler. Piksel, en küçük görüntü birimi olup, görüntüyü oluşturan dizelerin tek bir elemanı ile temsil edilir. Bu elemanın dize içindeki konumu koordinat bilgisine, elemanın skaler büyüklüğü ise "yeğinlik" (*intensity*) değerine karşılık gelmektedir. Bu çalışmada farklı görüntü giderme yöntemleri elektrik öz direnç haritalarına uygulanmıştır. Kullanılan harita Side (Akca vd., 2019) antik kentinde yürütülen elektrik öz direnç çalışmasının sonuçlarından elde edilmiştir. Jeofizik harita yaklaşık 90m × 60m boyutlarında bir alanı kaplamaktadır. Harita 50 cm derinliğe ait öz direnç dağılımını göstermektedir.



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



Genel çerçevede bir görüntü matematiksel olarak:

$$v(p) = u(p) + n(p) \quad (1)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada $v(p)$ gözlenen görüntü, $u(p)$ orijinal görüntü ve $n(p)$ gürültüyü göstermektedir. Gürültü giderme işlemleri ile $n(p)$ görüntüden uzaklaştırılmaya çalışılırken $u(p)$ olanaklı olduğu ölçüde korunmak istenir.

Gürültü giderme yöntemleri için iki temel yaklaşımdan söz edilebilir; bunlar, uzamsal ortamda gerçekleştirilen süzgeçleme işlemleri ve dönüşüm uzayında gerçekleştirilen süzgeçleme işlemleridir. Her iki durumda da süzgeçleme işlemi doğrusal ya da doğrusal olmayan işlemler olabilir. Bildiride sunulacak yöntemler arasında uzamsal ortamda Gaussian, ortalama ve disk süzgeçleri doğrusal süzgeçler arasında sayılırken yine uzamsal ortamda doğrusal olmayan orta-değer süzgeci ve yerel olmayan ortalama süzgecinden söz edilmiştir. Dönüşüm uzayı işlemlerine örnek olarak ise Fourier ortamında doğrusal süzgeçleme örneği verilmiştir.

Uzamsal İşlemler

Uzamsal ortamdaki doğrusal süzgeçler doğrusal ya da doğrusal olmayan biçimde olabilir. Doğrusal süzgeçlerin özelliği, her çıkış pikseli, giriş pikselinin komşuluklarının doğrusal kombinyasyonları ile hesaplanır. Bu tür bir süzgeç evrişim işlemi ile gerçekleştirilebilir. Uzamsal ortamda doğrusal süzgeçlere örnek olarak Gaussian süzgeci, ortalama süzgeci ve disk süzgeç verilebilir. Belirli bir amaç için tasarlanmış evrişim çekirdeği h ve sayısal görüntü f ile gösterilmek üzere, süzgeçlenmiş görüntü g ,

$$g(n_1, n_2) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} \sum_{j=-\infty}^{\infty} h(i, j) f(n_1 - i, n_2 - j) \quad (2)$$

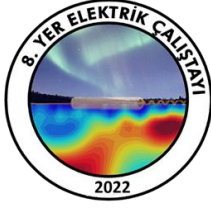
bağıntısı ile bulunur. Görüntülerdeki gürültüleri gidermek için tasarlanmış süzgeçler, elektrik özdirenç haritalarında kullanılırken doğrudan parametre değerleri üzerinde veya parametreler kullanılarak oluşturulan görüntüler üzerinde uygulanabilir.

Uzamsal ortamda tasarlanabilecek en basit doğrusal süzgeç ortalama süzgecidir. Bu süzgecin temel amacı her piksel komşuluğundaki piksellerin ortalamasının alınarak aralarındaki farkın en aza indirilmesidir. Ortalama süzgecin evrişim çekirdeği,

$$h = \begin{bmatrix} 1/9 & 1/9 & 1/9 \\ 1/9 & 1/9 & 1/9 \\ 1/9 & 1/9 & 1/9 \end{bmatrix}$$

ile verilir.

Gaussian süzgeç belki de en bilinen gürültü giderme süzgeci olup görüntüyü bulanıklaştırma etkisi vardır. Gaussian süzgecin evrişim çekirdeği tahmin edilebileceği üzere Gaussian fonksiyon ile hesaplanır. Örnek olması açısından 3×3 boyutlarında standart sapması σ olan Gaussian süzgecin çekirdeği



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



$$h = \begin{bmatrix} 0.0113 & 0.0838 & 0.0113 \\ 0.0838 & 0.6193 & 0.0838 \\ 0.0113 & 0.0838 & 0.0113 \end{bmatrix}$$

şeklinde verilir.

Bir başka yaygın kullanılan süzgeç ise disk süzgeçidir. Aslında disk süzgeci Gaussian süzgeçle benzer şekilde çalışır, sadece Gaussian süzgecin çan benzeri şekline karşılık disk süzgeç daire ya da elips şekline sahiptir.

Şimdiye kadar sözü edilen üç süzgecin özdirenç haritasına etkisi şekil 1'de görülebilir. Bütün süzgeçler doğrudan parametre değerlerine uygulanmış ve hepsi için 3×3 'lük pencere genişliği kullanılmıştır. Gaussian süzgeç için kullanılan standart sapma değeri 0.6 olarak atanmıştır. Bütün süzgeçler gürültü azaltma etkisi göstermekle birlikte yapı sınırlarının bulanıklaşmasına neden olmuşlardır. Şekil 1'deki sonuçlar incelenirse ortalama süzgecin diğerlerine göre daha fazla bulanıklaştırma etkisi gösterdiği görülebilir. Disk süzgeci ise yüksek frekanslı gürültüleri bastırmada etkili olurken yapı sınırlarını da kısmen korumuştur. Son olarak Gaussian süzgeç ile arka plan iyi ölçüde gürültüden arındırılmış ve neredeyse tüm yapıların sınırlarının da iyi ölçüde korunmuştur. Gaussian süzgecin bu uygulama için aralarında en iyi sonucu verdiğini söyleyebiliriz.

Görüntüyü oluşturan piksel değerleriyle (veya jeofizik haritayı oluşturan parametre değerleriyle) bir süzgeç çekirdeğinin uzamsal ortamda evrişime sokulması veya frekans ortamında çarpılmasıyla doğrusal süzgeçleme işlemi gerçekleştirilir. Lineer olmayan, ancak yeni üretilen piksel değerinin yine giriş pikselinin komşu komşuluklarıyla ilişkili olarak hesaplanacağı bir süzgeç türü medyan (orta değer) süzgeçtir. Orta değer süzgeci, görüntüden yüksek frekanslı bileşenleri ayırırken, daha önce sözü edilen süzgeçlere kıyasla yapı kenarlarını muhafaza etmek konusunda daha başarılıdır.

Orta değer süzgeci de dahil olmak üzere buraya kadar sözü edilen süzgeçlerin hepsi yerel süzgeçler olarak da anılır. Yerel işlemler için yapı sınırlarıyla gürültü arasında bir fark olmayışı bulanıklaşma etkisine neden olmaktadır. Yapı sınırlarının korunmasının öncelik olduğu gürültü giderme işlemleri için Baudes (2005) tarafından ortaya atılmış yerel olmayan ortalamalar algoritması iyi bir seçenek olabilir. Doğrusal olmayan süzgeçler sınıfına giren bu algoritmayı işleyişi özet olarak aşağıdaki adımlardan oluşur.

- 1- Görüntü, her birinin merkezinde bir piksel bulunan ve boyutları kullanıcı tarafından belirlenen parçalara (patches) bölünür.
- 2- Her parça, yine kullanıcı tarafından bir alanın sınırları içerisinde kalan diğer parçalarla olan benzerlikleri ölçülerek karşılaştırılır ve benzerliklere göre ağırlık dizeyi oluşturulur. Birbirine benzer parçalardan gelen ağırlıklar diğerlerinden daha büyük olacaktır.
- 3- Ağırlık dizeyine göre yeni piksel değerleri hesaplanır.

Orta değer ve NLM süzgecinin özdirenç haritası üzerindeki etkisini görmek için şekil 2 incelenebilir. Orta değer süzgeci yapı sınırlarını korumak konusunda kesin olarak ortalama süzgeçten daha başarılı olsa da hala görüntüde belirgin ölçüde bulanıklaşma meydana gelmiştir. NLM süzgeçte ise başlangıçtan çok daha temiz bir görüntüye ulaşılmış olmakla



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



birlikte yapı sınırlarının önceki bütün süzgeçlerden daha iyi korunduğu söylenebilir. Bunun sebebi NLM süzgeci ile her piksel değerinin, bütün piksellerden gelen ağırlıklarla yeniden hesaplanmasıdır. Ağırlıklar piksellerin yerel komşulukları arasındaki benzerliğe göre belirlenir. (Sarker vd., 2012). Böylece gürültü giderme işlemi sırasında yapısal sınırlar korunmuş olur.

Dönüşüm Uzayı İşlemleri

Dönüşüm Uzayı İşlemleri, giriş görüntüsünün matematiksel bir dönüşüm fonksiyonu yardımıyla farklı bir sayısal uzaya taşınarak işlem yapılmasını içerir. Burada bu işlemler arasından sadece Fourier bölgesinde gürültü giderme işlemi ele alınacaktır. Giriş görüntüsü uzamsal ortamı temsil ederken Fourier dönüşümü ile frekans ortamına geçilir. Fourier ortamında görüntü sinüzoidal bileşenler ayrıldığı için, görüntüyü belirli frekanslar için işlemek ya da analiz etmek kolaylaşır.

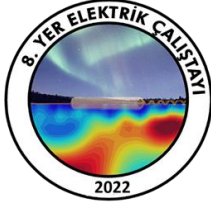
$N \times N$ boyutunda bir kare görüntüyle uğraşıldığı düşünülürse bu görüntü için ayrık Fourier dönüşümü

$$F(k,l) = \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} f(i,j) \exp\left(-i2\pi\left(\frac{ki}{N} + \frac{lj}{N}\right)\right) \quad (3)$$

ile verilir.

Burada $f(i,j)$ uzamsal ortamdaki görüntüye karşılık gelirken üstel bileşen ise Fourier uzayında $F(k,l)$ noktalarına karşılık gelen temel fonksiyondur. Yani her bir $F(k,l)$ değeri uzamsal görüntünün o noktaya karşılık gelen fonksiyon ile çarpılması ve bu sonuçların toplanması ile elde edilir.

Bir görüntünün Fourier dönüşümü alındığında karmaşık değerli bir çıkış görüntüsü elde edilir. Çıkış görüntüsünün gerçel ve sanal kısımlarından genlik ve faz bileşenleri oluşturulur. Şekil 3a'da ilk sütunda daha önceki örneklerde de kullanılan öz direnç haritasının 8 bitlik görüntüye dönüştürülmüş hali görülmektedir. Öncelikle görüntünün ayrık Fourier dönüşümü alınıp daha sonra genlik bileşeni, DC bileşen (görüntü ortalaması, sıfır frekanslı bileşen) şeklin merkezine gelecek şekilde kaydırıldıktan sonra görsellik açısından 0-7000 genlik değerleri arasına ölçeklendirilmiş ve çizdirilmiştir. DC bileşen zamanın tüm anları boyunca değişmeyen sinyaldir, 1B durum için bu doğrusal bir sinyale karşılık gelir. 2B sinyaller yani görüntüler içinse DC bileşen pikseller arası değişimin olmadığı sıfır frekansa karşılık gelir. Genlik bileşenindeki piksellerin parlaklığı o piksele karşılık gelen frekans değerinin genliği ile ilişkilidir. Fourier dönüşümü sonrasında genlik bileşeninin ortasındaki parlaklık ne kadar fazla ise görüntünün arka planı o kadar güçlü demektir. Sıfır fazlı bileşen merkezde en parlak değeri alırken merkezden uzaklaştıkça frekans değerleri büyür ve buna karşılık genlik azalır. Bu düşük frekanslı bileşenlerin görüntü ile ilgili daha fazla bilgi içerdiği anlamına gelir. Yüksek frekanslar ise görüntüdeki ince detaylara bir başka deyişle ani değişimlerin olduğu sınır bölgelerine karşılık gelir. Şekil 3b'de görüntünün genlik bileşenine alçak geçişli bir süzgeç uygulanmıştır. Süzgecin şekli merkezi genlik bileşeni görüntüsünün merkezine karşılık gelen ve genlik bileşeni elemanlarının %20'sini kapsayacak yarıçapta bir çember olarak seçilmiş ve çemberin içinde kalan frekans değerleri aynen alınırken dışında kalanlar sıfıra eşitlenmiş ve görüntü yeniden oluşturulmuştur. Şekil 3.16b'nin sağ sütununda görüntünün yeniden oluşmuş haline bakılırsa frekans ortamındaki alçak geçişli bir süzgecin uzamsal ortamdaki yumuşatıcı özelliği olan evrişim süzgeçleriyle aynı işi yaptığı görülebilir.



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



Şekil 3c'de ise merkezi yine genlik bileşeninin merkezinde olan tüm frekans değerlerinin %5'ini kapsayacak yarıçapta bir çember şeklinde bir süzgeç oluşturulmuş, bu kez bu çemberin içinde kalan frekans değerleri sıfıra eşitlenmiş dışındakiler ise aynen alınarak görüntü yeniden oluşturulmuştur. İkinci sütunda görüntünün yeniden oluşturulmuş haline bakılırsa, atılmış olan düşük frekanslar görüntünün pikselleri arası değişimin az olduğu kısımlarına karşılık geldiğinden görüntünün arka planının bozulduğu buna karşılık yüksek frekanslara karşılık gelen yapı sınırlarının belirginleştiği görülebilir.

SONUÇLAR

Uygulamalı jeofizikte temel amaç yer içinin olanaklı olan en net görüntüsünü elde etmektir. Jeofizik çalışmaların önemli bir bölümünün çok disiplinli olması nedeniyle sonuç olarak sunulan görsellerin, farklı disiplinlerden olan araştırmacı ve ilgililer tarafından da kolay anlaşılır hale getirilmesi önemlidir. Bu nedenle jeofizik görüntülerde aranan hedef yapı ile ortamın kendisinin kolay ayırt edilebilir olması istenen bir durumdur. Bu amaçla görüntü işleme temelli gürültü giderme araçlarının kullanılması mümkündür. Sözü edilen araçlar, doğrudan ters çözüm sonucu elde edilen parametrelere veya parametrelerin 0-225 ya da 0-1 arasında ölçeklendirilmesiyle oluşturulmuş sayısal görüntülere uygulanabilir.

Bu bildiri arkeolojik bir sahada uygulanmış doğru akım öz direnç çalışması sonucu elde edilen yer-elektrik haritasına farklı görüntü işleme araçları uygulanarak gürültü giderme işlemi yapılmıştır. Gürültü giderme araçları uzamsal ortamda uygulananlar ve dönüşüm uzayında uygulananlar olarak ikiye ayrılmıştır. Uzamsal ortamda yer-elektrik parametrelerine doğrusal süzgeçler olan ortalama, Gaussian ve disk süzgeçleri, doğrusal olmayan işlemlerden ise orta değer ve yerel olmayan ortalama süzgeçleri uygulanmıştır. Bu süzgeçler arasında doğrusal olanların yapı sınırlarını korumakta başarısız olduğu görülürken NLM süzgecinin gürültüleri giderirken görüntünün netliğini de korumak konusunda en başarılıları olduğu görülmüştür. Dönüşüm uzayında yapılan işlemler için Fourier ortamında süzgeçleme örnek verilmiştir. Uzamsal ortamda evrişim işlemi ile gerçekleştirilen süzgeçlerin fourier ortamında alçak geçişli süzgeçlere karşılık geldiği gösterilmiştir.

KAYNAKLAR

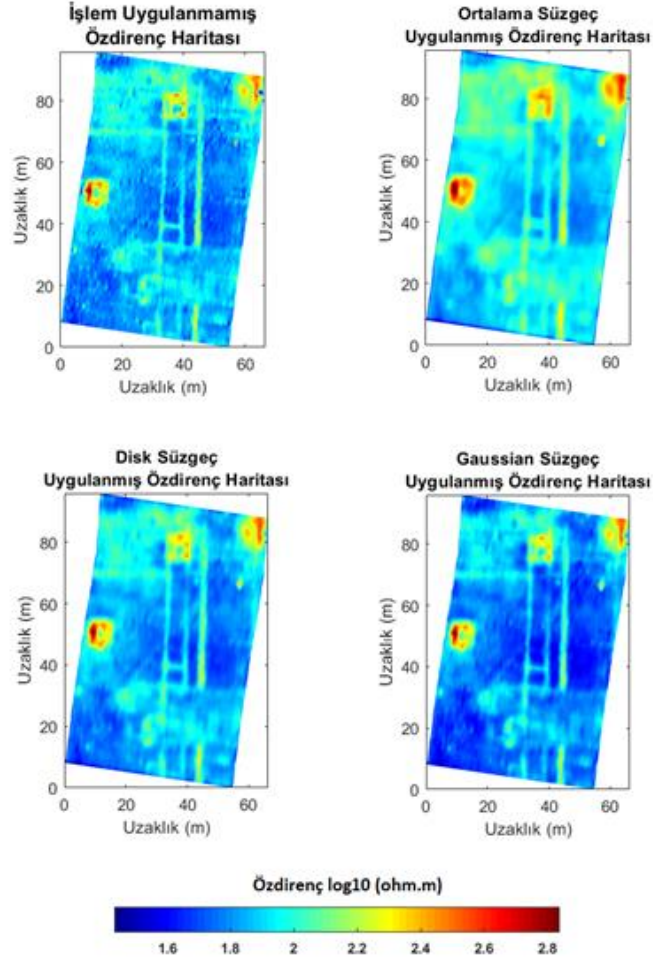
- Akca I., Balkaya Ç., Pülz A., Alanyalı H.S., Kaya M.A. 2019. Integrated geophysical investigations to reconstruct the archaeological features in the episcopal district of Side (Antalya, Southern Turkey). *Journal of Applied Geophysics*, 163, 22-30.
- Al Nuamy, W., Huang, Y., Nakhkash, M., Fang, M.T.C., Nguyen, V.T., Eriksen, A., 2000. Automatic detection of buried utilities and solid objects with GPR using neural networks and pattern recognition. *Journal of Applied Geophysics*, 43, 157-165.
- Buades, A., Coll, B., Morel, J. 2005. A review of image denoising algorithms, with a new one. *Multiscale Modeling and Simulation: A SIAM Interdisciplinary Journal, Society for Industrial and Applied Mathematics*, 4 (2), 490-530.



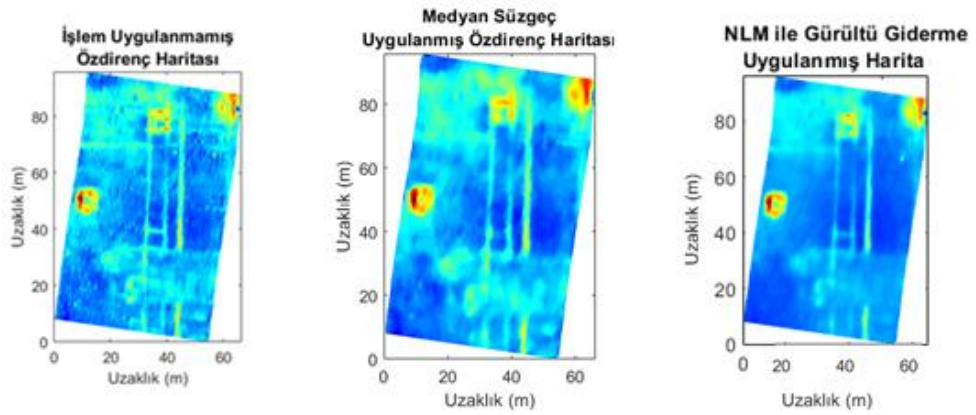
8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



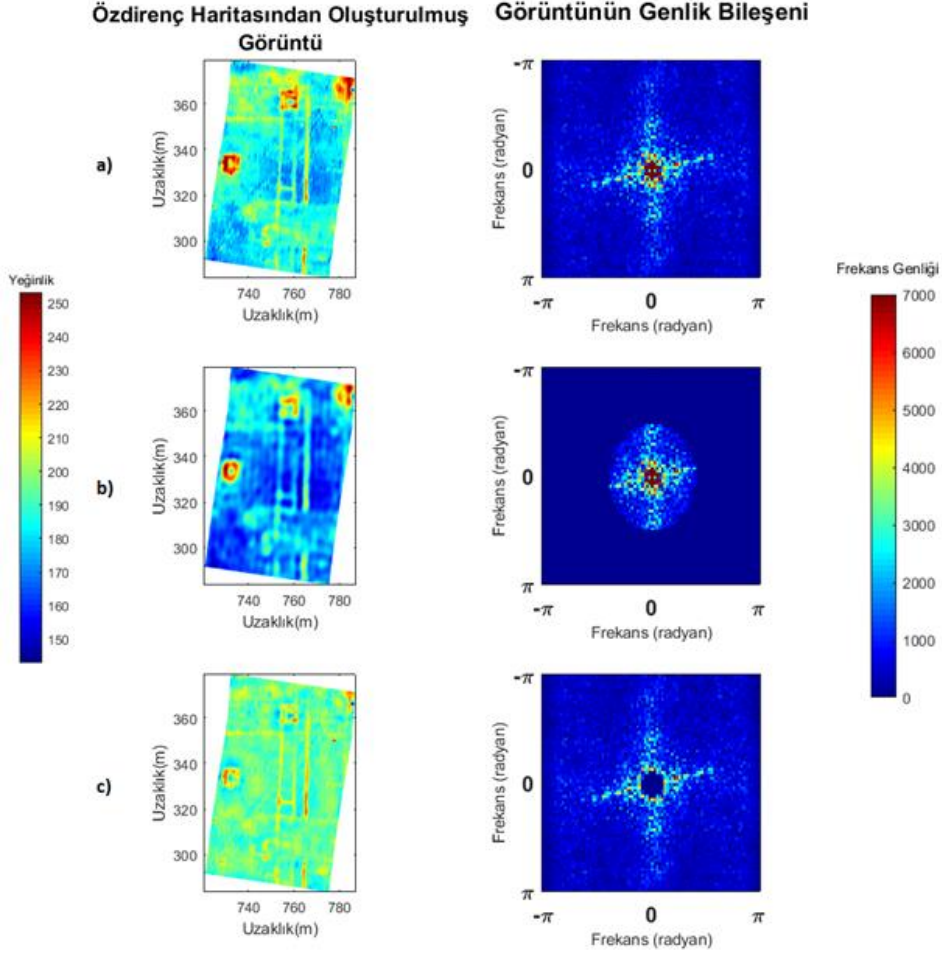
- Bergeron, S. Y, Yuen D. A, Vincent, A. P., (2000a), Capabilities of 3-D wavelet Transforms to detect plume-like structures from seismic tomography, *Geophysical Research Letters* 26:2311-2314
- Candansayar, M.,E., Başokur, A., T. 2001. Detecting small scale targets by the 2D inversion of two sided three-electrode data: application to an archeological survey. *Geophysical Prospecting*, 49(1), 13-25
- Carter, N., Lines, L., 2001. Fault imaging using edge detection and coherency measures on Hibernia 3-D seismic data. *The Leading Edge*, 20 (01), 64-69.
- Dahlin, T. 1996. 2D Resistivity Surveying for Environmental and Engineering Applications. *Firs Break*, 14(7), 275-285
- Overmeeren, R.A., and Ritsema, I.L. 1988. Continuous vertical electrical sounding. *First Break*, 6, 313-324.
- Sarker S., Chowdhury S., Laha S., Dey D. 2012. Use of Non-Local Means Filter to Denoise Image Corrupted by Salt and Pepper Noise. *Signal and Image Processing : An International Journal*, 3(2), 223-235.
- Morozov, I. B., and Smithson, S. B. 1996, Instantaneous Polarization Attributes and Directional Filtering, *Geophysics* 61, 872-881.



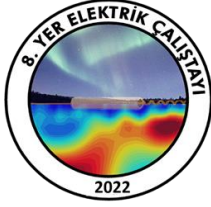
Şekil 1 Uzamsal ortamda üç farklı doğrusal süzgecin özdirenç haritasına uygulanması



Şekil 2 Uzamsal ortamda doğrusal olmayan iki süzgecin özdirenç haritasına uygulanması



Şekil 3 Frekans ortamında doğrusal işlemlerin jeofizik parametrelerden oluşturulmuş görüntüye uygulanması



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



S7	Doğal Potansiyel Anomalilerinden Gömülü Kutuplaşmış Bir Yapının Yapı Faktörü ve Parametrelerinin Regula Falsi ve İkiye Bölme Yöntemleriyle Saptanması
	Determination of Structure Factor and Parameters of a Buried Polarized Structure by Using Regula False and Bisection Methods on Self Potential Anomalies

Coşkun SARI^{*1}, Emre TİMUR¹

¹ Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Jeofizik Mühendisliği Bölümü Buca/İZMİR

E-posta: coskun.sari@deu.edu.tr

^{*}Sunumu yapacak yazar

ÖZ

Doğal potansiyel (SP) yöntemi kullanılarak toplanan verilerin değerlendirilmesinde, yöntemin kaynak özellikleri nedeniyle çoğunlukla bir belirsizlik söz konusudur. Yeraltında farklı geometrik şekillere sahip yapılar, yer yüzeyinde aynı doğal potansiyel etkisini oluşturabilirler. Bu çok çözümlülük sorununun önüne geçebilmek için birçok yöntem geliştirilmiş olup bunların birçoğunda yapı faktörü ön bilgi olarak gereklidir. Bu çalışmada, doğal potansiyel verilerinden yeraltındaki yapının önce yapı faktörü belirlenmiş ve buna bağlı yapının derinliği, kutuplaşma açısı ve ortamın elektrik dipol momenti gibi ortam parametreleri saptanmıştır. Yapı faktörünün kestirilmesi doğrusal olmayan bir bağıntının çözümünün bulunması problemi olup, iki farklı yöntem kuramsal verilere uygulanarak denenmiş ve arazi verilerine uygulanmıştır. Gerek Regula Falsi gerekse İkiye Bölme yöntemlerinin uygulanması kolay olup, arazi verisinden elde edilen sonuçlar daha önce yapılmış çalışmalarla karşılaştırılmış ve uyumlu sonuçlar verdiği saptanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Doğal gerilim, İkiye bölme, Regula Falsi

ABSTRACT

There is often an uncertainty due to the source characteristics of the Self Potential (SP) method in the evaluation of the collected data. Buried structures with different geometrical shapes can create the same self potential effect on the ground surface. Many methods have been developed to prevent this multi-solution problem, and in many of them, the structure factor is required as preliminary information. In this study, firstly the structure factor of the subterranean structure was determined from the self potential data, and after that the geometrical and physical parameters such as the depth of the structure, the polarization angle and the electric dipole moment were determined. Estimation of the structure factor is the problem of finding the solution of a nonlinear equation and two different methods have been carried out by applying to theoretical and field data. Both Regula False and Bisection methods are easy to apply and the results obtained from the field data have been compared with previous studies and it has been determined that they give consistent results.

Keywords: Self potential, Bisection, Regula False



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



GİRİŞ

Doğal potansiyel (SP) yöntemi başlıca elektrokimyasal, elektrokinetik ve termoelektrik kaynakların doğal olarak yarattığı potansiyel farklarının ölçümüne dayanır. Mineralleşmenin var olduğu alanlarda ölçülen mineralleşme potansiyelleri minerallerin özellikle topoğrafik etkilerle gizlenen ve/veya bölgesel alanda saklı doğal potansiyel (SP) anomalileri olarak açığa çıkan metalik sülfidlerin araştırılmasında kullanılır. Bununla birlikte, bir doğal potansiyel anomalisi bazen topoğrafik engellemeler ve bölgesel etkilerden kolayca ayrılabilir ve kutuplaşmış tek bir yapı olarak modellenebilir. Doğal Potansiyel verilerin yorumu genellikle belirsizlik konusudur. Yeraltında farklı geometrik şekillere sahip kütleler yeryüzeyinde aynı doğal potansiyel alanı yaratabilirler. Bununla birlikte, elektrik dipol moment sabit olduğunda ve sınırlanan yüzey bilinen bir şekil ile tanımlanabildiğinde, doğal potansiyel verilerinden tekil bir çözüme ulaşılabilmektedir. Bu görüş, maden araştırmalarında küre, yatay silindir, düşey silindir ve eğimli levha gibi dört kategoride sınıflanan kutuplaşmış yapıların çoğunda birçok araştırmacı tarafından sayısal olarak kanıtlanmıştır (Yüngül, 1950; Banerjee, 1971; Fitterman, 1979; Bhattacharya ve Roy, 1981; Abdelrahman ve Sharafeldin, 1997). Çalışmanın ilk aşamasında kuramsal yapı parametre değerleri verilen küre ve silindir tipi model yapıların kuramsal doğal potansiyel anomalileri hesaplanmıştır. Hesaplanan kuramsal anomali değerleri çözümü gerçekleştirmek amacıyla Fortran programlama dilinde yazılan ve REGULA adını verdiğimiz bilgisayar programı ile değerlendirilmiştir. Kuramsal verilerin değerlendirilmesi sonucunda kuramsal anomaliye neden olan yapı parametreleri ve yapı faktörü çok büyük bir doğrulukla saptanmıştır. Kuramsal verilerin değerlendirilmesinde elde edilen başarı sonucunda yöntem bir arazi verisine uygulanarak başarısı sınanmıştır.

YÖNTEM

Birçok kutuplaşmış yapının oluşturduğu doğal potansiyel anomalisinin genel bağıntısı

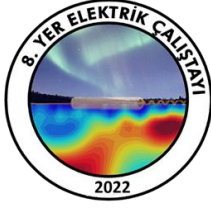
$$V(x_i, z, \theta, q) = K \frac{x_i \cdot \cos \theta + z \cdot \sin \theta}{(x_i^2 + z^2)^q}; \quad i = 1, 2, 3, \dots, N \quad (1)$$

ile verilir (Yüngül, 1950; Bhattacharya ve Roy, 1981). Bu bağıntıda z ; yapının derinliği, θ : kutuplaşma açısı, x_i ; ölçüm noktasının konumu, K ; elektrik dipol moment veya kutuplaşmanın genliği ve q ; yapının biçim faktörüdür. Bilindiği gibi, üç boyutlu durum için (3-B) bir kürenin biçim faktörü $q=1.5$ ve yarı sonsuz düşey silindirin biçim faktörü $q=0.5$, iki boyutlu durum için yatay bir silindirin biçim faktörü $q=1.0$ olarak tanımlanır. Yapı yatay bir levhaya yaklaştığında yapı faktörü de $q=0$ değerine yaklaşır (Şekil 1).

Tüm yapı şekilleri için, (1) no.lu bağıntı ($x_i=0$) ; başlangıç noktası ve $V(0)$; başlangıç noktasındaki anomali değeri olmak üzere yapı faktörü q 'nun bir işlevi olarak

$$K = \frac{V(0) \cdot z^{2q-1}}{\sin \theta} \quad (2)$$

bağıntısıyla verilir. (1) no.lu bağıntının sıfıra eşitlenmesi sonucunda x_0 anomalinin sıfır değerini aldığı noktanın başlangıç noktasına olan uzaklığı olmak üzere (Şekil 1)



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



$$\cot\theta = \frac{-z}{x_0} \quad (3)$$

bağıntısı elde edilir. (2) ve (3) no.lu bağıntıların (1) no.lu bağıntıda yerine konması sonucunda, (**q**) yapı faktörü cinsinden izleyen doğrusal olmayan bağıntı elde edilir.

$$V(x_i, q) = \frac{V(0) \cdot A^{2q} \cdot M \cdot (x_0 - x_i)}{x_0 \cdot (x_i^2 + M^{1/q} \cdot (A^2 - x_i^2))^q} \quad (4)$$

olarak tanımlanır. (4) no.lu bağıntı, doğrusal olmayan denklemlerin çözümüne ilişkin bilinen çözüm yöntemleri (Newton-Raphson, Regula Falsi, Bisection (İkiye bölme), Secant gibi) kullanılarak **q** bilinmeyeni için çözülebilir.

UYGULAMALAR

Silindir ve küre modelleri için gerek kuramsal gerekse saha verileri üzerinde yöntemler uygulanmış ve sonuçlar çizelge (Şekil 2 ve 3) ve tablo biçiminde (Tablo 1 ve 2) sunulmuştur.

SONUÇLAR

Doğal potansiyel anomalilerinden gömülü kutuplaşmış bir yapının yapı parametrelerinin belirlenmesinde yardımcı eğriler (abak) kullanıldığında yapının tipine ilişkin hiçbir bilgimiz bulunmamaktadır. Yardımcı eğrileri kullanırken yapının silindir veya küre olduğu kabul edilir ve bu kabul doğrultusunda değerlendirme yapılır. Bu çalışmada tanıtılan doğrusal olmayan denklem çözüm yöntemlerini kullanarak yapılan değerlendirmelerde önce yapı faktörü saptanmaktadır. Küre ve silindir gibi model yapıların neden olduğu doğal potansiyel anomalilerinin değerlendirilmesi sonucunda model yapılarla ilişkin yapı parametreleri, her iki yöntemle de büyük bir duyarlılık ve doğrulukla saptanmıştır. Kuramsal verilerdeki başarısı üzerine yöntem arazi verisi üzerine uygulanmış ve daha önce elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. SP anomalisinden gömülü yatay bir silindir ya da bir kürenin derinliğinin saptanması problemi doğrusal olmayan bir denklemin bir çözümünün bulunması işlemine dönüştürülmüştür. Tanımlanan yöntemi gerçekleştirmek oldukça kolaydır. Sadece birkaç noktadaki değerleri, uzaklık değerlerini ve nomogramları kullanan önceki yöntemlere göre tanımlanan yöntemin avantajları (1) tüm gözlem değerlerini kullanması, (2) yöntemin otomatik olması ve (3) SP anomalisindeki hatalara daha az duyarlı olmasıdır.

KAYNAKLAR

Abdelrahman EM and Sharafeldin SM, 1997, A least squares approach to depth determination from self-potential anomalies caused by horizontal cylinders and spheres, *Geophysics*, 62(1), 44-48.

Banerjee B, 1971, Quantitative interpretation of self-potential anomalies of some specific geometric bodies, *Pure appl. Geophys.*, 90, 138-152.

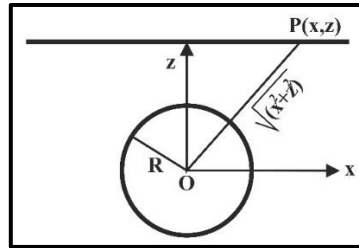
Bhattacharya BB and Roy N, 1981, A note on the use of a nomogram for self-potential anomalies, *Geophysical Prospecting*, 29, 102-107.

Çağal B, 1998, *Sayısal Analiz*. Birsen Yayınevi, İstanbul.

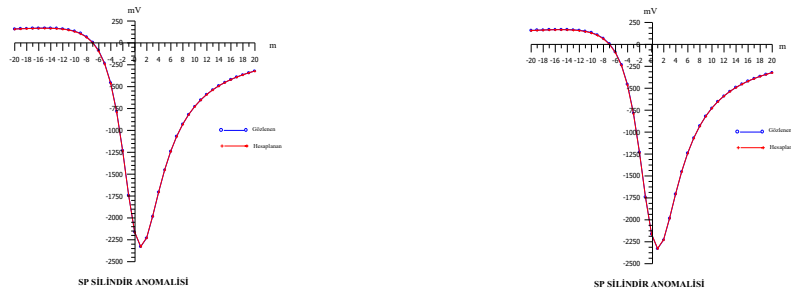
Fitterman DV, 1979, Calculation of self potential anomalies near vertical contacts. *Geophysics*, 44, 195-205.

Stanley JM, 1977, Simplified magnetic interpretation of the geologic contact and thin dike. *Geophysics*, 42(6), 1236-1240.

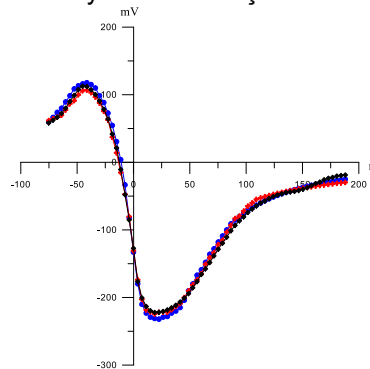
Yüngül S, 1950, Interpretation of spontaneous polarization anomalies caused by spherical ore bodies. *Geophysics*, 15, 237-246.



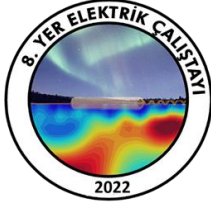
Şekil 1 Yatay silindir ve küre modellerinin kesit görünümü



Şekil 2 Silindir modeli için Doğal gerilim anomalileri ve solda Regula Falsi, sağda ise İkiye Bölme yöntemi sonuçları.



Şekil 3 Yüngül (1950) anomalisi ve Regula Falsi ile İkiye Bölme yöntemi sonuçları. Siyah çizgi SP anomalisini, kırmızı çizgi İkiye Bölme ve mavi çizgi Regula Falsi sonucunu göstermektedir.



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



Tablo 1 Kuramsal silindir modeli ve çözümleri

Parametre	Model	Regula Falsi Çözümü	İkiye Bölme Çözümü
Yapı Faktörü (q)	1.0	0.999	0.998
Derinlik (z)	4.0	4.01	4.00
Kutuplaşma Açısı (θ)	60°	60.21°	60.23°
Elektrik Dipol Moment (K)	-10000	-9960.42	-9940.50

Tablo 2 Yüngül (1950) anomalisi ve farklı yöntemlerle çözüm sonuçları

Parametre	Regüla Falsi Çözümü	İkiye Bölme Yöntemi Çözümü	Yüngül (1950)	Bhattacharya and Roy (1981)	Abdelrahman and Sharafeldin (1997)
Yapı Faktörü (q)	1.414	1.498	----	----	----
Derinlik (z)	33.91	35.6	38.8 m	40 m.	42 m.
Kutuplaşma Açısı (θ)	16.74°	15.32	21°	15°	13°



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



S8	Seleukeia Sidera Antik Kenti (Atabey, Isparta) Jeofizik Araştırmaları
	Seleukeia Sidera Ancient City (Atabey, Isparta) Geophysical Research

Hatice Evrim TÜTÜNSATAR ^{*1}, Olcay ÇAKMAK², Bilge HÜR MÜZLÜ KORTHOLT³,
Çağlayan BALKAYA^{2,4}

¹ Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Gönen MYO Kültürel Miras ve Turizm Programı, Isparta

² Süleyman Demirel Üniversitesi, Deprem ve Jeoteknik Araştırma Merkezi, Isparta

³ Süleyman Demirel Üniversitesi, Arkeoloji Bölümü, Isparta

⁴ Süleyman Demirel Üniversitesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, Isparta

E-posta: evrimtutunsatar@isparta.edu.tr

ÖZ

Seleukeia Sidera, Isparta iline bağlı Atabey ilçesinde, Eğirdir ile Burdur Göller'inin arasında konumlanan bir antik kenttir. Seleukeia Sidera antik kentinde gerçekleştirilen arkeoloji çalışmalarının yanı sıra yer radarı ve elektrik özdirenç yöntemleriyle gerçekleştirilen arkeojeofizik çalışmalar kent in toprak altında kalan yapı kalıntılarının varlığı, uzanımı ve derinliklerine ilişkin önemli bilgiler sunmaktadır. Antik kentin tiyatro yapısına yakın bir yerde her iki yöntem ile toplanan verilerin değerlendirilmesiyle elde edilen ve birbirini destekleyen sonuçlar oldukça umut vericidir. Araştırma alanından elde edilen jeofizik bulgular, 8 küçük dükkân/oda yapılarına ait olabilecek olası duvarların varlığını göstermektedir. Elde edilen bulgular ışığında gerçekleştirilecek arkeolojik deneme açmaları jeofizik sonuçların başarısını gösterecektir. Geleneksel arkeolojik kazı çalışmalarına göre zaman ve maliyet açısından oldukça ekonomik olan tahribatsız jeofizik uygulamaların geniş ölçekte gerçekleştirilmesi antik kentin yeraltında kalan yapılarının mimarisinin de anlaşılmasına büyük katkı sağlayacaktır.

Anahtar Kelimeler: Yer radarı, Elektrik özdirenç, Seleukeia Sidera, Atabey

ABSTRACT

Seleukeia Sidera is an ancient city in the district of Atabey in the province of Isparta, between Egirdir and the Burdur lakes. In addition to the archaeological investigations in the ancient city of Seleukeia Sidera, the archaeo-geophysical investigations carried out with ground-penetrating radar (GPR) and electrical resistivity methods provide important information about the existence, extent and depth of the remains of the city underground. The results obtained by analyzing the data collected with both methods in a location close to the theatre structure of the ancient city and supporting each other are promising. The geophysical findings obtained from the research area indicate the existence of possible walls that could belong to 8 small shop/room structures. The archaeological experimental trenches, which will be carried out in the light of the results, will show the success of the geophysical results. Implementing non-destructive geophysical applications on a large



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



scale, saving time and money compared to traditional archaeological excavations, will contribute significantly to understanding the architecture of the underground structures of the ancient city.

Keywords: GPR, Electrical resistivity, Seleukeia Sidera, Atabey

GİRİŞ

Antik kentlerde toprağın altında keşfedilmeyi bekleyen arkeolojik buluntuların ve mimari yapıların daha düşük maliyet, zaman ve iş gücü ile sağlıklı bir şekilde tespit edilmesi arkeojeofizik araştırmalar ile mümkündür. Arkeolojik kazı ve yüzey araştırmaları sırasında veya öncesinde sıklıkla başvurulan jeofizik yöntemlerin başarılı olabilmesi, belirli bir arkeolojik alanın sığ yeraltı özellikleri ve bu özelliklerin hedef arkeolojik yapı ile oluşturacağı kontrast derecesine bağlıdır. Jeofizik veri, fiziksel bir parametre farklılığından oluşan belirtilerin (anomalilerin) bütünüdür. Bir antik kentin belirli bir konumunda, kendini çevreleyen ve homojen olmayan topraktan farklı fiziksel özelliklere sahip yapının ortaya konulabilmesi doğru yöntem seçimi ile mümkündür. Antik kent araştırmalarında jeofizik yöntem seçiminin doğru yapılabilmesi için önce hedef yapının özelliklerinin ve toprak fiziksel özelliklerinin tespit edilmesi gereklidir.

Bu çalışma kapsamında, Seleukeia Sidera Antik Kentinin toprak altında kalan yapı kalıntılarının varlığı tahribatsız yer radarı yöntemi ve elektrik öz direnç tomografi (EÖT) tekniği kullanılarak araştırılmıştır. Antik kent, Isparta'nın Atabey ilçesinin 7 km güneyindeki Bayat köyü sınırları içerisinde yer alan Hisar Tepe ve çevresine konumlanmaktadır (Şekil 1a, b). Kent, 2008 yılından itibaren SDÜ Arkeoloji Bölümü öğretim üyesi Prof. Dr. Bilge HÜR MÜZLÜ KORTHOLT başkanlığında ve T.C. Kültür ve Turizm Bakanlığı, Kültür Varlıkları ve Müzeler Genel Müdürlüğü'nün izni, Süleyman Demirel Üniversitesi'nin desteği ile araştırılmaktadır. Yüzey araştırmaları neticesinde kente çok sayıda demir cürufu ve seramik buluntular kayıt altına alınmıştır (Hür müzlü vd 2017). Birçok mimari kalıntının toprak altında olduğu düşünülen Seleukeia Sidera Antik Kenti'nde ilk jeofizik araştırmalar manyetik ölçümlerle gerçekleştirilmiş ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir (Schenk vd 2018, 2019, Tütünsatar vd 2020). Seleukeia Sidera Antik kenti yapıları genel olarak kireçtaşı olması nedeniyle çevre toprak malzemesine karşı büyük bir kontrast oluşturmaktadır (Schenk 2020). Böylece, alanda yüksek çözünürlükte yeraltı görüntüleri elde edilmektedir. Bu bağlamda değerlendirildiğinde, Seleukeia Sidera Antik Kenti'nin jeofizik prospeksiyon için oldukça verimli bir uygulama alanıdır.

ARKEOJEOFİZİK UYGULAMALAR

Arkeojeofizik araştırmalarda yaygın olarak manyetik, yer radarı ve elektrik öz direnç tomografi yöntemleri uygulanmaktadır. Seleukeia Sidera Antik Kentinde arkeojeofizik uygulamalar ise çoğunlukla yer radarı yöntemiyle gerçekleştirilirken EÖT uygulamaları da yer radarı yönteminden elde edilen sonuçlar dikkate alınarak belirlenen alanlarda uygulanmaktadır. Literatürde bu yöntemlerin birlikte ya da tek başlarına uygulanarak elde edilen başarılı örnekleri bulunmaktadır (Balkaya vd 2018, Akca vd 2019, Yılmaz vd 2019, Balkaya vd 2020, 2021). Bu çalışma kapsamında, öncelikle, Hisar Tepe'nin doğusunda ve kentin tiyatro yapısına yakın bir alanında yer radarı yöntemi uygulanmıştır. 50 cm mesafeli



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



profiller üzerinde 5 cm iz aralığı ile toplanan veri kümeleri uygun veri işlem teknikleriyle değerlendirilerek derinlik seviye haritaları oluşturulmuştur. Buradan elde edilen sonuçlar ışığında, 60 cm elektrot aralığı ile 28,2 m uzunluğundaki bir ölçüm profil üzerinde dipol-dipol elektrot dizilimiyle EÖT tekniği uygulanmıştır. Bu alandan her iki yöntem uygulamasıyla elde edilen sonuçlar düzenli geometriler sunan arkeolojik yapıların yeraltındaki varlığını açıkça göstermektedir (Şekil 2). Buna göre, araştırılan alanda 8 küçük ölçekli dükkân/oda kalıntılarına ait olası duvarların varlığı ortaya konmuştur. Her iki yöntemin sonuçları oldukça uyumlu ve birbirlerini destekler niteliktedir.

SONUÇLAR

Elde edilen bulgular ışığında gerçekleştirilecek arkeolojik deneme açmaları jeofizik sonuçların başarısını gösterecektir. Ancak, Hisar tepenin çevresindeki tarım alanlarının genel olarak özel mülk arazisi olmaları nedeniyle kısa vadede bu alanlarda arkeolojik kazı çalışması planlanmamaktadır. Bu nedenle, geleneksel arkeolojik kazı çalışmalarına göre zaman ve maliyet açısından oldukça ekonomik olan tahribatsız jeofizik uygulamaların Seleukeia Sidera Antik Kentinde geniş ölçekte gerçekleştirilmesi yeraltında kalan arkeolojik yapıların mimarisinin ortaya çıkarılmasına büyük katkı sağlayacaktır.

TEŞEKKÜR

Selukeya Sidera Antik Kenti jeofizik çalışmasının gerçekleşmesini sağlayan T.C. Kültür ve Turizm Bakanlığı, Kültür Varlıkları ve Müzeler Genel Müdürlüğü'ne ve destekleri için Süleyman Demirel Üniversitesi Rektörlüğü'ne teşekkür ederiz.

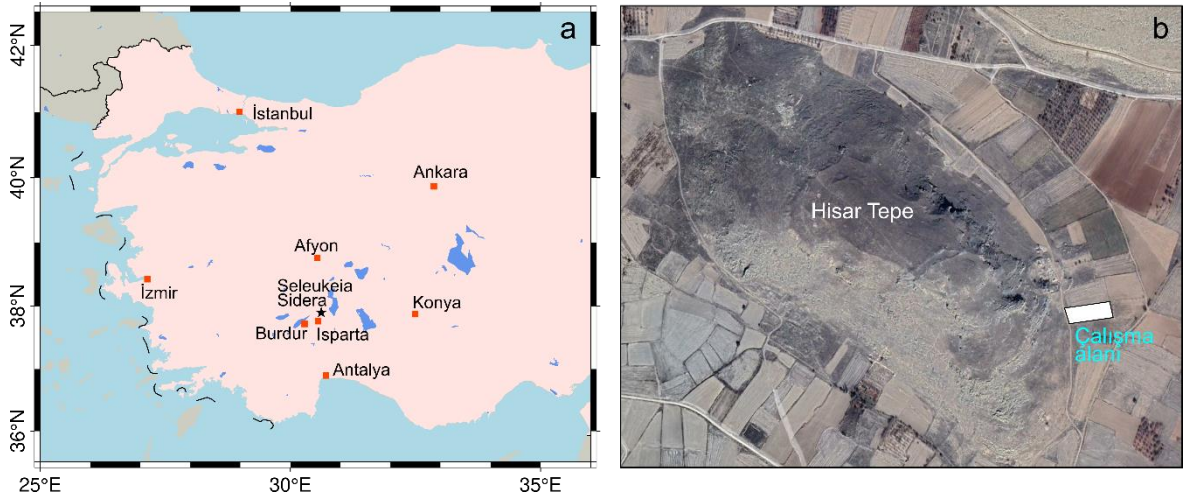
KAYNAKLAR

- Akca İ, Balkaya Ç, Pülz A, Alanyalı HS and Kaya MA 2019, Integrated geophysical investigations to reconstruct the archaeological features in the episcopal district of Side (Antalya, Southern Turkey): *Journal of Applied Geophysics*, 163, 22–30.
- Balkaya Ç, Kalyoncuoğlu ÜY, Özhanlı M, Merter G, Çakmak O and Güven İT 2018. Ground-penetrating radar and electrical resistivity tomography studies in the biblical Pisidian Antioch city, southwest Anatolia: *Archaeological Prospecting*, 25, 285–300.
- Balkaya Ç, Sever A, Çakmak O and Özcan F 2020. Arkeolojik alanlarda jeofizik prospeksiyon: Pisidia Mallos örneği. *BEU Fen Bilimleri Dergisi*, 9, 958–966.
- Balkaya Ç, Ekinci YL, Çakmak O, Blömer M, Arnkens J and Kaya MA 2021, A challenging archaeo-geophysical exploration through GPR and ERT surveys on the Keber Tepe, City Hill of Doliche, Commagene (Gaziantep, SE Turkey): *Journal of Applied Geophysics*, 186, 104272.
- Sönmez B, Bilgin Ar, Hümmüzlü Kortholt B, Atav I, Yayan E, Demirci D, Firat M, Köker H, Çevik N, Ataseven O, Kaska G, Özcan F, Mörel A, Tütünsatar HE ve Kaska M 2019, *Antik dönemden günümüze Isparta'nın kültürel mirası*: Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta.
- Schenk T, Atav-Köker İ, Sönmez B, Hümmüzlü B, Tütünsatar E ve Akaslan M 2018, Seleukeia Sidera Antik Kenti yüzey araştırmaları – 2018: *Demircilik Faaliyetlerine İlişkin Veriler: Türk Eskiçağ Bilimleri Enstitüsü (TEBE haberleri)*, 44, 66–72.
- Schenk T, Tütünsatar HE, Schlegel J, Akaslan M, Hümmüzlü B ve Atav-Köker, İ 2019, Seleukeia Sidera Antik Kenti 2016-2017 Jeofizik Çalışmalarının Sonuçları: *34. Arkeometri Sonuçları Toplantısı, 40th International Symposium of Excavations, Surveys and Archaeometry*, 103–112.

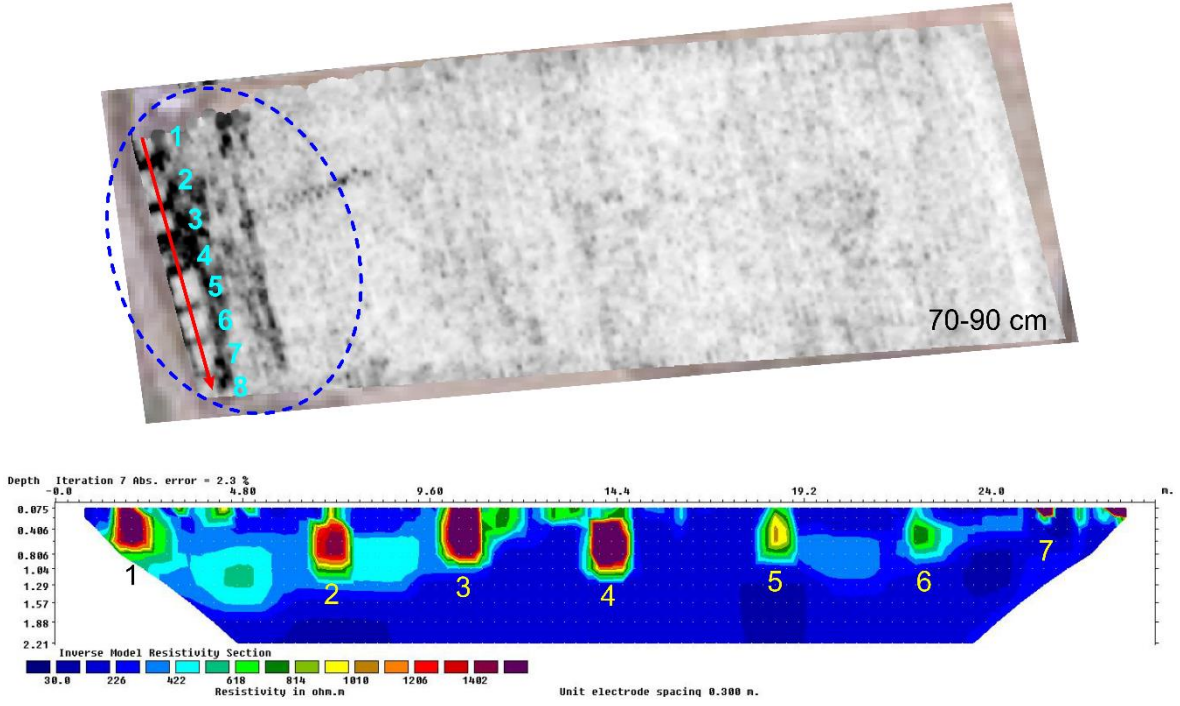
Schenk T 2020, *Archäologische prospektionen in Seleukeia Sidera und der versuch, produktionszentren zu bestimmen (Production, trade and economy in Psidia and its surrounding areas)*: International Symposium Proceedings Pisidian Studies II, Mörel A, Kaşka G, Köker H, Kaşka M, Fırat M and Akgönül SO (eds.), Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, Turkey, 154–165.

Tütünsatar HE, Schenk T, Hürmüzlü-Kortholt B and Akaslan M 2020, Seleukeia Sidera Antik Kenti 2018 jeofizik çalışmalarının sonuçları: *35. Arkeometri Sonuçları Toplantısı, Bildiri Özetleri, 41th International Symposium of Excavations, Surveys and Archaeometry*, 293–301.

Yılmaz S, Balkaya Ç, Çakmak O and Oksum E 2019. GPR and ERT explorations at the archaeological site of Kılıç village (Isparta, SW Turkey): *Journal of Applied Geophysics*, 170, 103859.



Şekil 1 a) Seleukeia Sidera Antik kentinin lokasyonu ve b) çalışma alanı



Şekil 2 Seleukeia Sidera Antik kenti çalışma alanı alanında uygulanan yer radarı derinlik dilimi (70-90 cm, üstte) ve elektrik özdirenç tomografi çalışmasından elde edilen tomogramın (altta) karşılaştırılması



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



S9	Betonarme Elemanlardaki Nem İçeriğinin Yer Radarı Tomografi Uygulaması ile Belirlenmesi
	Determining the Humidity Content of Reinforced Concrete with Ground Penetrating Radar Tomography Application

Muhammet Ertuğrul KARA*¹, Aysel ŞEREN¹, Hilal ALEMDAĞ¹

¹ Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, 61080 Trabzon

ÖZ

Son yıllarda teknolojinin gelişmesine paralel olarak, betonarme elemanların yapı içeriğinin görüntülenmesinde kullanılan geleneksel yöntemlerin yerini, gün geçtikçe kullanımı artan hasarsız jeofizik test yöntemleri almaya başlamıştır. Hasarsız bu test yöntemlerinden biri, Elektromanyetik dalgaların yayını, yansıması ve kırılması esasına göre çalışan Yer Radarı (GPR) yöntemidir. Bu yöntem, beton ve benzeri elemanların iç yapılarının görüntülenmesi ve bu yapıların fiziksel özelliklerinin araştırılması amacıyla da yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Betonarme elemanlarda artan nem miktarı, yapının fiziksel özelliklerini etkileyerek korozyona neden olmakla birlikte, beton dayanımını da önemli ölçüde etkileyen bir unsurdur. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, farklı araştırmacıların betonarme yapılardaki nem içeriğini belirlemek amacıyla elektromanyetik dalga temelli yöntemleri, laboratuvar ortamında uygulamış oldukları belirlenmiştir. Bu çalışmada ise ilk olarak, tomografik görüntüleme yaygın şekilde kullanılan eşzamanlı tekrarlamalı rekonstrüksiyon tekniğinin (SIRT) testi amacıyla modelleme çalışmaları yürütülmüştür. Daha sonra Trabzon'daki bir viyadük ayağı üzerinde belirlenen 11 profilde GPR tomografi ve genel ofset verileri toplanmıştır. Elde edilen verilerin analizi ile viyadük ayağının bağıl dielektrik permittivitesi yaklaşık olarak 5 ve %su içerik miktarı 4-6 arasında hesaplanmıştır. Bu çalışmada, betonarme yapıların nem içeriğinin belirlenmesinde kullanılan zaman alıcı ve hasar verici geleneksel yöntemlerin yerine, GPR tomografi yönteminin etkin bir şekilde kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Yer radarı, Tomografi, Dielektrik Permittivite, Betonarme, Nem içeriği

ABSTRACT

In recent years, to the parallel of development of technology, the use of non-destructive testing methods increasingly takes the place of traditional methods day by day. One of non-destructive testing method is ground penetrating radar, which operates under the basis of propagation, reflection and refraction of electromagnetic waves. This method, has a wide usage on monitoring inner structures and investigation of physical properties of concrete-like elements. Increasing water content level on reinforced concrete elements, affects the physical properties of structure and causes corrosion which is an important factor on concrete strength. On past studies, other researchers have used electromagnetic wave based techniques to determine water content of concrete samples in laboratory media. On this study, first, the generation of electromagnetic waves, propagation, behaviour on different mediums which has different physical properties and tomography exercises carried out by using mathematical modelling studies and the SIRT (Simultaneous Iterative Reconstruction Technique) algorithm technique tested. Moreafter GPR tomography and common offset data were gathered on determined 11 profiles on a viaduct pillar which is



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



located in Trabzon city. With the analysis of acquired data, the relative dielectric permittivity of pillar calculated around 5 and % water content distribution calculated between 4-6. In this study, it was concluded that the GPR tomography method can be used effectively instead of the time-consuming and damaging traditional methods used to determine the water content of reinforced concrete structures.

Keywords: GPR, Tomography, Dielectric permittivity, Reinforced concrete, Water content

GİRİŞ

Betonarme yapılar içerisindeki su/nem içeriğinin artması, beton dayanımını etkilemekle birlikte donatılarda da korozyona neden olmaktadır. Atmosferde bulunan karbondioksit (CO₂) molekülleri betonarme yapılara nüfuz ederek betonarme yapıda kullanılan çimento içerisindeki kalsiyum hidroksit (Ca(OH)₂) ile tepkimeye girerek betonarme yapı içerisinde karbonatlaşmaya neden olmaktadır. Karbonatlaşma sürecinde oluşan kimyasal tepkimeler, betonun alkalinitesinin güçlü bir şekilde azalması ile sonuçlanmaktadır. Alkalinitenin azalması betonarme yapıyı zayıflatmakta ve böylelikle karbonatlaşma, donatıyı kaplayan yapıya nüfuz ettikçe nemliliğin artmasına neden olarak betonarme yapının korozyona uğramasını kolaylaştırmaktadır. Betonarme yapı içerisinde karbonatlaşmanın derinliği, yapıyı korumak için önemli rol oynamaktadır. Karbonatlaşma derinlere ulaştıkça, yapı içerisindeki donatının da korozyona uğrama riski artmaktadır (Li, 2011). Beton yapı içeriğini hasarsız bir şekilde görüntüleyebilen yer radarı (GPR) yöntemi, araştırılan ortamın sığ derinliklerini yüksek çözünürlükte görüntüleyebilen jeofiziğin elektromanyetik (EM) yöntemlerinden biridir. Çok farklı uygulama alanları (arkeoloji, hidroloji, sedimentoloji, yapısal jeoloji, boşluk/mayın araştırmaları ve yapı incelemesi vb.) olan bu yöntem, beton türü inşaat elemanlarının iç yapılarını görüntüleme ve bu yapıların fiziksel özelliklerinin araştırılması amacıyla yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Grandjean vd., 2000; Bungey, 2003; Luaidi vd., 2014). Farklı araştırmacılar, betonarme yapılardaki nem içeriğini belirlemek amacıyla elektromanyetik dalga temelli ekipmanlar kullanarak laboratuvar ortamında çalışmalarını yürütmüşlerdir (Soutsos vd., 2001; Laurens vd., 2002; Leucci, 2012; Monte vd., 2017; Kaplanvural vd., 2018-2021).

Bu çalışmada ise GPR yöntemi kullanılarak bir viyadük ayağında belirlenen profiller üzerinde hem genel ofset hem de tomografi GPR ölçümleri toplanıp çözümlenerek, incelenen ortamın bağıl dielektrik permittivite dağılımı ve buna bağlı olarak su içerik miktarının belirlenmesi amaçlanmıştır.

YER RADARI (GPR) YÖNTEMİ

Yöntem, verici anten aracılığıyla araştırılan ortama gönderilen elektromanyetik dalgaların, belirli bir hızla ilerleyerek karşılaştığı süreksizliklerden yansıyıp çift yol seyahat zamanı nanosaniye mertebesinde alıcı antende kaydedilmesi esasına dayanmaktadır. GPR, incelenen ortamdaki dielektrik özellik farklılığına göre görüntüleme yapabilen ve yüksek frekanslı elektromanyetik dalgalar kullanıldığı için yüksek çözünürlük sağlayabilen bir yöntemdir. İncelenilen ortam özelliklerine bağlı olarak, yüksek frekanslı EM dalgalar geçtikleri ortamda karşılaştıkları süreksizliklerde, enerjilerinin bir kısmını bir sonraki ortama iletirken, kalan kısmı da süreksizlik yüzeyinden yansıyarak alıcı antende algılanıp, kontrol ünitesi vasıtasıyla kayıtçıya aktarılmaktadır (Annan ve Davis, 1989).

Jeofizik Uygulamalarda Tomografi Tekniği

Jeofizik uygulamalarda kırılma ve ışın yolu tomografisi teknikleri kullanılmaktadır. Bu çalışmada ışın yolu tomografisi kullanılmıştır. Işın yolu tomografisinde görüntülenmek istenen ortam hücrelere bölünerek ızgaralanmaktadır. Her hücre için sabit kabul edilen bir yavaşlık terimi ile varış zamanı hesaplanmaktadır. Bütün ışınlar için seyahat zamanları hesaplanıp matris formunda yazılabilmekte ve çeşitli yaklaşımlar kullanılarak çözümlenmektedir (Lehmann, 2007).

Tomografik çözümler sonucunda elde edilen dielektrik permittivite değerlerinden yüzde su içeriğinin (%w) hesaplanması için Leucci (2012) tarafından geliştirilen bir formülasyon kullanılmıştır.

Yapılan Çalışmalar

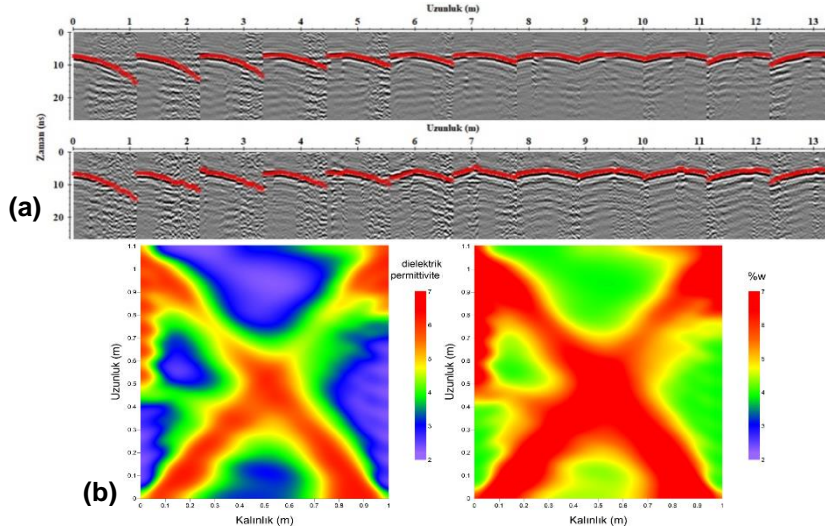
Bu çalışmada ilk defa bir beton blok üzerinde GPR tomografi görüntülenmesi deneneceği için kullanılacak algoritmanın üreteceği sonuçlar, öncelikle sentetik modeller oluşturularak test edilmiştir. GPR tomografi çalışmalarında SIRT (Simultaneous Iterative Reconstruction Technique) algoritması kullanılmıştır. Modelleme çalışmalarından sonra, Trabzon ili, Ayasofya mevkii, E70 karayolundaki bir viyadük ayağında belirlenen 11 profilde (ayağın hem doğu hem de batı yönünde birbirine paralel olacak şekilde) hem genel ofset hem de tomografi GPR verileri toplanmıştır.

Bu aşamada tomografi ölçümleri için, alıcı ve verici olarak iki adet 500 MHz frekanslı antenler, genel ofset ölçümleri için ise 800 MHz frekanslı anten kullanılmıştır. Verici anten atış aralığı 10 cm ve profiller arası mesafeler 15 cm olarak belirlenmiştir. Birbirine paralel profillerde verici anten, viyadük ayağının bir yüzünde ölçü noktasında sabit tutularak, ayağın diğer yüzünde alıcı antenle profil boyunca ölçümler toplanmıştır. Her bir profil için ölçümler tamamlandıktan sonra alıcı-verici antenler yer değiştirilerek aynı işlem tekrarlanmıştır. Şekil 1a'da viyadük ayağının bir yüzünde yer alan profiller ve verici anten konumları (sarı noktalar), Şekil 1b'de ise ölçüm alımı aşaması gösterilmiştir.

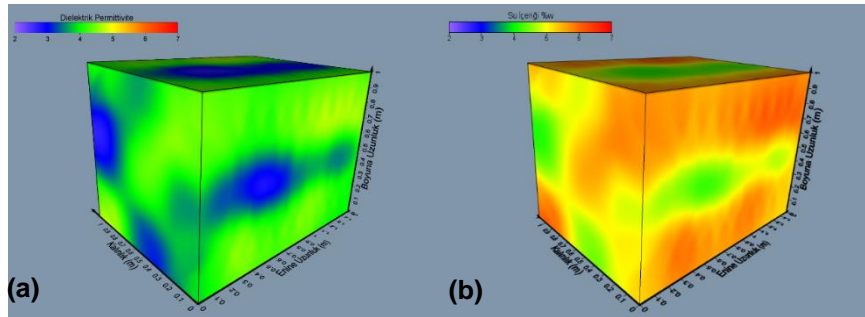


Şekil 1 a) Kırmızı çizgiler tomografi ve genel ofset ölçüm profillerini, turkuaz çizgiler yatayda genel ofset ölçüm profillerini, sarı noktalar ise verici anten noktalarını göstermektedir. b) ölçüm alım şekli.

Ölçümler toplandıktan sonra, elde edilen verilerde, hassas bir şekilde ilk varış okumaları yapabilmek için çeşitli veri işlem aşamaları uygulanmıştır. Bu aşamalar; DC kayması, dewow, genlik normalizasyonu, bant geçişli süzgeç, f-k süzgeci ve dekonvolüsyon işlemleridir. Daha sonra her bir atış grubu için ilk varışlar (Şekil 2a) işaretlenip, tomografik çözüm yapılarak 2B bağıl dielektrik permittivite kesiti elde edilmiş ve buna bağlı olarak yüzde su içeriği miktarı haritalanmıştır (Şekil 2b).



Şekil 2 a) Viyadük ayağının 9. Profilinin doğu ve batı yüzlerinden alınan tomografi ölçüleri, b) Viyadük ayağının 9. Profiline ait bağıl dielektrik permittivite kesiti (solda) ve yüzde su içeriği kesiti (sağda)



Şekil 3 a) 3B bağıl dielektrik permittivite dağılımı, b) 3B yüzde su içeriği dağılımı

SONUÇLAR

Bu çalışmada incelenen viyadük ayağı üzerinden elde edilen GPR tomografi kesitleri birleştirilerek, viyadük iç yapısının bağıl dielektrik permittivite ve yüzde su içerik kestiriminin 3B olarak görüntülenmesi amaçlanmıştır. Yürütülen çalışma modelleme ve saha çalışması olarak iki aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada yapılan modelleme çalışması sonucunda tomografi çözümünün model parametrelerine oldukça yakın sonuçlar ürettiği gözlenmiştir. İkinci aşamada, incelenen viyadük ayağının doğu ve batı yüzlerinden alınan tomografi ölçümlerinin değerlendirilmesiyle elde edilen tomografi kesitleri birleştirilerek, ayağın iç yapısında bağıl dielektrik permittivite dağılımı (Şekil 3a) ve su içeriğinin kestirimi 3B görüntülenmiştir (Şekil 3b). Elde edilen tomografik çözümlerden viyadük ayağının üst kısımlarında yüzde su içeriği miktarı yaklaşık 4 olarak tespit edilmiştir. Bu değer viyadük ayağının orta ve taban kısımlarında ise 6 civarında olduğu hesaplanmıştır. %w=4-6 arasında değişen su miktarının güvenli düzeylerde olduğu şeklinde değerlendirilmektedir (Leucci, 2012). Bu nedenle yüzde su içeriği miktarının orta kısımlarda bir miktar daha yüksek çıkması normal karşılanmıştır. Sonuç olarak, incelenen viyadük ayağındaki tomografi ölçümlerinden hesaplanan yüzde su içerik miktarının değerlendirilmesiyle, yapıda herhangi bir bozulma olmadığı ve yapının sağlam olduğu tespit edilmiştir.



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



KAYNAKLAR

- Bungey, J., (2003). "Geophysics in pavement engineering meeting of the EIGG." Geol. Soc. HQ, Burlington, London, October 14.
- Davis, J.L. ve Annan, A.P., 1989. Ground Penetrating Radar for High-Resolution Mapping of Soil and Rock Stratigraphy. Geophysical Prospecting, Vol. 37, Pp. 531–551.
- Grandjean G, Gourry J C and Bitri A 2000 Evaluation of GPR techniques for civil-engineering applications: study on a test site J. Appl. Geophys. 45 141–56.
- Kaplanvural, Ismail & Peksen, Ertan & Ozkap, Kerem. (2018). Volumetric water content estimation of C-30 concrete using GPR. *Construction and Building Materials*. 166. 141-146. 10.1016/j.conbuildmat.2018.01.132.
- Kaplanvural, Ismail & Ozkap, Kerem & Peksen, Ertan. (2021). Influence of water content investigation on GPR wave attenuation for early age concrete in natural air-drying condition. *Construction and Building Materials*. 297. 123783. 10.1016/j.conbuildmat.2021.123783.
- Laurens S., Balayssac J. P, Rhazi J. and Arliguie G., „Influence of concrete relative humidity on the amplitude of Ground-Penetrating Radar (GPR) signal“, *Mat. and Struct.* 35, pp. 198–203, 2002.
- Lehmann, B., 2007. Seismic Traveltime Tomography for Engineering and Exploration Applications. EAGE Publications, Houten, The Netherlands.
- Leucci, G., 2012. Ground Penetrating Radar: An Application to Estimate Volumetric Water Content and Reinforced Bar Diameter in Concrete Structures. Journal Of Advanced Concrete Technology. Vol. 10, Pp. 411-422.
- Li, Z., 2011. *Advanced Concrete Technology*. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, USA.
- Lo Monte, Francesco & Lombardi, Federico & Felicetti, Roberto & Lualdi, Maurizio. (2017). Ground-Penetrating Radar monitoring of concrete at high temperature. *Construction and Building Materials*. 151. 881-888. 10.1016/j.conbuildmat.2017.06.114.
- Lualdi, M., Lombardi, F., 2014a. Combining orthogonal polarization for elongated target detection with GPR. *J. Geophys. Eng.* 11 (5). <http://dx.doi.org/10.1088/1742-2132/11/5/055006>.
- M.N. Soutsos, J.H. Bungey, S.G. Millard, M.R. Shaw, A. Patterson, Dielectric properties of concrete and their influence on radar testing, *NDT E Int.* 34 (2001) 419–425.



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



S10	Sümela Manastırı Kaya Yamacında Gerçekleştirilen Jeofizik, Jeolojik ve Jeoteknik Çalışmalar
	Geophysical, Geological and Geotechnical Studies Carried Out on the Rock Slope of Sumela Monastery

Zeynep ÖĞRETMEN AYDIN^{*1}, Ali Erden BABACAN¹, Aysel ŞEREN¹, Kenan GELİŞLİ¹, Hakan ERSOY², Murat KARAHAN², Muhammet Oğuz SÜNETHÇİ²

¹ Karadeniz Teknik Üniversitesi Jeofizik Mühendisliği Bölümü, 61080, TRABZON

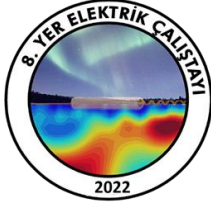
² Karadeniz Teknik Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 61080, TRABZON

E-posta: zogretmen61@gmail.com

ÖZ

Dünyanın her yerinde olduğu gibi ülkemizde de heyelan olaylarının yanı sıra her yıl çok sayıda kaya düşmesi olayı meydana gelmektedir. Yerleşim merkezlerinde meydana gelen kaya düşmeleri, ev veya iş yerlerinde hasarlara, zaman zaman ulaşımın aksamasına ve insanların ölümüne neden olmaktadır. Kaya düşmesi, eğimli yamaçlarda bulunan büyük kaya bloklarının, dış olayların etkisiyle harekete geçmesi olayıdır ve Doğu Karadeniz Bölgesi'nde gelişen kaya düşmeleri en az heyelanlar kadar tehlikeli olmaktadır. Meydana gelen kaya düşmeleri nedeniyle bölgemizdeki en önemli kültür varlıklarından birisi olan Sümela Manastırı ziyaretçilerinin, çalışanlarının ve tesisin zarar görmemesi için bu alanda bir tehlike değerlendirmesine ihtiyaç duyulmuştur. Bu çalışma kapsamında, Sümela Manastırının yer aldığı kaya yamacında bulunan riskli kaya bloklarının düşme potansiyelinin jeolojik, jeofizik ve jeoteknik yöntemlerle araştırılması amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda, kaya yamacında jeofizik yöntemlerden yer radarı (GPR) tekniği kullanılmıştır. Jeolojik-Jeoteknik çalışmalar için kaya blokları üzerinden kaya örnekleri alınmış, örnekler üzerinde laboratuvarında fiziksel ve dayanım testleri uygulanmış ve yerinde ölçüm teknikleri ile kaya malzemesinin mekanik özellikleri araştırılmıştır. Kaya kütleleri üzerinde süreksizlik analizi yapılarak hakim süreksizlikler belirlenmiş, süreksizliklerin konumu ve özellikleri kullanılarak riskli bloklar tanımlanmış, kaya kütle sınıflama sistemleri ile manastırın bulunduğu yamaç kaya düşme riski açısından sınıflandırılmıştır. GPR yöntemi düşme potansiyeli olan bölgelerdeki süreksizlik derinliğini, yönelimini ve devamlılığını ortaya koymak amacıyla kullanılmış, riskli bloklar için denetleyici süreksizlik takımları belirlenmiştir. Kaya yamaçta düşey ve yatay profillerde alınan GPR ölçüleri işlenerek değerlendirilmiş ve yamacın 2 ve 3 boyutlu olarak içyapısı görüntülenerek çatlak, kırık durumu ve bu kırıkların karakterizasyonu ortaya konulmuştur. Yapılan jeolojik, jeofizik ve jeoteknik çalışmalardan elde edilen sonuçlarla riskli kaya bloklarının düşme potansiyeli ortaya konulmuş olup alınması gereken tedbirler belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kaya düşmesi, Sümela Manastırı, GPR



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



ABSTRACT

As in all parts of the world, in addition to landslide events many rockfall events occur in our country every year. Rockfalls that occur in settlement areas cause damage to homes or workplaces, disruption of transportation from time to time, and human death. Rockfall is the event that large rock blocks on sloping slopes are activated by the effect of external events, and rockfalls that develop in the Eastern Black Sea Region are at least as effective as landslides. A hazard assessment was needed in order to prevent any damage to the visitors, employees and facility of the Sümela Monastery, which is one of the most important cultural assets in our region due to rockfalls. Within the scope of this study, it is aimed to investigate the fall potential of risky rock blocks on the rock slope where Sümela Monastery is located by geological, geophysical and geotechnical methods. For this purpose, Ground Penetrating Radar (GPR) technique, one of the geophysical methods, was used on the rock slope. For the geological-geotechnical studies, rock samples were taken from the rock blocks, physical and strength tests were applied on the samples in the laboratory, and the mechanical properties of the rock material were investigated with on-site measurement techniques. By making discontinuity analysis on the rock masses, the dominant discontinuities were determined, risky blocks were defined using the location and characteristics of the discontinuities, and the slope where the monastery was located was classified in terms of rockfall risk with rock mass classification systems. The GPR method was used to reveal the depth, orientation and continuity of the discontinuity in the areas with the potential to fall, and supervisory discontinuity sets were determined for the risky blocks. GPR measurements taken in vertical and horizontal profiles on the rock slope were processed and evaluated, and the internal structure of the slope was displayed in 2 and 3 dimensions, and the crack, fracture status and the characterization of these fractures were revealed. With the results obtained from the geological, geophysical and geotechnical studies, the fall potential of risky rock blocks has been revealed and the precautions to be taken have been determined.

Keywords: Rockfall, Sumela Monastery, GPR

GİRİŞ

Dünyanın her yerinde olduğu gibi ülkemizde de heyelan olaylarının yanı sıra her yıl çok sayıda kaya düşmesi olayı meydana gelmektedir. Yerleşim merkezlerinde meydana gelen kaya düşmeleri, ev veya iş yerlerinde hasarlara, zaman zaman ulaşımın aksamasına ve insanların ölümüne neden olmaktadır. Kaya düşmesi, eğimli yamaçlarda bulunan büyük kaya bloklarının, dış olayların etkisiyle harekete geçmesi olayıdır ve Doğu Karadeniz Bölgesi'nde gelişen kaya düşmeleri en az heyelanlar kadar tehlikeli olmaktadır. Bölgemizdeki en önemli kültür varlıklarından birisi olan Sümela Manastırı Trabzon'un Maçka ilçesinin Altındere Mahallesi sınırları içinde yer almaktadır. Altındere vadisine hakim Karadağ'ın eteklerinde sarp bir kayalık üzerine kurulmuş olan Sümela Manastırı, Maçka ilçesinin 17 km güneyinde, vadiden yaklaşık 300 metre yükseklikte bulunmaktadır. Manastır tarihi, kültürel ve turizm açısından önemli bir yapı olmasından dolayı her yıl yerli yabancı yaklaşık 500 bin kişi tarafından ziyaret edilmektedir. 2001 yılında Sümela Manastırı güneybatı yamacında kaya düşmeleri meydana gelmiş ve manastır sosyal tesisleri ile ulaşım yolunun bir kısmı zarar görmüştür. Sümela Manastırı kaya yamacında zaman zaman kaya düşmeleri meydana gelmektedir. Kopma ve düşmeler kırıklı çatlaklı, bol eklemli volkanik kayaların dik yamaç zonlarında gerçekleşmektedir. Düşme zonundan itibaren

yuvarlanma mesafesi ve yamaç eğimi fazla olduğu için çok küçük kaya parçaları bile çok büyük hasarlara sebebiyet verebilmekte ve ziyaretçi, çalışan ve tesis için güvenlik problemi oluşturmaktadır (Gelişli vd. 2011). Bu kapsamda bu çalışmada Sümela Manastırının yer aldığı kaya yamacındaki riskli kaya bloklarının düşme potansiyelinin jeolojik, jeofizik ve jeoteknik yöntemlerle araştırılması yapılmıştır.

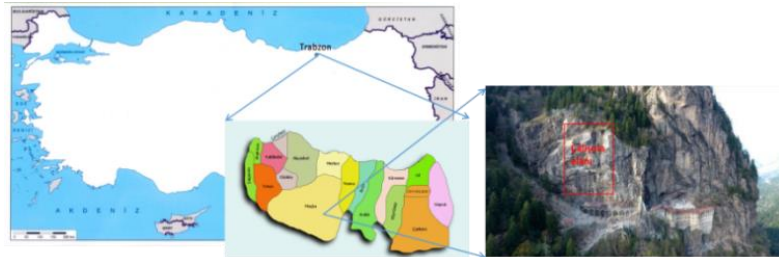
YÖNTEM

Jeolojik-Jeoteknik çalışmalar; Bu çalışmada incelenen kaya kütlelerinin süreksizlik özelliklerini belirlemek amacıyla her bir süreksizlik takımı için ayrı ölçümler yapılmış, farklı süreksizlik takımları için, o süreksizlik takımının doğrultusuna dik ölçüm hatları belirlenmiş ve bu hatlar boyunca süreksizliklerin özellikleri tespit edilmiştir. Hat etüdü çalışmalarında ISRM (1981) tarafından önerilen tanımlamalara bağlı kalınarak ilk olarak mevcut süreksizliklerin yönelimleri belirlenmiş, daha sonra süreksizlik ara uzaklığı, açıklığı, devamlılığı, süreksizlik yüzeylerinin pürüzlülüğü ve dalgalılığı, süreksizlik yüzeylerindeki bozuşma, su ve dolgu durumu gibi özellikler incelenmiştir.

Jeofizik çalışmalar; Bu çalışmada kullanılan jeofizik yöntem olan yer radarı yöntemi (GPR); kayaların iç yapısını ayrıntılı bir şekilde görüntüleyebilen bir elektromanyetik (EM) yöntemidir. Kaya içerisine gönderilen ve zaman içinde değişen yüksek frekanslı EM alanlar kullanılarak incelemeler yapılmaktadır (Daniels, 1996; Annan, 2003).

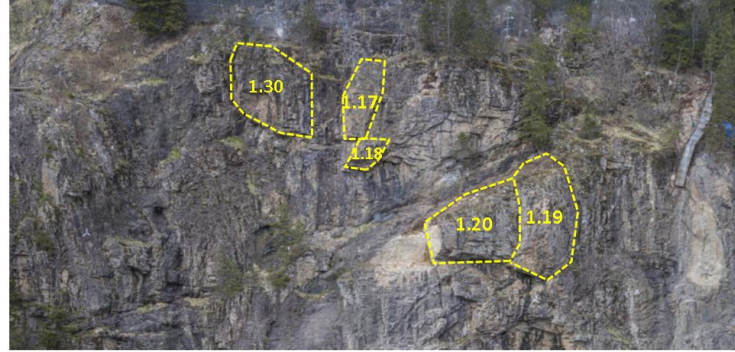
YAPILAN ÇALIŞMALAR

Bu çalışma kapsamında Sümela Manastırı (Şekil 1) kaya yamacındaki riskli olan kaya blokları incelenmiş ölçüm yapma imkanı dikkate alınarak gerekli görülen bloklar (1.17, 1.18, 1.19, 1.20 ve 1.30 olarak adlandırılan) üzerinde düşey hatlar belirlenerek bu hatlar boyunca jeolojik ve jeofizik çalışmalar yapılmıştır (Şekil 2).



Şekil 1. Çalışma alanı yer bulduru haritası ve çalışma alanını gösteren fotoğraf

Bunların haricinde yamaçta yer alan riskli olabilecek diğer bloklar gözlemsel olarak değerlendirilmiştir. Bu bloklar üzerinde her hat için 3 noktada Schmidt çekici ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bahsedilen bloklarda 500 ve 800 MHz merkez frekanslı antenler kullanılarak kaya yamacı boyunca dağcılar yardımıyla GPR ölçümleri toplanmıştır. Toplanan veriler gerekli veri işlem adımlarından geçirilerek radargramlar oluşturulmuştur. Tüm bu veriler değerlendirilerek bloklar için düşme riski olup olmadığı, risk söz konusu ise gerekli önlemlerin ne olacağı hakkında değerlendirmeler yapılmıştır.



Şekil 2. Kaya yamacında bulunan ve ölçüm yapılan riskli blokların görünümü

SONUÇLAR

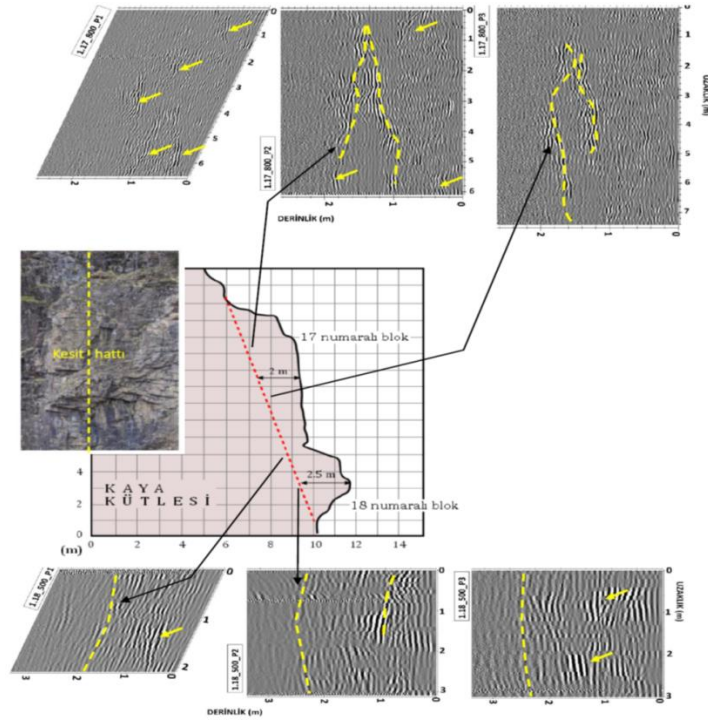
Bu çalışma kapsamında Sümela Manastırının yer aldığı kaya yamacında bulunan blokların kütle hareketi yönünden riskleri jeolojik, jeofizik ve jeoteknik yöntemler kullanılarak araştırılmış, aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

-Yapılan süreksizlik analizleri, arazi ve laboratuvar deneyleri sonucunda elde edilen veriler değerlendirilerek Sümela Manastırının yer aldığı kaya yamacın bulunduğu kısmın “orta riskli yamaç (risk sınıfı 3)” sınıfına girdiği belirlenmiştir. Bu durumda özellikle yamacın stabilitesinin hafif tedbirlerle (blon, ankraj, duraysız blokların alınması, basit hafif çitler) sağlanabilir nitelikte olduğu anlaşılmıştır.

-1.17 numaralı blok üzerinde yapılan GPR ölçümlerinde; her profilde bloğun yaklaşık 2 metre içinde süreksizlikler belirlenmiştir. Bu kesitlerden görülebileceği gibi blok yüzeye kadar çok kırıklıdır. Bu derinlikten sonra kaya çatlaksız ve masiftir. 135/72 duruşlu bu süreksizlik yamaç dışına doğru eğimlidir. Aynı süreksizlik 1.17 numaralı bloğun hemen yanında bulunan 1.18 numaralı blokta yaklaşık 2.5 metre derindedir. Bunun nedeni ise bloğun daha çıkıntılı olmasından kaynaklanmaktadır.

-1.17 ve 1.18 numaralı her iki bloğunda askıda olması, parçalı bir yapı sunması ve devamlılığı olan süreksizler içermesi, dayanım, index, verileri nedenleri ile blokların üstten başlanarak tasfiye edilmesi önerilmektedir (Şekil 71'deki kırmızı kesikli çizgi takip edilerek).

- Kaya kütlelerinin içyapısının görüntülenmesinde kullanılan yöntemlerden biri olan GPR yöntemi Sümela Manastırının kaya yamacı gibi zor ortam koşullarında ve ölçüm alımının çok zor olduğu blokların kütle hareketi yönünden risklerinin araştırılması adına başarılı bir şekilde uygulanabilmiştir ve bu çalışmanın gelecekteki benzer araştırmalara öncülük edeceği düşünülmektedir.



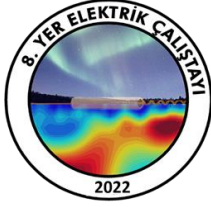
Şekil 3. 1.17 ve 1.18 numaralı bloklar için alınan ölçümlerden oluşturulan GPR kesitleri ile jeolojik, jeoteknik ve GPR verileri kullanılarak oluşturulan model

TEŞEKKÜR

Bu çalışmada verdikleri lojistik desteklerden dolayı Trabzon Valiliği Yatırım İzleme ve Koordinasyon ekibi ile Kuzey Endüstriyel Dağcılık ekibine teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

- Annan A.P., 2003. Ground Penetrating Radar Principles, Procedures & Applications. Mississauga, On, Canada: Sensors & Software Inc.
- Daniels, D.J., 1996. Surface-Penetrating Radar. Electronics & Communication Engineering Journal, 8, 165-182.
- Gelişli K., Şeren A., Babacan A.E., Catakli A., Ersoy H. ve Kandemir R. 2011. The Sumela Monastery slope in Macka, Trabzon, Northeast Turkey: rock mass properties and stability assessment, Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 70, 4, 577-583.
- ISRM (International Society for Rock Mechanics), 1981. ISRM Suggested Methods: Rock Characterization, Testing and Monitoring. E. T. Brown (ed.), Pergamon Press, London, p. 211



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



S11

FloatTEM: Transientelectromagnetics on lakes

B.Tezkan*¹, M.Küpper, P.Yogeshwar

¹ *Institute of Geophysics and Meteorology, University of Cologne, Germany*

E-posta:tezkan@geo.uni-koeln.de

**Sunumu yapacak yazar*

ABSTRACT

Geophysical surveys often leave out water covered areas due to in-accessibility, leading to a lack of resolution in derived subsurface images and consequently leading to interpretation uncertainty. To close this gap, we have developed a floating TEM system (FloatTEM) at the University of Cologne that can be used to conduct transient electromagnetic measurements on lakes. FLoatTEM system can be used in anchored and continuous mode for subsurface imaging of conductivity down to 200 m depth. The first successful measurements with this system in anchored mode were realized on a volcanic lake in Eifel, Germany yielding to very promising results.

We present the first study using a combination of anchored and continuously boat-towed TEM soundings to image a volcanic hydrothermal system with intense CO₂ outgassing areas below the Furnas volcanic intra-caldera lake on the Azores archipelago, Portugal. Our floating TEM setup consisted of a frame of plastic drain pipes, composing an 18 m x 18 m in-loop configuration. During the field survey 52 stations were measured while the boat and the pipe construction were anchored on the lake. In order to provide a dense data coverage in the northern lake area where intense CO₂ outgassing was detected, measurements were conducted in continuous mode while the boat was slowly pulling the FloatTEM system. The continuous driven measurements resulted in around 500 soundings near the fumarolic fields. The data is inverted one-dimensionally using conventional inversion schemes. Possible 2D effects on the 1D inversion results were also examined. Parameter uncertainty estimates were derived from inversion statistics and an equivalence modelling approach. Both, the boat-towed and anchored approach led to well comparable consistent TEM data and inversion results.

The inversion results show a well conducting anomaly in approximately 50 m below the water level in the northern part of the lake, that correlates well to the already known CO₂ outgassing anomalies and the hydrothermal system. Towards the main lake in the southern part, the good conductor dips downwards to approximately 120 m depth. This well conducting structure is currently interpreted as a shallow aquifer that feeds the surface hydrothermal manifestations.



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



S12	Doliche Antik Kenti (Gaziantep) 2020-2021 Jeofizik Araştırmaları
	Doliche Ancient City (Gaziantep) 2020-2021 Geophysical Surveys

Çağlayan BALKAYA^{*1,2}, Yunus Levent EKİNCİ³, Olcay ÇAKMAK², M. Ali KAYA⁴, Michael BLÖMER⁵, Dilek COBANOGU⁵

¹ Süleyman Demirel Üniversitesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, Isparta

² Süleyman Demirel Üniversitesi, Deprem ve Jeoteknik Araştırma Merkezi, Isparta

³ Bitlis Eren Üniversitesi, Sanat Tarihi Bölümü, Isparta

⁴ Trakya Üniversitesi, Mimarlık ve Şehir Planlama Bölümü, Edirne

⁵ Münster University, Department of Ancient History, Asia Minor Research Centre, Münster

E-posta: cağlayanbalkaya@sdu.edu.tr

ÖZ

Şehitkamil ilçesinde (Gaziantep) konumlanan Doliche/Dülük Antik Kenti MÖ 300 yılları civarında kurulmuştur. Antik dönemlerin önemli askeri ve ticari yollarının üzerinde olması nedeniyle kent etkin olarak Mezopotamya, Suriye, Pers, Yunanistan ve Roma gibi büyük uygarlıkların izlerini yansıtmaktadır. 2020–2021 yılı arkeojeofizik çalışmaları kapsamında, Roma İmparatorluğu Dönemi'ne ait hamam yapısı kalıntılarının batısında konumlanan bir alanda yer radarı ve elektrik özdirenç yöntemleri uygulanmıştır. Kamulaştırılan bu alanda, kazı çalışmaları başlamadan önce, büyük bir antik yapının/mimarinin varlığını gösteren önemli bir iz rastlanmamıştır. 2020 yılı yer radarı uygulamaları, 50 cm aralıklı toplam 162 ölçüm profili üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bu alanlardan elde edilen sonuçlar dikkate alınarak sınırlandırılan bir alanda ise 2021 yılında 1 m aralıklı toplam 23 profil üzerinde dipol-dipol dizilimiyle bir elektrik özdirenç tomografi çalışması gerçekleştirilmiştir. Her iki yöntemden elde edilen verilerin değerlendirilmesi, sığ yüzeyin altında düzenli bir geometri ve uzanım gösteren arkeolojik yapı kalıntılarının olası belirtilerini ortaya çıkarmıştır. Bu bulgular ışığında, araştırma alanda gerçekleştirilen arkeolojik kazılar jeofizik sonuçları doğrulamıştır.

Anahtar Kelimeler: Doliche/Dülük, Arkeojeofizik, Yer radarı, Elektrik Özdirenç Tomografi

ABSTRACT

Doliche/Dülük Ancient City located in Şehitkamil county (Gaziantep) was established around 300 BC. Since the city is on the important military and trading roads of ancient times, it reflects the traces of great civilizations such as Mesopotamian, Syrian, Persian, Greek and Roman. As part of the archaeo-geophysical investigations of the years 2020-2021, ground-penetrating radar and electrical resistivity methods were applied in an area west of the remains of the bath structure from the Roman Empire. In this expropriated area, there were no significant traces of a large ancient structure / architecture before the excavations began. In 2020, ground-penetrating radar applications were performed on a total of 141 measurement profiles at a distance of 50 cm. Taking into account the results from the area, in 2021, an electrical resistivity tomography survey was conducted on a total of 23 profiles at a distance of 1 m with the dipole-dipole array in a limited area. Evaluation of the data from both methods revealed possible anomalies of archaeological remains that have a



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



regular geometry and extension under the shallow surface. In the light of these findings, the archaeological excavations carried out in the study area confirmed the geophysical results.

Keywords: Doliche/Dülük, Archaeogeophysics, Ground-penetrating Radar, Electrical Resistivity Tomography

GİRİŞ

MÖ 300 yılları civarında kurulan Doliche/Dülük Gaziantep ilinin yaklaşık 10 km kuzeyinde yer almaktadır (Şekil 1a). Antik dönemlerin önemli ticari ve askeri yollarının üzerinde olması nedeniyle Mezopotamya, Suriye, İran, Yunanistan ve Roma gibi büyük uygarlıklara ev sahipliği yapmıştır. Kentin yakınlarındaki Dülük Baba Tepesi'nin doruklarında Kuzey Suriye ve Anadolu'da tapınım gören fırtına ve gökyüzü tanrısı Teşup-Hadad'a ait merkezi bir kutsal alan bulunduğu çok erken dönemlerden itibaren bilinmektedir. MS ilk üç yüz yılda, aynı tanrıya Jüpiter Dolichenus olarak Roma İmparatorluğu'nda tapınılmıştır. Kentin gelişmesinde, bu tanrıya ait kutsal alanın varlığı önemli bir rol oynamıştır. Jüpiter Dolichenus Kültü, Pers kralı I. Şapur tarafından kentin yerle bir edilmesiyle, son bulmuştur. MS 5. yüzyılda Doliche'de bir piskoposluk merkezi kurulurken, MS 7. yüzyıldan itibaren Bizans ve Arap Devletleri arasında meydana gelen sınır savaşlarında kent önemli bir rol oynamıştır. Selçuklular'ın 1156 yılında Doliche Antik Kentini tahrip etmesiyle komşu Ayıntap/Gaziantep karşısında önemini tamamen yitirmiştir (Winter ve Blömer, 2018).

Keber Tepe (Şekil 1b) üzerindeki kazı çalışmaları, Alman Araştırma Kurumu (DFG) tarafından desteklenen bir proje kapsamında 2015 yılında başlamıştır. 2016 yılında Tepenin güney yamacında konumlanan ve önce bir villa mimarisine ait olduğu düşünülen Erken Bizans Dönemi bazilika bu çalışmayla ortaya çıkarılmaya başlanmıştır. Kentte ilk jeofizik çalışma, 2016 yılında, Viyana Üniversitesi Merkez Araştırma Enstitüsü Jeofizik Kürsüsü'nden Dr. Sırrı Seren tarafından yer radarı uygulamasıyla gerçekleştirilmiştir. Seren bu çalışmasında, genel olarak, arkeolojik olarak bir tabakalaşmanın varlığının belirlenemediğini belirtmiştir. 2019 yılından itibaren, kentte jeofizik araştırmalar Süleyman Demirel, Trakya ve Bitlis Eren Üniversitesi'nden araştırmacılar tarafından yer radarı ve elektrik özdirenç yöntemleri uygulanarak gerçekleştirilmektedir. Genel olarak, bu yöntemlerin sonuçlarının birbirini desteklediği oldukça başarılı çalışma örnekleri literatürden bilinmektedir (Balkaya vd 2018, Akca vd 2019, Yılmaz vd 2019). Bu bağlamda, kentin bazilika yapısı ve civarında 2019 ve 2020 yıllarında bu yöntemlerle bir arkeojeofizik araştırma gerçekleştirilmiştir. Balkaya vd (2021), bu çalışmanın sonuçları kapsamında, Dr. Seren'in de belirttiği gibi, kentin arkeolojik yapı kalıntılarıyla içinde buldukları toprak arasında ölçülebilir fiziksel kontrastın görece az olması nedeniyle kentte gerçekleştirilen jeofizik çalışmanın oldukça zorlu bir görev üstlendiğini ortaya koymuştur. Her ne kadar her iki yöntemin sonuçları tamamıyla birbirini desteklemese de bunların birlikte değerlendirilmesiyle ulaşılan bulgular kazı sonuçlarıyla görece örtüşmektedir. Bu kazanım bile maliyetli ve zaman alıcı arkeolojik kazı çalışmalarının başlangıç noktasının belirlenmesine oldukça önemli bir katkı sağlamaktadır. Doliche/Dülük Antik Kenti 2020–2021 yılı arkeojeofizik çalışması, Keber Tepe üzerinde konumlanan ve Roma İmparatorluk Dönemi'ne ait hamam yapısı kalıntılarının batısında kalan görece küçük bir alanda yer radarı yöntemi ve elektrik özdirenç tomografi (EÖT) tekniği uygulanarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 1b). Her iki yöntemden elde edilen verilerin değerlendirilmesi, sığ yüzeyin altında düzenli bir geometriye ve uzanıma sahip olan arkeolojik yapı kalıntılarının olası belirtilerini ortaya çıkarmıştır.



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



YÖNTEM

Yer radarı çalışması, Şekil 1b'de mavi çizgiler arasında görülen görece küçük ölçekteki bir alanda 500 MHz merkez frekansına sahip kapalı bir anten sistemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Araştırma alanında toplam 162 GK doğrultulu profil üzerinde; profiller arası 50 cm, iz aralığı 5 cm ve zaman penceresi ise 100 ns olacak şekilde yansıma verileri toplanmıştır. Değerlendirmede; kazanç, bant geçişli süzgeç ve arka plan etkisinin giderilmesi gibi temel veri işlem teknikleri uygulanmıştır (GPR-SLICE v7.0). EÖT çalışması ise yer radarı çalışmasının sonuçları dikkate alınarak Şekil 1b'de yeşil renkle sınırlandırılan bir alanda dipol-dipol elektrot dizilimi kullanılarak GB-KD doğrultulu 23 profil üzerinde toplanmıştır. Uygulamada elektrotlar arası uzaklık 70 cm ve profiller arası uzaklık ise 1 m olarak seçilmiştir. Toplanan veriler iki ve üç boyutlu ters çözüm teknikleriyle değerlendirilerek görselleştirilmiştir (Günther vd 2006, Rücker 2010).

SONUÇLAR

2020–2021 yılı, Doliche antik kenti arkeojeofizik uygulamaları yeni kamulaştırılan bir alanda yer radarı ve EÖT uygulamalarıyla gerçekleştirilmiştir. Jeofizik çalışma öncesi, hafif eğimli ve küçük asmalarla kaplı olan alanda antik mimariyle ilişkili olabilecek hiçbir iz bulunmamaktaydı. Toplanan veri kümelerinin değerlendirilerek yeraltının 2B ve 3B görüntülenmesiyle bu alan için her iki yöntem sonuçlarının birbirini desteklediği görülmüştür. Oldukça umut verici olan bu belirtilerin ölçeği ve antik kentin sivil merkezi olarak tanımlanan yere yakınlığı nedeniyle arkeologlar tarafından bir tür kamu yapısı olabileceği öngörülmüştür. Jeofizik çalışma sonrasında belirtilerin gözlemlendiği alanlarda başlayan kazı çalışmaları binanın Roma döneminden kalma bir tapınak olabileceğini ortaya koymuştur.

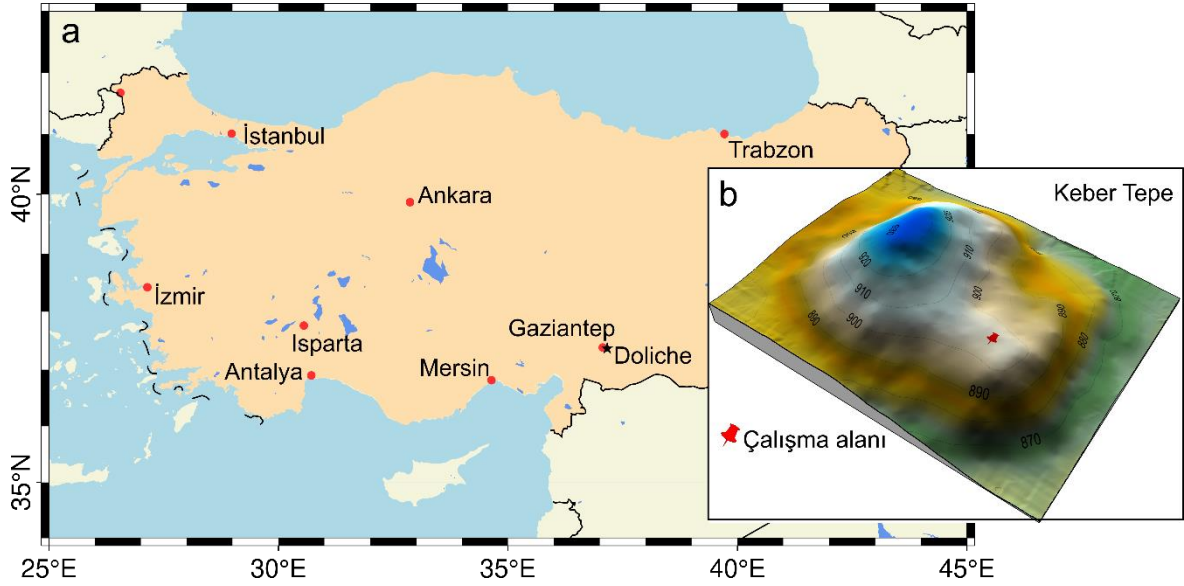
TEŞEKKÜR

Doliche antik kenti kazı başkanı Prof. Dr. Engelbert Winter nezdinde jeofizik alan çalışmasına katkıda bulunan ekip üyelerine teşekkür ederiz.

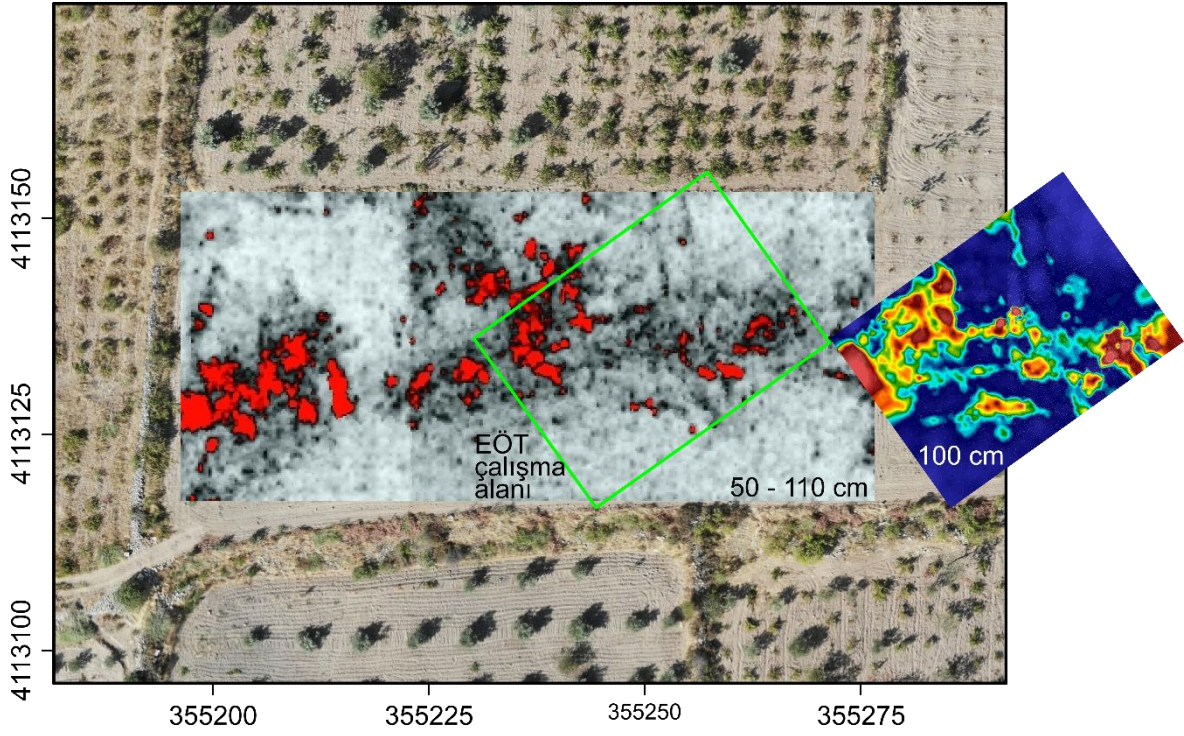
KAYNAKLAR

- Akca İ, Balkaya Ç, Pülz A, Alanyalı HS and Kaya MA 2019, Integrated geophysical investigations to reconstruct the archaeological features in the episcopal district of Side (Antalya, Southern Turkey): *Journal of Applied Geophysics*, 163, 22–30.
- Balkaya Ç, Kalyoncuoğlu ÜY, Özhanlı M, Merter G, Çakmak O and Güven İT 2018. Ground-penetrating radar and electrical resistivity tomography studies in the biblical Pisidian Antioch city, southwest Anatolia: *Archaeological Prospecting*, 25, 285–300.
- Balkaya Ç, Ekinci YL, Çakmak O, Blömer M, Arnkens J and Kaya MA 2021, A challenging archaeo-geophysical exploration through GPR and ERT surveys on the Keber Tepe, City Hill of Doliche, Commagene (Gaziantep, SE Turkey): *Journal of Applied Geophysics*, 186, 104272.
- Günther T, Rücker C and Spitzer K 2006. Three-dimensional modelling and inversion of dc resistivity data incorporating topography – II. Inversion: *Geophysical Journal International*, 166, 506–517.

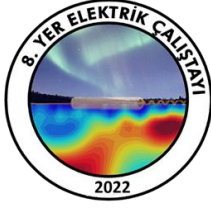
- Rücker C 2010. *Advanced Electrical Resistivity Modelling and Inversion using Unstructured Discretization*. PhD thesis, University of Leipzig.
- Rücker C, Günther T and Spitzer K 2006. Three-dimensional modelling and inversion of dc resistivity data incorporating topography – I. Modelling: *Geophysical Journal International*, **16**, 495–505.
- Winter E and Blömer M 2018, *Doliche (Eds, Salgar N and Çobanoğlu D): Şehit Kamil Belediyesi, Gaziantep*.
- Yılmaz S, Balkaya Ç, Çakmak O and Oksum E 2019. GPR and ERT explorations at the archaeological site of Kılıç village (Isparta, SW Turkey): *Journal of Applied Geophysics*, **170**, 103859.



Şekil 1 a) Doliche antik kenti yer bulduru haritası b) Keber Tepe ve çalışma alanı



Şekil 2 a) Yer radarı ve EÖT sonuçlarının karşılaştırılması



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



S13	Yer Radarı Yönteminde Radargramlara ait Dielektrik Katsayısı, Hacimsel Su İçeriği ve Özdirenç Haritalarının Görüntülenmesi
	Displaying Dielectric Coefficient, Volumetric Water Content and Resistivity Maps of Radargrams in Ground Penetrating Radar Method

Selma KADIOĞLU*¹

¹ Ankara Üniversitesi Müh. Fak. Jeofizik Mühendisliği Bölümü

E-posta: kadioglu@ankara.edu.tr

*Sunumu yapacak yazar

ÖZ

Yer radarı (GPR) yönteminde radargramlar üzerinde süreksizliklerin belirlenmesi kolay olsa da yeraltı yapısının özellikleri konusunda diğer yöntemlere göre zorluk çekilmektedir. Bu durum özellikle jeoloji ve maden çalışmalarında yorumu güçleştirmektedir. Bu nedenle jeolojik yorumlama amaçlı genellikle başka bir jeofizik yöntemden de yararlanılmaktadır. Son dönemlerde toplam EM dalga alanının kaynak alana oranı analizleri ile radargrama ait dielektrik katsayısı kesiti elde edilmiş ve bu kesitten yararlanarak hacimsel su içeriği, iletkenlik veya özdirenç haritalarının eldesi mümkün olmuştur. Bu çalışmada yer radarı yönteminde saçılmış dalga alanı teorisi ve maden galerisi içinde yapılmış bir uygulama ile birlikte sunulacaktır. Çalışmanın yeraltı fiziksel özelliklerinin belirlenmesinde, özellikle maden galerileri gibi diğer jeofizik yöntemlerin uygulanmasında yaşanan zorlu bölgelerde yeni bir gelişme olacağı düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Yer Radarı (GPR), saçılmış EM dalga alanı, dielektrik katsayısı kesiti, hacimsel su içeriği kesiti, elektrik özdirenç kesiti

ABSTRACT

There are difficulties in the properties of the underground structure compared to other methods, although it is easy to determine the discontinuities on the radargrams in the ground radar (GPR) method. This situation makes interpretation difficult especially in geology and mining studies. For this reason, another geophysical method is generally applied for geological interpretation. Recently, the dielectric coefficient section of the radargram has been obtained with the analysis of the ratio of the total EM wave area to the source area, and it has been possible to obtain volumetric water content, conductivity or resistivity maps by using this section. In this study, scattered wave field theory in ground radar method will be presented with an application realized inside a mine gallery. It is thought that the study will be a new development in the determination of the underground physical properties, especially in the application of other geophysical methods such as mine galleries in difficult regions.

Keywords: Ground Penetrating Radar (GPR), EM wave field, dielectric coefficient section, volumetric water content section, electric resistivity section



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



GİRİŞ

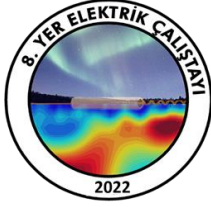
GPR yöntemi yüksek frekanslı elektromanyetik (EM) yöntemdir. Yöntemin en büyük avantajı hedef araştırma derinliğine uygun merkez frekanslı antenlerin kullanılması ile yeterli duyarlılıkta sonuçların elde edilebilmesidir. GPR yöntemi genel olarak bir profil üzerinde belirli aralıklarla yer içine yollanan yüksek frekanslı elektromanyetik (EM) kaynak alanın yer içinde herhangi bir süreksizliğe çarparak yansması ve saçılması sonucu alıcı antene zamanın fonksiyonu olarak gelen toplam EM dalga alanını temsil eden izlerin kaydedilmesi ve işlendikten sonra tüm izlerin konumlarına göre sıralanmış radargrama adı verilen GPR kesit görüntülenmesi esasına dayanmaktadır.

Yöntemin kullanımının kolay olması ve çok hızlı veri toplanabilmesi, veri toplama sırasında çalışma alanında herhangi bir tahribat oluşturmaması (non-invasive), santimetre düzeyinde yüksek çözünürlüklü iki boyutlu (2B) ve üç boyutlu (3B) yeraltı görüntülemenin yapılabilmesi en önemli avantajlarıdır. Böylece yapıların konum ve derinliklerinin çok daha net belirlenebilmesi, özellikle 3B görüntüleme ile karmaşık yapı bölgelerinde aranan özel yapının kararlaştırılması ve oldukça etkin görüntü ile sunulabilmesi özellikleri nedeniyle tüm sığ araştırmalarda son yıllarda en çok kullanılan jeofizik yöntem olmuştur (Kadioğlu 2008; Kadioğlu and Daniels 2008; Kadioğlu, 2017). Ancak Radargramlar üzerinde yapısal süreksizliklerin belirlenmesi kolay olsa da yapının özelliklerini tanımlama konusunda diğer yöntemlere göre zorluk çekilmektedir. Bu durum özellikle jeoloji ve maden çalışmalarında yorumu güçleştirmektedir. Bu nedenle ayrıntılı yeraltı görüntüleme yapabilese de yorumu güçleştirmektedir. Sismik ve EM yöntemlerde kullanılan dalga alanı ters çözümleri yeraltı yapısının çok hızlı değişmediği kabulü ile çözüm sunması ve zaman alması nedeniyle belirlenen nod noktalarında çözümün eldesi yapılmaktadır. Ancak GPR yönteminde izlerin duyarlılığın yanal yönde cm, düşey yönde nanosaniye (ns) aralıklı olması bir kesitin ters çözüm ile dielektrik katsayısı değişiminin eldesi bilgisayar hızları ve kapasitesinin artması şartlarına endeksli olarak gelişmektedir. Berkut ve diğ. (2017) sismik yansıma yönteminde çok kullanılan dalga alanı integral çözüm yöntemlerinden WKB kapalı integral yönteminin sadeleştirilerek lineer çözüm elde etmiş ve çok kısa sürede çözüm elde etmenin yolunu açmıştır.

Bu çalışmamızda Berkut ve diğ.(2017) yaklaşımı kullanılarak bir maden galerisi içinde toplanmış GPR verisi radargramına ait dielektrik katsayısı kesiti ve bu kesitten yararlanarak hacimsel su içeriği kesiti, elektrik resistivite kesiti elde edilmiş sonuçlar sunulacaktır.

YÖNTEM

GPR yönteminde doğru dielektrik ortamda ortam karakterizasyonunu belirleme amaçlı tam dalga şekli ve monostatik yaklaşımlar kullanılmıştır (Spagnolini 1997; Kaplanvural et al 2020; Kaplanvural et al 2021). Berkut et al (2017) birleşik WKB yaklaşımına dayalı ters çözüm probleminin basitleştirilmiş bir çözümünü sunmuştur. Bu çözümde verici ve alıcı anten ayrımı yapılmaksızın bir boyutlu (1B) yayılma modeli kullanılmaktadır. Düzgün değişen yeraltı modelleri için derinden gelen GPR tepkileri 1B dalga yayılımının analitik teorisini vermektedir. Zayıf geri saçılmış dalga alanını dikkate alan motive edilmiş WKB yaklaşımına dayanmaktadır. Klasik Bremmer-Brekhovskikh yaklaşımını kullanarak önce kaynak EM dalga alanının kısmi yansımalarından üretilmiş geri saçılmış dalga alanı kapalı çözüm olan dalganın ilerleme yolu boyunca integrali ile tanımlanır. Daha sonra ortamı temsil eden integralde ortamın özelliğini temsil eden yavaş değişen bölümü ile araştırılan dalgacık ayrı ayrı çarpan durumunda ifade edilir. Kaynağı içeren integralin çözümü kolaylıkla elde



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



edilir. Ortamın özelliğini temsil eden göreceli dielektrik geçirgenlik (permittivity) derinliğin bir fonksiyonudur. Derinlik kaynağın gidiş-dönüş zamanına göre tanımlanır. Ancak kaydedilen dalganın özellikleri basit çözüm değildir. Bu nedenle saçılmış dalga alanını temsil eden fonksiyon kaynak alanı temsil eden fonksiyona oranlanarak yeni bir fonksiyon elde edilir. Bu fonksiyon açık integral yaklaşımı ile çözülür. Yerin derinliğe göre göreceli dielektrik geçirgenlik değeri ve derinliği bu fonksiyonu değişkeni olarak hesaplanır. Böylece saçılmış GPR dalga alanı ile kaynak alan arasındaki belirlenen lineer ilişki fonksiyonu ile çok kısa bir sürede ortamın göreceli dielektrik geçirgenlik özelliği belirlenir.

Bu çalışmada gerçek zaman örnekleme ile veri toplama sağlayan Cobra Plug-in GPR SE-40 model monostatik anten kullanılarak bir maden galerisi içinde toplanan ve kırıkları görüntüleme amaçlı işlenen ve görüntülenen radargramlar giriş olarak alındı. Berkut et al (2017) yaklaşımı kullanılarak geliştirilmiş bir MATLAB programı ile göreceli gerçel dielektrik geçirgenlik kesiti, Topp et al (1980) tarafından geliştirilen hacimsel su içeriği ile göreceli dielektrik geçirgenlik arasındaki emprikal bağıntıdan yararlanarak hacimsel su içeriği kesiti ve elektrik özdirenç kesiti elde edildi. Şekil 1. bir maden galerisi içinde toplanan, sırasıyla kırık görüntüleme amaçlı işlenen radargramı, bu radargramın (geri saçılan dalga alanı kesiti) göreceli dielektrik geçirgenlik kesitini, hacimsel su içeriği kesitini ve elektrik özdirenç kesitini temsil etmektedir.

KATKI BELİRTME

Bu çalışmada kullanılan Cobra Plug-in GPR sistemi ve SE40 Model anten **Ankara Üniversitesi Yer Bilimleri Uygulama ve Araştırma Merkezi (YEBİM) Altyapı Projesi, Kalkınma Bakanlığı 2012K120-440** kapsamında satın alınmıştır.

KAYNAKLAR

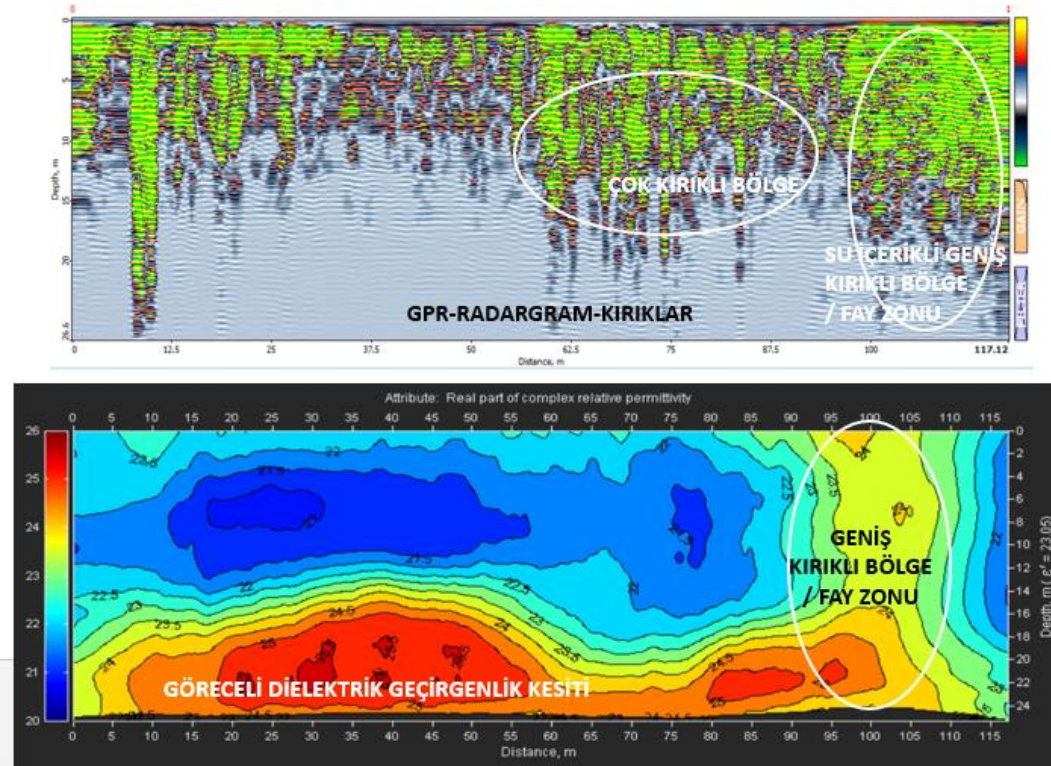
- Berkut, A.I., Edemsky, D.E., Kopeikin, V.V., Morozov, P.A., Prokopovich, I.V., Popov, A.V., 2017. Deep penetration subsurface radar: Hardware, results, interpretation. 9th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar (IWAGPR), Edinburgh, UK. <http://dx.doi.org/10.1109/IWAGPR.2017.7996052>
- Kadioglu, S 2008, Photographing Layer Thicknesses and Discontinuities in a Marble Quarry with 3D GPR Visualization, Journal of Applied Geophysics, 64 (3), p. 109-114.
- Kadioglu, S and Daniels, JJ 2008, 3D Visualization of Integrated Ground Penetrating Radar Data and EM-61 Data to Determine Buried Objects and their Characteristics, Journal of Geophysics and Engineering, 5, p. 448-456.
- Kadioglu, S 2017, Research of the sea-filled airport OGU in the Black Sea, Turkey, using ground penetrating radar method, Construction and Building Materials, Special Issue on Ground-Penetrating Radar and Complementary Non-Destructive Testing Techniques in Civil Engineering, Vol 158, 1123-1133.

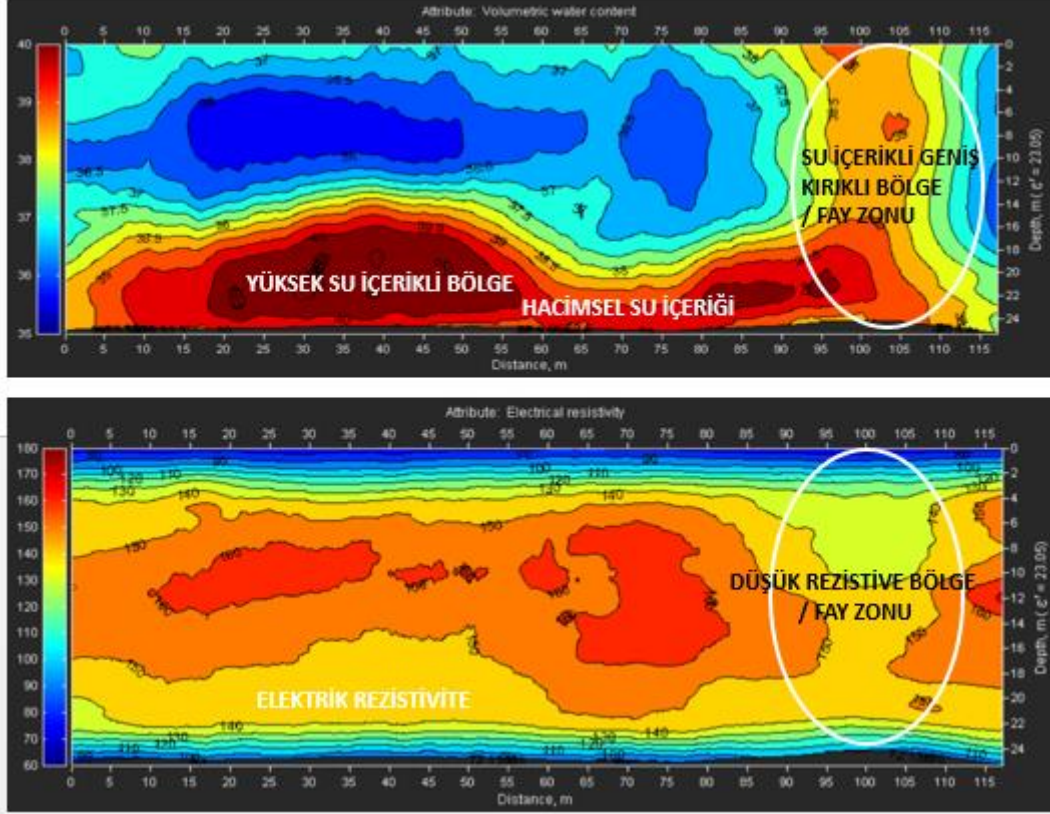
Kaplanvural İ, Peksen E and Ozkap, K 2020, 1D waveform inversion of GPR trace by particle swarm optimization. *Journal of Applied Geophysics*, 181, [10.1016/j.jappgeo.2020.104157](https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2020.104157)

Kaplanvural İ, Ozkap, K and Peksen E, 2021, Influence of water content investigation on GPR wave attenuation for early age concrete in natural air-drying condition, *Construction and Building Materials*, 297, [10.1016/j.conbuildmat.2021.123783](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123783).

Spagnolini U, 1997, Permittivity measurements of multilayered media with monostatic pulse radar, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, vol. 35, No 2, pp. 454-463.

Topp, G. C., Davis, J. L. and Annan, A. P., 1980. Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines. *Water Resources Research*, vol. 16, no. 3, pp. 574–582.





Şekil 1. Kırıkların görüntülediği radargram ve bu radargrama ait göreceli dielektrik geçirgenlik (permittivity) kesiti



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



S14	Zonguldak, Kocaeli, Uşak ve Konya Sınırlarında Kalan Bölgenin Litosfer Yapısının Uzun Periyod Manyetotellürik Yöntem İle Araştırılması: Uzak kalite kontrolü ile veri toplama
	Investigation Lithospheric Structure of the region bounded by Zonguldak, Kocaeli, Uşak and Konya Districts with Long Period Magnetotelluric Data: data acquisition with remote quality control

M. Emin CANDANSAYAR*¹, İsmail Demirci¹, N. Yıldırım GÜNDOĞDU¹

¹ Ankara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Müh. Böl., Jeofizik Modelleme Grubu, Gölbaşı 50.Yıl Kampüsü, Gölbaşı- Ankara

E-posta: candansayar@ankara.edu.tr

*Sunumu yapacak yazar

ÖZ

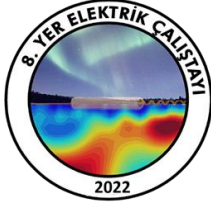
Zonguldak, Kocaeli, Uşak ve Konya il sınırları arasında kalan alanın litosfer yapısının incelenmesi amacı ile uzun periyod manyetotellürik ölçüler alınmıştır. Bu veriler, daha önce geniş bant manyetotellürik ölçü alınan yaklaşık Güney-Kuzey doğrultulu dört doğrultu boyunca toplanmıştır. Ülkemizde ilk kez, manyetotellürik veri toplama sırasında hücresel ağ kullanan modem ile gerçek zamanlı veri aktarımı yapılmıştır. Böylece, veri toplama sırasında veri kalitesi kontrol edilmekte, veri kalitesi iyi değilse istasyon yeri değiştirilebilmektedir. Bu çalışmada, uzun periyod MT veri toplama sırasında, verilerin gerçek zamanlı analizi ve ölçülen verilerin ilk veri işlem sonuçları sunulacaktır.

Anahtar Kelimeler: Uzun periyod, manyetotellürik, gerçek zamanlı, veri toplama

ABSTRACT

Long-period magnetotelluric measurements were taken to examine the lithosphere structure of the area between the provincial borders of Zonguldak, Kocaeli, Uşak and Konya. These data were collected along the approximately South-North quadrilateral for which broadband magnetotelluric measurements were previously taken approximately 15 years ago. For the first time, real-time data transfer was made via cell modem during magnetotelluric data collection in Turkey. Thus, data quality is controlled during data collection, and if the data quality is not good, the station location can be changed. In this study, real-time analysis of data and initial data processing results of measured data during long period MT data collection will be presented.

Keywords: Long period, magnetotelluric, real time, data acquisition



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



GİRİŞ

Yer içinin derin özdirenç yapısını (0.1 km ile 40 km arası derinlik) incelemede en çok tercih edilen Jeofizik elektromanyetik yöntemlerden birisi Manyetotellürik yöntemidir.

Manyetotellürik yöntem ile üst kabuk-alt kabuk sınırı ile kabuk içinde tektonik yapıların, kenet kuşaklarının ve fay zonlarının araştırılmasında son 15 yılda yapılmış birçok çalışma bulunmaktadır (ör. Becken vd. 2011; Zeng vd. 2015). Benzer şekilde ülkemizde de kabuk içinde kalan (ilk 20-30 km), özellikle Batı Anadolu'da Kuzey Anadolu Fay Zonunun özelliklerini incelemek ve tektonik amaçlı çalışmalar yapılmıştır (Tank vd 2005; Ulugergerli vd 2007; Kaya vd. 2009, 2013; Tank, 2012). Yine Kuzeybatı Anadolu'da üst - alt kabuk ilişkisi, kenet kuşakları ve fay zonlarını araştırmaya yönelik çalışmalar ise önceki TÜBİTAK projemiz kapsamında yapılmıştır (Candansayar vd. 2008, 2010, 2012; Kaya 2010).

Litosfer ve içinde bulunan kabuk ilişkisini araştırmaya yönelik son yıllarda birçok uluslararası proje yapılmıştır. INDEPTH projesi kapsamında Tibet-Himalaya kuşağında yapılan çalışmalar, kıta-kıta çarpışması ile litosfer içinde kabuk erimesi incelenmiştir (Unsworth 2010; Xie 2016). Benzer şekilde kuzey Avrupa'da litosfer araştırılmasına yönelik çalışma ise BEAR (Baltic Electromagnetic Array Research) projesi kapsamında yapılmıştır (Korja 2007).

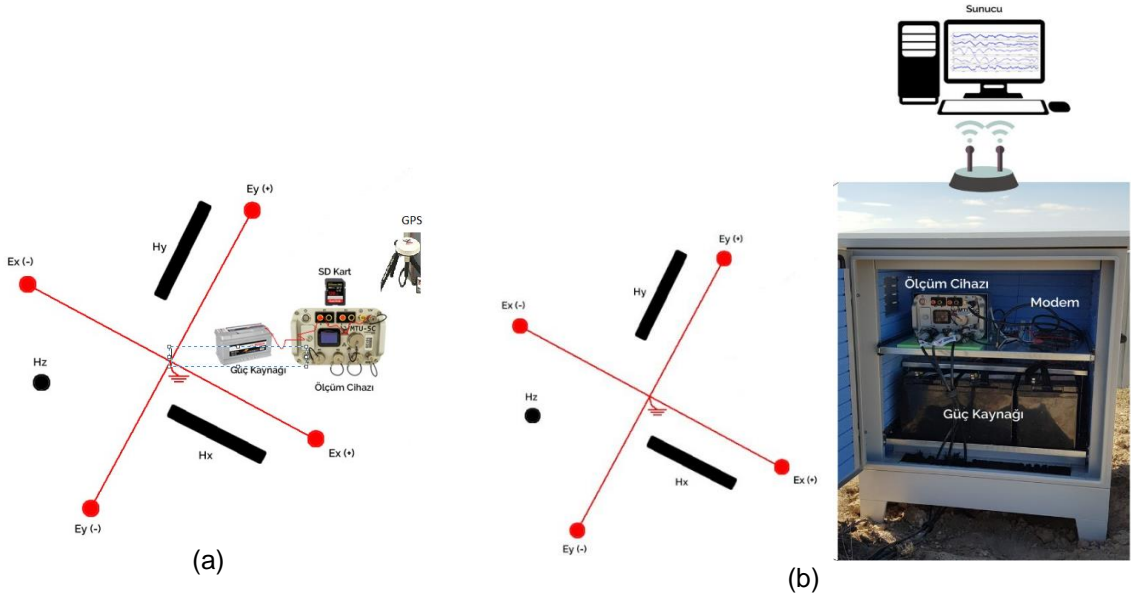
Ülkemizde ise litosferin araştırılmasına yönelik Arap-Avrupa çarpışma zonunda yapılan tek bir çalışma vardır (Türkoğlu vd. 2015). Batı Anadolu' da ise litosferin incelenmesine yönelik bir çalışma bulunmamaktadır. Bu çalışma kapsamında, ilk kez Kuzeybatı Anadolu'nun Zonguldak, Kocaeli, Uşak ve Konya illeri ile çevrili alanın ilk 100 km derinliğe kadar olan litosfer yapısını incelemek amacı ile uzun periyod Manyetotellürik ölçüler alınmıştır. Ölçülerin alınması sırasında, gerçek zamanlı olarak veriler hücrenel ağ aracılığı ile bir sunucu bilgisayara aktarılmıştır. Bu sunumda, uzun periyod MT veri toplamada, uzaktan veri yönetimi için bir iş akış şeması ile bu verilerin gerçek zamanlı veri analizi ve çalışma alanında ölçülen veriler sunulacaktır.

YÖNTEM

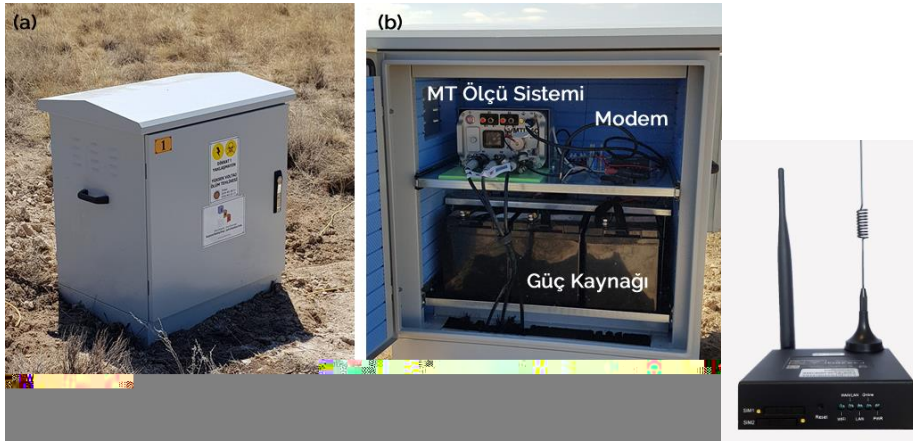
MT yöntemde, elektrik alanın iki bileşeni (E_x ve E_y) ve manyetik alanın üç bileşeni (H_x , H_y , H_z) zamanın fonksiyonu olarak ölçülmektedir. Ölçülen bu E ve H alanların Fourier dönüşümleri alınarak frekans ortamında empedans tensörü ve tipper tensörü kestirilir. Klasik Manyetotellürik ölçü sistemlerinde, ölçülen elektrik ve manyetik alan bileşenleri alıcı ünite içinde bulunan bir SD karta (dahili hafıza) kayıt edilir (Şekil 1a). Bu çalışmada, MT veri toplama sırasında, MT ölçü sistemi veri hattı (GSM operatörü) olan bir modeme bağlanmış ve bu modem aracılığı ile ölçüler 10 dakikalık paketler halinde veri hattı aracılığı ile çalışma ofisindeki ana terminal olarak kullanılan bilgisayara aktarılır. Bu aktarılan verilerin gerçek zamanlı olarak temel veri işlemi yapılarak veri kalitesi kontrol edilebilir. Böylece, veri toplama sırasında veri kalitesi incelenebilir, elektrik veya manyetik alan ölçülerinin her bir bileşenini üzerindeki olumsuz etkilere müdahale edilebilir, aşırı ısınmadan dolayı aletin kapanması ve anlık olaylar nedeniyle oluşan veya oluşabilecek satürasyonlar hakkında anında bilgi edinilebilir.

Uzun periyod manyetotellürik ölçülerinde arazide bir istasyonda ölçü alma süresi istenilen periyoda ($T > 8000$ sn) inebilmek için 10-15 günü bulmaktadır. Bu nedenle, Uzun periyod MT

ölçü sisteminin arazide güvenliğinin sağlanması ve olumsuz hava koşullarından olabildiğince az etkilenmesi için bir kutu düzeneği tasarlanmıştır. Söz konusu düzenek içinde Phoenix marka MTU-5C MT alıcı sistemi, güç kaynağı (akü) ve ölçümlerin ağ bağlantısı yoluyla sürekli aktarımı için bir modem bulunmaktadır (Şekil 2).



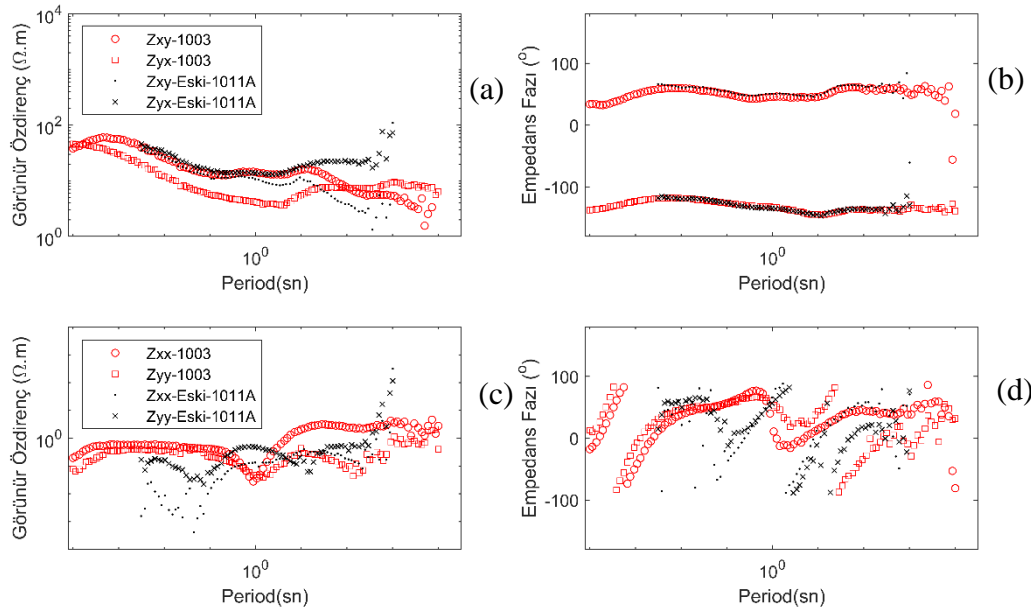
Şekil 1 (a) Klasik ölçü sistemi, (b) Uydu modem eklenmiş ölçü sistemi

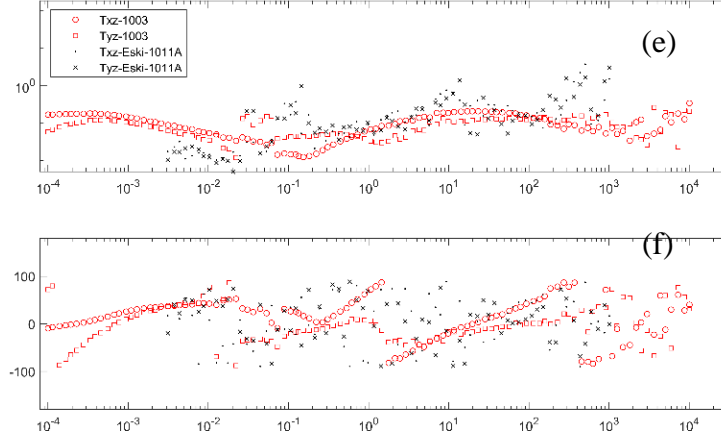


Şekil 2 (a) Arazi koşullarına uygun olarak tasarlanmış MT ölçü sistemi kutusu, (b) içindeki sistemin yerleşimi ve (c) kullanılan modem.

Manyetotellürik Veri Toplama

Uzun periyod manyetotellürik ölçüler, önceki TÜBİTAK 105G145 numaralı projemiz kapsamında geniş bant MT ölçüsü alınan dört paralel doğrultu boyunca toplanmıştır (Şekil 3). Her bir MT istasyonunda ölçü süreleri 9-20 gün aralığında değişmiştir. Önceki projede ölçülen geniş bant MT verilerinin analizi sayesinde, uzun periyod MT verileri için kültürel gürültüsü az olan yerler seçilmiştir. Böylece, tekrar ölçü ve veri kayıpları en aza indirilmiştir. Proje sonrası geçen 15 yıllık sürede yerleşim yeri ve enerji nakil hatlarındaki değişimlerde interaktif olarak göz önünde bulundurulmuş ve yer seçimleri de tüm bu bilgiler ışığında interaktif olarak seçilmiştir. Önceden ölçülen geniş bant MT ve 2020 yılında ölçülen uzun periyod MT verilerinin karşılaştırması Şekil 3' de sunulmuştur. Bu karşılaştırmada empedansın diyagonal dışı elemanlarından elde edilen görünür öz direnç ve fazların aynı periyod aralıklarında uyum içinde oldukları görülmektedir. Ancak empedansın diyagonal elemanlarından elde edilen görünür öz direnç ve faz bu bileşenlerin gürültüden fazla etkilenmesinden dolayı çok benzememektedir. Tipper genlik ve fazlarının karşılaştırılmasında da benzer olarak geniş bant verilerin saçılmış olduğunu ve uzun periyod verilerinin daha az saçılmış bir karakterde olduğu görülmektedir.



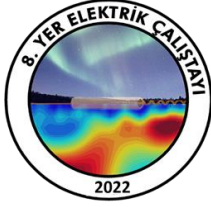


Şekil 3 Aynı noktada 2020 yılında ölçülmüş Uzun Periyod MT (1003 nolu istasyon) ve 2007 yılında ölçülmüş geniş bant MT (eski 1011A) verilerinin birlikte sunumu: (a) xy ve yx bileşeni Görünür Özdirenç eğrileri, (b) xy ve yx bileşeni Empedans Faz eğrileri, (c) xx ve yy bileşeni Görünür Özdirenç eğrileri, (d) xx ve yy bileşeni Empedans Faz eğrileri, (e) Txz ve Tyz tipper genlikleri, (f) Txz ve Tyz tipper fazları. Kırmızı “daire ve kare” semboller uzun periyod MT verilerini, siyah renkli “+ ve x” semboller ise geniş bant MT ölçülerini göstermektedir.

SONUÇLAR

Bu çalışmada ilk kez uzun audio, geniş ve uzun periyod bandlarını kapsayan ($0.0001 \text{ sn} < T < 20.000 \text{ sn}$) MT verisi gerçek zamanlı veri transferi ve veri kontrolü yapılarak toplanmıştır. Bu tip ölçü almanın temel üstünlüğü istasyon kurulumundan itibaren 6 dakikada paketler halinde ana bilgisayara aktarılan zaman serisi verisi analiz edilebilmektedir. Bu analiz sırasında, ölçünün başlangıcının ilk 10 dakikasından itibaren ölçülen veriler analiz edilebilmektedir. Böylece, istasyon kurulumunda kurulum hataları görülerek hata düzeltilebilmektedir. Diğer taraftan veri toplarken, özellikle elektrik alan ölçülen kabloların kemirgenlerin kopması veya herhangi bir nedenle kablo bağlantılarındaki sorun gözlemlenebilmekte ve bu sorun giderilebilmektedir. Uzun periyod ölçü için bekleme süresi ortalama 10-20 gün sürmektedir. Klasik ölçü sistemlerinde, ilk günden oluşan kablolardaki kesinti, akünün bitmesi vb. durumlarında, 20 gün sonra araziye gidildiğinde farkına varılabildi. Ancak bu yeni sistem ile sorun yaşandığı anda müdahale edilebilmektedir.

Diğer taraftan bu çalışmada elde edilen diğer tecrübe, yaklaşık 15 yıl aradan sonra aynı istasyonda ölçülen MT verileri arasında, güneş fırtınalarının durumuna göre sinyal genliğindeki değişiklik ölçüleri etkilemesi ve gürültü içeriğinin artması veya azalmasına neden olabilmektedir. Bu çalışmada aynı istasyonda 15 yıl ara ile ölçülen verilerin genel olarak ortamın özdirenç yapısına uygun olarak genel anlamda uyum içinde olduğu sonucu elde edilmiştir. Yine bu çalışma ile empedansın düşük genlikli bileşenlerinin (Z_{xx} ve Z_{yy}) gürültüden çok etkilendiği ve bu nedenle bu bileşenlerin 15 yıl ara ile ölçülen veriler karşılaştırıldığında çok da uyum içinde olmadığı gözlenmiştir. Aynı sorun tipper genlik ve faz bileşenlerinde de gözlenmiştir. Dolayısıyla 3B ters çözümde empedansın ana diyagonal bileşenleri ile tipper bileşenlerinin gürültü içeriğine göre ters çözüme katılmasında özen gösterilmesi gerekmektedir.



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



TEŞEKKÜR

Bu proje TÜBİTAK 119Y197 nolu proje kapsamında yapılmıştır. Desteklerinden dolayı TÜBİTAK' a teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

- Becken, M., Ritter, O., Bedrosian, P. A., & Weckmann, U. 2011. "Correlation between deep fluids, tremor and creep along the central San Andreas fault". *Nature*, 480(7375), 87-90.
- Candansayar M.E., Kaya C., Güner A., v.d., 2008. "NW_Anatolia_CSGM Project: an investigation of N-W Anatolian Crust Structure by using Geophysical Methods". IAGA WG 1.2 on Electromagnetic Induction in the Earth, Beijing, China, October 23- October 29, 2008
- Candansayar M. E., C.Kaya, Ü.Dikmen v.d. 2010 "Crustal structure of Northwestern Turkey, revealed by magnetotelluric surveys with the help of Seismology, Gravity and Magnetic Data". IAGA WG 1.2 on Electromagnetic Induction in the Earth 20th Workshop Abstract, Giza, Egypt , September 18-24, 2010
- Candansayar, M.E. vd. 2012. "Deep Crustal Structure of Thrace Region Revealed by 2D Inversion of Magnetotelluric Data". Extended Abstract, 21st EM Induction Workshop, Darwin, Australia, July 25-31, 2012
- Chen, L., Booker, J. R., Jones, A. G., & Wu, N. (1996). Electrically conductive crust in Southern Tibet from INDEPTH magnetotelluric surveying. *Science*, 274(5293), 1694.
- Kaya, C. (2010). Deep crustal structure of northwestern part of Turkey. *Tectonophysics*, 489(1), 227-239.
- Kaya, T., Kasaya, T., Tank, S. B., Ogawa, Y., Tunçer, M. K., Oshiman, N., ... & Matsushima, M. (2013). Electrical characterization of the North Anatolian Fault Zone underneath the Marmara Sea, Turkey by ocean bottom magnetotellurics. *geophysical journal international*, ggt025.
- Kaya, T., Tank, S. B., Tunçer, M. K., Rokoityansky, I. I., Tolak, E., & Savchenko, T. (2009). Asperity along the North Anatolian Fault imaged by magnetotellurics at Düzce, Turkey. *Earth, planets and space*, 61(7), 871-884.
- Korja, T. (2007). How is the European lithosphere imaged by magnetotellurics?. *Surveys in Geophysics*, 28(2-3), 239-272.
- Tank, S. B., Honkura, Y., Ogawa, Y., Matsushima, M., Oshiman, N., Tunçer, M. K., ... & Işıkara, A. M. (2005). Magnetotelluric imaging of the fault rupture area of the 1999 Izmit (Turkey) earthquake. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 150(1), 213-225.
- Tank, S. B. (2012). Fault zone conductors in Northwest Turkey inferred from audio frequency magnetotellurics. *Earth, planets and space*, 64(9), 729-742.
- Türkoğlu, E., Unsworth, M., Bulut, F., & Çağlar, İ. 2015. Crustal structure of the North Anatolian and East Anatolian Fault Systems from magnetotelluric data. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 241, 1-14.
- Ulugergerli, E. U., Seyitoğlu, G., Başokur, A. T., Kaya, C., Dikmen, U., & Candansayar, M. E. (2007). The geoelectrical structure of northwestern Anatolia, Turkey. *Pure and Applied Geophysics*, 164(5), 999-1026.
- Unsworth, M. (2010). Magnetotelluric studies of active continent–continent collisions. *Surveys in Geophysics*, 31(2), 137-161.



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



Xie, C., Jin, S., Wei, W., Ye, G., Jing, J., Zhang, L., ... & Xia, R. (2016). Crustal electrical structures and deep processes of the eastern Lhasa terrane in the south Tibetan plateau as revealed by magnetotelluric data. *Tectonophysics*, 675, 168-180.

Zeng, S., Hu, X., Li, J., Xu, S., Fang, H., & Cai, J. (2015). Detection of the deep crustal structure of the Qiangtang terrane using magnetotelluric imaging. *Tectonophysics*, 661, 180-189.



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



S15	Yer Radarı Yöntemi ile Tünel İçi Yapı Elemanlarının Görüntülenmesi ve Denetlenmesi: Ermenek Barajı Yeşilköy Bağlantı Yolu Tüneli Örneği
	Visualization and Inspection of In-Tunnel Constructional Elements with Ground Radar Method: Example of Ermenek Dam Yeşilköy Connection Road Tunnel

Selma KADIOĞLU*,¹

¹ Ankara Üniversitesi Müh. Fak. Jeofizik Mühendisliği Bölümü

E-posta: kadioglu@ankara.edu.tr

*Sunumu yapacak yazar

ÖZ

Çalışmanın başlıca amacı yapım aşaması bitmiş veya devam etmekte olan tünellerin alt yapı elemanlarının sondajsız denetlenmesi amaçlı tahribatsız, hızlı uygulanabilen jeofizik yer radarı yöntemi ile görüntüleme ve uygulama örneği ile ülkemizde kullanımının yaygınlaşmasını sağlamaktır. Örnek çalışma yeri Ermenek Barajı Yeşilköy bağlantı yolu tüneldir. Tünel Konya Ovası Sulama Projesi (KOP) çerçevesinde Göksu Nehri üzerinde yapılan Ermenek barajının Yeşilköy yerleşim yeri arasındaki bağlantının sağlanması amaçlı inşaa edilmiştir. Ermenek bağlantı Tüneli yeni Avusturya tünel açma yöntemi (NATM) ile inşa edilmiştir. Tünelin inşaatında toleransların da dahil edildiği beton kalınlığının GPR yöntemi ile belirlenmesi çalışmanın birincil amacıdır. Ayrıca tünel altyapı elemanlarının (tünel kazı süreksizlikleri, iksa aralıkları, çelik hasır, püskürtme beton ve iç beton kalınlığı) belirlenmesidir.

Çalışmalar sonucunda elde edilen radargramlardaki kaynak kuyruk etkisinin önkestirimli dekonvolüsyon ile yüksek frekanslardaki tekrarların ise F-K süzgeci ile daha başarılı bir şekilde kaldırıldığı belirlenmiştir. Ayrıca bu çalışmada saçılmış dalga alanı integral çözüm ile elde edilmiş radargramlara ait dielektrik katsayısı ve öz direnç haritası da sunulmuştur. Tünel duvarları üzerindeki radargramlar üzerinde tünel beton kalınlığı değişimi cm bazında grafiklenmiştir. Ayrıca beton içindeki iksaların (çelik yaylar) ve çelik hasır konumları çok net bir şekilde belirlenebilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yer Radarı (GPR), tünel altyapı elemanları, tünel kazı toleransı, F-K süzgeci, Önkestirimli Dekonvolüsyon

ABSTRACT

The main purpose of the paper is to ensure the widespread use of the non-destructive, fast-applied geophysical ground radar method in our country with the imaging and application example for the inspection of the infrastructure elements of the tunnels, the construction phase of which has been completed or in progress, without drilling. The sample study site is the Ermenek Dam Yeşilköy connection road tunnel. The tunnel has been built to provide the connection between the Ermenek dam built on the Göksu River within the framework of the Konya Plain Irrigation Project (KOP) and the Yeşilköy settlement. The Ermenek connection Tunnel was built with the new Austrian tunneling method (NATM). The aim of the study is to determine the concrete thickness, including the tolerances, in the construction of the tunnel with the GPR method. In addition, the determination of tunnel



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



infrastructure elements (tunnel excavation discontinuities, shoring gaps, steel mesh, shotcrete and internal concrete thickness) also covers the objectives. As a result of the studies, it has been determined that the source tail effect in the radargrams is removed more successfully with the predictive deconvolution and the repetitions at high frequencies are removed more successfully with the F-K filter. In addition, the dielectric coefficient and resistivity map of the radargrams obtained by the scattered wave field integral solution are also presented in this study.

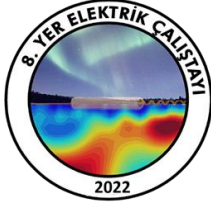
The tunnel concrete thickness variation is plotted on the radargrams in cm. In addition, the positions of the shoring (steel springs) and the steel mesh in the concrete could be determined very clearly.

Keywords: Ground Penetrating Radar (GPR), Tunnel construction elements, excavation tolerance of the tunnel, F-K filter, predictive deconvolution

GİRİŞ

GPR yöntemi yüksek frekanslı elektromanyetik (EM) yöntemdir. Yöntemin en büyük avantajı hedef araştırma derinliğine uygun merkez frekanslı antenlerin kullanılması ile yeterli duyarlılıkta sonuçların elde edilebilmesidir. Yöntemin kullanımının kolay olması ve çok hızlı veri toplanabilmesi, veri toplama sırasında çalışma alanında herhangi bir tahribat oluşturmaması (non-invasive), santimetre düzeyinde yüksek çözünürlüklü iki boyutlu (2B) ve üç boyutlu (3B) yeraltı görüntülemenin yapılabilmesi en önemli avantajlarıdır. Böylece yapıların konum ve derinliklerinin çok daha net belirlenebilmesi, özellikle 3B görüntüleme ile karmaşık yapı bölgelerinde aranan özel yapının kararlaştırılması ve oldukça etkin görüntü ile sunulabilmesi özellikleri nedeniyle tüm sığ araştırmalarda son yıllarda en çok kullanılan jeofizik yöntem olmuştur. Ülkemizde de kullanımı oldukça yaygındır (Kadioğlu 2008; Kadioğlu and Daniels 2008; Kadioğlu, 2017). Tünel altyapı elemanlarının (iksa aralıkları, çelik hasır, püskürtme beton ve iç beton kalınlığı) belirlenmesi amaçlı GPR yöntemi kullanımı da oldukça yaygındır. Bizim ülkemizde daha çok tünel içi, tünel arkası kırık, boşluk gibi duraylılık problemleri araştırma amaçlı kullanılmaktadır (Kadioğlu ve diğ. 2018). Yer radarı yöntemi ile tünel içi duvar kalınlığının belirlenmesine yönelik uluslararası çalışmalardan Parkinson ve Ékes (2014) örnek olarak verilebilir. Tünel yapı parametrelerinin GPR yöntemi ile belirlenmesi için yüksek frekanslı (500-2000 MHz aralığında) antenler kullanılmaktadır. GPR yöntemi ile metalik parametrelerin ve kırık, boşluk gibi süreksizliklerin belirlenmesi oldukça kolay olmasına rağmen, tünel beton-anakaya sınırı, karayolu beton içi süreksizliklerin, kalınlık değişimlerinin belirlenebilmesi için GPR verilerinde beton yüzey çalışmalarında çok sık görülen clutter effect olarak tanımlanan kaynak dalgacığının tekrarlarının giderilmesi önemli bir işlemdir. Bu etkinin giderilmesi için için dekonvolüsyon işlemi ve F-K süzgeçleme veya Karhunen-Loeve (K-L) dönüşümü, dalgacık ayrıştırma gibi özel çalışma gerektiren işlemlerle yürütülmektedir. Burada F-K ve önkestirimli dekonvolüsyon işlemleri ile elde edilen sonuçlar sunulacaktır.

Çalışmanın gerçekleştirildiği tünel, Konya Ovası Sulama Projesi (KOP) çerçevesinde Konya Ermenek Göksu nehri üzerinde yapılan Ermenek barajının sular altında bıraktığı Kazancı-Ardıçaya-Yeşilköy arasındaki yolun yerine yapılan yeni güzergahta bağlantının sağlanması için yapılmış bir tüneldir. Ermenek bağlantı Tüneli iki tünel giriş çıkış yapıları olup yeni Avusturya tünel açma yöntemi (NATM) ile inşa edilmiştir.



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



YÖNTEM

Çalışma bölgesi içinde tünellerin sağ ve sol iç duvar yüzeyi boyunca tabandan 1.5 m yükseklikte belirlenen hat boyunca RAMAC CUII GPR sistemi ve 3.0m derinliğe kadar cm bazında duyarlılığa sahip 800 MHz kapalı (shilded) anten kullanılarak veri toplama ilk aşamayı oluşturmaktadır. Çalışmanın ikinci aşaması toplanan verilere çalışmanın amacına uygun olan veri-işlem adımlarının ayrıntılı olarak test edilmesidir. GPR verilerine genel olarak sıfır kayma zamanı düzeltmesi (move start time), çok alçak frekanslı gürültülerin giderilmesi (dewow), ortak genlik bilgisinin kaldırılması (background removal), genlik kazanç düzeltmesi (gain), frekans süzgeçleme gibi veri-işlem adımları uygulanmaktadır. Bu işlemlerin yanında gerek radargramlar üzerindeki rastgele gürültüleri ortadan kaldırmak gerekse saçılmaları toparlamak ve verideki sürekliliği sağlamak amacı ile veriye göç (migrasyon) işleminin uygulanması özel veri-işlem aşamasıdır. Migrasyon homojen ortamlarda oldukça iyi sonuç vermekte ve seçilen iz sayısı ile orantılı olarak saçılma dalgalarını toplamakta ve rastgele gürültüleri yok etmektedir. Ancak ortam karmaşık yapıda ise GPR verisinde ortak genlik bilgisini kaldırmak çok başarılı olamamakta ve gürültü olarak veride kalmaktadır. GPR verisinde yüksek frekanslarda tekrarlı yansımalar veya katlamalar oluşmaktadır. Yine frekans geçirme bandı ile aynı frekanslarda özellikle beton gibi sert zeminler üzerinde toplanan verilerde gözlenen çınlama olarak da bilinen düşey tekrarlar (clutter effect) veride düzenli gürültüler olarak karşımıza çıkmaktadır. Düzenli gürültüler çoğu zaman aranan belirtiyi (anomali) örtmektedir.

GPR yöntemi ile metalik parametrelerin ve kırık, boşluk gibi süreksizliklerin belirlenmesi oldukça kolay olmasına rağmen, tünel beton-anakaya sınırı, karayolu beton içi süreksizliklerin, kalınlık değişimlerinin belirlenebilmesi için çoğu zaman özel veri-işlem gereksinimi duyulmaktadır. GPR verilerinde beton sert yüzeyden kaynaklanan çınlama etkisinin giderilmesi önemli bir işlemdir. Bu adım için burada önkestirimli dekonvolüsyon işlemi ve F-K süzgeçleme işlemi uygulanarak karşılaştırılmıştır.

Tünel inşaatı kazı, iksa donatımı, çelik hasır kaplama, püskürtme beton ve nihai beton kaplama aşamalarını içermektedir. İksa kurumu, iç beton kalınlığı ve tünel genişliği düşünülerek hazırlanan bir çelik düzeneştir. Bu düzeneğin yerleştirilebilmesi için kazının tolerans genişliği adıyla anılan ek bir açma genişliğine ihtiyaç duyulmaktadır. Bazen kaya içinde gevşek zemin ile karşılaşılması durumunda bu genişlik azami verilen genişlikten daha fazla olma durumu söz konusu olabilir. Aranan beton kalınlığının yani beton, ana kaya sınırının belirlenmesinde iç beton kaplama (şartnameye göre 0.4 m kalınlıkta) arkasındaki çelik hasır kaplama, iksa ve arkasında kalan kalıntı kazı alanını içine alan püskürtme beton kalınlığı toplamı (şartnamede 0,20 m kalınlıkta) olmak üzere toplam beton kalınlığının yaklaşık 0.60 m (60 cm) olması gerekmektedir. Ancak yüklenici firmanın çalışma alanındaki kireçtaşının zayıf olmasından dolayı tolerans kalınlığın daha fazla olduğunu bu nedenle daha fazla betonlama yapıldığını iddia etmesi bu çalışmanın gerekliliğini ortaya koymuştur. Bu durum yöntemin doğru uygulanmasında daha da önemli hale getirmiştir.

SONUÇLAR ve TARTIŞMA

İşlenen radargramların görüntülenmesi ve beton-anakaya sınırının işaretlenmesi, daha sonra yatay eksen tünel duvar uzaklığı, düşey eksen ise kalınlık olmak üzere tünel beton kalınlığını gösteren grafiklerin çizilmesi üçüncü aşama olarak sunulmaktadır. Çalışma sonucunda radargramlardaki kaynak dalgacığının kuyruk etkisinin ön kestirimli dekonvolüsyon ile yüksek frekanslardaki tekrarların ise F-K süzgeci ile daha başarılı bir



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



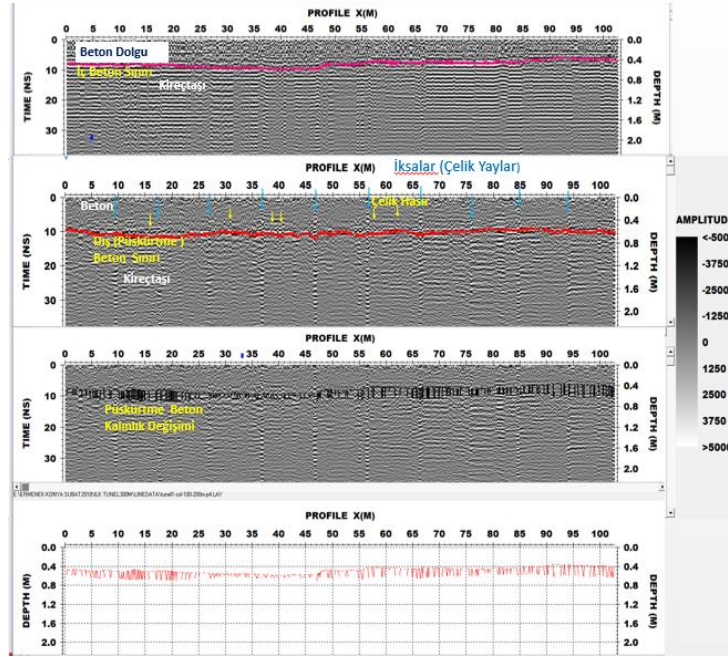
şekilde kaldırıldığı belirlenmiştir. Tünel duvarları üzerindeki radargramlar üzerinde tünel beton kalınlığı değişimi cm bazında grafiklenmiştir. Ayrıca beton içindeki iksaların (çelik yaylar) ve çelik hasır konumları çok net bir şekilde belirlenebilmiştir. Burada Şekil 1 örnek sonuç olarak sunulmuştur. Bununla birlikte bir radargrama ait dielektrik katsayısı ve öz direnç haritası da sunulmuştur. Şekil 2. Tünel 1 sol duvar 400-500 m arasındaki radargrama ait gerçel dielektrik katsayısı haritasını temsil etmektedir.

KATKI BELİRTME

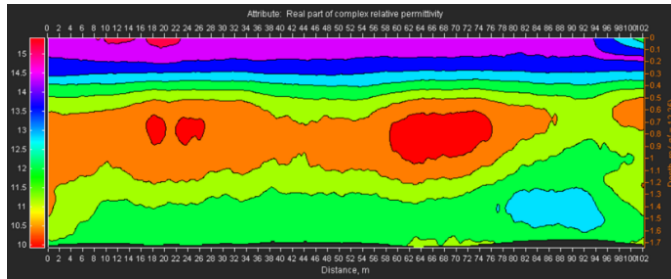
Bu çalışma, **Ankara Üniversitesi Yer Bilimleri Uygulama ve Araştırma Merkezi (YEBİM)** tarafından T.C Konya 3. Asliye Hukuk Mahkemesi Esas No:2016/603 dosyası gereği protokol çerçevesinde gerçekleştirilmiştir.

KAYNAKLAR

- Kadioglu, S 2008, Photographing Layer Thicknesses and Discontinuities in a Marble Quarry with 3D GPR Visualization, *Journal of Applied Geophysics*, 64 (3), p. 109-114.
- Kadioglu, S and Daniels, JJ, 2008, 3D Visualization of Integrated Ground Penetrating Radar Data and EM-61 Data to Determine Buried Objects and their Characteristics, *Journal of Geophysics and Engineering*, 5, p. 448-456.
- Kadioglu, S 2017, Research of the sea-filled airport OGU in the Black Sea, Turkey, using ground penetrating radar method, *Construction and Building Materials, Special Issue on Ground-Penetrating Radar and Complementary Non-Destructive Testing Techniques in Civil Engineering*, Vol 158, 1123-1133.
- Kadioglu, S, Kadioglu, YK, Deniz K, Demirbaş, N, 2018, Determining Construction Problems in Zigana Tunnels (Gumushane-Turkey) with GPR Method, 18 International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2018 30 June - 9 July, 2018, SGEM Conference Proceedings 2018.
- Parkinson, G and Ékes C 2008, Ground Penetrating Radar Evaluation of Concrete Tunnel Linings, 12th International Conference on Ground Penetrating Radar, June 16-19, 2008, Birmingham, UK.



Şekil 1. Tünel 1, sol duvar (gidiş) 0.0-100 m arasında **(a)** önkestirimli dekonvolüsyon yapılmış radargram üzerinde iç beton sınırının belirlenmesi, **(b)** dekonv.+F-K süzgeç uygulanmış, üzerinde dış beton sınır eğrisi çizilmiş, iksalar ve çelik hasırların görüntülediği radargram, **(c)** iç ve dış beton duvarların farklarının görüntülediği radargram **(d)** iç ve dış beton sınır arasındaki çelik hasır ve püskürtme beton dolgu değişimi



Şekil 2. Tünel 1 sol duvar 400-500 m arasındaki radargrama ait gerçel dielektrik katsayısı haritası



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



S16	Arkeolojik Belgelemede Jeofiziğin Değeri: Kremna Antik Kenti Örneği
	The Value of Geophysics in Archaeological Documentation: The Example of Kremna Ancient City

Mehmet Ali KAYA^{*1}, Çağlayan BALKAYA^{2,3}, Olcay ÇAKMAK³, B. Ayça POLAT BECKS⁴, Ralf H. BECKS⁴

¹ Trakya Üniversitesi, Mimarlık ve Şehir Planlama Bölümü, Edirne

² Süleyman Demirel Üniversitesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, Isparta

³ Süleyman Demirel Üniversitesi, Deprem ve Jeoteknik Araştırma Merkezi, Isparta

⁴ Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Arkeoloji Bölümü, Burdur

E-posta: malikaya1@trakya.edu.tr

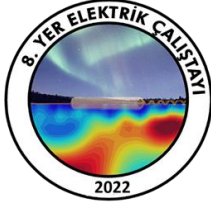
ÖZ

Arkeoloji jeofiziği araştırmaları; yer radarı, elektrik özdirenç ve manyetik gibi hasarsız jeofizik yöntemleri birlikte ya da ayrı ayrı yüzeyden uygulayarak yeraltındaki arkeolojik yapı kalıntılarının konum, derinlik ve durumunu belirlemektedir. Elde edilen jeofizik bulgu ve bilgilerle de arkeolojik kazı tasarımına yön vermektedir. Son yıllarda, alet ve bilgisayar teknolojisi ve yazılımlardaki gelişmelerle arkeolojik alanın, jeofizik yöntemlerle, yeraltı görüntüsü 2B ve 3B olarak gerçeğine çok yakın görüntülenebilmektedir. Bilimsel ve teknolojik gelişmeler kuşkusuz bilimin her alanında geçerlidir. Bu bağlamda, süreç içinde arkeolojik kazılarda ortaya çıkacak gelişmeler, jeofizik araştırmalarla belgelenen (kayıt altına alınan) arkeolojik alanların sonraki yıllarda kazılması olasılığını da gündeme getirmektedir. Kazılarak ortaya çıkarılan arkeolojik eser kalıntılarının korunması, ekonomik anlamda maliyet yükselten bir etken olduğundan, sonraki yıllarda kazının gerçekleştirilmesi iyi bir seçenek durumundadır. Jeofizik belgelemeye örnek olmak üzere Burdur ili Bucak ilçesi sınırları içindeki Kremna antik kentinde yer radarı ve elektrik özdirenç tomografi araştırmaları gerçekleştirilmiştir. 2021 yılında bilimsel kazılara başlanan Kremna'da elde edilen sonuçlar, hasarsız jeofizik mühendisliği uygulamalarının arkeolojik belgelemede gerekliliğini, bir kez daha, ortaya koymuştur.

Anahtar Kelimeler: Arkeolojide belgeleme, Arkeojeofizik, Kremna Antik Kenti, Yer radarı, EÖT

ABSTRACT

Archaeological geophysical investigations determine the location, depth and condition of archaeological remains below the surface using non-destructive geophysical methods such as ground-penetrating radar, electrical resistivity and magnetic together or separately from the surface. It also guides the archaeological excavation design with the geophysical findings and information gained. Through the development of instruments, computer technology and software, it has been possible in recent years to observe the subsurface image of the archaeological area very realistically in 2D and 3D using geophysical methods. Scientific and technological developments are undoubtedly valid in all areas of science. In this context, developments in the archaeological excavations carried out during these excavations make it possible in the following years to excavate archaeological sites documented via geophysical studies. It is a good option to carry out excavations in



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



subsequent years, as the preservation of archaeological remains uncovered by excavations is an economic factor that increases costs. As an example of geophysical documentation, ground-penetrating radar and electrical resistivity tomography surveys were performed in the ancient city of Kremna, within the boundaries of Bucak district of Burdur province. Results from Kremna, where scientific excavations began in 2021, once again demonstrated the need for non-destructive geophysical applications in archaeological documentation.

Keywords: Documentation in archaeology, Archaeogeophysics, Kremna Ancient City, GPR, ERT

GİRİŞ

Yeraltındaki arkeolojik yapı kalıntılarının belirlenmesi amaçlı jeofizik uygulamalar 1946 yılında başlamıştır (Atkinson 1952). 1990'lı yıllara kadar her ülkede ve sıklıkla kullanımına rastlanmasa da 1990'lı yıllardan itibaren hemen hemen bütün ülkelerde ve sıklıkla arkeolojik kazı tasarımı amaçlı jeofizik yöntem uygulamaları dikkat çekmektedir (Scollar vd 1986; Başokur 1992; Ekinci vd 2012; Ranieri vd 2016; Malfitana vd 2018; Correia vd 2019). 2000'li yıllardan itibaren gelişen bilgi ve teknolojiye uygun olarak bilgisayar donanım ve yazılımı, jeofizik donanım ve yazılımındaki gelişmeler yeraltının, gerçeğine en yakın, 2B ve 3B'lu görüntülenmesine olanak sağlamıştır. Arkeoloji jeofiziği araştırmalarında önceleri tek yöntem uygulamaları dikkat çekerken günümüzde birkaç yöntemin birlikte uygulanması ile arkeolojide jeofizik belgelemenin başarısı artırılmıştır (Negri vd 2008; Ekinci vd 2014; Balkaya vd 2018; Akca vd 2019; Cozzolino vd 2020; Balkaya vd 2021).

Ahunbay (2010)'da da vurgulandığı gibi, arkeolojik alanlar hem doğal hem de insani etkilerin tehdidi altındadır ve bazı arkeolojik alanlar hiç belgelenmeden yok olmaktadır. Ahunbay'a göre, kültürel mirasın korunması çok disiplinli çalışmalarla desteklenmeli ve ek olarak ekonomik katkı ve bilinçlenme de artırılmalıdır. Anlaşılacağı gibi, kültürel mirasın korunması ekonomik olarak masraflı bir çabadır. Kültürel mirasın korunmasına çabalarında Tanaç Zeren ve Uyar (2010), arkeolojik alanlarda koruma çadırları ve gezi platformlarının düzenlemesini öne çıkarırken, Öksüz Kuşçuoğlu ve Taş (2017), sürdürülebilir kültürel miras yönetimi konusunu araştırmışlardır.

Dikilitaş (2011), toprağın fiziksel, kimyasal ve biyolojik olarak karmaşık bir yapı sunduğunu belirtmekte ve bu nedenle de arkeolojik alanlarda toprak altında bulunan yapı kalıntılarının korunması ya da bozulmasına neden olabileceğini vurgulamaktadır. Toprak altındaki arkeolojik yapı kalıntılarının, toprağın yapısından kaynaklı, bozulma riski var ise de kazı sonucu yeryüzüne çıkması ile doğal (/insani) etkilere daha açık olduğu ve gerekli ancak masraflı koruma önlemleri alınmadığı zaman tahribat riskinin çok daha yüksek olduğu düşünülmektedir.

Bu çalışmada, toprak altındaki arkeolojik yapı kalıntılarının hasarsız jeofizik yöntemlerle belgelenmesi ve böylece hangi süreçte kazı yapılırsa yapıların jeofizik belgelerle, her zaman olduğu gibi, doğru yerden doğru derinliğe kadar kazı tasarımının gerçekleştirilmesi tartışılmıştır. Arkeolojik kazı ile ortaya çıkarılan arkeolojik yapı kalıntılarının doğal (/insani) etkilere karşı yeterince korunamaması durumunda tahrip olma riski arttığına göre, jeofizik araştırma ile belgelenmiş alanların, koruma koşulları yerine getirilmiş durumuyla, ne zaman kazılacağına bir önemi kalmamaktadır. Bu bağlamda Burdur - Bucak sınırları içinde bulunan Kremna antik kentinde (Şekil 1a) yer radarı ve DC elektrik öz direnç (/EÖT tekniği) yöntemleri uygulanarak (Şekil 1b) toprak altındaki arkeolojik yapı kalıntıları belgelenmiştir.



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



KREMNA ANTİK KENTİ JEOFİZİK ARAŞTIRMA

Pisidia'nın Hellenistik kökenli önemli kentlerinden biri olan Kremna günümüzde Burdur'un Bucak İlçesi yakınlarında kalır. Hemen doğusundan geçen Kestros Vadisi'ni kontrol altında tutan kent, doğu güzergahında Pisidia'nın Pamphylia'ya açılan kapısıdır. Roma İmparatorluk Döneminde Augustus tarafından, Pisidia Bölgesini kontrol altında tutmak, kuzey-güney bağlantısını sağlayan Via Sebaste güzergahını korumak ve doğudan -Kilikia ve Pamphylia'nın kuzeydoğusundan- gelen savaşı Homonad kavimlerine karşı bölge savunmasını güçlendirmek amacıyla "Colonia Iulia Augusta Felix Cremna" adıyla Roma Kolonisi ilan edilmiştir. Bugün Kremna'ya bakıldığında Erken Roma İmparatorluk Dönemi'nin kent plancılığı ve mimarisine dair önemli izler görmek mümkündür.

Kremna'da yapılan kazılar 1970'lerde gerçekleştirilen kısa süreli kurtarma kazıları ile sınırlı kalmıştır (İnan 1970). Pisidia ve güneybatı Anadolu arkeolojisi içerisinde Hellenistik ve Roma İmparatorluk Dönemleri şehirciliği, anıtsal mimarisi, sivil mimarisi, kent savunması, heykeltıraşlık, keramik üretimi gibi konularda önemli bilgi kaynağı olan Kremna'nın bilimsel bir bakış açısıyla ele alınıp araştırılması amacıyla 2021 yılından itibaren bilimsel kazılara başlanmış, ilk sezonlarda öncelikle belgelemeye yönelik çalışmalar yürütülmesi planlanmıştır. 2021 yılında yüzey temizliği sonrası ölçüm ve plan çıkartılması çalışmaları yürütülmüştür. Ayrıca hem kazılar öncesi sağlıklı planlama yapılabilmesi hem de kentin arkeolojik potansiyelinin anlaşılabilmesi amacıyla önceden belirlenen alanlarda Jeofizik taramalar gerçekleştirilmiştir.

Kremna Antik Kenti 2021 yılı jeofizik araştırmaları, A ve B olarak adlandırdığımız kentin iki farklı alanında yer radarı ve EÖT uygulamalarıyla gerçekleştirilmiştir. Çalışma alanlarının büyüklüğü nedeniyle, bu alanlar ayrıca dört alt alandan oluşacak şekilde tasarlanmıştır. Yer radarı araştırması, toplam 474 profil üzerinde 500 MHz merkez frekansına sahip kapalı bir sistemle, EÖT uygulamaları ise 28 profil üzerinde dipol-dipol elektrod dizilimiyle gerçekleştirilmiştir. Araştırma sonunda her iki alanda GPR ve EÖT sonuçlarının birbirini destekler nitelikte olduğu görülmüştür. Bu bağlamda, A3 alanı için her iki yöntemden elde edilen sonuçların bir karşılaştırması Şekil 2'de sunulmuştur. Bu alanda gerçekleştirilen yer radarı uygulamasıyla, 30 cm derinlik seviyesinden itibaren düzgün geometri ve uzanım gösteren yapı kalıntılarının yansımaları izlenebilmiştir. Özellikle, çalışma alanı boyunca GB-KD doğrultusunda uzanan bir yapı duvarı ve bu duvarı GB-KD doğrultusunda dik kesen bir duvar oldukça belirgindir. EÖT çalışmasına göre, A3 alanı <30 ohm.m değeri ile görece yüksek iletkenliğe sahiptir. Dolayısıyla, bu iletken ortam içerisinde görece yüksek öz direnç değeri (>1300 ohm.m) ile düzgün formlu yapı duvarları 40-150 cm derinlik kesitlerinde belirlenebilmiştir.

SONUÇLAR

2021 yılı Kremna Antik Kenti jeofizik araştırması yer radarı ve elektrik öz direnç yöntemleri uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma, antik kentte ilk gerçekleştirilen jeofizik araştırmadır. Buradan elde edilen sonuçlar, kentte yer radarı ve EÖT uygulamalarının etkinliğini ve başarısını açıkça göstermiştir. A ve B olarak adlandırılan çalışma alanlarından her iki uygulamadan elde edilen sonuçlar birbirlerini desteklemiş ve yeraltında saklı arkeolojik yapı kalıntılarının izleri görüntülenmiştir.



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



Kremna antik kenti oldukça geniş bir alana yayılmıştır. Arkeolojik kazılarla ortaya çıkarılması yıllar sürecektir bir çabadır. Bu nedenle jeofizik belgeleme; kazının yıllar sonraki tasarımına da rehberlik edecektir. Bu da, jeofizik belgelemenin arkeolojik kazıya ve kültürel mirasın korunmasına koyduğu katkının açık göstergesidir.

Bu belirtileri kapsayan arkeolojik test açmaları, yer radarı ve EÖT uygulamalarından elde edilen sonuçlarının kaynağını ve ayrıca jeofizik-arkeolojik sonuçlar arasındaki uyumu gösterecektir.

TEŞEKKÜR

Kremna antik kenti kazısı Bakanlık Temsilcisi Burdur Müzesinden Arkeolog Evren Ezgi'ye; arazi çalışmasındaki katkılarından dolayı, Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Arkeoloji Anabilim Dalı Doktora öğrencisi Arkeolog Murat Arpacı, Yüksek Lisans öğrencileri Arkeolog Anıl Söylemez ve Arkeolog Süleyman Göçmen'e ayrıca teşekkür ederiz.

Bu bildiri, Jeofizik Yük. Müh. Dr. Cemal Kaya'nın anısına atfedilmiştir.

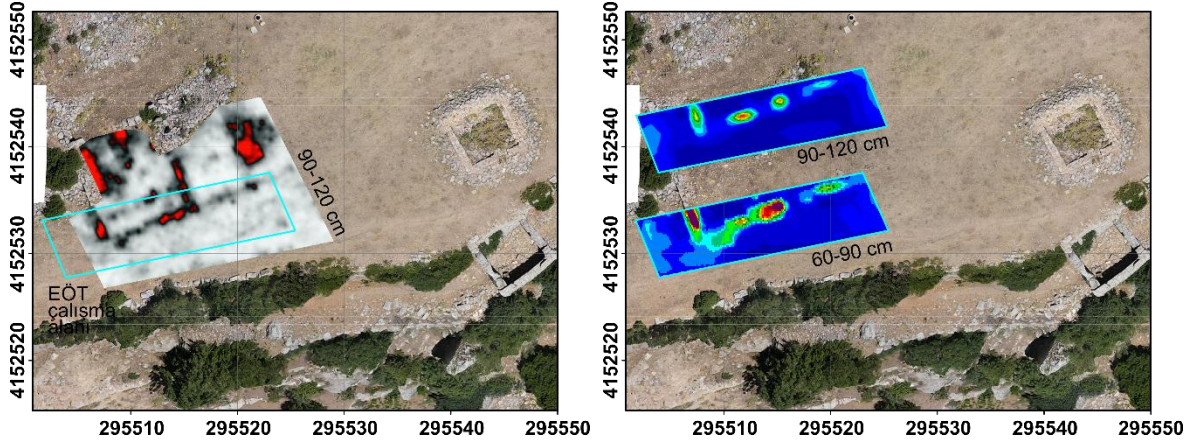
KAYNAKLAR

- Ahunbay Z 2010, Arkeolojik alanlarda koruma sorunları kuramsal ve yasal açılardan değerlendirme: *TÜBA-KED*, **8**, 103–118.
- Akca İ, Balkaya Ç, Pülz A, Alanyalı HS and Kaya MA 2019, Integrated geophysical investigations to reconstruct the archaeological features in the episcopal district of Side (Antalya, Southern Turkey): *Journal of Applied Geophysics*, **163**, 22–30.
- Atkinson RJC 1952, *Methodes electriques de prospection en archéologie*, in A Laming (Ed). *La Découverte du Passé* (pp. 59–70), Picard.
- Balkaya Ç, Kalyoncuoğlu ÜY, Özhanlı M, Merter G, Çakmak O and Güven İT 2018. Ground-penetrating radar and electrical resistivity tomography studies in the biblical Pisidian Antioch city, southwest Anatolia: *Archaeological Prospecting*, **25**, 285–300.
- Balkaya Ç, Ekinci YL, Çakmak O, Blömer M, Arnkens J and Kaya MA 2021, A challenging archaeo-geophysical exploration through GPR and ERT surveys on the Keber Tepe, city hill of Doliche, Commagene (Gaziantep, SE Turkey): *Journal of Applied Geophysics*, **186**, 104272.
- Başokur AT 1992, Magnesia Ad Meandrum (Ortaklar) Argavlı tümülüsünde jeofizik araştırmalar, *8. Arkeometri Sonuçları Toplantısı*, 71–80.
- Correia A 2019, Archaeological geophysics in Portugal: some survey examples, in: G El-Qady, M Metwaly (Eds). *Natural Science in Archaeology* (pp. 101–124), Springer, Cham.
- Cosentino PL, Capizzi P, Martorana R, Messina M and Schiavone S 2011, From geophysics to microgeophysics for engineering and cultural heritage: *International Journal of Geophysics*, **2011**, 428412.
- Dikilitaş G 2011, Arkeolojik alanlarda koruma: *Restorasyon ve Konservasyon Çalışmaları Dergisi*, **6**, 43–51.
- Ekinci YL, Kaya MA, Başaran C, Kasapoğlu H, Demirci A and Durgut C 2012, Geophysical imaging survey in the south necropolis at the ancient city of Parion (Kemer-Biga), Northwestern Anatolia, Turkey: preliminary results: *Mediterranean Archaeology and Archaeometry*, **12**, 145–157.

- Ekinci YL, Balkaya Ç, Şeren A, Kaya MA and Lightfoot C 2014, Geomagnetic and geoelectrical prospection for buried archaeological remains on the upper city of Amorium, a Byzantine City in Midwestern Anatolia, Turkey: *Journal of Geophysics and Engineering*, **11**, 015012.
- İnan J. 1970, Kremna kazısı raporu: *Türk Arkeoloji Dergisi*, **19**, 51–97.
- Malfitana D, Leucci G, Mazzaglia A, Cacciaguerra G, De Giorgi L, Barone S, Fragalà G, Pavone PD and Russo S 2018, Archaeo-geophysics surveys in Pompeii: *Surveys in Geophysics*, **39**, 1219–1238.
- Negri S, Leucci G and Mazzone F 2008, High resolution 3D ERT to help GPR data interpretation for researching archaeological items in a geologically complex subsurface. *Journal of Applied Geophysics*, **65**, 111–120.
- Öksüz Kuşçuoğlu G ve Taş M 2017, Sürdürülebilir kültürel miras yönetimi: *Süleyman Demirel Üniversitesi Yalvaç Akademi Dergisi*, **2**, 58–67.
- Ranieri G, Godio A, Loddo F, Stocco S, Casas A, Capizzi P, Messina P, Orfila M, Cau MA and Chávez ME 2016, Geophysical prospection of the Roman city of Pollentia, Alcúdia (Mallorca, Balearic Islands, Spain): *Journal of Applied Geophysics*, **134**, 125–135.
- Scollar I, Weitner B and Segeth K 1986, Display of archaeological magnetic data: *Geophysics*, **51**, 23–633.
- Tanaç Zeren M ve Uyar O 2010, Arkeolojik alanlarda koruma çatıları ve gezi platformlarının düzenlenmesi kriterleri: *DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, **12**, 2, 55–64.



Şekil 1 a) Kremna Antik Kenti yer buldurular haritası b) A3 alanı yer radarı ve EÖT uygulamalarından görüntüler



Şekil 2 A3 alanında uygulanan yer radarı (90-120 cm derinlik) ve EÖT çalışmasının sonuçlarının (60-90 ve 90-120 cm derinlik) karşılaştırılması



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



S17	Akım ve Gerilim Elektrotlarının Paralel Doğrultularda Kullanımı ile Yer Altı Özdirenç Modelinin Belirlenmesi
	Determination of Subsurface Resistivity Model by Using Current and Potential Electrodes in Parallel Directions

N. Yıldırım GÜNDOĞDU^{*1}, Gökhan Eren KARAKULAK¹, M. Emin CANDANSAYAR¹

¹ Ankara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, Jeofizik Modelleme Grubu, Gölbaşı/Ankara

E-posta: gundogdu@eng.ankara.edu.tr

*Sunumu yapacak yazar

ÖZ

Paralel ardışık serimli ölçü tekniği, yer altının 3B özdirenç modelinin elde edilmesinde bir veri toplama tekniği olarak kullanılmaktadır. Bu teknikte elektrot kombinasyonlarının toplam sayısı çok fazladır. Bu çalışmada yeniden düzenlenmiş paralel ardışık serimli ölçüm tekniği önerilmektedir. Bu teknikte paralel hatlar akım ve potansiyel olarak ayrılır. Ölçüm sırasında mevcut hat ile komşu potansiyel hatları arasında ölçümler yapılır. Klasik paralel ardışık serimli ölçümlerde, hem çapraz hat hem de hat boyunca ölçümler yapılmaktadır. Ayrık hatlarda hat boyunca, klasik ve yeniden düzenlenmiş paralel ardışık serimli ölçü teknikleri kullanılarak yapay model uygulaması ile veri setleri üretilmiştir. Veri setlerinin ters çözümü karşılaştırıldığında, yeni önerilen ölçü tekniği ile klasik ölçü tekniğine göre 4.4 kat daha az veri ile gerçeğe yakın modeller ters çözüm sonucunda elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Doğru Akım Özdirenç, Veri Toplama, Paralel Ardışık Serim Ölçü Tekniği

ABSTRACT

The roll-along measurement technique can be used as 3D acquisition procedure in electrical resistivity tomography. The total number of electrode combinations is very large in this technique. We suggest a modified roll-along measurement technique in this study. The parallel lines are separated as current and potential in this technique. Moreover, measurements are carried between the current line and its neighbour potential lines. The standard roll-along commands include both crossline and in-line measurements. Whereas there is no in-line measurements in technique suggested. We compared our data set with other data sets which were calculated standard roll-along and in-line (2D parallel) using a synthetic model application. In our synthetic data example (19x11 electrodes), the number of data is about 4.4 times less in the modified roll-along technique than in the standard roll-along technique. The inversion results demonstrate that the subsurface structures were better recovered in terms of their locations, upper and bottom depths, resistivities.

Keywords: Direct Current Resistivity, Data Acquisition, Roll-Along Measurement Technique



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



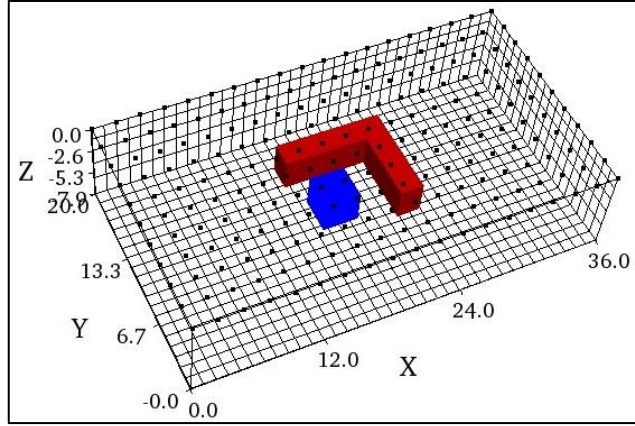
GİRİŞ

Yer altının ayrıntılı olarak öz direnç modelinin elde edilmesi amaçlandığında üç boyutlu ters çözüme uygun veri toplanması gereklidir. Bununla birlikte, geniş alanların incelendiği arazi çalışmalarında kullanılan elektrot sayısının artması, en uygun veri setinin belirlenmesi ve zaman bakımından zorluklara neden olmaktadır. Bu tür geniş ölçekli arazi çalışmalarında veri toplama aşamasında zamanın azaltılması için birçok strateji önerilmiştir. En çok tercih edilen yöntem birbirine paralel hatlar boyunca sondaj-profil ölçülerinin toplanmasıdır (Rucker *vd* 2009, Chambers *vd* 2011). Bu şekilde veri toplama göreceli olarak hızlı olsa da profile yatay doğrultuda uzanan yer altı yapılarının görüntülenmesinde yetersiz kalabilmektedir. Diğer bir ölçü alım tekniği hem x- hem de y-yönünde paralel hatlar boyunca sondaj-profil ölçülerinin toplanmasıdır (Bentley ve Gharibi 2004, Negri *vd* 2008). Bu şekilde toplanan veriler ile yer altı yapıları daha belirgin olarak belirlenebilir. Birbirini dik kesen paralel hatlarla oluşturulan elektrot düzeninde her iki yöndeki elektrot aralığının seçimi oldukça önemlidir. Açısal, L şekli, C şekli, kare, halka biçiminde elektrot dağılımları da araştırmacılar tarafından önerilmiştir. Yer altının yüksek çözünürlüklü modelini elde etmek için çapraz ölçülerin de toplandığı paralel ardışık serimli ölçü tekniği tercih edilmektedir. Fakat bu ölçü tekniğinde veri sayısı oldukça fazla olmaktadır. Veri sayısını azaltmak amacıyla düzenlenmiş paralel ardışık serimli ölçü sistemleri kullanılabilir (Dahlin *vd* 2002, Cho ve Yeom 2007, Van Horde *vd* 2017).

Bu çalışmada yeni bir paralel ardışık serimli tekniği önerilmektedir. Bu teknikte, akım ve gerilim elektrotları ayrı gruplar halinde paralel hatlarda ayrı ayrı olarak arazide kullanılmaktadır. Yapay model uygulaması ile aynı hatta ve farklı hatlarda elektrot gruplarının kullanılması karşılaştırılmıştır.

YÖNTEM

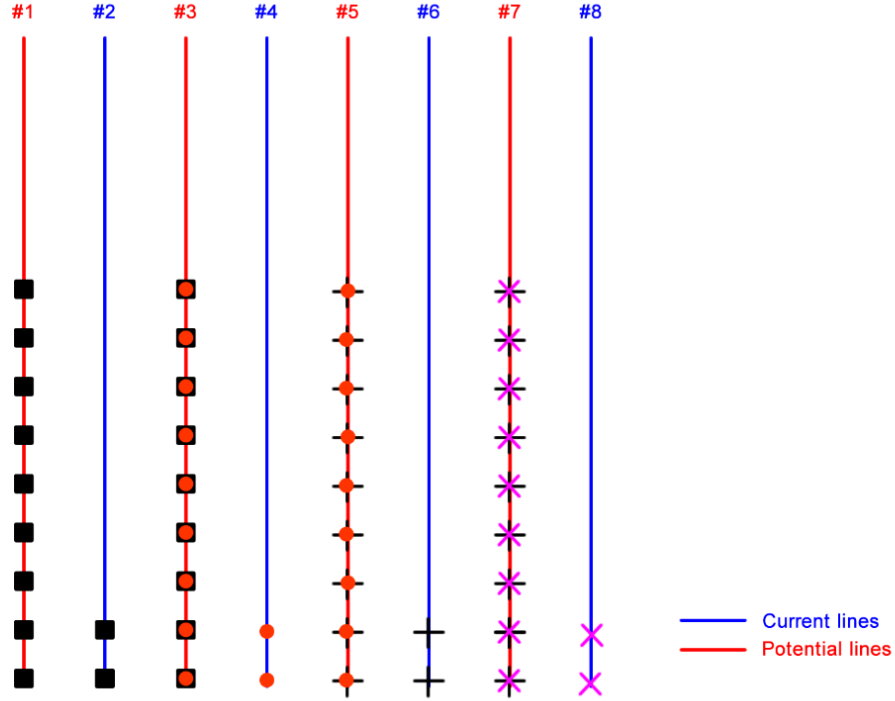
Yapay veri elde etmek için bloklu bir model tasarlanmıştır. Tek düze bir ortam (100 Ω m) içerisine görece iletken (10 Ω m) ve L şeklinde yalıtkan (1000 Ω m) iki yapı yerleştirilmiştir. Yapıların kalınlıkları 3 m yüzeyden derinlikleri 1.5 m'dir. 2 m aralıklı 11 paralel doğrultuda yine 2 m aralıklı 19 elektrot ile sekiz seviyede 2, 4 ve 6 dipol açıklığı için dipol-dipol elektrot dizilimi kullanılarak AGI EarthImager 3D programında üç farklı yapay veri seti üretilmiştir. Bunlar hat boyunca, klasik paralel ardışık serimli ve yeniden düzenlenmiş paralel ardışık serimli veri setleridir. Tüm veri setlerinin üretilmesinde düz çözümde kullanılan ağ elemanlarının genişlik ve kalınlıkları aynıdır. Yapay verilere %3 Gaussian dağılımlı gelişigüzel gürültü eklenmiştir.



Şekil 1 Tek düze ortam ($100 \Omega\text{m}$) içinde iletken ($10 \Omega\text{m}$ – mavi) ve yalıtkan ($1000 \Omega\text{m}$ -kırmızı) iki yapı yerleştirilerek oluşturulmuş yapay öz direnç modeli. Siyah noktalar elektrotların konumlarını göstermektedir.

Yeniden düzenlenmiş paralel ardışık serimli ölçü tekniği ile akım hattı arasındaki gerilim hatlarından ölçü alınacak şekilde tasarlanmıştır. Klasik ardışık paralel ardışık serimli ölçüm tekniğinde veriler hem hat boyunca hem de çapraz olarak üretilirken, yeni önerilen ölçü tekniğinde sadece hat boyunca veri üretilmiştir. Şekil2 ve Tablo 1’de sırasıyla yeni önerilen ölçü tekniğinin şematik görüntüsü ve verilerin üretildiği akım ve gerilim komutları verilmiştir. Yine Tablo 1’de üç veri seti için toplam veri sayıları da görülmektedir.

Üretilen veri setlerinin ters çözümleri Reslm3D algoritmasında yapılmıştır (Gündoğdu ve Candansayar 2018). Başlangıç modeli olarak her bir veri setindeki görünür öz direnç değerlerinin aritmetik ortalamasına sahip tek düze yer modeli kullanılmıştır. Model ağı 6688 ($38 \times 22 \times 8$) bloktan oluşmaktadır.



Şekil 2 Yeniden düzenlenmiş paralel ardışık serimli ölçü tekniğinin şematik gösterimi. Her farklı sembol ilgili akım ve gerilim dipol çiftlerini göstermektedir. Örneğin akım hattı olan hat #2’de siyah karelerden akım verilirken ölçümler sırasıyla hat #1 ve hat #3’ten yapılmaktadır.



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



Tablo 1 Çalışmada kullanılan veri setlerinin üretildiği komut dizileri ve veri sayıları. C: Akım dipol çiftleri, P: Gerilim diol çiftleri. Sayılar ölçüm sırasında aktif olan akım ve gerilim hatlarını göstermektedir.

Ölçüm Tekniği	Komutlar	Veri Sayısı
Hat boyunca	C1P1+C2P2+ C3P3+C4P4+ C5P5+C6P6+ C7P7+C8P8	600
Klasik paralel ardışık serimli	C1P2+C1P3+C1P4+C1P5+C1P6+C1P7+C1P8+ C2P3+C2P4+C2P5+C2P6+C2P7+C2P8+ C3P4+C3P5+C3P6+C3P7+C3P8+ C4P5+C4P6+C4P7+C4P8+ C5P6+C5P7+C5P8+ C6P7+C6P8+ C7P8+hat boyunca ölçümler	10843
Yeniden düzenlenmiş paralel ardışık serimli	C2P1+C2P3+ C4P3+C4P5+ C6P5+C6P7+ C8P7	2461

Burada $\Delta\phi$ gerilim farkı (mV), k geometrik faktör (m) ve I akım (A)'dır.

SONUÇLAR

Üç farklı veri setinin ters çözüm sonuçları normalize edilmiş RMS değerleri ile birlikte Şekil 3'te gösterilmiştir. Sonuçlardan görülmektedir ki; paralel ardışık serimli ölçü teknikleri hat boyunca yapılan ölçüye göre yapay modele daha yakın sonuçlar sunmaktadır. İletken ve yalıtkan yapıların konumları ve öz direnç değerleri hat boyunca yapılan ölçümlerde tam olarak elde edilememiştir. Bununla birlikte yeniden düzenlenmiş paralel ardışık serimli ölçü tekniğinde söz konusu yapıların üst ve alt derinlikleri göreceli olarak daha iyi bulunmuştur. Bu yapıların öz direnç değerleri de yapay modeldekine daha yakındır. Ayrıca tek düze ortamdaki bazı yapay etkiler de yeni önerilen ölçü tekniğinde oldukça azalmıştır.

Yeniden düzenlenmiş paralel ardışık serimli ölçüm tekniğinin, ters çözüm sonuçları ve veri sayısı göz önüne alındığında gerçek modele daha yakın sonuçlar verdiği görülmektedir. Yeni önerilen ölçü tekniğinde veri sayısı, klasik ölçü tekniğine göre yaklaşık 4,4 kat daha azdır. Bu, arazide veri toplama süresini de belirgin ölçüde azalmasını sağlayacaktır.



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



KAYNAKLAR

- Bentley LR ve Gharibi, M. 2004, Two- and three-dimensional electrical resistivity imaging at a heterogeneous remediation site: *Geophysics*, 69, 674-680.
- Brunner I, Friedel S, Jacobs F ve Danckwardt E 1999, Investigation of a Tertiary maar structure using three-dimensional resistivity imaging: *Geophys. J. Int.*, 136, 771-780.
- Chambers JE, Wilkinson PB, Kuras O, Ford JR, Gunn DA, Meldrum PI, Pennington CVL, Weller AL, Hobbs PRN ve Ogilvy RD 2011, Three-dimensional geophysical anatomy of an active landslide in Lias Group mudrocks: Cleveland Basin, UK. *Geomorphology*, 125, 472-484.
- Chávez RE, Cifuentes-Nava G, Hernández-Quintero JE, Vargas D ve Tejero A. 2014, Special 3D electric resistivity tomography (ERT) array applied to detect buried fractures on urban areas: San Antonio Tecómitl, Milpa Alta, México: *Geofis. Int.*, 53, 425-434.
- Cho I-K ve Yeom J-Y 2007, Crossline resistivity tomography for the delineation of anomalous seepage pathways in an embankment dam: *Geophysics*, 72, G31-G38.
- Dahlin T, Bernstone C ve Loke MH 2002, A 3-D resistivity investigation of a contaminated site at Lernacken, Sweden: *Geophysics*, 67, 1692-1700.
- EarthImager 3D 2008, Resistivity inversion software manual, version 1.5.3.: Advanced Geosciences, Inc., Austin, Texas.
- Gündoğdu NY ve Candansayar ME 2018, Three-dimensional regularized inversion of DC resistivity data with different stabilizing functionals: *Geophysics*, 83, E399-E407.
- Rucker DF, Schindler A, Levitt MT ve Glaser DR 2009, Three-dimensional electrical resistivity imaging of a gold heap: *Hydrometallurgy*, 98, 267-275.
- Negri S, Leucci G ve Mazzone, F 2008, High resolution 3D ERT to help GPR data interpretation for researching archaeological items in a geologically complex subsurface: *J. Appl. Geophys.*, 65, 111-120.
- Tsourlos P, Papadopoulos N, Yi M-J, Kim J-H ve Tsokas G 2014, Comparison of measuring strategies for the 3-D electrical resistivity imaging of tumuli: *J. Appl. Geophys.*, 101, 77-85.
- Van Hoorde M, Hermans T, Dumont G ve Nguyen F 2017, 3D electrical resistivity tomography of karstified formations using cross-line measurements: *Engineering Geology*, 220, 123-132.



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



S18	Havadan Yapay Kaynaklı Elektromanyetik Yöntem Verilerinin GPU Platformunda 3-B Düz Çözümü
	3-D Modeling of Airborne Controlled Source Electromagnetic Method Data on GPU Platform

İsmail DEMİRCİ*,¹

¹ Ankara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, Gölbaşı-ANKARA
E-posta: idemirci@eng.ankara.edu.tr

ÖZ

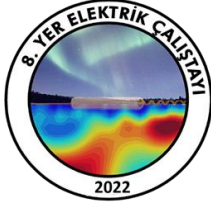
Son dönemlerde, geliştirilen havadan jeofizik ölçüm yöntemleri ve ölçü alım sistemleri sayesinde, çalışma imkânının zor olduğu alanlarda, ölçü alımının olanaklı hale getirilmesi ve ölçü hızının artırılması hedeflenmektedir. Ülkemizin de büyük bir kısmının dağlık ve ormanlık olması, yer bilimleri çalışmalarının bu gibi coğrafik koşullarda karadan yapılmasını zorlaştırmaktadır. Havadan jeofizik çalışmalar genellikle manyetik yöntemler üzerine odaklanmıştır. Ancak yöntemin derinlik bilgisi yönünden zayıflığı nedeniyle son yıllarda havadan Elektromanyetik yöntemler önem kazanmıştır. Bu çalışmada, Karadan ve Havadan Doğal ve Yapay Kaynaklı Elektromanyetik yöntemlerin ters çözümlerinde altlık olarak kullanılacak 3B düz çözüm yazılımı geliştirilmiştir. Algoritma yapay ve doğal kaynaklı EM yöntemler için daha önce geliştirilen yazılımlar ile test edilmiştir. Ayrıca, çalışma sırasında geliştirilen yazılımda doğrudan ve yinelemeli çözüm yöntemler kullanılmış ve CPU-GPU platformlarında performansları test edilmiştir ve sonuçları tartışılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Havadan Elektromanyetik, Düz Çözüm, 3-Boyutlu, GPU

ABSTRACT

Recently, thanks to the developed airborne geophysical measurement methods and data acquisition systems, it is aimed to make the data acquisition possible and increase the data acquisition speed in areas where working condition is difficult. Since most of our country is mountainous and forested, it makes it difficult for earth science studies to be carried out by land in such geographical conditions. Airborne geophysical studies have generally focused on magnetic methods. However, due to the weakness of the method in terms of depth information, the use of airborne electromagnetic methods has gained importance in recent years. In this study, 3D forward solution algorithm was developed to be used as a base for inversion of natural and controlled source electromagnetic methods collected data based on ground and airborne studies. In addition, direct and iterative solution methods were used in the software developed during the study, and their performance was tested in CPU-GPU platforms and the results were discussed.

Keywords: Airborne Electromagnetic, Forward Solution, 3-Dimensional, GPU



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



GİRİŞ

Son yıllarda birçok jeofizik yöntem için (Radyometrik, Manyetik ve Elektromanyetik yöntemler vb.) havadan ölçü alım yöntemleri üzerinde çalışılmaya başlanmıştır. Geliştirilen havadan jeofizik ölçüm yöntemleri ve ölçü alım sistemleri sayesinde, karadan ölçü alımının mümkün olmadığı veya zor olduğu yoğun bitki örtüsü ile kaplı ve ölçü alımı için ekipmanın taşınmasının mümkün olmadığı topoğrafik koşullarda çalışma imkânı sağlanabilmektedir. Ancak Radyometrik ve Manyetik yöntemler gibi yöntemlerin derinlik bilgisi yönünden zayıflığı nedeniyle son yıllarda havadan Elektromanyetik yöntemlerin kullanımı önem kazanmıştır. Havadan EM yöntemlerden, çevresel sorunlar (Doll vd., 2001), altyapı araştırmaları (Pfaffhuber vd. 2010), yeraltı suyu ve kirliliği (Gunnink vd., 2012), jeolojik haritalama (Steuer vd. , 2009) ve mineral araştırmaları (Wolfgram ve Golden, 2001) gibi birçok konuda yararlanılmaktadır.

Havadan EM yöntemlerin ölçü alım yöntem ve uygulamalarındaki gelişmeleri takiben, verilerin değerlendirilmesinde kullanılan 3-B düz ve ters çözüm algoritmalarının geliştirme süreçleri de devam etmektedir. 3-B düz çözüm algoritmaları, güvenilir 3-B yeraltı modellerinin elde edilmesinde kullanılan ters çözüm yöntemlerinin en önemli parçasıdır. Bu nedenle durağan ve hızlı çalışan 3-B düz çözüm algoritmalarının geliştirilmesi, daha güvenilir yer altı modellerinin elde edilebilmesi için hayati önem taşımaktadır.

Frekans ortamı EM yöntemlerde 3-B düz çözüm konusunda son yıllarda birçok çalışma bulunmaktadır. Düz çözüm yöntemi olarak, Sonlu Farklar (Newman and Alumbaugh, 1995, 2002; Streich, 2009), Sonlu Elemanlar (Badea et al., 2001; Mitsuhashi and Uchida, 2004; da Silva vd., 2012), Sonlu hacim yaklaşımı (Mackie et al., 1994; Haber and Ascher, 2001; Constable and Weiss, 2006) ve integral denklemi (Wannamaker, 1991; Avdeev et al., 2002) yöntemlerinden yararlanılmaktadır. Sonlu elemanlar yöntemi model geometrisinin tanımlanması açısından en esnek yöntemdir (Avdeev, 2005, Erdoğan vd. 2008, Demirci vd, 2012). İntegral denklemi yöntemleri ise basit modeller için oldukça kullanışlı olmasına rağmen, karmaşık modeller için hesaplanmasında zorluklar yaşanmaktadır (Mackie vd. 1993). Bu nedenle Sonlu Farklar yöntemi ve yakın ilişkili olan sonlu hacim yaklaşımı hesaplama ve uygulama kolaylığı ve çözüm durağanlığı nedeniyle tercih edilmektedir. Ayrıca 3-B Havadan EM yöntemler modelleme konusunda da yapılmış sınırlı sayıda çalışma bulunmakta (Newman ve Alumbaugh, 1995; Avdeev, 2005; Cox vd., 2010; Liu ve Yin, 2014) ve çalışmalarda genellikle Sonlu farklar yöntemi tercih edilmiştir. Bu çalışma sırasında da Sonlu Farklar yöntemi kullanılarak karadan ve havadan CSEM 3-B düz çözüm algoritması geliştirilmiştir.

YÖNTEM

EM yöntemlerde düz çözüm bağıntısı frekans ortamı Maxwell denklemlerinden elde edilen Helmholtz denklemleridir.

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} + i\omega\mu_0\sigma^* \mathbf{E} = -i\omega\mu_0\mathbf{J} \quad (1)$$

Burada, \mathbf{E} elektrik alan şiddeti, μ_0 manyetik geçirgenlik, σ^* ortam parametresi ($\sigma^* = \sigma + i\omega\varepsilon$ olmak üzere σ iletkenlik ve ε dielektrik katsayısını tanımlamaktadır), w açısal frekans ve \mathbf{J} elektrik kaynak terimi olarak tanımlanmaktadır. Eşitliğin sağ tarafındaki kaynak terimi kullanırsa yöntemler kontrol kaynaklı, kullanılmaz ise doğal kaynaklı yöntemler olarak



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



tanımlanır. Bu denklem karmaşık modeller için analitik olarak çözülememektedir. Bu nedenle denklemin çözümünde sayısal çözüm yaklaşımlarından birinin kullanılması gerekmektedir. Sonlu Farklar yöntemi (Newman and Alumbaugh, 1995; Alumbaugh et al., 1996; Champagne II et al., 2001; Weiss and Newman, 2002, Streich, 2009) uygulama kolaylığı ve çözüm hızı nedeniyle en sık tercih edilen yöntemlerden biridir. Bu çalışmada da Helmholtz denkleminin çözümünde Sonlu Farklar yöntemi tercih edilmiştir.

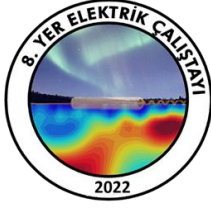
Eşitlik 1'in Sonlu Farklar ifadesi Yee(1966)'nin staggered grid yaklaşımı kullanılarak elde edilir, simetrik olarak ölçeklenir ve Dirichlet sınır koşulları (sonuç denklemin simetrik olması için genellikle Dirichlet sınır koşulları öncel çalışmalarda kullanılmıştır bkz. Newman ve Alumbaugh, 1995; Streich, 2009) kullanılırsa aşağıda verilen formda doğrusal denklem sistemi elde edilir.

$$\mathbf{KE}=\mathbf{S} \quad (2)$$

Burada, \mathbf{K} matrisi hermitian ve her bir satırında en fazla 13 sıfırdan farklı elemanı olan sparse bir matrisi, \mathbf{S} ise kaynak terimini tanımlamaktadır. Denklem sisteminin çözümü ile \mathbf{E} alan değerleri elde edilir ve yardımcı denklemler kullanılarak \mathbf{H} alanlar elektrik alanlardan türetilebilir. Denklem sisteminin çözümünde \mathbf{K} matrisinin terslenmesi (doğrudan yöntemler) veya denklem sisteminin Krylov ortamı çözümler (yinelemeli yöntemler) ile çözülmesi gerekmektedir.

Son dönemlerde nispeten küçük model ağları için doğrudan çözümler kullanılmaya başlanmıştır. Doğrudan çözümlerde matrisin tersi alındığı için her bir kaynak ve polarizasyon için tekrar denklemin çözümüne gerek duyulmamakta ve çözüm hızı artmaktadır. Bilgisayar teknolojisindeki gelişmelere bağlı olarak doğrudan çözüm yöntemlerinin kullanımı son 10 yılda artış göstermiştir ve CPU ortamında Multifrontal yöntemlerin kullanımı yaygınlaşmıştır (Streich, 2009; da Silva vd., 2012; Kordy vd., 2015; Puzyrev vd., 2016; Mütschard vd., 2017; Liu vd., 2018). Multifrontal yöntemler ile doğrudan çözümlerin herne kadar RAM kullanımı azaltılmış ise de büyük model ağları için kullanımı tercih edilmemektedir. Çalışma sırasında küçük model ağları için çözüm hızlarının karşılaştırılmasında Multifrontal yöntemlerde kullanılmıştır.

Çözülme istenen denklem sistemindeki \mathbf{K} matrisinin satır veya sütun sayısı tasarlanan 3-B model ağındaki eleman sayısına bağlı olarak yüzbinler hatta milyonlar ile ifade edilebilmektedir. Bu nedenle denklem sisteminin çözümünde kullanılan durağan ve hızlı çözümler, yöntemin hızını doğrudan etkilemektedir. Krylov ortamı çözümler RAM kullanımının doğrudan çözümlere oranla çok daha düşük olması nedeniyle sıklıkla tercih edilmektedir. 3-B EM yöntemde düz çözümde kullanılan başlıca Krylov ortamı çözümler CG (Zhdanov vd, 2000; Haber, 2004; Zhdanov vd, 2011), BICG (Sasaki vd., 2010; Farquharson ve Miensoopust, 2011; Sasaki, 2012), BICGSTAB (Xiao vd., 2018; Singh vd, 2017; Plessix ve Mulder, 2008), QMR (Kelbert vd., 2014; Tang vd.,2015; Wang ve Tan, 2017) ve GMRES (Cox vd., 2010; Grayver, 2015; Grayver ve Kolev, 2015) olarak sıralanabilir. Hursan ve Zhdanov (2002), çalışmalarında yöntemleri karşılaştırmış ve BICGSTAB, QMR ve GMRES yöntemlerinin en efektif çözümler olduğunu söylemiştir. Bu üç yöntem sıklıkla tercih edilmektedir.



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



Yukarıda özetlenmeye çalışılan çözümler geliştirilen algorithmada kullanılmış ve CPU performansları test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar kullanılarak GPU da BICGSTAB kullanımına karar verilmiştir. Çözüm sonuçları izleyen bölümde sunulmuştur.

MODEL ÇALIŞMASI

Çalışma sırasında geliştirilen algoritmanın ilksel sonuçları, 1-B yarı analitik düz çözüm algoritması (Streich and Becken, 2011) ve daha önce geliştirilen 3B CSEM düz çözüm algoritması (CUSTEM- Rochlitz et al., 2019) yardımıyla Tablo-1'de verilen yerelektrik modeli kullanılarak test edilmiştir. Oluşturulan yer elektrik modeli sonucu elde edilen E ve H alanlar her bir ölçüm noktası üzerinde 1Hz frekansı için çalışma sırasında geliştirilen algoritmanın sonuçları, CUSTEM (Rochlitz et al., 2019) ve yarı analitik çözüm algoritması ile karşılaştırılmıştır(Şekil.1). Çalışmada kullanılan kaynak $y=-3\text{km}$ 'de ve x eksenine paralel olarak konumlandırılmıştır. Konumlandırılan kaynağın dipol açıklığı 1 Km olarak tasarlanmıştır. Model çalışması sonucunda geliştirilen algoritmanın hem analitik çözüm hem de CUSTEM algoritması sonuçları ile elde edilen sonuçlar ile örtüşmektedir. Çalışma sırasında çözümlerin performansları CPU üzerinde test edilmiş ve BICGSTAB çözümlerinin en hızlı ve durağan çözümler olduğu görülmüştür (Şekil-2). Ancak doğrudan çözümler birden fazla kaynak kullanılması durumunda en efektif çözüm süresinde çözüme ulaştığı görülmektedir. Şekil-2'de tek bir kaynak kullanılması durumuna göre sonuçlar verilmiştir. Yinelemeli çözümlerde her bir kaynak için yeniden bir hesaplama yapmak gerekirken doğrudan çözümler birden fazla kaynak kullanılması durumunda hesaplama zamanında hissedilir bir artış olmamaktadır. Bu nedenle çalışma sonucunda küçük model ağları için çoklu sayıda kaynak kullanılması durumunda doğrudan çözümlerinin verimli olacağı sonucuna varılmıştır. Seçilen yinelemeli çözümler olan BICGSTAB algoritmasının CPU ve GPU performanslarına bakıldığında ise özellikle düşük frekanslarda çözümlerdeki hızlanmanın 2.5 kat daha fazla olduğu ve GPU platformunda geliştirilen algoritmanın daha verimli olduğu gözlenmektedir (Şekil-3).

SONUÇLAR

Çalışma sırasında CPU üzerinden elde edilen bulgular BICGSTAB algoritmasının 3B CSEM düz çözüm için verimli bir algoritma olduğunu ortaya koymuştur. Elde edilen bulgular neticesinde GPU ortamında da BICGSTAB algoritması kullanılmıştır. Bu sayede GPU üzerinde kodlanan çözümlerinin özellikle düşük frekanslarda 2.5 kat daha hızlı çözüme ulaştığı gözlenmiştir. Çoklu kaynak olması durumunda da küçük model ağları için ve yüksek frekanslarda multifrontal yöntemler çözüme daha hızlı yakınsayabilmektedir. Bu nedenle kullanılacak algorithmadaki çözümlerinin seçilimin elde edilen bilgiler ışığında hibrit olmasının çözüm hızını artıracığı düşünülmektedir. Bu amaçla çözüm hızını optimize edecek şekilde yüksek frekanslarda BICGSTAB ve düşük frekanslarda multifrontal yöntemin kullanımı kaynak sayısının birden fazla olduğu durumlarda önerilmektedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma 1059B191800610 başvuru numaralı TÜBİTAK BİDEB desteği kapsamında desteklenmiştir.



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



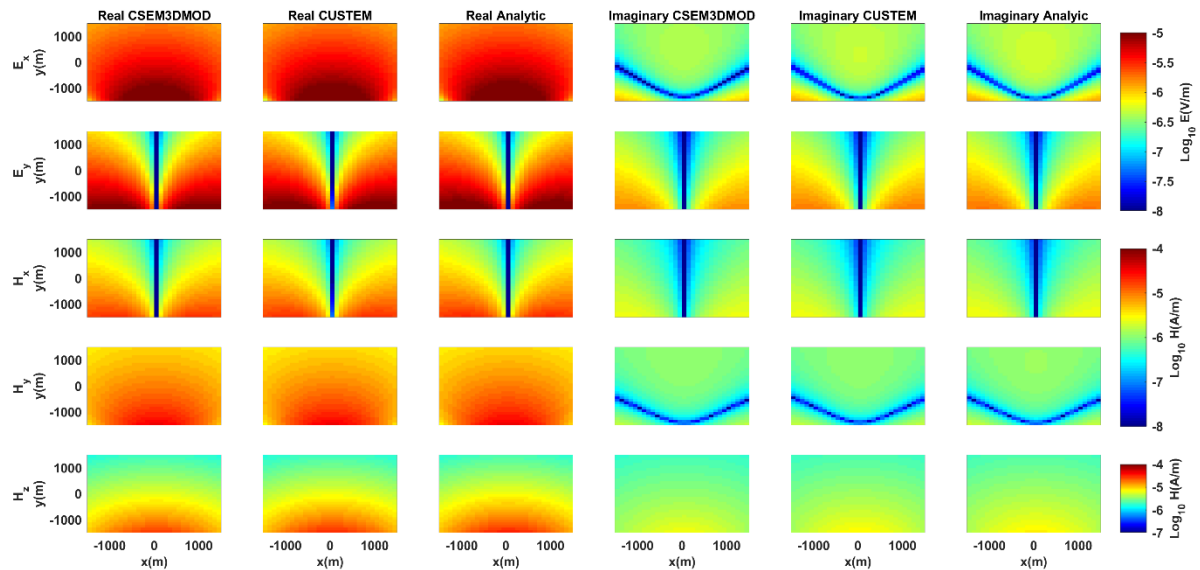
KAYNAKLAR

- Avdeev, D. B., Kuvshinov, A. V., Pankratov, O. V., & Newman, G. A. (2002). Three-dimensional induction logging problems, Part I: An integral equation solution and model comparisons. *Geophysics*, 67(2), 413-426.
- Badea, E. A., Everett, M. E., Newman, G. A., & Biro, O. (2001). Finite-element analysis of controlled-source electromagnetic induction using Coulomb-gauged potentials. *Geophysics*, 66(3), 786-799.
- Constable, S., & Weiss, C. J. (2006). Mapping thin resistors and hydrocarbons with marine EM methods, Part II—Modeling and analysis in 3D. *Geophysics*, 71(6), G321-G332.
- da Silva, N. V., Morgan, J. V., MacGregor, L., & Warner, M. (2012). A finite element multifrontal method for 3D CSEM modeling in the frequency domain. *Geophysics*, 77(2), E101-E115.
- Demirci, I., Erdoğan, E., & Candansayar, M. E. (2012). Two-dimensional inversion of direct current resistivity data incorporating topography by using finite difference techniques with triangle cells: Investigation of Kera fault zone in western Crete. *Geophysics*, 77(1), E67-E75.
- Doll, W. E., Nyquist, J. E., Beard, L. P., & Gamey, T. J. (2000). Airborne geophysical surveying for hazardous waste site characterization on the Oak Ridge Reservation, Tennessee. *Geophysics*, 65(5), 1372-1387.
- Erdoğan, E., Demirci, I., & Candansayar, M. E. (2008). Incorporating topography into 2D resistivity modeling using finite-element and finite-difference approaches. *Geophysics*, 73(3), F135-F142.
- Gunnink, J. L., Bosch, J. H. A., Siemon, B., Roth, B., & Auken, E. (2012). Combining ground-based and airborne EM through Artificial Neural Networks for modelling glacial till under saline groundwater conditions. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(8), 3061.
- Haber, E., & Ascher, U. M. (2001). Fast finite volume simulation of 3D electromagnetic problems with highly discontinuous coefficients. *SIAM Journal on Scientific Computing*, 22(6), 1943-1961.
- Mackie, R. L., Smith, J. T., & Madden, T. R. (1994). Three-dimensional electromagnetic modeling using finite difference equations: The magnetotelluric example. *Radio Science*, 29(4), 923-935.
- Mitsuhata, Y., & Uchida, T. (2004). 3D magnetotelluric modeling using the T- Ω finite-element method. *Geophysics*, 69(1), 108-119.
- Newman, G. A., & Alumbaugh, D. L. (1995). Frequency-domain modelling of airborne electromagnetic responses using staggered finite differences. *Geophysical Prospecting*, 43(8), 1021-1042.
- Newman, G. A., & Alumbaugh, D. L. (2002). Three-dimensional induction logging problems, Part 2: A finite-difference solution. *Geophysics*, 67(2), 484-491.
- Pfaffhuber, A. A., Grimstad, E., Domaas, U., Auken, E., Foged, N., & Halkjaer, M. (2010). Airborne EM mapping of rockslides and tunneling hazards. *The Leading Edge*, 29(8), 956-959.
- Rochlitz, R., Skibbe, N., & Günther, T. (2019). custEM: Customizable finite-element simulation of complex controlled-source electromagnetic data. *Geophysics*, 84(2), F17-F33.
- Steuer, A., Siemon, B., & Auken, E. (2009). A comparison of helicopter-borne electromagnetics in frequency-and time-domain at the Cuxhaven valley in Northern Germany. *Journal of Applied Geophysics*, 67(3), 194-205

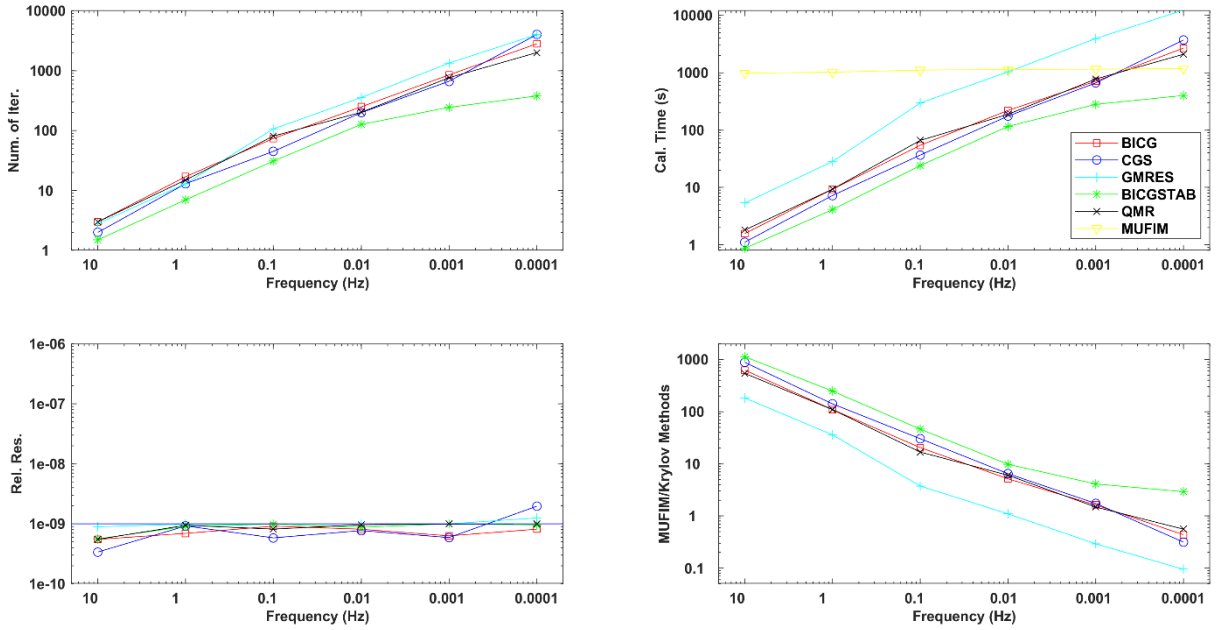
- Streich, R. (2009). 3D finite-difference frequency-domain modeling of controlled-source electromagnetic data: Direct solution and optimization for high accuracy. *Geophysics*, 74(5), F95-F105.
- Streich, R., & Becken, M. (2011). Electromagnetic fields generated by finite-length wire sources: comparison with point dipole solutions. *Geophysical Prospecting*, 59(2), 361-374.
- Wannamaker, P. E. (1991). Advances in three-dimensional magnetotelluric modeling using integral equations. *Geophysics*, 56(11), 1716-1728.
- Wolfgram, P., & Golden, H. (2001). Airborne EM applied to sulphide nickel-examples and analysis. *Exploration Geophysics*, 32(3/4), 136-140.

Tablo 1. Çalışmada kullanılan 1-B yerelektrik modeli

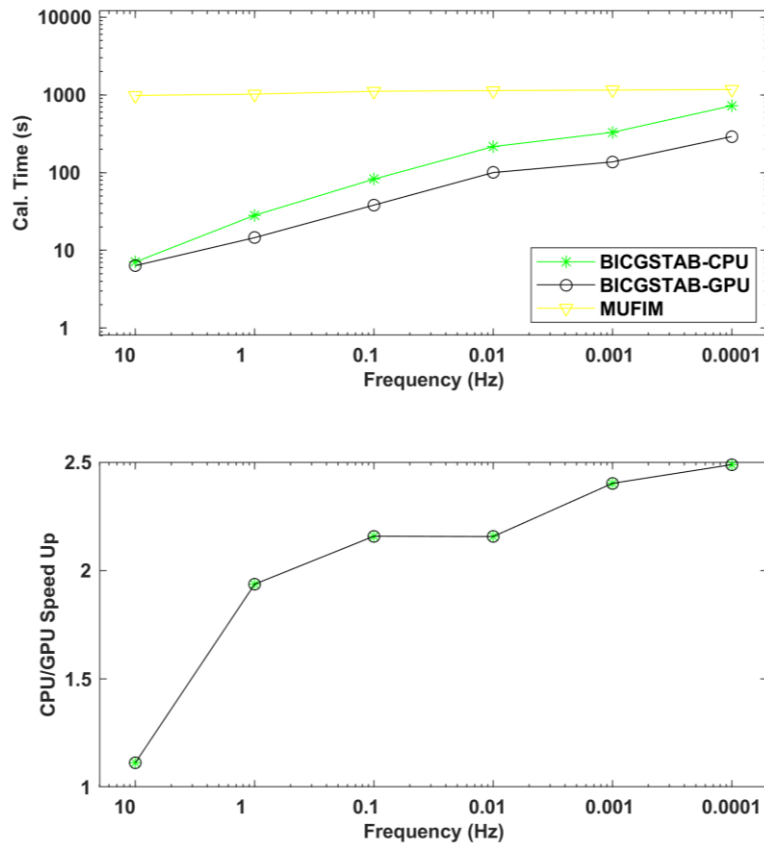
	z (m)	Resistivity (Ω m)
B 1	0 to 300	100
B 2	300 to 700	10000
B 3	700 to infinity	1000



Şekil 1. Çalışma sırasında geliştirilen algoritma (CSEM3DMOD), CUSTEM (Rochlitz et al., 2019) ve Yarı analitik çözümler (Streich and Becken 2011) ile elde edilen elektrik ve manyetik alan (E_x , E_y , H_x , H_y , H_z) değerlerinin 1 Hz frekansı için karşılaştırılması



Şekil 2. Yinelemeli yöntemlerin iterasyon sayısı, hesaplama zamanı, görecel hata ve hızlanma açısından karşılaştırılması



Şekil 3. Seçilen çözücünün (BICGSTAB) CPU ve GPU performansları ve görecel hızlanma grafikleri



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



S19	Kuzey Anadolu Fayı yüzey kırığının VLF-R ölçümleriyle görüntülenmesi
	Imaging of the surface rupture of the North Anatolian Fault using VLF-R measurements

Gökhan KARCIOĞLU^{1*}, Anisya B.TEKKELI¹, Ümit AVŞAR², Karya AKYÜZ², Feyza GÜNAYDIN², Oğuz ALTINTAŞ²

¹ İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, Büyükçekmece, İstanbul

² İstanbul Teknik Üniversitesi, Maden Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, Ayazağa, Maslak, İstanbul

E-posta: gkarci@iuc.edu.tr

*Sunumu yapacak yazar

ÖZ

1999 Kocaeli Depremiyle ($M_w = 7.4$) birlikte Kuzey Anadolu Fayı'nın Düzce-Hersek arasındaki bölümü boyunca 5m'ye kadar atım gözlenen ~145 km uzunluğunda bir yüzey kırığı meydana getirmiştir. Günümüzde yeryüzünden gözlenmeyen yüzey kırığının İzmit-Spanca Gölü arasındaki segmentinin sığ elektriksel özelliklerinin Çok Düşük araştırılması hedefiyle, bölgede Güney-Kuzey doğrultulu dört hat boyunca TE modunda Frekans Elektromanyetik-Özdirenç (VLF-R) ölçümleri toplanmıştır. Toplanan veriler iki boyutlu modellenmiş ve sonuçları karşılaştırılmıştır. Elde edilen modellerde, kırık kendisini iletken-yalıtan sınırı olarak göstermiştir. Yüzey kırığı içerisinde, önceki paleosismik hendek çalışmalarında belirlenmiş killi birimler, çevresine göre iletken olarak görüntülenmiştir ve bu geçirimsiz killerin, sığ derinliklerde meteorik suların yer içindeki dağılımını önemli derecede etkilediğini görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: VLF-R, ters çözüm, Kuzey Anadolu Fayı

ABSTRACT

With the 1999 Kocaeli earthquake ($M_w = 7.4$), a ~145 km long surface rupture with a slip up to 5m is emerged throughout the part of the North Anatolian Fault between Düzce-Hersek. In order to investigate near-surface electrical properties of the rupture segment between İzmit and Sapanca Lake, which is currently non-visible from the surface, Very Low Frequency Electromagnetic-Resistivity (VLF-R) measurements are collected on four South-North oriented traverses in TE mode. The collected data is modeled in two-dimensions and their results are compared. The recovered models, the rupture manifested itself as a conductive-resistive boundary. Clayey fills in the rupture, which are previously determined from paleoseismic trench studies, are imaged as conductors, and these non-permeable clays are determined to be affecting the distribution of the meteoric waters in the near-surface, significantly.

Keywords: VLF-R, inversion, North Anatolian Fault



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



GİRİŞ

VLF yöntemi, diğer frekans ortamı, uzak alan metodlar gibi iletkenlere karşı daha duyarlıdır. Bu nedenle yöntem, yeraltı iletkenlik dağılımında önemli farklılıkların arandığı fay (Gürer vd, 2009), jeotermal (Drahor ve Berge, 2006) ve sığ maden yataklarının keşfinde (Bayrak ve Şenel, 2012) sıklıkla uygulanmaktadır. VLF yöntemi, ölçülen manyetik ve elektrik alan bileşenlerine göre iki farklı adlandırmaya sahiptir. Bunlardan VLF-EM yönteminde sadece manyetik alan bileşenleri ölçülürken, VLF-R yönteminde yatay manyetik Alana dik yöndeki elektrik alan da iki elektrot aracılığıyla ölçülmektedir; bu sayede yeraltı iletkenlik dağılımı hakkında daha çok bilgiye ulaşılabilmektedir. VLF verileri çok zaman basit ayrık filtrelerle (Fraser, 1969; Karous ve Hjelt, 1983) incelenmektedir; İki boyutlu ters çözümler ise, eksik tanımlı bir problem çözümünü gerektirse de genelde jeolojik olarak mantıklı sonuçlara erişilebilmektedir.

Bu nedenle, Kuzey Anadolu Fayının İzmit Sapanca Gölü arasındaki segmenti üzerinde sığ iletkenlik dağılımının belirlenmesi amacıyla VLF-R yöntemi dört hat üzerinde uygulanarak yuvarlaticılı ters çözüm ile değerlendirilmiştir ve elde edilen modeller yorumlanmıştır.

YÖNTEM

VLF yöntemi, 15-30 kHz arasında yayın yapan, genelde askeri amaçlarla kullanılan vericilerin yaydığı elektromanyetik alanların yer içinde oluşturduğu tepkiden faydalanarak sığ yer-elektrik özellikleri inceleyen bir jeofizik yöntemdir. Yöntem, sadece yatay ve düşey manyetik alanların ölçülmesi durumunda VLF-EM, elektrik alanların da ölçülmesi durumunda ise VLF-R olarak adlandırılır. VLF-EM yönteminde düşey ve yatay manyetik alanların oranının (tipper) gerçel ve sanal bileşenleri yüzde olarak verilir (denklem 1). VLF-R yönteminde ise bu verilere ilave olarak görünür özdirenç (denklem 2) ve faz bilgisi de elde edilir (denklem 3).

$$T_{z,i} = H_z / H_i \quad (1)$$

$$\rho_{a i,j} = \frac{1}{\omega \mu_0} \left| \frac{E_i}{H_j} \right| \quad (2)$$

$$\varphi_{i,j} = \text{atan} \left(\frac{\text{im}(E_i/H_j)}{\text{re}(E_i/H_j)} \right) \quad (3)$$

Yukarıdaki denklemlerde i ve j , yanal yönlerdeki alan bileşenlerini ifade etmektedir. H , manyetik alan şiddeti, E elektrik alan, ω açısal frekans ve μ_0 boşluğun manyetik geçirgenliğidir.

Toplanan verilerden tipper, yanal sınırlara duyarlıdır; özdirenç ve faz verilerinin toplanması ise yatay tabakaların belirlenmesini kolaylaştırır. VLF-R yöntemi ile ideal koşullarda yerin ilk 100m içerisindeki özdirenç dağılımı belirlenebilir, ancak iletken çökel ortamlarda genelde ilk birkaç 10m içerisinde bilgi edinmek mümkün olmaktadır.

VLF-R yöntemiyle toplanan verilerin değerlendirilmesi çok zaman iki boyutlu ters çözümlerle gerçekleştirilmektedir. Problem eksik tanımlı olduğu için düzgünleyicilere gereksinim duyulmaktadır. Jeofizik ters çözümde en çok uygulanan düzgünleyicilerden biri, görece basit ve keskin olmaktan uzak yapı sınırlarına sahip modeller sağlayan yuvarlatıcı düzgünleyicidir ve bu çalışmada da kullanılmıştır. Ters çözüm işlemi aşağıdaki denklemle gerçekleştirilmiştir.

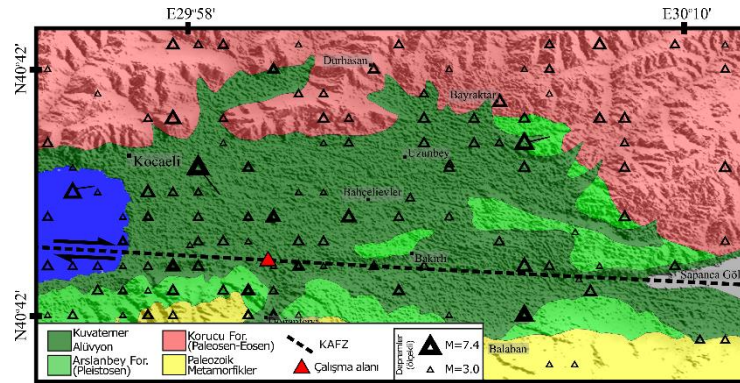
$$\mathbf{m}_{i+1} = [\gamma \mathbf{C}^T \mathbf{C} + (\mathbf{W})^T \mathbf{W}]^{-1} (\mathbf{W})^T \mathbf{W}(\mathbf{d} - \mathbf{F}[\mathbf{m}_i] + \mathbf{J}\mathbf{m}_i) \quad (4)$$

Denklemden \mathbf{m} model parametre vektörü, \mathbf{d} gözlenen veri vektörü, $\mathbf{F}[\mathbf{m}_i]$ mevcut model parametreleri için hesaplanan vektörü, \mathbf{J} Jacobian dizisi, \mathbf{C} kabalık dizisi (roughening matrix) ve γ model kabalığı ile çakışma hatası arasındaki dengeyi belirleyen Lagrange parametresidir.

BÖLGENİN JEOLJİSİ

Çalışma alanı, 1999 İzmit depreminden sonra ($M_w = 7.4$) Düzce-Hersek arasında 5m'ye kadar atım gözlenen yüzey kırığının (Toksöz vd, 1999; Barka vd, 2002) İzmit-Sapanca Gölü arasındaki segmenti üzerindedir. Bölgede, depremle birlikte geniş çaplı zarar ve sivilaşma gözlenmiştir. Bölgenin basitleştirilmiş jeolojisine göre (Şekil 1), araştırma alanında yüzey Kuvaterner alüvyon örtüsüyle kaplıdır. Karakaş ve Çoruk (2010)' a göre alüvyon örtünün kalınlığı 100m'den daha derine ulaşmaktadır.

Günümüzde yüzey kırığı büyük ölçüde gömülü olmakla birlikte belirli bölgelerde kırığın konumu detaylı biçimde kaydedilmiştir. Ayrıca, Gürer vd. (2019) tarafından bölgede gerçekleştirilmiş paleosismik hendek çalışmalarından da kırığın konumu bilinmektedir.

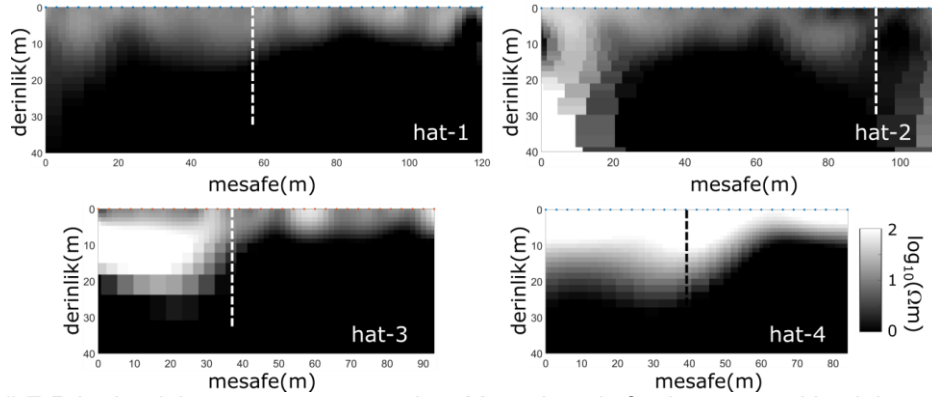


Şekil 1 Bölgenin basitleştirilmiş jeolojisi (Kurtuluş ve Bozkurt, 2010'dan yeniden çizilmiştir).

SONUÇLAR

Ters çözüm, hat-3 için %5; diğer hatlar için %10 hata tabanı ile gerçekleştirilmiştir. Bütün hatlarda, görünür öz direnç, faz ve tipper verileri değerlendirilmiştir. Gerçekleştirilen ters çözümler sonucunda dört hat için sırasıyla 1.27, 1.47, 1.23 ve 1.36 RMS hataya sahip modeller elde edilmiştir (Şekil 2). Elde edilen modellerde, hat-1 haricinde, fayın iki yanında

önemli iletkenlik farklılıkları gözlenmiştir. Bölgede daha önceden gerçekleştirilmiş paleosismolojik hendek çalışmalarından fay kırığını doldurmuş olan killerin varlığı bilinmektedir. Ters çözümler sonucunda elde edilen yer iletkenlik modelleri, killi fay dolgusunun meteorik suların yer içerisindeki dağılımını önemli ölçüde etkilemekte olabileceğini ortaya koymaktadır.



Şekil 2 VLF-R hatları için ters çözüm sonuçları. Yüzeylemiş fay kırığının yaklaşık konumu kesikli çizgiyle gösterilmiştir.

TEŞEKKÜR

Yardımları için Prof.Dr. Ömer Feyzi GÜRER ve Prof.Dr. Aysan GÜRER'e çok teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

- Baranwal V.C., Franke A., Börner R., Spitzer K., 2011, Unstructured grid based 2-D inversion of VLF data for models including topography. *Journal of Applied Geophysics*, **75** (2011) 363–372
- Barka A., Akyuz H. S., Altunel E., Sunal G., Cakir Z., Dikbas A., Yerli B., Armijo R., Meyer B., de Chabaliier J.B., Rockwell T., Dolan J.R., Hartleb R., Dawson T., Christofferson S., Tucker A., Fumal T., Langridge R., Stenner H., Lettis W., Bachhuber J., Page W., 2002, The surface rupture and slip distribution of the 17 August 1999 Izmit earthquake (M 7.4), North Anatolian fault. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **92**(1), 43-60. doi: 10.1785/0120000841
- Bayrak M., Şenel L., 2012, Two-dimensional resistivity imaging in the Kestelek boron area by VLF and DC resistivity methods. *Journal of Applied Geophysics*, **82**, 1-10.
- Drahor M.G., Berge M.A., 2006, Geophysical investigations of the Seferihisar geothermal area, Western Anatolia, Turkey. *Geothermics*, V.**35** (2006), pp. 302-320
- Fraser D.C., 1969, Contouring of VLF-EM data, *Geophysics* , **34**, 958-967
- Gürer A., Bayrak M., Gürer Ö.F., 2009, A VLF survey using current gathering phenomena for tracing buried faults of Fethiye–Burdur Fault Zone, Turkey. *Journal of Applied Geophysics*, V**68** (2009), pp. 437-447



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



- Gürer Ö.F., Coruk Ö., Sanğu E., 2019, "Kocaeli İli, Başiskele İlçesi, Ovacık Mahallesi, G24D01A04D ve G24D05C02B Paftalarında Fay Uyuşmazlığına Yönelik 1/1000 Ölçekli Revize İmar Planına Esas Jeolojik, Jeofizik ve Jeoteknik Etüt İşİ" Projesi Kapsamında, Paleosismolojik Amaçlı Arazi ve Hendek Çalışmaları Hakkında Teknik Değerlendirme Raporu [Yayınlanmamış teknik rapor]. Kocaeli Belediyesi, Türkiye.
- Karakas A., Coruk O., 2010, Liquefaction analysis of soils in the western Izmit basin, Turkey. *Environmental & Engineering Geoscience*, **16(4)**, 411-430. doi: 10.2113/gseegeosci.16.4.411
- Karous M., Hjelt S.E., 1983, Linear filtering of VLF dip angle measurements, *Geophysical Prospecting*, **31**, 782-794
- Kurtuluş C., Bozkurt A., 2010, Başiskele-Kocaeli Civarında Yer Altı Suyu Akiferlerinin Tespiti Jeofizik ve Sondaj Araştırmaları. *Uygulamalı Yerbilimleri Dergisi*, **9(2)**, 1-9.
- Toksöz M. N., Reilinger R. E., Doll C. G., Barka A., Yalçın, N., 1999, Izmit (Turkey) earthquake of 17 August 1999: first report. *Seismological Research Letters*, **70(6)**, 669-679. doi: 10.1785/gssrl.70.6.669



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



S20	Karşıt-Kuyu Radar Yönteminde Occam Ters Çözüm Yöntemi ile Seyahat Zamanı Tomografisi
	Traveltime Tomography with Occam Inversion Method in Crosshole Radar Method

*Esra Ezgi BAKSI¹, Selma KADIOĞLU²

¹ Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Mekansal Planlama Genel Müdürlüğü, Yerbilimsel Etüt Dairesi Başkanlığı

² Ankara Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Jeofizik Mühendisliği Bölümü
E-posta: ¹eezgi.baksi@cbs.gov.tr, ²kadioglu@ankara.edu.tr

ÖZ

Karşıt Kuyu radar yönteminde, yeriçi elektromanyetik (EM) dalga hızı veya dielektrik katsayısı modelini belirlemek için karşıt kuyu radar dalga alanı (radar izi) verilerinin varış zamanları kullanılarak ters çözüm çakıştırma yöntemleri kullanılmaktadır. Bu çalışmada, içinde farklı boyut ve hızlarda materyaller içeren sentetik EM dalga hızı modelleri kullanılarak Occam ters çözüm yöntemi ve eşlenik gradyan en küçük kareler (CGLS) yöntemleri ile EM dalga hız modelleri elde edilmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

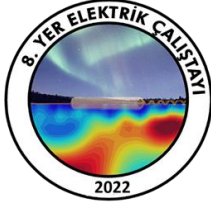
Modelleme aşamasında, seyahat zamanı hesabı için ikinci dereceden sonlu farklar yaklaşımı ile iki boyutlu (2B) Eikonal denkleminin çözümü kullanılmıştır. Çözümler hızın tersi olan yavaşlık parametresi ile gerçekleştirilmektedir. Çalışma kapsamında, ikinci dereceden eikonal denklem çözümü ile karşıt-kuyu radar verisinin ilk varışlarının seyahat zamanı tomografisi hesaplamaları, CGLS and Occam Ters çözüm yöntemleri için basit ve karmaşık yeraltı hız modellerinden oluşan farklı sentetik veriler üzerinden test edilmiştir. Kullanılan sentetik test verilerinin tomografi sonuçlarına bakıldığında, elde edilen hız modeli sonuçlarının durağan ve birbirlerine yakın olduğu görülmüştür. Bununla birlikte Occam ters çözüm yönteminin CGLS ters çözüm yöntemine oranla daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Karşıt-kuyu radar, eikonal denklem, ilk varış seyahat zamanı tomografisi, eşlenik gradyan en küçük kareler ters çözümü (CGLS), Occam ters çözümü.

ABSTRACT

In crosshole radar method, inversion methods are used by using the arrival times of the crosshole radar wave field (radar trace) data to determine the subsurface electromagnetic (EM) wave velocity or dielectric coefficient model. In this study, EM wave velocity models were obtained using Occam inversion method and conjugate gradient least squares (CGLS) methods by using synthetic EM wave velocity models containing materials of different sizes and velocities, and the results were compared.

In the modeling process, the solution of the two-dimensional (2D) Eikonal equation with the quadratic finite difference approach was used for the travel time calculation. The solutions are carried out with the slowness parameter which is the inverse of the velocity. The scope



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



of the study, the solution of the quadratic eikonal equation and the travel time tomography calculations of the first arrivals of the crosshole radar data were tested on different synthetic data consisting of simple and complex velocity models for the CGLS and Occam Inversion methods. When the tomography results of the synthetic test data used were examined, it was seen that the obtained velocity model results were stable and close to each other. At the same time, it has been observed that Occam inversion method gives better results than CGLS inversion method.

Keywords: Crosshole radar, eikonal equation, first arrival traveltime tomography, conjugate gradient least-squares (CGLS) inversion, Occam's inversion.

GİRİŞ

Karşılıklı iki kuyu içerisinde yapılan radar ölçümünde, verici ve alıcı ayrı kuyulara yerleştirilir. Alıcı ve vericilerin derinlikle değişen her bir konumu için elektromanyetik dalganın ilk varış seyahat zamanları kaydedilir. Kaşıt-Kuyu radar ölçümünde, kuyulardan birinde alıcı anten sabit tutulurken verici anten kuyu sonuna kadar belirli aralıklarla hareket ettirilerek ölçü alınır. Ardından alıcı antenin konumu değiştirilerek tekrar sabit tutularak, verici anten ise tekrar yüzeyden derine doğru belirli aralıklarla tekrar hareket ettirilerek ölçü alınır. Bu şekilde alıcı anten kuyu sonuna ilerleyene kadar ölçüme devam edilir. Böylelikle iki kuyu arasında kalan alanın tamamı taranmış olacaktır. Karşılıklı kuyularda ölçüm alınırken verici ve alıcı antenlerin yerleri değiştirilebilir. Antenlerin hangi kuyularda olduğunun bir önemi yoktur.

Bir ortamın dielektrik sabiti, elektromanyetik (EM) dalga hızı değişimi gibi fiziksel özellikleri ile diğer ilgili parametrelerin değişimi karşılıklı iki kuyu arasında ölçülen radar verileriyle belirlenebilir. Bu parametreleri belirlemek için ilk adım, oluşturulan yeraltı modelinde bir kuyuda yer alan verici antenden gönderilen ve diğer kuyudaki alıcı antene gelen yüksek frekanslı EM dalgalarının ilk varış zamanlarının ölçülmesidir. Teorik olarak seyahat süreleri, 2B eikonal denklemin, ikinci mertebeden ileri-geri fark operatörleri ve sonlu farklar yöntemi kullanılarak hesaplanır. 2B eikonal denklemin yinelemeli çözümü, seyahat süresinin çözümüyle doğrudan ilişkilidir (Ammon ve Vidale, 1993). Bu çalışma kapsamında 2B karşı-kuyu radar modelleme algoritması geliştirilmiştir. İkinci adım 2B seyahat zamanı tomografisini hesaplamaktır. Bu hesaplama için sönümlü en küçük kareler ve Occam ters çözüm yöntemleri kullanılarak bir algoritma geliştirilmiş, tomografi sonuçları ise yeraltı EM hız haritası olarak sunulmuştur. Son adımda ise, iki farklı ters çözüm yöntemi arasında elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bazı uluslararası çalışmalarda yer alan modeller kullanılarak bu iki ters çözüm yöntemi sonuçları hem birbirleriyle hem de referans alınan model sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

YÖNTEM

Minimum seyahat zamanlarını yani ilk varışları hesaplamak için, Denklem (1)'de verilen 2B eikonal denkleminin sonlu farklar algoritması çözümü kullanılmıştır (Vidale, 1988, 1990, Podvin ve Lecomte, 1991).



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



$$\left(\frac{\partial t}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial t}{\partial y}\right)^2 = s^2(x, y)$$

(1)

2B eikonal denklemin yinelemeli çözümü, Denklem (1)'de gösterildiği gibi seyahat süresi ile ilişkilidir. Bu denklemde "s" hızın tersi olarak tanımlanan yavaşlık, "t", belirli bir kaynak noktasından yayılan EM dalgasının seyahat süresi, "x" ve "z", kartezyen koordinat eksenleridir. Öncelikle yavaşlık modeli x(i) ve z(j) yönlerini içeren hücrelere bölünmüştür. Her (i,j) hücresinin bir s(i,j) yavaşlık değeri vardır. Her hücreden geçebilecek ışınların seyahat süreleri hesaplanmıştır. Hesaplamalar, sonlu farklar yaklaşımı ile ikinci dereceden ileri ve geri fark operatörleri kullanılarak yapılmıştır. Eikonal denklemin sonlu farklar yöntemi ile çözümü hesaplamalarında Qin vd. (1992) yaklaşımı kullanılmıştır.

Modellemede yapılan tüm bu hesaplamalar için Fortran dilinde yazılan bir seyahat zamanı hesaplama algoritması geliştirilmiştir. Farklı sentetik modeller oluşturularak 2B seyahat zamanı modellemesi yapılmış ve hangi durumda nasıl sonuçlar elde edildiği irdelenmiştir. Bu algoritma ile sentetik yeraltı modelleri için alıcı antenden çıkan ve verici antende kaydedilen ışının seyahat zamanı değerleri hesaplanmıştır. Seyahat zamanı kontur haritaları oluşturulmuş, geliştirilen yazılım ile Giroux vd (2007)'nin oluşturduğu modelleme sonuçları karşılaştırılmış ve seyahat zamanları hesaplanarak oluşturulan iki model arasında fark gözlenmemiştir.

Karşıt-Kuyu Radar Verilerinin 2B Tomografisi

Bu çalışmada, karşıt-kuyu radar verilerinin 2B tomografisi ile yeraltının 2B EM dalga hızı haritasının elde edilmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda MATLAB programlama dili ile bir algoritma geliştirilmiş ve yazılımda sönümlü en küçük kareler ve Occam optimizasyon yöntemleri kullanılmıştır.

Optimizasyon yöntemleri, ölçülen ve hesaplanan seyahat zamanları arasındaki farklara ve bu farkların en aza indirilmesine dayanmaktadır. Bu açıdan bakıldığında ters çözüm aslında doğrudan modelleme ile ilgilidir. Bu model gerçeğe ne kadar yakın seçilirse, doğru seyahat zamanı hesaplanması ve doğru kontur haritalarının oluşturulması sağlanacaktır. Tomografi yönteminin başarısı için doğru modelleme önemlidir. Ölçülen ve hesaplanan seyahat zamanı değerleri arasındaki fark, tercih edilen ters çözüm yöntemleri kullanılarak en aza indirilmeye çalışılmıştır. Tomografi, karşılıklı iki kuyu arasında ilerleyen EM dalgasının alıcıdan vericiye ulaşma zamanı hesabı için yapılmaktadır. Geliştirilen yazılım ile iki farklı ters çözüm yöntemi için sonuçlar elde edilmiş ve birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Linde vd (2008) tarafından kullanılan yeraltı modelinin ters çözüm sonucu ile bu çalışma kapsamında yapılan ters çözüm sonuçları Şekil 1b, c ve d' de gösterilmektedir.

Şekil 1' de verilen örnek modelde, elektromanyetik dalga hızı 75 m/μs olan bir ortamda yer alan 100 m/μs yüksek ve 50 m/μs düşük EM dalga hızlarına sahip dikdörtgen ve kare şekilli 3 homojen yapıya sahip bir yer modeli kullanılmıştır. İki kuyu arası mesafe 9 metre, kuyu derinlikleri ise 12 metredir. Model 0.25x0.25m boyutlarında hücrelere bölünmüş, 1750 hücre için işlem yapılmıştır. Yüzeyden başlayarak kuyu boyunca ilerlenmiş, 12.125 m derinliğe kadar alıcı ve verici antenler 0.25 m aralıklarla kaydırılarak ölçü alınmıştır. (Şekil 1a).



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



Tablo 1 Linde *vd* (2008)'nin çalışmalarında kullandığı sönümlü en küçük kareler yöntemi ile bu çalışma kapsamında geliştirilen sönümlü en küçük kareler yöntemi sonuçları arasındaki RMS Değeri farkı.

Yöntem	RMS Değeri (%)
Ters Çözüm Algoritması Sonucu (Linde <i>vd</i> , 2008)	1.85
Sönümlü En Küçük Kareler (çalışma kapsamında)	1.63

Tablo 2 Bu çalışma kapsamında geliştirilen sönümlü en küçük kareler ve Occam yöntemleri arasındaki RMS Değeri farkları ve hesaplama süreleri.

Yöntem	RMS Değeri (%)	Hesaplama Süresi (dakika)
Sönümlü En Küçük Kareler (çalışma kapsamında)	1.63	22,34
Occam Yöntemi(çalışma kapsamında)	1.02	28,32

SONUÇLAR

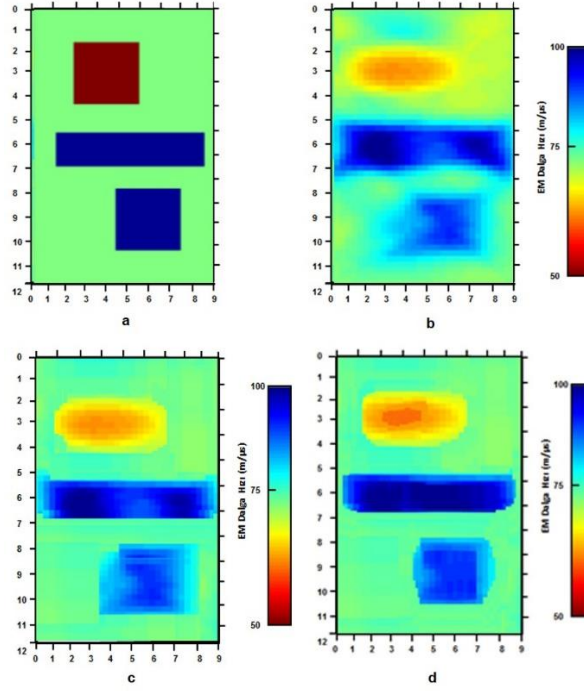
Çalışma kapsamında oluşturulan sentetik yeraltı modellerine ait 2B EM hız haritası oluşturmak için 2B seyahat zamanı modellemesi ve seyahat zamanı tomografisi algoritmaları geliştirilmiştir. 2B modelleme algoritması, sonlu farklar yöntemi ile 2B eikonal denkleme (Denklem 1) dayanmaktadır. Tomografi algoritması hem sönümlü en küçük kareler ters çözüm yöntemi hem de Occam ters çözüm yöntemi kullanılarak geliştirilmiştir. Bu yazılımların doğruluğu kontrolü amacıyla bazı uluslararası çalışmalarda kullanılan modeller seçilmiş, elde edilen sonuçlar bu yeraltı modelleri ile karşılaştırılmış ve bu çalışmada sunulmuştur. Çalışma kapsamında geliştirilen tomografi yazılımı sonuçlarına bakıldığında, RMS hata değerlerinin Linde *vd* (2008)'den daha düşük olduğu görülmüştür (Tablo 1). Ayrıca Occam ters çözüm yöntemi ile hesaplanan RMS hata değerinin sönümlü en küçük kareler ters çözüm yönteminden daha az olduğu (Tablo 2), ancak hesaplama süresi tam tersi daha fazla olduğu görülmüştür.

KAYNAKLAR

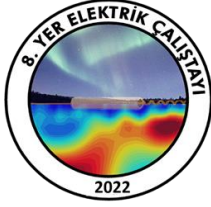
- Ammon CJ, Vidale JE 1993, Tomography without rays. Bulletin of the Seismological Society of America, 83, 509–528.
- Giroux B, Gloaguen E and Chouteau M 2007, bh_tomo—a Matlab borehole georadar 2D tomography package, Computers & Geosciences, Vol. 33, 1, 126-137.
- Linde N, Tryggvason A, Peterson J and Hubbard S 2008, Joint inversion of crosshole radar and seismic travel times acquired at the South Oyster Bacterial Transport Site, Geophysics, Vol. 73, 4, 29-37.
- Podvin P and Lecomte I 1991, Finite difference computation travel times in very contrasted velocity models: a massively parallel approach and its associated tools, Geophysics Jour. Int., 105, 271-284.
- Qin F, Luo Y, Olsen KB, Cai W and Schuster G 1992, Finite Difference Solution of the Eikonal Equation Along Expanding Wavefronts,” Geophysics, Vol. 57, 3, 478-487.

Vidale, JE 1988, Finite-difference calculation of travel times, Bulletin of Seis. Soc. of America, Vol. 78, 6, 2062-2076.

Vidale, JE 1990, Finite-difference calculation of travel times in three dimension, Geophysics, Vol. 55, 5, 521-526.



Şekil 1 a. Tomografi için kullanılan yeraltı modeli, **b.** Linde vd (2008), **c.** Sönümlü en küçük kareler yönteminin tomografi sonucu ve **d.** Aynı yeraltı modeli için Occam yönteminin tomografi sonucu



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



S21	Maden Araştırmasında DAÖ ve RMT Verilerinin Düzensiz Ağ Kullanılarak 2B Birleşik Ters Çözümü
	2D Joint Inversion of DCR and RMT Data by Using Unstructured Mesh on Mineral Exploration

Özcan ÖZYILDIRIM^{*1}, İsmail DEMİRCİ¹, N. Yıldırım GÜNDOĞDU¹, M. Emin CANDANSAYAR¹

¹ Ankara Üniversitesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, Jeofizik Modelleme Grubu, Gölbaşı, Ankara.
E-posta: ozyildirim@ankara.edu.tr

^{*}Sunumu yapacak yazar

ÖZ

Düzenli ağ tabanlı algoritmalarda, model ağı, dikdörtgen hücreler ile oluşturulduğunda, hücrelerin düşey boyutları derinlik arttıkça büyürken, yanal yönde hücre boyutları sabit kalmaktadır. Ayrıca modelin derin bölümlerinde, hücre boyutlarının uyumsuz en boy oranı nedeniyle model parametrelerinin çözünürlüğü küçülür ve iyi çözümlenemez. Geliştirilen sonlu elemanlar algoritmalarının sonlu farklar yöntemine göre sayısal olarak başarılı olsa da yöntemin dezavantajı olarak daha yavaş olduğu bilinmektedir. Bu problemlerin önüne geçebilmek ve yüzey topoğrafyasının daha iyi temsil edilebilmesi için düzensiz ağ kullanılarak Doğru akım Özdirenç ve Radyomanyetotellürik verilerinin iki-boyutlu ters çözümü için yeni bir algoritma geliştirilmiştir. İlk olarak, geliştirilen birleşik ters çözüm algoritması, arkeoloji, tünel ve maden sahası modellerinden elde edilmiş yapay veriler kullanılarak test edilmiş ve önceden geliştirilmiş düzenli ağ kullanan bir algoritma ile karşılaştırılmıştır. Algoritma, bir maden sahasında toplanan gerçek verilerle de test edilmiştir. Sonuçlar, geliştirilen birleşik ters çözüm algoritmasının hem iletken hem de yalıtkan hedeflerin bulunmasında başarılı olduğunu göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Radyomanyetotellürik, Doğru Akım Özdirenç, Düzensiz Ağ, Birleşik Ters Çözüm, Maden araştırması

ABSTRACT

In the structured grid-based algorithms, when the mesh is being generated with rectangular cells, the vertical lengths of the cells get bigger towards the depths while the lateral lengths remain constant. Also, because of the incompatible aspect ratio of model cell sizes in deeper model sections, the resolution of the model parameters will get smaller and cannot be resolved well with the structured grids. Although the developed finite element algorithms are numerically successful compared to the finite difference algorithms, it is known that the method is slower as a disadvantage. In order to prevent these problems and to represent the undulated surface topography well enough, a new two-dimensional joint inversion algorithm has been developed for Radiomagnetotelluric and Direct current resistivity data by using the unstructured mesh. First, the developed joint inversion algorithm have been tested using synthetic data simplified from archaeological, tunnel and mine site scenarios and the results have been compared with the conventional algorithms using structured grids. Algorithm has also been tested with the real data which were collected from mineral



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



investigation site. The results show that the developed joint inversion algorithm is a powerful tool to detect both resistive and conductive targets.

Keywords: Radiomagnetotelluric, Direct current resistivity, Unstructured mesh, Joint Inversion, Mineral exploration

GİRİŞ

Son dönemlerde bilgisayar teknolojisinin gelişimine paralel olarak Elektromanyetik (EM) verilerin birleşik ters çözümü üzerinde çalışılmaya başlanmıştır. Doğru akım öz direnç (DAÖ) verilerinin EM verileri ile birleşik ters çözümü, genellikle Manyetotellurik (MT) yöntemi ve benzeri düzlem dalga kabulü yapılabilen RMT ve Audio-Manyetotellurik (AMT) yöntemleri ile yapılmıştır (Sasaki 1989, Candansayar ve Tezkan 2008, Kalschever vd 2010).

DAÖ ve RMT yöntemlerinde elde edilen parametre yer altı iletkenliği olmasına rağmen, DAÖ yöntemi yalıtkan yapılara, RMT yöntemi ise iletken yapılara daha duyarlıdır. Bu nedenle, hem iletken hem de yalıtkan yapıların çözünürlüğünün artırılması için birçok araştırmacı RMT ve DAÖ verilerinin birleşik ters çözümünü önermişlerdir (Candansayar ve Tezkan 2008, Kalscheuer vd 2010). Bu algoritmaların düz çözüm bölümleri sonlu farklar (SF) yöntemi ile düzenli ağ kullanılarak geliştirilmiştir. Düzenli ağ yapısı kullanımı, derinlik yönündeki parametre çözünürlüklerini düşürmekte ve topoğrafyanın temsil edilmesini güçleştirmektedir. Bu problemin üstesinden gelmek için son dönemlerde sonlu elemanlar (SE) yönteminde düzensiz ağ kullanan düz ve ters çözüm algoritmaları geliştirilmiştir. DAÖ yönteminde düzensiz ağ kullanılarak geliştirilen düz ve ters çözüm algoritmaları mevcuttur (Günther vd 2006, Rücker vd 2006). Benzer şekilde MT yönteminde de düzensiz ağ kullanarak düz çözüm (Key ve Weiss 2006) ve ters çözüm (Özyıldırım vd 2017) algoritmaları geliştirilmiştir. Fakat literatürde DAÖ ve RMT verilerinin 2B birleşik ters çözümü için hali hazırda düzensiz ağ kullanan algoritma bulunmamaktadır. Bu çalışma kapsamında RMT ve DAÖ verilerinin 2B birleşik ters çözümünü düzensiz ağ kullanarak yapan yeni bir algoritma geliştirilmiştir. Fortran90 programlama dilinde geliştirilen algoritma literatürdeki bu eksikliği giderecek olması nedeniyle önemlidir. Geliştirilen algoritma yapay veriler ve bir maden sahasında ölçülmüş gerçek veri ile test edilmiştir. Yeni algoritmanın, düzenli ağ kullanan birleşik ters çözüm algoritmalarına ve ayrık ters çözüm algoritmalarına nazaran avantajları yapay ve gerçek veriler kullanılarak tartışılmıştır.

BİRLEŞİK TERSÇÖZÜM ALGORİTMASI

RMT ve DAÖ verilerinin ayrık ters çözümlerinde genellikle düzgünleştiricili ters çözüm algoritmaları kullanılmaktadır (Günther vd 2006, Candansayar ve Tezkan 2008, Demirci vd 2017). Bu çalışmada da yuvarlatıcılı durağanlaştırıcılı düzgünleştirici ters çözüm tekniği kullanılmıştır. Parametrelerin çözümü için her yinelemede Denklem (1) 'de verilen normal eşitliğin çözümü gerekmektedir:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{W}_d \mathbf{A} \\ \sqrt{\alpha} \mathbf{C} \end{bmatrix} \Delta \mathbf{m}_i = \begin{bmatrix} \mathbf{W}_d \Delta \mathbf{d}_i \\ -\sqrt{\alpha} \mathbf{C} \mathbf{m}_i \end{bmatrix} \quad (1)$$



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



Burada, \mathbf{W}_d , veri ağırlık dizeyi, \mathbf{A} , kısmi türevler dizeyi, α , düzgünleştirici parametresi, \mathbf{C} , yuvarlatma dizeyi, \mathbf{m}_i , i-ninci yinelemede parametre sütun vektörü, $\Delta \mathbf{d}$, ölçülen ve kuramsal veriler arasındaki farkı içeren sütun vektörü, $\Delta \mathbf{m}$ parametre düzeltme yöneyidir. Denklem (1) her yinelemede QR- Ayırıklaştırması kullanarak çözülmüştür. Algoritma Fortran90 dilinde yazılmıştır ve QR ayırıklaştırması için LAPACK Fortran90 kütüphanesi kullanılmıştır. Birleşik ters çözümde, kısmi türevler dizeyi (\mathbf{A}) ve DAÖ ve RMT verileri için $\Delta \mathbf{d}$ yöneyi aşağıdaki gibi alınmıştır (Candansayar ve Tezkan 2008):

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{W}_{dcr} & \mathbf{A}_{dcr} \\ \mathbf{W}_{rmt} & \mathbf{A}_{rmt} \end{bmatrix} \quad \text{and} \quad \Delta \mathbf{d} = \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{d}_{dcr} \\ \Delta \mathbf{d}_{rmt} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Burada, $\mathbf{A}_{DAÖ}$, $\mathbf{W}_{DAÖ}$ ve $\Delta \mathbf{d}_{DAÖ}$ DAÖ verileri için ve \mathbf{A}_{RMT} , \mathbf{W}_{RMT} ve $\Delta \mathbf{d}_{RMT}$ ise RMT verileri için kısmi türevler, ağırlık ve veri farkları dizeyleridir. RMT yöntemde kısmi türevler dizeyi hesabı için karşılıklık yaklaşımı (reciprocity approach) kullanılmıştır. Yuvarlatma dizeyi (C) hesabı için, komşu üçgen parametrelerin çevresinin komşu kenar uzunluklarına oranına bağlı olan yuvarlatma dizeyi yaklaşımı kullanılmıştır (Özyildirim vd, 2017).

UYGULAMALAR

Algoritmanın avantaj ve dezavantajlarını göstermek amacıyla, geliştirilen yeni algoritma ve Demirci vd (2017) 'nin algoritmasıyla yapay veriler kullanılarak karşılaştırılmıştır. Yapay veriler, ölçülen veri olarak varsayıp ters çözüm algoritmaları ile yorumlanmıştır. Bilinen modelin ters çözüm ile tekrar bulunması hedeflenmiştir. Algoritmanın testi için birçok yapay model, jeofizik problemler göz önüne alınarak oluşturulmuştur. Çevresindeki malzemeye göre daha iletken ve daha yalıtkan birim veya yapıların olduğu modellerin tasarlanmasıyla, DAÖ ve RMT verilerinin birleşik ters çözümünün önemi vurgulanmaya çalışılmıştır. Ayrıca modellerde bulunan yapı veya birimlerin düzenli ve düzensiz ağlar ile tasarlanarak ters çözüm sonucu öz direnç değerlerinin gerçek modele yakınlığı tablolar ile tartışılmıştır. Algoritmanın testi için kullanılan gerçek veri örneği Kahramanmaraş ili Elbistan ilçesinde bir bakır sahasında toplanmıştır. RMT frekanslarında bu bölgedeki madenin yataklanma şeklinin görülebileceği ve birleşik ters çözümün avantajları ile düzensiz ağ kullanan yeni algoritmanın avantajlarının test edilebilmesi için ideal bir alandır. Bakır madeninin bu arazide derinlerden sığ kesimlere kadar ulaştığı bilgisi, 2012 yılında yapılan mekanik sondajlardan anlaşılmıştır (Bekar 2016). Arazide madenin sığ kesimlerde olduğunu tahmin ettiğimiz bölgede RMT ve DAÖ verileri 8 doğrultuda toplanmıştır. Bütün profil boyutları yaklaşık olarak 300 m ve DAÖ yönteminde elektrot aralığı 10 'ar m, RMT verileri de istasyon aralıkları 10 'ar metre olacak şekilde seçilmiştir. DAÖ verileri AMN elektrot dizilimi kullanılarak iki (10 ve 20 m) elektrot aralığı için 7 şer seviyede toplanmıştır. RMT verileri toplamak için yeni geliştirilmiş bir RMT aleti (Tezkan ve Saraev, 2008) kullanılmıştır. DAÖ verilerinin toplanması için ise ZONGE firmasının cihazı kullanılmıştır. Bu çalışmada, toplanan verilerden sadece bir profile yer verilmiştir. Toplanan verilerin düzensiz ve düzenli ağ kullanan algoritmalar ile ayırık ve birleşik ters çözümleri yapılmıştır. Elde edilen modeller Şekil 2 'de verilmiştir.



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



SONUÇLAR

Yeni algoritmada, hem modellemede model ağının temsil edilmesinde hem de ters çözümde parametreleştirmede düzensiz üçgen parametreler kullanılmıştır. Algoritma bu yönü ile RMT ve DAÖ verilerin birleşik ters çözümü hakkında bir ilk niteliği taşımaktadır. Geliştirilen algoritmada kullanılan düzensiz ağ sayesinde hızlı, SE yöntemi ile modelleme yapılarak da hassas düz çözüm yapılmıştır. Yeni geliştirilen algoritma ve Demirci vd (2017) tarafından geliştirilmiş düzenli ağ temelli başka bir algoritmayla karşılaştırılmıştır. Düzenli ağ yapısında, üçgen kalitesinden kaynaklı sayısal hatalar ile orantılı olarak derinlik yönünde parametre çözünürlüğünü düşürdüğü ve topoğrafya basamaklı şekilde temsil edildiği için yeni geliştirilen düzensiz ağ algoritmasına göre parametre çözüm gücü açısından daha zayıftır. Burada üçgen kalitesinin de parametre çözünürlüğü açısından önemli bir etken olduğu görülmüştür. Düzensiz üçgen eleman kullanılması nedeni ile modellere eklenen yapının şekli ne olursa olsun, model ağındaki elemanların artışı çok fazla olmamaktadır. Bu yüzden düzensiz ağda kullanılan parametre sayısı düzenli ağa göre daha az olmaktadır ve düz çözümde genel düzey denkleminin elemanları da daha az olur. Böylece ters çözüm süresi kısalmır.

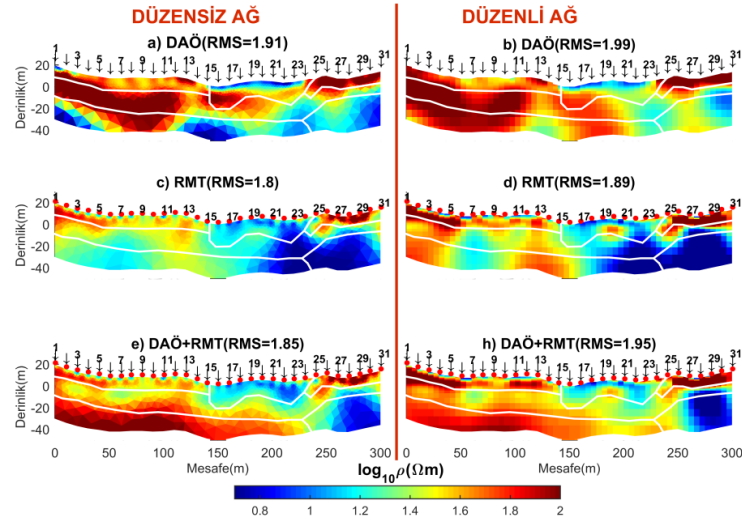
TEŞEKKÜR

Bu çalışma birinci yazarın Doktora tezinin bir kısmını içermektedir ve 110Y343 numaralı TÜBİTAK ve BMBF projesi ile desteklenmiştir. Projenin Almanya tarafı yöneticisi Bülent TEZKAN (Köln Üniversitesi) 'a katkılarından dolayı teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

- Bekar K 2016, Hüyükli (Kahramanmaraş - Afşin) sahasının sülfür potansiyelinin jeofizik araştırması: *Doğal Kay. ve Eko. Bült.* 21, 95–104.
- Candansayar ME 2008, Two-dimensional inversion of magnetotelluric data with consecutive use of conjugate gradient and least-squares solution with singular value decomposition algorithms: *Geophys. Prospect.* 56, 141–157.
- Candansayar ME and Tezkan B 2008, Two-dimensional joint inversion of radiomagnetotelluric and direct current resistivity data: *Geophys. Prospect.* 56, 737–749.
- De Lugaõ PP and Wannamaker PE 1996, Calculating the two-dimensional magnetotelluric Jacobian in finite elements using reciprocity: *Geophys. J. Int.* 127, 806–810.
- Demirci İ, Candansayar ME, Vafidis A and Soupios P 2017, Two dimensional joint inversion of direct current resistivity, radio-magnetotelluric and seismic refraction data: An application from Bafra Plain, Turkey: *J. Appl. Geophys.* 139, 316–330.
- Günther T, Rücker C and Spitzer K 2006, Three-dimensional modelling and inversion of DC resistivity data incorporating topography-II. Inversion: *Geophys. J. Int.* 166, 506–517.
- Kalscheuer T, De LosÁngeles García Juanatey M, Meqbel N and Pedersen LB 2010, Non-linear model error and resolution properties from two-dimensional single and joint inversions of direct current resistivity and radiomagnetotelluric data: *Geophys. J. Int.* 182, 1174–1188.
- Key K 2016, MARE2DEM: a 2-D inversion code for controlled-source electromagnetic and magnetotelluric data: *Geophys. J. Int.* 207, 571–588.

- Özyıldırım Ö, Candansayar ME, Demirci İ and Tezkan B 2017, Two-dimensional inversion of magnetotelluric/radiomagnetotelluric data by using unstructured mesh: *GEOPHYSICS* 82, E197–E210.
- Rücker C, Günther T and Spitzer K 2006, Three-dimensional modelling and inversion of dc resistivity data incorporating topography - I. Modelling: *Geophys. J. Int.* 166, 495–505.
- Spitzer K 1998, The three-dimensional DC sensitivity for surface and subsurface sources: *Geophys. J. Int.* 134, 736–746.
- Tezkan B and Saraev A 2008, A new broadband radiomagnetotelluric instrument: Applications to near surface investigations: *Near Surf. Geophys.* 6, 2451–252.
- Tripp AC, Hohmann GW and Swift CM 1984, Two-dimensional resistivity inversion: *GEOPHYSICS* 49, 1708–1717.



Şekil 2 Maden sahasında ölçülen verilerin ayırık ve birleşik ters çözümü sonucu elde edilen modeller



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



S22	Düşey Elektrik Sondaj ve SPAC Yöntemleri ile Jeotermal Amaçlı Derin Yeraltı Yapının Belirlenmesi
	Determination of Deep Underground Structure for Geothermal Purposes by Vertical Electric Sounding and SPAC Methods

Olcaç ÇAKMAK¹, Osman UYANIK²

¹ Süleyman Demirel Üniversitesi, Deprem ve Jeoteknik Araştırma Merkezi, Isparta

² Süleyman Demirel Üniversitesi, MF. Jeofizik Mühendisliği Bölümü, Isparta

E-posta: olcaycakmak@sdu.edu.tr osmanuyanik@sdu.edu.tr

*Olcaç ÇAKMAK

ÖZ

Dünyanın sürekli artan nüfusuna karşılık enerji ihtiyacı da günden güne artmaktadır. Fosil temelli enerji kaynaklarının (petrol, kömür, doğal gaz, vb.) hızla tükenmesi, ülkeleri alternatif yenilenebilir enerji kaynaklarını aramaya ve kullanmaya yönlendirmektedir. Jeotermal enerji; yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde temiz, kullanışlı ve verimli olması sebebiyle oldukça ilgi çekici ve önemli bir hale gelmektedir. Bu çalışmada, Türkiye'nin ilk ve en çok tanınan jeotermal sahası olan Kızıldere jeotermal sahasının bir bölümünü ve bu sahanın kuzeyinde yer alan Buldan Jeotermal sahasını kapsayan bir alan, elektrik ve sismik yöntemlerle araştırılmıştır. Belirlenen profiller üzerinde, AB/2 en az 3 km olacak şekilde 14 adet Düşey Elektrik Sondajı (DES) ölçümü gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, belirlenen 1 adet DES profilinde, her noktada yarıçapı $r = 75$ m ve $r = 750$ m olacak şekilde 11 noktada SPAC (Spatial Autocorrelation) ölçüleri toplanmıştır. Toplanan veriler, gerekli düzeltmeler ve veri işlem aşamalarından sonra birlikte değerlendirilerek yorumlanmıştır. Her iki yöntemden elde edilen verilerin değerlendirilmesi ile jeotermal akışkan ihtiva edebilecek derin yapılar ve bunların lokasyonları hakkında önemli bilgiler edinilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Buldan, Jeotermal Enerji, Elektrik Özdirenç Tomografi, SPAC,

ABSTRACT

In response to the ever-growing world population, energy demand is increasing by the day. The rapid depletion of fossil energy sources such as oil, coal, natural gas, etc. is leading countries to seek and use alternative renewable energy sources. Geothermal energy is becoming more and more interesting and important because it is clean, useful and efficient among renewable energy sources. In this study, a part of the Kızıldere which is the first and best-known geothermal field in Turkey, and an area of the Buldan geothermal field in the north of this field were investigated with electrical and seismic methods. In the study, 14 Vertical Electrical sounding (VES) measurements were carried out on the profiles determined at an AB/2 of at least 3 km. Furthermore, SPAC (Spatial Autocorrelation) measurements were performed at 16 points in 1 VES profile with radius $r = 75$ m and $r = 750$ m at each point. After necessary corrections and data processing steps, the collected data were evaluated and interpreted jointly. By analyzing the data from both methods, important information was obtained about the deep structures that geothermal fluids can contain and their locations.

Keywords: Buldan, Geothermal Energy, Electrical Resistivity Tomography, SPAC



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



GİRİŞ

Jeotermal enerji, yer altında çeşitli nedenlerle birikmiş bir enerji türüdür. Bu enerji yeryüzüne doğal yollarla ulaşabildiği gibi mekanik sondaj gibi yapay yollarla da ulaşabilir. Jeotermal kaynak araştırmaları ise yeraltında biriken bu enerjinin bulunup ekonomiyeye kazandırılmasını amaçlar. Yeraltında biriken bu enerji, genellikle, sıcak akışkan veya buhar şeklinde olmaktadır. Jeotermal alanlar ülkemizde derin yeraltı yapıların içerisinde bulunmaktadır. Derin yeraltı yapılarının belirlenmesinde Jeofizik yöntemler etkin olarak kullanılmaktadır (Uyanık 2012). Bu derin yeraltı yapılarını jeofizik yöntemler kullanarak belirleyen birçok çalışmalar mevcuttur (Meju, 2002; Wannamaker vd., 2004; Burçak vd., 2005; Uchida, 2005; Cumming ve Mackie, 2007; Kuyumcu vd., 2011; Vozar vd., 2020).

Kızıldere jeotermal sahası Türkiye'nin en bilinen jeotermal sahalarından birisidir. Buldan jeotermal sahası ise Kızıldere jeotermal sahasının hemen kuzeyindedir. Buldan ilçesi Denizli ilinin yaklaşık 35 km kuzey doğusunda yer almaktadır. Ayrıca Türkiye'de genişlemeli tektonizmanın sebep olduğu Gediz Grabeni (GG) ve Büyük Menderes Grabenlerinin (BMG) kesişim noktasında yer almaktadır (Şimşek, 1984; Alçıçek vd., 2007a, b; Bozcu, 2010). Bölgenin ekonomik olarak ilgi çekici olması nedeniyle bölgenin jeolojisi birçok araştırmacı tarafından detaylı bir şekilde araştırılmıştır. Bu konuda ayrıntılı literatür bilgisi için Alçıçek, 2007a ve 207b incelenebilir. GG ve BMG'de gerçekleştirilen jeofizik araştırmalar, hem özel şirketlerin hem de akademinin çalışmaları bulunmaktadır (Şimşek, 1984; Göktürkler vd., 2003; Burçak vd., 2005; Kuyumcu vd., 2011; Akın vd., 2014; Erdoğan ve Candansayar, 2017; Hacıoğlu vd., 2021;). Bu çalışmada Buldan jeotermal alanında gerçekleştirilen jeofizik araştırmalar bir profil üzerinde Düşey Elektrik Sondaj (DES) ve aynı profil üzerinde SPAC ölçümlerinden oluşmaktadır. Derin yeraltı yapısı uygulanan jeofizik yöntemler ile belirlenmiş ve yorumlanmıştır.

ÇALIŞMA ALANININ JEOLJİSİ VE JEOFİZİK UYGULAMALAR

Jeoloji

Etüt alanı içerisinde araştırılan jeotermal sistemlerin temelini, Paleozoik Menderes Masifi'ne ait metamorfik kayalar ile yine jeotermal sistemin örtü kayaları olan Senozoik kayalar oluşturmaktadır. Menderes masifinin metamorfikleri, aşağıdan yukarıya doğru; çeşitli gnayslar, şistler, kuvarsit ve mermerler ile temsil edilmektedir (Şimşek, 1985). Metamorfik kayaların örtü kayaları ise Alt, Orta ve Üst olmak üzere üç ayrı birimden oluşmaktadır (Bozcu, 2010). Bu üç birim uyumsuzluklarla ayrılmışlardır. Alt Birim, Kızıldere'nin kuzeyinde bulunan Sarıcaova, Ovacık, Alandız ve Bostaneri çevresinde oldukça geniş bir yelpazeye sahiptir. Orta Birim, Sarayköy ve Buldan çevresinde görüldüğü gibi, Alt birimin üzerine veya doğrudan metamorfik ana kayanın üzerine oturmaktadır. Alt birim: Karasal kırmızı tabaka olarak bilinen bu birim, İsalar ve Bostanyeri Formasyonlarından oluşur. Orta birim, üç farklı formasyona incelenir. Bunlar Alttan üste doğru Kızılburun, Sarayköy ve Aktepe (Kolonkaya) formasyonlarıdır. Üst Birim, çoğunlukla kaba kırıntılı tortullarla temsil edilmekte olup, mevcut graben çöküntüleri içerisinde alüvyon konileri ve akarsu yatakları olarak oluşturulmuştur. Ölçü profili Batı tarafında, yüzeyde Menderes masifine ait, Şekil 1 de Pz_ş simgesi ile görülen paleozoik şist birimi üzerindedir. Doğu tarafında ise Sarayköy formasyonunu kesmektedir. Pz_ş jeolojik birimi sahada; gri, siyahımsı gri, ince yapraklanmalı fillit, kuvars-mika şist ve kalk şist olarak gözlenmektedir. Sarayköy formasyonu ise; ince-orta tabakalı kumtaşı, siltaşı, kiltası ve marn alterasyonlarından oluşur. Bu birimin geniş kapsamlı mostraları Sarayköy, Buharkent, Buldan ve Güney



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



ilçelerinde görülmektedir. Bu formasyonun ana litolojisi sarı-bej, ince tabakalı (2-25 cm) kumtaşlarıdır.

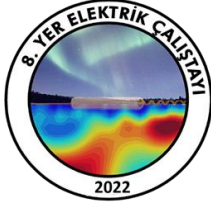
Çalışma alanı içerisinde çok fazla soğuk su, sıcak su ve maden suyu kaynakları bulunmaktadır. Kamara olarak bilinen sıcak su çıkışının sıcaklığı 56 °C, Yenice, Bölmekaya ve Tekkehamam sıcak su çıkışları ise 35-40 °C civarındadır. Bunlardan, Bölmekaya olarak bilinen ve sıcak su çıkışı olan doğal kaynak çalışma alanına oldukça yakındır.

Düşey Elektrik Sondaj

Çalışma alanı, Buldan Horstunun kuzeyinde, Buldan ilçesinin ise güneyinde konumlanmaktadır. Bu bölgede, Bozcu (2010) tarafından Bölmekaya Fayı olarak isimlendirilen ve Buldan ilçesinin Güneyinden geçerek Sarayköy ilçesine doğru yönelen yaklaşık D-B yönelimli normal fay bulunmaktadır. Bu faya paralel bir adet 9km uzunluğunda ölçüm profili 1/25000 topoğrafik harita ve Google Earth yazılımı üzerinden belirlenmiştir. Belirlenen profilin arazide uygulanabilirliği görsel incelenmiştir. Ölçü alımına engel teşkil edebilecek yoğun bitki örtüsü olan alanlar, ölçü alımına uygun olacak şekilde düzenlenmiştir. Profil üzerinde 250m aralıklarla 14 adet DES (Şekil 1, Kırmızı kalın çizgi) merkez noktaları belirlenmiştir. DES merkez noktasına eşit uzaklıkta olan akım noktalarının (A ve B noktaları) koordinatları QGIS yazılımı ile belirlenmiştir. Belirlenen koordinatlar A noktası koordinatları bir GPS'e, B noktası koordinatları ise başka bir GPS'e yüklenmiştir. GPS'e A ve B noktaları arazide alye edilerek bulunmuştur. Bir sonraki DES ölçüsü, bir önceki DES ölçüsü ile aynı hatta olup 250 m kayılmış ve yukarıda anlatılan izlenye tekrar edilmiştir. Dolayısıyla 250 m nin katları olan uzaklıklarda bir önceki profilde kullanılan akım noktaları tekrar kullanılmıştır. Profilin Batı kısmındaki M14 DES noktası ile Doğu kısmındaki M1 profili arasındaki mesafe 3500m dir. 14 adet DES ölçüsü Schlumberger elektrot dizilimiyle gerçekleştirilmiştir. Toplanan DES ölçüleri açık kaynak kodlu Boundless Electrical Resistivity (BERT) (Günther vd, 2006; Rücker, 2010) yazılımı ile 2 boyutlu olarak değerlendirilmiştir.

SPAC

Aynı profil üzerinde toplamda 10 adet SPAC ölçüsü toplanmıştır. SPAC profili Özdirenç profilinin 1250 m batısından başlamıştır (Şekil 1, yeşil kalın çizgi). SPAC ölçülerine ait gürültü kayıtları, 4 adet 24 bit A/D (Analog/Dijital) dönüştürücüye sahip gerçek Broadband hızölçer GüralpCMG-6TD ile gerçekleştirilmiştir. Cihaz 30sn-100Hz frekans aralığındadır. Tüm kayıtlar 100 Hz örnekleme aralığıyla toplanmıştır. Zaman senkronizasyonu için yine aynı üreticinin tedarik ettiği GPS sistemi kullanılmıştır. Sismometrelerin ölçü alımı esnasında dış etkenlerden kaynaklanabilecek gürültüleri en aza indirmek için, her ölçü noktasında önceden 50 cm kadar derinliğinde çukurlar kazılarak sismometreler yerleştirilmiştir. Çukura yerleştirilen sismometreler dengesi bozulmayacak şekilde plastik muhafaza ile kaplanıp üzeri toprak ile tekrar örtülmüştür. Merkezdeki sismometrenin etrafında, ilk sismometre merkeze göre tam kuzeyde olacak şekilde, 120° aralıklarla üç sismometre daha yerleştirilmiştir. Aynı merkezin etrafında, kayıt zamanları farklı olarak, 2 farklı daire üzerinde ölçüler toplanmıştır (dairelerin yarıçapları $r_1 = 75m$ ve $r_2 = 750 m$). 75m yarıçaplı ölçülerde kayıt süresi 120 dakika iken, 750 m yarıçaplı ölçülerde bu süre 180 dakikaya çıkarılmıştır. SPAC ölçülerinin değerlendirmeleri açık kaynak kodlu GEOPSY yazılımı ile gerçekleştirilmiştir (Wathelet, 2008).



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



DEĞERLENDİRMELER

Elektrik Özdirenç Tomografi (EÖT) değerlendirmesi sonucunda, özdirenç kesitinde genel olarak üç tabaka sınırı ayırt edilmiştir. Bu tabakaların yanal yönde birbirleri ile geçişlerinde yaklaşık M9 ve M7 DES noktalarının altına denk düşen alanda ve M2 ve M1 noktalarının altına denk düşen alanda faylar tanımlanmıştır. Genel olarak 1. tabaka olarak yaklaşık özdirenç değerleri 10-20 arasında olan sedimanter bir örtü tabakası ve bunun altında derinliği belirlenemeyen (M10 – M1) arasında metamorfik kökenli, özdirenç değerleri 30-40 ohm.m arasında değişen bir ortam olduğu düşünülmektedir. Bu ortam jeotermal açısından yorumlandığında özellikle 2 fayın arasına denk düşen (M8 – M2 aralığı) derinliği en az 1000m jeotermal akışkan ihtiva edebilecek bir ortam tespit edilmiştir. SPAC değerlendirmeleri bir boyutlu yapılmış, elde edilen Vs hızına ait katman parametreleri gerçek konumlarına yerleştirilerek çizdirilmiştir (Şekil 2b). SPAC sonuçlarına göre profilin tamamı üç tabakalı gözükmetedir. En üstteki tespit edilen ve özdirenç profilinde sedimanter örtü tabakası olarak yorumlanan tabakanın Vs hızı 200 – 600 m/s arasında değişmektedir. Tabaka derinliği ise A1 noktasından A6 noktasına kadar 500 – 600 m arasında iken A6 dan A10'a kadar bu derinlik 750 m civarına yükselmiştir. Birinci tabakanın altındaki ikinci ve üçüncü tabakalar metamorfik kökenli olup bu tabakanın Vs hızı 1000 – 1250 m/s civarında, tabaka kalınlığı ise 500 m civarındadır. Üçüncü tabaka hızı ise 1800 m/s ve üzerindedir.

SONUÇLAR

Batı Türkiye aktif olarak Kuzey-Güney yönlü kıtasal genişleme hareketleri içerisindedir. Bu genişlemenin sonucu olarak Batı Türkiye'de iki önemli yapı gelişmiştir. Bunlar GG ve BMG'leridir. Bu iki grabenin, batı tarafında kesiştiği bölgede konumlanan Buldan ilçesinin jeotermal potansiyelini anlamak için, belirlenen bir profil üzerinde derin DES ölçüleri toplanmıştır. Yine aynı profil üzerinde iki farklı yarıçapta SPAC ölçüleri toplanmıştır. DES yardımı ile toplanan veri kümelerinin iki boyutlu ters çözümü gerçekleştirilmiştir ve araştırılan profil için yanal ve düşey yöndeki özdirenç değişimleri belirlenmiştir. SPAC ölçüleri ise bir boyutlu olarak değerlendirilmiştir. Elektrik özdirenç ve SPAC değerlendirmeleriyle, jeolojik olarak yüzeyde tahmin edilen ve Şekil 1 de kesikli siyah çizgi ile gösterilen fayların yer altında var olduğu, jeofizik çalışmalarla gösterilmiştir. Çalışma alanında 3 farklı jeolojik birim tespiti özdirenç çalışmasında yararlanılarak yorumlanmıştır.

TEŞEKKÜR

Yazarlar Süleyman Demirel Üniversitesi Bilimsel Araştırma birimine, bu çalışmanın bir kısmını 4783-D2-16 numaralı proje ile desteklediği için teşekkür eder. Ayrıca yazarlar GÖLTAŞ ENERJİ A.Ş. ve çalışanlarına teşekkür eder.

KAYNAKLAR

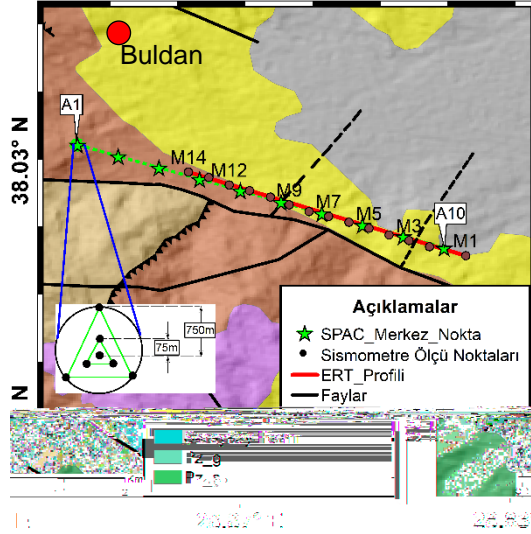
- Alçıçek H, Varol B, Özkul M, 2007(a). Sedimentary facies, depositional environments and palaeogeographic evolution of the Neogene Denizli Basin, SW Anatolia, Turkey. *Sedimentary Geology*, 202(4), 596-637.
- Alçıçek H, 2007(b). Denizli havzası (Sarayköy-Buldan bölgesi, GB Türkiye) neojen çökellerinin sedimantolojik incelemesi. Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri, Doktora Tezi, 323s, Ankara.
- Cumming W, Mackie R, 2007. 3D MT resistivity imaging for geothermal resource assessment and environmental mitigation at the glass mountain KGRA, California. *GRC Transactions* 31:331–334.



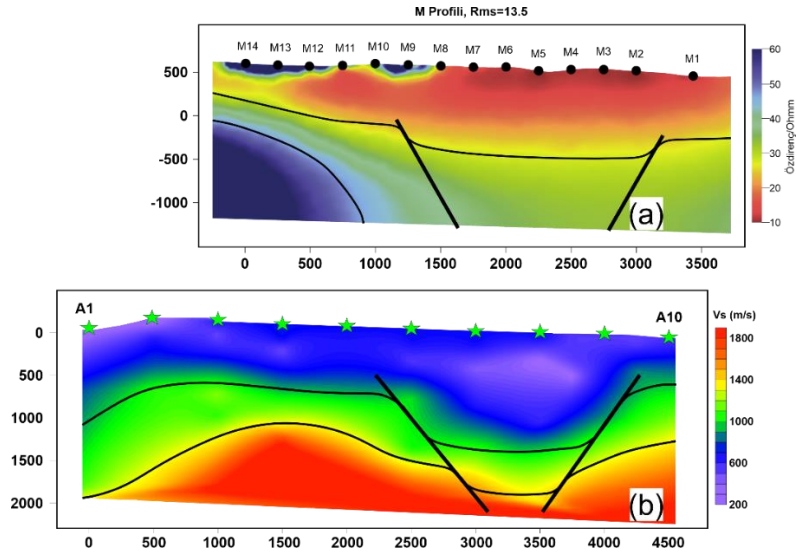
8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



- Bozcu M, 2010. Geology of Neogene basins of Buldan-Sarıcaova region and their importance in Western Anatolia neotectonics. *International Journal of Earth Sciences*, 99, 851-861.
- Burçak M, Kaya C, Kılıç AR, Akdoğan N, 2005. Exploration of the heat source and geothermal possibilities of the Aksaray Region, Central Anatolia, Turkey. *Proceedings world geothermal congress, Antalya, Turkey*.
- Erdoğan E, Candansayar E, 2017. The conductivity structure of the Gediz Graben geothermal area extracted from 2D and 3D magnetotelluric inversion: Synthetic and field data applications. *Geothermics*, 65, 170-179.
- Günther T, Rücker C, Spitzer K, 2006. Three-dimensional modelling and inversion of dc resistivity data incorporating topography – II. Inversion: *Geophysical Journal International*, 166, 506–517.
- Hacıoğlu Ö, Başokur AT, Diner Ç, 2021. Geothermal potential of the eastern end of the Gediz basin, western Anatolia, Turkey revealed by three-dimensional inversion of magnetotelluric data, *Geothermics*, 91, (2020) 102040.
- Kuyumcu ÖC, Destegül SUZ, Hallinan S, Çolpan B, Türkoglu E, Soyer W, 2011. Interpretation of 3D Magnetotelluric (MT) Surveys: basement conductors of the Menderes Massif, Western Turkey. *International Geophysical Conference and Oil & Gas Exhibition, İstanbul, Türkiye, Eylül 17-19*.
- Meju MA, 2002. Geoelectromagnetic exploration for natural resources: models, case studies and challenges. *Survey in Geophysics*, 23:133–205.
- Rücker C, 2010. *Advanced Electrical Resistivity Modelling and Inversion using Unstructured Discretization*. PhD thesis, University of Leipzig.
- Rücker C, Günther T, Spitzer K, 2006. Three-dimensional modelling and inversion of dc resistivity data incorporating topography – I. Modelling: *Geophysical Journal International*, 16, 495–505.
- Şimşek Ş, 1984. Denizli, Kızıldere, Tekkehamam, Tosunlar, Buldan ve Yenice alalarının jeolojisi ve jeotermal enerji olanakları. *MTA Rapor No 7486, Ankara*.
- Uchida T, 2005. Three-dimensional magnetotelluric investigation in geothermal fields in Japan and Indonesia. *Proceedings world geothermal congress, Antalya, Turkey*.
- Uyanık O, 2012. Şehir Yapılaşmaları için Deprem Mastır Planlaması ve Alanya için Yapılması Gerekenler. *Alanya 12. Tarih ve Kültür Sempozyumu s:152-169, Alanya*.
- Vozar J, Jones AG, Campaya J, Yeomans C, Muller MR, Pasquali R, 2020. A geothermal aquifer in the dilation zones on the southern margin of the Dublin Basin. *Geophysical Journal International*, 220(3),117-1134.
- Wannamaker PE, Rose PE, Doerner WM, Berard BC, McCulloch J, Nurse K, 2004. Magnetotelluric surveying and monitoring at the Coso geothermal area, California, in support of the enhanced geothermal systems concept: survey parameters and initial results. *Proceedings, 29th workshop on geothermal reservoir Engineering, Stanford University*.
- Wathelet M, 2008. An improved neighborhood algorithm: Parameter conditions and dynamic scaling. *Geophysical Research Letters*, 35(9), L09301.



Şekil 1. Jeoloji haritası(Bozcu 2010 dan değiştirilerek), üzerinde Yer bulduru haritası.



Şekil 2 (a) Elektrik Özdirenç Tomografi Sonuçlarının karşılaştırılması, (b) Sismik Hız modeli.



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



S23	Boksit ve Zımpara Taşı (Korund) Araştırmalarında Yer Elektrik Yöntemler
	Geoelectrical Methods in Bauxite and Emery Stone (corundum) Surveys

Erhan İÇÖZ^{*1}, Coşkun SARI², Ecevit G. YURTKAL¹ Emre TİMUR²

¹ SUMET Yerbilimleri, Narlıdere İZMİR

² Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Müh. Bölümü, Buca-İzmir
Erhanicoz@gmail.com

*Sunumu yapacak yazar

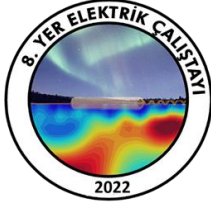
ÖZ

Ülkemizde boksit ve zımpara taşı (korund) araştırmaları çok yaygın değildir. Yapılan araştırmalar da çoğunlukla yüzey jeolojisi ile gerçekleştirilmektedir. Az sayıdaki jeofizik etüt ise ERT (çok elektrotlu elektrik özdirenç) yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Boksit araştırmalarının diğer ülkelerdeki uygulamaları, literatür çalışmalarıyla incelenerek ön bilgiler elde edilmiştir. Bu çalışmada, dört ayrı sahada farklı elektrik yöntemler kullanılarak gerçekleştirilen boksit ve zımpara (korund) etüdü araştırmalarında elde edilen sonuçlar anlatılacaktır. Saha çalışmaları, ERT ve DES teknikleriyle gerçekleştirilen özdirenç ölçümleri ile SP ölçümlerini kapsamaktadır. Ayrıca, bir profil üzerinde GPR ölçümü de alınmıştır. Bu yöntemlerin boksit ve zımpara taşı (korund) etütlerinde kullanılabilirliği de tartışılacaktır. Ölçülerin (ERT, DES ve SP) değerlendirilmeleri, jeolojik verilerle de deneştirilmiş, uyum ve uyumsuzluklar gözden geçirilerek değerlendirmeler yeniden ele alınmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, jeolojik çalışmalar yinelenmiş ve tüm sahaların geometrileri belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar boksit ve zımpara taşının farklı özdirenç değerleriyle temsil edildiğini ve özdirenç değerlerinin oluşum koşullarına göre değiştiğini göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: boksit, zımpara taşı, ERT, DES, SP

ABSTRACT

In our country, bauxite and emery stone (corundum) surveys are not very common. Surveys are carried out mostly by surface geology. A small number of geophysical surveys were carried out by the ERT (multi-electrode electrical resistivity) method. The applications of bauxite survey in other countries have been examined by literature studies and preliminary information has been obtained. In this study, the results obtained in bauxite and emery stone (corundum) surveys conducted in four different fields by using different electrical methods will be explained. Field studies include resistivity measurements performed with ERT and VES techniques and SP measurements. Also, the GPR has been measured over a profile. The usability of these methods in bauxite and emery stone (corundum) studies will also be discussed. The evaluations of the measurements (ERT, DES and SP) were also correlated with geological data, and the evaluations were reconsidered by reviewing the compliance and incompatibilities. According to the obtained results, geological studies were repeated and the geometries of all fields were determined. The obtained results showed that bauxite and emery



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



stone are represented with different resistivity values and the resistivity values change with respect to the formation conditions.

Key Words: Bauxite, Emery Stone, ERT, VES, SP

GİRİŞ

Boksit, Değişik alüminyum-demir oksit ve hidroksitlerden (boehmit, gibbsit, dijaspor gibi minerallerden) oluşan bir karışımdır (1). Alüminyum silikat içeren kayaların, tropikal koşullar altında yağmur suyunun filtrasyonu ve yıkamasıyla ikincil olarak konkresyonlar şeklinde oluşur. Yeşil, kahverengi, kırmızı ve gri renklerde gözlenirler. Korundum (Al_2O_3), Manyetit (Fe_3O_4) ile biraz Hematit ve spinelin doğal bir bileşimidir. Zımpara'nın, boksitlerin metamorfizması sonucu oluştuğu genel olarak kabul edilen bir görüştür (Tüysüz, 2016). Zımpara, yaklaşık olarak 2/3 oranında korund ve diaspor, 1/3 oranında ise demir ve titan oksitlerinden oluşmaktadır. Zımparanın ana kayası olarak kabul edilen boksit yatakları ise üç farklı mekanizma ile oluşmaktadır. Bunlar, a) Lateritik boksit yatakları b) Kalkerli boksit yatakları ve c) Silikatlı boksit yataklarıdır (Tüysüz, 2016). Çalışma alanlarımızda, lateritik boksit ve kalkerli boksit tipi oluşumlar bulunmaktadır. Türkiye boksit yatakları çoğunlukla güneyde ve batıdan doğuya uzanan bir kuşak içinde bulunmaktadır (Çağatay ve Arman, 1982), [1]. Genellikle SiO_2 ve TiO_2 içerir (Hatipoğlu ve Helvacı, 2009). Sertliği: 9, d: 4,2'dir. Her iki cevher de çok düzensiz geometrilerle kireçtaşı, mermer ve şistler içerisinde sekonder olarak yerleşmektedir. Bunun sonucu olarak, sondajlarla geometrilerinin belirlenmesi, tenor hesabı yapılabilmesi çok zordur. Açılacak rastgele sondajlar, rastlantısal olarak ya hiç cevher kesmeyen yerlerde ya da cevherin en kalın olduğu yerlerde açılabilir ve çok yanıltıcı sonuçlar verebilir (İçöz ve Yurtkal, 2019). Diğer yandan, dünyanın çeşitli yerlerinde gerçekleştirilen Boksit ve Korund (Zımpara Taşı) jeofizik araştırmaları, bu birimler için belirleyici bir öz direnç aralığının olmadığını göstermiştir (Bolaji vd (2019), Talabi vd (2013), İçöz ve Yurtkal, (2018)). Jeofizik araştırmalar için bu büyük bir sorun oluşturur. Ancak, oluşum koşullarının benzerliği (yan kayaç ve tektonizma) cevher yataklarının benzer öz direnç aralığında oluşu, yorumlamada bize yol gösterici olacaktır. Bu çalışma, hangi yer elektrik yöntemlerinin boksit ve korund araştırmalarında daha iyi sonuç verebileceğini ve geometrilerini ne ölçüde ortaya koyabileceğini belirlemek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmalar, boksit ve zımpara taşı aramalarında, DES ve ERT yönteminin birlikte uygulanmasıyla başarılı sonuçlar vereceğini göstermiştir. SP ölçüleri de araştırmalarda katkı sunabilmektedir.

UYGULANAN YÖNTEMLER

Bu çalışma, öz direnç, SP ve GPR ölçüleriyle gerçekleştirilmiştir. Yöntemlerin çok biliniyor olması nedeniyle kuramsal açıklamalarına burada değinilmeyecektir. Öz direnç ölçümleri, en çok kullanılan iki uygulamayla yapılmıştır. Bunlar, Düşey Elektrik Sondaj (DES) ve çok elektrikli öz direnç (ERT) yöntemleridir. DES ölçülerinde, $AB/2= 50- 70$ m metre uygulanmıştır. ERT ölçüleri ise 48 elektrot ve 6 metre elektrot aralığı olarak Wenner yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Kuramsal araştırma derinliği 40 metre dolayındadır. SP ölçüleri, iki sahada ERT profilleri üzerinde 5 m. adım aralığı ve türev uygulamasıyla gerçekleştirilmiştir. Bir sahada ise, ERT profillerine dik doğrultularda yine türev şeklinde ve 5 metre adım aralığıyla uygulanmıştır. Bu uygulamalar, saha koşullarına göre seçilmiştir.



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



Literatürde yer alması nedeniyle, bir sahada GPR ölçüsü de alınarak, diğer ölçülerle denetlenmiş ve bu tür araştırmalar için başarı şansının incelenmesi sağlanmıştır.

Elde edilen verilerin yorumu

Boksit, metaboksit ve zımpara taşı (korund) araştırması amacıyla 6 ayrı sahada gerçekleştirilen jeofizik çalışmalardan elde edilen sonuçlar, yerelektrik ölçülerinin, büyük ölçüde yararlı olabileceğini göstermiştir. Ancak, ek olarak mikrogravite ve manyetik çalışmaların yapılmasının da çok yararlı olacağı ve daha geniş bir çözümleme sunacağı bir gerçekliktir.

Gerek ERT ve gerekse DES ölçüleriyle belirlenen cevher özdirenç aralıklarının oldukça geniş bir yelpaze sunduğu görülmüştür. Buna karşılık, boksit özdirençlerinin, diğerlerine göre çok daha düşük bir özdirenç aralığında olduğu belirlenmiştir. Tablo 1, bu üç oluşum için ayırdığımız baskın özdirenç aralıklarını göstermektedir. Bu ayırtılma, yamaç şevlerinde ve açtırılan yarmalarda gözlemlenen cevherlerle denetlenilerek yapılmıştır.

Tablo 1: Cevherlerin, cinsine göre yaklaşık özdirenç aralığı

CİNSİ	SEVİYE	ÖZDİRENCİ (Ω m)
AYRIŞMIŞ BOKSİT	En üst birkaç metre	< 100
BOKSİT	En çok 20 m	100-500
ZIMPARA TAŞI	En çok 50 m.	500-1500

Cevher Geometrisi

Cevherler, yukarıdaki çizelgede de gösterildiği gibi, en çok 40 metre kalınlığa sahiptir. Ancak bu kalınlıklar, düzenli bir incelik kalınlaşma şeklinde değildir. Genel olarak üç farklı cevher geometrisi saptanmıştır. En yaygın olan cevher şekli, tüm sahalarda üst örtü olarak geniş yayılım gösteren ve kalınlığı birkaç metreyi geçmeyen plaser türüdür. Özdirençleri düşük olan plaser tipi cevher, yan kayaçların yamaç molozu karakterli irili ufaklı parçalarıyla karmaşık olarak bulunmaktadır. İkinci cevher geometrisi, özellikle fay veya yanall süreksizlik bölgelerindeki cevherlerdir (Şekil 1, 3 ve 5). Bunların kalınlığı 40 metreye kadar çıkabilmektedir. Üçüncü cevher şekli ise olasılıkla karstik olarak gelişen boşlukları doldurmuş, düzensiz şekilli kalın cevherlerdir (Şekil 2). Üç boyutlu katı gösterim (Şekil 4), cevher yayılımını ve geometrisini daha iyi izlemeyi sağlamaktadır.

SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Yatağan yakınlarındaki birkaç sahada gerçekleştirilen boksit ve zımpara taşı aramaları, ERT ve DES olmak üzere iki farklı özdirenç uygulaması ve SP yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, boksit aramalarında özdirenç yönteminin DES ve ERT ile başarıyla uygulanabileceği göstermiştir. Zımpara taşı (korund) aramalarında ise özdirenç yönteminin daha az başarılı olduğu söylenebilir. Bunun nedeni, korund özdirençinin, birlikte bulunduğu yan kayaç özdirençleri ile çok yakın oluşudur. Ancak eğer, ortam su içermiyorsa, yan kayaç özdirençleri çok yüksek olacağı için, özdirenç yönteminin zımpara taşı aramalarında da başarı şansı artmaktadır. ERT profili üzerinde



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



birkaç DES ölçüsü yapıp, her iki sistemle alınan ölçü sonuçları birbirleriyle denştirilerek başarı şansı artırılabilir (Şekil 1). SP yöntemi, ancak özdirenç yöntemleri ile birlikte uygulandığında, katkı sunabilmektedir. Bu yöntem, olası kalın cevher zonlarına ve cevher biriktirebilecek yanal geçiş yerlerine işaret edebilmektedir (Şekil 5).

Diğer yandan, daha gerçekçi çözümlere sağlayabilmek için, özdirenç uygulamalarının sahaya dağıtılarak gerçekleştirilmesi gerekir. Özellikle ERT ölçülerinin birbirine paralel hatlarda uygulanması, DES ölçü yerlerinin, mutlaka ERT ölçüleri sonrasında belirlenmesi önerilir. Böylece, DES ölçü noktaları daha uygun yerlerde seçilebilecektir. SP ölçüleri ise, yanal süreksizlik doğrultularına dik profillerde ve saha genelinde birbirine paralel birkaç profil olarak alınmalıdır. Tüm bu verilerin, hem profil hem haritalama ve hem de üç boyutlu değerlendirilmeleriyle, başarı şansı artacaktır.

KAYNAKLAR

[1] <http://www.mta.gov.tr/v3.0/bilgi-merkezi/boksit>

Bolaji, E.A., Lawrence, A.O., Akindele, O., Femi, A.O., Ayoola, O.R., Ojo, T.A. and Amos, O.O. (2019). "Geoelectric Assessments of the Bauxite Ore Deposit at Orin-Ekiti, Southwestern Nigeria", Int. Jour. of App. Environmental Sci., V.14, No. 2, 197-210.

Çağatay, A. ve Arman, B., (1982). "Boksit ve Türkiye'deki Boksit Yatakları", Jeoloji Müh. Dergisi, 14, 23-33.

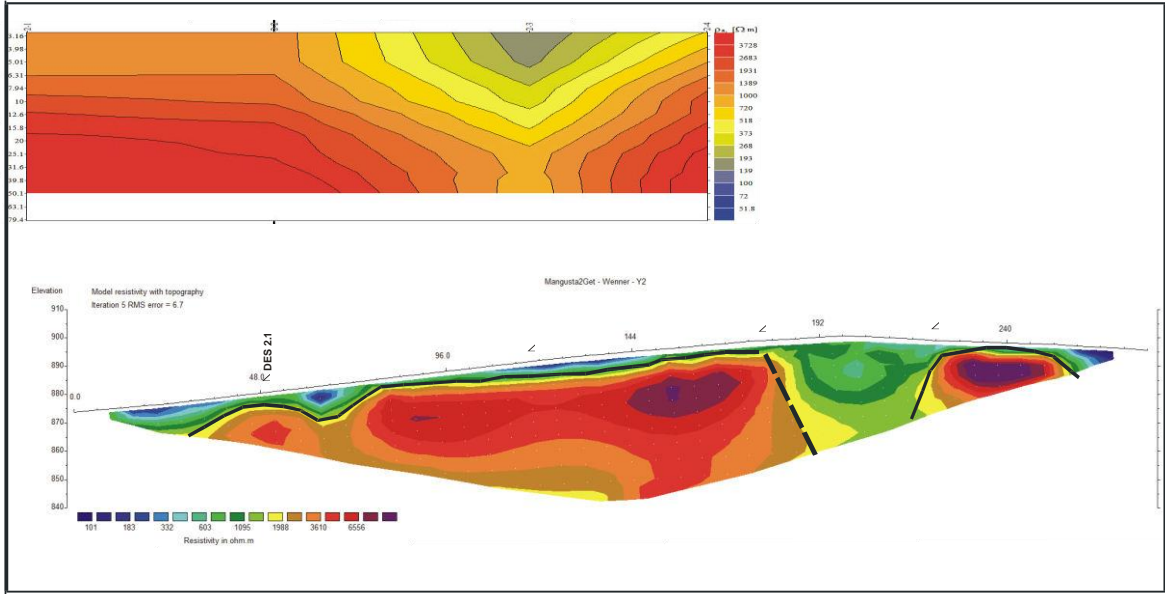
Hatipoğlu, M. ve Helvacı, C. (2009). "Süstaşı Diaspor ve Diasporitin Birlikte Bulunduğu İlbirdağı Meta-Boksit Yatağının (Danışment-Milas-Muğla) Tarihçesi, Mevcut Durumu ve Süstaşı Madenciliği", 7th Inter. Industrial Minerals Symposium and Exhibition, 363-370.

İçöz, E. ve Yurtkal, E.G. (2017) Muğla-Yılanlı Zımparataşı Jeofizik Etüt Raporu (Sumet Yerbilimleri, yayımlanmamış).

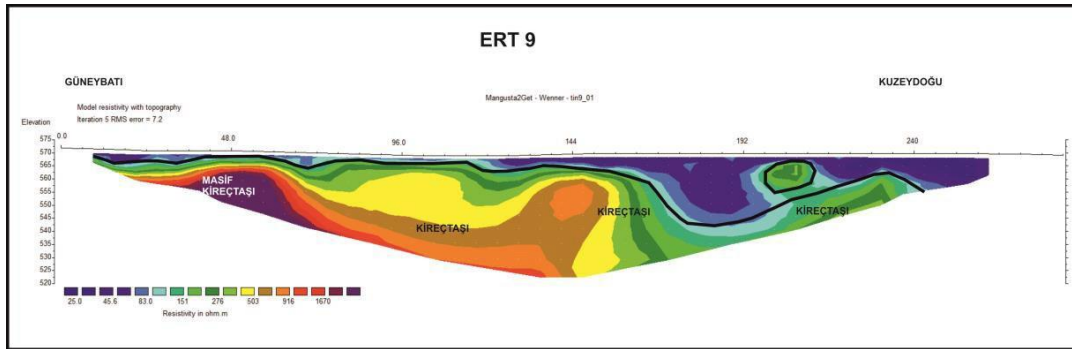
İçöz, E. ve Yurtkal, E.G. (2017) Muğla-Özlüce Metaboksit Jeofizik Etüt Raporu (Sumet Yerbilimleri, yayımlanmamış).

Talabi, A.O., Ademilua, O.L, Ajayi, O.Z. and Ogunniyi, S.O. (2013). "Preliminary Geophysical Evaluation of Orin Bauxite Deposit Southwestern Nigeria", Jour. of Emerging Trends in Eng. and App. Sci.,V. 4(3), 432-437

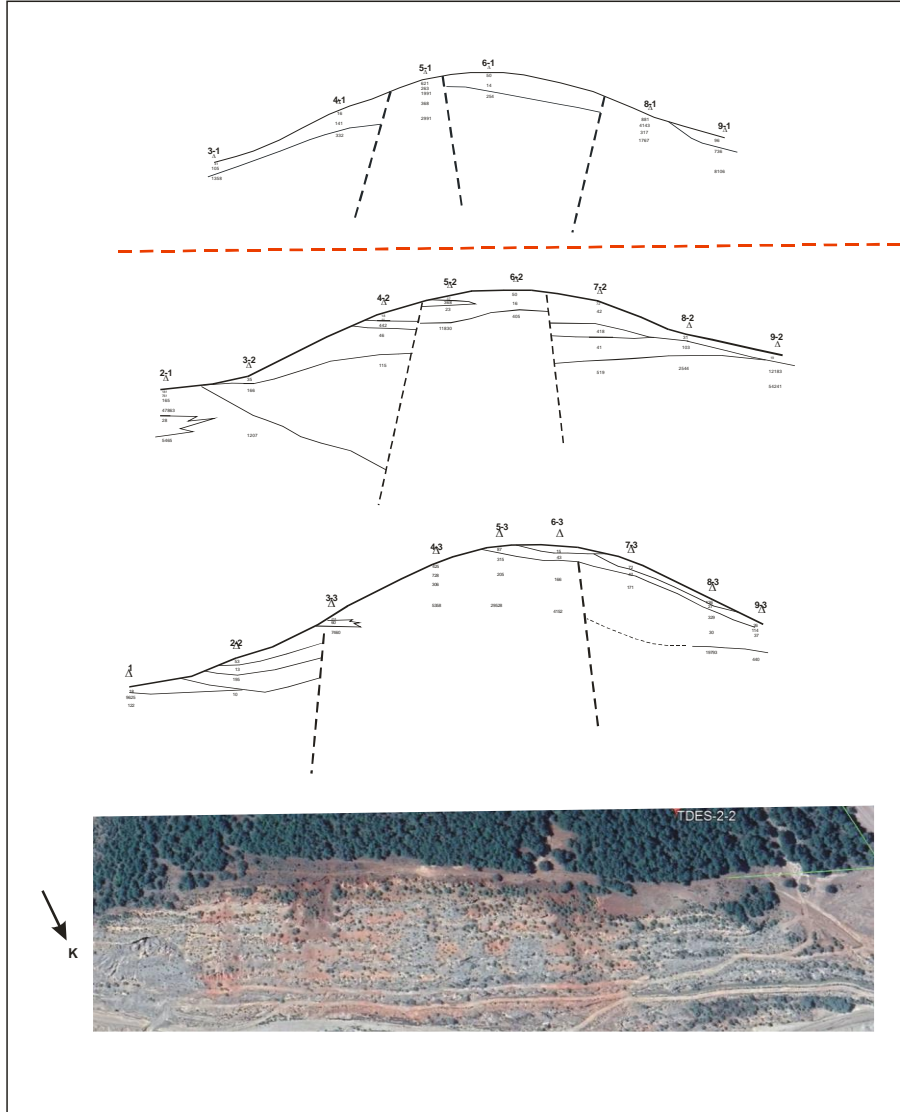
Tüysüz O. (2016). Muğla ili Yatağan ilçesi Zeytinli-Katranlı köyleri güneyindeki korund yataklarının jeolojisi (İTÜ Avrasya Yerbilimleri Enstitüsü).



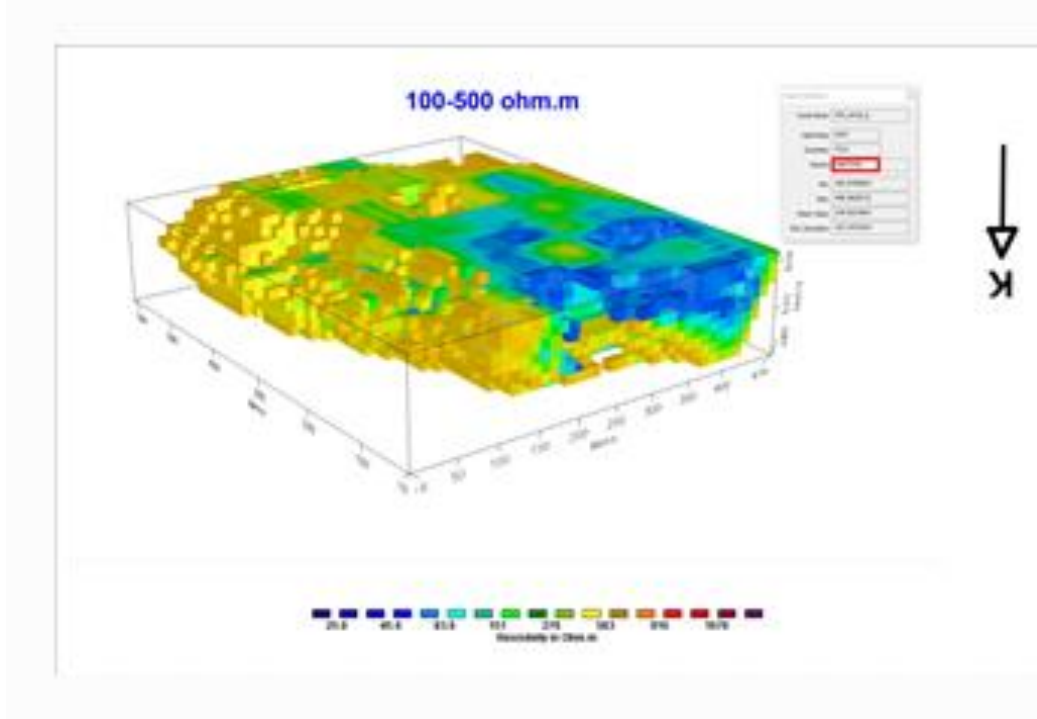
Şekil 1: Aynı profil üzerindeki DES ve ERT kesitleri örneği



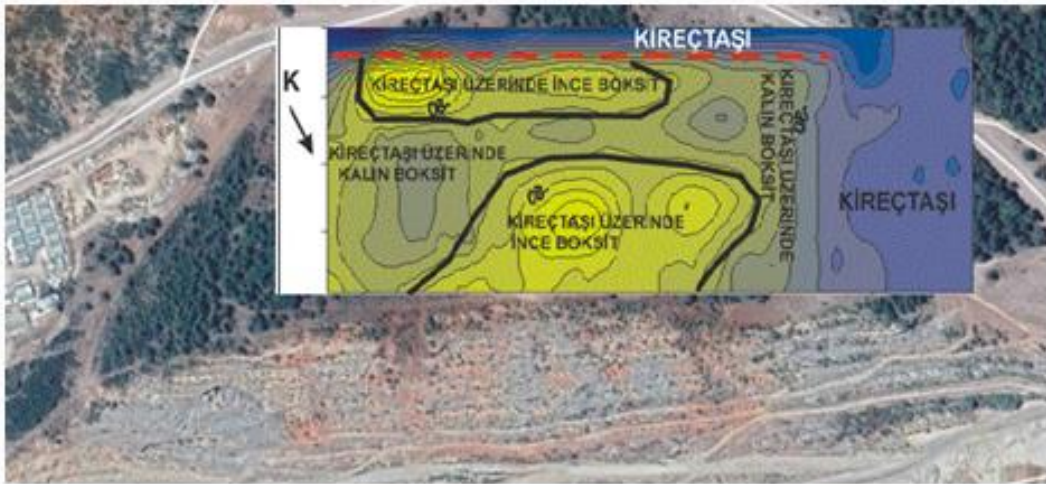
Şekil 2: Boksit cepleri



Şekil 3: Özdirenç kesitleri ile yanal süreksizliklerin uyumu



Şekil 4: Üç boyutlu katı model



Şekil 5: Uydu görüntüsüne aplike edilmiş SP haritası



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



P1	Yapı Elemanları Üzerinde Küçük Ölçekli Doğru Akım Özdirenç Yönteminin Uygulanabilirliğinin Araştırılması
	Investigation of Applicability of Small-Scale Direct Current Resistivity Method on Construction Elements

Cansu ARICAN^{1*}, M. Emin CANDANSAYAR¹ ve N. Yıldırım GÜNDOĞDU¹

¹ Ankara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, Jeofizik Modelleme Grubu (GMG), Gölbaşı, Ankara, Türkiye
E-posta: carican@ankara.edu.tr

ÖZ

Doğru Akım Özdirenç (DAÖ) yönteminde kullanılan çok elektrotlu ve çok kanallı ölçü sistemleri, betonarme yapılar üzerinde de inceleme yapılmasına olanak sağlamaktadır. Küçük ölçekli DAÖ çalışmaları genel olarak laboratuvar ortamında yapılan araştırmalarda tercih edilmekle birlikte bina, köprü vb. betonarme mühendislik yapılarının taşıyıcı sistem elemanlarının incelenmesinde de kullanılmaktadır. Bu çalışmada, DAÖ yönteminin çok elektrotlu ölçü sistemi ile betonarme yapılar üzerinde veri toplamaya uygun veri düzeneğinin belirlenmesi için üç boyutlu modelleme araştırması yapılmıştır. Bu araştırmada, bir kolon yapı üzerinde tek yüzeyde, karşılıklı yüzeylerde ve komşu yüzeylerde elektrotların konumlanması durumunda elde edilecek özdirenç tepkileri incelenmiştir. Beton yapısının demir donatı ve küçük çatlaklar içermesi durumunda bu farklı elektrot dağılımlarına göre görünür özdirenç verilerinde gösterdiği değişim incelenmiş ve pratik ölçü almada uygun düzenek seçimi için bir ön çalışma yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Doğru Akım Özdirenç, Küçük-ölçekli uygulama, Yapı Jeofiziği

ABSTRACT

The multi-electrode and multi-channel resistivity measurement systems used in the Direct Current Resistivity (DCR) method allow us to investigate concrete structures. Although small-scale DCR studies are generally preferred in laboratory studies, it is also used in the examination of structural system elements of reinforced concrete engineering structures such as buildings, bridges, etc.. In this study, three-dimensional DCR modeling research was conducted to determine the appropriate data set for data collection on reinforced concrete structures with the multi-electrode measurement system. In this research, the resistivity responses to be obtained when the electrodes are positioned on a single surface, opposite surfaces and adjacent surfaces on a columnar structure were investigated. In case the concrete structure contains reinforcement and small cracks, the change in the apparent resistivity data according to these different electrode distributions has been examined and a preliminary study has been made for the selection of the appropriate electrode layout for taking practical measurements.

Keywords: Direct Current Resistivity, Small-scale application, Structure Geophysics



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



GİRİŞ

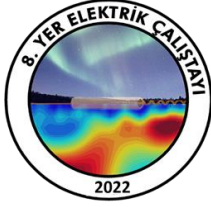
Son yıllarda Jeofizik yöntemler, mühendislik yapılarının projeye uygunluğu veya deprem gibi doğal afetler sonucu hasar durumunun incelenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Mühendislik yapılarının incelenmesi amacıyla yapılar üzerinde yapılan jeofizik incelemeler “Yapı Jeofiziği” araştırmaları olarak isimlendirilebilir. Bir yapının sağlamlığını belirlemede yapı temel tipi, beton dayanımı, donatıların hasar ve korozyon durumu, yapıdaki kırık ve çatlakların tespit edilmesi önemlidir. Bu tespitler için klasik bir yöntem olarak numune alım tekniği veya Schmit çekici kullanılmaktadır. Ancak bu teknikler incelenen yapı elemanına hasar vermektedir.

Taşıyıcı sistem elemanlarının beton kalitesi ve beton sağlamlığı sismik yöntemler ile (Krauß ve Hariri 2006, Li vd. 2016, Sabbağ ve Uyanık 2017), donatı tespiti, donatı hasar durumu ve beton hasar durumu yer radarı ile (Hong vd. 2017, Jankú vd. 2019) araştırılmaktadır. DAÖ yöntemi ise, betonarme yapıların korozyon tespiti (Morris vd. 2002, Hornbostel vd. 2013, Rodrigues vd. 2021) ve beton tuzluluğu/nemliliği/iletkenlik ilişkisi ile beton içindeki çatlakların araştırılması (Lataste vd. 2003, Wiwattanachang ve Giau 2011) gibi alanlarda kullanılmaktadır. Ancak bu alanlarda incelemeler genellikle Wenner elektrot dizilimi ile klasik ölçü sistemi kullanılarak incelenmiştir.

Bu çalışmada, DAÖ yönteminin çok-elektrotlu ve çok-kanallı ölçüm sistemi ile beton yapıların incelenmesinde kullanımı için en uygun ölçü düzeneği araştırılmıştır. Bu amaçla, 3B modelleme ile bir kolon yapı üzerinde tek yüzey, karşılıklı yüzeyler ve komşu yüzeyler üzerine elektrot yerleştirilerek ölçülen verilerin analizi yapılmış ve betonarme yapının incelenmesine en uygun elektrot düzeneği araştırılmıştır.

YÖNTEM

DAÖ yönteminde amaç, yer içinin jeolojik yapısını, elektrik özelliğine (özdirenç) göre haritalamaktır (Candansayar 2016). Özdirenç parametresi ise incelenen yapının gözenekliliği, geçirimliliği, mineral içeriği vb. fiziksel özelliklere bağlı değişmektedir. Günümüzde çok-elektrotlu ve çok kanallı ölçü sistemleri sayesinde bir doğrultu boyunca dizilen eşit aralıklı elektrotlar ile farklı akım ve gerilim elektrodu çiftleri için sondaj-profil ölçüleri toplanır ve bu veriler 2B ters çözüm algoritmaları ile yorumlanır. 3B ters çözüm için ise birbirine paralel hatlar boyunca ölçülen sondaj profil verileri kullanılabilir. Ayrıca 3B ters çözüm için bir düzleme karelej yapılar ve bütün köşe noktalarına elektrot yerleştirilerek de veri toplanabilmektedir. Veriler toplanırken akım ve gerilim elektrotlarının konumuna göre tanımlanmış Wenner, Schlumberger, Dipol-dipol, pol-dipol vb. klasik elektrot dizilimleri kullanılabilir. Bu dizilimler ile çok elektrotlu sistemlerinde, N-adet elektrot için “vs-adet (veri sayısı, $vs=N*(N-1)*(N-2)*(N-3)/8$ ” veri toplanabilir (Noel ve Xui 1991). Stummer vd. (2004) “vs” adet veri içinde optimum veri seti seçimini incelemiştir. Aynı bölgede farklı elektrot dizilimleri ile ölçülen gerilim farkları ve dolayısı ile elde edilen GÖ değerleri birbirinden farklı olmaktadır. Klasik elektrot dizilimlerinin ayrı ve birleşik ters çözümü karşılaştırılarak yer içi yapılarının en iyi dipol-dipol ve pol-dipol (sol ve sağ yönlü) dizilimi verilerinin birlikte kullanılması ile elde edildiği gösterilmiştir (Candansayar, 2008). Yapı üzerinde ise elektrotların bir yüzeyde olması durumunda, yeryüzünde karelej yapılmış gibi düşünülerek uygun elektrot dizilimi ile veri toplanabilir. Ancak elektrotların karşılıklı veya komşu yüzeylerde olması durumunda kuyu-kuyu elektrot dizilimlerinin kullanılması gerekir. Klasik kuyu-kuyu elektrot dizilimlerinin ayrı ve birleşik ters çözümünü karşılaştıran bir çalışma Demirel ve Candansayar (2017) tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada ise hem yüzey, hem



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



de kuyu-kuyu elektrot dizilimleri için kolon yapı üzerinde 3B modelleme ile uygun veri toplama düzeneği araştırılmıştır.

Bu amaç için 112 elektrotlu ve çok kanallı özdirenç ölçü sistemi için x, y ve z yönünde ölçü alabilecek bir düzeneğin farklı elektrot dağılımlarına uygunluğu ve doğruluğu karşılaştırılmıştır. Burada amaç, akım (A ve B) ve gerilim (M ve N) elektrotlarının farklı konumları için en uygun elektrot dizilimini seçmektir. En uygun alt veri grubunun belirlenmesi hedeflenerek çeşitli klasik ve klasik olmayan elektrot dizilimleri için, birden fazla derinlik seviyesinde aynı yüzeyde, karşılıklı yüzeylerde ve komşu yüzeylerde yer alan paralel profillerdeki elektrot dağılımları için 3B modelleme çalışmaları yapılmıştır (Şekil 1).

Bahsedilen çalışmalar ilk olarak 50x150x50 cm boyutlarındaki homojen bir kolon modeli ile yapılarak model ağının doğruluğu test edilmiştir. Çalışmada kullanılan üç farklı elektrot dağılımı için üç farklı özdirençteki homojen kolon modelinde (Aynı Yüzey: 100 Ω .m, Karşılıklı Yüzeyler: 120 Ω .m, Komşu Yüzeyler: 80 Ω .m) Dipol-Dipol elektrot dizilimi için yapılan düz çözüm sonuçları Şekil 2'de gösterilmiştir. Bu aşamanın ardından sırasıyla kolon modelinin içine demir donatı ve etriyeyi temsilen ortama göre (100 Ω .m) düşük özdirençli (10 Ω .m) ve çatlak yapısını temsilen ortama göre yüksek özdirençli (1 Ω .m) yapılar yerleştirilerek modelleme çalışmaları yinelenmiştir.

SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Bu çalışmada, bir kolon betonarme yapının demir donatı içermesi durumunda ve çatlaklı yapı durumunda farklı elektrot dağılımlarının tepkisi incelenmiştir. Bu incelemede farklı yüzey ve kuyu-kuyu elektrot dizilimlerinin de tepkileri hesaplanarak sonuçlar tartışılmıştır.

TEŞEKKÜR

Bu bildiri, TÜBİTAK 121Y281 nolu proje kapsamında yapılmıştır. Desteklerinden dolayı TÜBİTAK' a teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

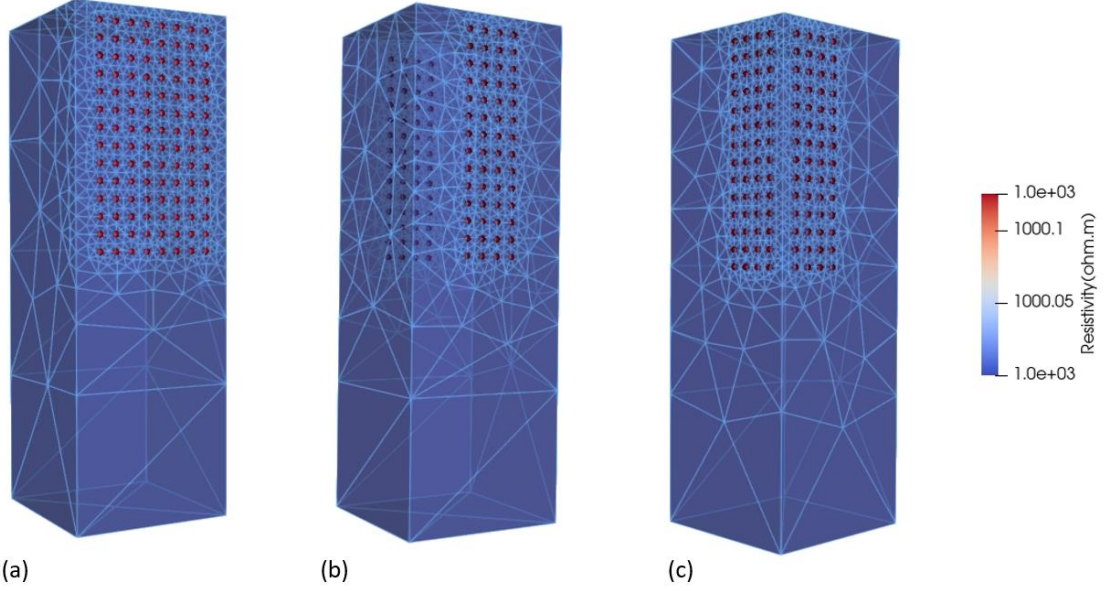
- Binley A 2013, <http://www.es.lanacs.ac.uk/people/amb/Freeware/R3t/R3t.htm>, R3t software version 2.3 erişim 1 Mart 2022
- Candansayar ME 2008, Two-dimensional individual and joint inversion of three-and four-electrode array dc resistivity data. *Journal of Geophysics and Engineering*, 5(3), 290-300.
- Candansayar ME 2016, Doğru Akım Özdirenç Yöntemi (Ders Notları, Yayınlanmamış, Ankara Üniversitesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü).
- Demirel C and Candansayar ME 2017, Two-dimensional joint inversions of cross-hole resistivity data and resolution analysis of combined arrays. *Geophysical Prospecting*, 65(3), 876-890.
- Hong S, Wiggenhauser H, Helmerich R, Dong B, Dong P and Xing F 2017, Long-term monitoring of reinforcement corrosion in concrete using ground penetrating radar. *Corrosion Science*, 114, 123-132.
- Hornbostel K, Larsen CK and Geiker MR 2013, Relationship between concrete resistivity and corrosion rate-a literature review. *Cem. Concr. Compos.*, 39, 60-72.



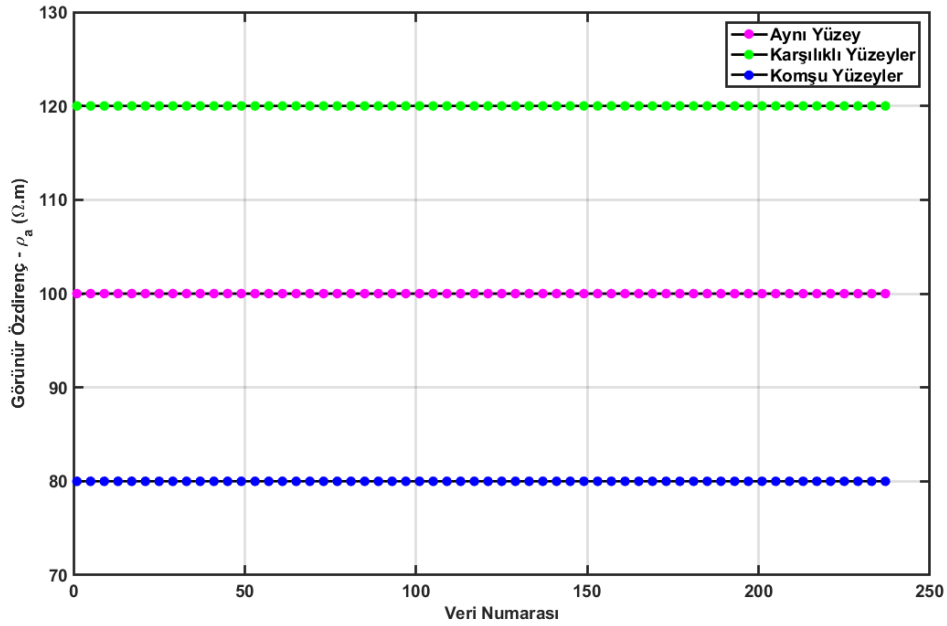
8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



- Janků M, Cikrle P, Grošek J, Anton O and Stryk J 2019, Comparison of infrared thermography, ground-penetrating radar and ultrasonic pulse echo for detecting delaminations in concrete bridges. *Construction and Building Materials*, 225, 1098-1111.
- Krauβ M and Hariri K 2006, Determination of initial degree of hydration for improvement of early-age properties of concrete using ultrasonic wave propagation. *Cement and Concrete Composites*, 28(4), 299-306.
- Latate JF, Sirieix C, Breysse D and Frappa M 2003, Electrical resistivity measurement applied to cracking assessment on reinforced concrete structures in civil engineering. *NDT & E International*, 36 (6), 383-394.
- Li M, Anderson N, Sneed L and Maerz N 2016, Application of ultrasonic surface wave techniques for concrete bridge deck condition assessment. *Journal of Applied Geophysics*, 126, 148-157.
- Morris W, Vico A, Vazquez M and Sanchez SR 2002, Corrosion of reinforcing steel evaluated by means of concrete resistivity measurement. *Corros. Sci.*, 44, 81-99.
- Noel M and X 1991, Archaeological investigation by electrical resistivity tomography: a preliminary study. *Geophysical Journal International*, 107.1, 95-102.
- Rodrigues R, Gaboreau S, Gance J, Ignatiadis I and Betelu S 2021, Reinforced concrete structures: A review of corrosion mechanisms and advances in electrical methods for corrosion monitoring. *Construction and Building Materials*, 269.
- Sabbağ N and Uyanık O 2017, Prediction of reinforced concrete strength by ultrasonic velocities. *Journal of Applied Geophysics*, 141, 13-23.
- Si H 2015, "TetGen, a Delaunay-Based Quality Tetrahedral Mesh Generator". *ACM Trans. on Mathematical Software*. 41 (2), Article 11.
- Stummer P, Maurer H, and Green AG 2004, Experimental design: Electrical resistivity data sets that provide optimum subsurface information. *Geophysics*, 69.1, 120-139.
- Verdet C, Anguy Y, Sirieix C, Clément R and Gaborieau C 2018, On the effect of electrode finiteness in small-scale electrical resistivity imaging. *Geophysics*, 83(6), EN39–EN52.
- Wiwattanachang N and Giao PH 2011, Monitoring crack development in fiber concrete beam by using electrical resistivity imaging. *Journal of Applied Geophysics*, 75(2), 294-304.



Şekil 1 (a) Aynı yüzeyde, (b) Karşılıklı yüzeylerde (Ön-Arka), (c) Komşu yüzeylerde (Sol-Ön) elektrot dağılımlarının (kırmızı noktalar) kolon modeli üzerinde gösterimi



Şekil 2 Homojen kolon modeli için farklı elektrot dağılımları ile elde edilen düz çözüm sonuçları (Grafik için kolay izlenebilmesi için her elektrot dağılımı için farklı ortam öz direnci seçilmiştir).



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



P2	Şeref Höyük / Komama (Bucak) Arkeojeofizik Araştırmaları
	Şeref Höyük / Komama (Bucak) Archaeo-geophysical Explorations

Olcaç ÇAKMAK^{*1}, Çağlayan BALKAYA^{1,2}, Ralf H. BECKS³, B. Ayça POLAT BECKS³

¹ Süleyman Demirel Üniversitesi, Deprem ve Jeoteknik Araştırma Merkezi, Isparta

² Süleyman Demirel Üniversitesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, Isparta

³ Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Arkeoloji Bölümü, Burdur

E-posta: olcaycakmak@sdu.edu.tr

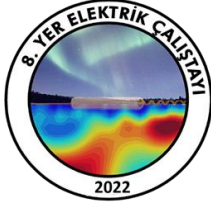
ÖZ

Burdur ili, Bucak ilçesi, Ürkütlü köyü yakınlarındaki Şeref Höyük üzerine konumlandırılan Komama, Antik Pisidia Bölgesi'ndeki Roma Koloni kentlerinden biridir. Geç Kalkolitik Dönem ile Roma İmparatorluk Dönemi arasında kısa kesintilerle yerleşim gören höyük, yaklaşık 320 m × 460 m ölçüleri ve 14 m'ye varan yüksekliği ile Göller Bölgesinin en büyük höyüğüdür. Höyük üzerinde yüzey araştırmaları 2014 yılından itibaren sürdürülürken ilk arkeojeofizik araştırma 2018 ve 2019 yıllarında yer radarı ve elektrik özdirenç yöntemleriyle gerçekleştirilmiştir. Araştırmada, höyük üzerinde yaklaşık 0,2 ha büyüklüğünde bir alan, 500 MHz merkez frekanslı kapalı bir sistem kullanılarak KB-GD doğrultulu 83 ve GB-KD doğrultulu 82 profil üzerinde gerçekleştirilen yer radarı ölçümleriyle taranmıştır. İki veri kümesinin birlikte değerlendirilmesiyle, yeraltında olası arkeolojik yapı kalıntılarının izleri olabilecek dikkat çekici yer radarı belirtileri kapsayan yaklaşık 0,09 ha büyüklüğündeki bir alanda Wenner-Schlumberger dizilimiyle GB-KD doğrultulu 36 profil üzerinde bir elektrik özdirenç tomografi (EÖT) çalışması gerçekleştirilmiştir. Her iki yöntemden elde edilen ve birbirini destekleyen bulgular, yüzeyin altında yaklaşık 25 cm derinlik seviyesinden itibaren düzgün geometri arkeolojik yapı kalıntılarının varlığını göstermiştir. Bu alanlarda gerçekleştirilecek arkeolojik deneme açmaları arkeojeofizik uygulamaların başarısını gösterecektir.

Anahtar Kelimeler: Şeref Höyük/Komama, Arkeojeofizik, Yer radarı, EÖT

ABSTRACT

Komama, situated on Şeref Höyük near the village of Ürkütlü in Bucak district Burdur province, is one of the Roman colony cities in the region of ancient Pisidia. The hoyuk, which was inhabited at short intervals between the Late Chalcolithic Age and the Roman Imperial Period, is the largest hoyuk of the Lake Region with its dimensions of about 320 m × 460 m and a height of up to 14 m. While surface surveys on the hoyuk have been carried out since 2014, the first archaeo-geophysical surveys were carried out in 2018 and 2019 using ground-penetrating radar (GPR) and electrical resistivity methods. In the study, an area of about 0.2 ha on the hoyuk was scanned with GPR measurements on 83 NW-SE and 82 NW-NE oriented profiles with a shielded 500 MHz center-frequency system. Through the joint evaluation of the two datasets, an investigation of the electrical resistivity tomography (ERT) with the Wenner-Schlumberger array on 36 profiles in SW-NE direction was carried out over an area of about 0.09 ha, which exhibits remarkable GPR anomalies



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



that may be traces of possible archaeological remains below the surface. The results of both methods, which were mutually supported, showed the existence of archaeological remains below the surface with a regular geometry of about 25 cm depth. Archaeological test trenches in these areas will demonstrate the success of archaeological-geophysical applications.

Keywords: Şeref Höyük, Archaeoeophysics, GPR, ERT

GİRİŞ

Burdur ili, Bucak ilçesi, Ürkütlü köyünün 2,5 km kadar doğusunda yer alan Şeref Höyük/Komama Burdur-Antalya-Isparta üçgenini kapsayan Antik Pisidia Bölgesi'nin güneyinde Milyas olarak adlandırılan bölgede konumlanmaktadır (Şekil 1a). Şeref Höyük/Komama yüzey araştırmaları, Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Arkeoloji Bölümü Öğretim Üyesi Prof. Dr. Ralf BECKS başkanlığında bir ekiple 2014 yılında başlamıştır. Antik yerleşim yeri hakkında bilgiler erken dönem gezginlerin anlatımları, J. Mellaart gibi tüm Anadolu'yu içeren çalışmalar yapan araştırmacıların verdiği bilgiler ve özellikle Prof. Dr. Mehmet Özsait tarafından yürütülen uzun soluklu yüzey araştırmaları sırasında bulunanlarla sınırlıdır (Becks vd 2016). Şeref Höyüğü'nün belki de en önemli özelliklerinden birisi de antik çağdaki yolların kesişim noktasında yer almasıdır. İç Anadolu'dan Lykia-Pamphylia Bölgeleri'ne inen yolların kavşak noktasında yer alan Höyük, vadilere geçit veren Doğu-Batı güzergâhını da kontrol altında tutmaktaydı (Becks 2017). İlk, Orta ve Geç Tunç Dönemlerini ve Demir Çağlarını da kapsayan kesintisiz kronolojisi nedeniyle bölgenin nadir erken buluntu yerlerinden biri olan höyükte, tabakalanma Geç Kalkolitik Dönemde başlamıştır. Kent, Hellenistik Dönem'de, Komama adıyla kendi sikkelerini basmıştır. Roma İmparatorluk Dönemi'nde yukarıda değinilen stratejik konumu nedeniyle "*Colonia Iulia Augusta Prima Fida Comama*" adıyla bölgenin Koloni Kenti ünvanını almaya layık görülen 5 kentinden biri olmuştur (Polat Becks 2016).

Höyük üzerinde ve çevresinde ilk jeofizik araştırma 2018 yılında gerçekleştirilmiştir. Üzerinde gözle görülür bir yapı kalıntısı veya izi bulunmayan höyük çok fazla kaçak kazak kazıya maruz kalmıştır. Şeref Höyük'de görece geniş bir alanı kapsayacak şekilde bir planlamanın yapılmasının ardından yüzeyden 3 m derinliğe kadar olası yapı kalıntılarının belirlenmesi amaçlanmıştır. Araştırma, arkeolojik alanlarda manyetik yöntemden sonra en sık uygulanan yer radarı ve elektrik öz direnç yöntemleriyle gerçekleştirilmiştir. Genel olarak, bu iki yöntemin birlikte uygulanmasıyla birbirini destekleyen oldukça başarılı sonuçlar elde edilmektedir (Balkaya vd 2018, Akca vd 2019, Yılmaz vd 2019). Yer radarı çalışmaları 2018 ve 2019 yıllarında 500 MHz merkez frekanslı, elektrik öz direnç tomografi (EÖT) ölçümleriyle 2018 yılında 48 elektrotlu bir sistem kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Höyük üzerinde toplanan veri kümeleri, uygun veri-işlem teknikleriyle değerlendirilerek yeraltı iki ve üç boyutlu görüntülenmiştir.

VERİ TOPLAMA ve DEĞERLENDİRME

2B/3B yüksek çözünürlüklü yeraltı görüntüleri sağlayan yer radarı yöntemi, özellikle arkeojeofizik çalışmalarda, yüzeye yakın yapı kalıntılarının belirlenmesinde oldukça sık uygulanan bir yöntemdir (Kadioğlu ve Kadioğlu, 2016). 2018 ve 2019 yıllarındaki yer radarı



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



çalışmaları, höyüğün en yüksek tepesinin kuzey bölümünde (Şekil 1b), 40 m × 50 m boyutlarındaki bir alanda 500 MHz merkez frekanslı korumalı anten içeren MALÅ ProEx sistemiyle zikzak modunda ve profiller arası mesafe 50 cm olacak şekilde GB-KD doğrultulu paralel profiller üzerinde gerçekleştirilmiştir. Uygulamada; kayıt süresi 120 ns, iz başına 750 örnek ve iz aralığı 5 cm olarak seçilmiştir. Höyük üzerinde toplanan ham veriler daha sonra kazanç, wobble, arkaplan etkilerinin giderilmesi ve bant geçişli filtre (150–850 MHz) uygulanarak işlenmiştir (Goodman 2016, GPR-SLICE, v7.0). Zaman-derinlik dönüşümü için hiperbolik hız analizleri sonucunda ortamın ortalama hızı yaklaşık 0,1 m/ns olarak belirlenmiştir.

Yer radarı çalışmasından elde edilen umut verici sonuçlar ışığında, bu alanın 25,9 m × 32,9 m büyüklüğündeki bir bölümünde EÖT verisi toplanmıştır. EÖT çalışması, ARES (GF Instruments) çok kanallı özdirenç ölçüm cihazıyla Wenner-Schlumberger elektrot dizilimi kullanılarak GB-KD doğrultulu toplam 36 profil üzerinde gerçekleştirilmiştir. Arazi çalışmasından elde edilen görünür özdirenç veri kümeleri 2B ve 3B ters çözüm teknikleri kullanılarak değerlendirilmiştir.

SONUÇLAR

Şekil 2a, 50 cm derinlik seviyesine ait yer radarı, Şekil 2b ise 35–75 cm derinlik seviyesine ait EÖT kesitlerini göstermektedir. 2018 yılı yer radarı çalışmasıyla, yaklaşık 7 m × 7 m, 7 m × 10 m ve 5 m × 3,5 m boyutlarında kare ve dikdörtgen formlu olası arkeolojik yapı kalıntılarının izleri belirlenmiştir. Bu alandan elde edilen umut verici sonuçlar ışığında, 2019 yılında ölçüm alanı kuzeye doğru uzatılmıştır. Yaklaşık 4 m yüksekliğinde dik bir şev ile sonlanan bu alanda gerçekleştirilen yer radarı çalışmasında, alanın kuzey bölümünde de 13 m × 9 m boyutlarında oldukça düzenli ve yüksek genlikli radar yansımaları elde edilmiştir. Bu alanın kuzeybatı köşesinde yer alan 20 m × 7 m ölçülerinde bir başka arkeolojik yapı izi olabilecek belirtiler görülmektedir. Ayrıca, çalışma alanının ortasından geçen, KB–GD uzanımlı, 15 m × 4 m boyutlarında ve zayıf genlikli bir yol izi olabilecek belirtiler de tespit edilmiştir. Genel olarak, bu bölgeden elde edilen yansıma genlikleri güneydeki çalışma alanına göre oldukça kuvvetlidir.

EÖT çalışması 2018 yılı yer radarı çalışma alanı sınırlarında belirlenen belirtileri kapsayan bir alan içerisinde gerçekleştirilmiştir. EÖT çalışmasıyla da aynı uzanımlarda ve benzer boyutlarda belirtiler sunan sonuçlar elde edilmiştir. Araştırma alanında ortalama özdirenç değerleri 40–80 ohm.m arasında değişirken, antik yapı kalıntılarının izleri olarak düşünülen belirtiler 1000–1500 ohm.m arasında görece yüksek özdirenç değerleri sunmuştur. Bu kare ve dikdörtgen formlu yapıların görece kuzeyinde 30–35 m uzunluğa sahip 3,5–4 m genişliğinde, yaklaşık DB uzanımlı ve her iki kesitte de izlenebilen görece zayıf belirtinin ise olası bir antik yolun izleri olabileceği düşünülmektedir. Ayrıca, bu yolun devamında ve güneyinde yaklaşık 21×7 m ölçülerine sahip dikdörtgen formlu bir yapı izi de belirlenmiştir.

Genel olarak, höyük alanının kuzey bölümünde iki yüzey kazısı sezonu boyunca toplam 20 günlük bir çalışma neticesinde belirlenen yapı izlerinin alanın belirli bölgelerinde kümelendiği görülmüştür. Bu kümeler içindeki yapı izlerinin uzanımları kendi içlerinde birbirleriyle uyumludur. Ancak kümeler arasında uzanım doğrultuları farklıdır. Bu sonuç bir

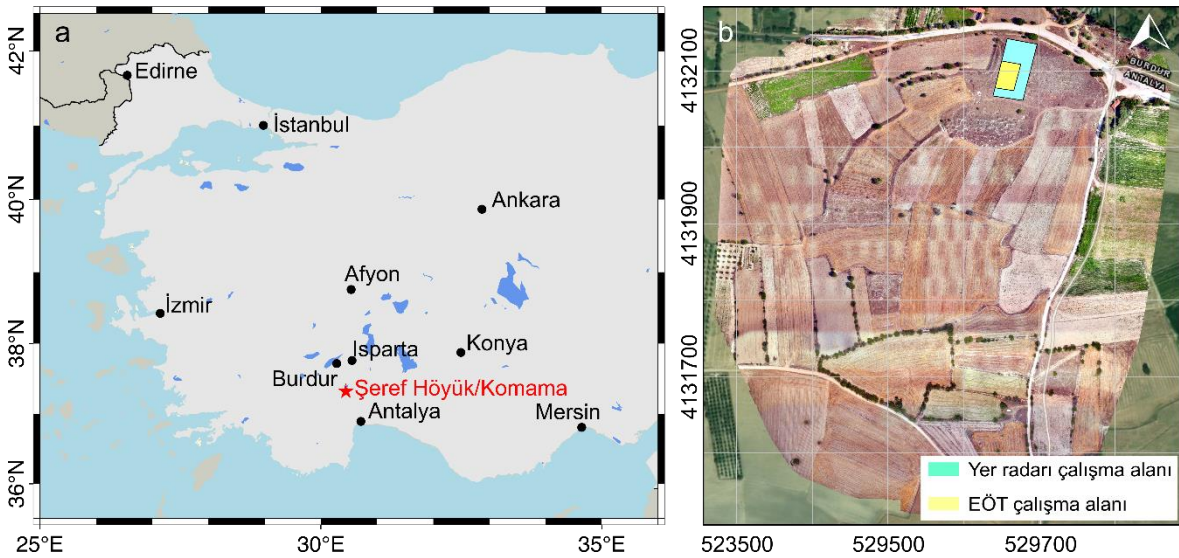
höyük yerleşimi için oldukça olağan karşılanabilir. 2019 yılı yer radarı çalışmasında tespit edilen ve alanın kuzeybatısında bulunan yapı izlerinin genliklerinin oldukça kuvvetli olması höyük yerleşiminin sonlarına doğru bir Roma yapısı olabileceğini düşündürmektedir. Sonuç olarak, her iki sezonda gerçekleştirilen jeofizik bulgular dikdörtgen ve kare formu birden çok yapı izinin varlığına işaret etmektedir. Ayrıca, çalışma alanının doğusuna doğru uzanan görece daha zayıf genlikli olası iki farklı yol izi olarak yorumlanan belirtilerin aydınlatılması amacıyla gelecek yıllarda höyük üzerinde arkeojeofizik çalışmalar devam edecektir.

TEŞEKKÜR

Çalışmalar sırasında kullanılan cihaz ve donanımlar için altyapısını kullandığımız Süleyman Demirel Üniversitesi Deprem Araştırma ve Jeoteknik Merkezine teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

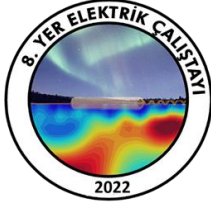
- Akca İ, Balkaya Ç, Pülz A, Alanyalı HS and Kaya MA 2019. Integrated geophysical investigations to reconstruct the archaeological features in the episcopal district of Side (Antalya, Southern Turkey): *Journal of Applied Geophysics*, **163**, 22–30.
- Balkaya Ç, Kalyoncuoğlu ÜY, Özhanlı M, Merter G, Çakmak O and Güven İT 2018. Ground-penetrating radar and electrical resistivity tomography studies in the Biblical Pisidian Antioch city, SW Anatolia: *Archaeological Prospection*, **25**, 285–300.
- Polat Becks BA 2016. Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Arkeoloji Bölümü: *Göller Bölgesi Aylık Hakemli Ekonomi ve Kültür Dergisi Ayrıntı*, **4**, 41–46.
- Becks R ve Polat Becks BA 2017. Şeref Höyük / Komama ve Çevresi Yüzeysel Araştırması 2016: *ANMED*, **15**, 251–260.
- Goodman D 2016. GPR-SLICE Software (v7.0). <http://www.gpr-survey.com/>
- Yılmaz S, Balkaya Ç, Çakmak O and Oksum E 2019. GPR and ERT explorations at the archaeological site of Kılıç Village (Isparta, SW Turkey): *Journal of Applied Geophysics*, **170**, 103859.



Şekil 1 a) Şeref Höyük/Komama antik kenti yer bulduru haritası b) Höyük ortofotosu (Şeref Höyük/Komama yüzeysel araştırması arşivi) üzerinde yer radarı ve EÖT çalışma alanları



Şekil 2 a Yer radarı ve EÖT çalışmasının sonuçlarının karşılaştırılması **a** 50-70 cm GPR derinlik kesiti ve **b** 50 cm ve 75 cm EÖT derinlik seviyeleri kesiti



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



P3	Sındırgı-Hisaralan (Balıkesir) Jeotermal Sahasında, Jeotermal Akışkanın Olası Konumu ve Fay Sistemlerinin Elektrik Rezistivite Tomografi (ERT) Yöntemi İle Belirlenmesi
	Determination of Potential Location of Geothermal Fluid Installation and Fault Systems by Electrical Resistivity Tomography (ERT) Method Transmission in Sındırgı-Hisaralan (Balıkesir) Geothermal Field

Ziya Orhan Derinsu^{*1}, Züheyr Kamacı², Serdar Kapucu³, İbrahim Acar⁴

¹ orhanderinsu@gmail.com

² zuheyrkamaci@sdu.edu.tr

³ kapucuserdar@gmail.com

⁴ ibrahimacarjz@gmail.com

* Ziya Orhan Derinsu

ÖZ

Yerinde jeofizik yöntemlerden olan Elektrik Rezistivite Tomografi (ERT), jeotermal dahil olmak üzere çeşitli mühendislik problemlerinin çözümü için kullanılmaktadır. Bu çalışmada Balıkesir İli, Sındırgı İlçesi, Hisaralan jeotermal sahasında bulunan bir alanda, araştırma derinliği sınırları içerisinde, jeotermal akışkanın olası konumu ve fay/kırık sistemleri ortaya konularak, yapılması planlanan jeopark proje alanının önünü açacak bilgiler elde edilmesi amacı ile Elektrik Rezistivite Tomografi (ERT) çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Ölçümler proje için belirlenen alanda gerçekleştirilerek, jeofizik verilerden elde edilen 2D ve 3D sonuçlar ile jeotermal akışkanın en kısa ve doğru şekilde belirlenmesi hedeflenmiştir. Jeofizik veriler bilgisayar ortamında çeşitli veri işlem ve ters çözüm modelleme aşamalarından geçirilerek, profile ait öz direnç sınırlarını içeren yer altı kesitleri elde edilmiştir. ERT çalışması sonucu oluşturulan yer altı modelleri bölgesel jeolojiyle birlikte yorumlanarak gerçek jeolojik yapıya ulaşılması hedeflenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Elektrik rezistivite tomografi, jeotermal, Hisaralan, Türkiye

ABSTRACT

Electrical Resistivity Tomography (ERT), which is one of the in situ geophysical methods, is used for the solution of various engineering problems, including geothermal. In this study, studies were carried out in order to obtain information that will pave the way for the planned geopark project area by revealing the potential location of the geothermal fluid and the fault/fracture systems within the boundaries of the research depth, in an area located in the Hisaralan geothermal field in Balıkesir Province, Sındırgı District. The measurements were carried out in the area determined for the project, and it was aimed to determine the geothermal fluid in the shortest and most accurate way with the 2D and 3D results obtained from the geophysical data. By passing the geophysical data through various data



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



processing and inversion modeling stages in the computer environment, underground sections containing the resistivity limits of the profile were obtained. It is aimed to reach the real geological structure by interpreting the underground models created as a result of the ERT study together with the regional geology.

Keywords: Electrical resistivity tomography, geothermal, Hisaralan, Turkey

GİRİŞ

Proje kapsamında gerçekleştirilen jeofizik çalışmanın temel amacı jeotermal akışkanın olası konumu, boşluk (mağara) ve fay/kırık sistemleri ortaya konularak, jeopark proje alanının önünü açacak bilgilerin tespitinin sağlanmasıdır. Bu kapsamda proje alanı, yapılan jeofizik çalışmanın çözüm başarısını en hızlı ve doğru biçimde belirlemek adına jeoparkın yapılacağı ham arazi olarak seçilmiştir. Bu doğrultuda 15 profilde Elektrik Rezistivite Tomografi (ERT) çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Çalışma alanı sınırları içerisinde D-B yönlü ve birbirine paralel altı ERT profilinde ve bu hatları KD-GB yönlü kesen dokuz ERT profilinde jeofizik veri toplanmıştır. ERT verilerinin toplanmasında 60 elektrot kullanılmıştır. Elektrot aralıkları 1.25, 2 ve 3 m seçilmiş, veriler Wenner dizilim tekniği ile toplanmıştır. 2 profilde ise 60 elektrotlu sistemde, 12 elektrot bindirme ile toplam 72 elektrot veri toplanmıştır.

YÖNTEM

Elektrik özdirenç (EÖ) yönteminde, yere çakılan elektrotlar ile yere akım uygulanır ve diğer elektrotlar arasında oluşan gerilim farkı ölçülür. Ölçülen gerilim farkı tüm elektrotlar arasındaki uzaklığa ve ortamın jeolojik yapısına bağlıdır. EÖ yönteminde ölçülen büyüklük gerilim farkıdır. Ancak veri yorumu için gerilim farkı fiziksel bir büyüklük olan özdirenç (Şekil 1) dönüştürülür. Bu dönüştürme işlemi,

$$\rho_a = k \cdot \left(\frac{\Delta V}{I} \right) \quad (1)$$

bağıntısı ile yapılır. Burada I , yere uygulanan akım (amper), k , elektrotların konumuna bağlı geometrik faktör ve ΔV , ölçülen gerilim farkıdır (volt). Bu bağıntı tekdüze ve izotrop bir ortam için geçerlidir. Gerçekte yer tekdüze değildir ve bu bağıntıdan hesaplanan özdirenç, görünür özdirenç (GÖ) olarak adlandırılır.

Bu yöntemde amaç yer altı yapısını farklı jeolojik birimlerin farklı özdirençlere sahip olmalarından faydalanarak belirlemektir. Elektrik özdirenç yönteminde veri toplama işlemi çok kanallı özdirenç aletleriyle çok kısa sürede ve kolayca yapılabilmektedir. Ölçüm profillerinin konumu ve uzunluğu, ölçü noktalarının yerleri de aranan yapının vereceği yanıtı etkilemektedir. Bu nedenle bunların seçimi oldukça önemlidir. Ölçülen veriler yeraltının özdirenç değişimi hakkında bilgi vermek amacıyla yapma kesitler olarak sunulabilir. Bu tip veri sunumunda yatay eksen uzaklık, düşey eksen göreceli derinlik olmak üzere elde edilen veriler konturlanır. Bu tip veri sunumu ölçü alanı hakkında nitel yorum yapma imkanı verir. Aranan yapıların gerçek konumları ve özdirençleri (nicel yorum) uygun veri işlem teknikleri sonucu belirlenebilir. Ters çözüm olarak adlandırılan bu işlemler sonucunda yeraltı yapısını gerçek değerleri ile gösteren yer elektrik kesitleri elde edilir.

Yeryüzünden yapılan elektrik özdirenç çalışmaları ile yeraltındaki özdirenç dağılımlarını belirlemek için değişik ölçüm teknikleri bulunmaktadır. Burada araştırma problemine bağlı



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



olarak özdirenç değişiminin yer altında hangi yönlerde incelenmesinin gerekliliği ve temel olarak iki farklı ölçüm türünün olduğu ortaya çıkmaktadır (Berge, 2005). Bunlar:

- i. Düşey Elektrik Sondajı (DES) Çalışmaları (bir boyutta)
- ii. Profil Ölçüsü (iki veya üç boyutta)

İlk olarak 1915'te Wenner tarafından uygulanan elektrik özdirenç yöntemi, 1920'de Schlumberger tarafından gerçekleştirilerek kullanılmış ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Burada yeraltının özdirenç değerinin derinlikle değişimi DES çalışmaları ile incelenmekte ve geleneksel özdirenç eğrileri (Stafanescu, 1930) ile nicel yorumlamaları yapılmaktadır. 1970'li yıllarda bilgisayar ve lineer filtre teorisinin gelişimi ile bilgisayar bazlı yorumlama teknikleri gelişmiştir (Ghosh, 1971). Bunu ise geliştiren otomatik ters çözüm teknikleri izlemekte ve bir boyutlu bu verilerin değerlendirilmesinde kullanılmaktadır (Johansen, 1977). Tek kanallı özdirenç aletlerinin kullanıldığı ölçüm yönteminde, dizilimin orta noktası sabit tutularak, elektrotların aralıkları açılmakta böylelikle elektrot aralığına bağlı olarak, orta noktanın altındaki yeraltına ait görünür özdirenç değerleri, derinliğe göre bir boyutlu olarak elde edilmektedir. Derinliğe göre olan bu değişimde özdirenç sadece bu yönde (z yönlü) değiştiği, diğer iki yönde (x ve y yönlü) sabit kaldığı ve yeraltının yatay homojen katmanlardan oluştuğu varsayılmaktadır. Tabii ki yeraltında özdirenç dağılımı üç yönde değişmektedir ve bir boyutta yapılan bu varsayım sonucu, diğer yöndeki değişimler, elde edilen görünür özdirenç değerlerini olumsuz etkilemektedir. Yine de yöntem bir boyutlu yeraltı modelinin yaklaşık doğru olduğu yerde örneğin yeraltı su tablası jeolojik ortamlar hakkında kullanışlı bilgi verebilmektedir (Berge, 2005).

Ne var ki çoğu mühendislik ve çevresel çalışmada olduğu gibi yeraltı jeolojisi çok karmaşıktır ve özdirenç kısa mesafelerde çok hızlı değişir. Böylesi ortamlarda bir boyutlu DES metodu başarılı olamamaktadır. Daha kesin yeraltı modeli elde etmek için bir boyutlu basit bir modelden çok daha karmaşık bir model kullanılmalıdır. İki boyutlu modelde özdirenç değerleri hem yatay yönde (genellikle x ölçüm yönü) hem de düşey yönde değişir ama diğer yatay yönde (y yönü) sabit kabul edilir. Daha gerçekçi bir model ise özdirenç değerlerinin tüm üç yönde de değiştiği kabul edilerek yapılan üç boyutlu modeldir. Özdirenç dağılımının iki ve üç boyutta gözlenebilmesi için arazi çalışmaları profil ölçüsü alınarak yapılır (Berge, 2005). Bu ölçüm yönteminde ise ölçüm hattı boyunca ve istenen ölçüm aralıklarına bağlı olarak yerleştirilen çoklu elektrotlar ve bunlar arasında iletimi sağlayan çok kanallı kablo (32, 64 kanal sayısı gibi) ve bunların bağlandığı taşınabilir bir özdirenç ve bilgisayar, ölçümün temel ekipmanlarıdır (Overmeeren ve Ritsema, 1988; Griffiths ve diğer., 1990; Griffiths ve Barker, 1993; Dahlin, 1996; Dahlin ve Loke, 1998; Christensen ve Sorensen, 1998; Dahlin, 2001).

Wenner dizilimine göre alınan bir ölçüm sistemine göre elektrot aralıkları "a" olarak alınan, birinci ve dördüncü elektrotları yere akım veren akım elektrotları, ikinci ve üçüncü elektrotları ise potansiyeli ölçen elektrotlar olarak kullanılan ilk ölçümün düzenidir. Ölçülen bu ilk görünür özdirenç değeri ikinci ve üçüncü elektrotlar arasına atanır. Daha sonra aynı işlem elektrotların bir kez ötelenmesiyle yeni ölçüm noktası için yinelenir ve diğer ölçümler profil sonuna kadar devam ettirilerek "n=1" derinlik seviyesine ait görünür özdirenç verileri toplanmış olur. Diğer derinlik seviyeleri için ise elektrot aralıkları "2a, 3a, ..., na" kadar açılarak görünür özdirenç verileri "n" seviye için toplanmaktadır (Berge, 2005). Tüm bu ölçüm noktaları için elektrot değişimleri bu amaç için geliştirilmiş bir çok kanallı özdirenç ölçüm aletindeki elektronik anahtarlama yoluyla sağlanmaktadır. Böylece tüm düzeyler için ölçümler kolaylıkla alınabilmektedir (Griffiths ve Baker, 1993). Tek hat üzerinde yapılan iki



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



boyutlu ölçümün “m” kadar hat üzerinde tekrarlanması ile ortama ait görünür öz direncinin üç boyuttaki değişiminin haritalanması ve hacimsel görüntülerin oluşturulması sağlanabilir.

Tablo 1 Jeofizik ölçüm bilgileri

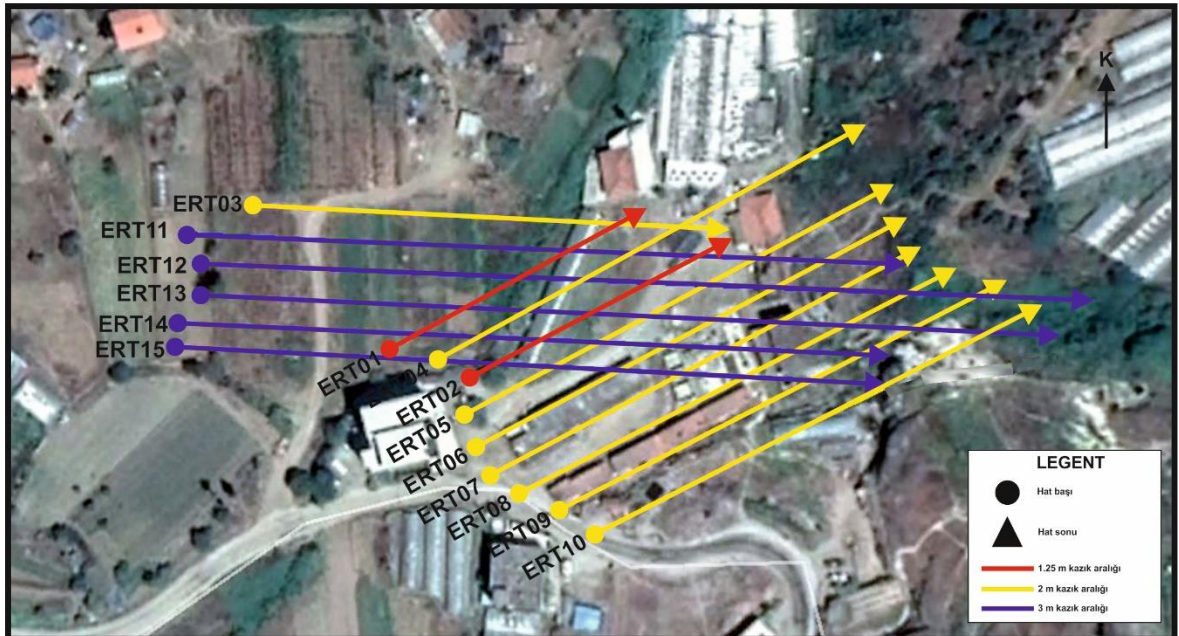
PROFİL ADI	Elektrot Sayısı	Elektrot Aralığı	Profil Boyu
ERT-01	60	1.25 m	73.75 m
ERT-02	60	1.25 m	73.75 m
ERT-03	60	2 m	118 m
ERT-04	60	2 m	118 m
ERT-05	60	2 m	118 m
ERT-06	60	2 m	118 m
ERT-07	60	2 m	118 m
ERT-08	60	2 m	118 m
ERT-09	60	2 m	118 m
ERT-10	60	3 m	177 m
ERT-11	60	3 m	177 m
ERT-12	60+12	3 m	213 m
ERT-13	60+12	3 m	213 m
ERT-14	60	2 m	118 m
ERT-15	60	2 m	118 m

SONUÇLAR

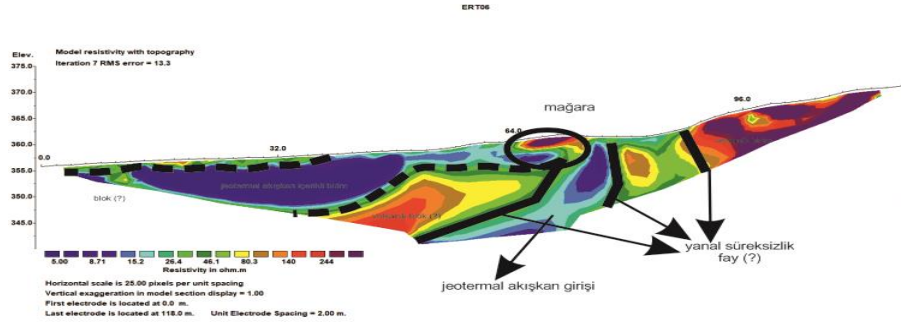
Yoğun bir tektonizmaya maruz kalan çalışma alanındaki birçok jeotermal sistem bu tektonizmaya bağlı olarak oluşmuştur. Mevcut alanda oluşan ve ölçülen profillerde de işaretli olan fay sistemlerinden birinin KB-GD yönlü düşey atımlı olduğu görülmüştür. Bölgede fay ve kırık sistemleri boyunca yüzeye kadar ulaşan jeotermal akışkanın belirtileri ERT kesitlerinde düşük öz direnç anomalisi olarak görülmektedir. Kesitlerden de görüleceği üzere, yüzeye yakın zonun üzerini kapatacak geçirimsiz bir birim olmaması veya zayıf zonun aşınmış olmasından dolayı, yine kesitlerde de görülen birçok doğal çıkışa neden olduğu düşünülmektedir. Özellikle ERT06 (Şekil 1) ve ERT07 (Şekil 2) profillerinin yaklaşık 45. Metrelerinde, üzeri sediman ile örtülü yüksek öz direnç emaresi magmatik blok olarak yorumlanmakla birlikte, sahadaki başka bir boşluk/mağara yapısı da olabileceği düşünülmektedir. ERT07 profilinin 45. Metresinde yapılacak 10-15m derinliğindeki bir sondaj ile bu belirtinin test edilmesi önerilmektedir. Çalışma sahasındaki özellikle mağara ile otel binasının arasında kalan alanda yoğun jeotermal akışkan birikiminin olduğu tespit edilmiştir. Bu alanın kuzeyine doğru gidildikçe akışkan etkisinin azaldığı görülmektedir (Bu bulgu sadece çalışma sınırları için geçerlidir). Özellikle ERT04/05/06/07/08/10/11/12/13 profillerinin D-KD bölümlerinde (bitiş taraflarında) gözlemlenen yüksek öz dirençli ve kalınlığı 5-15 metre arasında değişen volkanik birimlerin bulunduğu düşünülmektedir. İnşası planlanan yapıların zemin taşıma gücü yönünden bu volkanik birimler üzerine oturtulmasının uygun olacağı düşünülmekle birlikte, yine bu kısmın bir fay sınırı olduğu konusu da göz önünde bulundurulmalıdır.

KAYNAKLAR

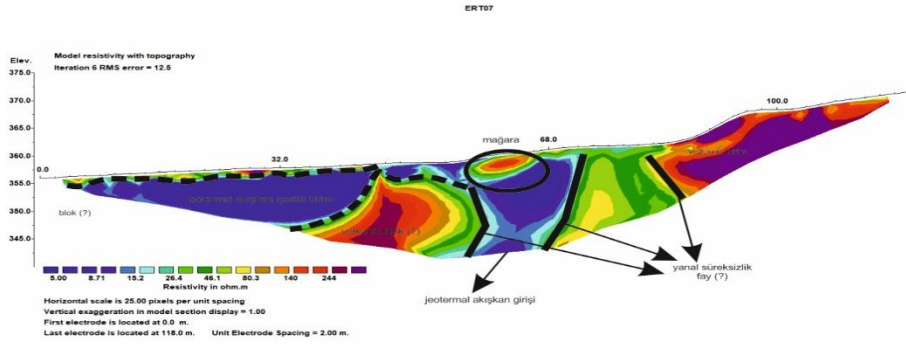
- Berge MA. 2005. İki boyutlu öz direnç ters çözüm modellemesi. *Y. Lisans Tezi*, D.E.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, s. 15-17.
- Christensen NB, Sorensen KI. 1998. Surface and borehole electric and electromagnetic methods for hydrogeological investigations. *European Journal of Engineering and Environmental Geophysics*, 3(1), p. 75-90.
- Dahlin T. 1996. 2D resistivity surveying for environmental and engineering applications. *First Break*, 14, p. 275-284.
- Dahlin T, Loke MH. 1998. Resolution of 2D Wenner resistivity imaging as assessed by numerical modelling. *Journal of applied Geophysics*, 38(4), p. 237-249.
- Ghosh DP. 1971. The application of linear filter theory to the direct interpretation of geoelectrical resistivity sounding measurements. *Geophysical Prospecting*, 19, p. 192-217.
- Griffiths DH, Turnbull J, & Olayinka AI. 1990. Two-dimensional resistivity mapping with a computer-controlled array. *First Break*, 8(4), p. 121-129.
- Johansen HK, 1977. A man computer interpretation system for resistivity soundings over a horizontally stratified earth. *Geophysical Prospecting*, 25(4), p. 667-691.
- Overmeeren RA, Ritsema IL. 1988. Continuous vertical electrical sounding. *First Break*, 6(10), 313-324.
- Stafenescu S, Schlumberger C, Schlumberger M. 1930. Sur la distribution électrique potentielle autour d'une prise de terre ponctuelle dans un terrain à couches, homogènes et isotropes. *Journal de Physique et du Radium*, 1(4), p. 132-140.



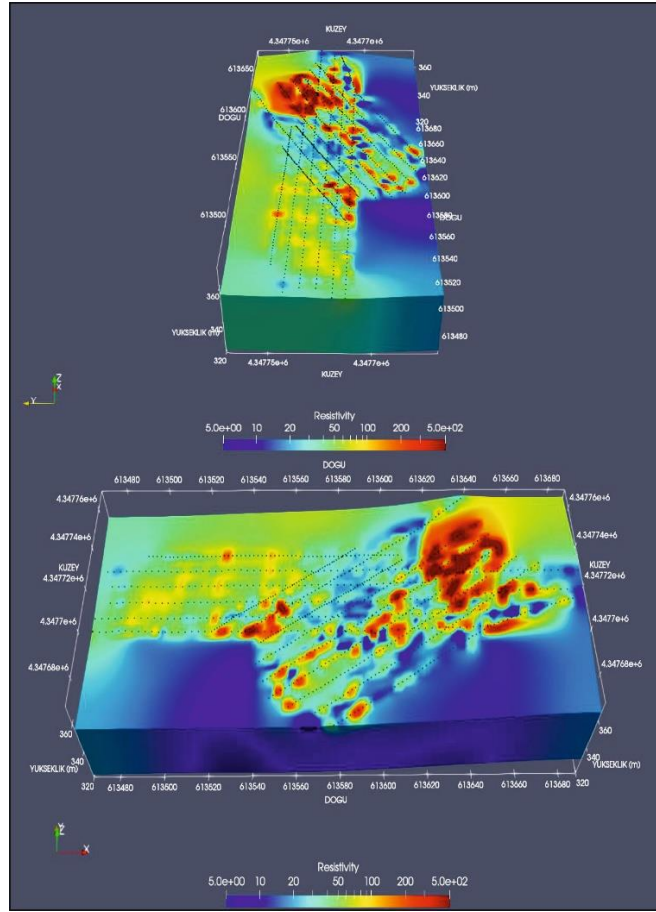
Şekil 3 Jeofizik profillere ait uydu görüntüsü



Şekil 2 ERT6 hattı yer elektrik kesiti



Şekil 3 ERT7 hattı yer elektrik kesiti



Şekil 4 Profillerin 3D birleştirilmiş görüntüleri



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



P4	İzmir İli, Torbalı İlçesi, Pancar Organize Sanayi Bölgesi İçerisindeki Kontrolsüz Dolgu Alanlarının Geometrisinin Elektrik Rezistivite Tomografi Yöntemiyle Tespiti
	Electrical Resistivity Method Determination of the Geometry Uncontrolled Filling Areas in the Pancar Organized Industrial Zone, Torbalı District, İzmir Province

Serdar Kapucu^{*1}, Züheyr Kamacı², Ziya Orhan Derinsu³, Ahmet Akdemir⁴

¹ kapucuserdar@gmail.com

² zuheyrkamaci@sdu.edu.tr

³ orhanderinsu@gmail.com

⁴ ahmetakdemir59@gmail.com

* Serdar Kapucu

ÖZ

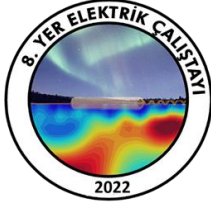
Jeofizik yöntemlerden Elektrik Rezistivite Tomografi (ERT) yöntemi, jeoteknik ve geoteknik anlamda mühendislik problemlerinin çözümü için sıklıkla kullanılmaktadır. Bu çalışmada İzmir İli, Torbalı İlçesi, Pancar Organize Sanayi Bölgesinde bulunan kontrolsüz dolgu alanlarında araştırma derinliği sınırları içerisinde, dolgu tabakasının olası konumu, uzanımı, yatay-düşey dağılımı ve yaklaşık dolgu tabakası hacminin hesaplanması doğrultusunda Elektrik Rezistivite Tomografi (ERT) yöntemi kullanılarak data setleri oluşturulmuştur. Jeofizik verilerden elde edilen 2B ve 3B kesitler ile dolgu alanlarının doğruya yakın şekilde belirlenmesi hedeflenmiştir. Jeofizik veriler bilgisayar ortamında çeşitli veri işlem ve ters çözüm modelleme aşamalarından geçirilerek, profile ait öz direnç sınırlarını içeren yer altı kesitleri elde edilmiştir. ERT çalışması sonucu oluşturulan yer altı modelleri bölgesel jeolojik birimlerde göz önünde bulundurularak muhtemel dolgu karakteristiğinin belirlenmesi hedeflenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Elektrik rezistivite tomografi, dolgu alanı, Torbalı, Türkiye

ABSTRACT

Electrical Resistivity Tomography (ERT) method, one of the geophysical methods, is frequently used for the solution of engineering problems in geotechnical and geotechnical terms. In this study, data sets were created using the Electric Resistivity Tomography (ERT) method in order to calculate the possible location, elongation, horizontal-vertical distribution of the fill layer and the approximate fill layer volume within the boundaries of the research depth in the uncontrolled fill areas in the Pancar Organized Industrial Zone, Torbalı District of İzmir Province. With the 2D and 3D sections obtained from the geophysical data, it is aimed to determine the fill areas almost accurately. By passing the geophysical data through various data processing and inversion modeling stages in the computer environment, underground sections containing the resistivity limits of the profile were obtained. It is aimed to determine the possible filling characteristics by considering the underground models created as a result of the ERT study in the regional geological units.

Keywords: Electrical resistivity tomography, filling area, Torbalı, Turkey



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



GİRİŞ

İnceleme alanında zemine ait elektrik (özdirenç) yapısının ortaya konulması amacıyla 'Elektrik Rezistivite Tomografi (ERT)' ölçümleri alınmıştır. 2 boyutlu (yanal ve düşey) yer elektrik modelleri sayesinde zemini oluşturan tabaka sınırları, derinlik ve kalınlıkları, olası fay ve kırık sistemleri ile jeolojik birim eşleştirmeleri belirlenebilir. Meydana gelen fiziksel hareketin var ise yanal ve düşey uzanımının (devamının) belirlenmesi ve sahadaki tabaka yapısının saptanması temel amaçtır. Bu sebeple mevcut dolgu sınırlarını ortaya koyacak şekilde sığ elektrik ölçümler yapılmıştır. Toplamda yapılan 8 profilden 15 metre derinlik hedeflenmiştir.

YÖNTEM

Elektrik özdirenç (EÖ) yönteminde, yere çakılan elektrotlar ile yere akım uygulanır ve diğer elektrotlar arasında oluşan gerilim farkı ölçülür. Ölçülen gerilim farkı tüm elektrotlar arasındaki uzaklığa ve ortamın jeolojik yapısına bağlıdır. EÖ yönteminde ölçülen büyüklük gerilim farkıdır. Ancak veri yorumu için gerilim farkı fiziksel bir büyüklük olan özdirenç (Şekil 1) dönüştürülür. Bu dönüştürme işlemi,

$$\rho_a = k \cdot \left(\frac{\Delta V}{I} \right) \quad (1)$$

bağıntısı ile yapılır. Burada I , yere uygulanan akım (amper), k , elektrotların konumuna bağlı geometrik faktör ve ΔV , ölçülen gerilim farkıdır (volt). Bu bağıntı tekdüze ve izotrop bir ortam için geçerlidir. Gerçekte yer tekdüze değildir ve bu bağıntıdan hesaplanan özdirenç, görünür özdirenç (GÖ) olarak adlandırılır.

Bu yöntemde amaç yer altı yapısını farklı jeolojik birimlerin farklı özdirençlere sahip olmalarından faydalanarak belirlemektir. Elektrik özdirenç yönteminde veri toplama işlemi çok kanallı özdirenç aletleriyle çok kısa sürede ve kolayca yapılabilmektedir. Ölçüm profillerinin konumu ve uzunluğu, ölçü noktalarının yerleri de aranan yapının vereceği yanıtı etkilemektedir. Bu nedenle bunların seçimi oldukça önemlidir. Ölçülen veriler yeraltının özdirenç değişimi hakkında bilgi vermek amacıyla yapma kesitler olarak sunulabilir. Bu tip veri sunumunda yatay eksen uzaklık, düşey eksen göreceli derinlik olmak üzere elde edilen veriler konturlanır. Bu tip veri sunumu ölçü alanı hakkında nitel yorum yapma imkanı verir. Aranan yapıların gerçek konumları ve özdirençleri (nicel yorum) uygun veri işlem teknikleri sonucu belirlenebilir. Ters çözüm olarak adlandırılan bu işlemler sonucunda yeraltı yapısını gerçek değerleri ile gösteren yer elektrik kesitleri elde edilir.

Yeryüzünden yapılan elektrik özdirenç çalışmaları ile yeraltındaki özdirenç dağılımlarını belirlemek için değişik ölçüm teknikleri bulunmaktadır. Burada araştırma problemine bağlı olarak özdirenç değişiminin yer altında hangi yönlerde incelenmesinin gerekliliği ve temel olarak iki farklı ölçüm türünün olduğu ortaya çıkmaktadır (Berge, 2005). Bunlar:

- i. Düşey Elektrik Sondajı (DES) Çalışmaları (bir boyutta)
- ii. Profil Ölçüsü (iki veya üç boyutta)

İlk olarak 1915'te Wenner tarafından uygulanan elektrik özdirenç yöntemi, 1920'de Schlumberger tarafından gerçekleştirilerek kullanılmış ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Burada yeraltının özdirenç değerinin derinlikle değişimi DES çalışmaları ile incelenmekte ve geleneksel özdirenç eğrileri (Stafanescu, 1930) ile nicel yorumlamaları yapılmaktadır. 1970'li yıllarda bilgisayar ve lineer filtre teorisinin gelişimi ile bilgisayar bazlı yorumlama



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



teknikleri gelişmiştir (Ghosh, 1971). Bunu ise geliştiren otomatik ters çözüm teknikleri izlemekte ve bir boyutlu bu verilerin değerlendirilmesinde kullanılmaktadır (Johansen, 1977). Tek kanallı öz direnç aletlerinin kullanıldığı ölçüm yönteminde, dizilimin orta noktası sabit tutularak, elektrotların aralıkları açılmakta böylelikle elektrot aralığına bağlı olarak, orta noktanın altındaki yeraltına ait görünür öz direnç değerleri, derinliğe göre bir boyutlu olarak elde edilmektedir. Derinliğe göre olan bu değişimde öz direncin sadece bu yönde (z yönlü) değiştiği, diğer iki yönde (x ve y yönlü) sabit kaldığı ve yeraltının yatay homojen katmanlardan oluştuğu varsayılmaktadır. Tabii ki yeraltında öz direnç dağılımı üç yönde değişmektedir ve bir boyutta yapılan bu varsayım sonucu, diğer yöndeki değişimler, elde edilen görünür öz direnç değerlerini olumsuz etkilemektedir. Yine de yöntem bir boyutlu yeraltı modelinin yaklaşık doğru olduğu yerde örneğin yeraltı su tablası jeolojik ortamlar hakkında kullanışlı bilgi verebilmektedir (Berge, 2005).

Ne var ki çoğu mühendislik ve çevresel çalışmada olduğu gibi yeraltı jeolojisi çok karmaşıktır ve öz direnç kısa mesafelerde çok hızlı değişir. Böylesi ortamlarda bir boyutlu DES metodu başarılı olamamaktadır. Daha kesin yeraltı modeli elde etmek için bir boyutlu basit bir modelden çok daha karmaşık bir model kullanılmalıdır. İki boyutlu modelde öz direnç değerleri hem yatay yönde (genellikle x ölçüm yönü) hem de düşey yönde değişir ama diğer yatay yönde (y yönü) sabit kabul edilir. Daha gerçekçi bir model ise öz direnç değerlerinin tüm üç yönde de değiştiği kabul edilerek yapılan üç boyutlu modeldir. Öz direnç dağılımının iki ve üç boyutta gözlemlenmesi için arazi çalışmaları profil ölçüsü alınarak yapılır (Berge, 2005). Bu ölçüm yönteminde ise ölçüm hattı boyunca ve istenen ölçüm aralıklarına bağlı olarak yerleştirilen çoklu elektrotlar ve bunlar arasında iletimi sağlayan çok kanallı kablo (32, 64 kanal sayısı gibi) ve bunların bağlandığı taşınabilir bir öz direnç ve bilgisayar, ölçümün temel ekipmanlarıdır (Overmeeren ve Ritsema, 1988; Griffiths ve diğer., 1990; Griffiths ve Barker, 1993; Dahlin, 1996; Dahlin ve Loke, 1998; Christensen ve Sorensen, 1998; Dahlin, 2001).

Wenner dizilimine göre alınan bir ölçüm sistemine göre elektrot aralıkları "a" olarak alınan, birinci ve dördüncü elektrotları yere akım veren akım elektrotları, ikinci ve üçüncü elektrotları ise potansiyeli ölçen elektrotlar olarak kullanılan ilk ölçümün düzenidir. Ölçülen bu ilk görünür öz direnç değeri ikinci ve üçüncü elektrotlar arasına atanır. Daha sonra aynı işlem elektrotların bir kez ötelenmesiyle yeni ölçüm noktası için yinelenir ve diğer ölçümler profil sonuna kadar devam ettirilerek "n=1" derinlik seviyesine ait görünür öz direnç verileri toplanmış olur. Diğer derinlik seviyeleri için ise elektrot aralıkları "2a, 3a, ..., na" kadar açılarak görünür öz direnç verileri "n" seviye için toplanmaktadır (Berge, 2005). Tüm bu ölçüm noktaları için elektrot değişimleri bu amaç için geliştirilmiş bir çok kanallı öz direnç ölçüm aletindeki elektronik anahtarlama yoluyla sağlanmaktadır. Böylece tüm düzeyler için ölçümler kolaylıkla alınabilmektedir (Griffiths ve Baker, 1993). Tek hat üzerinde yapılan iki boyutlu ölçümün "m" kadar hat üzerinde tekrarlanması ile ortama ait görünür öz direncinin üç boyuttaki değişiminin haritalanması ve hacimsel görüntülerin oluşturulması sağlanabilir.



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



Tablo 1 Jeofizik ölçüm bilgileri

PROFİL	Elektrot Aralığı	Elektrot Sayısı	Profil Boyu
ERT-1	3 m	30	87 m
ERT-2	3 m	30	87 m
ERT-3	3 m	30	87 m
ERT-4	3 m	30	87 m
ERT-5	3 m	30	87 m
ERT-6	3 m	30	87 m
ERT-7	3 m	30	87 m
ERT-8	3 m	30	87 m

SONUÇLAR

Arazi verilerinden elde edilen özdirenç kesitlerine bakıldığında, genel olarak yüzeyin ilk 3-10 metresinde düşük özdirençli (dolgu) varlığı görülmüş olup, buradan 15 metreye kadar orta-yüksek ve yüksek özdirenç anomalilerinin varlığı gözlenmektedir. Kesitlerde görülen özdirenç değerleri çalışma alanının jeolojisine göre yorumlanarak, kesitlere ait olası jeolojik birim eşleştirmeleri yapılmıştır. Bu durumda yüzeyden derine doğru sırasıyla; dolgu, dolgu ile miyosen kırıntılılar ve miyosen kırıntılılar şeklinde devam ettiği düşünülmektedir. ERT-1 (Şekil 1) yer elektrik modelinde, ölçüm yapılan diğer hatlardan farklı olarak yüksek özdirençli yapıların daha yaygın olduğu görülmüştür. Parsel dışı sınırında ölçümü gerçekleştirilen ERT-1 profilinde, parsel sınırları içerisinde bulunan profillere göre zemin üstündeki dolgu miktarı yok denecek kadar az görülmüştür. Tüm ERT profillerinin genel karakteri incelendiğinde dolgu sınırları ve kalınlıkları 2B ve 3B olacak şekilde ortaya çıkarılmış olup ayrıca inceleme sahasına ait dolgu tabakasının hacimsel hesabı da yardımcı programlar sayesinde yapılabilmektedir.

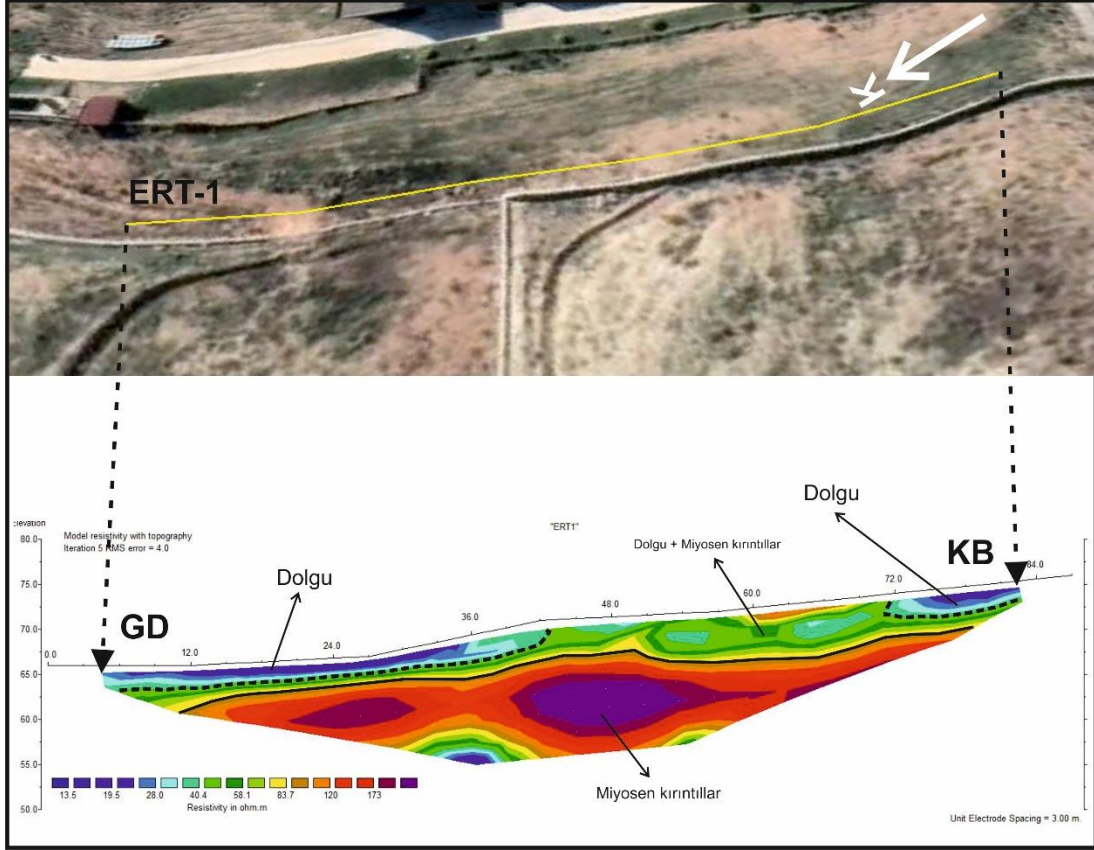
KAYNAKLAR

- Berge MA. 2005. İki boyutlu özdirenç ters çözüm modellemesi. *Y. Lisans Tezi*, D.E.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, s. 15-17.
- Christensen NB, Sorensen KI. 1998. Surface and borehole electric and electromagnetic methods for hydrogeological investigations. *European Journal of Engineering and Environmental Geophysics*, 3(1), p. 75-90.
- Dahlin T. 1996. 2D resistivity surveying for environmental and engineering applications. *First Break*, 14, p. 275-284.

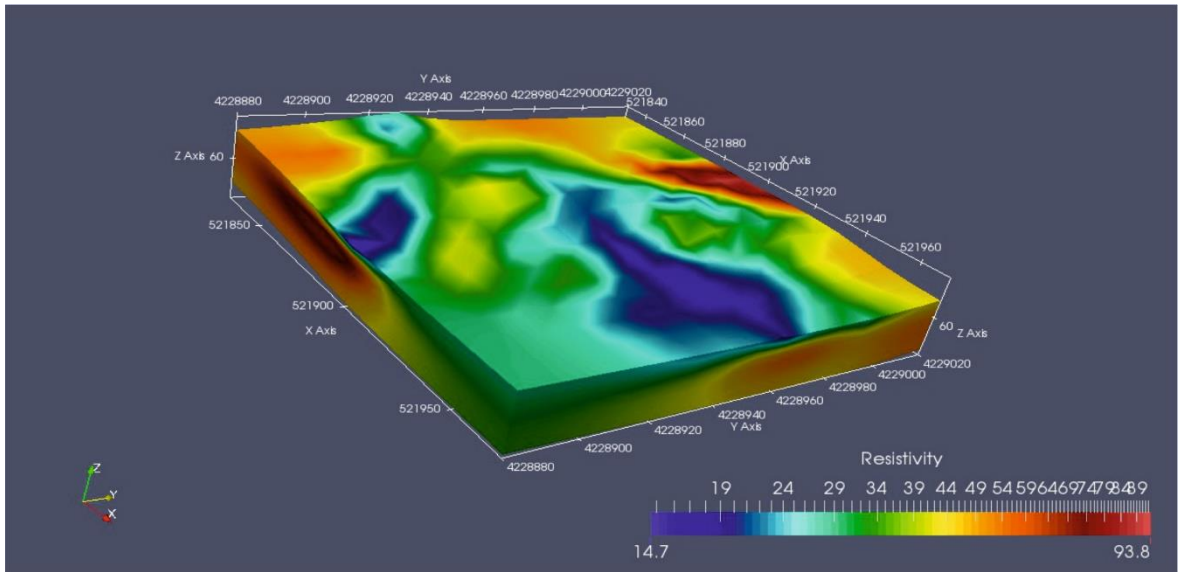
- Dahlin T, Loke MH. 1998. Resolution of 2D Wenner resistivity imaging as assessed by numerical modelling. *Journal of applied Geophysics*, 38(4), p. 237-249.
- Ghosh DP. 1971. The application of linear filter theory to the direct interpretation of geoelectrical resistivity sounding measurements. *Geophysical Prospecting*, 19, p. 192-217.
- Griffiths DH, Turnbull J, & Olayinka AI. 1990. Two-dimensional resistivity mapping with a computer-controlled array. *First Break*, 8(4), p. 121-129.
- Johansen HK, 1977. A man computer interpretation system for resistivity soundings over a horizontally stratified earth. *Geophysical Prospecting*, 25(4), p. 667-691.
- Overmeeren RA, Ritsema IL. 1988. Continuous vertical electrical sounding. *First Break*, 6(10), 313-324.
- Stafenescu S, Schlumberger C, Schlumberger M. 1930. Sur la distribution électrique potentielle autour d'une prise de terre ponctuelle dans un terrain à couches, homogènes et isotropes. *Journal de Physique et du Radium*, 1(4), p. 132-140.



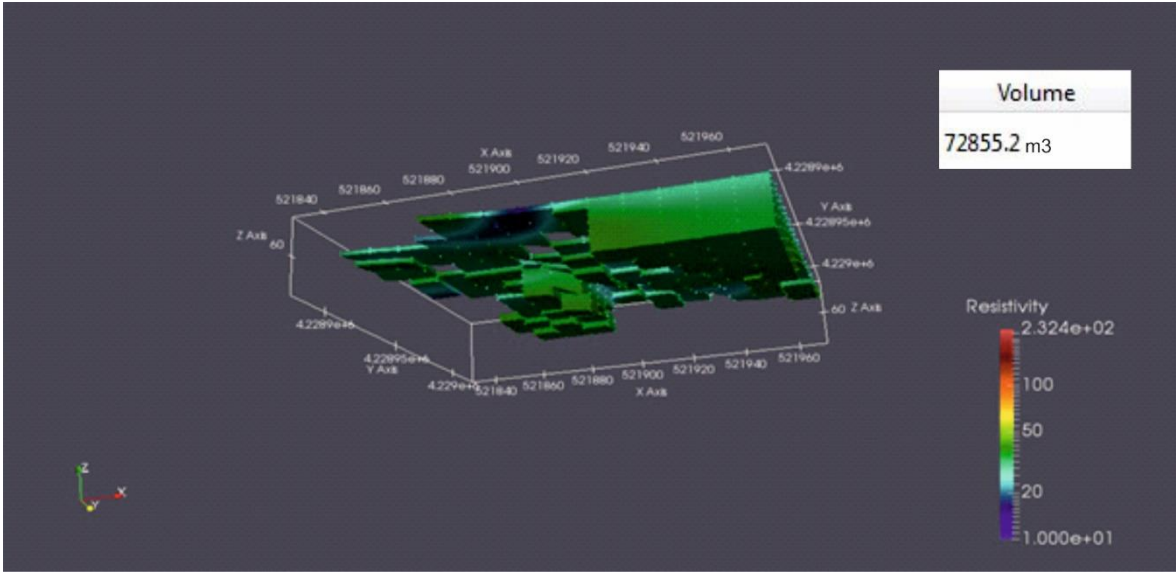
Şekil 4 ERT profillerini gösteren uydu görüntüsü



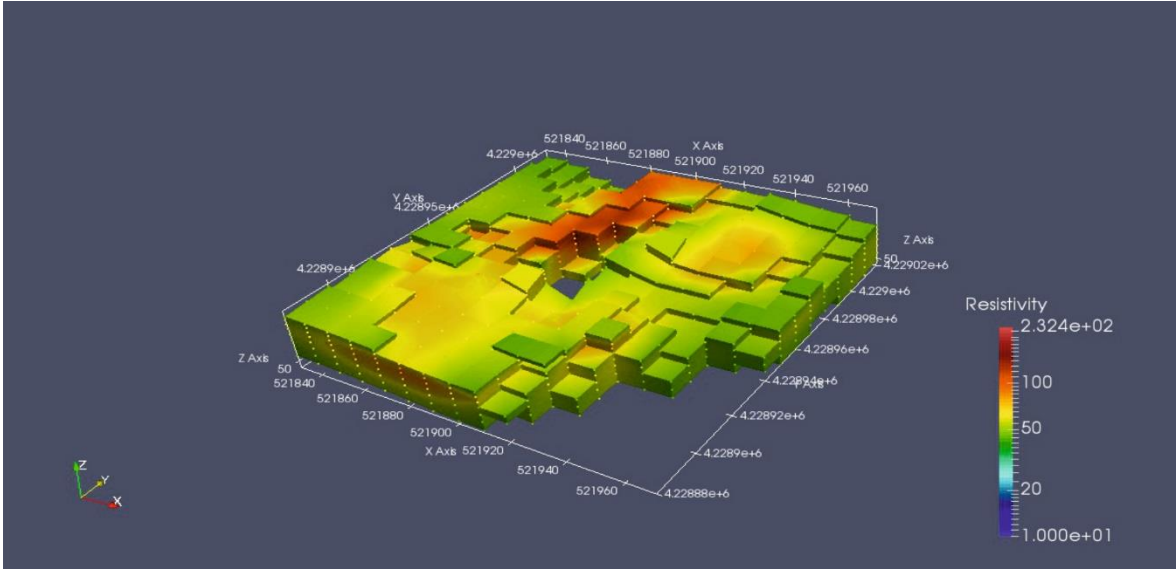
Şekil 2 ERT-1 ters çözüm öz direnç modeli



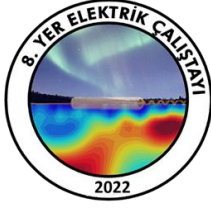
Şekil 3 3B birleştirilmiş model



Şekil 4 3B düşük özdirenç zonu (dolgu) ve yaklaşık hacim hesabı



Şekil 4 3B orta-yüksek özdirenç özdirenç zonu (dolgu+miyosen kırıntılar)



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



P5	Tarihi Tabakhane Köprüsü ve Çevresinin Arkeolojik Yapısının Yer Radarı (GPR) Yöntemiyle Araştırılması
	Investigation of the Archaeological Structure of the Historical Tabakhane Bridge and its Surroundings by Ground Radar Method

O.Serhat KARAÇAL^{*1}, Emre ÖZÇELİK²

¹ serhatkaracal@gmail.com

² emreozcelikk@gmail.com

ÖZ

Trabzon İli Ortahisar İlçesi'nde bulunan tarihi Tabakhane köprüsünün ilk kuruluşu, 1'inci yüzyıla tarihlendirilmektedir. Evliya Çelebi, Karakoyunlular döneminde yapıldığını ileri sürmektedir. Değişik dönemlerde yapılan onarım ve genişletmelerde bugünkü durumuna gelmiştir. Bugünkü haliyle Osmanlı yapısıdır ve son şekline 19'uncu yüzyılda kavuşmuştur. Ayrıca çalışılan bölgede tarihi surlar da bulunmaktadır. Bu kapsamda Tabakhane Köprüsü altında bulunan alanda Yer radarı (GPR) yöntemi ile bölgenin arkeolojik yapısı araştırılmıştır. Çalışma alanında 224 profilde farklı uzunluklarda yaklaşık 7500 metre Yer radarı (GPR) çalışması yapılmıştır. Yatay ve düşey profil hatlarında ölçümler yapıp 2 boyutlu ve bu kesitlerin birleştirilmesiyle de 3 boyutlu görüntüler ortaya çıkarılmış ve tarihi yapıların ortaya çıkarılması amacıyla arkeolojik sondaj yerleri önerilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yer radarı, GPR, Tarihi Yapılar, Arkeojeofizik

ABSTRACT

The first foundation of the historical Tabakhane bridge, located in Ortahisar District of Trabzon Province, is dated to the 1st century. Evliya Çelebi claims that it was built during the Karakoyunlu periods. It has reached its present state with the repairs and expansions made in different periods. It is an Ottoman structure in the 19th century. There are also historical walls in the studied area. In this context, the archaeological structure of the region was investigated with the Ground Penetrating Radar (GPR) method in the area under the Tabakhane Bridge. Approximately 7500 meter in different lengths in 224 study has been carried out. Measurement were made on the horizontal and vertical profile lines and 2-d sections were created. Then, by combining these sections, 3-d images were obtained and archaeological sounding sites were proposed in order to reveal historical structures.

Keywords: Ground Penetrating Radar, Historical Structures



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



GİRİŞ

Trabzon ili Ortahisar ilçesinde bulunan tarihi Tabakhane köprüsünün ilk kuruluşu, 1'inci yüzyıla tarihlenmektedir. Evliya Çelebi, Karakoyunlular döneminde yapıldığını ileri sürmektedir. Değişik dönemlerde yapılan onarım ve genişletmelerde bugünkü durumuna gelmiştir [1]. Trabzon Büyükşehir Belediyesi tarafından, Tabakhane Köprüsünün hemen altında bulunan alanın arkeolojik yapısının incelenmesi talep edilmiş ve bu kapsamda çalışma alanında Yer Radarı (GPR) yöntemi uygulanmıştır.

YÖNTEMLER

Yer Radarı (GPR) Yöntemi

Yer radarı yöntemi (Ground Penetrating Radar - GPR), yüzeyin sığ derinliklerini araştırmak için kullanılan yüksek frekanslı elektromanyetik dalgaları kullanan bir jeofizik yöntemdir. Yöntemin kullanımının kolay olması ve çok hızlı veri toplanabilmesi, veri toplama sırasında çalışma alanında herhangi bir tahribat oluşturmaması, santimetre düzeyinde yüksek çözünürlüklü iki boyutlu (2B) ve üç boyutlu (3B) yer altı görüntülemenin yapılabilmesi bu yöntemin en önemli avantajlarıdır. Bu yöntemle, yapıların konum ve derinliklerinin çok daha net belirlenebilmesi, özellikle 3B görüntüleme ile karmaşık yapı bölgelerinde aranan özel yapının kararlaştırılması ve oldukça etkin görüntü ile sunulabilmesi özellikleri nedeniyle tüm sığ araştırmalarda, son yıllarda en çok kullanılan jeofizik yöntem olmuştur Annan (2000). Çalışma alanında 224 profilde farklı uzunluklarda yaklaşık 7500 metre Yer radarı (GPR) çalışması yapılmıştır. Yatay ve düşey profil hatlarında ölçümler yapıp 2 boyutlu ve bu kesitlerin birleştirilmesiyle de 3 boyutlu görüntüler ortaya çıkarılmış ve tarihi yapıların ortaya çıkarılması amacıyla arkeolojik sondaj yerleri önerilmiştir.

SONUÇLAR

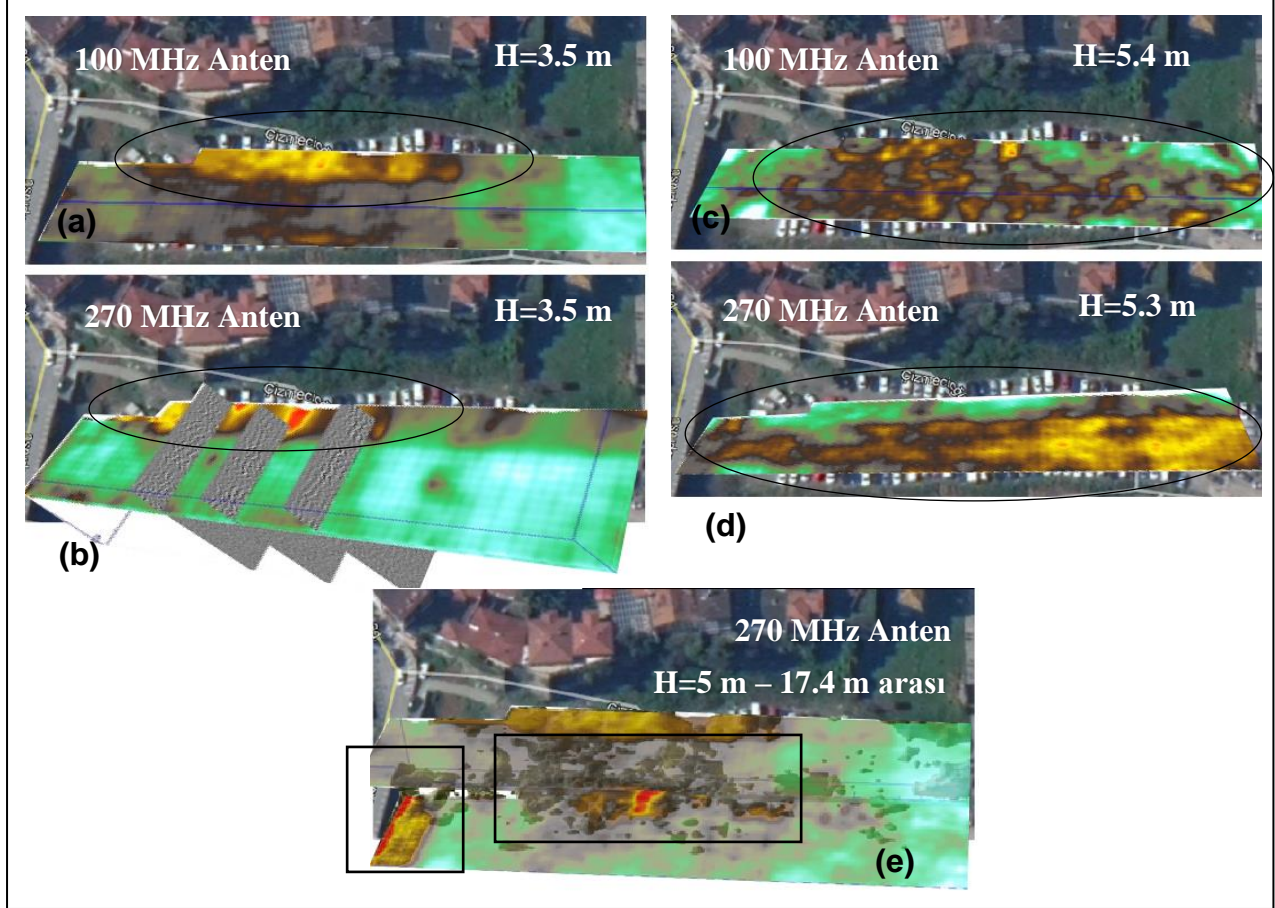
Yer Radarı (GPR) Yöntemi 3 farklı alanda 100 MHz ve 270 MHz antenler ile yapılmıştır. 1'inci bölgede yatay ve düşey profillerde yapılan ölçümler sonucu elde edilen Yer Radarı kesitleri incelendiğinde ilk bölgede üstte bir dolgu malzeme tespit edilmiştir. Daha önce bu bölgede yerleşim yeri bulunduğundan bu dolgu buradaki binaların yıkıldıktan sonraki kalıntılarından kaynaklanmaktadır. Yine Yer Radarı kesitleri incelendiğinde özellikle surların altında kalan kısımda anomaliler tespit edilmiştir. Dolayısıyla bu anomalilerden yararlanarak arkeolojik sondaj yerleri önerilmiştir. 2'inci bölgede yine yatay ve düşey profillerde ölçümler alınmıştır. Elde edilen kesitler incelendiğinde bir hat boyunca devam eden belirgin bir anomali görülmektedir. Araştırmaların ardından anomalinin bir akar hattından kaynaklandığı belirlenmiştir. 3'üncü bölge dar bir alanda kaldığı için birbirine paralel 2 profilde ölçümler alınmıştır. Bu verilere ait radargram incelendiğinde, profil başında 1.5 m derinlikten başlayıp 0.5 m derinlikte profil hattı boyunca ilerleyen boru hattı tespit edilmiştir. Yer radarı (GPR) çalışmasından elde edilen bilgiler doğrultusunda arkeolojik sondaj yerleri belirlenmiş ve belirlenen bu yerlerde yapılan kazılar neticesinde tarihi yapılar gün yüzüne çıkarılmıştır.

KAYNAKLAR

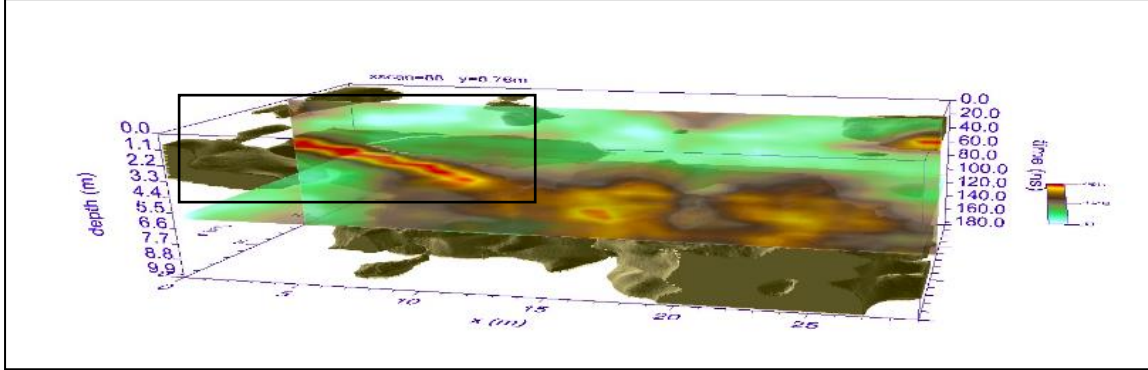
- [1], <https://www.trabzon.bel.tr/fck-sayfalar.aspx?id=4265> erişim 17 Mart 2022.
Annan, A.P., 2000. Ground Penetrating Radar Workshop Notes, Sensors and Software Inc.,
Canada.



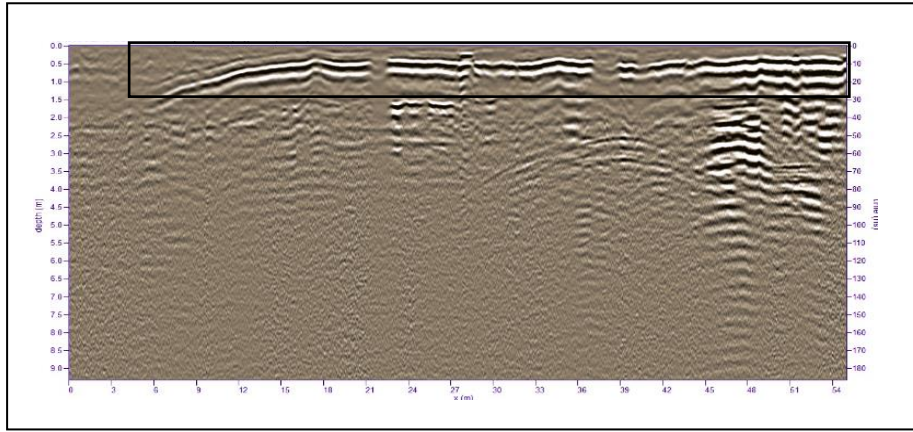
Şekil 1 Ölçüm alanlarının yerlerinin üstten görüntüsü



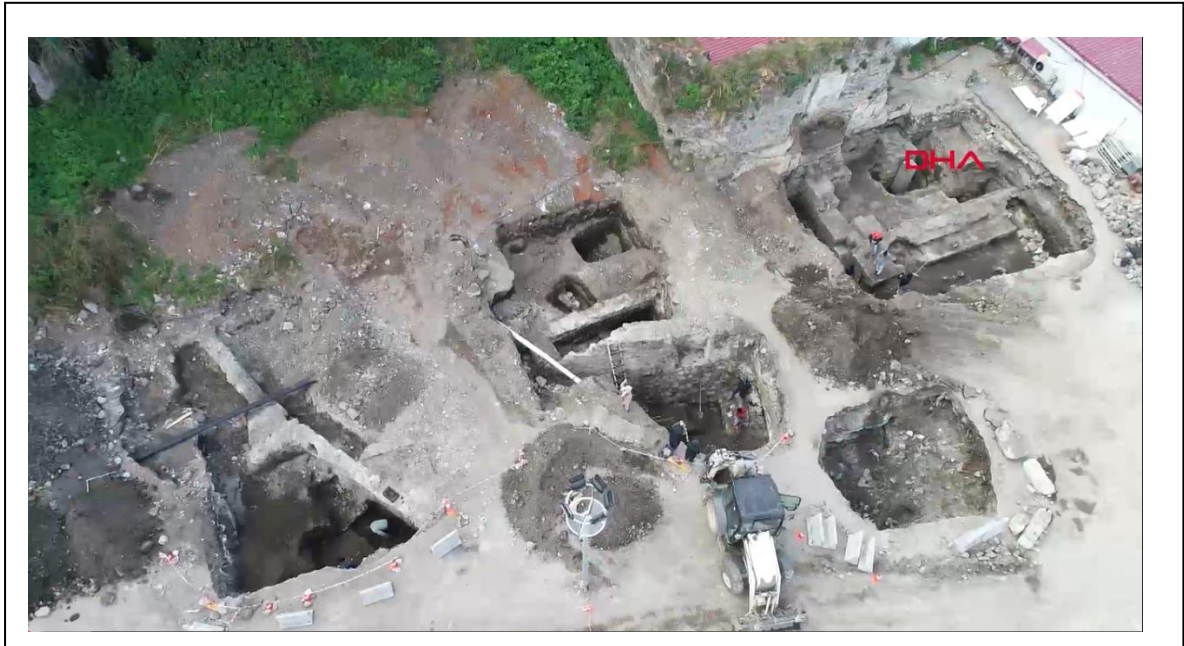
Şekil 2 1'inci ölçüm alanında elde edilen yer radar kesitleri ve katı modeli a) 100 MHz Anten ile alınan ölçümün H=3.5 m derinlikteki kesiti, b) 270 MHz Anten ile alınan Ölçümün H=3.5 m derinlikteki kesiti c) 100 MHz Anten ile alınan ölçümün H=5.4 m derinlikteki kesiti d) 270 MHz Anten ile alınan ölçümün H=5.3 m derinlikteki kesiti e) 270 MHz Anten ile alınan ölçümün katı modeli



Şekil 3 2'inci ölçüm alanında) 270 MHz Anten ile alınan ölçümün katı modeli



Şekil 4 3'üncü ölçüm alanında elde edilen radargram kesiti



Şekil 5 Kazı sonrası araştırma alanının üstten görüntüsü



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



P6	Yeşilyurt Köyü (Isparta) Heyelanının İncelenmesi
	Investigation of Yeşilyurt Village (Isparta) Landslide

Olcaç ÇAKMAK^{*1}, Çağlayan BALKAYA^{1,2}, Erhan ŞENER^{3,4}, Ali YALÇIN⁴

¹ Süleyman Demirel Üniversitesi, Deprem ve Jeoteknik Araştırma Merkezi, Isparta

² Süleyman Demirel Üniversitesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, Isparta

³ Süleyman Demirel Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Isparta

⁴ Süleyman Demirel Üniversitesi, Uzaktan Algılama ve Uygulama Merkezi, Isparta

E-posta: olcaycakmak@sdu.edu.tr

ÖZ

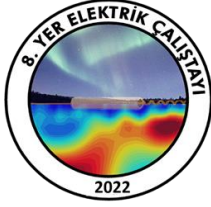
Zemini kaya ya da dolgu malzemesinden oluşan bir yamacın su, yer çekimi ve eğim gibi doğal ya da yol yapımı, madenler ve sulama faaliyetleri gibi doğal olmayan etkenlerle dengesinin bozulmasıyla gelişen kütle hareketleri olan heyelanlar can kayıplarına ve ekonomik zararlara neden olmaktadır. Heyelanların genel olarak karmaşık yapısını sadece mühendislik jeolojisi ile açıklamak bazen mümkün değildir. Heyelan malzemesinin bu karmaşıklığı farklı bir litoloji anlamına gelse de zemin malzemesinin genel olarak sismik hız, elektrik özdirenç ve yoğunluk gibi fiziksel parametrelerindeki değişimiyle de doğrudan ilişkilidir. Bu nedenle jeofizik yöntemler, özellikle heyelan geometrisinin araştırılmasında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada Yeşilyurt (Isparta)'da meydana gelen heyelan elektrik özdirenç ve sismik tomografi teknikleri uygulanarak 9 ölçüm profilinde incelenmiştir. Çalışma kapsamında elde edilen bulgulara göre heyelanın hareket mekanizmasının tabanda bulunan killi birim ile ofiyolit sınırında geliştiği belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Heyelan, Elektrik özdirenç, Sismik, Yeşilyurt

ABSTRACT

Landslides are mass movements caused by the deterioration of the equilibrium of a slope whose ground is composed of rock or filler, with natural factors such as water, gravity and slope, as well as unnatural factors such as road construction, mining and irrigation, cause death and economic damage. Sometimes it is not possible to explain the generally complex structure of landslides only with engineering geology. Although this complexity of the landslide material means a different lithology, it is also directly related to changes in the physical parameters of the soil material in general, such as seismic velocity, electrical resistivity and density. Geophysical methods are therefore widely used, especially in the investigation of landslide geometry. In this study, the landslide in Yeşilyurt (Isparta) was investigated by applying electrical resistivity and seismic tomography techniques in 9 measurement profiles. According to the findings of the study, it was found that the movement mechanism of the landslide developed at the boundary between the clay unit at the base and the ophiolite.

Keywords: Landslides, Electrical resistivity, Seismic, Yeşilyurt



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



GİRİŞ

Heyelanlar, genellikle; dairesel (rotasyonel) kayma, düzlemsel kayma, blok kayma, kaya düşmesi, kaya devrilmesi, yamaç döküntüsü (/molozu) akması, yamaç döküntüsü çığı, toprak akması, çamur akması, yanal yayılma ve karmaşık heyelanlar olarak sınıflandırılır [1] ve doğal veya doğal olmayan nedenlerle yamaç dengesinin bozulması ile oluşan kütle hareketleridir. Yağmur ve kar gibi doğal meteorolojik olayların da etkisiyle, yamaç eğimi fazla olan ve yamaç molozu ya da özellikle kil, silt ve kum içeriği fazla olan bölgeler heyelanlar için ideale yakın ortamlardır. Yol yapımı, madencilik ve sulama faaliyetleri gibi doğal olmayan etkenler de bu doğal yamaç dengeninin bozulmasına neden olabilmektedir. Heyelanların genel olarak karmaşık yapısını sadece mühendislik jeolojisi ile açıklamak bazen mümkün değildir (Karslı 2015). Jeofizik yöntemler heyelan araştırmalarında ve özellikle heyelan geometrisinin belirlenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Yılmaz 2007, Göktürkler vd 2008, Uyanık ve Çatlıoğlu 2014, Gelişli 2018, Senkaya vd 2020).

Yeşilyurt köyü, Aksu Çayı havzasında, tamamen karstik platolar içerisinde teşekkül etmiş olan Yeşilyurt polyesi etrafına kurulmuştur. Polye havzasının doğu batı yönünde uzunluğu 2,5 km ve ova tabanının alanı ise yaklaşık 3,80 km² dir (Atayeter 2000). Bu çalışmada, Yeşilyurt Köyünde meydana gelen heyelan jeofizik yöntemler kullanılarak araştırılmıştır (Şekil 1 sol panel). Bu amaçla öncelikle jeolojik amaçlı arazi çalışmalarının yanı sıra çalışma alanında belirlenen 9 profil boyunca sismik kırılma tomografi (SKT) ve elektrik özdirenç tomografi (EÖT) uygulamaları gerçekleştirilmiştir.

GENEL JEOLJİ

Çalışma alanı GB Anadolu'da Isparta büklümü olarak bilinen coğrafik yapı içerisinde yer almaktadır. Bölgede otokton konumlu kaya birimlerinden oluşan Beydağları otoktonu ve allokton konumlu kaya birimlerinden oluşan Antalya Napları, Yeşilbarak Napı ve Likya Napları yüzeyleyir. Ayrıca çalışma alanında Anamas-Akseki Otoktonu ile reotokton konumlu Miyosen-Kuvaterner yaşlı kayaçlarda yer alır. Bölgede farklı yaş ve litolojiye sahip stratigrafik birimler yüzeylenmektedir. Bölgede ayırtılan litolojik birimler; Gökdere Formasyonu, Kesmeköprü Formasyonu, Dulup Kireçtaşı, Tekedağı Formasyonu, Keçili Formasyonu, Kırkdirek Formasyonudur. Tüm bu birimlerin üzerinde Kuvaterner örtü birimleri olan Alüvyon bulunmaktadır (Şenel 1997).

JEOFİZİK UYGULAMALAR ve BULGULAR

Heyelan alanında, EÖT çalışması 9 profil üzerinde gerçekleştirilmiş ve bu profillerin çalışma üzerindeki konumları Şekil 1'in sağ panelinde verilmiştir. Aktif heyelan bölgesinde %15 lik bir eğim mevcuttur. Arazi yüzeyi aktif heyelan hareketinden dolayı oldukça karmaşıktır. GF-ARES elektrik özdirenç ölçüm sistemiyle gerçekleştirilen çalışmada Wenner-Schlumberger elektrot dizilimi kullanılmıştır. EÖT profillerinin altısı heyelan düzlemine paralel (Profiller 1-5, 7) ve bir tanesi ise heyelan düzlemine diktir (Profil 6). Bu profillerin uzunlukları 188 m ve elektrod aralıkları ise 4 m'dir. Profil 8, yakındaki mermer ocağının artıkları olan pasa kalınlığını belirlemek için pasa üzerinde ve profil 9 ise alandaki kil kalınlığını belirlemek amacıyla çalışma alanının güneydoğusunda konumlanmaktadır. 141 m uzunluğundaki bu profiller üzerinde görünür özdirenç veri kümeleri 3 m elektrod aralığı kullanılarak toplanmıştır. Veri kümelerinin tomografik ters çözümü Res2DinV yazılımıyla düzgünlük kısıtlı en-küçük kareler tekniği (Constable vd 1987) kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



Uzunlukları EÖT profillerine göre görece kısa olan 12 adet SKT profilleri ise EÖT profillerinin üzerinde konumlanmaktadır.

Ölçüm profilleri, genel olarak, Şekil 1'in sağ panelinden görüldüğü gibi sera alanlarının üzerinde konumlanan stabilize yol üzerindedir. Profil 3 için 5 yinelemenin sonunda %6,1 RMS değeri ile elde edilen EÖT kesiti Şekil 3'te gösterilmiştir. Genel olarak, yanal ve düşey yönde farklı özdirenç değişimlerinin görüldüğü kesitte; yüzeyde gözlemlenen görece yüksek özdirençli (> 800 ohm.m) kireçtaşı biriminin altında düşük özdirenç değerleri sunan killi birim (5-40 ohm.m) ile yaklaşık 100-200 ohm.m arasında özdirenç değerleri gösteren ofiyolit birimi belirlenmiştir. En üstte yüzeyleyen Kireçtaşı biriminin altında ise su içeriği yüksek killi birim yer almaktadır. En altta ise görece yüksek özdirençli ofiyolit birim bulunmaktadır. Arazide gerçekleştirilen temel araştırma sondajlarından ve açılan gözlem çukurlarından alınana örnekler üzerinde laboratuvar ortamında deneyler yaptırılarak özellikle killi birimlerin fiziksel özellikleri ve bazı indeks özellikleri belirlenmeye çalışılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda; birleştirilmiş Zemin Sınıflamalarına göre ince daneli zeminlerin genellikle CL ve CH sınıfında olduğu tespit edilmiştir. Su muhtevası değerleri ise (w); %2.4 - %31,4 arasında değiştiği gözlenmiştir. Atterberg limitleri ve su muhtevasına göre buradaki kil yarı katı kıvamda olduğu anlaşılmıştır. Bu birimin altında yer alan ofiyolit biriminin su muhtevası oldukça düşüktür. Bu sonuç ise heyelan hareketinin kil ile ofiyolit sınırında olacağını göstermektedir.

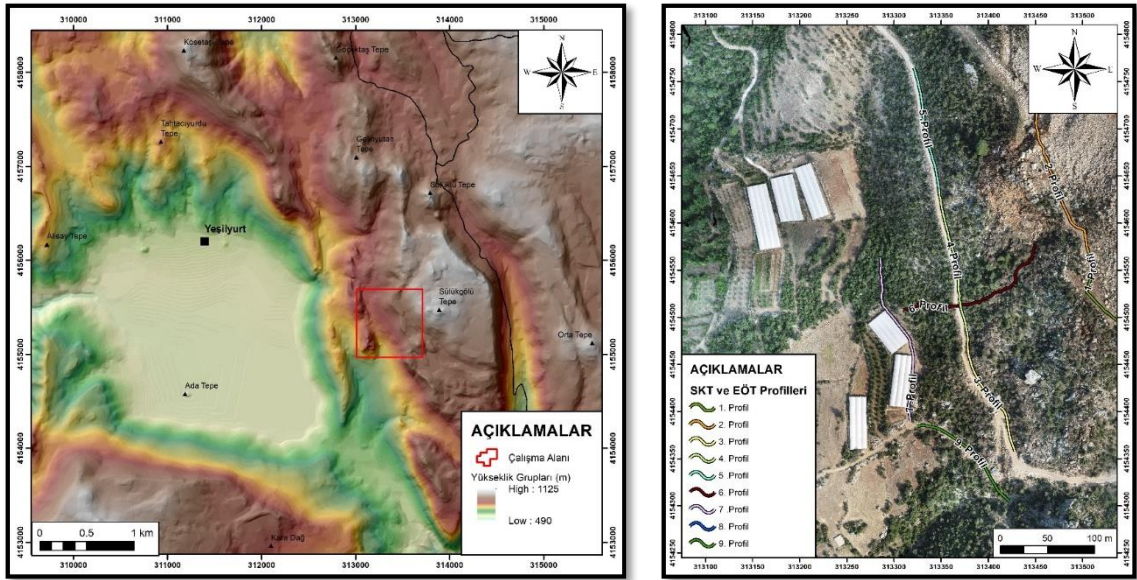
SONUÇLAR

Bu çalışmada, jeofizik yöntemler kullanılarak Yeşilyurt Köyünde meydana gelen heyelan araştırılmıştır. Bu amaçla öncelikle jeolojik amaçlı arazi çalışmalarının yanı sıra çalışma alanında belirlenen 9 profil boyunca EÖT ve SKT çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Profil 3'e göre en üstte yüzeyleyen Kireçtaşı biriminin hemen altında su içeriği yüksek killi birim ve en altta ise görece yüksek özdirençli ofiyolit birim bulunmaktadır. Çalışma kapsamında elde edilen bulgulara göre heyelanın hareket mekanizmasının tabanda bulunan killi birim ile ofiyolit sınırında geliştiği belirlenmiştir.

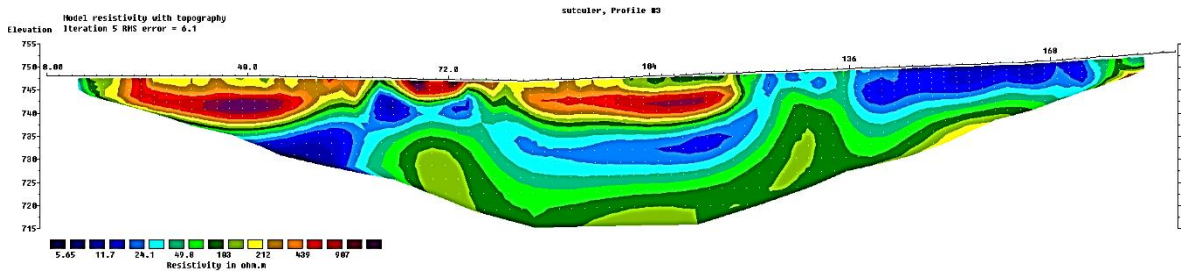
KAYNAKLAR

- [1] <https://www.usgs.gov/natural-hazards/landslide-hazards>, erişim 12 Mart 2020.
- Atayeter Y 2000, Aksu Çayı Havzasının Jeomorfolojisi, Marmara Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Doktora Tezi, İstanbul.
- Constable SC, Parker RL and Constable CG 1987, Occam's inversion: A practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data. *Geophysics*, 52, 289–300.
- Gelişli K 2018, Jeofizik yöntemlerle heyelan araştırmaları. *Uygulamalı Yer Bilimleri Dergisi*, 17, 115–126.
- Geotomo Software 2006. RES2DINV–manual.
- Göktürkler G, Balkaya Ç and Erhan Z 2008, Geophysical investigation of a landslide: The Altındağ landslide site, İzmir (western Turkey). *Journal of Applied Geophysics*, 65, 84–96.
- Karslı H 2015. Heyelan incelemelerinde jeofizik yöntemler ve uygulama örnekleri: *Prof. Dr. Ali Keçeli Jeofizik-Jeoteknik Çalıştayı*, 51–60.

- Senkaya GV, Senkaya M, Karsli H and Güney R 2020. Integrated shallow seismic imaging of a settlement located in a historical landslide area. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 79,1781–1796.
- Şenel M 1997, 1/100 000 Ölçekli Türkiye Jeoloji Haritaları, Isparta M25 paftası, MTA, Ankara.
- Uyanık O ve Çatlıoğlu B 2014. Elektrik özdirenç ve sismik kırılma yöntemlerinden heyelan geometrisinin belirlenmesi. *SDÜ Fen Bilimleri Enstitü Dergisi*, 18, 22–29.
- Yılmaz S 2007. Investigation of Gürbulak landslide using 2D electrical resistivity image profiling method (Trabzon, Northeastern Turkey), *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 12, 199–205.



Şekil 1 Çalışma alanının topografik harita üzerindeki konumu (sol panel) b) EÖT ve SKT profillerinin ortofoto görüntüsü üzerindeki konumları (sağ panel)



Şekil 2. Profil 3'e ait EÖT kesiti



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



P7	Tarihi Ambarlık Taş Kemer Köprüsü'nün Bulunduğu Alanda Jeofizik Yöntemlerle Zemin Yapısının İncelenmesi
	Investigation of the Soil Structure with Geophysical Methods in the Area of the Ambarlik Historical Masonry Arch Bridge

Emre ÖZÇELİK^{*1}, Hakan Karslı², O.Serhat Karaçal³

¹ emreozcelikk@gmail.com

² hkarsli@ktu.edu.tr

³ serhatkaracal@gmail.com

ÖZ

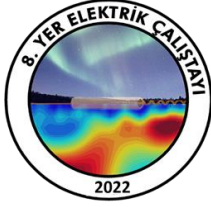
Rize Merkez Ambarlık Köyü'nde bulunan Tarihi Ambarlık Taş Kemer Köprüsü kente 18'inci yüzyılda inşa edilmiş, Kültür Varlıklarını Koruma Bölge Kurulu ve Müzeler Genel Müdürlüğüne 2003 'te tescil edilerek koruma altına alınmıştır. Ambarlık Taş Kemer Köprüsü'nün restorasyonu 2010 yılında tamamlanmış, ancak Köprü 10 Temmuz 2019 tarihinde bilinmeyen bir nedenle çökmüştür. Bu kapsamda Ambarlık Taş Kemer Köprüsü'nün bulunduğu alanda jeofizik uygulamalar ile zemin yapısı incelenmiştir. Jeofizik uygulamalar kapsamında köprü çevresinde 2 profilde elektrik özdirenç ölçümleri, 3 profilde sismik ölçümleri, 2 profilde yer radarı ölçümleri ve 5 noktada mikrotremör ölçümleri yapılmış ve zemin yorumlanmıştır. Çalışmalar sonucunda zemin yapısı, jeolojik birimlerin tabakalanması, yer altı modeli, zemin grubu, köprünün ayak kısımlarının elastik ve dinamik parametreleri ve köprünün hakim salınım frekansları belirlenmiştir. Ayrıca köprünün yol kenarındaki girişinin hemen önünde muhtemelen bir isale hattı (muhtemelen plastik/metal boru döşenerek) tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Elektrik Özdirenç, Yer radarı, Sismik, Mikrotremör, Taş Kemer Köprü

ABSTRACT

The Historical Ambarlik Masonry Arch Bridge in Ambarlık Village of Rize was built in the 18th century and was taken under protection by the Regional Board of Cultural Heritage Preservation and General Directorate of Museums in 2003. Restoration of the Ambarlik Masonry Arch Bridge was completed in 2010, but the Bridge collapsed on July 10, 2019 for an unknown reason. In this context, geophysical methods are applied and ground structure were examined in the area where Ambarlık Masonry Arch Bridge is located. Within the scope of geophysical applications, around the bridge, electrical resistivity measurements in 2 profiles, seismic measurements in 3 profiles, ground penetrating radar measurements in 2 profiles and microtremor measurements in 5 points are completed, and ground are interpreted. As a result of the applications, the ground structure, the stratification of the geological units, the underground model, the floor group, the elastic and dynamic parameters of the bridge pier and the dominant oscillation frequencies of the bridge were determined. In addition, a transmission line (possibly by laying plastic / metal pipes) was identified, right in front of the bridge's roadside entrance.

Keywords: Electric Resistivity, Ground Penetrating Radar, Seismic, Microtremor, Masonry Arch Bridge



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



GİRİŞ

Rize Merkez Ambarlık Köyü'nde bulunan Tarihi Ambarlık Taş Kemer Köprüsü kente 18'inci yüzyılda inşa edilmiş, Kültür Varlıklarını Koruma Bölge Kurulu ve Müzeler Genel Müdürlüğüne 2003 'te tescil edilerek koruma altına alınmıştır. Ambarlık Taş Kemer Köprüsü'nün restorasyonu 2010 yılında tamamlanmış, ancak Köprü 10 Temmuz 2019 tarihinde bilinmeyen bir nedenle çökmüştür. Çöküş sebebinin araştırılması kapsamında proje yürütücü firması ve kontrol görevlileri tarafından jeofizik uygulamaların yapılması talep edilmiş ve bu kapsamda çalışmalar yapılmıştır. Çalışma alanında elektrik özdirenç, sismik, yer radarı ve mikrotremor yöntemleri uygulanmıştır.

YÖNTEMLER

Elektrik Özdirenç Yöntemi

Elektrik özdirenç yöntemi yere verilen akımın yer içinde yayılırken yer içi malzemelerinin elektrik akımına karşı direnç özelliklerine göre oluşan potansiyel farkın değişiminin ve dolayısıyla görünür özdirenç ölçülmesi esası üzerine geliştirilen yöntemdir. Elektrik özdirenç uygulamasında temel hedef yeraltı su seviyesinin ve su akış rejiminin belirlenmesi olmakla birlikte, kaya kütlelerinin ayrışma dereceleri hakkında oldukça güvenilir bilgi sağlamaktadır. Çünkü kaya kütleleri kırıklı, çatlaklı ve gözenekli yapıya sahip olabilir. Bununla birlikte, geçirimsizlik, nemlilik, tuzluluk, arkeolojik kalıntıların, gömülü nesnelerin ve yeraltı boşluklarının belirlenmesinde çok etkin ve yaygın kullanılan bir yöntemdir. İnceleme kapsamında köprünün çaylık tarafındaki ayak kısmında yatay ve düşey 2 profil hattında elektrik özdirenç yöntemi uygulanarak zeminin tomografik görüntüsü oluşturulmuştur. Ölçümler Wenner-Schlumberger dizilim türü ile 48 elektrot ve 1m elektrot aralıkları ile yapılmış, yeraltı su seviyesi, litolojik değişim durumu, tabakaların deformasyon durumlarının belirlenmesi hedeflenmiştir.

Sismik Yöntemler (Sismik Kırılma ve MASW)

Sismik yöntemlerin esası elastik dalgaların yer içinde kırılma ve yansıma ilkelerine bağlıdır. Yüzeyde yapay bir kaynak vasıtasıyla oluşturulan deformasyondan (gerilme ve yamulma) dolayı oluşan boyuna (P-dalgaları) ve enine (S-dalgaları) dalgalar yer içinde elastik empedans (yoğunluk değişimi ihmal edilirse sadece hız değişimine bağlı akustik empedans) değişimi olan yüzeylerde yansır, kırılır ve tekrar yüzeye dönerek alıcılarda zamanın fonksiyonu olarak kaydedilir. Kaydedilen bu varışlar amaca göre analiz edilerek yer içine ait boyuna ve enine dalga hızları ve bu hızlara bağlı olarak birçok mühendislik parametresi hesaplanarak, yeraltı geometrisi, tabakalanma durumu, arayüzey topoğrafyaları, kırıklı yapılar, litolojik değişim, zemin ve kaya kütlelerine ait jeoteknik ve sökülebilirlik/kazılabilirlik değerlendirmeleri yapılmaktadır. İnceleme kapsamında köprünün yol tarafındaki ayak kısmında köprüye dik ve köprü ayağını ortalayacak şekilde 1 profilde ve köprünün çaylık tarafındaki ayak kısmında yatay ve düşey 2 profilde ölçümler yapılmıştır. 24 kanallı sismograf, 4.5 Hz 'lik 24 adet düşey bileşen alıcı (jeofon), kaynak olarak 10 kg ağırlığındaki



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



balyoz ve çelik levha kullanılmıştır. Her bir profilde 9 (7 sismik kırılma, 2 MASW) atış yapılmıştır. Tüm sismik profiller için alıcı aralıkları 1 m ve ofset mesafeleri ise 4 m olarak kullanılmıştır. Sismik Kırılma Yöntemi ile boyuna dalga hızının yanal ve düşey değişimi, yeraltı geometrisi, tabakalanma durumu, tabakaların deformasyonu/arayüzey topoğrafyalarının belirlenmesi, Aktif Çok Kanallı Yüzey Dalgası Analizi (MASW) yöntemi ile zemin ve kayaların sıklık, katılık ve sertlik durumlarının belirlenmesi hedeflenmiştir.

Yer Radarı (GPR) Yöntemi

Yer radarı yöntemi (Ground Penetrating Radar - GPR), yüzeyin sığ derinliklerini araştırmak için kullanılan yüksek frekanslı elektromanyetik dalgaları kullanan bir jeofizik yöntemdir. Yöntemin kullanımının kolay olması ve çok hızlı veri toplanabilmesi, veri toplama sırasında çalışma alanında herhangi bir tahribat oluşturmaması, santimetre düzeyinde yüksek çözünürlüklü iki boyutlu (2B) ve üç boyutlu (3B) yer altı görüntülemenin yapılabilmesi bu yöntemin en önemli avantajlarıdır. Bu yöntemle, yapıların konum ve derinliklerinin çok daha net belirlenebilmesi, özellikle 3B görüntüleme ile karmaşık yapı bölgelerinde aranan özel yapının kararlaştırılması ve oldukça etkin görüntü ile sunulabilmesi özellikleri nedeniyle tüm sığ araştırmalarda, son yıllarda en çok kullanılan jeofizik yöntem olmuştur Annan (2000). Çalışma kapsamında 2 profil üzerinde yer radarı (GPR) ölçümü yapılmıştır. Profil uzunlukları 30 m'dir. Ölçümler köprünün yol tarafındaki ayağına dik olarak yolun 2 tarafında yapılmıştır. Ölçümlerde 270 MHz merkez frekanslı korumalı anten kullanılmıştır ve çok sığ, yüzeye yakın kırık, çatlak, boşluk, gömülü nesnelerin tespit edilmesi hedeflenmiştir.

Mikrotremor Yöntemi

Mikrotremorler, zamansal olarak 1 saat ve uzaysal olarak 1-2 km çap içerisinde çok küçük ve farklı kaynaklardan yayılan sürekli titreşimler olup, genlikleri 0.1 mikron ile 1 mikron, periyotları ise 0.05 sn ve 2 sn arasında değişir. Bu titreşimlerin kaynağı yerkürenin belli bir ekseninde dönmesi, gelgit etkisi, jeotermal aktiviteler, yeraltındaki sismik aktiviteler, atmosfer etkileri, rüzgâr, trafik, endüstriyel aktiviteler ve diğer bazı insan kaynaklı etkiler olarak bilinmektedir. Mikrotremorler kullanılarak zemine ait, zeminin baskın periyodu, zemin büyütmesi, kesme dalgası hızı (V_s) ve yumuşak zeminlerin kalınlığının belirlenmesi mümkündür. Ayrıca, mikrotremör yönteminden elde edilen hakim titreşim frekans (veya periyot) değerleri ile girişim (rezonans) meydana gelip gelmeyeceği de araştırılmaktadır. Bilindiği gibi dinamik kuvvetler altında meydana gelen salınımın oluşturacağı hakim periyot, zemin ve yapıda farklı değerler alabileceği gibi aynı ya da yakın değerler de alabilir. Bu durumda, hem zemin hem de yapının hakim periyodu ortak olacağından yapıya en büyük kuvvet uygulanmış olur. Çalışma kapsamında 5 adet tek istasyon mikrotremor ölçümü alınmıştır. Buna göre ölçümlerin 2 adedi köprünün üstünde karşılıklı 2 taraftan, 2 adedi köprünün 2 tarafında ayak temellerinin yanında ve 1 adedi köprünün yol tarafındaki ayağının karşısındaki binanın önündeki zeminde yer almaktadır. Kayıtlar üç bileşen (K-G, D-B ve Düşey) hız ölçer sismometre ile sinyal/gürültü oranı yüksek veri toplamak için en az 30 dakika olacak şekilde kaydedilmiş, zemin ve köprünün hakim titreşim frekansları ve büyütme potansiyellerinin belirlenmesi hedeflenmiştir.

SONUÇLAR

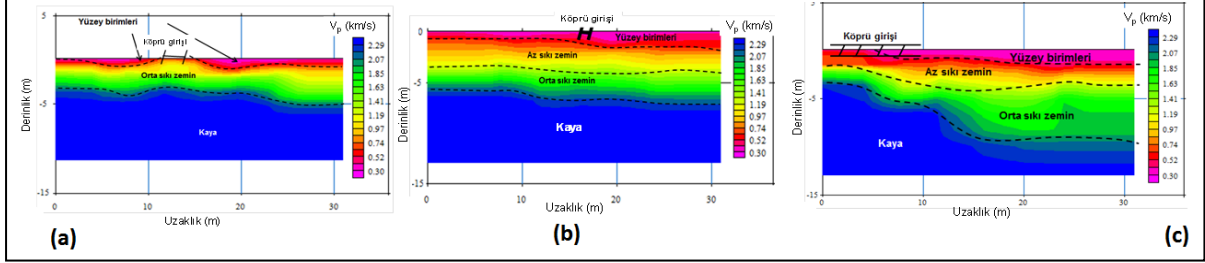
P-dalgası tomografik kesitlerine göre, yüzeydeki döküntü malzemeler ihmal edildiğinde, ortamda yaklaşık 1-1.5m'den sonra sıkışmış bir zemin tabakası (muhtemelen, farklı boyutlarda çakıl, kırıntı kaya parçaları, kum, kil den oluşan dere malzemesi-alüvyonal malzeme) ve sonrasında kaya birim (sağlam olmakla birlikte yer yer yumuşak kaya özelliği gösterebilir) yer almaktadır. Bu kapsamda köprünün her iki tarafındaki girişler için oluşturulan yer modelleri yaklaşık olarak çizilerek gösterilmiştir. Elektrik özdirenç tomografi kesitlerine göre, yüzey birimleri yüzey sularından dolayı ıslak olmakla birlikte, derine doğru istiflenen birimler kurudur. Özellikle inceleme derinliği seviyesinde yeraltı suyu ve dereden su girişi etkisi yoktur. Yer Radarı (GPR-1) kesitine göre, köprünün yol kenarındaki girişinin hemen önünden muhtemelen bir isale hattı (muhtemelen plastik/metal boru döşenerek) tespit edilmiştir. Köprünün bu girişinde yapılacak işlemlerde bu isale hattının varlığı dikkate alınmalıdır. Mikrotremor ölçüm sonuçlarına göre, köprünün hakim salınım frekansları çevresindeki zemine göre oldukça yüksektir (genellikle, >10Hz) (dolayısıyla, düşük periyotlar). Bu köprünün yüksek frekanslı titreşimlere duyarlı olacağı anlamını taşımaktadır. 2B Vs, 2B ERT ve Yer Radarı kesitlerinde jeolojik birimlerin tabakalanması (istiflenmesi) düzgün görülmektedir. Dolayısıyla, köprü ayakları ve çevresinde herhangi bir deformasyon (kırılma, bükülme, çökme, vb.) durum gözlenmemiştir. Köprüyü, köprünün uzanım doğrultusu ve ona dik yönlerde etkileyen/etkileyecek herhangi bir bozucu yer hareketinin (yerel akma, kayma, çökme şeklindeki heyelan) izleri gözlenmemiştir. 30m derinlik için ortalama kayma dalgası hızı Vs30'a göre köprünün her iki tarafındaki yerel zemin sınıfı emniyetli tarafta kalınarak ZC alınması önerilmektedir. Dolayısıyla, köprü projesinin yeniden yapılması sırasında statik hesaplarında zemin sınıfı ve mühendislik parametreleri için jeofizik yöntemler sonucu elde edilen değerlerin kullanılması önerilmektedir.

KAYNAKLAR

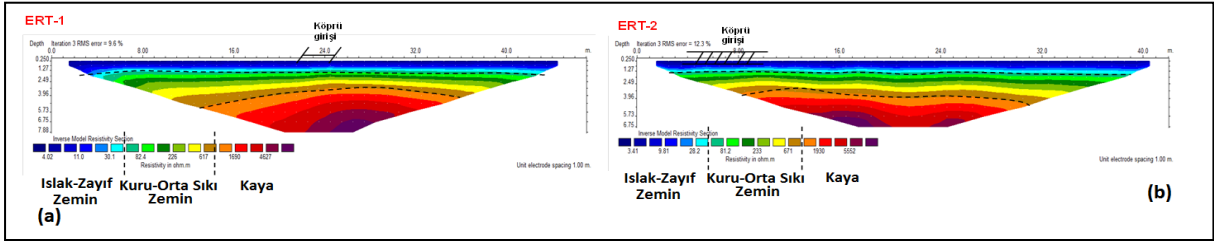
- Annan, A.P., 2000. Ground Penetrating Radar Workshop Notes, Sensors and Software Inc., Canada.
- Şenkaya, G., Karanlı, H., Şenkaya, M., 2016, Comparison of soil amplification calculations using V_{s30} and Impedance Ratio, SEG International Exposition and 86th Annual Meeting, Abstract Book, P. 5001-5005, USA.
- Türk Deprem ve Bina Yönetmeliği, Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Esaslar. AFAD Deprem Dairesi Başkanlığı, Ankara/Turkey, (2018)



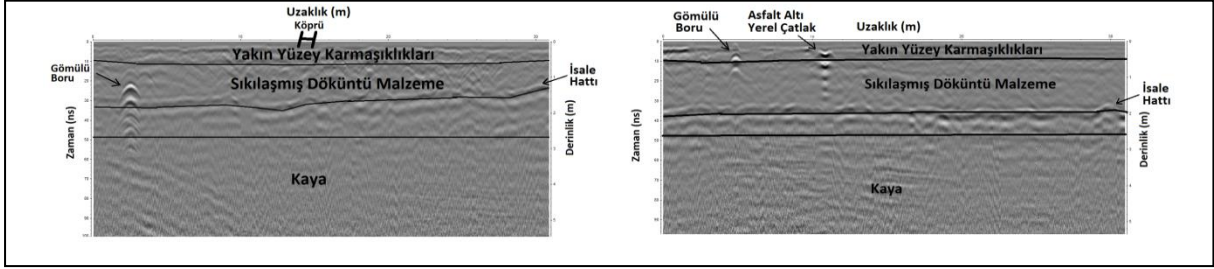
Şekil 1 Ölçüm profilleri ve noktalarının yerlerinin üstten görüntüsü a)Yol tarafı b) Çaylık tarafı



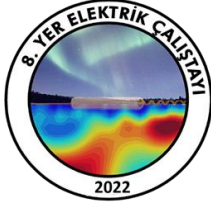
Şekil 2 2B-Vp tomografik kesiti a)SİS-1 profili b)SİS-2 profili c)SİS-3 profili



Şekil 3 ERT-1 ve ERT-2 profilleri tomografik kesitleri



Şekil 4 Profillerinden elde edilen yer radar kesitleri a) GPR-1 b) GPR-2



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



P8	Sagalassos Antik Kenti (Burdur) 2021 Yılı Jeofizik Araştırmaları
	Geophysical Research at Sagalassos Ancient City (Burdur) in 2021

Hatice Evrim TÜTÜNSATAR ^{*1}, Olcay ÇAKMAK², Peter TALLOEN³, M. Nuri DOLMAZ⁴
Çağlayan BALKAYA^{2,4}

¹ Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Gönen MYO Kültürel Miras ve Turizm Programı, Isparta

² Süleyman Demirel Üniversitesi, Deprem ve Jeoteknik Araştırma Merkezi, Isparta

³ Süleyman Demirel Üniversitesi, Arkeoloji Bölümü, Isparta

⁴ Süleyman Demirel Üniversitesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, Isparta

*E-posta: evrimtutunsatar@isparta.edu.tr

ÖZ

Burdur ilinin Ağlasun ilçesinde yer alan Sagalassos Antik Kentinde, yüzeyin altında gömülü arkeolojik yapıların araştırılması için 2021 yılında arkeojeofizik araştırmalar gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, yer radarı yöntemi ve elektrik özdirenç tomografi (EÖT) tekniği kullanılmıştır. Kentin batı kesiminde A1, A2 ve A3 olarak adlandırılan üç araştırma alanı incelenmiştir. Yer radarı araştırması, 500 MHz merkez frekanslı bir sistem ile 291 ölçüm profili üzerinde gerçekleştirilirken EÖT 20 profil üzerinde dipol-dipol dizilimiyle uygulanmıştır. Günümüzde iki erken Bizans bazilika kalıntılarını içeren stadyum alanında (A1) elde edilen sonuçlar, arkeolojik yapılar ile toprak arasındaki yüksek iletkenlik kontrastı nedeniyle tümleşik uygulamaların etkinliğini ortaya koymuştur. Çeşitli veri işlem teknikleri kullanılarak elde edilen kesitler, insan yapımı yapılara atfedilebilecek umut verici belirtileri göstermektedir. Ancak, eğitim koşulları ve yüzeyde yoğun bir şekilde devrilmiş kalıntıların varlığı nedeniyle A2 alanından yorumlanabilir bir sonuç elde edilememiştir. Öte yandan, A3 alanının bazı bölümlerinden elde edilen jeofizik bulgular dikkate alındığında, yapı/duvar kalıntısı olarak yorumlanabilecek bir anomali tespit edilmiştir. Bu alanlardaki jeofizik anomalileri araştıran gelecekteki arkeolojik test açmaları, Sagalassos'taki bu arkeojeofizik araştırmanın sonuçlarının doğruluğunu gösterecektir.

Anahtar Kelimeler: Yer radarı, Elektrik özdirenç tomografi, Sagalassos, Burdur

ABSTRACT

In the ancient city of Sagalassos, situated in the Ağlasun district of the southeastern Burdur province, archaeo-geophysical surveys were carried out in 2021 to investigate archaeological structures buried beneath the surface. For this purpose, the ground-penetrating radar (GPR) method and the electrical resistivity tomography (ERT) technique were used. Three survey areas, designated A1, A2 and A3, in the western part of the city were investigated. While GPR explorations were carried out on 291 measurement profiles with a 500 MHz center frequency system, ERT was applied to 20 profiles with a dipole-dipole array. The results in the stadium area (A1), which today contains the remains of two early Byzantine basilicas, showed the effectiveness of integrated applications due to the high conductivity contrast between the archaeological structures and the host soil. Cross-



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



sections obtained with various data processing techniques show some remarkable anomalies that can be attributed to man-made structures. However, due to the slope conditions and the presence of densely overturned remains on the surface, no interpretable results could be obtained from the area of the A2. On the other hand, taking into account the geophysical findings obtained from some parts of the A3 area, an anomaly was found that could be interpreted as a structure/wall remnant. Future archaeological test trenches investigating the geophysical anomalies at these sites will demonstrate the accuracy of the results of this archaeo-geophysical survey at Sagalassos.

Keywords: GPR, Electrical resistivity tomography, Sagalassos, Burdur

GİRİŞ

Günümüzde Göller Bölgesi olarak anılan antik Pisidia bölgesinin önemli kentlerinden biri olan Sagalassos Antik Kenti Ağlasun ilçe merkezine 7 km uzaklıkta konumlanmaktadır (Şekil 1a ve 1b). Kentte, Akhaimenid dönemde (MÖ 5. yy.) yerleşimin başladığına dair izler olsa da esas yerleşimin Hellenistik, Roma ve Bizans İmparatorluk Dönemlerinde olduğu düşünülmektedir (Poblome vd 2019). Sagalassos Antik Kentinde, arkeolojik araştırmaların yanı sıra mimari ve topografik yüzey araştırmaları 1986 yılında Pisidia Projesi kapsamında başlamıştır (Mitchell ve Vandeput 2013). Sagalassos günümüze kadar birçok disiplinler arası çalışmanın odağı olmuştur (Poblome vd 2019). Batı Toros dağlarında, 1600 m rakıma ulaşan ve dağlık bir alana konumlanmış olan Sagalassos, ofiyolitlerin üzerine bindirilmiş kireçtaşından oluşmuş bir platform üzerindedir (Paulissen vd 1993). Sagalassos'un yerleşim düzeni, çevresini oluşturan yüksek eğimli arazi ile uyumlu olmakla birlikte (Martens 2005), bu durum, kentin arkeojeofizik araştırmasını zorlaştırmaktadır.

Bu çalışma kapsamında, Sagalassos Antik Kenti yer radarı yöntemi ve elektrik özdirenç tomografi (EÖT) tekniği kullanılarak araştırılmıştır. Arkeojeofizik çalışmalarda elektrik yöntemler ile yer radarı yöntemlerinin birlikte uygulanmasıyla başarılı sonuçlar elde edilmektedir (Balkaya vd 2018, Akca vd 2019, Yılmaz vd 2019, Balkaya vd 2020, 2021). Kentin, 2021 yılı arkeojeofizik çalışmaları, T.C. Kültür ve Turizm Bakanlığı, Kültür Varlıkları ve Müzeler Genel Müdürlüğü'nün izni, Leuven (Belçika) Üniversitesi'nin desteği ile gerçekleştirilmiştir. Kentte geçmiş dönemlerde gerçekleştirilen jeolojik ve jeofizik araştırmalar, toprağın altında keşfedilmeyi bekleyen birçok yapının varlığını açıkça göstermektedir (Mušič vd 2009, Dirix vd 2013, Talloen vd 2017, de Giorgi ve Leucci 2018). Sagalassos Antik Kenti, 2021 yılı arkeojeofizik araştırmaları, görece farklı büyüklükteki üç araştırma alanında yer radarı uygulamasıyla gerçekleştirilmiştir. Bu alanların ikisinde ise elektrik özdirenç tomografi (EÖT) uygulamaları gerçekleştirilmiştir.

ARKEOJEOFİZİK UYGULAMALAR

Arazi koşullarının daha zor olduğu arkeolojik alanların jeofizik yöntemler ile araştırılması düz platolara kıyasla zor olsa da imkânsız değildir. Schmidt (2013)'e göre dik eğimli, yüksek otların ve arkeolojik kalıntıların yüzeyde yoğun olduğu alanlarda elektrik yöntemler yaygın kullanıma sahiptir. Sagalassos Antik Kenti, 2021 yılı arkeojeofizik araştırmaları kapsamında, arazi ve toprak koşulları da dikkate alınarak yer radarı ve elektrik özdirenç yöntemleri birlikte uygulanmış ve toprak altında kalmış arkeolojik yapılar ve bunların uzanımları belirlenmeye çalışılmıştır. Şekil 1b'de görülen her üç araştırma alanında (A1-A3) toplam 291 ölçüm profili üzerinde 500 MHz merkez frekanslı kapalı bir sistem kullanılarak



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



gerçekleştirilen yer radarı ölçümlerinde yansıma verileri, 50 cm profil aralıklarında ve 5 cm iz aralığı toplanmış ve uygun veri işlem teknikleriyle değerlendirilerek derinlik seviye haritaları oluşturulmuştur. Elde edilen bulgular ışığında, A1 alanında 2 m aralıklı 11 profil üzerinde, A3 alanında ise 70 cm aralıklı 9 profil üzerinde 50 cm elektrot aralığı ile dipol-dipol elektrot dizilimi kullanılarak EÖT uygulamaları gerçekleştirilmiştir. Görünür özdirenç veri kümeleri L1 norm kullanılarak değerlendirilmiştir.

SONUÇLAR

Şekil 2a, çalışma alanında gerçekleştirilen yer radarı ölçümleri neticesinde elde edilen 50-70 cm derinlik seviyesi yer radarı kesitini göstermektedir. Buna göre, A3 çalışma alanının güneydoğusunda kalan bölümü yüksek genlikli yansıma belirtileri içermektedir. Alanın diğer kalan bölümlerinde gözlemlenen görece yüksek genlikli belirtiler ise büyük olasılıkla yüzey kalıntılarının ve yan kayaların etkilerinden kaynaklanmaktadır. Bu alanda gerçekleştirilen EÖT çalışmasında ölçüm profilleri alan koşulları nedeniyle alanın kuzeydoğusuna doğru uzatılmıştır. Şekil 2b, görünür özdirenç veri kümelerinin ters çözümüyle elde edilen 40-60 cm ve 60-80 cm derinlik seviyelerine ait özdirenç kesitlerini göstermektedir. 60-80 cm derinlik kesitinden, A3 alanının güneybatısının genel olarak <50 ohm.m, kuzeydoğusunun ise >2500 ohm.m özdirenç değerlerini içerdiği görülmektedir. Burada kesikli dikdörtgen çizgi arasında gözlemlenen yaklaşık 3 m kalınlığındaki yüksek özdirençli anomali düzgün geometrisiyle insan yapımı arkeolojik bir yapıya ait olabilir. Bu belirti, ayrıca, yer radarı kesitinde de kısmen izlenebilmektedir. A3 alanının bu bölümünde gerçekleştirilecek bir arkeolojik deneme açması bu belirtinin kaynağını ortaya koyacaktır.

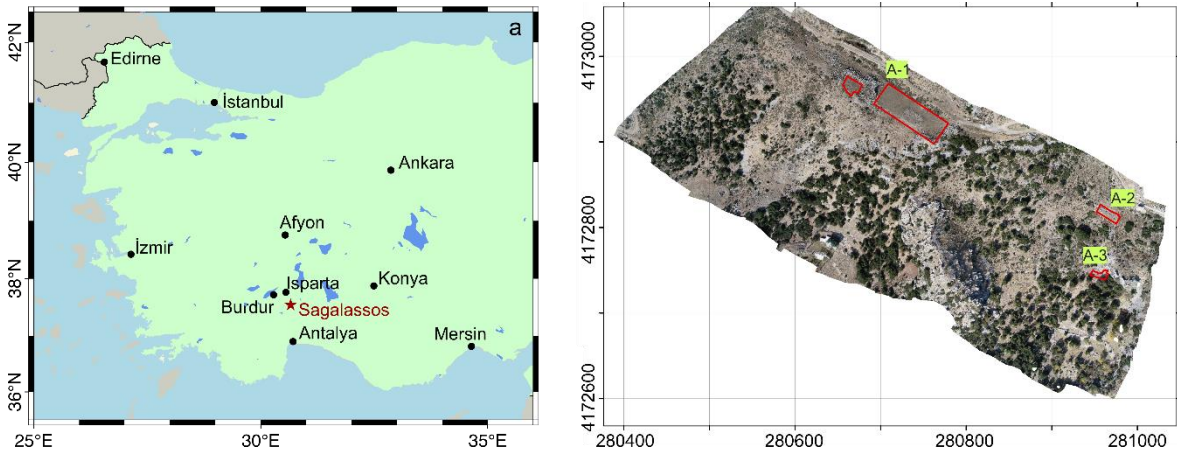
TEŞEKKÜR

Sagalassos Antik Kenti arkeojeofizik çalışmasının gerçekleşmesini sağlayan T.C. Kültür ve Turizm Bakanlığı, Kültür Varlıkları ve Müzeler Genel Müdürlüğü'ne ve destekleri için Süleyman Demirel Üniversitesi ve Leuven Üniversitesi Rektörlükleri'ne teşekkür ederiz.

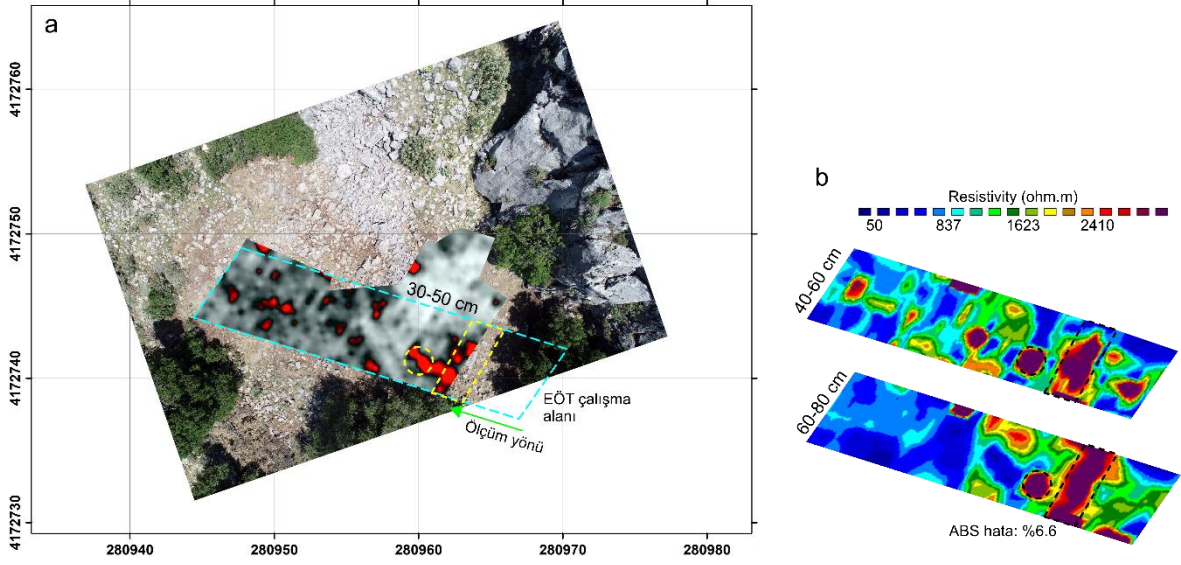
KAYNAKLAR

- Akca İ, Balkaya Ç, Pülz A, Alanyalı HS ve Kaya MA 2019, Integrated geophysical investigations to reconstruct the archaeological features in the episcopal district of Side (Antalya, Southern Turkey): *Journal of Applied Geophysics*, 163, 22–30.
- Balkaya Ç, Kalyoncuoğlu ÜY, Özhanlı M, Merter G, Çakmak O ve Güven İT 2018. Ground-penetrating radar and electrical resistivity tomography studies in the biblical Pisidian Antioch city, southwest Anatolia: *Archaeological Prospecting*, 25, 285–300.
- Balkaya Ç, Sever A, Çakmak O ve Özcan F 2020. Arkeolojik alanlarda jeofizik prospeksiyon: Pisidia Mallos örneği. *BEU Fen Bilimleri Dergisi*, 9, 958–966.
- Balkaya Ç, Ekinci YL, Çakmak O, Blömer M, Arnkens J ve Kaya MA 2021, A challenging archaeo-geophysical exploration through GPR and ERT surveys on the Keber Tepe, City Hill of Doliche, Commagene (Gaziantep, SE Turkey): *Journal of Applied Geophysics*, 186, 104272.
- de Giorgi L ve Leucci G 2018, The archaeological site of Sagalassos (Turkey): Exploring the mysteries of the invisible layers using geophysical methods: *Exploration Geophysics*, 49, 751-761.
- Dirix K, Muchez P, Degryse P, Kaptijn E, Music B, Vassilieva E ve Poblome J 2013, Multi-element soil prospection aiding geophysical and archaeological survey on an

- archaeological site in suburban Sagalassos (SW-Turkey): *Journal of Archaeological Science*, 40, 2961–2970
- Martens F 2005, The archaeological urban survey of Sagalassos (South-west Turkey): The possibilities and limitations of surveying a “non-typical” classical site: *Oxford Journal of Archaeology* 24, 229-254.
- Mitchell S ve Vandeput L 2013, Sagalassos and the Pisidia Survey Project: In Search of Pisidia’s History, in: J. Poblome (ed.) *Exempli Gratia: Sagalassos, Marc Waelkens and Interdisciplinary Archaeology*, Leuven, 97-118.
- Mušič B, De Laet V, Martens F, Similox-Tohon D, Verstraeten G, Poblome J, Talloen P, Uytterhoeven I ve Waelkens W 2009, Geophysics, Satellite Imagery, Urban Survey and Archaeological Excavations - Complementary Contributions to Reconstruct an Ancient Urban Landscape - The Case of Sagalassos (SW-Turkey), in: W. Börner (ed.), *Archäologie und Computer*, 5.-7. November 2008, Workshop 13: Kulturelles Erbe und neue Technologien, 1–23.
- Paulissen E, Poesen J, Govers G ve De Ploey J 1993, The physical environment at Sagalassos (Western Taurus, Turkey). A reconnaissance survey. In: Waelkens M and Poblome J. (eds.). *Sagalassos II. Report on the third excavation campaign of 1992. Acta Archaeologica Lovaniensia Monographiae* 9, Leuven University Press, Leuven, 229–240.
- Poblome J, Torun, F, Talloen P ve Waelkens M 2019, Bir zamanlar Toroslar’da: Sagalassos, Yapı Kredi Yayınları.
- Schmidt A 2013, Earth resistance for archaeologists: Alta Mira Press.
- Talloen P, Vandam R, Broisch M ve Poblome J 2017, A Byzantine church discovered in the village of Ağlasun Burdur: Some more light on dark age Pisidia: *Adalya*, 20, 371–404.
- Yılmaz S, Balkaya Ç, Çakmak O ve Oksum E 2019. GPR and ERT explorations at the archaeological site of Kılıç village (Isparta, SW Turkey): *Journal of Applied Geophysics*, 170, 103859.



Şekil 1 a) Sagalassos Antik Kentinin lokasyonu ve b) çalışma alanlarının havadan görüntüsü



Şekil 2 a) Sagalassos Antik kenti çalışma alanında uygulanan yer radarı derinlik dilimi (30-50 cm, solda) ve b) EÖT çalışmasından elde edilen 3B ters çözüm sonuçlarının (40-60 cm ve 60-80 cm, sağda) karşılaştırılması



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



P9	Menderes Mahallesi (Eğirdir, Isparta) Heyelan Alanı Jeofizik Araştırmaları
	Menderes District (Eğirdir, Isparta) Landslide Area Geophysical Research

M. Metin Ünyay¹, Olcay ÇAKMAK², Erkan KARAKURT³, Çağlayan BALKAYA^{2,4}

¹ Isparta Jeoteknik, Turan Mh., 2203 Sk., Isparta

² Süleyman Demirel Üniversitesi, Deprem ve Jeoteknik Araştırma Merkezi, Isparta

³ Isparta AFAD Planlanma ve Risk Azaltma Şube Müdürlüğü, Isparta

⁴ Süleyman Demirel Üniversitesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, Isparta

E-posta: metinunyay@gmail.com

ÖZ

2008 yılında Isparta-Eğirdir ilçesi Menderes Mahallesinde 17 adet toplu konut yapılmıştır. Bu konut alanı, İl Afet ve Acil Durum Müdürlüğü'nün 2020 yılı jeolojik etüd raporuna istinaden "afete maruz bölge" olarak ilan edilmiştir. Bu alanın güney batısında eğim miktarı %40-80 aralığında olduğu için ayrıca "çok yüksek eğimli alanlar" sınıfı içerisinde yer almaktadır. Bu çalışma kapsamında, bu yüksek eğim nedeniyle inceleme alanındaki toplu konutlara olası bir depremin ya da aşırı yağışın tetikleyebileceği bir kütle hareketi olup olmayacağı bir jeofizik araştırmayla incelenmiştir. İnceleme alanında, 92 m uzunluğundaki toplam 21 adet ölçüm profilinde Wenner-Schlumberger dizilimiyle bir elektrik özdirenç tomografi çalışması gerçekleştirilmiştir. Tomografik ters çözüm tekniği ile görünür özdirenç verilerinin değerlendirilmesi sonucu heyelan riski oluşturabilecek yeraltı tabakaları tespit edilmiştir. Bu çalışmayla elde edilen sonuçlar ile inceleme alanında belirlenen bölgelerde gerçekleştirilen jeolojik sondajlar jeofizik sonuçları doğrulamıştır.

Anahtar Kelimeler: Elektrik özdirenç tomografi, Heyelan, Isparta

ABSTRACT

In 2008, 17 collective housing were built in the Menderes Neighborhood of the Isparta-Egirdir district. According to the geological report of the Provincial Disasters and Emergencies Directorate for 2020, this residential area has been designated a "disaster area." As the slopes in the southwest of this area are in the range of 40-80%, it also falls into the category of "very high slopes." In this study, geophysical research has been carried out to determine whether there will be a mass movement due to this high slope, which could be triggered by a possible earthquake or excessive rainfall. In the study area, an electrical resistivity tomography survey with Wenner-Schlumberger array was performed on a total of 21 measurement profiles with a length of 92 m. By analyzing the apparent resistivity data with the tomographic inversion technique, the subsurface layers that could cause a landslide risk were determined. Geological drilling in the regions identified in the study area by the results of this study confirmed the geophysical results.

Keywords: Electrical resistivity tomography, Landslide, Isparta



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



GİRİŞ

Deprem, volkanik patlama, heyelan ve sel gibi birçok yer fiziksel olay, başlangıçta, sadece mevcut flora ve faunayı tehdit ederken, milyonlarca yıl sonra ortaya çıkan insan varlığı bunları birer doğal afete dönüştürmüştür. Doğal afetler dünya çapında meydana gelmekle birlikte, gelişmekte olan ülkelerde daha sık gözlemlenirler ve etkileri de çok daha fazladır. Bu ülkelerde doğal afetlerin daha sık meydana gelmesi, genel olarak iki ana nedenden kaynaklanmaktadır. Bunlardan ilki, gelişmekte olan veya fakir ülkelerin çoğunlukla volkanik aktivite, sismisite, sel vb doğal olaylardan büyük ölçüde etkilenen bölgelerde yer almaları nedeniyle coğrafi konum ve jeolojik – jeomorfolojik ortam ilişkisiyle açıklanabilir. İkinci neden ise bu ülkelerin ekonomik, sosyal, politik ve kültürel koşullarının iyi olmaması ve sonuç olarak doğal afetlere karşı yüksek kırılabilirlik göstermeleri nedeniyle ülkelerin tarihsel gelişimi ile bağlantılıdır (Alcántara-Ayala 2002).

Heyelan terimi Varnes (1958) tarafından “bir kaya, moloz veya toprak kütlelerinin bir yamaçtan aşağı hareketi” Katz ve Aharonov (2006) tarafından ise “mevcut yerçekimi kuvvetleri, artan boşluk basınçları ve sismik olarak indüklenen kesme gerilmeleri şev mukavemetini yendiğinde meydana gelen şev malzemesinin kararsız aşağı doğru hareketi” olarak tanımlanmıştır. Kütle hareketini etkileyen 7 temel unsur bulunmaktadır ve bunlar; jeolojik faktörler, şev açısı, bitki örtüsü, su içeriği, iklim koşulları ve aşırı yükleme başlıkları altında incelenebilir. Karmaşık jeolojiye ve litolojiye sahip bu alanlardaki malzemeler farklı jeofizik yöntemlerde incelenmelidir. Jeofizik yöntemler heyelan araştırmalarında ve özellikle heyelan geometrisinin belirlenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Yılmaz 2007, Göktürkler vd 2008, Uyanık ve Çatlıoğlu 2014, Gelişli 2018, Senkaya vd 2020). Bu çalışmada, Isparta ili Eğirdir ilçesi (Şekil 1a) Menderes Mahallesi konumlanan bir toplu konut alanını etkileyebilecek olası bir heyelan riski araştırılmıştır (Şekil 1b).

GENEL JEOLJİ

İnceleme alanındaki toplu konut, Güneybatı Anadolu’da Göller Bölgesi Yöresinde, 1840 km² lik alan üzerinde; Türkiye’nin 4. Büyük gölü olan Eğirdir Gölü’nün doğudan batıya uzanan kıyılarında ve %40-80 aralığında eğime sahip olan bir yamaç kenarında kurulmuştur. Çalışma alanında kireçtaşlarından oluşan bir istif gözlenirken en altta plaketli kireçtaşları ve radyolarit çörtten oluşan Ispartaçay formasyonu yer almaktadır. Bunların üstünde açık renkli, bol kırıklı çatlaklı, çatlakları kalsit dolgulu, orta-kalın tabakalı uyumsuz Söbüdağ kireçtaşları yer alır. En üstte ise Kuvaterner – günümüz yaşlı güncel etek çökelleri; yamaç döküntüleri ve göl çökeli sedimanlar uyumsuz olarak bulunmaktadır. Ayrıca, alanın üst kısımları yer yer bloklu yamaç moloz (Qym) birikiminden, yamaç molozu altında ise Dulup (Jkdu) birimlerinden oluşmaktadır. Dulup kireçtaşı Malm-Kretase yaşlı kireçtaşı orta-kalın tabakalı, gri, bej, krem, açık kahve renkli, yer yer dolomit ve dolomitik kireçtaşları ara seviyeli neritik kireçtaşlarından oluşmaktadır. Yer yer alg, mercan gastropod, lamelli vb makro fosil izlidir. Üstte rudist parçalı ve yer yer rekristalize kireçtaşlarını kapsamaktadır. Formasyon, üstte Keçili formasyonu tarafından uyumsuz olarak örtülmekte ve yaklaşık 500 m kalınlık göstermektedir (Dumont ve Kerey 1975).



8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



YÖNTEM

Araştırma alanında heyelan geometrisini belirleyebilmek için elektrik öz direnç ve sismik yöntemler uygulanmıştır. Toplam 58,600 m² büyüklüğündeki alan içinde öncelikle 14 Hz merkez frekanslı düşey jeofonlar kullanılarak sismik kırılma ve 4,5 Hz merkez frekanslı düşey jeofonlar ile de MASW uygulamaları 90 m uzunluğundaki 26 ölçüm profili üzerinde gerçekleştirilmiştir. Uygulamada, jeofon aralığı 5 m, ofset aralığı ise sırasıyla 5, 10 ve 15 m olacak şekilde seçilmiştir. EÖT uygulaması ise sismik ölçüm profilleri üzerinde olacak şekilde 21 profile ve 2 m elektrot aralığı ile Wenner-Schlumberger elektrot dizilimiyle gerçekleştirilmiştir. Veri kümelerinin tomografik ters çözümü Res2DinV yazılımıyla düzgünlük kısıtlı en-küçük kareler tekniği (Constable vd 1987) kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

SONUÇLAR

Araştırma alanında toplanan sismik ve elektrik öz direnç veri kümelerinin ilk varış analizleri ve tomografik ters çözümünden elde edilen sonuçlar dikkate alınarak olası heyelan riskli alanlar belirlenmeye çalışılmıştır. Buna göre, inceleme alanının, genel olarak, yüzeyden itibaren kırık çatlaklı kireçtaşlarından oluştuğu, birkaç profileyse yaklaşık 6-8 m kalınlığında yamaç molozu ve kireçtaşı blokları ve bu derinlikten sonra ise kırık çatlaklı ancak daha masif kireçtaşlarından oluştuğu belirlenmiştir. Ayrıca, yüzeye yakın alanlarda birbirinden bağımsız ve askıda duran kireçtaşı blokları ve döküntü malzemenin yüksek eğimden dolayı deprem, sel ve aşırı yağmur gibi kuvvetler etkisiyle toplu konut alanına doğru kayma riski bulunmaktadır. Şekil 2a, Profil 18'in çalışma alanındaki lokasyonunu, Şekil 2b ise bu profile ait EÖT kesitini göstermektedir. Bu kesit üzerinde, alanın topografyasına paralel ve ortalama 5 m derinlik seviyesindeki kayma yüzeyi, kırıklı-çatlaklı kireçtaşı birimi (~300–865 ohm.m) ve kayan malzeme (min. 60 ohm.m) gösterilmiştir. Ayrıca, bu çalışma sonunda belirlenen riskli alanlarda, 4 adet 10 m derinliğinde karotlu jeolojik sondajlar gerçekleştirilmiş ve EÖT sonuçlarını doğrulamıştır.

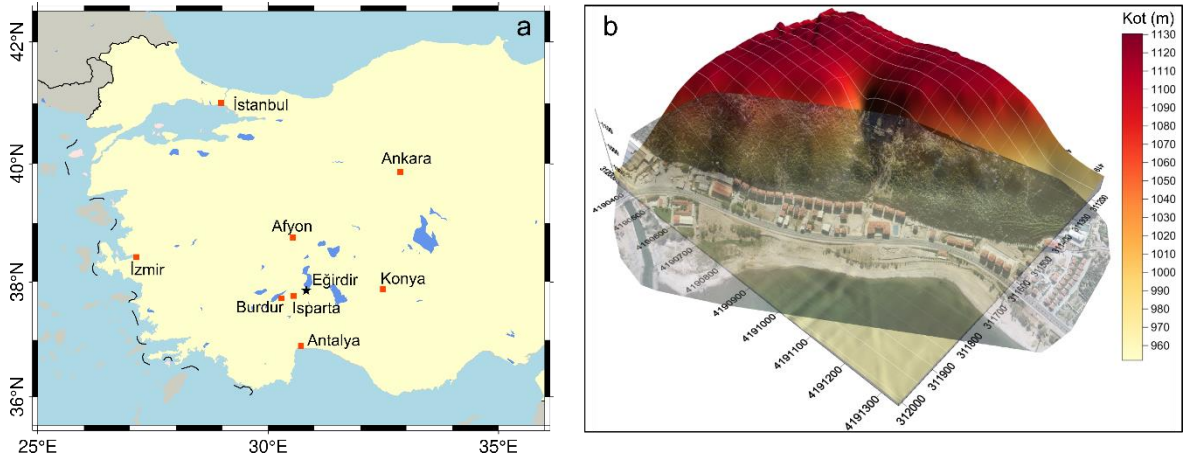
TEŞEKKÜRLER

Destek ve katkıları için Isparta İl Afet ve Acil Durum Müdürlüğü Yönetimine ve çalışanlarına teşekkür ederiz.

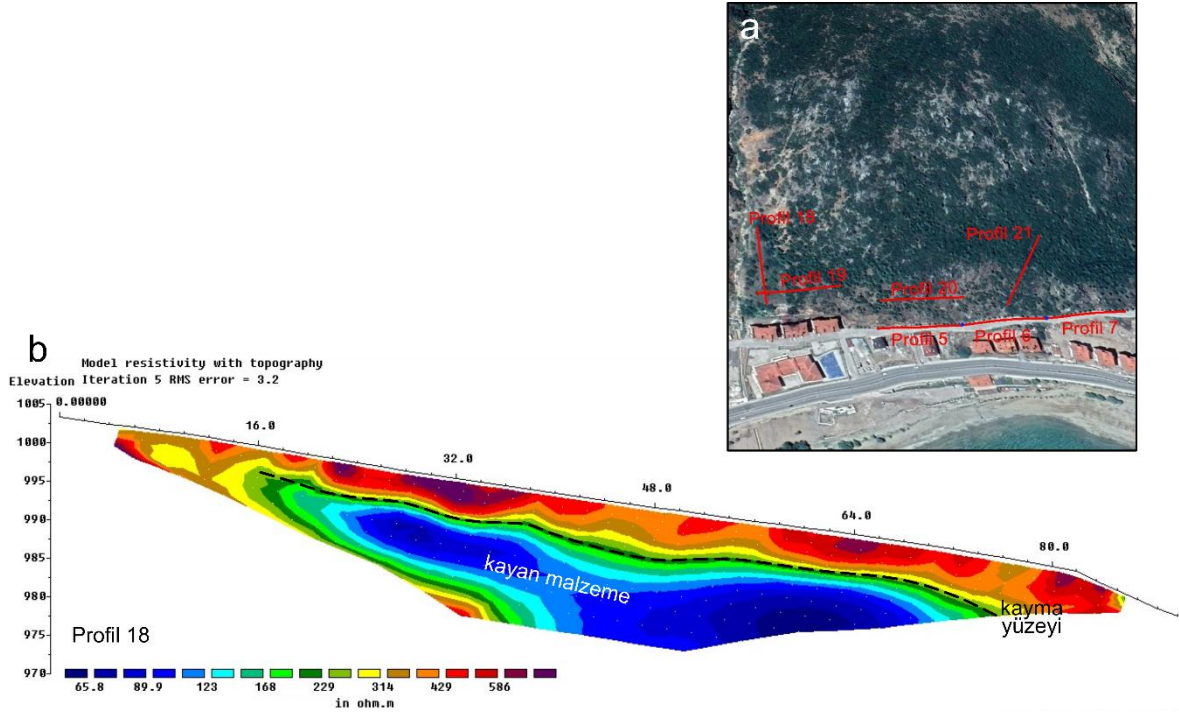
KAYNAKLAR

- Alcántara-Ayala I 2002, Geomorphology, natural hazards, vulnerability and prevention of natural disasters in developing countries: *Geomorphology*, 47, 107–124.
- Constable SC, Parker RL and Constable CG 1987, Occam's inversion: A practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data. *Geophysics*, 52, 289–300.
- Dumont JF and Kerey E 1975, Eğirdir Gölü güneyinin (Isparta ili) temel jeolojik etüdü: *Türkiye Jeoloji Kurultayı Bülteni*, 18, 2, 1–10.
- Gelişli K 2018, Jeofizik yöntemlerle heyelan araştırmaları. *Uygulamalı Yer Bilimleri Dergisi*, 17, 115–126.
- Geotomo Software 2006. RES2DINV–manual.

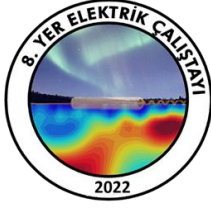
- Göktürkler G, Balkaya Ç and Erhan Z 2008, Geophysical investigation of a landslide: The Altındağ landslide site, İzmir (western Turkey). *Journal of Applied Geophysics*, 65, 84–96.
- Katz O and Aharanov E 2006, Landslides in vibrating sand box: what controls types of slope failure and frequency magnitude relations: *Earth and Planetary Science Letters*, 247, 280–294.
- Senkaya GV, Senkaya M, Karsli H and Güney R 2020. Integrated shallow seismic imaging of a settlement located in a historical landslide area. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 79,1781–1796.
- Varnes DJ 1958, Landslides types and processes: In Eckel EB (ed.), *Landslides and Engineering Practice*. Special Report 29, NAS-NRC Publication 544. Washington, DC: Highway Research Board, 20–47.
- Uyanık O ve Çatlıoğlu B 2014. Elektrik özdirenç ve sismik kırılma yöntemlerinden heyelan geometrisinin belirlenmesi. *SDÜ Fen Bilimleri Enstitü Dergisi*, 18, 22–29.
- Yılmaz S 2007. Investigation of Gürbulak landslide using 2D electrical resistivity image profiling method (Trabzon, Northeastern Turkey), *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 12, 199–205.



Şekil 1 a) Isparta-Eğirdir ve b) Menderes Mahallesi çalışma alanı ve topografya haritası



Şekil 2 a) Çalışma alanında Profil 18'in lokasyonu ve b) EÖT kesiti

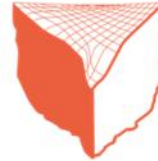


8. YER ELEKTRİK ÇALIŞTAYI



SPONSORLAR

Düzenleme ve Yürütme Kurulu, 8. Yer Elektrik Çalıştayı'na destek veren tüm kurum ve kuruluşlara teşekkür eder.



YFA YERBİLİMLERİ
MÜHENDİSLİK HİZMETLERİ

