



Yerbilimleri, 2019, 40 (2), 190-209, DOI:10.17824/yerbilimleri.549104
Hacettepe Üniversitesi Yerbilimleri Uygulama ve Araştırma Merkezi Bülteni
Bulletin of the Earth Sciences Application and Research Centre of Hacettepe University

İstanbul Avcılar Heyelanı Üzerinde VLF ve ERT Yer İletkenlik Modellerinin Kıyaslanması

Comparison of the VLF and ERT Geo-Electrical Models on the Avcılar Landslide (Istanbul, Turkey)

GÖKHAN KARCIOĞLU ^{1*}, RAFET ENDER ALEMDAR ¹, LEYLA EVGİ ¹

¹ İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, 34320 Avcılar İstanbul

Geliş (received): 5 Nisan (April) 2019 Kabul (accepted) : 26 Temmuz (July) 2019

ÖZ

VLF ve ERT yöntemleri, yerin ilk birkaç on metresindeki iletkenlik dağılımının araştırılmasında sıklıkla kullanılmaktadır. VLF yöntemi, hızlı ve düşük maliyetli ölçü alınmasına olanak sağlamaktadır, ancak, az sayıda ve nispeten dar bir frekans aralığında ölçü alınması, ERT yöntemine göre düşük derinlik erişimi sunmaktadır. Bu nedenle, ERT yöntemi, genelde önemli iletkenlik karşıtlıklarının görüldüğü heyelanlı ortamlarda en çok kullanılan yöntemler arasındadır.

Heyelanlar üzerinde VLF verilerinin 2B ters çözüm sonuçlarının ne kadar başarılı sonuçlar sağladığının araştırılması için İstanbul Avcılar heyelanı üzerinde paralel iki hat üzerinde VLF-EM ve ERT ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca VLF-EM hattının kuzeydoğu ucunda VLF-R verileri de toplanmıştır. Toplanan veriler, birbirinden bağımsız olarak 2B yuvarlatıcılı ters çözüm algoritmaları ile modellenmiş ve yorumlanmıştır.

Sonuçlara göre, heyelan içerisindeki iletkenler ve kayma düzlemi VLF yöntemi ile belirlenebilmiştir. Buna göre, kayma düzlemini teşkil eden Gürpınar formasyonunun iletken killeri 15-20 m derinde tespit edilmiştir. VLF-EM yöntemi, yatay iletkenlik değişimlerin duyarlı olduğundan, yüzeyi kaplayan iletken alüvyon VLF-EM verileri ile belirlenememiştir. Çalışma alanının kuzeydoğu bölümünde, Gürpınar formasyonunun killerin yeryüzüne yaklaştığı hem ERT hem de VLF-EM yöntemi ile belirlenmiştir. Çalışma alanının kuzeydoğu ucunda alüvyon örtü ve ~3-10 m derindeki iletken killer VLF-EM modelinde birbirinden ayıramamıştır. Buna karşın, VLF-R ölçümleri ile daha yüksek düşey ayrımlılık elde edilebildiğinden, bu iletkenlerin başarılı bir şekilde birbirinden ayrılması mümkün olmuştur.

Anahtar Kelimeler: VLF, ERT, 2B Ters Çözüm, Avcılar heyelanı.

<https://doi.org/10.17824/yerbilimleri.549104>

 Gökhan KARCIOĞLU gkarci@istanbul.edu.tr

¹ İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Mühendislik Fak., Jeofizik Müh. Böl., 34320 Avcılar İstanbul , ORCID 0000-0002-5081-8113

¹ İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Mühendislik Fak., Jeofizik Müh. Böl., 34320 Avcılar İstanbul , ORCID 0000-0003-3506-6248

¹ İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Mühendislik Fak., Jeofizik Müh. Böl., 34320 Avcılar İstanbul , ORCID 0000-0002-5355-8628

ABSTRACT

VLF and ERT methods are widely used for investigating the resistivity distribution in the first few ten meters of the earth. VLF method provides rapid and low-cost measurements; however, the low frequency count and the relatively narrow frequency band provide a lower depth of investigation, compared to that of the ERT method. Hence, ERT is amongst the most employed methods in the landslides areas where sharp resistivity contrasts are generally observed.

To investigate the performance of the 2D inversion results of the VLF data on landslide areas, VLF-EM and ERT measurements are acquired on two parallel profiles. Besides, VLF-R measurements are performed on the northeastern end of the VLF-EM profile. The measured data are modeled and interpreted individually, using 2D smooth inversion algorithms.

The results suggest that conductive zones and the sliding surface of the landslide are delineated using the VLF method. Accordingly, conductive clays of the Gürpınar formation, consisting of the sliding surface, are delineated between 15-20 m depth. Due to the sensitivity of the VLF-EM data to the horizontal conductivity differences, the conductive alluvium cover is not delineated from the VLF-EM data. In the northeastern part of the study area, clays of the Gürpınar formation are observed to be approaching to the surface, detected from both VLF-EM and ERT models. In the northeasternmost part of the study area, VLF-EM model failed to detect the alluvium cover separately from the conductive clays at ~3-10 m depth. However, due to the higher vertical resolution obtained from the VLF-R measurements, these conductors are successfully identified by the VLF-R model.

Keywords: *VLF, ERT, 2D inversion, Avcılar landslide.*

GİRİŞ

Çok Düşük Frekans elektromanyetik yöntem (VLF) ve Elektrik Özdirenç Tomografisi (ERT) yöntemleri, yerin sığ derinliklerindeki elektriksel özelliklerin araştırılmasında sıklıkla kullanılan jeofizik araştırma yöntemlerindedir. Bu iki yöntem de belirgin iletkenlik karşıtlıklarının (kontrast) gözlemlendiği heyelanlı sahalarda uygulanmaktadır.

VLF yöntemi, 15-30 kHz bandında çalışan, frekans ortamı uzak alan bir elektromanyetik (EM) araştırma yöntemidir. Frekans ortamı uzak alan EM yöntemlerde araştırma derinliği

ölçüm frekansına bağlı olarak değişmektedir. Ancak VLF bandı çok dar ve nispeten yüksek frekanslı olduğundan yöntemin araştırma derinliği düşüktür. Buna karşın, yere bir elektrot çifti ile akım vererek bu akım sonucu oluşan gerilimin başka bir elektrot çiftiyle ölçülmesi ile yer iletkenliği hakkında bilgi sağlayan ERT yöntemi daha kapsamlı bir derinlik çözünürlüğü sunmaktadır. Bu niteliğinden ötürü, ERT yöntemi heyelanlı sahalarda kayma düzleminin görüntülenmesi amacıyla en sık uygulanan yöntemlerden birisi olmuştur.

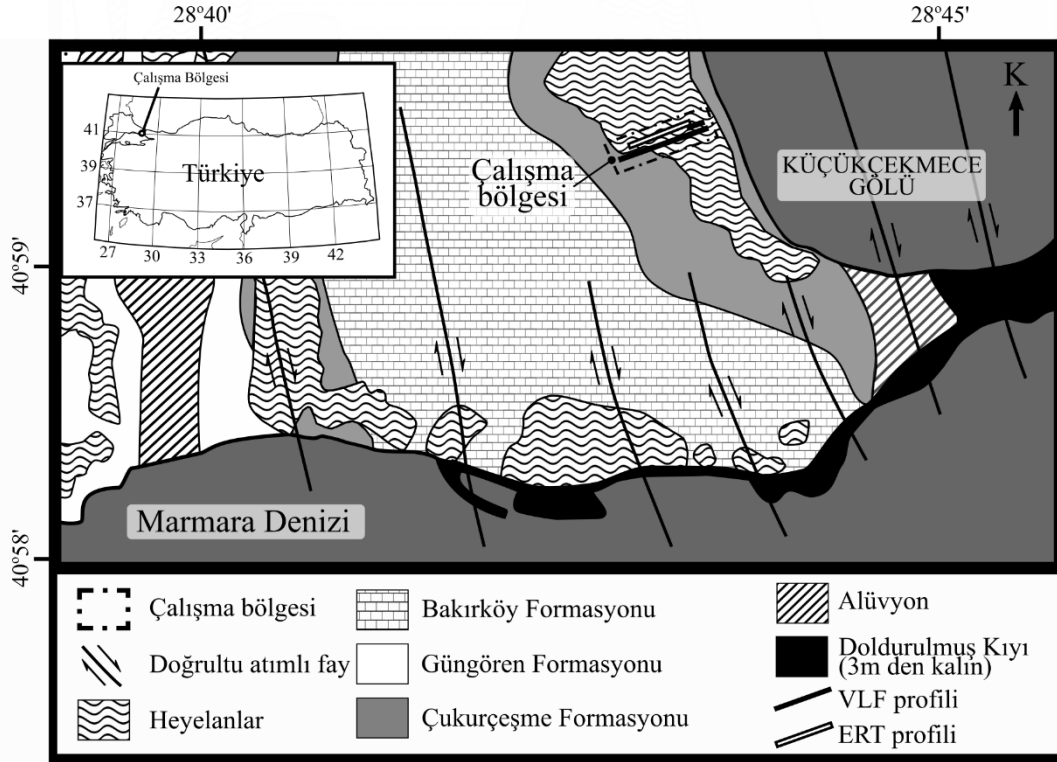
Türkiye’de İstanbul’un Avcılar ilçesinde yer alan Avcılar heyelanı, Küçükçekmece gölünün batı kıyısında, kısmen İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Avcılar Kampüsü arazisi içerisinde yer alan pasif bir heyelandır. Bu heyelanlı saha ve çevresinin jeolojisi, Zarif (1996) ve Yüzer ve Eyüboğlu (1998) tarafından incelenmiştir. Bu çalışmalara göre, Avcılar heyelanı, Güngören ve Çukurçeşme formasyonlarının geçirimli, kumlu ve killi içeriğinin, geçirimsiz Gürpınar formasyonuna ait killi-siltli birimler üzerindeki hareketi sonucu meydana gelmektedir. Lenti (2016) çalışmasına göre, günümüzde pasif durumda olan bu heyelanın bir deprem sonucu aktif hale gelme olasılığı da düşüktür.

Avcılar heyelanını oluşturan birimlerin iletkenliği daha önce, Zarif (1996), Türkoğlu (2003) ve İBB (2007) tarafından incelenmiştir. Bu çalışmalara göre, heyelanın temelini oluşturan Gürpınar formasyonu bölgedeki en iletken birimdir. Bu birimin üzerinde yer alan Güngören ve Çukurçeşme formasyonları ise birbirine çok benzer iletkenlik değerleriyle ifade edilmekte olup Güngören formasyonuna göre daha yalıtıkandırlar.

Araştırma bölgesindeki VLF ölçümleri 2015-2018 yılları arasında 19.6 kHz ve 23.4 kHz frekanslarında gerçekleştirilmiştir. ERT ölçümleri ise, VLF yönteminden elde edilen iletkenlik kesitleriyle karşılaştırmak üzere 2018 yılında toplanmıştır. Ölçülen veri grubundan iki hat VLF ve bir hat ERT ölçüsü seçilerek, birbirinden bağımsız olarak, 2B ters çözümü gerçekleştirilmiş ve yer iletkenlik modelleri elde edilmiştir. Bu iki yöntemden elde edilen modeller kullanılarak, heyelanın yapısı ve araştırma bölgesinde gözlenen birimlerin öz dirençleri birbiriyle kıyaslanmıştır.

ÇALIŞMA ALANININ JEOLJİSİ

Türkiye’nin İstanbul ilinde yer alan Avcılar bölgesinde killi formasyonlar, geniş heyelanlı alanlar ve kuzey-kuzeybatı yönlü doğrultu atımlı faylar yer almaktadır (Şekil 1). Gökaşan ve diğ. (2001)’e göre bu faylar, bölgenin güneyinde Marmara Denizi içerisinde geçen Kuzey Anadolu Fay Zonu’nun (KAFZ) diri ikincil faylarıdır. Bölge jeolojisinin de genel olarak bu faylara paralel uzandığı gözlenmektedir.



Şekil 1. Çalışma alanının basitleştirilmiş jeolojisi (İBB, 2007; Şen, 2007; Ergintav ve diğ., 2011; Dalgıç ve diğ., 2010; Alp, 2014' den eklemelerle, Duman ve diğ., 2004'den yeniden çizilmiştir.), VLF ve ERT hatları şekil üzerinde gösterilmiştir.

Figure 1. Simplified geology of the study area (redrawn from Duman et al., 2004 with contributions from İBB, 2007; Şen, 2007; Ergintav et al., 2011; Dalgıç et al., 2010; Alp, 2014.)

Bölgedeki heyelanlar genelde Marmara Denizi ve Küçükçekmece Gölü kıyısında yer almaktadır (Şekil 1). Küçükçekmece Gölünün batı kıyısında, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa kampüsü ve çevresinde yer almakta olan heyelanlı bölge, Avcılar heyelanı olarak adlandırılmaktadır. Zarif (1996) ve Yüzer ve Eyüboğlu (1998)'e göre, Avcılar heyelanı, kumlu ve killi geçirimli Güngören ve Çukurçeşme formasyonlarının geçirimsiz killi Gürpınar formasyonu üzerindeki hareketinden meydana gelmektedir. Gürpınar formasyonu bu bölgedeki Tersiyer yaşlı temeli oluşturmaktadır (Şekil 2).

Bölgenin iletkenlik yapısı daha önce Zarif (1996), Türkoğlu (2003) ve İBB (2007) tarafından araştırılmıştır. Bu çalışmalara göre Avcılar heyelanının temelini oluşturan Gürpınar formasyonu bölgede gözlenen en iletken birimdir. Türkoğlu (2003), gerçekleştirdiği çalışmada bu birimin iletkenliğini $<10 \Omega\text{m}$ olarak belirlemiştir. İlgili

Üst Sistem		Sistem		Seri		Formasyon		Kalınlık (m)		Litoloji		Açıklama		
Senozoik	Kuv.	Holo.	Alüvyon										Kil-Silt	
														Tersiyer
	Güngören	20-25										Kil-Silt-Kum		
	Oligosen	Gürpınar	Çukurçeşme	15-30									Çakıl-Kum-Kil	
				>700										
	Eosen	Kırklareli	Trakya											Kireçtaşı-Killi Kireçtaşı
Paleozoik														

Şekil 2. Çalışma alanının stratigrafisi (Dalgıç, 2004'den yeniden çizilmiştir.)

Figure 2. Stratigraphy of the study area (redrawn from Dalgıç, 2004).

çalışmada, Zaman Ortamı Elektromanyetik Yöntem (TDEM) kullanılarak, bu birimin ilk 90 metrelik kısmı görüntülenmiştir ancak kalınlığı belirlenememiştir. Buna göre, Gürpınar formasyonu, bölgede, sığ jeofizik yöntemlerle görüntülenebilecek en derin birimdir ve kalınlığının VLF, ERT gibi sığ metotlarla belirlenmesi mümkün değildir. Güngören ve Çukurçeşme formasyonları ise, içerikleri bakımından birbirine çok benzerlik göstermektedir (Şekil 2). Bu benzerlik iletkenliklerinde de gözlenmektedir. Türkoğlu (2003) ve İBB (2007) çalışmalarına göre, bu birimlerin öz direnci yaklaşık 6-20 Ω m aralığındadır ve genel olarak Gürpınar formasyonuna göre daha yalıtıcıdır. Gürpınar formasyonu ile Güngören ve Çukurçeşme formasyonları arasındaki iletkenlik farkı Türkoğlu (2003) çalışmasında gösterilmiştir.

Avcılar heyelanı daha önce Zarif (1996) ve Lenti ve diğ. (2016) çalışmalarında değerlendirilmiştir. Bu çalışmalara göre, Avcılar heyelanının temeli (Gürpınar formasyonu) yaklaşık 15-20 m derinlikte yer almaktadır. Avcılar heyelanı, günümüzde pasif durumda olup,

düşük de olsa depremlerle aktifleşme olasılığı vardır (Lenti ve diğ., 2016). Gökaşan ve diğ. (2001) ve Alp (2014) çalışmalarında KAFZ'nin Küçükçekmece Gölü'nün içerisine uzanan olası kolları görüntülenmiştir. Diao ve diğ. (2016) çalışmasında, bu olası fayların aktivitesi uydu görüntüleri aracılığıyla incelenmiştir. Buna göre, bölgede yılda 5 mm'den fazla bir hareket söz konusudur ve Küçükçekmece Gölü içerisindeki fayların tektonik ve sismik olarak diri olma olasılığı vardır.

VLF YÖNTEMİ

VLF yöntemi 15-30 kHz frekans bandındaki elektromanyetik dalgaların yer içerisindeki iletkenlerle etkileşiminden faydalanan ve sığ derinliklerdeki yer iletkenliğinin araştırılmasında kullanılan bir EM arama yöntemidir. Yöntemde kaynak, alıcıdan uzakta bulunan (görünür öz direncin uzaklığa bağımlı olamayacağı kadar uzak), genellikle askeri amaçlar için kullanılan radyo vericileridir.

VLF yöntemi, ölçülen elektromanyetik alan bileşenlerine göre iki farklı şekilde adlandırılır. VLF-EM yönteminde sadece manyetik alanın düşey ve yatay bileşenleri ölçülmektedir (H_x , H_z); VLF-R yönteminde ise manyetik alan bileşenlerinin yanı sıra manyetik alan bileşenlerine dik doğrultudaki yatay elektrik alan da (E_y) ölçülmektedir. Ölçülen bu bileşenlerden tipper (denklem 1), görünür öz direnç (denklem 2) ve faz (denklem 3) verileri hesaplanır.

$$T_{zi} = H_z/H_i \quad (1)$$

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

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

Verilen bu denklemlerde, $i=x,y$ (ölçülen bileşenler), ω açısal frekans ve μ_0 boşluğun manyetik geçirgenliğidir ($\mu_0=4\pi 10^{-7}$ Wb/(Am)).

VLF-EM yönteminin kullanılması durumunda sadece tipper verisi elde edilmektedir. Tipper verisi yanal süreksizlikler hakkında bilgi vermektedir. Ayrıca, seçilen başlangıç modelinin ters çözüm sonucu elde edilecek iletkenlik modeli üzerinde önemli etkisi vardır (Baranwal ve diğ., 2011). Daha doğru sonuçlar elde edilmesi için başlangıç modelinin, araştırılan bölgenin arka plan iletkenliğini mümkün olduğunca iyi yansıtması gerekmektedir. VLF yönteminde, mevcut istasyonların frekans bandı çok dar olduğundan, farklı frekansların kullanılması araştırma derinliğini arttırmaz. Bu nedenle, bir frekanstaki kaynak kesintiye uğradığında ölçümlere farklı bir kaynaktan devam edilmesi, farklı frekanslardaki verilerin birbirinin yerine kullanılması mümkün olabilmektedir (Bozzo ve diğ., 1994). Ancak, daha derinde bulunan

iletkenler daha yüksek dalga boylu değişimlere neden olduğu için, sığdaki ve derindeki iletkenler kısmen ayırt edilebilir. Ayrıca VLF-R yönteminde faz ve görünür özdirenç bilgileri ile düşey yöndeki iletkenlik değişimi hakkında sınırlı bilgi elde edilebilir.

VLF yönteminde modelleme genellikle yerin iletkenliğinin iki boyutlu (2B) olduğu varsayımına göre gerçekleştirilir. Buna göre, yerin iletkenliği bir yatay ve düşey doğrultuda değişirken, diğer yatay doğrultuda sabittir. İletkenliğin değişiklik göstermediği bu yatay doğrultuya yer elektrik doğrultu (geo-electrical strike) adı verilir. Yer elektrik doğrultusu, yerin elektriksel yapısının başat (hâkim) uzanım doğrultusudur ve her zaman jeolojik yapıların uzanıma paralel olmak zorunda değildir. Buna karşın, çalışmalarında genellikle ikisinin örtüştüğu gözlenmektedir (ör. Tank ve diğer., 2005; Kaya ve diğer., 2009; Özaydın ve diğer., 2018).

2B yer varsayımının geçerli olması durumunda, elektromanyetik dalgaların uzayda yayınımını tanımlayan Maxwell denklemleri iki temel moda ayrılır; bunlar **E** kutuplaşması (transvers elektrik, TE) ve **B** kutuplaşmasıdır (transvers manyetik, TM). **E** kutuplaşmasında, elektrik alanlar yer elektrik uzanıma paralel ölçülür (E_x); **B** kutuplaşmasında ise manyetik alanlar yer elektrik uzanıma paralel ölçülür (H_x). **E** kutuplaşmasında, E_x bileşeninin yanında H_y ve H_z bileşenleri de ölçülür. **B** kutuplaşmasında ise, sadece H_x ve E_y bileşenleri ölçülür. **B** kutuplaşmasında, ilgili tipper bileşeni sıfır "0" olacağından hesaplanmaz.

VLF yöntemi, diğer uzak alan frekans ortamı elektromanyetik arama yöntemleri gibi özellikle iletken yapılara duyarlıdır. Bu nedenle VLF yöntemi, hidrojeolojik araştırmalar (Monteiro Santos ve diğer., 2006 a; Drahor ve Berge, 2006), fay zonlarının incelenmesi (Olesen ve diğer., 1992; Yamaguchi ve diğer., 2001 ; Gürer ve diğer., 2009), çevre ve kirlilik araştırmaları (Monteiro Santos ve diğer., 2006 b; Kaya ve diğer., 2007), çatlakların ve bozuşmaların araştırılması (Gürer ve diğer., 2008), maden araştırmaları (Başokur ve Candansayar, 2003; Bayrak ve Şenel, 2012) için yer iletkenliğinin değişimine neden olan unsurların araştırılmasında kullanılmaktadır. Heyelanlı alanlarda da genellikle nispeten yüksek iletkenlik karşıtlığı (kontrastı) bulunduğundan VLF yönteminin sığ derinlikli heyelanların araştırılmasında kullanılması mümkündür.

ERT YÖNTEMİ

Elektrik Özdirenç Tomografisi (ERT) yöntemi, aktif (yapay) kaynaklı Doğru Akım Özdirenç (DAÖ) yönteminin 2B ve 3B uygulamalarına genel olarak verilen isimdir. DAÖ yöntemi 1B uygulandığı zaman, genelde Düşey Elektrik Sondaj (DES) olarak adlandırılmaktadır. DAÖ yöntemi, yere bir elektrot çifti aracılığıyla akım verilmesi ve başka bir elektrot çifti ile bu akımın oluşturduğu potansiyel farkın (gerilimin) ölçülmesiyle gerçekleştirilir. Görünür

öz direnç verisi, ölçülen akım ve gerilimden, elektrotların geometrisinin de hesaba katılmasıyla, aşağıdaki denklemler kullanılarak hesaplanır:

$$\rho_a = k \frac{V}{I} \quad (4)$$

$$k = 2\pi / \left(\left(\frac{1}{|C_1 P_1|} - \frac{1}{|C_2 P_1|} \right) - \left(\frac{1}{|C_1 P_2|} - \frac{1}{|C_2 P_2|} \right) \right) \quad (5)$$

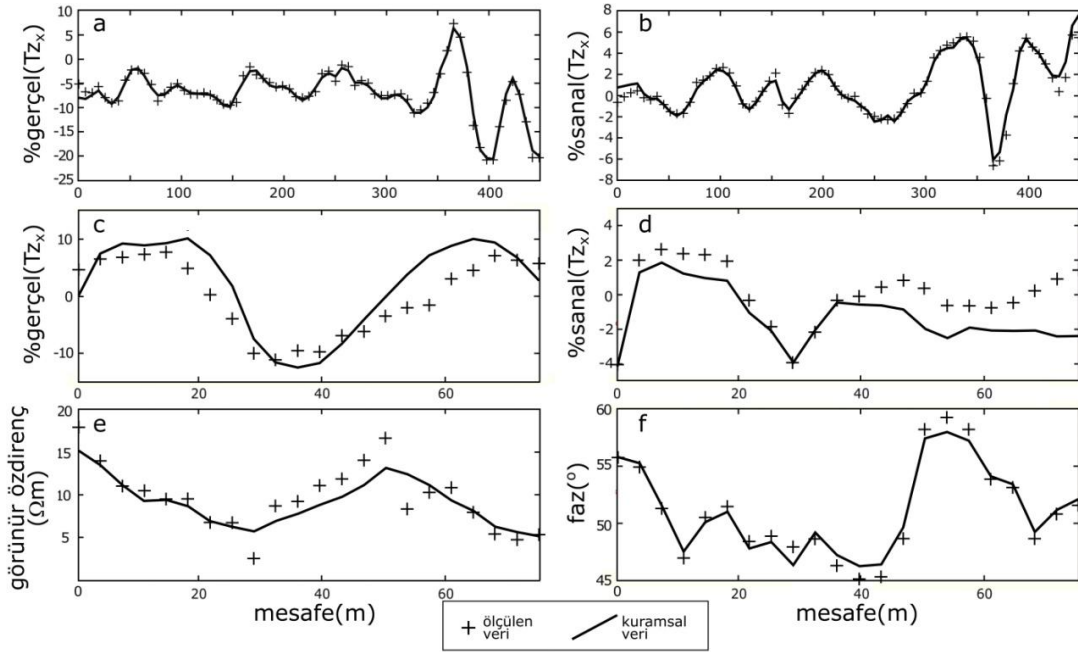
Verilen denklemlerde, k elektrotların arazideki yerleşimine göre hesaplanan geometrik faktördür; n,m =1,2 olmak üzere $|C_n P_m|$ akım ve potansiyel elektrotları arasındaki mesafelerdir. Kullanılan elektrot çiftlerinin konumlarına ve aralarındaki mesafelere göre farklı dizilimler tanımlanmaktadır. ERT yönteminde kullanılan elektrot dizilimlerinin başlıcaları Wenner-Alfa, Wenner-Beta, Wenner-Gamma, Wenner-Schlumberger, Dipol-Dipol, Pol-Dipol ve Pol-Pol dizilimleridir (Loke, 2012).

VLF yönteminin aksine, ERT yönteminde akım elektrotları arası mesafe değiştirilerek ölçüm derinliği kontrol edilebildiğinden, şehir içerisinde ölçümlere daha uygundur ve kapsamlı bir derinlik çözünürlüğü sağlar. ERT yöntemi jeoteknik araştırmalarda (Cosenza ve diğ., 2006; Sudha ve diğ., 2009; Long ve diğ., 2012; Maślakowski ve diğ., 2014), arkeojeofizikte (Candansayar ve Başokur, 2001; Gündoğdu ve diğ., 2017; Balkaya ve diğ., 2018; Drahor, 2019), fayların yüzeye yakın etkilerinin incelenmesinde (Nguyen ve diğ., 2007; Zhu ve diğ., 2009; Giocoli ve diğ., 2011; Demirci ve diğ., 2012; Moisedi ve diğ., 2012), tuzlu su girişimlerinin tespitinde (Vafidis ve diğ., 2014; Hamdan ve diğ., 2015; Ardalı ve diğ., 2018) ve heyelanların araştırılmasında (Bichler ve diğ., 2004; Lapenna ve diğ., 2005; Göktürkler ve diğ., 2008; Chambers ve diğ., 2011; Shan ve diğ., 2016) sıklıkla kullanılmaktadır. ERT yöntemi ile en sağlıklı sonuçların 3B uygulamalarla elde edildiği bilinmektedir (Chambers ve diğ., 2002). Buna karşın, özellikle heyelanlar gibi geniş alanlar kaplayan yapıların 3B araştırılması çok zor olduğundan, bu tip araştırmalarda 2B uygulamalar sıklıkla görülmektedir (Chambers ve diğ., 2011).

VERİ VE 2B TERS ÇÖZÜMÜ

Çalışma kapsamında GB-KD doğrultulu iki hat boyunca VLF ölçüleri toplanmıştır. Ölçüm doğrultusu gözlenen jeolojik uzanımlara ve fay doğrultularına dik olacak şekilde seçilmiştir. Buna uygun olarak, İngiltere (19.6 kHz) ve Almanya'da (23.4 kHz) bulunan VLF vericilerinin sinyallerinden faydalanılmıştır. İki VLF hattında da ölçümler, bölgedeki başat jeolojik doğrultunun, yer elektrik doğrultuya paralel olacağı varsayımıyla, E kutuplaşmasında toplanmıştır. Hatlardan ilki ~ 450 m uzunluğunda olup, sadece manyetik alan ölçümlerinden

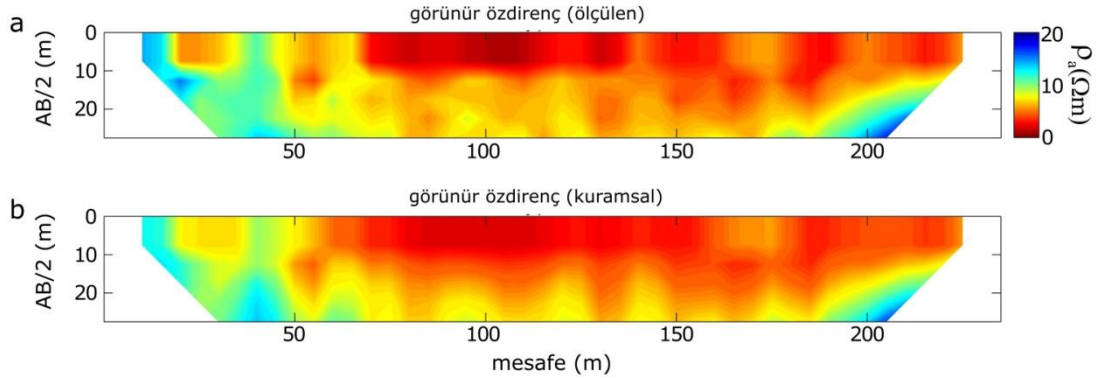
ibarettir (VLF-EM), ölçüm aralığı $\sim 6.5\text{m}$ dir (Şekil 3, a,b) ve 23.4 kHz frekansında toplanmıştır. Diğer VLF hattı ise, birinci hattın son bölümüne karşılık gelen alanda 3 m aralıkla Bulgan (2016) tarafından ölçülmüştür. Bu hat $\sim 65\text{m}$ uzunluğundadır ve 19.6 kHz frekansında toplanmıştır. Bu ikinci hatta elektrik alan ölçüleri de gerçekleştirilmiş (VLF-R); tipper verisinin yanında, görünür öz direnç ve faz verisi de elde edilmiştir (Şekil 3, c,d,e,f).



Şekil 3. VLF-EM hattı boyunca toplanan ölçümler (ölçülen veri) ve 2B modelleme sonucu elde edilen modelin tepkisi (kuramsal veri) (a,b). VLF-R ölçümleri ve elde edilen 2B modelin tepkisi (c,d,e,f). Şekilde ölçülen veri "+" sembolü ile, kuramsal veri düz çizgi ile gösterilmiştir.

Figure 3. Measurements along the VLF-EM profile (observed data) and the model response (calculated data), obtained from the 2D inversion (a,b). VLF-R measurements and the model response of the resulted 2D model (c,d,e,f). In the figure, the observed data is shown with "+" symbol and the calculated data are shown with solid lines.

ERT ölçümleri, yine GB-KD doğrultusunda, VLF-EM hattına paralel olacak şekilde, $\sim 240\text{m}$ uzunluğunda bir hat boyunca 5 m aralıkla yerleştirilmiş 48 elektrot kullanılarak Wenner-Schlumberger dizilimiyle gerçekleştirilmiştir. Ölçümler sonucunda elde edilen görünür öz direnç verileri, akım elektrotu yarım açıklığına ($AB/2$) göre yapma kesit olarak Şekil 4 a'da verilmiştir.



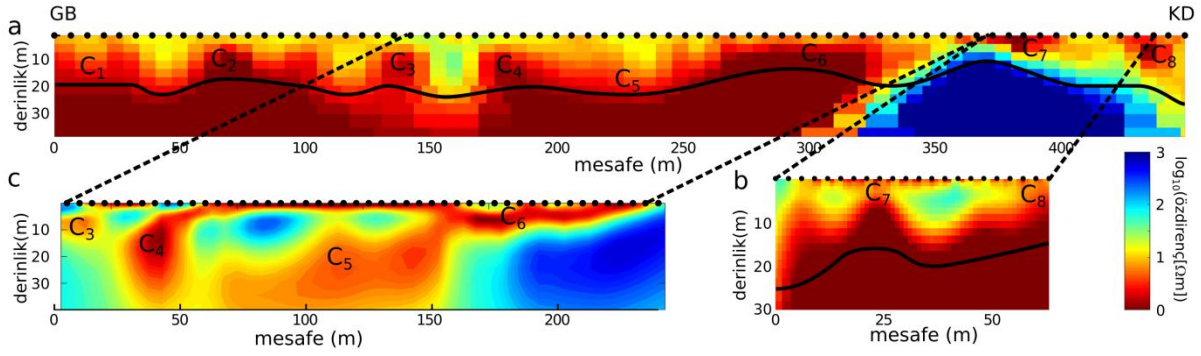
Şekil 4. ERT verisi (a) ve bu verinin 2B modellenmesi sonucu elde edilen modelin tepkisinin (b) yapma kesit olarak gösterimi. Ölçümler, 48 kanallı bir cihazla Wenner-Schlumberger elektrot dizilimi kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Figure 4. ERT data (a) and the model response (b) obtained from the 2D inversion of the dataset, shown as pseudosections. The measurements are realized using a 48 channel device with Wenner-Schlumberger electrode array.

VLF verileri, sıklıkla basit süzgeçleme teknikleriyle yorumlanmaktadır. En çok kullanılanları, Fraser (1969) ile Karous ve Hjelt (1983) filtreleridir. Ancak, bu filtreler, yeraltındaki yapılar hakkında sınırlı bilgi sağlayabilmektedir; 2B ve 3B ters çözüm algoritmaları ile elde edilen yer iletkenlik modelleriyle doğruya daha yakın sonuçlar elde edilebilmektedir (Baranwal ve diğ., 2011; Singh ve Sharma, 2015).

Toplanan VLF ve ERT ölçüleri, 2B yuvarlatıcılı ters çözüm algoritmaları kullanılarak modellenmiştir. Jeofizik verilerin 2B yuvarlatıcılı ters çözümü, Constable (1989), Sasaki (1989), de Groot Hedlin ve Constable (1990) çalışmalarında detaylı olarak anlatılmıştır. VLF-EM ve VLF-R ölçümleri MATLAB® ortamında geliştirilen ters çözüm algoritmasıyla, ERT ölçüleri ise WSJointInv2D-MT-DCR (Amatyakul ve diğ., 2017) yazılımı kullanılarak modellenmiştir.

VLF ve ERT verilerinin ters çözümü için, ortalama arka plan öz direncini temsil edeceği öngörülen 20Ωm öz dirençli homojen ortam başlangıç modeli olarak sunulmuştur. 2B modelleme sonucunda, VLF-EM verisinden elde edilen iletkenlik modeli Şekil 5 a'da verilmiştir ve 2.22 RMS hataya sahiptir (Şekil 3 a,b). VLF-R verisinin ters çözümü sonucu elde edilen model Şekil 5 b'de verilmiştir (VLF-R hattı, VLF-EM hattı üzerine iz düşürülmüştür) ve 2.24 RMS hata ile sonuçlanmıştır (Şekil 3, c,d,e,f). İlgili modeller için duyarlılık analizi gerçekleştirilmiş, verinin duyarlı olduğu derinlik kesikli çizgi ile gösterilmiştir (Şekil 5 a,b). ERT verisinin ters çözümü sonucu elde edilen iletkenlik modeli Şekil 5 c'de verilmiştir ve 2.3 RMS hataya sahiptir (Şekil 4).



Şekil 5. 2B ters çözüm sonucu, VLF-EM hattı (a), VLF-R hattı (b) ve ERT hattı (c) için elde edilen öz direnç modelleri. VLF modellerinde, VLF verilerinin duyarlı olduğu belirlenen derinlik düz çizgi ile gösterilmiştir (a,b).

Figure 5. Resistivity models obtained from the 2D inversions of VLF-EM profile (a), VLF-R profile (b), and the ERT profile (c). In the VLF models, the depths the VLF data is determined to be sensitive are shown using solid lines (a,b).

Elde edilen modellerde çok sayıda iletken gözlenmiştir (Şekil 5 C₁-C₈). Ayrıca, VLF-R ve ERT modellerinde (Şekil 5 b,c), C₄-C₈ arasında yüzeyde ~1-2m kalınlığında, iletken bir örtü olduğu gözlenmiştir. Tipper verileri, yanal iletkenlik değişimlerine duyarlı olduğundan bu yatay tabaka, VLF-EM verileri ile görüntülenememiştir. C₃ ve C₆ arasındaki iletkenler ise hem VLF-EM hem de ERT modelinde gözlenebilmiştir. Bu iletkenler, heyelan sahasında, eğimin en yüksek olduğu bölüme karşılık gelmektedir. C₃ ve C₄ iletkenlerinin, Güngören ve Çukurçeşme formasyonlarının kil içeriği yüksek kısımlarına karşılık geldiği düşünülmektedir. Yaklaşık 20 m derinlikte gözlenen C₅ iletkeni ise Avcılar heyelanının öngörülen derinliğine karşılık gelmektedir ve heyelanın temelini oluşturan iletken Gürpınar formasyonunun killeri olarak yorumlanmıştır. C₆ iletkeni, C₅ iletkeni ile bağlantılı görünmektedir. Çalışma alanının en kuzeydoğu bölümünde Gürpınar formasyonunun yüzeylendiği bilinmektedir (Zarif, 1996). Bu nedenle, C₆ iletkeni Gürpınar formasyonunun yüzeye yakın killeri olarak yorumlanmıştır. Hem VLF-EM hem de ERT modelinde (Şekil 5 a,c), C₆ ve C₇ iletkenlerinin arasında yalıtkan bir bölge gözlenmektedir. Ancak bu bölge, VLF-EM modelinde düşük duyarlılık nedeniyle tam belirlenememiştir ve ERT modeline göre çok daha yalıtkan elde edilmiştir

VLF-EM modelinin (Şekil 5 a) kuzeydoğu bölümünde yüzeyde iki farklı iletken yapı gözlenmiştir (C₇ ve C₈). Daha sık aralıklarla toplanmış ve daha çok veri içeren VLF-R modeli incelendiğinde (Şekil 5 b), C₇ ve C₈ iletkenlerinin yüzeyde bulunan iletken alüvyon ve hemen

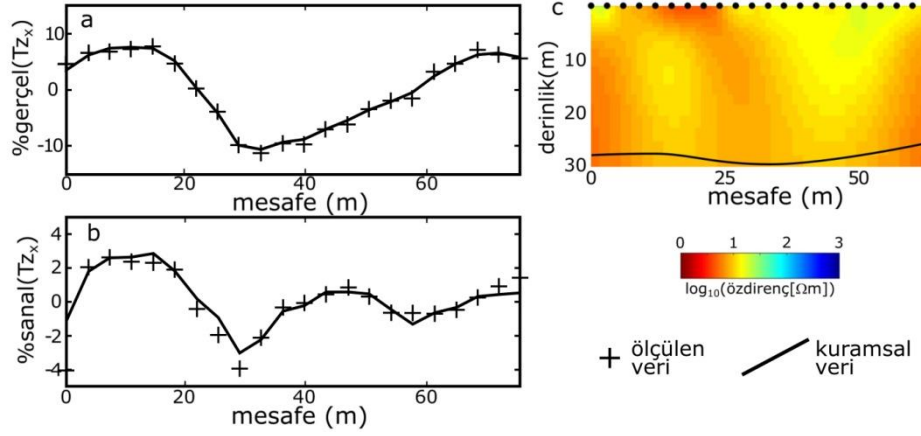
altında yüzeğe yakın Gürpınar formasyonu olabileceği görülmektedir. Modelde, bu iletkenler birbirinin devamı olarak elde edilmiştir. Bu iletkenler, VLF-EM modelinde (Şekil 5 a) birbirinden ayırlamamıştır.

VLF-EM modelinde (Şekil 5 a), alüvyon ve altındaki iletkenlerin ayırlamamasının sebebinin, VLF-EM verilerinin sadece yatay yöndeki iletkenlik değişimlerine olan duyarlılığı olduğu düşünölmüştür. Bu savın desteklenmesi için, VLF-R hattı, sadece gerçel ve sanal bileşen tipper verileri kullanılarak baştan modellenmiştir. 2B ters çözüm, yine 20 Ω m özdirençli homojen ortamdan başlatılmıştır ve 1 RMS hatalı özdirenç modeli elde edilmiştir (Şekil 6). Ölçölen ve kuramsal veriler arasındaki yüksek çakışmaya rağmen (Şekil 6 a,b), elde edilen modelde (Şekil 6, c), C₇ iletkeni yüzeyde gözlenmiştir. C₈ iletkeni ise, düşey uzanımlı olarak elde edilmiştir ve bu iki iletken arasındaki bağlantı tespit edilememiştir. Elde edilen bu model (Şekil 6 c) göstermektedir ki, VLF-EM modelinde (Şekil 5 a) ~370-430 m arasında gözlenen C₇ ve C₈ iletkenleri VLF-R modelinde (Şekil 5 b) daha başarılı çözümlenmiştir.

SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Avcılar heyelanı üzerinde VLF ve ERT yöntemleri uygulanmış, elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. VLF yöntemi, bir hat üzerinde VLF-EM olarak uygulanmış; bu hattın son bölümünde VLF-R ölçümleri de gerçekleştirilmiştir.

VLF-EM ve ERT modelleri karşılaştırıldığında (Şekil 5 a,c), VLF-EM ölçülerinin yatay tabakalara duyarlı olmaması nedeniyle, yüzeyi kaplayan iletken örtünün görüntülenemediği ortaya çıkmaktadır. VLF-R ölçüleri görünür özdirenç ve faz verilerini de içerdikinden, yatay tabakalar hakkında da bilgi sağlayabilmektedir. Bu nedenle, VLF-R verisi için elde edilen modelde (Şekil 5 b), VLF-EM modelinde görüntülenemeyen iletken örtü belirlenebilmiştir. VLF-EM ve VLF-R hattı karşılaştırıldığında zaman, VLF-R ölçümlerinin, düşey yönde daha iyi ayrımlılık sağladığı da gözlenmiştir. Yüzeyi örten alüvyon ve altında bulunan iletken yapı, VLF-EM verisi ile ayırlamamışken VLF-R verisi ile ayrılabilmiştir. VLF-R yönteminin bu avantajı, VLF-R verilerinin VLF-EM verisi gibi modellenmesiyle gösterilmiştir (Şekil 6). Bu test sonucu elde edilen modelde düşey iletkenlik değişimi belirlenememiştir (Şekil 6).



Şekil 6. VLF-R hattı için, sadece gerçel ve sanal bileşen tipper verilerinin (VLF-EM) ters çözülmesi durumunda elde edilen öz direnç modeli. Verinin duyarlı olduğu belirlenen derinlik siyah düz çizgi ile gösterilmiştir.

Figure 6. The resistivity model for the VLF-R profile when only the real and the imaginary parts of the tipper data are inverted (VLF-EM). The depth the data is determined to be sensitive is shown using solid lines.

VLF-EM modelinde, ERT yöntemiyle görüntülenen diğer iletkenler belirlenebilmiştir (Şekil 5 a,c; C₃-C₆). İki modelde de, Avcıların heyelanının temelini oluşturan (Zarif, 1996) ve araştırma bölgesindeki en iletken birim olan (Türkoğlu, 2003) Gürpınar formasyonu ~20 m derinlikte belirlenmiştir (Şekil 5 a,c; C₅). Bu derinlik, daha önce Avcılar heyelanını değerlendiren, Zarif (1996) ve Lenti ve diğ. (2016)'nın öngördüğü derinliğe yakındır. Her iki modelde de bu birimin kuzeydoğuda yüzeye yaklaştığı görülmektedir (C₆).

Elde edilen sonuçlar, VLF-EM ve VLF-R verilerinden elde edilen yeraltı modellerinden heyelanlar hakkında bilgi elde edilebileceğini göstermektedir. Ancak, iletken ortamlarda, nispeten yüksek frekanslı VLF verileri hızlı bir şekilde sönmüldüğünden, heyelan derinliğinin ve kayan kütlelerin iletkenliğinin önemi büyüktür. Heyelan derinliğinin daha yüksek olması veya kayan kütlelerin daha iletken olması durumunda, kayma düzleminin VLF yöntemi ile görüntülenmesi mümkün olmayacaktır.

KATKI BELİRTME

Bu çalışma kapsamında kullanılan VLF ölçümlerinde katkısı bulunan bütün İstanbul Üniversitesi Jeofizik Mühendisliği Bölümü lisans öğrencilerine ve katkılarından ötürü bu makaleyi inceleyen hakemlere teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

- Alp, H., 2014. Evidence for active faults in K çük ekmece lagoon (Marmara Sea, Turkey), inferred from high-resolution seismic data. *Geo-Marine Letters*. 34(5), 447-455.
- Amatyakul, P., Vachiratienchai, C., Siripunvaraporn, W., 2017. WSJointInv2D-MT-DCR: An efficient joint two-dimensional magnetotelluric and direct current resistivity inversion. *Computers Geosciences*, 102, 100-108.
- Ardali, A. S., Tezkan, B., G rer, A., 2018. On the Salt Water Intrusion into the Durusu Lake, Istanbul: A Joint Central Loop TEM And Multi-Electrode ERT Field Survey. *Pure and Applied Geophysics*, 175(8), 3037-3050.
- Balkaya,  ., Kalyoncuoğlu,  . Y.,  zhanlı, M., Merter, G.,  akmak, O., Talih G ven, I., 2018. Ground-penetrating radar and electrical resistivity tomography studies in the biblical Pisidian Antioch city, southwest Anatolia. *Archaeological Prospection*, 25(4), 285-300.
- Baranwal, V.C., Franke, A., B rner, 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
- Başokur, A. T., Candansayar, M. E., 2003, Enhacing VLF data for qualitative interpretation: An example of massive chalcopyrite exploration. *Leading Edge*, 22, 568-570
- 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.
- Bichler, A., Bobrowsky, P., Best, M., Douma, M., Hunter, J., Calvert, T., Burns, R., 2004. Three-dimensional mapping of a landslide using a multi-geophysical approach: the Quesnel Forks landslide. *Landslides*, 1(1), 29-40.
- Bozzo, E., Lombardo, S., Merlanti, F., 1994. VLF prospecting: observations about field experiments. *Annals of Geophysics*, 37(5 Sup.).

- Bulgan. B., 2016. İ.Ü. Avcılar Kampüsü Heyelanının VLF Yöntemiyle Çalışılması. Lisans Bitirme Tezi, İstanbul Üniversitesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye.
- Candansayar, M. E., Başokur, A. T., 2001. Detecting small-scale targets by the 2D inversion of two-sided three-electrode data: application to an archaeological survey. *Geophysical Prospecting*, 49(1), 13-25.
- Chambers, J., Ogilvy, R., Kuras, O., Cripps, J., Meldrum, P., 2002. 3D electrical imaging of known targets at a controlled environmental test site. *Environmental Geology*, 41(6), 690-704.
- Chambers, J. E., Wilkinson, P. B., Kuras, O., Ford, J. R., Gunn, D. A., Meldrum, P. I., Pennington, C.V.L., Weller, A.L., Hobbs, P.R.N. Ogilvy, R. D., 2011. Three-dimensional geophysical anatomy of an active landslide in Lias Group mudrocks, Cleveland Basin, UK. *Geomorphology*, 125(4), 472-484.
- Constable, S. C., Parker, R. L., Constable, C. G., 1987. Occam's inversion: A practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data. *Geophysics*, 52(3), 289-300.
- Cosenza, P., Marmet, E., Rejiba, F., Cui, Y. J., Tabbagh, A., Charlery, Y., 2006. Correlations between geotechnical and electrical data: A case study at Garchy in France. *Journal of Applied Geophysics*, 60(3-4), 165-178.
- Dalgıç, S., 2004. Factors affecting the greater damage in the Avcılar area of İstanbul during the 17 August 1999 Izmit earthquake. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 63(3), 221-232.
- Dalgıç, S., Turgut, M., Kuşku, İ., 2010. Büyükçekmece ile Küçükçekmece arasındaki heyelanların oluşumunda hazırlayıcı ve tetikleyici parametrelerin değerlendirilmesi. *Uygulamalı Yerbilimleri*. 2, 56-73.
- deGroot-Hedlin, C., Constable, S., 1990. Occam's inversion to generate smooth, two-dimensional models from magnetotelluric data. *Geophysics*, 55(12), 1613-1624.

- 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.
- Diao, F., Walter, T. R., Minati, F., Wang, R., Costantini, M., Ergintav, S., Xiong, X., Prats-Iraola, P., 2016. Secondary fault activity of the North Anatolian Fault near Avcılar, southwest of Istanbul: Evidence from SAR interferometry observations. *Remote Sensing*. 8(10), 846.
- Drahor, M.G., Berge, M.A., 2006. Geophysical investigations of the Seferihisar geothermal area, Western Anatolia, Turkey. *Geothermics*, V.35 (2006), pp. 302-320
- Drahor, M. G., 2019. Integrated Geophysical Investigations in Archaeological Sites: Case Studies from Turkey. In *Archaeogeophysics* (pp. 27-68). Springer, Cham.
- Duman, T.Y., Keccer, M., Ateş, S., Emre, O., Gedik, İ., Karakaya, F., Durmaz, S., Olgun, S., Şahin, H., Gökmenoğlu, O., 2004. İstanbul metropolü batısındaki (Küçükçekmece-Silivri-Çatalca yöresi) kentsel gelişme alanlarının yerbilim verileri. MTA, Özel yayın serisi-3. MTA, Ankara.
- Ergintav, S., Demirbağ, E., Ediger, V., Saatçılar, R., İnan, S., Cankurtaranlar, A., Dikbaş, A.,Baş, M., 2011. Structural framework of onshore and offshore Avcılar, Istanbul under the influence of the North Anatolian fault. *Geophysical Journal International*. 185(1), 93-105.
- Fraser, D.C., 1969. Contouring of VLF-EM data, *Geophysics* , 34, 958-967
- Giocoli, A., Galli, P., Giaccio, B., Lapenna, V., Messina, P., Peronace, E., Romano, G. Piscitelli, S., 2011. Electrical resistivity tomography across the Paganica-San Demetrio fault system (L'Aquila 2009 earthquake). *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*, 52(3), 457-469.

- Gökaşan, E., Gaziöğlu, C., Alpar, B., Yücel, Z., Ersoy, Ş., Gündoğdu, O., Yaltırak, C., Tok, B., 2001. Evidence of NW extension of the North Anatolian Fault Zone in the Marmara Sea: a new interpretation of the Marmara Sea (Izmit) earthquake on 17 August 1999. *Geo-Marine Letters*. 21(4), 183-199.
- Göktürkler, G., Balkaya, Ç., Erhan, Z., 2008. Geophysical investigation of a landslide: The Altındağ landslide site, İzmir (western Turkey). *Journal of Applied Geophysics*, 65(2), 84-96.
- Gündoğdu, N. Y., Candansayar, M. E., Genç, E., 2017. Rescue archaeology application: Investigation of Kuriki mound archaeological area (Batman, SE Turkey) by using direct current resistivity and magnetic methods. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 22(2), 177-189.
- Gürer, A., Bayrak, M., Gürer, Ö.F., Şahin, S.Y., 2008. Delineation of Weathering in the Catalca Granite Quarry with the Very Low Frequency (VLF) Electromagnetic Method. *Pure appl. geophys.* 165 (2008) 429–441
- 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*, V68 (2009), pp. 437-447
- Hamdan, H., Candansayar, E., Demirci, I., Economou, N., Andronikidis, N., Arslan, H., Soupios, P., Vafidis, A., 2015. Imaging the saline/fresh water interface at Bafra, Samsun, Turkey using joint inversion of seismic refraction and direct current electricity data. In *International Conference on Engineering Geophysics*, Al Ain, United Arab Emirates, 15-18 November 2015 (pp. 232-235). Society of Exploration Geophysicists.
- İBB, 2007. İstanbul Mikrobölgeleme Projesi Avrupa Yakası. İstanbul Büyükşehir Belediyesi (İBB), İstanbul.
- Karous, M., Hjelt, S.E., 1983. Linear filtering of VLF dip angle measurements, *Geophysical Prospecting*, 31, 782-794

- Kaya, M.A., Özürkan, G., Şengül, E., 2007. Delineation of soil and groundwater contamination using geophysical methods at a waste disposal site in Çanakkale, Turkey. *Environ Monit Assess*, 135 (2007), pp. 441-446
- 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.
- Lapenna, V., Lorenzo, P., Perrone, A., Piscitelli, S., Rizzo, E., Sdao, F., 2005. 2D electrical resistivity imaging of some complex landslides in Lucanian Apennine chain, southern Italy. *Geophysics*, 70(3), B11-B18.
- Lenti, L., Martino, S., Musolino, G., 2016. Considering seismic coefficient distributions within slopes to calculate landslide reactivation probability. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 1-18.
- Loke, M.H., 2012. Tutorial: 2-D and 3-D Electrical Imaging Surveys. Geotomo Software, Malaysia (2012)
- Long, M., Donohue, S., L'Heureux, J. S., Solberg, I. L., Rønning, J. S., Limacher, R., O'Connor, P., Sauvin, G., Romoen, M., Lecomte, I., 2012. Relationship between electrical resistivity and basic geotechnical parameters for marine clays. *Canadian Geotechnical Journal*, 49(10), 1158-1168.
- Maślakowski, M., Kowalczyk, S., Mieszkowski, R., Józefiak, K., 2014. Using Electrical Resistivity Tomography (ERT) as a tool in geotechnical investigation of the substrate of a highway. *Studia Quaternaria*, 31(2), 83-89.
- Moisidi, M., Vallianatos, F., Soupios, P., Kershaw, S., 2012. Spatial spectral variations of microtremors and electrical resistivity tomography surveys for fault determination in southwestern Crete, Greece. *Journal of Geophysics and Engineering*, 9(3), 261-270.
- Monteiro Santos, F.A., Almeida, E.P., Gomes, M., Pina, A. , 2006 a. Hydrogeological investigation in Santiago Island (Cabo Verde) using magnetotellurics and VLF methods, *Journal of African Earth Sciences* V.45 (2006), pp. 421–430

- Monteiro Santos, F.A., Mateus, A., Figueiras, J., Gonçalves, M.A., 2006 b. Mapping groundwater contamination around a landfill facility using the VLF-EM method — A case study. *Journal of Applied Geophysics* V.60 (2006), pp. 115–125
- Nguyen, F., Garambois, S., Chardon, D., Hermitte, D., Bellier, O., Jongmans, D., 2007. Subsurface electrical imaging of anisotropic formations affected by a slow active reverse fault, Provence, France. *Journal of applied geophysics*, 62(4), 338-353.
- Olesen, O., Henkel, H., Lile, O.B., Mairing, E., Ronning, J.S., 1992. Geophysical investigations of the Stuaragurra postglacial fault, Finnmark, northern Norway. *Journal of Applied Geophysics.*, V29.(1992), pp.95-118
- Özaydın, S., Tank, S. B., Karaş, M., 2018. Electrical resistivity structure at the North-Central Turkey inferred from three-dimensional magnetotellurics. *Earth, Planets and Space*, 70(1), 49.
- Sasaki, Y., 1989. Two-dimensional joint inversion of magnetotelluric and dipole-dipole resistivity data. *Geophysics*, 54(2), 254-262.
- Shan, C., Bastani, M., Malehmir, A., Persson, L., Lundberg, E., 2016. Integration of controlled-source and radiomagnetotellurics, electric resistivity tomography, and reflection seismics to delineate 3D structures of a quick-claylandslide site in southwest of Sweden. *Geophysics*, 81(1), B13-B29.
- Singh, A., Sharma, S. P., 2015. Fast imaging of subsurface conductors using very low frequency electromagnetic data. *Geophysical Prospecting*, 63(6), 1355-1370.
- Sudha, K., Israil, M., Mittal, S., Rai, J., 2009. Soil characterization using electrical resistivity tomography and geotechnical investigations. *Journal of Applied Geophysics*, 67(1), 74-79.
- Şen, Ş., 2007. A fault zone cause of large amplification and damage in Avcılar (west of Istanbul) during 1999 Izmit earthquake. *Natural Hazards*. 43(3), 351-363.

- Tank, S. B., Honkura, Y., Ogawa, Y., Matsushima, M., Oshiman, N., Tunçer, M. K., Çelik, C., Tolak, E., 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(1-3), 213-225.
- Türkoğlu, E., 2003. Geçici elektromanyetik ve doğru akım elektrik özdirenç verilerinin ortak ters çözümü: Avcılar örneği. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Vafidis, A., Soupios, P., Economou, N., Hamdan, H., Andronikidis, N., Kritikakis, G., Panagopoulos, G., Manoutsoglou, E., Steiakakis, M., Candansayar, E., Schafmeister, M., 2014. Seawater intrusion imaging at Tybaki, Crete, using geophysical data and joint inversion of electrical and seismic data. *first break*, 32(8), 107-114.
- Yamaguchi, S., Murakami, S., Inokuchi, H., 2001. Resistivity mapping using the VLF-MT method around surface fault ruptures of the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake, Japan, *The Island Arc* V10 (2001), 296–305
- Yüzer, E., Eyüboğlu, R., 1998. Kentsel yerleşim planlamasında genelleştirilmiş bir mühendislik jeolojisi yaklaşımı (Avcılar-İstanbul). *Kentleşme ve Jeoloji Sempozyumu. Uluslararası Mühendislik Jeolojisi Türk Milli Komitesi TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi Avcılar Belediye Başkanlığı, İstanbul*. 233-248.
- Zarif, H., 1996. Küçükçekmece-Büyükçekmece arasındaki alanın yamaç stabilitesi. Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Zhu, T., Feng, R., Hao, J. Q., Zhou, J. G., Wang, H. L., Wang, S. Q., 2009. The application of electrical resistivity tomography to detecting a buried fault: a case study. *Journal of Environmental Engineering Geophysics*, 14(3), 145-151.