

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

**NEVŞEHİR ÜRGÜP YEŞİLÖZ KÖYÜ HODUL DAĞI ARKEOJEOFİZİK
ÇALIŞMALARI**

Oğuz Cihangir SAĞIN

**Danışman
Prof. Dr. Sedat YILMAZ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
JEOFİZİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ISPARTA - 2022**



© 2022 [Oğuz Cihangir SAĞIN]

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇİNDEKİLER.....	i
ÖZET	ii
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	v
ÇİZELGELER DİZİNİ	vi
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vii
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Yeşilöz Köyü Kısa Tarihçesi.....	4
1.2. Çalışma Alanı Jeolojisi.....	5
2. KAYNAK ÖZETLERİ.....	7
3. ARKEOJEOFİZİK YÖNTEMLER.....	11
3.1. Elektrik Özdirenç Tomografi (ERT).....	11
3.1.1. Wenner-Schlumberger Dizilimi	15
3.2. Yer Radarı (GPR).....	17
3.3. ERT ve GPR Verilerinin Değerlendirilmesi	21
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	29
4.1. Araştırma Planı.....	29
4.2. ERT Araştırma Bulguları.....	32
4.3. GPR Araştırma Bulguları.....	34
4.4. GPR ve ERT Sonuçlarını Karşılaştırma	39
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	41
KAYNAKLAR	43
ÖZGEÇMİŞ.....	51

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

NEVŞEHİR ÜRGÜP YEŞİLÖZ KÖYÜ HODUL DAĞI ARKEOJEOFİZİK ÇALIŞMALARI

Oğuz Cihangir SAĞIN

**Süleyman Demirel Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Prof. Dr. Sedat YILMAZ

Bu tez çalışmasında Kapadokya bölgesinde yer alan Nevşehir ili Ürgüp ilçesine bağlı Yeşilöz Köyü Hodul Dağı Ören mevkiinde arkeolojik amaçlı bir jeofizik araştırma gerçekleştirilmiştir. Araştırmada yeraltındaki katman sınırlarını veya anomalileri ortaya çıkaran dielektrik sabiti veya elektrik öz direnç gibi farklı jeofizik parametreleri tespit etmeye yardımcı olan yer radarı ve elektrik öz direnç yöntemleri kullanılmıştır.

Elektrik öz direnç tomografi ölçüleri Wenner-Schlumberger elektrot dizilimine göre 1 m aralıklı 11 profilde toplanmıştır. Elde edilen saha görünür öz direnç verilerin ters çözümü Res2DInv programı ile gerçekleştirilmiştir. Değerlendirilmiş veri setleri iki-boyutlu düşey kesitler ve kat haritaları şeklinde sunulmuştur. Yer radarı ölçüleri ise 0.5 m aralıklı 40 profilde toplanmış olup, verilerin değerlendirilmesinde ReflexW programı kullanılmıştır. Bu veri setleri derinlik kesitleri ve hacim modelleri olarak görselleştirilmiştir.

Arkeojeofizik araştırma sonuçlarına göre gözlemlenen ERT ve GPR anomalilerin gömülü yapı kalıntılarından kaynaklanmış olabileceği düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Elektrik öz direnç tomografi, yer radarı, arkeojeofizik.

2022, 51 sayfa

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

NEVŞEHİR ÜRGÜP YEŞİLÖZ VILLAGE HODUL MOUNTAIN ARCHEOGEOPHYSICAL STUDIES

Oğuz Cihangir SAĞIN

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

Supervisor: Prof. Dr. Sedat YILMAZ

In this thesis, an archaeological geophysical research was carried out in the Ören locality the Yeşilöz Village of the Ürgüp district of Nevşehir province in the Cappadocia region. For this aim, ground penetrating radar and electrical resistivity methods applied to detect different geophysical parameters such as dielectric constant or electrical resistivity that reveal the identification of layer boundaries or anomalies in the subsurface.

Electrical resistivity tomography measurements were performed along 11 profiles with 1 m spacing in the Wenner-Schlumberger electrode array. Res2DInv program was used for the inversion of the obtained field apparent resistivity data. Evaluated datasets were presented as both two-dimensional profiles and depth slices. Ground penetrating radar measurements were collected along 40 profiles with 0.5 m intervals. ReflexW program was used to evaluate the raw radar data. The processed datasets were visualized as both depth slices and volume models.

According to the results of the archeogeophysical survey, promising ERT and GPR anomalies were observed. It was concluded that these anomalies were caused by buried building remains.

Keywords: Electrical resistivity tomography, ground penetrating radar, archeogeophysics.

2022, 51 pages

TEŞEKKÜR

Bu araştırma için beni en iyi Şekilde yönlendiren, karşılaştığım zorlukları, bilgisiyle ve tecrübesiyle üstesinden gelmemde yardımcı olan Danışman Hocam Prof. Dr. Sedat YILMAZ'a sonsuz teŐekkürlerimi sunarım.

Tezimin her aşamasında beni yalnız bırakmayan ve benden maddi manevi hiĔbir desteğini esirgemeyen, iyi veya kötü gün ayırmaksızın her anımda yanımda olan kıymetli aileme sonsuz sevgi ve saygılarımı sunarım.

Oğuz Cihangir SAğIN
ISPARTA, 2022



ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 1.1. Çalışma alanı yer bulduru haritası.....	3
Şekil 1.2. Çalışma alanı ve çevresinin jeolojisi.....	5
Şekil 3.1. Yer materyallerinin özdirenç aralıkları.....	12
Şekil 3.2. ERT ölçüm prensibi (a-d)	13
Şekil 3.3. Bir andıran kesit oluşturmak için çok elektrotlu bir ERT sisteminin şematik diyagramı. Birbirini takip eden her seviye için elektrotlar arası mesafe arttırılır	14
Şekil 3.4. Wenner-Schlumber diziliminde ölçüm prensibi ve veri noktalarının konumları	15
Şekil 3.5. Wenner Schlumberger dizilimi için duyarlılık kesitleri. a) n=1, b) n=2, c) n=4, d) n=6	16
Şekil 3.6. GPRslice yazılımında GPR renk dönüşümü kontrolleri	22
Şekil 3.7. ERT ve GPR görselleştirmeleri. a: ERT andıran kesit, b: GPR radargram, c: GPR zaman dilimi.....	23
Şekil 3.8. Birkaç hatalı veri noktası içeren bir saha veri seti örneği. En belirgin kötü datum noktaları, 300 metre ve 470 metre uzaklıkları altında işaretlenmiştir. (a) andıran kesit formunda ve (b) profil formundaki görünür özdirenç verileri.....	25
Şekil 3.9. Veri setindeki gürültüyü gösteren bir örnek GPR radargramı	26
Şekil 3.10. Bir GPR profili için veri işlem aşamaları. (a) Ham veri, (b) ilk zaman filtresi, (c) akım düzeltmesi, (d) enerji geciktirme, (e) ortalama değer temizleme ve (f) hız analizi	28
Şekil 4.1. Çalışma sahası (üstte), ERT (solda) ve GPR (sağda) ölçüm düzenleri	29
Şekil 4.2. ERT ölçüm cihazı ve sahadan görüntüler.....	31
Şekil 4.3. GPR ölçüm cihazı ve sahadan görüntüler.....	31
Şekil 4.4. ERT-1 profili için ters çözüm sonuçları	32
Şekil 4.5. 2B ERT kesitlerinin birleştirilmiş görüntüsü	33
Şekil 4.6. 2B ERT verilerinden elde edilen özdiren kat haritaları.....	34
Şekil 4.7. GPR ölçümlerinden birinci profile ait veri işlem öncesi (a) ve sonrası aşamalara (b-e) ait radargramlar	35
Şekil 4.8. Z=0.5-1 m aralığındaki derinlik kesitleri	36
Şekil 4.9. Z=1.25-2 m aralığındaki derinlik kesitleri.....	37
Şekil 4.10. Z=2.5-6 m aralığındaki derinlik kesitleri.....	38
Şekil 4.11. Farklı derinliklerdeki ERT ve GPR kesitlerinin karşılaştırılması. a) Z=1.5 m, b) Z=3 m, c) Z=6 m	39
Şekil 4.12. ERT ve GPR veri setlerinden yararlanarak ortofoto görüntüsü üzerine yapı kalıntılarının temsili çizimi.....	40

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 3.1. Yaygın jeolojik materyallerin tipik bağıl dielektrik geçirgenlikleri.....	18
Çizelge 3.2. Anten türleri ve tipik uygulamaları	19
Çizelge 3.3. GPR veri işlem amaçları ve yöntemleri	27
Çizelge 4.1. Saha çalışmalarında kullanılan yöntem, cihaz, veri toplama teknikleri, veri işlem ve veri sunum teknikleri.....	30



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

a	Elektrot aralığı
DES	Düşey elektrik sondajı
EM	Elektromanyetik
ERT	Elektrik özdirenç tomografi
GPR	Yer radarı
I	Akım
k	Geometrik katsayı
m	Metre
MHz	Megahertz
n	Seviye
R	Direnç
RDP	Bağıl dielektrik geçirgenlik
ΔV	Potansiyel fark
Ω	Ohm
ρ_a	Görünür özdirenç

1. GİRİŞ

Jeofizik, petrol ve maden aramaları için Dünya'nın büyük ölçekli derin yapısını karakterize etmede kullanılan bir disiplin olarak ortaya çıkmıştır. Yeni teknolojilerin belirli koşullar için geliştirilmesiyle birlikte, jeofiziğin, toprak/kaya ara yüzeylerinin tanımlanması, yer altı suyunun yerinin ve kapsamının belirlenmesi veya gömülü atıkların yerinin ortaya çıkarılması gibi sığ yeraltı yüzeyini karakterize etmede başarıyla kullanılmaktadır. Diğer yaygın kullanım alanlarından biri ise, gömülü bombaların ve mayınların tespiti, konumu ve tanımlanmasıdır (Witten, 2000). Jeofiziğin bu sığ uygulamaları, arkeolojide uygulanmalarının yolunu açmıştır. Yüzey araştırması ve kazı içeren çoğu arkeolojik araştırma, toprak ve tortullardaki değişiklikleri araştırır. Bu değişkenlerin yüzeyin altında farklı derinliklerde ölçülmesi için jeofizik ekipmanlar geliştirilmiştir.

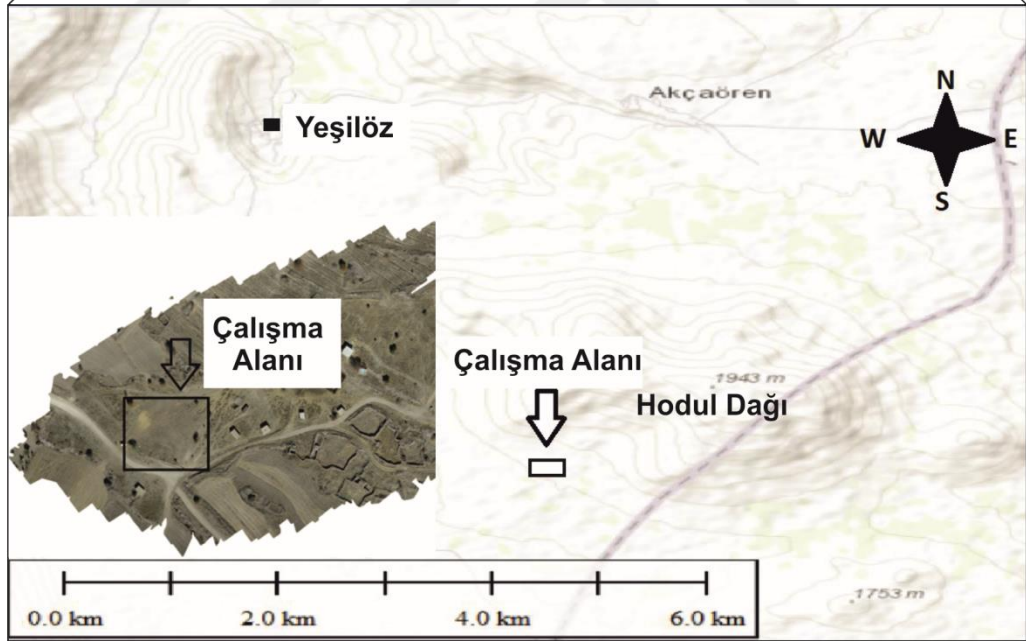
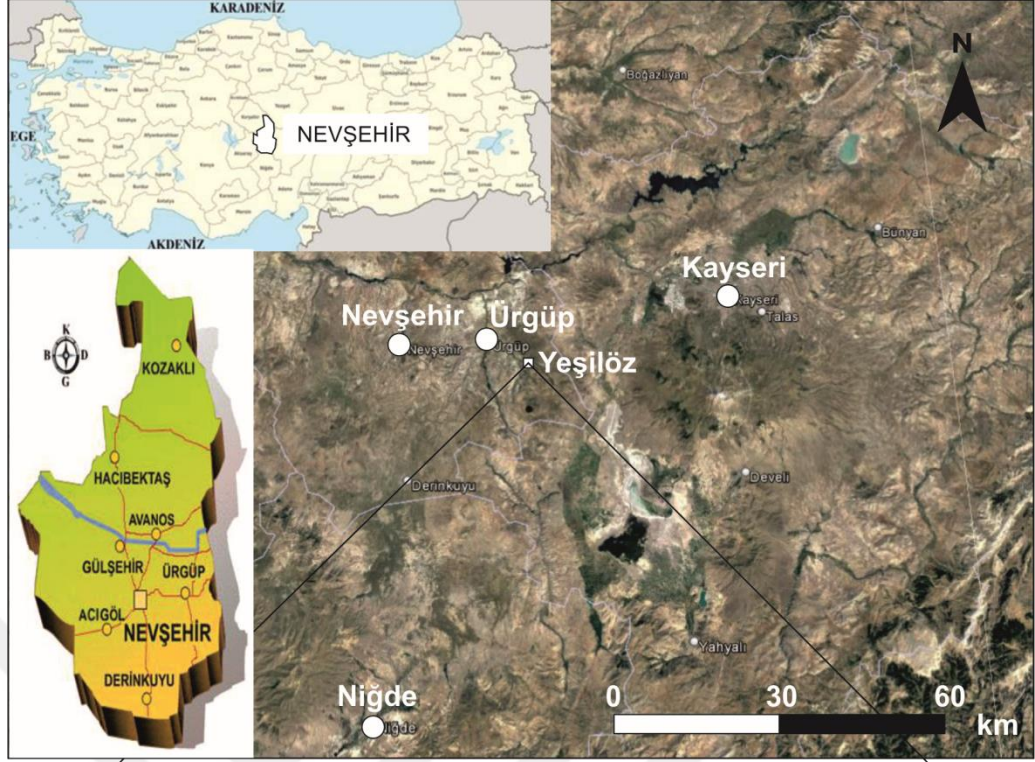
Mevcut olan çeşitli jeofizik araştırma teknikleri toprağın farklı fiziksel özelliklerini tespit eder (Telford vd., 1996; Clark, 2001; Scollar vd., 2009). Tekniklerden herhangi biri bir anomali tespit ederse, o yerde gömülü bir tür eser veya arkeolojik özellik olabilir. Son 50 yıldaki deneyimler, bu tekniklerin tek başına veya (tercihen birlikte) gömülü özelliklerin yeri, derinliği ve doğası hakkında hızlı ve güvenilir bilgi sağlayabileceğini göstermiştir (Nishimura, 2001).

Geçmiş kültürel faaliyetlerin temel göstergeleri, atık değerlendirme ve üst toprağın değiştirilmesidir. İnsan faaliyeti, diğer malzemelerin dahil edilmesi yoluyla toprağın fiziksel özelliklerinde değişikliklere neden olur. Arkeolojik birikintilerdeki topraklar, tortular ve diğer materyaller bu nedenle farklı fiziksel özelliklere sahiptir. Malzeme, gözeneklilik, parçacık boyutu, tuzluluk, nem ve diğer özelliklerdeki bu değişimler, yerin iletkenliğini ve dielektrik özelliklerini etkiler.

Çalışma alanı, Nevşehir ili Ürgüp ilçesi Yeşilöz köyü Hodul Dağı yakınında yer almaktadır (Şekil 1.1). Bu çalışma kapsamında elektrik öz direnç tomografi (ERT) yöntemi ve yer radarı (GPR) yöntemi kullanılmıştır.

ERT yöntemi kullanılmaya başlamadan önce bir-boyutlu (1B) düşey elektrik sondajı (DES) yöntemi kullanılıyordu. 1960'lı yıllardan sonra gelişen teknoloji ile iki boyutlu (2B) ve üç boyutlu (3B) çalışmalar yapılabilmektedir. ERT yöntemi mühendislik problemleri, çevresel problemler, arkeoloji, maden aramacılığı, jeotermal, hidrojeoloji ve fay çalışmaları gibi alanlarda başarılı bir şekilde kullanılmaktadır. 1960'lı yıllarda tıp alanında kullanılırken 1970'li yıllarda jeofizik alanında, özellikle kuyu içinde kullanılmaya başlamıştır. 1980 yıllarında radar tomografi (Lager ve Lytle, 1977) ve sismik tomografi (Mason, 1981; Pan ve Kak, 1983; Worthington, 1984; Daily, 1984) alanlarında uygulanmıştır. 1990 yıllarında da kuyu içi tomografide kullanılmıştır (Daily ve Owen, 1991).

GPR yöntemi; yüksek ayrımlılıklı, hasarsız, hızlı ve sığ yeraltı problemlerinin araştırmalarında jeofizik bilimlerine ait yöntemler arasında en yaygın olarak kullanılan yöntemdir. Yüksek frekansa sahip elektromanyetik (EM) radar sinyalinin, bir verici anten yardımıyla yere gönderilen ve gömülü nesnelere tekrar yansıyan sinyalin, alıcı anten tarafından varış zamanının bir fonksiyonu olarak kaydedilmesi esasına dayanır. Jeoloji, çevre, mühendislik problemleri, arkeolojik prospeksiyon, buzul araştırmaları ile adli bilimler yönteminin uygulandığı başlıca alanlardır (Reynolds, 1997).



Şekil 1.1. Çalışma alanı yer bulduru haritası

1.1. Yeşilöz Köyü Kısa Tarihçesi

Köyün yerleşim alanı içerisinde Kapadokya krallığı, Roma ve Bizans uygarlıklarının izleri mevcuttur. Selçuklularla birlikte Türklerin izleri başlar. Bir süre Karamanoğulları Beyliği sınırları içinde kalmış ve sonradan bölge Osmanlı egemenliğine girmiştir. Köyün ilk ismi Tağar olmakla birlikte, 1961 yılında Beydeğirmeni ve 1966 yılında da günümüzde kullanılan Yeşilöz ismini almıştır (Güçlü, 2020).

Pekak (2010)'a göre, köy sınırları içerisinde bulunan başlıca tarihi yapılar şunlardır. 1- Aziz Teodora Kilisesi: Bizans imparatoriçesi Teodora'nın adına yaptırılmış ve Kapadokya'nın kayadan oyma en büyük erken dönem kilisesidir. Kilise, mimari özelliklerin yanı sıra duvar resimleri ile de Kapadokya bölgesinde benzeri bulunmayan bir eser niteliği taşımaktadır. 2- Çağlak yer altı şehri: değişik uygarlıkların izlerini taşıyan bu yer altı şehri, karmaşık dehlizleri, direkli denilen kral mezarı ve yüz merdivenle inilen halk tarafından "sazlı kuyu" denilen su kaynağı ilgi çekicidir. 3- Alkaya harabeleri: bu bölgede Kapadokya krallığı ve Roma İmparatorluğu'na ait kaya mezarlar ve yerleşim alanları mevcuttur. 4- Ağmaz harabeleri: burada da Roma ve Selçuklular dönemine ait yerleşim alanları ve mezarlar mevcuttur.

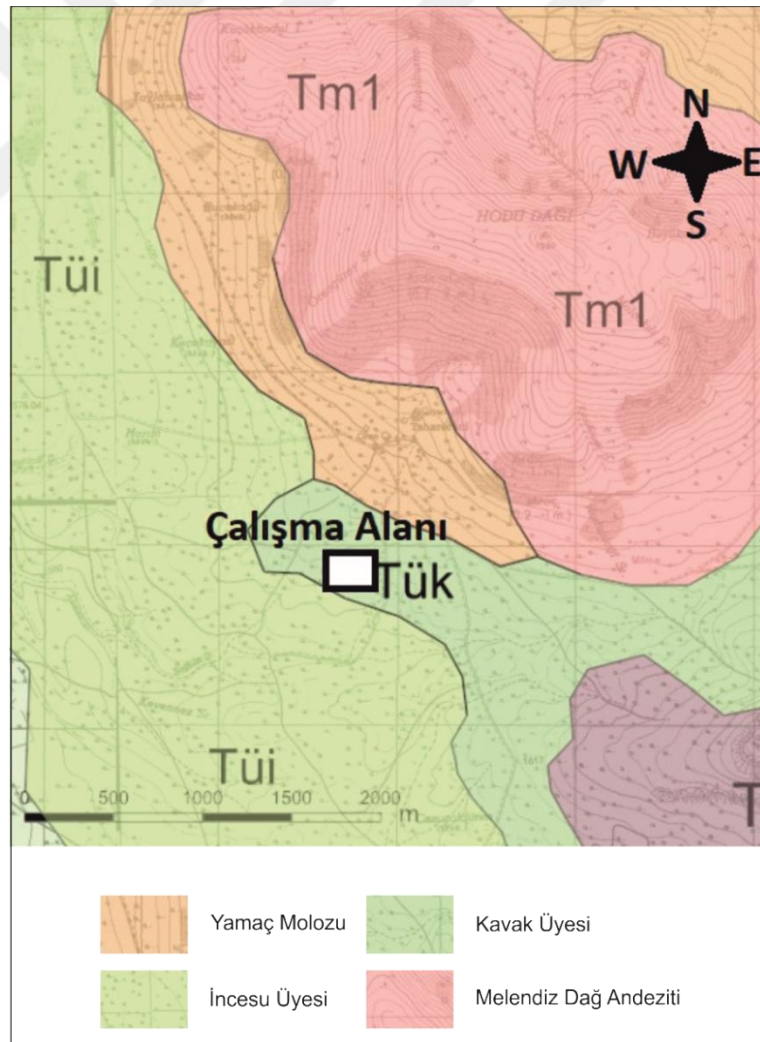
Yeşilöz köyü güney doğusunda yer alan bölgenin en yüksek yeri olan Hodul dağında tümülüs olduğu bilinmektedir. Bu bölgede kaçak kazılara rastlanmaktadır. T.C. Kültür ve Turizm Bakanlığı Kayseri Kültür Varlıklarını Koruma Bölge Kurulu 24 Haziran 2021 tarihli ve 5277 nolu kararı ile, Hodul Dağı Tümülüsü I. derece arkeolojik sit alanı olarak tescillenmiştir. Daha önce T.C. Kültür ve Turizm Bakanlığı Kültür Varlıkları ve Müzeler Genel Müdürlüğü'nden 3 Temmuz 2020 tarihli ve 468087 sayılı izniyle, Yeşilöz köyü Hodul Dağı'ndaki Tümülüs üzerinde jeofizik veri (tezde kullanılmadı) toplanmış ve sonuç raporu ilgili kuruma verilmişti. Hem bu arkeojeofizik araştırmanın sonuçları hem de aynı bölgedeki kaçak kazıların olması bu sit alanı kararının alınmasında etkili olduğu düşünülmektedir.

1.2. Çalışma Alanı Jeolojisi

İnceleme alanı ve çevresinin jeolojisi Şekil 1.2'de verilmiş olup jeolojik birimler aşağıda kısaca özetlenmiştir.

Yamaç Molozu: Bölgede akarsu kenarlarında çakıl, kum, mil ve topraktan oluşan alüvyonların yanı sıra yamaç molozları yüzeylemektedir.

İncesu Üyesi: Üst Miyosen yaşlı birim, inci grisi, pembe renkli dasidik tüftür. Birimde alt düzey pomzaca zengin ince taneli, homojen, gözeneksiz, orta düzey gözenekli ve orta taneli ve üst düzeyi ise orta taneli, masif ve gözeneksiz pomza içermektedir (Pasquare, 1968).



Şekil 1.2. Çalışma alanı ve çevresinin jeolojisi

Kavak Üyesi: Çalışma alanının da içinde bulunduğu Üst Miyosen yaşlı bu birim, beyaz-kahve tonları renginde homojen pomza içermektedir. Ayrıca kirli beyaz renginde andezitik bileşenli, camsı tüfitli ve parçacıklı pomza külü düzeyleri içermektedir (Atabey, 1989).

Melendiz Dağ Andeziti: Üst Miyosen–Pliyosen yaşlı birim çoğunlukla gri tonlarında, kahverengi ve camsı özellikte andezittir (Beekman, 1966).



2. KAYNAK ÖZETLERİ

Tsokas vd. (1994), ERT ve GPR yöntemlerini kullanarak Yunanistan Europos Antik kentindeki gömülü yapıları tespit etmişlerdir. Arkeojeofizik yöntemlerle hazırlanan antik yapıların şekilleri ve büyüklükleri ile yapılan arkeolojik kazılar ile bulunan kesitlerin birebir örtüştüğünü ortaya koymuşlardır.

Erdoğan ve Gündoğdu (1995), İzmit ilinde Roma Dönemi'ne ait olan bir tümülüsün araştırmasında elektrik öz direnç yöntemini kullanmıştır. Yaptıkları bu çalışma ile mezarlar, duvar yapıları ve giriş çıkış yerleri ortaya çıkmıştır. Elde edilen bu sonuçlar ile kazı sonuçlarının birebir aynı olduğunu ortaya koymuşlardır.

Mildan (1997), Tekirdağ ilinde bulunan, Karaevlialtı yöresinde elektrik öz direnç yöntemini kullanarak muhtemel bir tümülüsün varlığını Wenner ve Schlumberger elektrot dizilimleri kullanarak kesitler çıkarmaya ve haritalamaya çalışmıştır.

Batayneh vd. (2001), Ürdün Al-Kharrar bölgesinde yer alan antik kentin araştırmasında, elektrik öz direnç yöntemi ile birlikte manyetik yöntemi de kullanmışlardır. Çalışma sonucunda, ibadethane, su kanalları, duvarlar, mozaikler ve metal eşyalar tespit etmişlerdir.

Candansayar ve Başokur (2001), iki yönlü üç elektrot dizilimiyle, Çorum ilinde yer alan Alacahöyük ilçesinde, görünür öz direnç verilerinin 2B ters çözümünden yararlanarak gömülü küçük bir odanın ve şehir surununun bir bölümünün keşfedilmesi sağlamıştır.

Ghazala vd. (2003), Mısır Sharkiya Tell-Toukh El-Qaramousta antik kentindeki jeofizik araştırmada elektrik öz direnç ve manyetik yöntemleri kullanmışlardır. Elde edilen manyetik ve ERT haritalardan, tarihi bir kalenin varlığını, tuğlalarla örülmüş duvarlar ve insan eliyle yapılan kalıntılar olduğunu saptanmıştır.

Negri ve Leucci (2006), ERT ve GPR yöntemi kullanarak Hierapolis Antik Kenti'nde bulunan Apollo Tapınağının altındaki yapıların tespiti için çalışmalar yapmışlardır. Bu çalışma ile iki yöntemin birlikte kullanılmasının çok daha iyi sonuçlar verdiği sonucuna varmışlardır.

Drahor (2006), Türkiye'deki Sardis antik kentinde, manyetik, ERT, VLF-R ve sismik kırılma yöntemlerinden oluşan tümleşik bir jeofizik araştırma gerçekleştirmiştir. Araştırmada kalın toprak tabakası altında gömülü arkeolojik yapı kalıntılarının başarıyla ortaya çıkarıldığı vurgulanmıştır.

Ekinci ve Kaya (2007), Çanakkale Biga ilçesinde bulunan Antik Parion nekropol alanında, ERT yöntemini uygulamışlardır. ERT kesitlerindeki özellikle 0.25-2.5 m derinlik aralığında yoğunlaşmış yüksek öz dirençli bölgelerin, arkeolojik yapı kalıntılarını karakterize ettiğini ifade etmişlerdir.

Drahor vd. (2008), Türkiye'deki Roma dönemi Zeugma antik kentindeki askeri yerleşim alanına ait olduğu düşünülen bir alanda, manyetik ve elektrik öz direnç yöntemini birlikte kullanmıştır. Araştırma sonucuna göre yapılmış arkeolojik kazıdan, askeri yerleşime ait yollar, borular, metalik nesnelere, duvar yapıları ve yapı temelleri keşfedilmiştir.

Özyalın vd. (2010), İzmir'de yer alan 'Metropolis antik kentinde, sığ yüzeydeki arkeolojik kalıntılarının belirlenmesinde ERT, GPR ve sismik kırılma yöntemlerini kullanmıştır. Araştırma sonucunda gömülü antik yapı kalıntılarının varlığına işaret eden birçok anomali tespit edilmiştir.

Berge ve Drahor (2011), İzmir Smyrna antyk kentindeki Höyük araştırmasında ERT yöntemini kullanmıştır. Farklı elektrot diizlimlerinin sonuçlarını karşılaştırarak höyükteki tabakalaşma tespit edilmeye çalışılmıştır.

Ekinci vd. (2012), Çanakkale Biga Parion antik kentindeki birkaç alanda ERT araştırması yapmışlardır. ERT kesitlerindeki yüksek öz dirençli anomalilerin arkeolojik bulguları karakterize ettiği sonucuna varmışlardır.

Tong vd. (2013), Peinan Nekropollerinde (Tayvan) GPR, ERT ve manyetik yöntemlerini uygulayarak şehrin arkeolojik dönem sınırlarını belirlemiştir.

Üstol (2013), Isparta ili Yalvaç ilçesinde bulunan "Pisidia Antiokheia" antik kentinde GPR ve ERT yöntemini kullanarak, veri işlem teknikleri uygulayarak kalıntıların yerlerini ve derinliklerini tespit etmişlerdir. Araştırma sonucu L şeklinde ve yay şeklinde duvarlar tespit etmişlerdir.

Ekinci vd. (2014), Afyon Emirdağ sınırları içinde bulunan Bizans dönemine ait Amorium antik kentinde arkeolojik kazı çalışmalarına yön verebilmek için, manyetik ve elektrik özdirenç yöntemlerini kullanmışlardır.

Di Maio vd. (2016), Yunanistan'ın Girit adasındaki Phaistos antik kentinde, ERT, manyetik ve elektromanyetik yöntemlerin kullanıldığı bir araştırmadan, gömülü duvar kalıntılarına ait olduğu düşünülen anomaliler tespit etmişlerdir.

Yılmaz vd. (2018), Isparta Keçiborlu Kılıç'ta kaçak kazı ile ortaya çıkmış antik yapı kalıntılarının uzanımını ve devamını araştırmak için manyetik, ERT ve GPR yöntemlerini kullanmışlardır. Araştırma sonucunda, düzgün mimaride bir yapıyı, yolu ve duvarları karakterize eden manyetik, ERT ve GPR anomalileri tespit edilmiştir.

Yılmaz vd. (2019), Kılıç Ören bölgesindeki ikinci bir araştırma ile, gömülü bir bazilikaya ait bulgular elde etmişlerdir. GPR araştırması 500 MHz'lik anten kullanılarak 0,5 aralıklı 72 profil üzerinde gerçekleştirilmiştir. Her iki yanında birer nef bulunan bir orta nef ve sonunda bir apsis sergileyen üç nefli bazilikanın varlığı başarılı bir şekilde ortaya çıkarılmıştır. GPR sonuçlarına göre bazilikanın iç ve dış duvarlarının genişliği sırasıyla yaklaşık 3 ve 1,7 m'dir. Daha sonra Wenner-Schlumberger dizilimi ile 1 m aralıklı 37 paralel profil üzerinde bir ERT araştırması yapıldı. Bazilikanın ana yapısını gösteren ERT bulguları, GPR araştırmasının sonuçlarını desteklemiştir.

Ünyay (2019), ERT ve GPR yöntemlerini kullanarak, Isparta ilinin Yalvaç ilçesinde bulunan Pisidia Antiokheia kentinde yaptıkları ERT ve GPR araştırması sonucunda bazilikaya ait unsurlar 2- ve 3-boyutlu analizler ile ortaya konmuştur.

Akca vd. (2019), Antalya ilinde bulunan, antik Bizans döneminden kalma, Side'de bulunan piskoposluk çevresinde, alanın kullanımı veya tasarımı hakkında bilgilere ulaşmak için ERT ve GPR yöntemlerini kullanmışlardır. Elde ettikleri sonuçlara göre, yüksek EM dalga yansıma genliği direnç ve yüksek direnç ile karakterize, gömülü, antropojenik yapıların belirgin izlerinin varlığını ortaya koymuşlardır.

Balkaya vd. (2021), Gaziantep' te bulunan Doliche Antik Kenti'nde bulunan Keber Tepesi üzerinde ERT ve GPR yöntemleri kullanarak bazilika yapıları ile örtüşen duvarlar tespit etmişlerdir.

3. ARKEOJEOFİZİK YÖNTEMLER

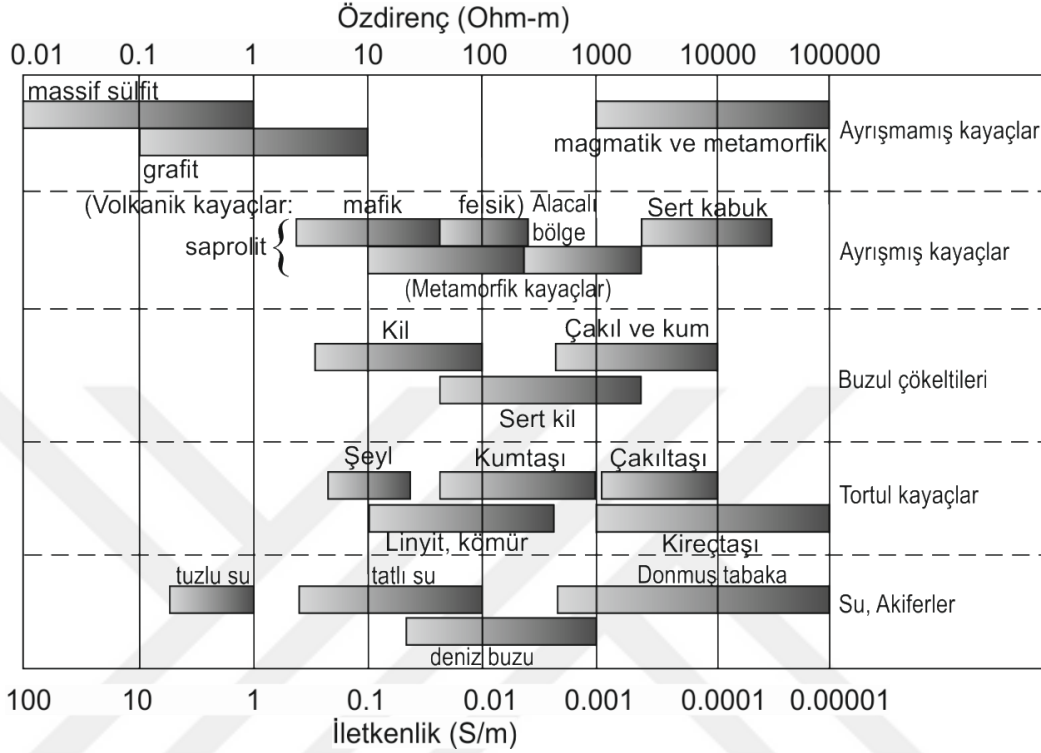
Jeofizik, birçok arkeolojik alanın keşfinde kilit bir rol oynamış ve birkaç farklı döneme ait bilinen yerler hakkında yeni bilgiler ortaya çıkarmıştır. Carnuntum, Avusturya (Neubauer vd., 2013), Pava ve Siena, İtalya (Piro vd., 2005), Portus, İtalya (Keay vd., 2004; Strutt, 2006; De Gaetano vd.ve Strutt, 2007) ve Gabii, İtalya (Kay, 2013) gibi Romalıların alanları jeofizik araştırmalardan belirlenmiştir. Bununla birlikte, GPR yöntemi ile Kazakistan'daki Demir Çağı mezarları (Pipan vd., 2001), Stonehenge çevresinde çoklu jeofizik araştırmalar (Gaffney ve Gaffney, 2012) ve St. Catherine Manastırı, Slovakya (Panisova vd., 2013)'da mikrogravite araştırmalar gibi tarih öncesi ve Roma sonrası alanlarda da fayda sağlamıştır.

Arkeolojik araştırma, hedef malzemenin çoğu yüzeye yakın, küçük ölçekli ve ince olduğu için benzersiz zorluklar sunar. Çürümüş ahşap direklerin kalıntıları gibi çok küçük özellikler, özel yöntemler, ekipman ve prosedürler geliştirmeyi gerektiren toprak bileşimi ve nem içeriğindeki küçük dalgalanmaları tespit etmek için yüksek hassasiyet ve yüksek çözünürlük gerektirir. Cihazlar, yakın yüzey anomalilerin çözünürlüğünü artırmak için tepki derinliğini sınırlandıracak şekilde yapılandırılmıştır. Arkeolojinin jeofizik tekniklere yüklediği benzersiz talepler nedeniyle, büyük ölçekli araştırmaların daha hızlı, daha yüksek çözünürlüklerde gerçekleştirilebileceği ve bazı durumlarda yeraltını birkaç metre derinliğe kadar görüntüleyen üç-boyutlu hacimsel modelleri oluşturacak şekilde yeni teknikler geliştirilmiştir.

3.1. Elektrik Özdirenç Tomografi (ERT)

Elektrik özdirenç araştırmaları yer altı özdirenç dağılımının bir resmini vermektedir. Bu sebeple farklı türdeki yer materyallerinin özdirenç değerleri bilinerek ve de incelenen alanın jeolojisi hakkında bilgi edinerek özdirenç dağılımın jeolojik bir resme dönüştürülmesi sağlanmalıdır. Yer materyallerinin özdirençleri 0.01 Ω m ile birkaç 100 k Ω m gibi geniş bir aralıkta değişmektedir (Şekil 3.1). Bu değişim, yeraltındaki hedef yapılar ile ana kayaç arasındaki

yüksek kontrastlara neden olur. Dolayısıyla, öz direnç araştırmalardan elde edilen yeraltı öz direnç dağılımının jeolojik bir resme dönüştürülmesi için avantaj sağlayacaktır.

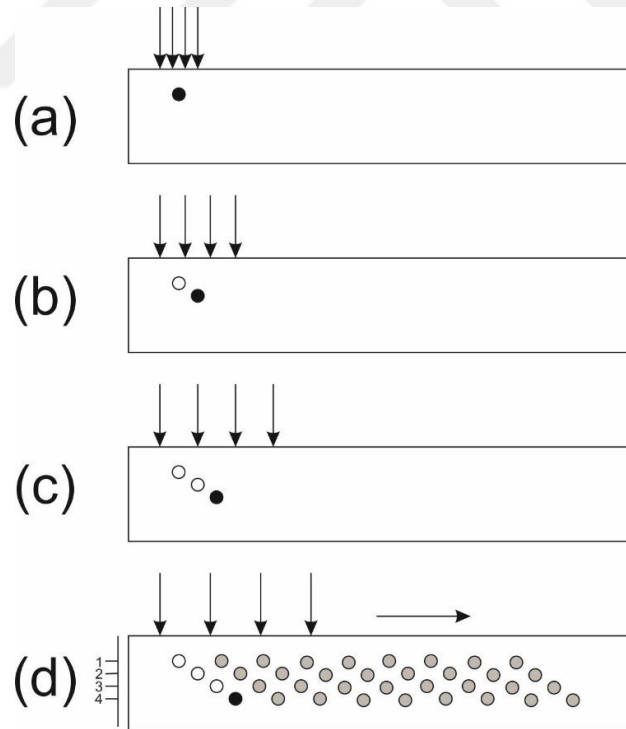


Şekil 3.1. Yer materyallerinin öz direnç aralıkları (Palacky, 1987' den değiştirilmiştir)

Öz direnç, malzemenin kendisinden kaynaklanan bir ölçüdür ve malzemenin miktarı veya şekli ile değişmez ve ohm-m olarak ifade edilir (Gaffney ve Gater, 2010). Elektrik öz direnç tomografi (Electrical Resistivity Tomography; ERT), çok sayıda elektrottan (tipik olarak >25 elektrot) yapılan öz direnç ölçümlerinden, yeraltının elektrik öz direnç dağılımını hesaplayan ve bir andıran kesit üreten yöntemdir (Daily vd.,2004; Gaffney vd., 2010). Lytle ve Dines (1978), ilk olarak ERT'nin temel konseptini, Schlumberger kardeşler tarafından tanıtılan geleneksel elektrik sondaj ile tomografinin yeni veri tersine çevirme yöntemlerinin bir evliliği olarak tanımlamışlardır (Daily vd., 2004). ERT'nin hem teorisinin hem de uygulamasının gelişimi, esas olarak 1980'lerin sonlarında ve 1990'larda gerçekleştirilmiştir. Tomografik ters çözüm, elektrik öz direnç verilerinin uzamsal görüntülemesinde daha önceki andıran kesit veya

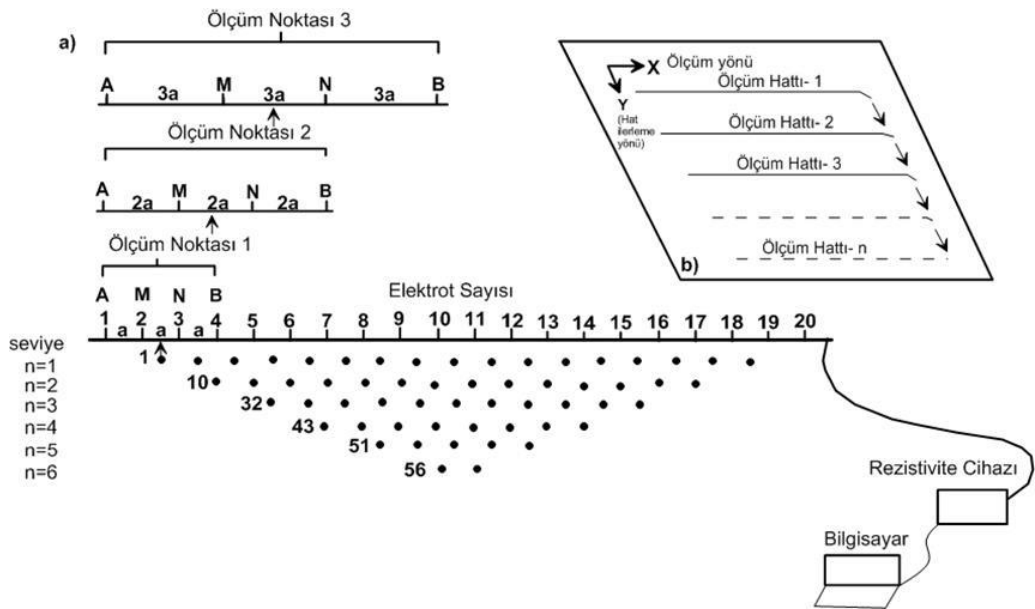
eğri uydurma yöntemlerinden daha genel ve doğru olan önemli yeni olanaklar sağlamıştır (Daily vd., 2004).

ERT yöntemi, geniş alanlarda uygulanabilir ve geleneksel bir toprak öz direnci araştırması ile aynı ekipman kullanılarak gerçekleştirilebilir. Dört elektrot kullanarak toprağa bir elektrik akımı enjekte edilir ve direnç ölçülür. Elektrotların mesafesi daha sonra iki yoldan biriyle genişletilir. Birincisi, elektrot dizilimi, her ardışık okuma için merkez nokta etrafında genişletilir. İkincisi ise, ilk elektrot sabit kalırken, diğerleri bir ERT kesiti oluşturmak için genişleyen bir elektrot dizilimi için genişletilir (Şekil 3.2). Burada, birinci elektrot sabit bir konumda tutulur ve kalan elektrotlar kademeli olarak genişletilir. Daha sonra ilk elektrot hareket ettirilir ve dizilim boyu tekrar genişletilerek eğik şeklinde (gri noktalar) bir andıran kesit oluşturulur. Her elektrot dizilimi için, görünür öz direnç uygun bir derinlikte (siyah noktalar) dizilim merkezinin altına atanır.



Şekil 3.2. ERT ölçüm prensibi (a-d) (Schmidt, 2013'den düzenlenmiştir)

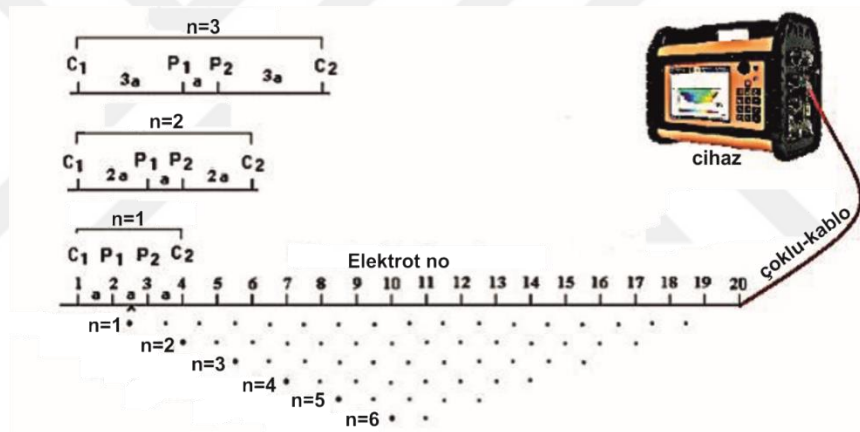
Otomatik elektrot dizilimleri, ERT verilerinin daha hızlı elde edilmesini sağlar. Birçok elektrottan oluşan sistem, bir hat boyunca düzenli aralıklarla (örneğin her 1 m'de bir) zemine yerleştirilir. Bu elektrotlar, bir bilgisayar tarafından kontrol edilen bir anahtarlama cihazına bağlanır. Elektriksel bir görüntü için veri seti oluşturmak için, yani yeraltı öz direnç dağılımının düşey bir kesiti için, veri noktaları tek bir hat boyunca bir dizi seviyede toplanır (Şekil 3.3). Bilgisayardaki yazılım, her bir ölçüm pozisyonu arasında ve seviyeden seviyeye otomatik olarak geçiş yapacak şekilde programlanmıştır. Anahtarlama ünitesi, her ölçüm için, akım enjeksiyonu ve potansiyel ölçümleri için kullanılan tam olarak dört elektrot seçer. İlk seviye, 4 komşu elektrotun, yani elektrotların, 1-2-3-4, 2-3-4-5, 3-4-5-6'nın tüm olası gruplamalarını kullanarak hat boyunca alınan ölçümlerden oluşur ve hattın sonuna kadar devam eder. Tüm elektrotlar kullanıldığında, yazılım bir seviye aşağısı için aktif elektrotlar arasındaki mesafeyi artırır; seviye 2, 1-3-5-7, 2-4-6-8, 3-5-7-9 vb. elektrotları kullanır. Ardışık her seviye ile aktif elektrotlar arasındaki mesafe artar, aralık arttıkça alınan ölçüm daha büyük bir derinlikte olur. Ortaya çıkan ERT verisi konturlanarak andıran kesit olarak görüntülenebilir (Şekil 3.3).



Şekil 3.3. Bir andıran kesit oluşturmak için çok elektrotlu bir ERT sisteminin şematik diyagramı. Birbirini takip eden her seviye için elektrotlar arası mesafe arttırılır (Loke, 2013'den düzenlenmiştir)

3.1.1. Wenner-Schlumberger Dizilimi

Wenner-Schlumberger dizilimi, Wenner ve Schlumberger dizilimlerinin birleşiminden oluşan ve ERT araştırmalarında yaygın olarak kullanılan melez bir dizilim olarak kabul edilir (Şekil 3.4). Aralık katsayısı (n) = 1 ile ölçümde, Wenner-Schlumberger dizilimi Wenner dizilimindeki ölçüme benzer (elektrot arasındaki mesafe = a), ancak, $n = 2$ ile ölçümde Wenner-Schlumberger dizilimi Schlumberger dizilimi ile aynıdır. Ölçülen görünür öz direnç değeri dizilimin orta noktasına atandığı bu elektrot düzeninde, a ve n ayrı ayrı veya birlikte artırılarak derin seviyelerden bilgi alınabilmektedir. Bu dizilim, ortalama bir araştırma derinliğine sahiptir ve hem yatay hem de düşey hedeflere orta düzeyde duyarlı olup, Wenner dizilimine kıyasla biraz daha iyi bir kapsama alanına sahiptir (Loke, 2013).



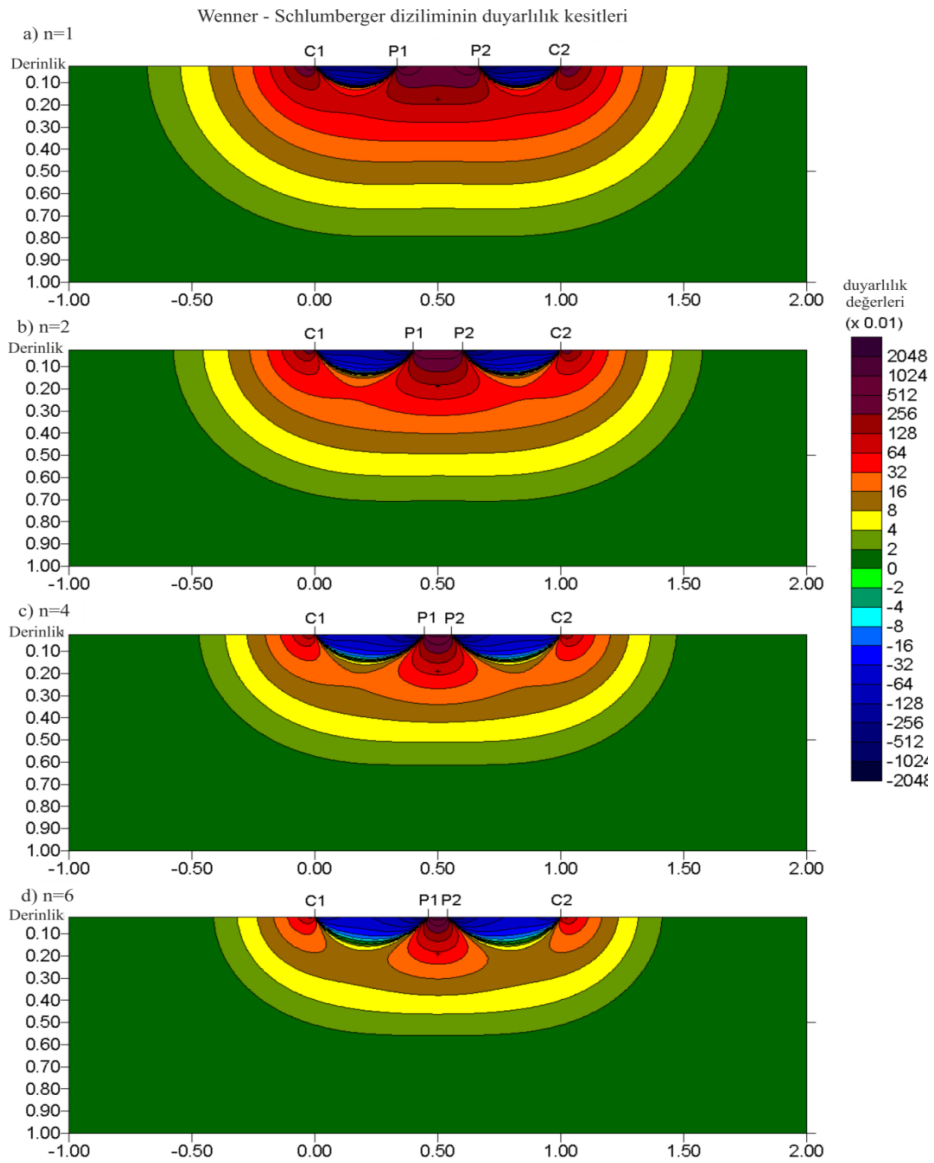
Şekil 3.4. Wenner-Schlumber diziliminde ölçüm prensibi ve veri noktalarının konumları (Loke, 2013'den düzenlenmiştir)

Wenner-Schlumberger elektrot dizilimi için görünür öz direnç (birimi Ωm) ve geometrik katsayı (denklem 3.1) aşağıda verilmektedir.

$$\rho_a = R \cdot k \quad \text{ve} \quad k = \pi n (n + 1) a, \quad (n=1,2,3,\dots) \quad (3.1)$$

Burada, ρ_a görünür öz direnci, R direnci ($R=\Delta V/I$; ΔV potansiyel farkını, I ise akımı göstermekte, a elektrotlar arasındaki mesafeyi, n ise ölçüm seviyelerini temsil etmektedir.

Bu dizilimin duyarlılık kesitinde, yüksek pozitif duyarlılığın n aralık katsayısının artmasıyla birlikte, dizilimin merkezi altında yoğunlaştığı gözlenmektedir (Şekil 3.5). Diğer bir ifadeyle, n=6 seviyesindeki potansiyel elektrotları (P1 ve P2) altındaki yüksek pozitif duyarlılığın, akım elektrotları (C1 ve C2) yakınındaki duyarlılık değerlerinden daha fazla ayrılmış olduğu görülmektedir. Dolayısıyla dizilimin, düşük n seviyelerinde yatay yapılara, büyük n seviyelerinde ise düşey yapılara kısmen duyarlı olması sonucu çıkarılır. Bu durum, Wenner-Schlumberger dizilimin yatay ve düşey süreksizliklere duyarlı olduğunu göstermektedir (Loke, 2013).



Şekil 3.5. Wenner Schlumberger dizilimi için duyarlılık kesitleri. a) n=1, b) n=2, c) n=4, d) n=6 (Loke, 2013)

3.2. Yer Radarı (GPR)

Yer radarı (Ground Penetrating Radar; GPR) yöntemi, 1970'lerden beri arkeolojide kullanılmaktadır, ancak diğer jeofizik tekniklerle karşılaştırıldığında göreceli olarak emekleme döneminde. GPR, arkeoloji jeofiziğinde kullanılan daha karmaşık yöntemlerden biri olarak ün kazanmıştır (Conyers, 2012). GPR, yeraltı özelliklerini tespit etmek için yeriçinde yayılan elektromanyetik (EM) dalgaları kullanır. Çoğu GPR uygulamasında kullanılan radar dalgaları, yaklaşık 10 ila 1500 MHz arasında değişen frekanslara sahiptir ve 30 m – 18 cm dalga boylarına eşittir (Ott, 2001). Bu radyasyon, televizyon ve FM Radyo, cep telefonları ve diğer kişisel iletişim cihazları ile aynı EM spektrumunun bir bölümünü kaplar (Conyers, 2012).

Yeraltı yapıları, yer içine dalgalar halinde yayılan EM sinyallerinin iletimi, gömülü süreksizliklerden yansımaları ve yüzey radar anteninde geri alınmaları arasında geçen süre ölçülerek GPR aracılığıyla tespit edilir (Conyers, 2012). Yerdeki fiziksel ve kimyasal değişiklikler, enerjinin bir kısmının yüzeye geri yansımaya neden olacaktır, bu yansıyan enerjinin gücü ve hızı, yeraltı özelliklerini yorumlamak için kullanılabilir.

Radar yayılımını ve yansımalarını etkileyen malzemelerin ölçülebilir özellikleri, elektrik iletkenliği (tutulan su miktarı ile ilgili) ve daha az ölçüde manyetik geçirgenliktir. Bu özellikler, malzemelerin dielektrik sabiti olarak da adlandırılan bağıl dielektrik geçirgenliğini (Relative Dielectric Permittivity; RDP) ve radar dalgalarının zayıflama oranını etkiler. RDP, gömülü malzemelerin elektrik ve manyetik özelliklerini hesaba katar ve bir malzemenin, uygulanan bir elektromanyetik alandan bir yük depolama ve daha sonra bu enerjiyi iletme yeteneğinin bir ölçüsüdür (Wensink, 1993). Dielektrik değeri ne kadar büyük olursa, yerde depolanabilecek yük o kadar fazla olur ve dalga iletimi o kadar yavaş olur (Conyers, 2012). Bağıl dielektrik geçirgenliği, radar enerjisinin derinliğe ne kadar iyi iletileceğinin genel bir ölçümüdür. Bu nedenle, yayılan radar enerjisinin hızını ve ayrıca gücünü ölçer (Conyers, 2012). Eğer yer, içinden bir elektromanyetik dalga geçerken yükleri depolayabiliyorsa, o zaman

dielektrikler, dalganın zemine çok hızlı bir şekilde nüfuz etmesini veya zemin yol boyunca enerjiyi depolamak için hareket ettiğinden, büyük derinliğe nüfuz etmesini engelleyecek şekilde hareket edecektir (Goodman ve Piro, 2013). Diğer taraftan, bir malzeme veya toprak zayıf veya mevcut olmayan dielektrik özelliklere sahip olduğunda, mikrodalgaların hareketine esasen hiçbir engel yoktur. Farklı malzeme ve kalıntılar sonucunda toprak kütlesi içerisindeki değişken dielektrik değerleri radar dalgasının yansımalarını etkiler (Çizelge 3.1).

Çizelge 3.1. Yaygın jeolojik materyallerin tipik bağlı dielektrik geçirgenlikleri (Conyers, 2012)

Materyal	RDP
Hava	1
Kuru kum	3-5
Kuru silt	3-30
Buz	3-4
Asfalt	3-5
Volkanik kül/pomza	4-7
Kireçtaşı	4-8
Granit	4-6
Donmuş tabaka	4-5
Kömür	4-5
Şeyl	5-15
Kil	5-40
Beton	6
Doygun silt	10-40
Kuru kumlu kıyı arazisi	10
Ortalama organik açıdan zengin yüzey toprağı	12
Bataklık veya ormanlık alan	12
Organik açıdan zengin tarım arazisi	15
Doygun kum	20-30
Tatlı su	80
Deniz suyu	81-88

Daha sonra yansıyan dalga için geçen süre, hız ve genlik okuması sağlayan dielektrik değerle orantılı olarak ilişkilidir. Tepki ne kadar hızlı olursa, özellik o kadar sığ, ne kadar yavaşsa o kadar derin olur; tepkinin genliği dielektrik değere bağlı olur (Goodman ve Piro, 2013). Yansıma miktarı, başta materyallerin dielektrik olmak üzere elektriksel parametreler arasındaki farkla ilgilidir; yer içinde gömülü kontrast yoksa yansıma olmaz.

Radar dalgasındaki sönüm, materyallerden geçen sinyal yoğunluğunun dağılımını ve azalmasını ifade eder. Kireçtaşı, kil, metaller ve tuzlu su gibi yüksek elektriksel iletkenlik değerleri ile karakterize edilen materyallerde yüksek sönüm değerleri bulunur. Yüksek sönüm değerleri tarama derinliğini sınırlar. Enerji yerde daha derin hareket ettikçe, yansıma için daha az elverişlidir ve gömülü ara yüzeylerdeki yansımaların genlikleri de azalır (Conyers, 2012). Başlangıçta iletilen enerjinin geri kalanı sonunda yerin içinden yüzeye doğru geri yansıtıldığında, bu kalan enerji, nihai olarak alıcı antene ulaşmadan önce içinden geçtiği materyaller içinde ek sönüme maruz kalacaktır. Sonuç olarak, radar enerjisi yerde hareket ettikçe kademeli olarak zayıflar (Conyers, 2012).

GPR'da penetrasyon derinliği sadece yer materyallerinin dielektrik değerlerine değil, aynı zamanda ve daha da önemlisi radarın çalışma frekansına da bağlıdır. Uzun dalga boylu bir anten, örneğin 100 MHz anten, 1000 MHz anten gibi kısa dalga boylu bir antenden daha derine (10 m veya daha fazla) nüfuz edecektir. Birçok radar sistemi geliştiricisi, anten türleri ve bunların tipik uygulamaları için bilgiler sağlar (Çizelge 3.2).

Çizelge 3.2. Anten türleri ve tipik uygulamaları (Geophysical Survey Systems Inc, 2015)

Frekans	Derinlik	Tipik uygulamalar
2600 MHz	0.4 m'ye kadar	Beton Değerlendirmesi
1600 MHz	0.5 m'ye kadar	Beton Değerlendirmesi
900 MHz	0-1 m	Beton Değerlendirmesi (Boşluk Tespiti)
400 MHz	0-4 m	Mühendislik, Çevre, Boşluk Tespiti, Arkeoloji
270 MHz	0-6 m	Mühendislik, Jeoteknik, Arkeoloji
200 MHz	0-9 m	Jeoteknik, Mühendislik, Çevre, Arkeoloji

GPR teknolojisi, birçok arkeolojik yapıyı ve kazılarda doğrulanabilecek stratigrafik ilişkileri etkin bir şekilde haritalayan birçok yeraltı arkeolojik araştırmasında uygulanmıştır. Eski mezar çukurları, yapı tabanları, yapı kalıntısı birikintileri, kaya duvarlar ve çeşitli yapılar GPR yöntemi için çok uygundur (Kvamme, 2001; Goodman vd., 2009; Burks ve Cook, 2011; Conyers, 2012). Roma dönemi alanların haritalanması, GPR'ın uzaktan algılama yeteneklerini

vurgulayan en basit uygulamalardan biri olduğunu kanıtlamıştır. Yerin altında gömülü olan yıkılmış Roma binalarının temelleri ve duvarları genellikle GPR ile kolayca tespit edilebilen ve haritalanabilen güçlü yansıma kontrastlarına sahiptirler (Nishimura, 2001; Neubauer vd., 2002; Piro vd., 2003; Goodman vd., 2004; Goodman ve Piro, 2013; Seren vd., 2007; Campana ve Piro, 2009; Novo vd., 2009).

ERT'nin yanı sıra GPR, jeomorfolojik araştırmalarda da etkin bir şekilde kullanılmaktadır. Daha uzun dalga boylarına sahip düşük frekanslı radar, önemli derinliklere nüfuz edebilir ve yüksek arkeolojik potansiyele sahip olabilecek tortuların tanımlanmasını sağlayan stratigrafik ilişkileri haritalamak için kullanılabilir. Conyers (2012), Arizona'nın Tucson bölgesindeki antik Hohokam dönemine ait organik toprak tabakasını tanımlamak için GPR yöntemini uygulamış, radargramlarda gömülü toprak tabakası ile aynı yükseklikte belirgin yansımalar yorumlamıştır. Yöntem ayrıca, gömülü topografik ve jeomorfolojik özellikleri belirlemek için ERT, Elektromanyetik İndüksiyon (EM/EMI) ve jeoarkeolojik yöntemlerin yanında, yorumlamaları desteklemek amacıyla da yaygın olarak kullanılmaktadır (Brown, 2002; Carey vd., 2006; Mansfield, 2007).

GPR bir materyali kesin bir şekilde tanımlayamaz, yalnızca iki materyal arasındaki sınırdaki mevcut olan dielektrik kontrastın derecesini ölçebilir (Goodman ve Piro, 2013). Herhangi bir mevkide, bir Roma dönemine ait sahadaki tuğla duvar gibi belirli malzemelerle ilişkilendirilen benzer kontrastları belirleme potansiyeli vardır. Çoğu zaman, metal işleri özellikle yüzeyde veya yüzeye yakın olduğunda tanımlanabilir. Metal nesnelere genellikle çoklu yansımalar oluşturabilir veya bir dizi sıg yansıma hiperbollerini oluşturarak altlarındaki özelliklerin bir kısmını veya tamamını engelleyebilir. Bu, bazı durumlarda yolu güçlendirmek için metal takviye çubuklarının kullanıldığı yol yüzeylerinde GPR araştırmaları yapılırken yaygındır. Bu gibi durumlarda, yansıma profillerinin genliği ve görünümü sayesinde malzemeleri tanımak mümkündür. Bununla birlikte, çoğunlukla, toprak altında olan ara yüzeyler ve yapılar arasındaki kontrastlar sahaya özgüdür ve yaygın materyal tepkilerinin ve hiperbol profillerinin belirgin bir izini engeller (Goodman ve Piro, 2013).

Yüksek yansıma özelliklerine sahip kıyasal şekiller, delta ortamları gibi alanlarda GPR yöntemi başarılı şekilde uygulanabilmektedir (Buynevich vd., 2009). Bu ortamlarda, çeşitli çökme süreçleri tarafından malzemeler güçlü GPR yansımaları veren farklı tane boyutuna ve mineralleşmeye sahiptirler (Buynevich vd., 2009). Ancak GPR yöntemi, iletken özelliğe sahip ortamlarda özellikle de, ince taneli (silt ve kil) ve tuzlu/az tuzlu kıyı ortamlarında sinyal zayıflaması ve yitimi nedeniyle tercih edilmemektedir (Buynevich vd., 2009). Oldukça kalın, demir içeriği bakımından zengin topraklarda ve ağır metal konsantrasyonu içeren litolojilerde radar sinyalinin manyetik bileşeni zayıflamaya uğramaktadır. Çimentolaşma ve diğer çökme sonrası süreçler de sedimanlardaki dielektrik özellikleri değiştirebilmektedirler (Topp vd., 1980). GPR yöntemi, güncel delta araştırmalarında kısmen başarılı olmuştur (Jol ve Smith, 1991; 1992; Smith ve Jol, 1992; Tary vd., 2007). Denizel deltalar barındırdıkları tuzlu gözenek suyu ve çamur nedeniyle sinyal zayıflamasına yol açtıkları için GPR görüntülemesine uygun değildirler, ancak Buynevich vd. (2009) tarafından bir göl deltası başarıyla görüntülenebilmiştir.

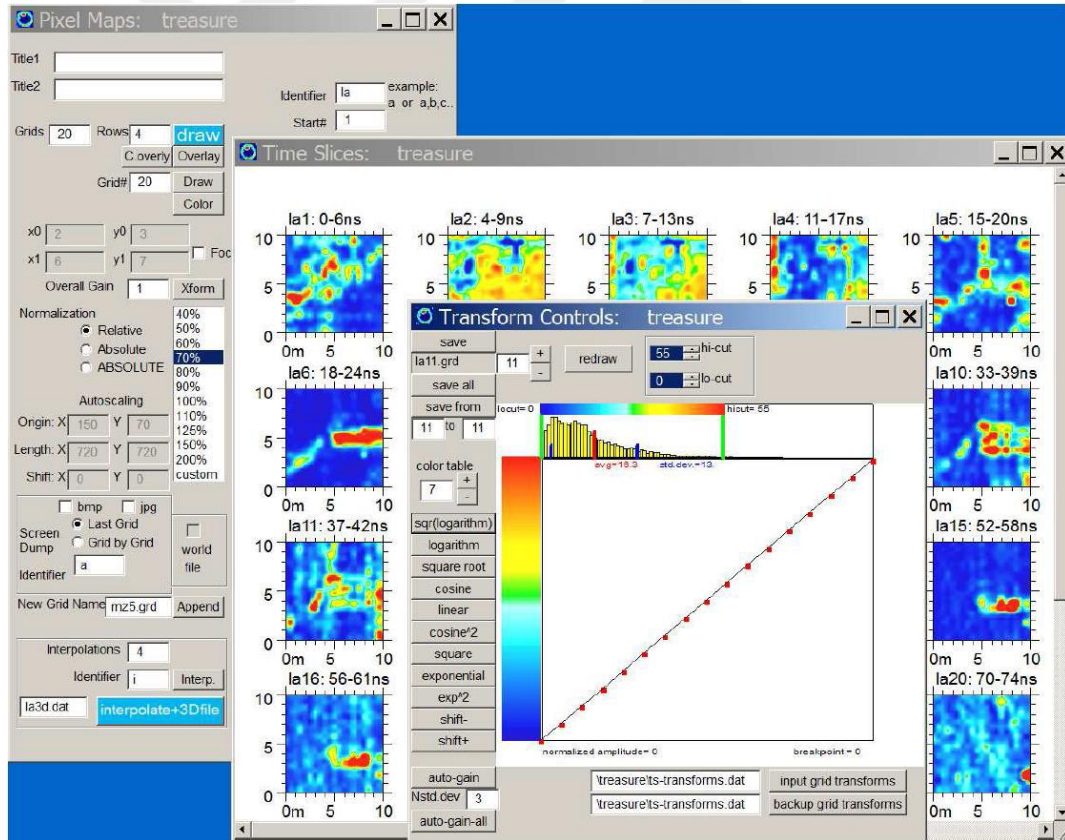
3. 3. ERT ve GPR Verilerinin Değerlendirilmesi

Her bir jeofizik yöntemde özgü veri işlem yaklaşımları vardır. Jeofizik verilerin işlenmesi ve görselleştirilmesi birbiriyle ilişkilidir ve tümü, verileri yorumlama ve arkeolojik açıdan önemli anomalileri belirleme kapasitesine yardımcı olur. Veri işlem yaklaşımları ve görselleştirme arasındaki ilişki, birbirine bağımlı bir süreçtir. Ham veriler belirli formatlarda görselleştirilir ve her tekniğin kendi kuralları vardır. Ham veride bazı düzensizlikler sebebiyle verilerin daha iyi görselleştirilmesini sağlamak, gürültüleri veya düzensizlikleri azaltmak için ham verilere filtreler uygulanır.

Jeofizik veriler sayısal olarak kaydedilir. İlk zamanlardaki veri toplama yöntemleri, konum bilgisinin yanı sıra ölçümlerin el ile gösterimini içermekteyken, günümüzde artık çoğu cihaz verileri gerçek zamanlı sayısal kayıt edebilmektedir. Veri toplama ve dışa aktarma kolaylığı, çeşitli görselleştirme

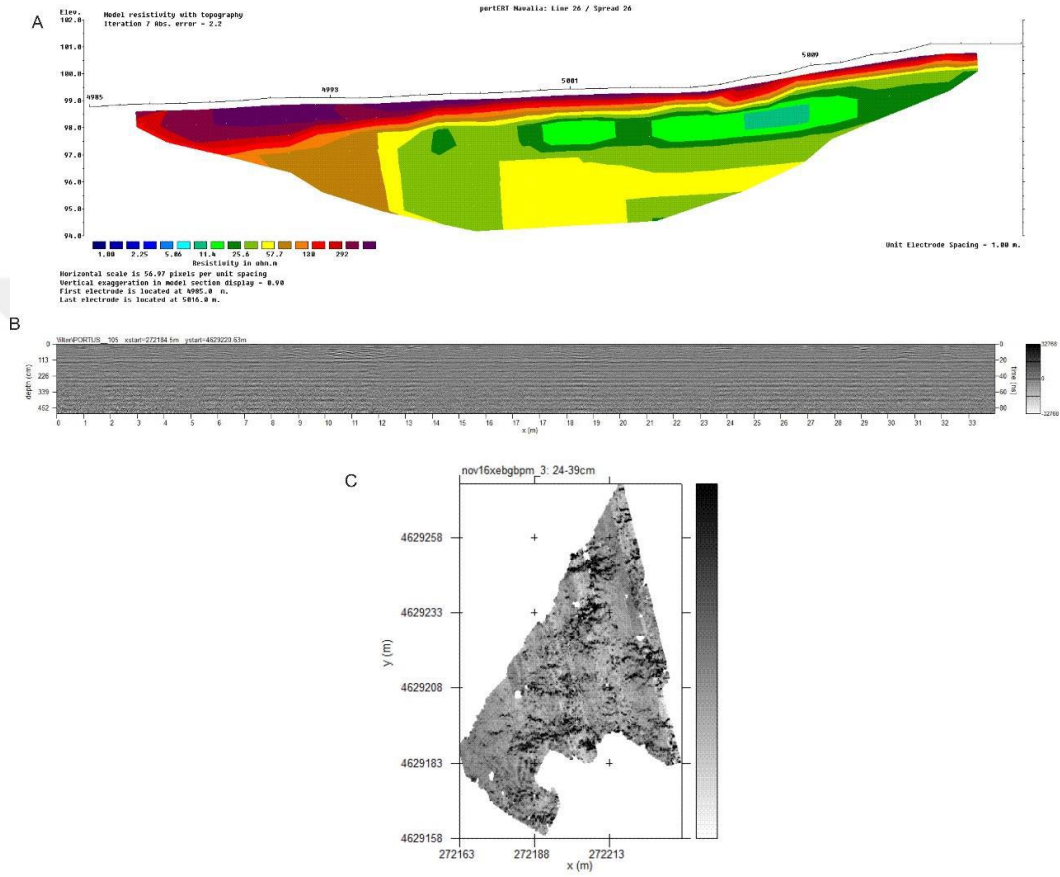
yolları açmıştır. Veriler tablolarda, tek bir kesitte veya grafikler halinde sunulabilir (Conolly ve Lake, 2006).

Jeofizik verilerin sunulmasında kullanılan renklendirme işlemleri anomalilerin yorumlanmasında önemli bir yer tutar. GPR zaman dilimlerini renklendirmenin en yaygın yollarından biri, ortalamadan standart sapmaya dayalı olarak verilerin çeşitli bölümlerine renkler uygulamaktır (Şekil 3.6). Verilere, ortalamanın her iki tarafında belirli sayıda standart sapma bulunup bulunmadığına bağlı olarak en yüksek renk değeri veya en düşük renk değeri verilebilir. Her GPR veri kümesi kendi ideal renklendirme şemasına sahiptir (Goodman ve Piro., 2013). Örneğin, GPRslice (Goodman, 2016) yazılımında renk çubuğu, logaritmik, karekök, kosinüs gibi çeşitli parametreler sunulduğu gibi (Şekil 3.6), manuel olarak da farklı formatta gösterilebilmektedir.



Şekil 3.6. GPRslice yazılımında GPR renk dönüşümü kontrolleri (Goodman, 2016)

ERT ve GPR veri setleri için, ya yer boyunca düşey kesitler (ERT–andıran kesitler; GPR–radargramlar) (Şekil 3.7a) ya da verilerin kuş bakışı görünümünü veya plan görüntülerini sunan derinlik/zaman dilimleri (Şekil 3.7b, c) gibi sunum yaklaşımları kullanılır. Üç-boyutlu veriler, hacim modelleri veya yüzey haritaları olarak sunulabilir.

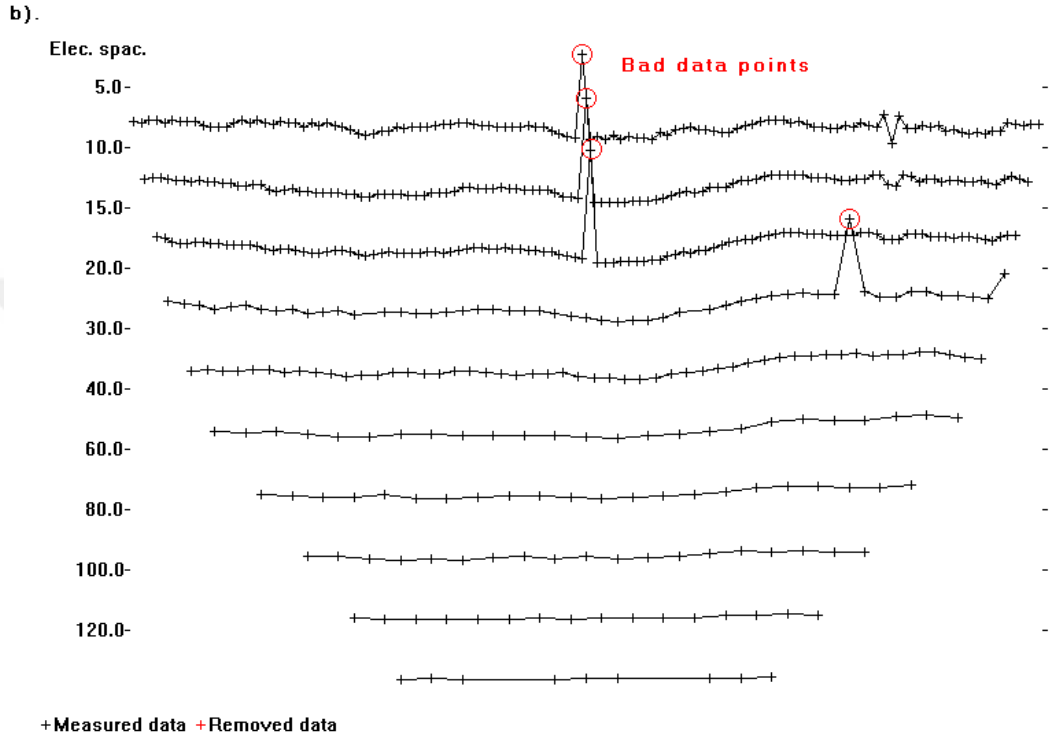
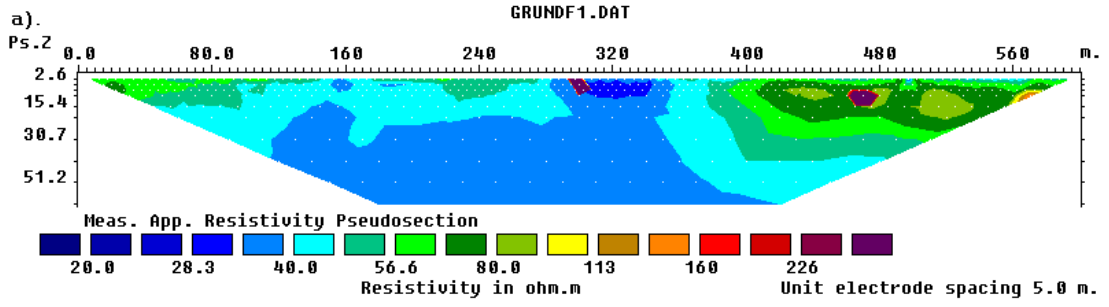


Şekil 3.7. ERT ve GPR görselleştirmeleri. a: ERT andıran kesit, b: GPR radargram, c: GPR zaman dilimi (Richley, 2018)

Veri işlem, arkeoloji jeofiziği içinde iki genel amaca hizmet eder; istenmeyen arka plan gürültüsünü ortadan kaldırmak ve analize yardımcı olmak için verilerin grafiksel temsillerini iyileştirmek. Gürültüler tüm jeofizik verilerde bulunabilir ve veri toplama stratejisi, kullanılan belirli alet, araştırma koşullarındaki günlük değişiklikler ve arka plan paraziti dahil olmak üzere bir dizi kaynaktan kaynaklanabilir. Veriler, kusurları gizlemek için değil, yoruma yardımcı olmak ve diğerlerini yorumun geçerliliğine ikna etmek için işlenir (Aspinall vd., 2009).

ERT ölçümleri genellikle, yerin gerçek öz direnç dağılımını elde etmek için bir ters çözüm adı verilen bir süreç aracılığıyla görünür öz direnç değerlerine indirgenir. Çeşitli ters çözüm yöntemleri önerilmiş (Szymanski vd., 1993) ve Zohdy (1989)'nin yöntemine dayalı algoritmalar çok popüler hale gelmiştir (Schmidt, 2013). Pratik olarak tüm ticari çoklu elektrot sistemleri, bu dönüşümü gerçekleştirmek için bilgisayar yazılımını barındırmaktadır. Çeşitli jeolojik ortamlarda toplanan çok çeşitli veri setleri nedeniyle, tek bir ters çözüm yöntemi her durumda en uygun sonuçları sağlamayabilir. Bu çalışmada kullanılan Res2DInv (Loke ve Barker, 1995) programı, bilinen jeolojiye daha yakın sonuçlar elde etmek için kullanıcı tarafından değiştirilebilen bir dizi ayara sahiptir.

ERT yönteminde iyi bir model elde etmek için verilerin eşit kalitede olması gerekir. Kötü veri noktaları "sistemik" ve "rastgele" gürültü olarak iki geniş kategoriye ayrılır. Sistemik gürültüye genellikle, ölçüm sırasındaki okumanın gerçek bir öz direnç ölçümünü temsil etmemesi gibi bir tür arıza neden olur. Kabloda kopmalar, elektrotta çok zayıf toprak teması, klipsi elektrotta takmayı unutma, kabloları yanlış yönde bağlama gibi bir dizi senaryo buna neden olabilir. Genellikle sınırlı sayıda okumada mevcut olduğundan ve kötü değerlerin kolayca fark edilebilir hale gelmesine neden olduğundan, sistemik gürültünün bir veri kümesinde saptanması oldukça kolaydır. Rastgele gürültü, tüm okumaları etkileyen ve eşdeğer gürültüsüz okumalardan daha düşük veya daha yüksek okumalarla sonuçlanan tellürik akımlar gibi etkileri içerir. Kural olarak, bir veri setinin ters çözümünü gerçekleştirmeden önce, veriler ilk önce bir andıran kesit grafiği (Şekil 3.8a) ve ayrıca bir profil grafiği (Şekil 3.8b) olarak analiz edilmelidir. "Sistemik" gürültüye sahip bozuk veri noktaları, alışılmadık derecede düşük veya yüksek değerlere sahip bir nokta olarak ortaya çıkabilmektedir (Şekil 3.8a). Profil formunda diğerlerinden ayrılırlar ve veri setinden manuel olarak kolayca çıkarılabilirler.

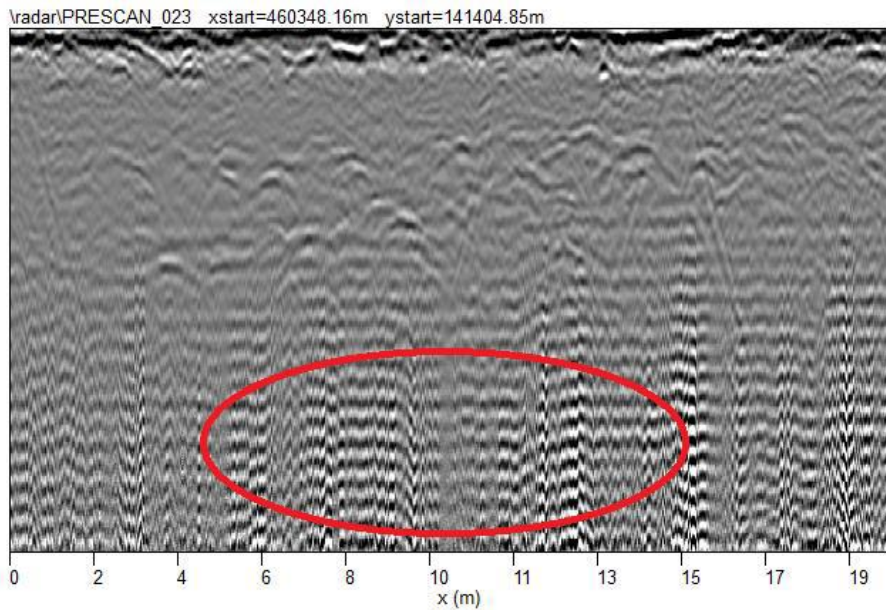


Şekil 3.8. Birkaç hatalı veri noktası içeren bir saha veri seti örneği. En belirgin kötü datum noktaları, 300 metre ve 470 metre uzaklıkları altında işaretlenmiştir. (a) andıran kesit formunda ve (b) profil formundaki görünür özdirenç verileri (Loke, 2013)

Çeşitli ters çözüm yöntemleri vardır, ancak Loke ve Barker (1995) tarafından daha da geliştirilen Zohdy yöntemi (Zohdy, 1989) günümüzde sıklıkla kullanılmaktadır. Yazılım bloklardan oluşan bir iki-boyutlu yeraltı ağı kullanır. Bu ağdaki bloklara özdirenç değeri atanarak düz çözüm için bir başlangıç modeli oluşturulur. Yazılım daha sonra bu tür bir ağ üzerinde ölçülecek olan iki-boyutlu görünür özdirenç veriyi hesaplar (düz çözüm). Bu sonuçlar gerçek ölçümlerden farklı olacaktır, çünkü bu ilk tahmin yalnızca kaba bir tahmindir ve

yazılım daha sonra bu hatayı azaltmak için modeldeki blok özdirençlerini ayarlar. Veri yeniden hesaplanır ve özdirençler daha da ayarlanır. Bu süreç, hesaplanan ve ölçülen veriler arasında tatmin edici bir eşleşmeye yol açan bir dizi özdirenç değeri bulunana kadar yinelenir. Çözüm tek değildir, çünkü çeşitli derinlik ve özdirenç değerleri kombinasyonları, hemen hemen aynı veriye yol açabilir (Schmidt, 2013). Bu nedenle, yüksek/düşük özdirençlerin arkeolojik özellikleri mi yoksa doğal tortular ve nem içeriğindeki değişiklikten mi kaynaklandığını doğru bir şekilde belirlemek her zaman mümkün değildir (Richley, 2018).

GPR verileri gürültüden etkilenir ve genellikle kayıt sırasında veya doğrudan kaydedildikten sonra görüntülenen yansıma profillerinde kolaylıkla fark edilebilir (Şekil 3.9). Yansıma profilleri genellikle hava dalgaları, çoklu yansımalar ve nokta kaynaklı yansıma hiperbollerini gibi yabancı yansımaları içerebilir ve bu da yansımaların yorumlanmasını veya kullanılabilir haritalara dönüştürülmesini zorlaştırır (Conyers, 2012). Yere nüfuz eden radar, radyo ve cep telefonu sinyalleri gibi arka plan elektromanyetik (EM) emisyonlarından, çalılıklardan, topografik değişikliklerden ve kazı yoluyla toprak içeriğinin bozulmasından büyük ölçüde etkilenebilir.



Şekil 3.9. Veri setindeki gürültüyü gösteren bir örnek GPR radargramı

GPR veri setlerinde parazit görünümünü ortadan kaldırmak ve/veya azaltmak için bir dizi sinyal işleme yaklaşımları (Çizelge 3.3) kullanılır.

Çizelge 3.3. GPR veri işlem amaçları ve yöntemleri (Conyers, 2012)

Amaç	Yöntem
Yansıma profillerinde doğru düşey ve yatay ölçekler; enine kesitler boyunca ortalama veya pürüzsüz yansımalar	İz yığıma
Sistem gürültüsü ve frekans girişimi tarafından oluşturulan yatay bantları kaldırma	Arka plan kaldırma; düşey yüksek geçişli filtreler
Yüksek frekanslı gürültüyü ortadan kaldırma	Düşük/geçiş frekans filtreleri; F-k filtresi
Birden çok yansımayı kaldırma	Dekonvolüsyon
Nokta kaynaklı hiperbolleri yok etme; dik eğimli katmanların yönünü düzeltme	Göç

İyi bir verinin oluşması için dikkatli ölçüm sonrasında, yorumlamaya uygun bir filtreleme gerekmektedir. Bu işlemler için ReflexW (Sandmeier, 2005) programı kullanılmıştır. Ham bir GPR verisi (Şekil 3.10a) için uygulanan veri işlem aşamaları (Leucci ve Negri, 2006) aşağıda özetlenmiştir.

İlk zaman filtresi: Bu filtre her iz için ayrı ayrı uygulanarak hava boşlukları en aza indirgenir ve diğer filtrelemeler için ön hazırlık yapılır (Şekil 3.10b).

Akım düzeltmesi: Bu filtre her iz için ayrı ayrı uygulanır. Bu seçenek ile tüm izlerden ortalama olarak DC akım ile oluşmuş etkiler temizlenir (Şekil 3.10c).

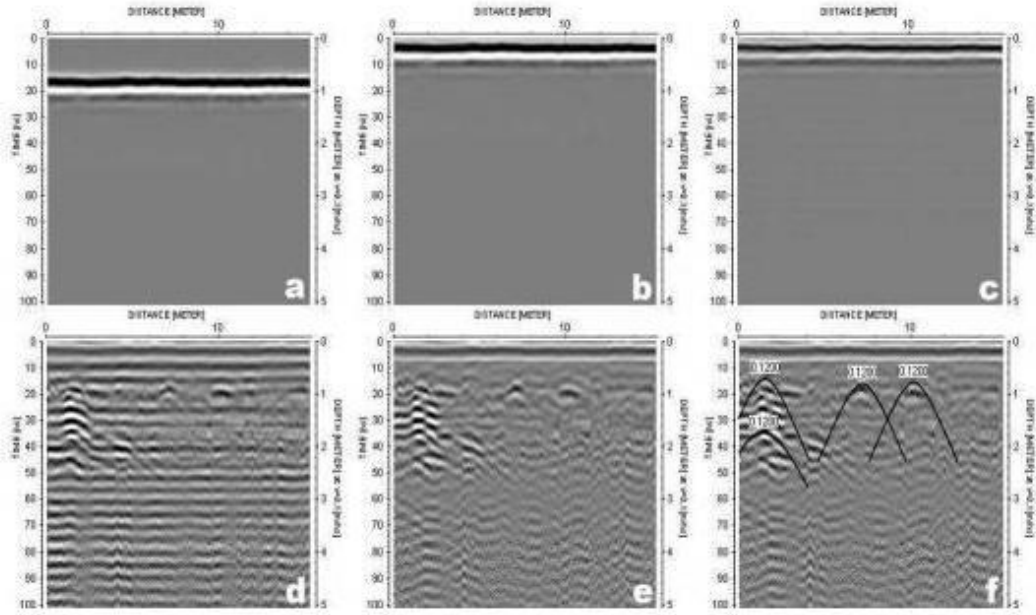
Enerji geciktirme: Bu filtre her iz için ayrı ayrı uygulanır. Filtre aktivitesi ile seçilen artış eğrisi “y” ekseninde tüm profile uygulanır ve enerjideki gecikmeler ortaya çıkartılır. Ancak tüm profile uygulanan bu artış ve azalış toplamda gerçekçiliği etkilememekte sadece görünürlüğü arttırmaktadır. Tüm işlemler sonucunda izlerdeki enerjiler sabit bir değer ile çarpılır (Şekil 3.10d).

Ortalama değer temizleme: Bu filtre belirlenen izlere uygulanır. Filtre her seferinde seçilen belirli bir sayıda iz üzerinde işletilir. Aynı zamanda bu filtre

kaydırmalı arka plan filtresi olarak da adlandırılır. Belirlenen sayıdaki iz üzerine uygulanan filtrede belirlenen değer toplam olarak izlere uygulanır ortada bulunan iz sabit tutularak diğerlerine yayılır. Görsel olarak bir çerçeve içerisinde kalan izlerin ortasındakine göre değer almalarına dayanır (Şekil 3.10e).

Hız analizi: Kırılma hiperbolları ölçümlere uygulanarak hız değerleri okunur (Şekil 3.10f).

GPR verileri, gri tonlamalı veya renkli radargramlar veya zeminin farklı derinliklerinde bir alanın plan görünümünü sunan zaman dilimleri olarak iki formatta görselleştirilir. Zaman dilimleri, aynı alan boyunca aralıklarla toplanan çoklu radargramlar üzerinde dilimleme, yeniden örnekleme ve XYZ işlemi ve ardından elde edilen verileri gridleme işlemiyle oluşturulur (Conyers 2012).

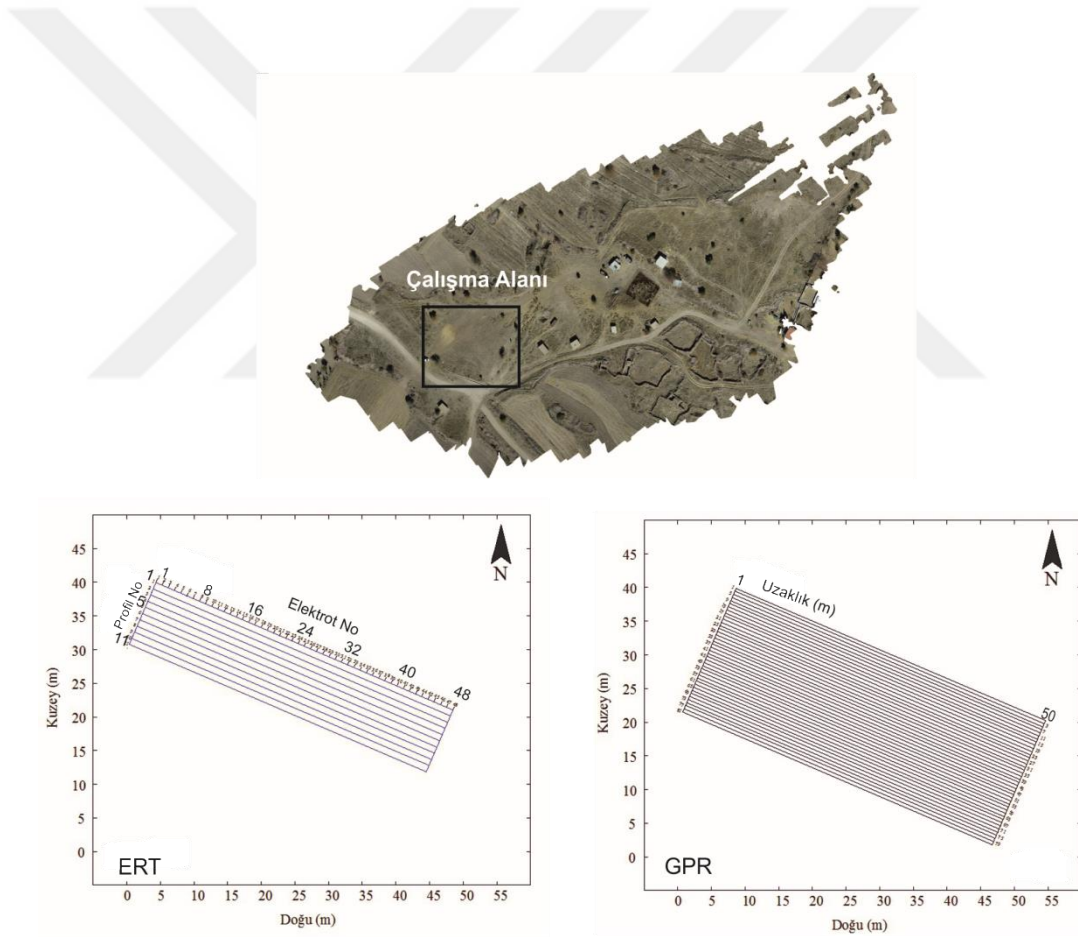


Şekil 3.10. Bir GPR profili için veri işlem aşamaları. (a) Ham veri, (b) ilk zaman filtresi, (c) akım düzeltmesi, (d) enerji geciktirme, (e) ortalama değer temizleme ve (f) hız analizi (Leucci ve Negri, 2006)

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

4.1. Araştırma Planı

Saha çalışması 20 m x 50 m boyutunda bir dikdörtgen alanda gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.1). Çalışma alanı köşe koordinatları Garmin Etrex 30 marka GPS (Global Positioning System: Küresel Konumlandırma Sistemi) ölçümleriyle belirlenmiştir. Ayrıca, DJI PHANTOM 4 PRO marka drone vasıtasıyla çalışma alanının ortofoto haritası oluşturulmuştur (Şekil 4. 1). Ölçüm profillerinin birbirine paralel olması amacıyla tüm alanda ip çekme yöntemi kullanılmıştır.



Şekil 4.1. Çalışma sahası (üstte), ERT (solda) ve GPR (sağda) ölçüm düzenleri

Arazi çalışması kapsamında kullanılan ERT ve GPR yöntemlerine ait ekipmanlar, veri toplama teknikleri, veri değerlendirme yöntemleri ve veri sunum şekilleri Çizelge 4.1’de özetlenmiştir.

Çizelge 4.1. Saha çalışmasında kullanılan yöntem, cihaz, veri toplama teknikleri, veri işlem ve veri sunum teknikleri

Yöntem	Kullanılan cihaz	Veri toplama	Veri işlem	Veri sunumu
Elektrik Özdirenç Tomografi (ERT)	Ambregeo Mangusto	Wenner-Schlumberger Elektrot Aralığı: 1m Toplam 11 profil	Res2DInv	Özdirenç ve derinlik kesitleri
Yer Radarı (GPR)	Mala Ramac X3m	Merkez Frekansı: 250 MHz Toplam zaman penceresi: 80 ns Zaman örnekleme aralığı: 0.1461 ns İz artımı: 0.0494 m Toplam 40 profil	ReflexW GPR-Slice v7 Akım düzeltmesi Bant geçişli filtre Arka plan kaldırma Otomatik Kazanç Kontrol	Zaman kesitleri ve hacimsel sunum

Elektrik özdirenç araştırması 48 m uzunluğunda ve 1 m aralıklı paralel profiller boyunca toplam 11 profilde 10 m x 47 m dikdörtgen şeklindeki alanda uygulanmıştır. ERT ölçümleri Wenner-Schlumberger dizilim tekniği ile çok kanallı rezistivite cihazı (Ambrogeo Strumenti per Geofisica) kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.2). Wenner-Schlumberger elektrot dizilimi genellikle diğer elektrot dizilimlerine göre daha yüksek genlikli sinyale sahip ve derinliğe bağlı özdirenç değişimlerine daha duyarlıdır (Dahlin ve Zhou, 2004).



Şekil 4.2. ERT ölçüm cihazı ve sahadan görüntüler

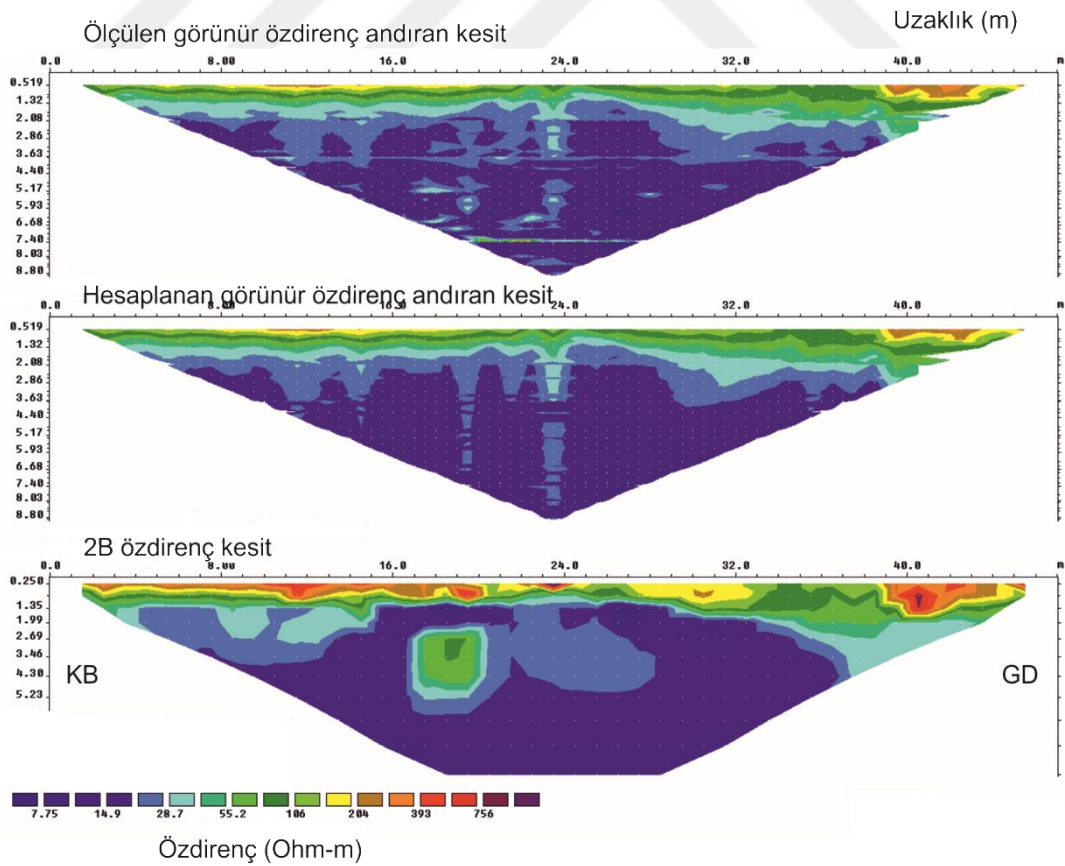
GPR ölçümleri 250 MHz antene sahip Mala Ramac X3m marka cihaz kullanılarak yine 0.5 m aralıklarla birbiri ile paralel çeşitli uzunlukta hatlar boyunca toplam 40 profil de gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.3).



Şekil 4.3. GPR ölçüm cihazı ve sahadan görüntüler

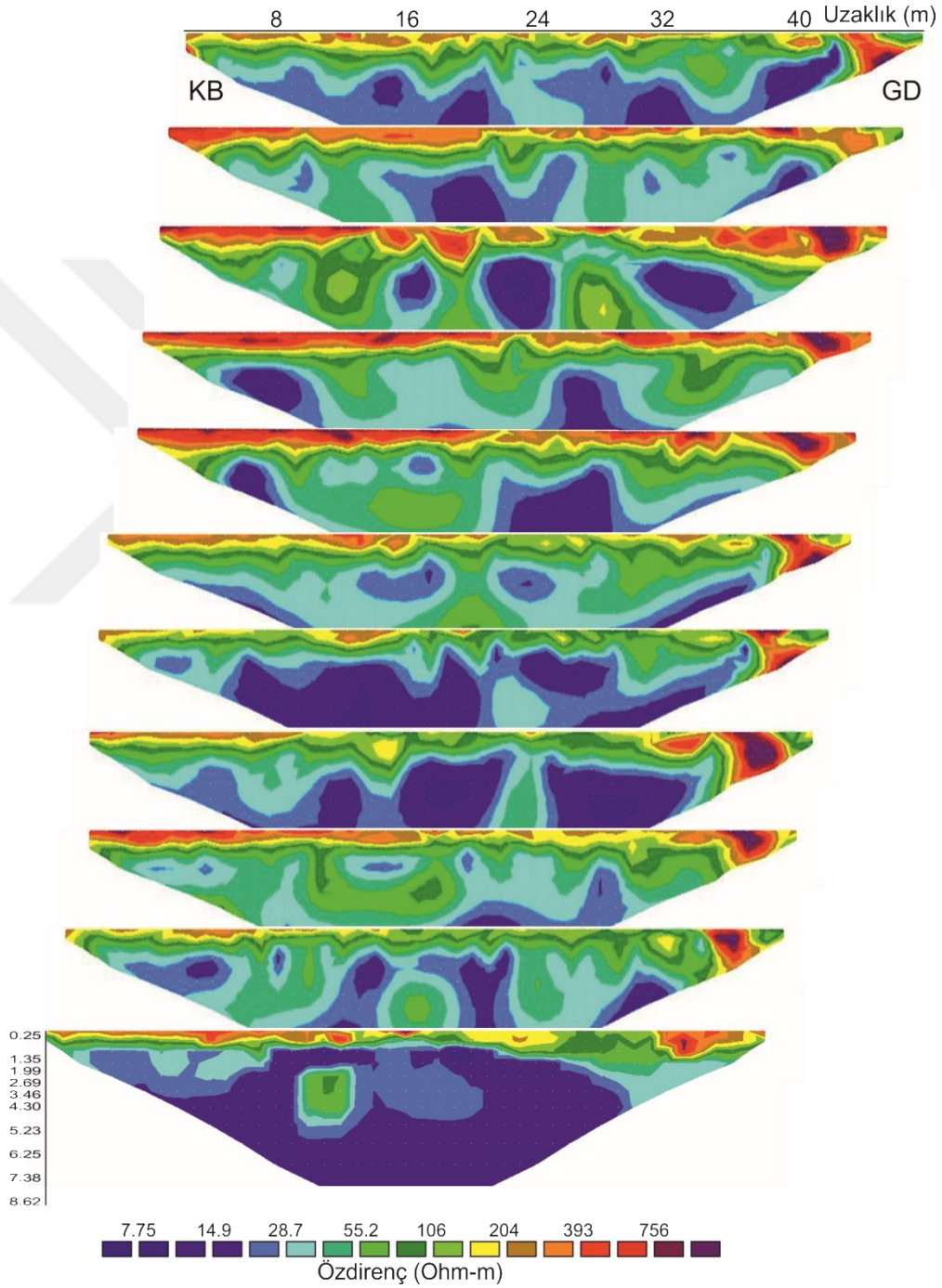
4.2. ERT Araştırma Bulguları

Saha ERT araştırmalarından elde edilen görünür özdirenç verilerin ters çözümü için Res2DInv yazılımı (Loke ve Barker, 1995) kullanılmıştır. Sahadan ölçülen verilerin ters çözümleri, genel olarak 4-6 yineleme ve %5-15 hata aralığında gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.4, elektrik özdirenç ölçümlerindeki birinci profile ait sahadan ölçülen görünür özdirenç andıran kesiti (üstte), hesaplanan görünür özdirenç andıran kesiti (ortada) ve ters çözümden hesaplanan 2B özdirenç modeli (altta) göstermektedir. ERT kesitindeki düşük özdirençli bölgeler (mavi renk tonları) yan kayaç özelliklerine karşılık gelmektedir. Orta ve yüksek özdirençli bölgeler (yeşil-koyu kahve renk tonları) ise gömülü kalıntıları karakterize etmektedir. Yüzeiden yaklaşık 1.5 m derinliğe kadar olan dirençli bölgeler yer yer yıkık duvar kalıntılarına, 2.5-4.5 m derinlik aralığında yaklaşık 2 m x 2 m boyutlarındaki özdirenç belirti ise duvar kalıntısına karşılık gelmektedir.



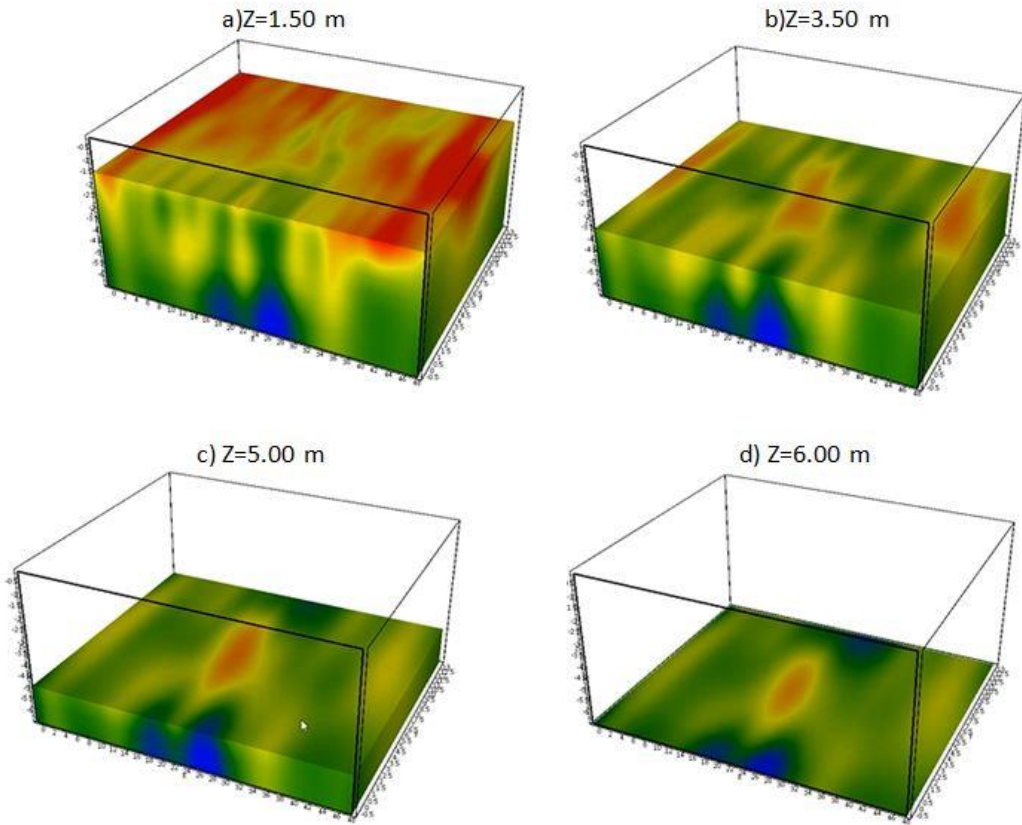
Şekil 4.4. ERT-1 profili için ters çözüm sonuçları

Çalışma sahasından elde edilen 11 adet 2B ERT kesitleri Şekil 4.5'te arka arkaya birleştirilerek verilmiştir. Elde edilen bu kesitler ile yaklaşık 8 m derinliğe kadar olan öz direnç dağılımı görülmektedir. Buna göre saha genelinde öz direnç değerlerinin değişim aralığı yaklaşık olarak 5 Ω m ile 1000 Ω m arasındadır. Yüksek öz direnç değişimler gömülü kalıntıları karakterize etmektedir.



Şekil 4.5. 2B ERT kesitlerinin birleştirilmiş görüntüsü

Farklı derinlikler için ERT kat haritaları Şekil 4.6'da verilmiştir. $Z=1.50$ m özdirenç kat haritasında nispeten çevre kayaca göre yüksek özdirençli alanlar (kırmızı renkli) oldukça yaygındır. Bu da gömülü duvar kalıntılarına karşılık gelmektedir (Şekil 4.6a). $Z=3.5$ m, $Z=5$ m ve $Z=6$ m derinliklere ait özdirenç kat haritalarında da yüksek özdirençlerle karakterize olmuş gömülü yapı kalıntılarının devam ettiği görülmektedir (Şekil 4.6b-d).

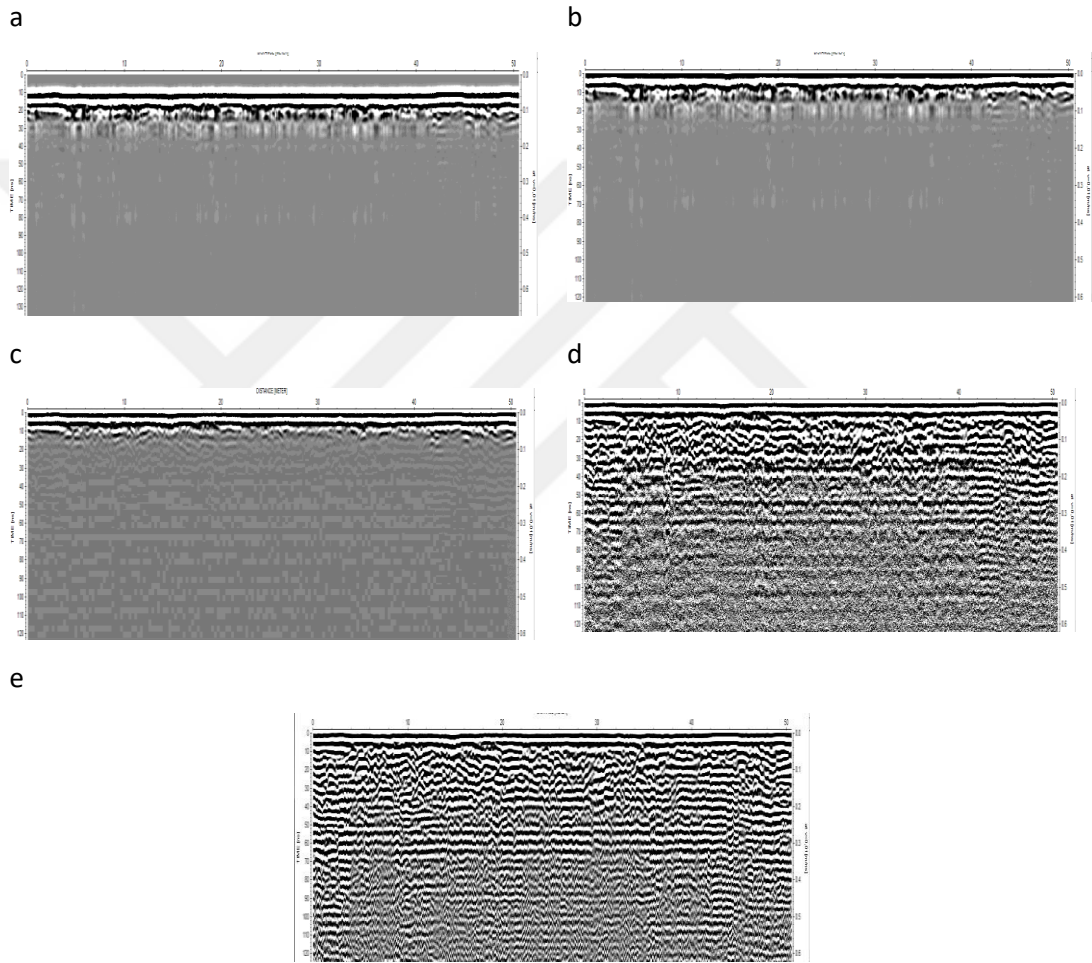


Şekil 4.6. 2B ERT verilerinden elde edilen özdirenç kat haritaları

4.3. GPR Araştırma Bulguları

GPR verileri anlaşılabilir görüntü formatlarında sunulduğunda daha kullanışlı olmaktadır (Daniels vd., 1988). Bu amaç doğrultusunda araziden elde edilen ham verilerin yorumlanabilmesi için yer radarı verilerine ReflexW (Sandmeier, 2005) yazılımı kullanılarak veri işlem aşamaları uygulanmıştır.

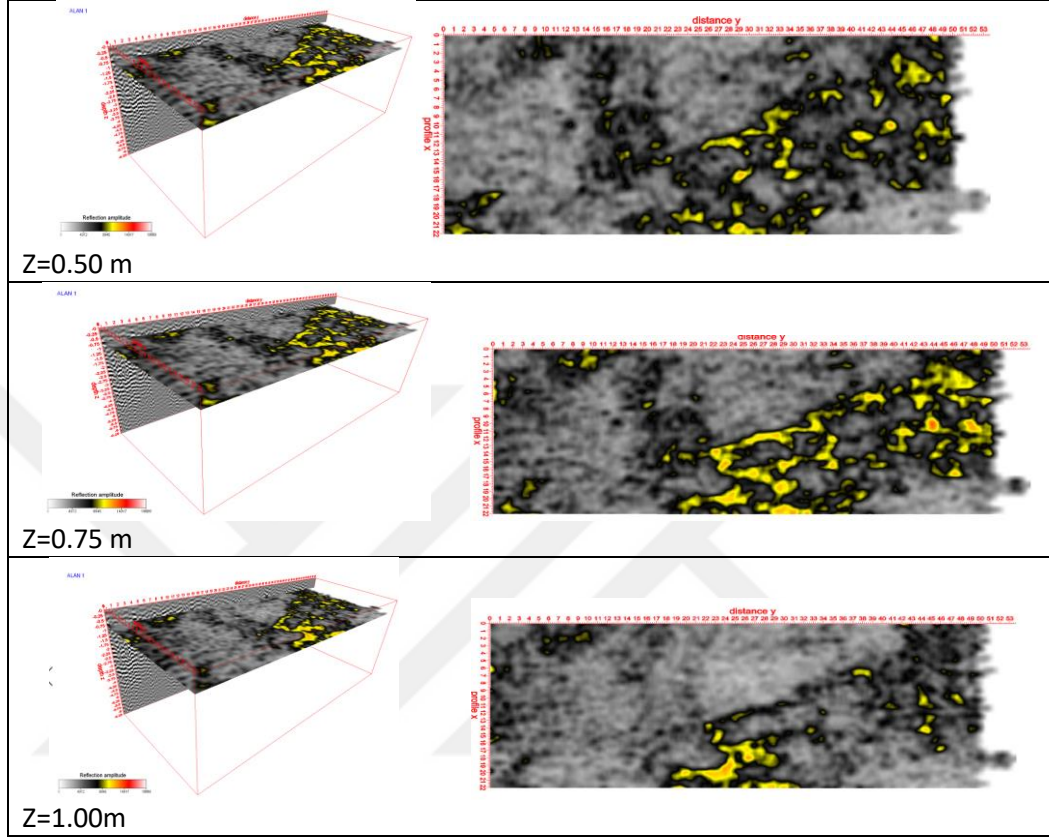
Yapılan veri işlem aşamalarını temsilen birinci radar rofiline ait veri işlem öncesi ve sonrası radargramlar sırasıyla gösterilmiştir (Şekil 4.7). Elde edilen işlenmemiş radar verilerine (Şekil 4.7a) sırasıyla; ilk zaman filtresi (Şekil 4.7b), akım düzeltmesi (Şekil 4.7c), enerji geciktirme (Şekil 4.7d), band geçişli süzgeç (200-800 MHz) (Şekil 4.7e) ve arka plan kaldırma veri işlem aşamaları uygulanarak yoruma hazır hale getirilmiştir. Veri işlem aşamaları ile radargram izleri belirgin olarak ayırt edilebilmektedir.



Şekil 4. 7. GPR ölçümlerinden birinci profile ait veri işlem öncesi (a) ve sonrası aşamalara (b-e) ait radargramlar

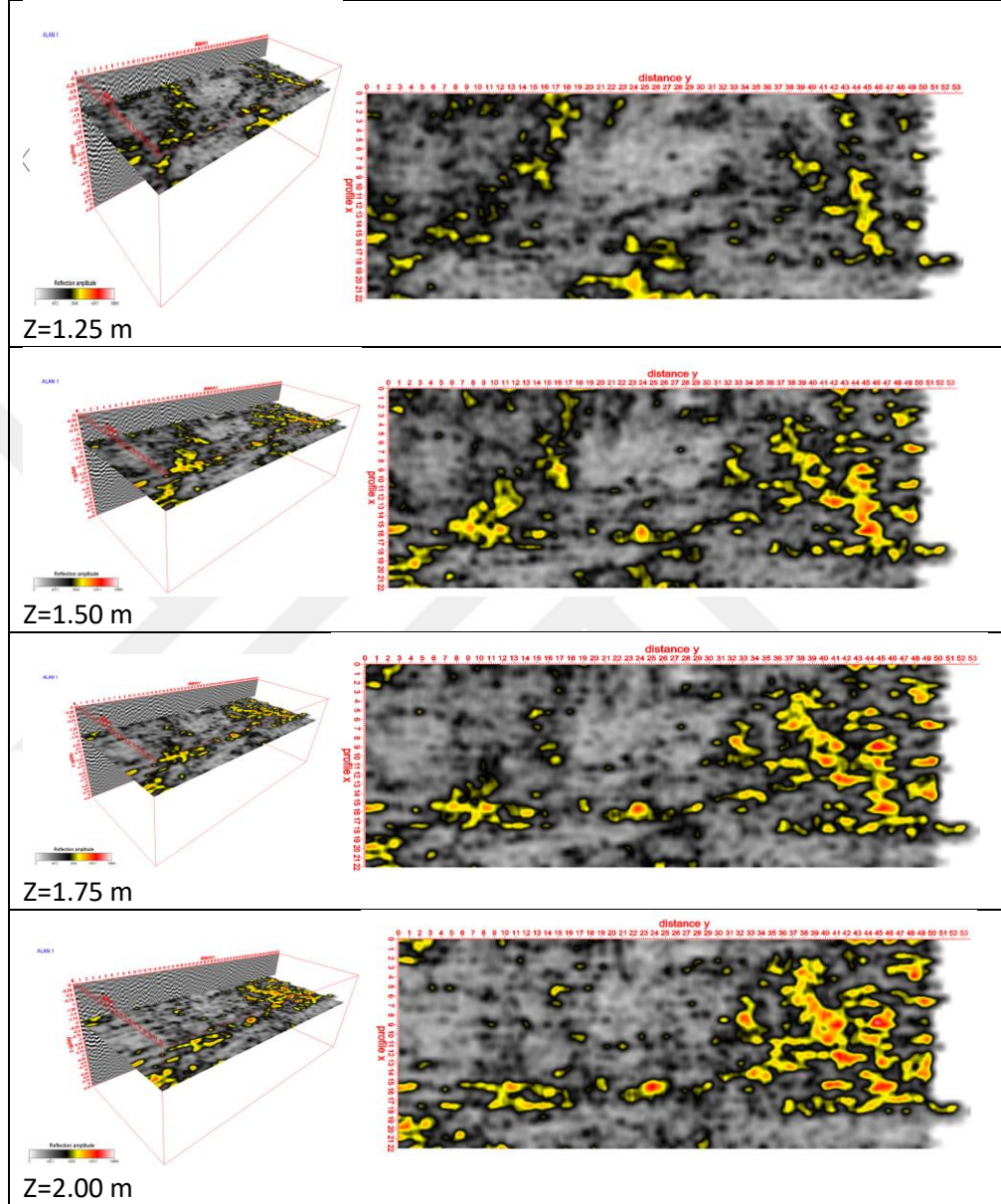
Şekil 4.8-4.10'da, araziden elde edilen GPR verilerininin 0.5-6 m aralığındaki derinlik kesitleri gösterilmiştir. Buradaki güçlü yansımaların açıkça gömülü duvar ve yıkıntılardan kaynaklandığı görülmektedir. Buna göre 0.50 m-1.00 m

arası derinlik kesitlerinde güçlü yansımalar mevcut olup, 0.50 m'de belirginleşmeye başlayan yansımalar 1.00 m derinliğe kadar devam etmiştir (Şekil 4.8).



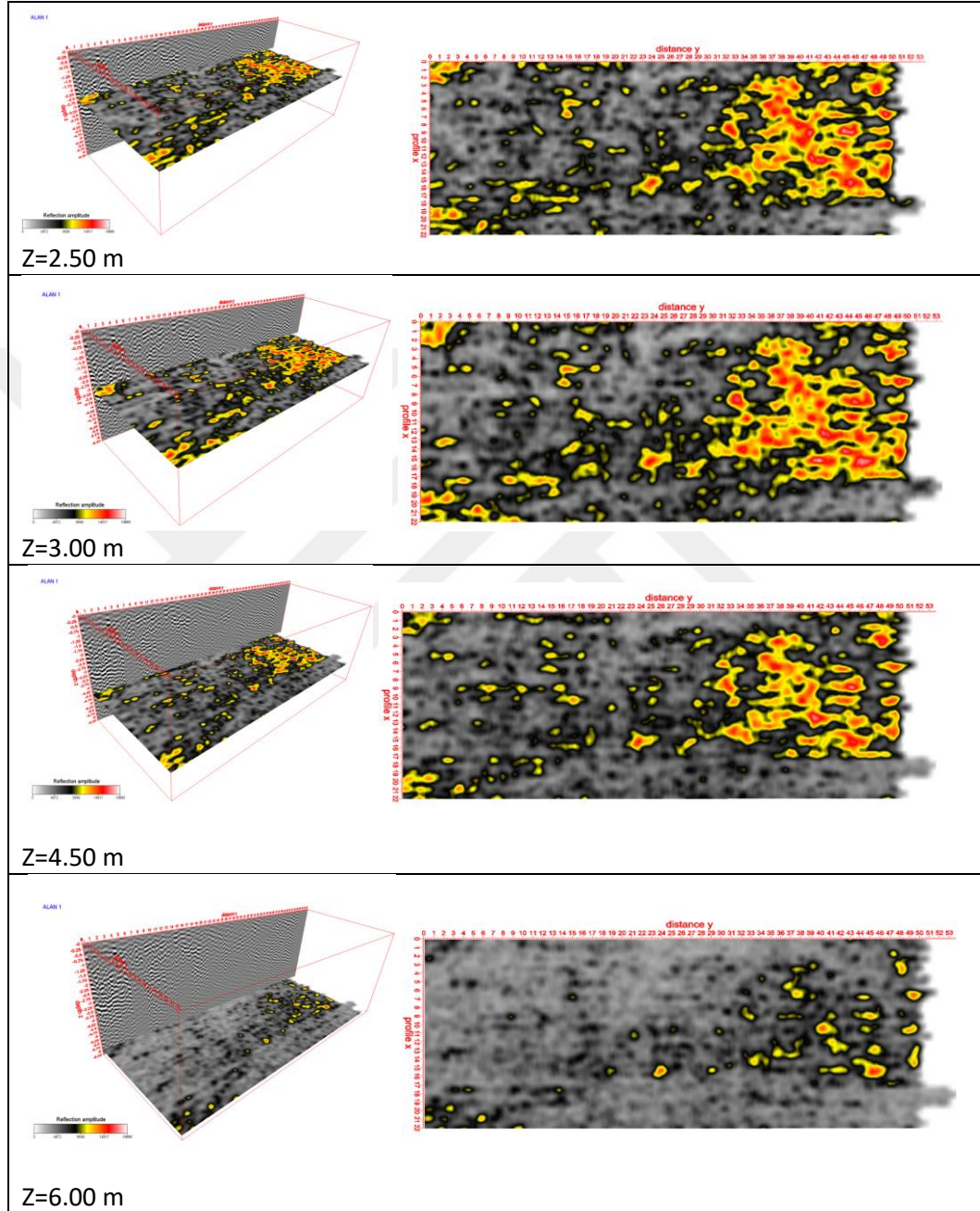
Şekil 4.8. Z=0.5-1 m aralığındaki derinlik kesitleri

Bu derinlikten sonra $Z=1.25$ m'den başlayan GPR derinlik kesitlerinde güçlü yansımalar belirginleşmeye başlayıp 2.0 m ye kadar devam eden kesitlerde aynı belirgin yansımalar devam etmiştir (Şekil 4.9).



Şekil 4.9. $Z=1.25-2$ m aralığındaki derinlik kesitleri

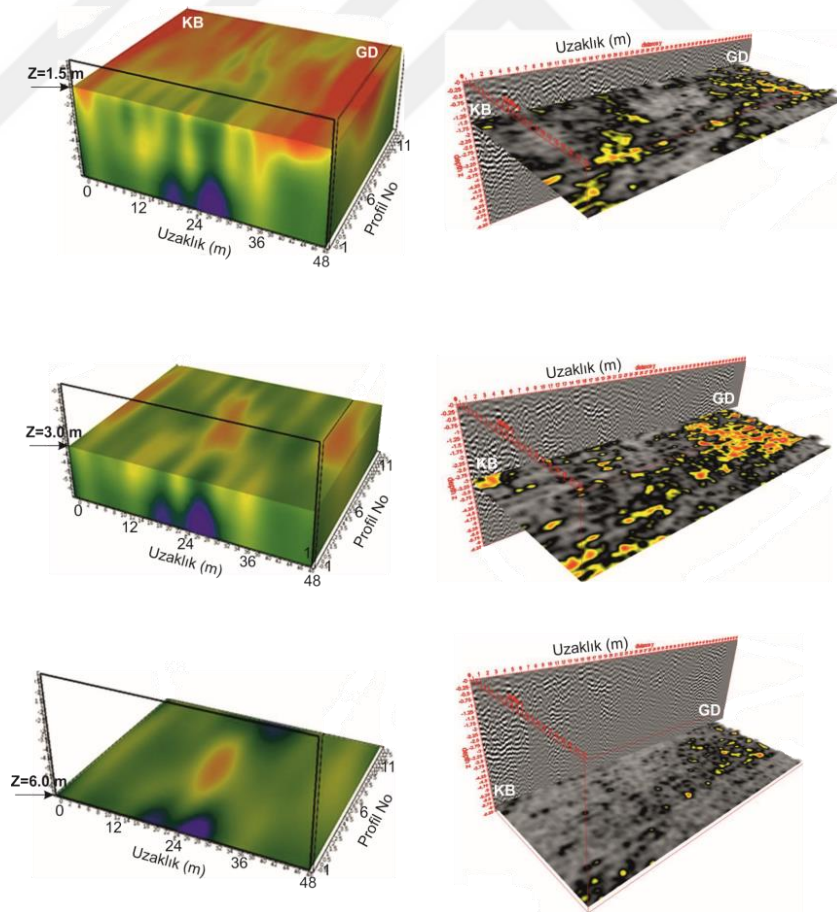
GPR derinlik kesitlerinde güçlü yansımalar daha derinlere ($Z=4.5$ m) kadar devam ettiği ve $Z=6$ m derinlik seviyesinde bu yansımaların zayıfladığı görülmüştür (Şekil 4.10).



Şekil 4.10. $Z=2.5-6$ m aralığındaki derinlik kesitleri

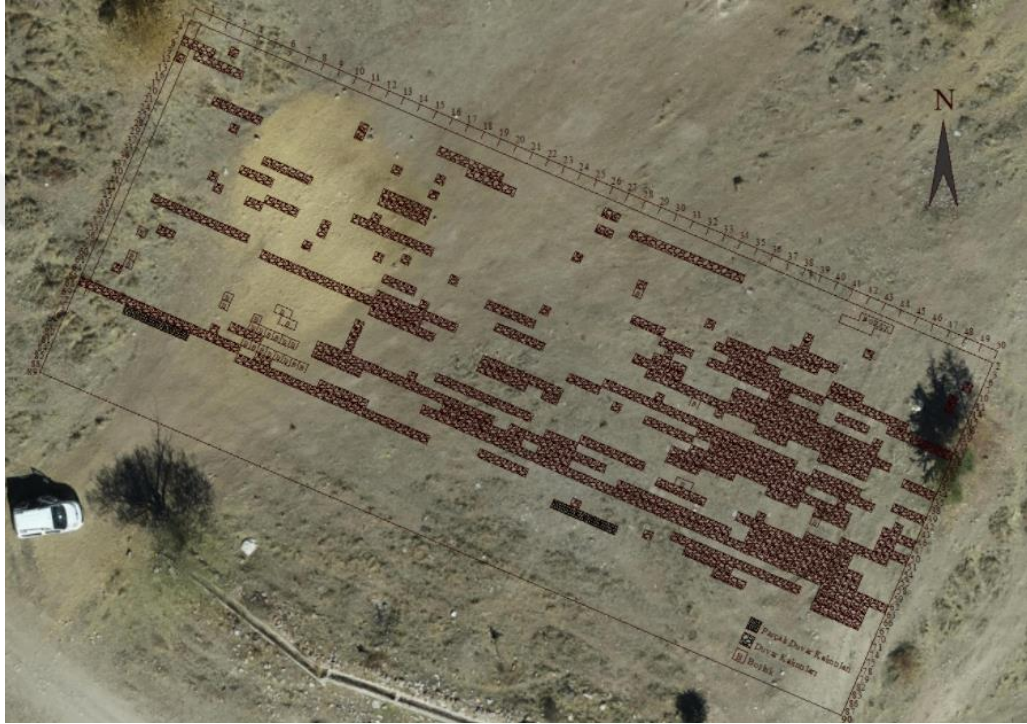
4.4. GPR ve ERT Sonuçlarını Karşılaştırma

ERT ve GPR araştırmasından elde edilen anomalilerin karşılaştırması Şekil 4.11'de verilmektedir. Karşılaştırma için $Z=1.5$ m, $Z=3$ m ve $Z=6$ m derinliklerdeki ERT kat haritaları ve GPR derinlik yatay kesitleri kullanılmıştır. Arkeolojik yapı kalıntıları yüksek özdirençler ve güçlü yansıma genlikleriyle karakterize olmaktadır. Dolayısıyla ERT kat haritalarındaki yüksek özdirençli alanlar (yeşil-kırmızı renklere karşılık gelen) gömülü yapı kalıntılarına karşılık gelmektedir. Yine aynı şekilde GPR derinlik kesitlerindeki güçlü yansımalar da gömülü kalıntılara karşılık gelmektedir. Her iki yöntem sonuçlarının birbiriyle uyumlu sonuçlar ürettiği ve yüzeyden 1.5-3 m derinlik aralığında yapı kalıntılarının belirginleştiği gözlenmiştir. 6 m derinlikteki ERT ve GPR kesitlerinde yapı kalıntılarına ait anomaliler gözlenmiştir. Ancak daha düşük özdirençler ve daha zayıf yansımalarla karakterize olmuştur.



Şekil 4.11. Farklı derinliklerdeki ERT ve GPR kesitlerinin karşılaştırılması. $Z=1.5$ m (üstte), $Z=3$ m (ortada), $Z=6$ m (altta)

Arkeolojik yapı kalıntılarının güçlü radar yansımalar ve yüksek öz dirençler ile karakterize olması sebebiyle, elde edilen sonuçlardan yararlanarak inceleme alanındaki yapı kalıntıları temsili olarak çizilmiştir (Şekil 4.12). Çizimler için AutoCAD yazılımı kullanılmıştır. Ayrıca, inceleme alanına ait ortofoto görüntüsüne birebir ölçekli olarak bu çizim yerleştirilmiştir. Çalışma alanı ölçüm hatları KB-GD doğrultusundadır. Jeofizik araştırma sonuçlarından sahanın GD kesimindeki yapı kalıntılarının daha fazla olduğu görülmektedir.



Şekil. 4.12. ERT ve GPR veri setlerinden yararlanarak ortofoto görüntüsü üzerine yapı kalıntılarının temsili çizimi

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, Nevşehir ili Ürgüp İlçesi Yeşilöz köyü Hodul dağı Ören yerinde ERT ve GPR yöntemleri kullanılarak elde edilen verilere uygulanan veri işlem yöntemleri ile jeofizik kesitler oluşturulmuştur. Bu kesitlerin yorumlanması ile inceleme alanında birçok arkeolojik kalıntıya işaret eden anomaliler gözlenmiştir.

Arkeolojik yapı kalıntılarının güçlü radar yansımalar ve yüksek özdirençler ile karakterize olması sebebiyle, elde edilen sonuçlardan yararlanarak inceleme alanındaki yapı kalıntıları temsili olarak çizilmiş inceleme alanına ait ortofoto görüntüsü ile örtüştürülmüştür. Jeofizik araştırma sonuçlarından sahanın GD kesimindeki yapı kalıntılarının daha fazla olduğu belirlenmiştir.

ERT yönteminde arkeolojik yapılar, çevre kayaca göre daha yüksek özdirençler ile karakterize olmaktadır. Ölçülen verilerin değerlendirme sonuçlarına göre, özdirenç kesitlerinde, özdirençler yaklaşık olarak 5 Ω m ve 1000 Ω m arasında değişmektedir. ERT kesitindeki düşük özdirençli bölgeler (mavi renk tonları) yan kayaç özelliklerine karşılık gelmektedir. Orta ve yüksek özdirençli bölgeler (yeşil-koyu kahve renk tonları) ise gömülü kalıntıları karakterize etmektedir. Yüzeyden yaklaşık 6 m derinliğe kadar olan dirençli bölgeler yer yer yıkık duvar kalıntılarına karşılık gelmektedir. Bunlar özdirenç kat haritalarında (Z=1.5, 3.5, 5, 6 m) nispeten çevre kayaca göre yüksek özdirençli alanlar olarak açıkça görülmektedir.

GPR yönteminde arkeolojik yapılar, güçlü radar yansımaları göstermektedirler. Ölçülen radar verilerine gerekli veri işlem aşamaları uygulandıktan sonra derinlik kesitleri çizilmiştir. Burada güçlü yansımaların açıkça gömülü duvar ve yıkıntılardan kaynaklandığı görüldü. Güçlü radar yansımalarının 6 m derinliğe kadar devam ettiği gözlenmiştir. GPR araştırma sonucuna göre duvar kalıntılarının inceleme alanının GD da yoğunlaştığı anlaşılmaktadır.

ERT ve GPR araştırma sonuçlarının karşılaştırması yapıldığında, her iki yöntem sonuçlarının birbiriyle uyumlu sonuçlar ürettiği ve yüzeyden 1.5-3 m derinlik aralığında yapı kalıntılarının belirginleştiği gözlenmiştir. Kesitlerde, 6 m derinlikte anomalilerin varlığı gözlenmiştir. Ancak, bunlar daha düşük öz dirençler ve daha zayıf yansımalarla karakterize olmuştur.

Sonuç olarak, ERT ve GPR yöntemlerinin birlikte kullanılması ile, inceleme alanında ümit verici arkeolojik yapı kalıntıları tespit edilmiştir. Dolayısıyla, bu bölgede farklı alanlarda da arkeolojik amaçlı jeofizik yöntemlerin kullanıldığı araştırmaların devam ettirilmesi gerektiği önerilmektedir.



KAYNAKLAR

- Akca, İ., 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.
- Aspinall, A., Gaffney, C., Schmidt, A., 2009. *Magnetometry for Archaeologists. Geophysical Methods for Archaeology*. United Kingdom: Altamira Press.
- Atabey, E., 1989. MTA 1/100.000 ölçekli açın-sama nitelikli Türkiye Jeoloji Haritaları Serisi, Aksaray H19 (K33) Paftası. MTA Jeoloji Etütleri Dairesi, Ankara.
- Balkaya, Ç., Ekinci, Y.L., Çakmak, O., Blömer, M., Arnkens, J., Kaya, M.A., 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.
- Batayneh, A., Al-Zoubi, A., Tobasi, U., Haddadin, G., 2001. Evaluation of archaeological site potential on the Tall Al-Kharrar Area (Jordan) using magnetic and resistivity methods. *Environmental Geology*, 41, 1-10.
- Beekman, P.H., 1966. Hasan Dağı-Melendiz Dağı bölgesinde Pliosen ve Kuaterner volkanizma faaliyetleri. *MTA Dergisi*, 66, 88-103.
- Berge, M.A., Drahor, M.G., 2011. Electrical resistivity tomography investigations of multilayered archaeological settlements: part II - a case from Old Smyrna Höyük, Turkey. *Archaeological Prospection*, 18, 291-302.
- Brown, A.G., 2002. Floodplain landscapes and archaeology: fluvial events and human agency. *Journal of Wetland Archaeology*, 2 (1), 89-104.
- Burks, J., Cook, R.A., 2011. Beyond Squirer and Davis: rediscovering Ohio's earthworks using geophysical remote sensing. *American Antiquity*, 76 (4), 667-689.
- Buynevich, I.V., FitzGerald, D.M., Jol, H.M., 2009. Coastal Environments. In: Jol, H. M., ed. *Ground Penetrating Radar: Theory and Applications*. Amsterdam: Elsevier Science, 299-322.
- Campana, S., Piro, S., 2009. *Seeing the unseen - geophysics and landscape archaeology*. London: CRC Press Taylor and Francis Group.
- Candansayar, M.E., Basokur, 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, 40-58.

- Carey, C.J., Brown, A.G., Challis, K.C., Cooper, L., Howard, A.J., 2006. Predictive modelling of multiperiod geoarchaeological resources at a river confluence: a case study from the Trent–Soar. UK. *Archaeological Prospection*, 13 (4), 241–250.
- Dahlin, T., Zhou, B., 2004. A numerical comparison of 2-D resistivity imaging with 10 electrode arrays. *Geophysical Prospecting*, 52, 379-398.
- Clark, A.J., 2001. *Seeing Beneath the Soil: Prospecting Methods in Archaeology*. Revised ed. London, UK: Routledge.
- Conyers, L.B., 2012. *Interpreting ground-penetrating radar for archaeology*. Walnut Creek, California: Left Coast Press, Inc.
- Conolly, J., Lake, M., 2006. *Geographical information systems in archaeology: Cambridge Manuals In Archaeology*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Dahlin, T., Zhou, B., 2004. A Numerical Comparison of 2-D Resistivity Imaging with 10 Electrode Arrays. *Geophysical Prospecting*, 52, 379-398.
- Daily, W.D., 1984. Underground oil shale retort monitoring using geotomography. *Geophysics*, 49, 1701-1707.
- Daily, W., Owen, E., 1991. Cross-borehole resistivity tomography. *Geophysics*, 56, 1228-1235.
- Daily, W., Binley, A.M., LaBrecque, D., Ramirez, A., 2004. Electrical resistance tomography. *The Leading Edge*, 23 (5), 438–442.
- Daniels, D.J., Gunton, D.J., Scott, H.F. 1988. introduction to subsurface radar, IEE Proceedings, 135 part F (4), August 1988, 278-320.
- De Gaetano, E., Strutt, K., 2007. Report on the Geophysical Survey at Portus May-June 2007. Srep 11/20. Southampton, UK.
- Di Maio, R., La Manna, M., Piegari, E., 2016. 3D Reconstruction of buried structures from magnetic, electromagnetic and ERT data: Example from the archaeological site of Phaistos (Crete, Greece). *Archaeological Prospection* 23, 3-13.
- Drahor, M.G., 2006. Integrated geophysical studies in the upper part of Sardis archaeological site, Turkey. *Journal of Applied Geophysics*, 59, 205-223.
- Drahor, M.G., Berge, M.A., Kurtulmuş, T.Ö., Hartmann, M., Speidel, M.A., 2008. Magnetic and electrical resistivity tomography investigations in a Roman legionary camp site (Legio IV Scythica) in Zeugma, Southeastern Anatolia, Turkey. *Archaeological Prospection*, 15, 159-186.

- Ekinci, Y.L., Kaya, M.A., 2007. Three dimensional resistivity imaging of buried tombs at the Parion Necropolis (NW Turkey). *Journal of the Balkan Geophysical Society*, 10 (2), 1-8
- Ekinci, Y.L., Kaya, M.A., Bařaran, C., Kasapođlu, H., Demirci, A., 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 (2), 145-157.
- Ekinci, Y.L., Balkaya, ., řeren, A., Kaya, M.A., Lightfoot, C., 2014. Geomagnetic and geolectrical prospectation for buried archaeological remains on the upper city of Amorium, a Byzantine city in Midwestern Anatolia, Turkey. *Journal of Geophysics and Engineering*, 11 (1), 015012.
- Erdoğan, A., Gündoğdu, O., 1995. Kocaeli Ütepelere tümölüsünde jeofizik araştırma. *Jeofizik Dergisi, TMMOB Jeofizik Mühendisleri Odası*, 10 (1-2), 13-17.
- Gaffney, C., Gater, J., 2010. *Revealing the buried past*. Gloucestershire, UK: The History Press.
- Gaffney, C., Gaffney, V., 2012. The Stonehenge hidden landscapes project. *Archaeological Prospection*, 19 (2), 147-155.
- Ghazala, H., El-Mahmoudi, A.S., Abdallatif, T.F., 2003. Archaeogeophysical study on the site of Tell Toukh El-Qaramous, Sharkia Governorate, East Nile Delta, Egypt, *Archaeological Prospection*, 10, 43-55.
- Goodman, D., Gaffney, V., Nishimura, Y., Patterson, H., Piro, S., 2004. Discovery of a 1st century AD Roman amphitheater and other structures at the Forum Novum by GPR. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 9 (1), 35-41.
- Goodman, D., Damiata, B., Higashi, N., Hongo, H., Piro, S., Nishimura, Y., Schneider, K., Steinberg, J., 2009. GPR archaeometry. In: Jol, H., ed. *GPR Theory and Applications*. Elsevier, 479-508.
- Goodman, D., Piro, S., 2013. *GPR Remote Sensing in Archaeology: Geotechnologies and the environment*. New York: Springer.
- Goodman, D., 2016. *GPRslice v7.0 Software Manual 2016*. Woodland Hills, California, USA: Geophysical Archaeometry Laboratory Inc.
- Güçlü, F., 2020. Ürgüp-Yesilöz (Tağar) köyü. www.fibhaber.com/urgup-yesiloz-tagar-koyu-makale,2582.html
- Jol, H.M., Smith, D.G., 1991. Ground penetrating radar of northern Lacustrine deltas. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 28 (12), 1939-1947.

- Jol, H.M., Smith, D.G., 1992. Geometry and structure of deltas in large lakes: A ground penetrating radar overview. In: Honninen, P. and Autio, S., eds. Fourth International Conference on Ground Penetrating Radar, June 8-13. Rovaniemi, Finland: Geological Survey of Finland Special Paper 16, 159-168.
- Kay, S., 2013. Geophysical Survey of the City of Gabii, Italy. In: Johnson, P. and Millet, M., eds. Archaeological Survey and the City. Oxford: Oxbow Books, 283-302.
- Keay, S., Millett, M., Strutt, K., 2004. Recent archaeological survey at Portus. In: Galinna Zevi, A. and Turchetti, R., eds. Le Strutture dei Porti e Degli Approdi Antichi. Le Strutture dei Porti e Degli Approdi Antichi. Atti del Seminario. Rome-Ostia Antica, 16-17 Aprile 2004. Rome, Italy: Rubettino Editore, 221-232.
- Kvamme, K.L., 2001. Current practices in archaeogeophysics: magnetics, resistivity, conductivity, and ground-penetrating radar. In: Goldberg, P., Holliday, V. T., and Ferring, C. R., eds. Earth Sciences and archaeology. New York: Kluwer Academic/Plenum, 358-384.
- Lager, D.L., Lytle, R.J., 1977. Determining a subsurface electromagnetic profile from high-frequency measurements by applying reconstruction technique algorithms. *Radio Science*, 2, 249-260.
- Leucci, G., Negri, S., 2006. Use of ground penetrating radar to map subsurface archaeological features in an urban area. *Journal of Archaeological Science*, 33 (4), 502-512.
- Lytle, R.J., Dines, K. A., 1978. An impedance camera: A system for determining the spatial variation of electrical conductivity: Lawrence Livermore National Laboratory UCRL-52413.
- Loke, M.H., Barker, R.D., 1995. Improvements to the Zohdy method for the inversion of resistivity sounding and pseudosection data. *Computers & Geosciences*, 21 (2), 321-332.
- Loke, M.H., 2013. Tutorial: 2D and 3D Electrical Imaging Surveys. Erişim Tarihi: 05.02.2022. <http://www.geotomosoft.com/coursenotes.zip>
- Mansfield, C., 2007. Reconstructing buried alluvial landscapes: The application of multiple geophysical and geoarchaeological techniques. Unpublished PhD Thesis. University of Reading.
- Mason, I.M., 1981. Algebraic reconstruction of a two-dimensional velocity inhomogeneity in the High Hazles seam of Thoresby colliery. *Geophysics*, 46, 298-308.

- Mildan, İ., 1997. Karaevliata (Tekirdağ) yöresindeki tümülüste arkeojeofizik araştırma, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 55s. İstanbul.
- Negri, S., Leucci, G., 2006. Geophysical investigation of the temple of Apollo (Hierapolis, Turkey). *Journal of Archaeological Science*, 33, 11, 1505-1513.
- Neubauer, W., Eder-Hinterleitner, A., Seren, S., Melichar, P., 2002. Georadar in the Roman civil town Carnuntum, Austria: an approach for archaeological interpretation of GPR data. *Archaeological Prospection*, 9 (3), 135-156.
- Neubauer, W., Doneus, M., Hinterleitner, A., Locker, K., Seren, S., Trinks, I., Verhoeven, G.J.J., 2013. Long-term integrated archaeological prospection at the Roman town of Carnuntum/Austria. In: Johnson, P. and Millet, M., eds. *Archaeological Survey and the City*. Oxford: Oxbow Books, 202-221.
- Nishimura, Y., 2001. Geophysical Prospection In Archaeology. In: Brothwell, D. R. and Pollard, A. M., eds. *Handbook of Archaeological Sciences*. Chichester: Wiley, 543-553.
- Novo, A., Sala, R., García, E., Lorenzo, H., Muñoz, F., Solla, M., Tamba, R., 2009. From Celtiberians to Romans: combined geophysical (3D GPR and fluxgate gradiometer) prospection for the archaeological characterisation of Castro del la Magdalena (Leon, Spain). *Archaeosciences*, 33, 121-124.
- Ott, H., 2001. Frequency Wave Length Chart. Erişim Tarihi: 10.02.2022. <http://www.hottconsultants.com/techtips/freq-wavelength.html>
- Özyalın, Ş., Balkaya, Ç., Erhan, Z., 2010. Metropolis antik kentindeki tümleşik jeofizik çalışmalar. Türkiye 19. Uluslararası Jeofizik Kongre ve Sergisi, Ankara.
- Pan, S.X., Kak, A.C. 1983. A computational study of reconstruction algorithms for diffraction tomography: Interpolation versus filtered backpropagation. *Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions Acoustics, Speech, Signal Processing*, 31, 1262-1275.
- Panisova, J., Fraštia, M., Kušnirák, D., Pašteka, R., Wunderlich, T., 2013. microgravity and ground-penetrating radar investigations of subsurface features at the St Catherine's Monastery, Slovakia. *Archaeological Prospection*, 20 (3), 163-174.
- Pasquare, G., 1968. Geology of the Cenozoic volcanic area of Central Anatolia. *Atti. Delia. Accad. Naz. Dei Line.*, 40, 1077-1085.

- Pekak, M.S., 2010. Ürgüp, Yeşilöz, (Tağar) kilisesi. Edebiyat Fakültesi Dergisi, 27 (1), 203–218.
- Pipan, M., Baradello, L., Finetti, I., Forte, E., 2001. Ground penetrating radar study of iron age tombs in Southeastern Kazakhstan. *Archaeological Prospection*, 8 (3), 141–155.
- Piro, S., Goodman, D., Nishimura, Y., 2003. The study and characterization of Emperor Traiano's Villa (Altopiani di Arcinazzo, Roma) using high-resolution integrated geophysical surveys. *Archaeological Prospection*, 10 (1), 1–25.
- Piro, S., Campana, S., Felici, C., 2005. Integration between magnetic surveys and archaeological excavations: The case study of Pava, Siena, Central Italy. In: *Proceedings of the 6th International Conference on Archaeological Prospection*. 14-17 Eylül 2005. Rome: Institute of Technologies Applied to Cultural Heritage., 226–227.
- Reynolds, J.M., 1997. *An introduction to applied and environmental geophysics*. Chichester: John Wiley & Sons Ltd.
- Richley, E.C., 2018. *Three-dimensional geophysical data integration at Portus, Italy*, PhD Thesis, University of Southampton.
- Sandmeier, K.J., 2005. *ReflexW Manual ver. 3.5*, Sandmeier Scientific Software, Karlsruhe, Germany.
- Schmidt, A., 2013. *Earth Resistance for Archaeologists*. Schnauffer,. Plymouth, UK: Altamira Press.
- Scollar, I., Herzog, I., Hesse, A., Tabbagh, A., 2009. *Archaeological prospecting and remote sensing. Topics in Remote Sensing*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Seren, S., Eder-Hinterleitner, A., Locker, K., Melichar, P., Neubauer, W., 2007. Extended comparison of difference GPR systems and antenna configurations at the Roman site of Carnuntum. *Near Surface Geophysics*, 5 (6), 389–394.
- Smith, D.G. Jol, H.M., 1992. Ground penetrating radar investigation of a Lake Bonneville delta, Provo level, Brigham City, Utah. *Geology*, 20 (12), 1083–1086.
- Strutt, K., 2006. *Portus Geophysical Survey Report December 2006*. Southampton, UK.
- Szymanski, J.E., Tsourlos, P., 1993. The resistive tomography technique for archaeology: An introduction and review. *Archaeologia Polona*, 31, 5–32.

- Tary, A.K., FitzGerald, D.M., Weddle, T.K., 2007. A ground penetrating radar investigation of a glacial-marine ice-contact delta, Pineo Ridge, eastern coastal Maine. Special Paper of the Geological Society of America, 432, 77–92.
- Telford, W.M., Geldart, L.P., Sheriff, R.E., 1996. Applied Geophysics. 2nd ed. Cambridge: Press Syndicate of the University of Cambridge.
- Tong, L.T., Lee, K.H., Yeh, C.K., Hwang, Y.T., Chien, J.M., 2013. Geophysical study of the Peinan archaeological site, Taiwan. Journal of Applied Geophysics, 89, 1-10.
- Topp, G.C., Davis, J.L., Annan, A.P., 1980. Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines. Water Resources Research, 16 (3), 574–582.
- Tsokas, G.N., Giannopoulos, A., Tsourlos, P., Vargemezis, G., Tealby, J.M., Sarris, A., Papazachos, C.B., 1994. A Large Scale Geophysical Survey in The Archaeological Site of Europos (Northern Greece). Journal of Applied Geophysics, 32, 85-98.
- Ünyay, M., 2019. Pisidia Antiokheia antik kenti aediculus bazilikası ve civarı araştırması, Süleyman Demirel Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, 68s. Isparta.
- Üstol, G., 2013. Pisidia Antiokheia antik kenti gözetleme kulesi arkeojeofizik (yer radarı ve elektrik öz direnç) araştırması, Süleyman Demirel Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, 130s. Isparta.
- Wensink, W.A., 1993. Dielectric properties of wet soils in the frequency range of 1-3000 MHz. Geophysical Prospecting, 41 (6), 671–696.
- Witten, A.J., Adams, R.B., Levy, T.E., Won, I.J., 2000. Geophysical surveys in the Jebel Hamrat Fidan, Jordan. Geoarchaeology, 15 (2), 135–150.
- Worthington, M.H., 1984. An introduction to seismic tomography. First Break, 2 (11), 20-26.
- Yilmaz, S., Öksüm, E., Cakmak O., Doğan, O., Tekelioğlu, E., 2018. Preliminary results of an integrated archaeo-geophysical survey on the basis of ancient finds unearthed by an illegal excavation at Kılıç Ören site (Isparta, Turkey), Archaeological Prospection, 25, 197-207.
- Yilmaz S., Balkaya Ç., Çakmak O., Oksum E., 2019. GPR and ERT explorations at the archaeological site of Kılıç village (Isparta, SW Turkey), Journal of Applied Geophysics, 170, 103859.

Zohdy, A.A.R., 1989. A new method for the automatic interpretation of Schlumberger and Wenner sounding curves. *Geophysics*, 54 (2), 245–253.

