T.C.

TRAKYA ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

PATARA ANTİK KENTİ, YERALTINDAKİ, ROMA VİLLALARININ JEOFİZİK (ELEKTRİK ÖZDİRENÇ YÖNTEMİ TOMOGRAFİ TEKNİĞİ VE YER RADARI) İLE BELİRLENMESİ

SERBAY KÜÇÜKDUVAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

UYGULAMALI BİLİMLER VE TEKNOLOJİ ANABİLİM DALI

Tez Danışmanı: PROF. DR. MEHMET ALİ KAYA

EDİRNE-2019

Serbay KÜÇÜKDUVAN' ın hazırladığı "PATARA ANTİK KENTİ, YERALTINDAKİ, ROMA VİLLALARININ JEOFİZİK (ELEKTRİK ÖZDİRENÇ YÖNTEMİ TOMOGRAFİ TEKNİĞİ VE YER RADARI) İLE BELİRLENMESİ" başlıklı bu tez, tarafımızca okunmuş, kapsam ve niteliği açısından Uygulamalı Bilimler ve Teknoloji Anabilim Dalında bir Yüksek lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri (Ünvan, Ad, Soyad):	İmza
Prof. Dr. Mehmet Ali KAYA	.....
Prof. Dr. Fikret İŞIK	.....
Doç. Dr. Çağlayan BALKAYA	.....

Tez Savunma Tarihi: 26/06/2019

Bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak gerekli şartları sağladığını onaylarım.

İmza

Prof. Dr. Mehmet Ali KAYA

Tez Danışmanı .....

Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü onayı

.....

Prof. Dr. Murat YURTCAN

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

T.Ü. FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

UYGULAMALI BİLİMLER VE TEKNOLOJİ ANABİLİM DALI YÜKSEK LİSANS PROGRAMI

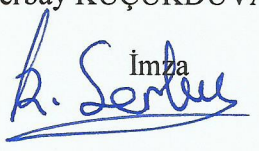
DOĞRULUK BEYANI

Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında, tüm verilerin bilimsel ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini, kullanılan verilerde tahrifat yapılmadığını, tezin akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını, kullanılan tüm literatür bilgilerinin bilimsel normlara uygun bir şekilde kaynak gösterilerek ilgili tezde yer aldığını ve bu tezin tamamı ya da herhangi bir bölümünün daha önceden Trakya Üniversitesi ya da farklı bir üniversitede tez çalışması olarak sunulmadığını beyan ederim.

26 / 06 / 2019

Serbay KÜÇÜKDUVAN

İmza



Yüksek Lisans Tezi

Patara Antik Kenti, Yeraltındaki, Roma Villalarının Jeofizik (Elektrik Özdirenç Yöntemi Tomografi Tekniği ve Yer Radarı) ile Belirlenmesi

T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü

Uygulamalı Bilimler ve Teknoloji Anabilim Dalı

ÖZET

Arkeolojik kazılarda, yeraltındaki arkeolojik yapı kalıntılarının araştırılmasında karşılaşılan en büyük sorun; yapı kalıntılarının yer ve derinliklerinin bilinmemesidir. Bu sorun arkeolojik kazılara ekonomik anlamda maliyet ve kazı sürecine zaman eklenmesi demektir. Ekonomik ve zaman kayıplarının üstesinden gelmek için arkeoloji biliminin en büyük destekçisi, arkeometri kapsamında, jeofizik mühendisliği araştırmalarıdır. Hasarsız, tahribatsız ve kazısız özellikleri ile jeofizik yöntemlerin arkeolojik yapı kalıntılarının araştırılmasında kullanımı 1940'lı yıllarda başlamaktadır. Günümüzde jeofizik alet teknolojisindeki hızlı gelişmelere paralel olarak çok hızlı veri toplanması, toplanan verilerin işlenmesinde bilgisayar kapasitesi ve hızındaki gelişmelerle 2B ve 3B ters çözüm ve modelleme yazılımlarının hızlı olarak çalıştırılması arkeolojik yapı kalıntılarının araştırılmasında jeofizik yöntemleri, arkeolojik kazının standardı haline getirmiştir.

Bu çalışma, Antalya ili Kaş ilçenin sınırları içerisinde yer alan Patara Antik Kenti'nde yürütülen ve yeraltındaki Patara Villalarının bulunduğu düşünülen bölgede gerçekleştirilen elektrik özdirenç tomografi (ERT) uygulaması ile arkeolojik yapı kalıntılarının olası yerlerini ve villalara ait izlerin belirlenmesini kapsamaktadır. Çalışmada Yerradarı (GPR) yöntem sonuçlarından da yararlanılmıştır.

Birbirine paralel profiller boyunca yapılan ERT ölçümleri sonucu elde edilen verilerinin ters çözümü; düzgünlük-kısıtlı doğrusallaştırılmış en-küçük kareler

yöntemini kullanan ERTInv2D yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Ters çözüm sonuçlarının 3B hale getirilerek hava fotoğraflarındaki konumlarına yerleştirilerek herhangi bir arkeolojik kazı işlemi gerçekleştirilmeden alanın yer altı görüntüsünün ortaya konulması amaçlanmıştır.

Çalışma alanının GPR ve ERT çalışmaları sonucu elde edilen yeraltı görüntülerinde insan yapımı olabileceği açıkça görülen geometrik formda izler gözlemlenmiştir. Belirtilerin boyutları, bunların Villalara ait izler olabileceğini göstermektedir. Belirtilerin 0.50 m derinlik seviyelerinden sonra gözlenmesi, araştırma alanında halen yapılan tarımsal faaliyetlerle ilgili olmalıdır. Bu nedenle araştırma alanının kamulaştırılmamış olması ve hali hazırda tarım faaliyetlerinin sürdürülmesi göz önünde bulundurularak belirlenen olası yapı kalıntılarının koruma altına alınması ve arkeolojik kazısının ilerleyen süreçlerde gerçekleşmesi beklenmektedir. Jeofizik yöntemlerin arkeolojik yapı kalıntılarının araştırılmasında kullanılması ile elde edilen sonuçlar; arkeoloji bilimi ve kültürel mirasın korunması açısından jeofiziğin önemli katkıları olduğunu göstermektedir.

Yıl: 2019

Sayfa Sayısı: 124

Anahtar Kelimeler: Patara Antik Kenti, Patara Roma Villaları, Jeofizik, Arkeojeofizik, Elektrik Özdirenç Tomografi, GPR

MSc. Thesis

The Determination of Underground Roman Villas by Geophysical Methods (Electrical Resistivity Tomography and Ground Penetrating Radar) in Patara Antique City.

Trakya University Institute of Natural Sciences

Applied Sciences and Technology Department

ABSTRACT

In archaeological excavations, the utmost problem in researches to come up aganist not to know positions and depths of archaeological building remains underground. This means to add cost in economic way and time to duration of excavation. To compensate the loss of economic and time failure in archaeometry coutent geophysical engineering researches assist. Archaeological building remains was begun to research by geophysical methods with non-invasive, non-destructive and trenchless propeties in1940's. Today beign developed geophysical device technology and inversion of 2D, 3D software and modelling with computer development of capacity in processing total datum rapidly provided geophysical methods are standardized to do research on archaeological building remains in archaeological excavation.

The present study contains application of Electrical resistivity tomography (ERT) and determination of villas and probable positions of archaeological building tracks in the Patara ancient city located in Kaş/Antalya. Besides all in the study the results of ground penetrating radar (GPR) methods are used.

ERT measurings are made along parallel profiles each other that obtain inversion routine that substantiate smoothness constrained least squares method is made by ERTInv2D software. Aimed to expose subterra neanimage of field without archaeological excavation prosess, inversion routine results are transferred 3D and set in their positions at air photos.

According to GPR and ERT results in field; are obtained in subterranean images that in the geometrical forms of human made are observed. Dimensions of the indicate tracks likely villas. After 0.50 m depth indicators should be agriculture activity in field the present day. Due to not to expropriated in field and is still made agriculture activity here; probable building and remain should be protected and archaeological excavation is expected to occur in forthcoming days. The results obtained via archaeological building remains researches in geophysical methods contributed how geophysical play a role in protecting culturel heritage and science of archaeology.

Year: 2019

Number of Pages: 124

Keywords: Patara Ancient City, Patara Roman Villas, Geophysics, Archaeogeophysics, Electrical Resistivity Tomography, GPR.

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının; konusun belirlenmesinde, arazi (veri toplama), veri işlem aşamalarında ve tezin yazım aşamalarında tecrübe, bilgi, zamanını benimle paylaşan ve yardımlarını benden esirgemeyen değerli hocam sayın Prof. Dr. Mehmet Ali KAYA'ya en içten dileklerimle teşekkürlerimi sunarım.

Patara Antik Kenti'nde yürütülen çalışmalara olanak sağlayan, bilgi ve tecrübelerini paylaşan Kazı Başkanı Prof. Dr. Havva IŞIK ve değerli eşi Prof. Dr. Fahri IŞIK'a teşekkür ederim. Jeofizik yöntemlerin uygulanmasında, veri işlem sürecinde bilgi ve tecrübelerini paylaşan Doç. Dr. Çağlayan BALKAYA, Doç. Dr. İrfan AKCA, Jeofizik Yüksek Mühendisi Olcay ÇAKMAK'a, arazideki yardımlarından dolayı meslektaşım Jeofizik Mühendisi Seçkin Sertaç LALLI'ya, Patara tarihçesi ve Roma villaları hakkında bilgi ve tecrübelerini paylaşan Dr. Öğretim Üyesi Şevket AKTAŞ'a, yabancı dil konusundaki yardımlarından dolayı Öğretim Görevlisi Kazım AYDOĞAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Bu tezin arazi çalışmaları Trakya Üniversitesi TÜBAP birimi tarafından 2018/160 no'lu proje olarak desteklenmiştir, teşekkür ederim.

Tez çalışmam süresince maddi ve manevi desteğini eksik etmeyen başta babam Şenol KÜÇÜKDUVAN, annem Sibel KÜÇÜKDUVAN'a, tez yazımındaki katkılarından dolayı kardeşim Ertaç KÜÇÜKDUVAN'a ve tez çalışmamda manevi desteği ile yanımda olan nişanlım Jeoloji Mühendisi Neşe GÜCÜYENER'e en içten duygularımla teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR VIII

İÇİNDEKİLER IX

SİMGELER VE KISALTMALAR XIII

ŞEKİLLER LİSTESİ XIV

ÇİZELGELER LİSTESİ XVIII

BÖLÜM 1 1

GİRİŞ 1

BÖLÜM 2 8

ARKEOJEOFİZİK ve UYGULANAN YÖNTEMLER 8

2.1 Arkeojeofizikte Uygulanan Jeofizik Yöntemler 10

2.2 Yer Radarı Yöntemi 12

2.2.1. Yöntemin Tanımı 13

2.2.2. Yer Radarı Kuramı 14

2.2.2.1. Ortamın İletkenliği 15

2.2.2.2. Dielektrik Sabiti (Ortamın Elektriksel Geçirgenliği) 16

2.2.2.3. Ortamın Manyetik Geçirgenliği 16

2.2.3. Elektromanyetik Dalgaların Özellikleri 18

2.2.4. Elektromanyetik Dalgaların Ara Yüzeylerde Yansıması, Kırılması ve İletimi 20

2.2.5. Yatay ve Düşey Ayrımlılık 23

2.2.6. GPR Alet ve Donanımı 25

2.2.7. Uygun Anten Seçimi 25

2.2.8. Anten Dizilimleri 27

2.2.9. Yöntemde Veri Toplama 28

2.3 Doğru Akım Özdirenç Yöntemi 29

2.3.1 Yöntemin Esasları 30

2.3.2 Kayaç Özdirencini Etkileyen Etkenler ve Kayaç İçinde Elektriksel İletkenlik 31

2.3.2.1 Elektronik İletim 31

2.3.2.2 Elektrolitik İletim 32

2.3.2.3 Dielektrik İletim 33

2.3.3 Görünür Özdirenç Kavramı 35

2.3.4 Özdirenç Ölçü Alma Teknikleri (Elektrot Dizilimleri) 37

2.3.4.1 Schlumberger Elektrot Dizilimi 37

2.3.4.2 Wenner Elektrot Dizilimi 38

2.3.4.3 Wenner-Schlumberger Elektrot Dizilimi 39

2.3.4.4 Dipol-Dipol Elektrot Dizilimi 40

2.3.4.5 Pol-Dipol Elektrot Dizilimi 40

2.3.4.6 Pol-Pol Elektrot Dizilimi 41

2.3.5 Farklı Elektrot Dizilimleri için Sinyal Katkı Kesiti 42

2.3.5.1 Schlumberger Elektrot Dizilimi Sinyal Katkı Kesiti 46
2.3.5.2 Wenner ve Yarım-Wenner Elektrot Dizilimi Sinyal Katkı Kesiti 46
2.3.5.3 Dipole-Dipole Elektrot Dizilimi Sinyal Katkı Kesiti 47
2.3.6. Özdirenç Çalışma Teknikleri 47
2.3.6.1 Düşey Elektrik Sondajı (DES) 47
2.3.6.2 Profil Ölçüsü 48
2.3.6.3 Sondaj Profil Ölçüsü 49
2.3.7 Özdirenç Verilerinin Sunumu 50
2.3.7.1 1B Veri Sunumu 50
2.3.7.2 Seviye (Kat) Haritaları 50
2.3.7.2.1 Düşey Seviye Haritası (Pseudo-Section, Yapma Kesit) 50
2.3.7.2.2 Yatay Seviye Haritası (Contour Map) 51
2.3.7.3 Yer Elektrik Kesit 52
2.3.8 Verilerin Modellenmesi 53
2.3.8.1 Düz-Çözüm (Forward Modeling) 53
2.3.8.2 Ters-Çözüm (Invers Modeling) 55
BÖLÜM 3 58
PATARA (KAŞ/ANTALYA) UYGULAMA ALANI 58
3.1. Çalışma Alanının Konumu 58
3.2. Patara Antik Kenti 58
3.3. Patara Villaları (Roma Villaları) 62

BÖLÜM 4 66
PATARA VİLLALARI ARKEOJEOFİZİK UYGULAMASI 66
4.1. Bölgenin Jeolojisi 66
4.2. Jeofizik Araştırma 69
4.2.1. Jeofizik Araştırma Alanı ve Çalışma Profilleri 69
4.2.2. GPR Çalışması 71
4.2.3. ERT Çalışması 76
4.2.3.1. Profillerin İncelenmesi 80
4.2.3.2 Derinlik Kesitleri. 96
BÖLÜM 5 108
SONUÇ VE TARTIŞMA 108
KAYNAKLAR 112
ÖZGEÇMİŞ 124

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

a	Elektrot Açıklığı
C	Akım Elektrotu
DES	Düşey Elektrik Sondaj
DAÖ	Doğru Akım Özdirenç
GÖ	Görünür Özdirenç
GPR	Georadar
I	Akım
k	Geometrik Katsayı (Geometrik Faktör)
P	Potansiyel Elektrotu
R	Direnç
RMS	Karesel Hata, (Root Mean Square)
V	Gerilim
ΔV	Gerilim Elektrotları Arasındaki Gerilim Farkı
ρ	Elektrik Özdirenç
ρ_a	Görünür Özdirenç
σ	Elektrik İletkenlik
Ω	Ohm
ε	Dielektrik Geçirgenlik
μ	Manyetik Geçirgenlik
χ_m	Mantetik Duygunluk

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Bir arkeolojik alanın hava fotoğrafı 4

Şekil 1.2. Gaziantep'in merkezindeki Bizans kalesi 4

Şekil 1.3. Rathcroghan Höyüğü ve koruma alanının LiDAR gölgeli rölyef dijital yükseklik modeli 5

Şekil 2.1. Kültürel mirasın korunmasına dair bir yapı civarında GPR araştırma sonucu 9

Şekil 2.2. Yer radarının çalışma prensipleri 14

Şekil 2.3 Hız ve Sönümleme değerlerinin frekansa olarak değişimi 20

Şekil 2.4. Ara yüzeye gelen dalga I'nın sınıra çarptıktan sonra enerjinin yansıyan ve iletilen dalgalara aktarılması 21

Şekil 2.5. TE ve TM bileşenlerinin arayüzeyde yansıması ve iletimi 21

Şekil 2.6. Anten durumlarına göre TE ve TM modları 22

Şekil 2.7. Frekans ile düşey ayrımlılık arasındaki ilişki 24

Şekil 2.8. Fresnel zonu ve yatay ayrımlılık 24

Şekil 2.9. Yer radarı ekipmanları 25

Şekil 2.10. Yer radarı ölçümlerinde kullanılan çeşitli anten dizilimleri 28

Şekil 2.11. Yarı sonsuz homojen ortamda akım ve potansiyel çizgilerinin dağılımı 30

Şekil 2.12. Özdirencin gözeneklilik ile değişim eğrisi 32

Şekil 2.13. Akımın verildiği ve gerilimin ölçüldüğü varsayılan noktalar 35

Şekil 2.14. Akım ve gerilim elektrotları arasındaki uzaklıklar 35

Şekil 2.15. Schlumberger elektrot dizilimi 37

Şekil2.16. Wenner elektrot dizilimi 38

Şekil 2.17. Wenner elektrot dizilimleri çeşitleri 39

Şekil 2.18. Wenner-Schlumberger elektrot diziliminde elektrotların konumları ve çok kanallı veri toplama düzeneği 39

Şekil 2.19. Dipol-Dipol elektrot dizilimi 40

Şekil 2.20. Pol-Dipol elektrot dizilimi 41

Şekil 2.21. Pol-pol elektrot dizilimi 41

Şekil 2.22. Sinyal katkı kesiti 44

Şekil 2.23. Yarım-Wenner elektrot diziliminde sinyal katkı kesiti 45

Şekil 2.24. Görünür özdirenç sondaj eğrisi 48

Şekil 2.25. Görünür özdirenç profil eğrisi 48

Şekil 2.26. Sondaj Profil ölçü tekniğine göre hazırlanmış görünür özdirenç yapma kesi 49

Şekil 2.27. Görünür özdirenç düsey elektrik sondajı egrisi ve 1B ters çözüm sonucu elde edilen 1B özdirenç modeli 50

Şekil 2.28. Görünür özdirenç yapma-kesiti 51

Şekil 2.29. AB/2=7 metre için İki-yönlü üç-elektrod dizilimi AMN, MNB ve AMNB GÖ seviye haritaları 52

Şekil 2.30. a) 1B model, b) 2B model, c) 3B model 54

Şekil 2.31. Nicel yorumlamanın basitleştirilmiş akış şeması 56

Şekil 2.32. 1B elektrik özdirenç ters-çözüm şeması 56

Şekil 3.1. Çalışma alanının konumu 59

Şekil 3.2. Efes Yamaç Ev-1 Peristili'nin Planı 64

Şekil 3.3. Efes yamaç ev-1 peristil bahçesi 'nin restitüsyonu 65

Şekil 3.4. Avsallar villa rusticası restitüsyonu 65

Şekil 4.1. Eşen ovası ve Patara'nın lokasyon haritası 67

Şekil 4.2. Patara ve çevresinin jeoloji haritası 68

Şekil 4.3. Çalışma alanının hava fotoğrafı ve araştırma yapılan alanın arazi üzerinde görünüşü. 69

Şekil 4.4. Çalışma alanında GPR profillerinin alan görünümü 70

Şekil 4.5. Çalışma alanında ERT profillerinin alan görünümü 71

Şekil 4.6. (0-0.2), (0.1-0.3) ve (0.3-0.5 m) derinlik değerleri için GPR sonuçları 72

Şekil 4.7. (0.4-0.6), (0.6-0.8) ve (0.7-0.9) m derinlik değerleri için GPR sonuçları 72

Şekil 4.8. (0.8-1.0), (1.0-1.2) ve (1.1-1.3) m derinlik değerleri için GPR sonuçları 72

Şekil 4.9. (1.2-1.5), (1.4-1.6) ve (1.5-1.7) m derinlik değerleri için GPR sonuçları 73

Şekil 4.10. (1.7-1.9), (1.8-2) ve (1.9-2.1) m derinlik değerleri için GPR sonuçları 73

Şekil 4.11. (2.1-1.9), (2-2.4) ve (2.4-2.6) m derinlik değerleri için GPR sonuçları ……... 73

Şekil 4.12. (2.5-2.7), (2.6-2.8) ve (2.8-3.0) m derinlik değerleri için GPR sonuçları 74

Şekil 4.13. (2.9-3.1), (3.0-3.2) ve (3.2-3.3) m derinlik değerleri için GPR sonuçları …... 74

Şekil 4.14. Çalışma alanının hava fotoğrafı 75

Şekil 4.15. GPR görüntülerinin hava fotoğraflarına çakıştırılması işlemi 75

Şekil 4.16. a) Yapısal olmayan ağ, b) yapısal ağ ve c) hibrit sonlu model ağları 77

Şekil 4.17. Ölçülen veri (6. ERT profili), Hesaplanan (kuramsal) veri, 10 Yineleme sonucu bulunan model 79

Şekil 4.18. Ölçülen veri (15. ERT profili), Hesaplanan (kuramsal) veri, 10 Yineleme sonucu bulunan model 79

Şekil 4.19. 1. profilin gerçek derinlik kesiti 80

Şekil 4.20. 2. profilin gerçek derinlik kesiti 81

Şekil 4.21. 3. profilin gerçek derinlik kesiti 82

Şekil 4.22. 4. profilin gerçek derinlik kesiti 83

Şekil 4.23. 5. profilin gerçek derinlik kesiti 84

Şekil 4.24. 6. profilin gerçek derinlik kesiti 85

Şekil 4.25. 7. profilin gerçek derinlik kesiti 86

Şekil 4.26. 8. profilin gerçek derinlik kesiti 87

Şekil 4.27. 9. profilin gerçek derinlik kesiti 88

Şekil 4.28. 10. profilin gerçek derinlik kesi 88

Şekil 4.29. 11. profilin gerçek derinlik kesiti 89

Şekil 4.30. 12. profilin gerçek derinlik kesiti 89

Şekil 4.31. 13. profilin gerçek derinlik kesiti 90

Şekil 4.32. 14. profilin gerçek derinlik kesiti 90

Şekil 4.33. 15. profilin gerçek derinlik kesiti 91

Şekil 4.34. 16. profilin gerçek derinlik kesiti 92

Şekil 4.35. 17. profilin gerçek derinlik kesiti 92

Şekil 4.36. 18. profilin gerçek derinlik kesiti 93

Şekil 4.37. 19. profilin gerçek derinlik kesiti 93

Şekil 4.38. 20. profilin gerçek derinlik kesiti 94

Şekil 4.39. 21. profilin gerçek derinlik kesiti 94

Şekil 4.40. 22. profilin gerçek derinlik kesiti 95

Şekil 4.41. 23. profilin gerçek derinlik kesiti 95

Şekil 4.42. z= 0m için 3B derinlik kesiti..... 96

Şekil 4.43. z= 0.25m için 3B derinlik kesiti 97

Şekil 4.44. z= 0.50m için 3B derinlik kesiti..... 98

Şekil 4.45. z= 0.75m için 3B derinlik kesiti..... 99

Şekil 4.46. z= 1.0m için 3B derinlik kesiti..... 100

Şekil 4.47. z= 1.25m için 3B derinlik kesiti..... 101

Şekil 4.48. z= 1.50m için 3B derinlik kesiti..... 102

Şekil 4.49. z= 1.75m için 3B derinlik kesiti..... 103

Şekil 4.50. z= 2.0m için 3B derinlik kesiti..... 104

Şekil 4.51. Çalışma alanının transparan ERT haritası 1 105

Şekil 4.52. Çalışma alanının transparan ERT haritası 2 106

Şekil 4.53. GPR görüntülerinin hava fotoğraflarına çakıştırılması işlemi 107

Şekil 4.54. ERT görüntülerinin hava fotoğraflarına çakıştırılması işlemi 107

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Bazı malzemeler için bağıl dielektrik sabiti ve iletkenlik değerleri 17
Çizelge 2.2. Bazı malzemeler için bağıl manyetik geçirgenlik değerleri 17
Çizelge 2.3. Anten merkez frekansı ile maksimum nüfuz derinliği arasındaki ilişki 26
Çizelge 2.4. Anten merkez frekansı ile maksimum örnekleme aralığı arasındaki ilişki 27
Çizelge 2.5. Bazı doğal malzemelerin elektrik özdirençleri 33
Çizelge 2.6. Bazı minerallerin elektrik özdirençleri 34
Çizelge 2.7. Bazı malzemelerin elektrik özdirençleri 34

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Jeofizik araştırmalar ilk olarak petrol ve maden gibi hammadde açısından önemli jeolojik araştırmalarda ortaya çıksa da gerek teknolojik gelişmeler gerekse çağın gereksinimleri ile gelişerek sadece jeoloji ve maden mühendisliklerine değil, farklı bilim dallarına da bilgi sağlamaktadır. Bunlar inşaat mühendisliği (jeoteknik), arkeoloji (arkeoloji jeofiziği), yeraltı suyu ve toprak kirliliği (çevre jeofiziği), inşaat mühendisliği ve mimarlık (yapı jeofiziği), peyzaj mimarlığı ve ziraat mühendisliği (tarım jeofiziği) olarak özetlenebilir. Bu araştırmalarda jeofizik mühendisliği, gravite yöntemi ve manyetik yöntem gibi doğal kaynaklı; yerelektrik yöntemler ve sismik yöntemler gibi yapay kaynaklı yöntemlerden yararlanmaktadır (Kaya, 2017a).

Jeofizik mühendisliğinin ortak çalışma yaptığı bilim dallarından birinin de arkeoloji olduğu belirtilmişti. Saltuk (1993), arkeolojiyi arkeos (eski) ve logos (bilim) sözcüklerine dayandırmaktadır. Arkeometri ise Esin (1985)'e göre (arkeolojide) çeşitli fen ve doğa bilimlerinin matematiksel ölçüm ve analiz yöntemlerinin uygulanması ve kullanılmasıdır. "Arkeolojik toprak altı ve üstü kalıntıların, ören yerlerinin saptanmasında" jeofizik yöntemlerden özellikle söz etmektedir (Kaya, Balkaya, Ekinci & Demirci, 2013).

Dünya kültür mirasının korunması amacıyla UNESCO, l972 yılında Paris'te toplanıp kültürel mirasın tahribat nedeniyle yok olma riski altında olduğunu vurgularken Kültürel Mirasın Korunmasına dair Avrupa Sözleşmesi de 1969'da " … Avrupa arkeolojik mirasının, büyük yapılanma çalışmalarındaki artıştan olduğu kadar doğal tehlikelerden, yasadışı veya bilimsel nitelikten yoksun kazılardan yahut halkın yeterli bilgilendirilmemesinden dolayı ciddi bir şekilde

tahrip tehdidi altında olduğunu" belirleyerek "Arkeolojik kazı ve aramaların bilimsel şekilde ve tahribatsız araştırma yöntemlerinin olduğunca sık kullanılması" nı zorunluluk derecesinde önermiştir (Kaya, 2018).

Yukarıdaki uluslararası sözleşmelerden çok önce, 1946'lardan itibaren jeofizik yöntemler hasarsız niteliği ile öne çıkmış ve arkeoloji jeofiziği amaçlı kullanılmaya başlanmıştır. Jeofizik yöntemlerin yüzeyden uygulanan teknikleri; arkeolojik yapı kalıntılarını hasarsız olarak hızlı ve pratik şekilde araştırarak, derinlik, konum ve durumlarını (position) belirlemekte ve arkeolojik kazı tasarımına yön vererek arkeolojik kazıya zamandan ve ekonomiden kazanç sağlamaktadır. Bu, yakın yüzey jeofizik (near-surface geophysics) araştırması arkeoloji jeofiziği olarak tanımlanmaktadır. (Kaya, 2018). Yakın yüzey jeofizik araştırmalar yerin (/yapı elemanının) yüzeyinden itibaren birkaç cm ile birkaç metre arasındaki derinliğini yüksek çözünürlükle ortaya koyabilmektedir. Tüm bu verilerin elde edilmesi süreci tahribatsız ve hasarsız olarak gerçekleştirilmektedir.

Tahribatsız (Non-Destructive Testing) sözcüğü 70 yıla yakın bir süredir inşaat mühendisliğinde kullanılmaktadır (Jones, 1949; Prassianakis ve Giokas, 2003; Niederleithinger, Wolf, Mielentz, Wiggenhauser & Pirskawetz, 2015). Tahribatsız test deyimi, beton ve donatının kısaca yapının tahribatsız test ve yöntemlerle araştırılmasını kapsarken süreç içinde jeofizik yöntemleri de kapsamıştır. Arkeoloji jeofiziği kapsamındaki tüm jeofizik uygulamalarda 20 yıla yakın bir süredir jeofizik uygulamaların tahribatsız niteliği farklı araştırmacılarca vurgulanmıştır. İsimlendirmede ise tahribatsız teknikler deyimi kullanılmaktadır (Non-Destructive Techniques (/Exploration), NDT) (Ciminale & Richetti, 1999; Athanasiou Tsourlos, Papazachos & Tsokas 2007; Mol & Preston, 2010; Fort, Alvarezde-Buergo & Perez-Monserrat, 2013; Pérez-Gracia, Caselles, Clapés & Martinez 2013). Restorasyon amaçlı çalışmalarda kullanılan terimlerden birisi de "bozucu olmayan" dır (non-invasive) (Snieder vd., 2007; Soldovieri, Dumoulin & Masini, 2011; Gizzi, Leucci, Masini, Persico & Quarta, 2015). Jeofizik yöntemlerin hasarsızlığını vurgulamak için kazısız (no-dig, trenchless) özelliği de zaman zaman öne çıkarılmaktadır. Ulugergerli (2005), "Kazmadan Görmek" deyimi ile genel olarak jeofizik araştırmaları özel olarak da arkeoloji jeofiziği uygulamalarını vurgularken Campana ve Piro (2009), "Görünmeyeni

Görmek" (Seeing the Unseen) deyimi ile jeofizik yöntemlerin tahribatsız (/hasarsız) yeraltını görüntüleme üstünlüğünü öne çıkarmışlardır (Kaya, 2017b).

Arkeoloji jeofiziği uygulamasındaki amacın, toprak altındaki arkeolojik yapı kalıntılarının, onlara herhangi bir hasar vermeden, derinlik, uzanım ve durumlarının ortaya konması olduğu yukarıda vurgulanmıştır. Arkeoloji jeofiziği, günümüzde hızlı ölçü alabilen alet ve donanımların varlığı ve elde edilen verilerin hızlı bilgisayarlarda işlenip yeraltının 2B veya 3B'lu olarak yüksek çözünürlükte görüntülenmesi ile arkeolojik kazılarla yıllarca sürebilecek kazı alanlarında, toprak altındaki yapı kalıntılarının hızlı ve ekonomik olarak görüntülenmesini (/belirlenmesini) sağlamaktadır. Bu da arkeolojik kazının tasarımına katkı koyarken aynı zamanda arkeolojik kazılarda zaman ve ekonomik kayıpları en aza indirmek için arkeoloji jeofiziğinin uygulanması gerektiğinin kanıtıdır. Böylece arkeolojik kazılarda gereksiz harcamalar önlenmiştir. Ek olarak; mühendislik projeleri ile araştırılan ve denetlenen baraj, metro gibi büyük inşaat projelerinde uygulama alanlarının sit alanı olup olmadığının bilinmesi ya da sit alanı ise yapı kalıntılarının Marmaray projesinde olduğu gibi yerlerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu tür büyük projelerde zaman önemli bir faktördür. Arkeoloji jeofiziği hasarsız uygulamaları yüzeyden yürütülerek hızlı veri toplama ve veri işleme teknikleri ile yeraltını 2B ve 3B'lu olarak ortaya koyarak kazı sürecini kısaltmaktadır (Kaya, 2018).

Başlangıçta Balon veya uçaktan çekilen fotoğraflar, günümüzde dron, uydu görüntüleri ve Lidar (light detection and ranging) uygulamaları, arkeolojik alanların sınırlarının belirlenmesi konusunda arkeolojik kazılarada önemli yarar sağlamaktadır. Persson (2005), arkeoloji amaçlı ilk hava fotoğrafının P. H. Sharpe tarafından 1906 yılında İngiltere'de (Stonehenge) çekildiğini belirtmektedir. Hava fotoğrafları höyük, tümülüs ya da bir kentin sınırlarının belirlenmesinde faydalı sonuçlar sunmaktadır (Şekil 1.1). Yüzey araştırmaları da arkeolojik alan hakkında oldukça faydalı bilgiler sunmaktadır. Yine de gerek hava fotoğrafları gerekse yüzey araştırmalarından sağlanan bulgularla yeraltındaki yapı kalıntıların derinliğinin ve mimari yapısının ortaya konması çok güçtür. Daha yeni yerleşim birimlerinin altında kalan antik yerleşimlerden bu geleneksel usullerle bilgi alınması da mümkün görünmemektedir (Şekil 1.2). Son yıllardaki Lidar uygulamaları, özellikle, yeryüzündeki antik yapıların (/yapı

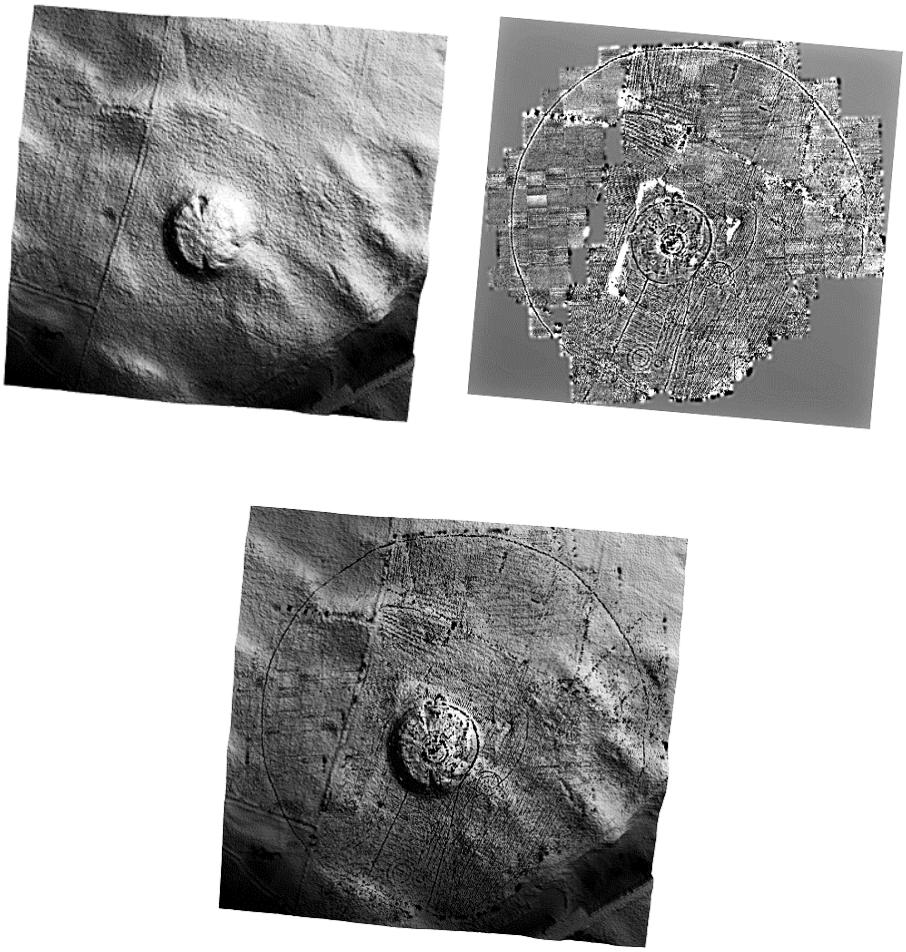
kalıntılarının) 2B ve 3B'lu görüntüsünde önemli olmaktadır. Arkeoloji jeofiziğinin katkısı, bir Lidar görüntüsü üzerinde Şekil 1.3'de gösterilmiştir (Kaya, 2018). Şekil 1.3'de de görüldüğü gibi, LİDAR görüntüsü yüzeydeki yapılar için katkı sağlarken yeraltındaki antik yapı kalıntıları için hiçbir zaman arkeoloji jeofiziği uygulamasının sağladığı katkıyı sağlamamaktadır.



Şekil 1.1. Bir arkeolojik alanın hava fotoğrafı (Aerial, 2016).



Şekil 1.2. 7 bin yıllık höyük üzerine inşa edilmiş Bizans kalesi, Gaziantep (Tayproject, 2008).



Şekil 1.3. Rathcroghan Höyüğü ve koruma alanının LiDAR gölgeli rölyef dijital yükseklik modeli (üstte, solda), (Co Roscommon (Ordnance Survey Ireland)), Rathcroghan Höyüğü ve koruma alanının manyetik gradiyometri görüntüsü (üstte, sağda) (Co Roscommon, 2009) ve manyetik gradiyometri görüntüsünün LiDAR gölgeli rölyef dijital yükseklik modeli üzerine oturtulmuş hali (altta), (Airbone, 2018).

Arkeolojik yapı ve kalıntılarının araştırılmasında olduğu gibi, ortaya çıkarılmış veya zaten yeryüzünde olan kültürel mirasa dair yapıların restorasyonunda da jeofizik mühendisliğinin katkısı bulunmaktadır. Saltuk (1993) göre, restorasyon, bir yapının ya da eserin yıkılan, harap olan bölümlerinin daha fazla tahrip olmasını önlemek için aslına uygun biçimde belirli prensiplerle onarılması şeklinde tariflemektedir. Restorasyonun yapı ya da eserin aslına uygun malzeme ile gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Yapı jeofiziğinde uygulanan yöntemlerin restorasyon amaçlı kullanılması da mümkündür.

Öyleki Capizzi, Martorana, Messina ve Cosentino (2012)'de belirtildiği gibi restorasyon projelerine jeofizik ve jeoteknik araştırmaların desteğinden örnekler sunarken jeofizik görüntülemenin restorasyonu desteklemek için standart bir yöntem olması gerekliliğini vurgulamışlardır (Kaya, 2018).

Kaya ve diğerleri (2013), arkeojeofizik konusundaki ilk çalışmanın 1946 yılında İngiltere'de yürütüldüğünü belitmektedir. Özdirenç yönteminin uygulandığı bu çalışma Atkinson tarafından gerçekleştirilmiştir. İlk manyetik uygulama da İngilterede 1958 yılında yapılmıştır. Arkeojeofizik amaçlı bu özdirenç ve manyetik uygulamaları Aitken (1961) "Physics and Archaeology" adı altında kitap haline getirmiştir. Türkiye'de arkeojeofizik uygulamaları 1960'lı yıllarda Keban kurtarma kazıları ile başlamıştır. ODTÜ'nün desteklediği Tepecik ve Norşun höyüğü ile Ağın kalesindeki kurtarma kazılarında Yaramancı (1970) özdirenç çalışmaları yapmıştır (Kaya vd., 2013).

Jeofizik yöntemler kullanılarak Roma antik kentlerindeki villaların araştırılmasında; manyetik yöntem Antandros Antik Kenti yamaç evlerinin belirlenmesinde (Görener, 2008), GPR yöntemi İtalya'nın kuzeyindeki Roma villalarının araştırılmasında (Francese, Finzi & Morell 2009), tümleşik jeofizik yöntemler Almanya Regensburg yakınlarında bir Roma villasında (Leopold, Plöckl & Forstenaicher, 2010), GPR ve ERT yöntemleri Kuzey Sardunya (İtalya)'da Roma villalarının araştırılmasında (Testone, Longo & Mameli, 2014) kullanılmıştır. Patara'da antik yapı kalıntılarının elektrik özdirenç tomografi (Electrical Resistivity Tomography, ERT) ve jeoradar (Ground Penetration Radar, GPR) yöntemleriyle araştırılması Kaya vd. (2017) tarafından gerçekleştirilmiş ise de Patara Roma villaları bu tez kapsamında araştırılmıştır.

Arkeojeofizik çalışmalar ülkemizde ve dünyada oldukça yoğun kullanılsa da Roma Villaları üzerine yapılan arkeojeofizik araştırmaların sayısı azdır. Roma Villaları antik çağın üretim faaliyetlerine ışık tutan yapılardır. Konum olarak üretim faaliyetlerinin yürütüldüğü bölgelere kurulmaları; yatak odaları, konuk odaları, hizmetli odaları, depolar, ahırlar, imalathaneler, hamamlar gibi çok çeşitli bölümlerin birleşiminden meydana gelen büyük yapılar olmaları nedeniyle arkeolojik açıdan önemlidir (Arkeolog Dr. Şevket Aktaş ile kişisel görüşme, 3 Haziran 2018). Bu tür

yapıların yeraltındaki bölümlerinin belirlenmesi de arkeojeofizik açıdan önemli araştırma alanları olabilmektedir.

Roma villalarının doğrudan üretim faaliyetleri ile ilgisi (şarap mahzeni, zeytinyağı deposu, …) ve yaşam alanı olması; Romalıların çeşitli heykel ve mozaiklerle süslemeleri; içindeki hamam ve havuz türü yapıları, … villaların arkeojeofizik yöntemlerle araştırılması ve arkeolojik kazılarla yeryüzüne çıkarılması ile dönemin sosyal yaşamı ve ekonomik zenginliğini ortaya çıkarmaktadır. Patara Roma villalarının arkeojeofizik araştırmalarla ortaya konması arkeoloji bilimine (/Patara Roma dönemine) büyük katkılar sağlayacaktır.

Bu çalışma Antalya ili, Kaş İlçesi sınırları içerisinde bulunan Patara Antik Kenti'nde Prof. Dr. Havva Işık Başkanlığında yürütülen kazı alanında gerçekleştirilmiştir. Araştırmada Roma Villalarının bulunduğu düşünülen bölgede çalışmalar yürütülmüştür. Ülkemizde yapılmış arkeojeofizik çalışmalar içerisinde literatürde Roma villaları üzerine ilk elektrik özdirenç tomografi (ERT) araştırmasıdır. Aynı alanda Kaya, Balkaya, Akca ve Çakmak (2018)'nin yer radarı (GPR) araştırmasının sonuçları da ERT sonuçlarını desteklemek amacıyla kullanılmıştır.

Trakya Üniversitesinde jeofizik araştırmaya dayanan bir YL tezi yapılmadığından DAÖ yöntemi ERT tekniği şeklinde uygulansa da DAÖ yönteminin temel ilkeleri ve tez kapsamında uygulanmayan fakat sonuçlarından yararlanılan GPR yöntemi ayrıntılı olarak anlatılmıştır.

BÖLÜM 2

ARKEOJEOFİZİK VE UYGULANAN YÖNTEMLER

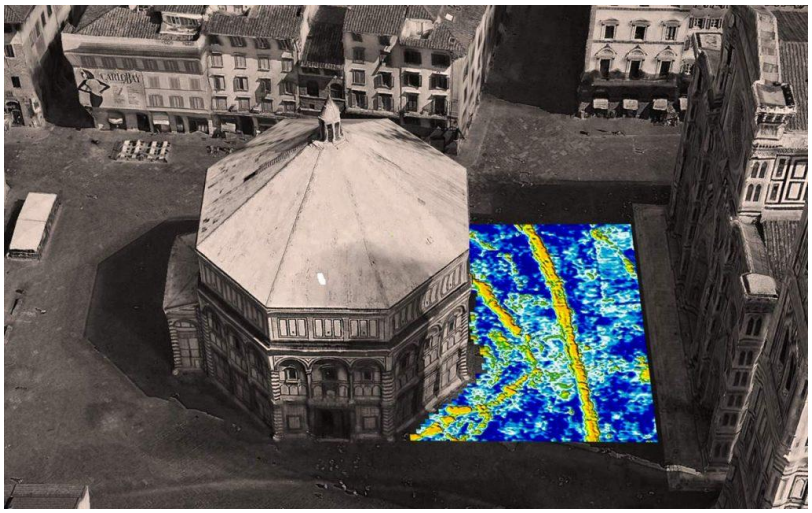
Jeopolitik konumu, üzerinden geçen ticaret yolları ve verimli topraklarının cazibesiyle ülkemiz yüzyıllardır çeşitli medeniyetlere ev sahipliği yapmıştır. Dört bir yanından tarih fışkıran ülkemiz şüphesiz ki arkeoloji açısından çok zengin ve çok değerlidir. Yeryüzündeki antik yapı kalıntıları hepimizin dikkatini çekerken antik yapı kalıntılarının, belki de çoğu, buzdağının su altındaki bölümü gibi, toprak altındadır. Bu nedenle ülkemizde ve dünyada her yıl yüzlerce arkeolojik kazı yapılmaktadır. Bilindiği gibi arkeolojik kazılar hem uzun zaman almakta hem de yüksek maliyetlidir. Kazı öncesinde yeraltındaki arkeolojik yapı kalıntılarının varlığı, yüzey araştırmalarına göre yorumlanmakta ve kazı sonucunda belirlenmekteydi (/belirlenmektedir).

Sadece yüzey araştırmalarına göre kazı yürütmek, zaman ve ekonomide ciddi kayıplara neden olmaktadır. Bu bağlamda arkeoloji ile jeofiziğin ilişkisi de tam bu noktada başlamaktadır. Jeofizik yöntemler yeraltında bulunan arkeolojik yapı kalıntılarının belirlenmesinde, yüzey araştırmalarına göre, yeraltındaki antik yapı kalıntılarının varlığı, konumu ve derinliği konularında güvenilir sonuçlar vermektedir. Ayrıca jeofizik yöntemlerin bozucu olmamasının (Non-invasive Sensing Techniques) (Soldovieri vd., 2011), (Palombo vd., 2001), (Soldovieri, Dumoulin, Masini, & Solimene 2012)) yanısıra kazısız (No-dig) (Grandjean vd., 2000)) ve hasarsız (Non-destructive Exploration) (Ciminale & Richetti, 1999) olması yeraltındaki antik yapı kalıntılarına hiçbir zarar ve hasar vermeden onların konum ve derinliği veya mimari yapısının belirlenmesine olanak tanımaktadır (Kaya, 2016).

Arkeolojik yapı kalıntılarının araştırılmasında jeofizik yöntemlerin kullanılması literatürde “Archaeogeophysics” (Ateş, 2002) ya da “Archaelogical Geophysics” (Cott, 2002) şeklinde isimlendirilirken, “Geophysical Survey” (Matias & Almedia, 1992) veya

“Geophysical Prospection” (Wynn, 1986) olarak da adlandırılabilmektedir. Kaya (2006)’ya göre adlandırmalar ki farklılıklar ülkemizde “arkeoloji jeofiziği“ veya “arkeojeofizik” olarak kullanılmaktadır.

Jeofizik yöntemlerinin yeraltındaki arkeolojik yapı kalıntılarının araştırılmasında; yüzeyden uygulanan ve tahrip edici olmayan tekniklere sahip olmaları ve bozucu etkilerde bulunmaması tercih edilmesinin en önemli gerekçesidir. Kaya vd (2013)’e göre yeraltında bulunan olası yapı kalıntılarının derinlik ve konumlarını saptayarak arkeolojik kazı tasarımına yön vererek kazıların harcama ve zaman açısından ekonomik olmasını sağlayan bilim dalı olarak arkeojeofiziği tanımlamışlar ve restorasyon amaçlı jeofiziği ve yeniden yapılandırma (reconstruction) çalışmalarını da arkeojeofizik tanımına dahil etmişlerdir.



Şekil 2.1. Kültürel mirasın korunmasına dair bir yapı civarında GPR araştırma sonucu (GPR, 2016).

Jeofizik yöntemler dışında arkeolojik araştırmalarda kullanılan lazer tarama, hava fotoğrafları ve jeomorfolojik araştırma yöntemleri, yüzey araştırmalarını destekleyen fakat jeofizik sonuçlar gibi konum, derinlik ve durum (position) bilgisi vermeyen arkeometri dallarıdır.

2. Dünya savaşının ardından gelişen ekonomi ve kalkınma seviyesinin artması çevre ve tarih bilincinin gelişmesine dolayısıyla duyarlılığın artmasına neden olmuştur.

İnsanlığın ortak mirası kavramı uluslararası toplumda kabul görmeye başlamıştır. Bununda sonucu olarak 19 Aralık 1954'de Paris' de imzalanan Avrupa Kültür Sözleşmesi (Uluslararası, 2018) ve bunun 1. ve 5. maddelerinin arkeolojik ve tarihi mirasın korunmasına yönelik önerisi çok önemlidir. Ülkemiz tarafından 1992 tarihinde imzalanan Dünya Kültürel ve Doğal Mirasının Korunmasına Dair Sözleşme'de;

Arkeolojik mirası korumak ve arkeolojik araştırma faaliyetlerini bilimsel güvence altına almak amacıyla 'Tahrip edici olmayan araştırma yöntemlerinin olduğunca sık kullanılması' önerilmektedir. Anayasal ve uluslararası sözleşmelerle ortak mirasın koruma altına alınmasının ve tespitinin ancak bilimsel yöntemler ile mümkün olduğu ve tahrip edici olmayan yöntemlerin kullanılması gerektiği vurgulanmıştır. Burada tahrip edici olmayan ve bilimsel araştırma yöntemleri tam da jeofizik bilimini tanımlamaktadır (Kaya vd., 2013).

2.1. Arkeojeofizikte Uygulanan Jeofizik Yöntemler

Arkeolojik amaçlı jeofizik çalışmalarda en fazla kullanılan yöntemler; manyetik, yer radarı (jeoradar, GPR (Ground Penetrating Radar)) ve elektrik özdirençtir. Bu yöntemler tek başına kullanıldığı gibi son yıllarda 2 veya daha fazlası birlikte kullanılmakta ve araştırmanın çözüm gücü artırılmaktadır (tümleşik (integrated)).

Manyetik yöntem: arkeojeofizik uygulamalarda geniş alanların hızlı şekilde araştırılmasını ve yeraltı manyetik haritasının oluşturulmasını sağlayan ve en sık kullanılan jeofizik yöntemlerdendir. Hızlı olmasının yanı sıra bir jeofizik mühendisi ile bile uygulanabilmesi personel masraflarını da azaltmaktadır. Gradyen ölçümü olarak adlandırılan manyetik çalışma aralarında (0.6- 1.2 metre) olan iki manyetik alıcı (sensor) ile yürütülmekte böylece baz ölçüsüne ihtiyaç duyulmamaktadır. Gradyometre ölçümü ile, sığ pişmiş topraktan yapılmış malzemeler, kerpiç duvar gibi kalıntılar ve metalik nesneler araştırılabilmektedir (Candansayar, 2013). Amorium Antik Kentinin Manyetik Yöntemle araştırılmasında Kaya ve Özyalın (1999), bu konuda tek bir yöntemin uygulandığı örnek çalışmalardandır.

Özdirenç yöntemide, manyetik yöntem gibi, arkeolojik alanlarda en çok tercih edilen ve en başarılı jeofizik yöntemlerdendir. Yöntem, gömülü yapıların, kendisini saran, jeolojik yapıya göre özdirenç farklılığını kullanmaktadır. Arkeolojik yapı kalıntılarını oluşturan kayaç ve metalik nesnelerin her birinin farklı elektrik özellikleri bulunmaktadır. Bu farklılık; sedimanlar arasında kalan yeraltındaki dirençli arkeolojik yapı kalıntılarının belirlenmesini kolaylaştırmaktadır. Özdirenç yönteminin en önemli üstünlüğü gömülü yapı kalıntılarının gerçek boyut ve derinliklerinin bulunabilmesidir (Candansayar, 2013). Arkeojeofizik amaçlı; Kelenderis Antik Kenti agorasında antik yapı kalıntılarının özdirenç yöntemi ile araştırılması (Kaya, Öztürk & Zoroğlu 2004), Oygu mezarların özdirenç yöntemi ile araştırılması: Nagidos ve Patara örnekleri (Kaya & Balkaya, 2005) sadece özdirenç yönteminin uygulandığı çalışmalardır.

Arkeojeofizik gibi yakın yüzey araştırmalarında özellikle son 30 yılda sıklıkla kullanılmaya başlayan yer radarı (jeoradar), bir yüksek frekanslı elektromanyetik yöntemdir. Çok hızlı veri toplama yeteneği, çok geniş alanların çok kısa zamanda araştırılmasına olanak sağlarken sığ derinlikler için yüksek çözünürlükte görüntü elde edilmesi yöntemin en çok tercih edilmesinin ana gerekçeleridir (Kaya, 2017b). Yer radarı, yeraltındaki yapıların (arkeolojik yapı kalıntıları ya da doğal oluşumlar) dielektrik sabitinin değişiminden yararlanmaktadır. Özellikle 2 metre derinliklere kadar yüksek çözünürlükte bilgiler sunması, arkeolojik çalışmalarda en çok istenen ve en çok uygulanan yöntem olmasını sağlamaktadır. Tlos Antik Kenti Stadion Alanında Jeoradar çalışmaları (Hoskan, Yüksel, Avcı, Ergüven & Korkut, 2014) yer radarının uygulandığı çalışma örnekleri arasındadır.

1990'lı yıllardaki araştırmalarda, arkeolojik soruna göre seçilen, tek yöntem uygulaması dikkat çekmektedir. Bu bağlamda manyetik yöntem (Gibson (1986), Tarling vd. (1986), Brizzolari vd. (1992), Drahor vd. (1995), Marshall (1999), Drahor ve Kaya (2000), Ateş vd. (2003), Ekinci ve Kaya (2006), Kaya vd. (2007)) yaygın olarak kullanılmıştır. Doğru akım özdirenç yöntemi (DAÖ) (Pattantyus (1986), Bernabini vd (1987), Başokur (1992), Sutherland vd (1998), Candansayar and Başokur (2001), Kaya vd (2004), Ekinci ve Kaya (2007), Ekinci vd. (2012)) uygulamaları da öne çıkmaktadır. Kuşkusuz jeoradar (GPR) yöntemi uygulamaları o yıllarda da bulunmaktadır

((Vaughan, 1986), Edwards vd. (2000), Chavez vd. (2001), Leucci (2002), De La Vega vd. (2005), Goodman vd. (2006)) (Kaya, 2018).

İlerleyen süreçte ve günümüzde tek yöntem uygulamaları devam etse de arkeolojik soruna göre seçilen, birkaç yöntemin birlikte uygulanması daha çok tercih edilmektedir (Piro, 1996; Kaya, Başokur, Ateş, Pekşen & Candansayar, 1996; Carderelli, Fishanger & Piro 2008; Ekinci. Balkaya, Seren, Kaya & Lightfoot 2014; Küçükdemirci, Özer, Salvatore, Baydemir & Zamuner, 2017). Böylece arkeolojik alanın gerçeğe en yakın yeraltı görüntüsünün (/modelinin) elde edilmesi ve arkeoleoji jeofiziğinin başarısının yükseltilmesi amaçlanmaktadır (Kaya, 2018). Bu bağlamda bir veya daha fazla jeofizik yöntemin tümleşik olarak uygulanması Assos (Ayvacık, Çanakkale) Antik Kentinde Arkeojeofizik Uygulamalar (Kaya vd, 2004), Metropolis Antik Kentindeki tümleşik jeofizik çalışmalar (Özyalın vd, 2010), Pisidia Antiokheia Antik Kentinde (Yalvaç, Isparta) Yer Radarı ve Elektrik Özdirenç Tomografi Araştırmaları (Üstol, Balkaya & Kalyoncuoğlu (2013) ve Balkaya, Çakmak, Kalyoncuoğlu, Özhanlı ve Balkaya (2018)) arkeojeofizik alanında ülkemizde uygulanmış literatür örnekleri olarak verilebilir.

Yine ilerleyen süreçte geniş ölçekli (large-scale) araştırmalar gerçekleştirilerek birkaç kazı dönemi sürdürülen arkeoloji jeofiziği araştırmaları ile onlarca kazı dönemi sürecek arkeolojik kazıların planlanması ve arkeolojik alanın koruma altına alınması sağlanmaktadır (Brizzolari, Ermolli, Orlando, Piro & Versino 1992; Tsokas vd., 1994; Cammarano, Mauriello &Piro, 1997; Gaffney, Gater, Linford, Gaffney & White 2000; Drahor, 2006; Filzwieser vd., 2017; Kaya, 2018).

2.2 . Yer Radarı Yöntemi

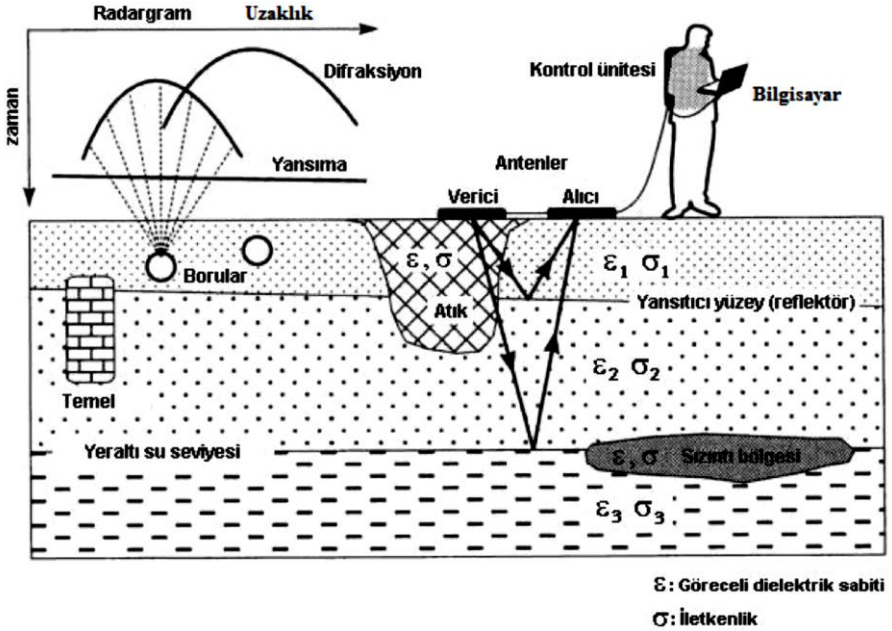
Yer radarı yöntemi, çok yüksek frekanslı elektromanyetik (EM) yöntem olarak tanımlanmaktadır. Bir verici anten tarafından oluşturulan çok yüksek frekanslı EM dalgalarının yeraltından (araşltırılan yapı ve nesnelerden) yansıması ve geri dönerek alıcı anten tarafından kaydedilmesi prensibine dayanmaktadır. Zamanın bir fonksiyonu olarak kayıt edilen dalgalara radargram adı verilmektedir. Yere gönderilen EM dalganın

merkez frekansı nüfuz derinliğini, soğrulma miktarını ve saçılma derecesini belirlemektedir (Annan'dan aktaran Kurt, 2009).

Yer radarı yöntemi, ilk olarak Stern tarafından bir düzenek kurularak 1929'da Avusturya'da denenmiştir (Stern, 1929, Stern & Grundlagen, 1930). 'Radar' kelimesi 1934'de "Radio Detection And Ranging" cümlesinden türetilmiştir (Buderi, 1996). Uzun bir süre bu teknoloji ile pek ilgilenilmemiştir. 1950'de Birleşik Devletler Hava Gücü, radarları Gröndland'da buz dağları boyunca yapılan deneme uçuşlarında kullanmış, büyük başarılar elde edilemese de araştırmalar sürdürülmüştür. Buzulların derinliğini bulmak için 1967'de Stern'in düzeneğine benzer bir düzenek önerilmiş, daha sonra bu düzenek "Yeraltı Elektrik Özellikleri Deneyimi" olarak adlandırılmış ve Apollo 17 Uzay aracı ile aya ilk uçuşta kullanılmıştır (Kesemen, 2007). Yer radarı aleti 1970'lerin ilk yıllarında Ohio Devlet Üniversitesinin Elektrobilimler Laboratuarında üretilmiş olup Rex Morey ve Art Drake 1972'de "Geophysical Survey Systems Inc." şirketi ile yer radarı aletini ticari olarak satışa sunmuş; satışlar başladıktan sonra araştırmalarda, uygulamalarda ve yayınlarda artış gözlemlenmiştir (Üstol, 2013).

2.2.1. Yöntemin Tanımı

GPR, yüksek çözünürlüklüdür ve sığ yüzey araştırmasının en çok tercih edilen yöntemidir. Çözünürlüğünün yanı sıra çok hızlı veri toplanmasıda tercih edilmesinin ana etkenleridir. Yöntemin ana frekansı 10 MHZ- 2.6 GHZ aralığındadır. Yer radarı uygulaması, sismik yansıma uygulamasına benzerlik göstermektedir.Çok yüksek frekanslı EM dalgalarını kullanan GPR yöntemi ve akustik dalgaları kullanan sismik yöntemde kullanılan dalgaların türleri farklı olsa da yöntemlerin işleyişleri çok benzemektedir. GPR yönteminde kullanılan EM dalgaların frekansına bağlı olarak çözünürlük ve görünebilirlik birkaç cm ile birkaç m arasında değişmektedir. GPR cisimlerin geometrisi ve derinliklerinin belirlenmesinde en hassas jeofizik yöntemdir (Kaplanvural, 2011).



Şekil 2.2. Yer radarının çalışma prensipleri (Knödel, Krummel & Lanke, 1997; Kaplanvural, (2011) tarafından düzenlenmiştir).

2.2.2. Yer Radarı Kuramı

Yer radarı yönteminin temeli elektromanyetik teoriye dayanmaktadır. Elektromanyetik teorinin temeli Maxwell denklemleri olup aşağıdaki dört temel denklem olarak bilinir.

Amper yasasına göre bir ortamdan alternatif akım (AC) geçerse mutlaka manyetik alan oluşur.

$$\vec{\nabla} x \vec{H} = \vec{J}_s + \frac{\partial}{\partial t} \vec{D} \tag{2.1}$$

Burada $\vec{J}_s$, serbest akım yoğunluğudr. Faraday yasasına göre manyetik alanın zamanla değişimi elektrik alan oluşturmaktadır.

$$\vec{\nabla} x \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \tag{2.2}$$

Gauss yasası, kapalı bir yüzeydeki elektrik akısının, bu yüzey tarafından çevrelenmiş olan hacimde bulunan net yük ile orantılı olduğunu ifade etmektedir.

$$\vec{\nabla} . \vec{D} = \rho_s \tag{2.3}$$

Burada ρ_s, serbest hacim yük yoğunluğudur.

Manyetik alan için Gauss yasasına göre kapalı bir yüzeyden geçen net manyetik akı sıfırdır.

$$\vec{\nabla} . \vec{B} = 0 \tag{2.4}$$

Bunlara ek olarak ortam ve alanlarla ilgili üç bağıntı aşağıdaki gibi verilmektedir;

$$\vec{\mathrm{D}} = \overrightarrow{\varepsilon E} \tag{2.5}$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \tag{2.6}$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \tag{2.7}$$

Burada H $\vec{}$ Manyetik alan şiddeti (A/m), E $\vec{}$ Elektrik alan şiddeti (V/m), B $\vec{}$ Manyetik akı yoğunluğu (nT), D $\vec{}$ Elektrik akı yoğunluğu (Coulomb/m2), J $\vec{}$ Akım yoğunluğu (A/m^2), ρ $\vec{}$ Serbest elektrik yük yoğunluğu ($Coulomb/m^3$), ε Dielektrik sabiti (Farad/m), σ İletkenlik (Siemens/m), μ Manyetik geçirgenlik (Henry/m) dir. EM yöntemlerde malzemenin fiziksel özellikleri ile ilgili parametreler olan σ, μ, ε elektromanyetik dalga yayılımının incelenmesi açısından oldukça önemlidir (Balanis, 1989).

2.2.2.1. Ortamın İletkenliği

Materyal ve malzemelerin elektrik akımına (elektronların hareketlerine) karşı gösterdiği dirence özdirenç denmektedir. Doğada bulanan kayaçlar ve mineraller farklı özdirenç değerlerine sahip oldukları gibi içinde bulundukları fiziksel koşullar özdirenç değerlerinde değişimlere neden olmaktadır. Çünkü jeolojik ortamda formasyonun çimentolanması, suya doygunluğu, gözenekliliği, mineral içeriği ve sıcaklığı doğrudan özdirenci etkilemektedir. Özdirencin tersi de iletkenliktir (Öztürk, 1995).

2.2.2.2. Dielektrik Sabiti (Ortamın Elektriksel Geçirgenliği)

Dielektrik sabiti, bir malzemenin elektriksel yükü depolayabilme ve serbest bırakabilme özelliğidir (Cassidy, 2009). Dielektrik sabiti (ε) ortamın elektrik özelliğine bağlı bir katsayıdır;

$$\varepsilon = \varepsilon_0(1 + x_e) \tag{2.8}$$

ile verilir. Burada ε_0 boşluğun elektriksel geçirgenliği ve X_e ortamın elektrik duyarlılığıdır. Boşluk için $\varepsilon_0 = 8.85x10^{-12}F/m$, X_e ise sıfırdır. Dielektrik sabiti malzemenin elektriksel geçirgenliğinin boşluğun elektriksel geçirgenliğine oranıdır;

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \tag{2.9}$$

ile verilir. Çizelge 2.1 Bazı malzemeler için bağıl dielektrik sabiti ve iletkenlik değerleridir.

2.2.2.3. Ortamın Manyetik Geçirgenliği

Manyetik geçirgenlik değeri μ, demir ve nikel içeren materyaller dışında fazla değişime uğramamaktadır. Durağan manyetik geçirgenlik;

$$\mu = \mu_0(1 + \chi_m) \tag{2.10}$$

bağıntısı ile verilir. Burada μ_0 boşluğun manyetik geçirgenliği, χ_m ortamın manyetik duyarlılığıdır. Boşluk için μ_0=$4\pi10^{-7}$ H/m dir. Bağıl manyetik geçirgenlik, malzemenin manyetik geçirgenliğinin boşluğun manyetik geçirgenliğine oranlanıdır.

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \tag{2.11}$$

dir. Çizelge 2.2'de bazı malzemeler için manyetik geçirgenlik verilmiştir.

Çizelge 2.1. Bazı malzemeler için bağıl dielektrik sabiti ve iletkenlik değerleri (Schön, 1998, Daniels, 1996).

Malzeme	Dielektirk Sabiti	İletkenlik (mS/m)	Hız (m/ns)	Attenüasyon (Sönümlenme) (dB/m)
Hava	1	0	0.3	0
Damıtma su	80	0.01	0.033	0.002
Taze su	80	0.5	0.033	0.1
Deniz suyu	80	30,000	0.01	1,000
Kuru kum	3-5	0.01	0.15	0.01
Doymuş kum	20-30	0.1-1.0	0.06	0.03-0.3
Kireçtaşı	4-8	0.5-2	0.12	0.4-1
Kil	5-15	1-100	0.09	1-100
Tortul	5-30	1-100	0.07	1-100
Kil, balçık	4-40	2-1,000	0.06	1-300
Granit	4-6	0.01-1	0.13	0.01-1
Tuz	5-6	0.01-1	0.13	0.01-1
Buz	3-4	0.01	0.16	0.01

Çizelge 2.2. Bazı malzemeler için bağıl manyetik geçirgenlik değerleri (Balanis, 1989).

Malzeme	Göreceli manyetik geçirgenlik
Su	0.9
Boşluk	1
Hava	1.0000004
Kobalt	250
Nikel	600
Demir	5000

2.2.3. Elektromanyetik Dalgaların Özellikleri

Elektromanyetik dalgalar, ortamın fiziksel özelliklerine bağlı olarak yayılmaktadırlar. Andre Marie Ampere (1775-1836), Michael Faraday (1791-1867) ve Karl Friedrich Gauss (1777-1855)'un yapmış olduğu çalışmalar ışığın elektromanyetik dalga olduğunu ve boşlukta ışık hızıyla yayıldığını ortaya koymaktadır (Sears, Zemansky & Young, 1982).

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} \tag{2.12}$$

$c \cong 3x10^8 m/s$ olarak hesaplanır. Elektromanyetik dalga madde içinde yayılırsa hız

$$v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon \mu}} \tag{2.13}$$

olarak verilir. Maddenin bağıl dielektrik sabiti ε_r ve maddenin bağıl manyetik geçirgenliği μ_r,

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \tag{2.14}$$

ve

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \tag{2.15}$$

bağıntıları ile hız bağıntısı tekrar yazılırsa malzemenin içinde seyahat eden elektromanyetik dalga hızı;

$$v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r \mu_r}} \tag{2.16}$$

olarak ifade edilebilir. (2.16) bağıntısında belirtildiği üzere elektromanyetik dalga hızı (v), bağıl dielektrik sabiti ve bağıl manyetik geçirgenliğin bir fonksiyonudur. Elektromanyetik dalga için sırasıyla, sönümlenme ve empedans bağıntıları ise aşağıdaki gibi tanımlanır (Annan, 2004);

$$\alpha = \frac{\sigma}{2}\sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \tag{2.17}$$

$$z = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \tag{2.18}$$

Boşluğun empedansı;

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} = 377\Omega \tag{2.19}$$

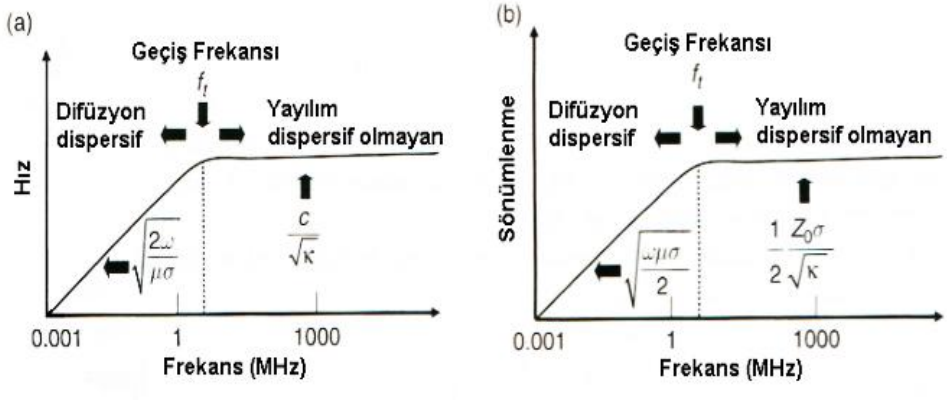
olarak ifade edilir.

2.16 ve 2.17 bağıntıları, dielektrik sabiti değişiminin EM dalga hızının değişimini etkiliyorken iletkenliğin sönümlenme üzerinde büyük bir etkiye sahip olduğunu açıklamaktadır. Bu nedenden dolayı yer radarı yöntemi kum ve çakıl karışımı malzemede (göreceli olarak direnç gösterme eğilimde olan) iyi sonuçlar vermektedir. Fakat elektriksel olarak iletken kil malzemesinin olduğu bölgelerde yer radarının kullanımı sınırlıdır. %5-%10 oranında kil içeren malzeme yer radarının nüfuz derinliğini 1 metreden daha aza düşürebilmektedir (Walther, Pitchford & Olhoeft 1986; Knight, 2001).

Dielektrik sabiti, iletkenlik ve manyetik geçirgenlik değerlerine sahip herhangi bir ortam için elektromanyetik dalga hızı (v) ve sönümlenme (α) frekansa bağlı olarak değişim gösterir. Düşük frekanslarda dalga özellikleri açısal frekansa bağlıdır. EM dalga düşük frekanslarda difüzyon hareketi ile ilerler. Yüksek frekanslarda ise dalga özellikleri frekansa bağlıdır ve dispersif olmayan yayılım gösterir. Yüksek frekans davranışı yer radarı yöntemi için en önemli özelliktir (Şekil 2.3).

Dispersif dalga hareketinden dispersif olmayan dalga hareketine geçiş galvanik iletimin baskın olduğu durumdan yer değiştirme akımları ile iletimin baskın olduğu duruma geçtiği frekansta gerçekleşir. Bu frekansa geçiş frekansı f_t denir.

$$f_t = \frac{\sigma}{2\pi\varepsilon} \tag{2.20}$$



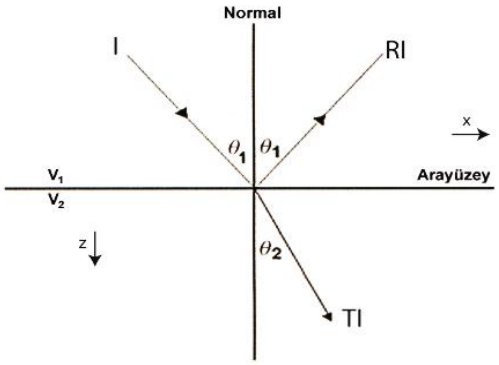
Şekil 2.3. Hız (a) ve sönümlenme (b) değerlerinin frekansa bağlı olarak değişimi (Annan, 2009; Kaplanvural, (2011) tarafından düzenlenmiştir).

2.2.4. Elektromanyetik Dalgaların Ara Yüzeylerde Yansıması, Kırılması ve İletimi

Elektromanyetik dalgaların herhangi bir ara yüzdeki davranışı, "Snell Kanunu" ile açıklanmaktadır. Snell kanununa göre dalga bir arayüzeye geldiğinde yansıyan ve kırılan dalgalar olacaktır. Snell yasası, yansıyan ve kırılan dalgaların normalle yaptığı açılarla ilgiliyken yansıyan ve kırılan dalganın genliği konusunda bilgi vermemektedir.

$$\frac{\sin \emptyset_1}{\sin \emptyset_2} = \frac{V_1}{V_2} \tag{2.21}$$

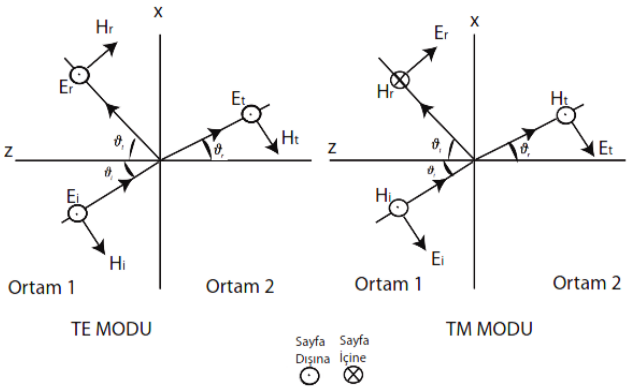
bağıntısı, Snell yasası olarak bilinmektedir. Burada v_1 ve v_2, sırasıyla, arayüzeyin üstündeki ve altındaki tabakaların hızları ve $\emptyset_1$ve $\emptyset_2$ ise dalganın, sırasıyla, yansıma ve kırılma sırasında normal ile yaptığı açılardır (Şekil 2.4).



Şekil 2.4. Ara yüzeye gelen dalganın sınırdan yansıması ve kırılması (Annan, 2005; Kaplanvural (2011) tarafından düzenlenmiştir).

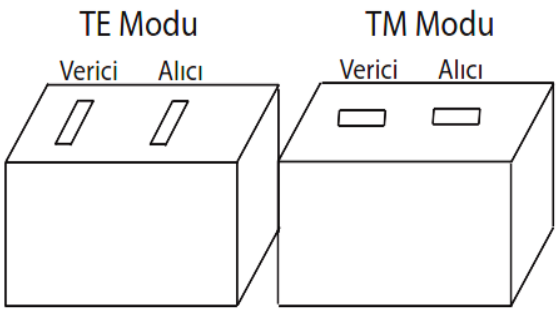
EM dalga genliğinin bir arayüzeydeki değişimi ise Fresnel yansıma ve iletim katsayıları ile açıklanabilir (Şekil 2.4). Arayüzeye gelen dalganın genliği I olmak üzere R ve T, sırasıyla, yansıma ve kırılma katsayıları olup yansıyan dalga RI, kırılan dalga TI dır. EM dalganın yayılma doğrultusunda birbirinden bağımsız iki ayrı bileşeni olduğu söylenebilir (Annan, 2005).

Arayüzeyin düzlemsel olması durumunda EM dalga alanı iki moda ayrılmaktadır; TE (Enine elektrik alan) ve TM (Enine manyetik alan) (Şekil 2.5).



Şekil 2.5. TE ve TM bileşenlerinin arayüzeyde yansıması ve iletimi (E: Elektrik alan vektörü, H: Manyetik alan vektörü) (Balanis, 1989; Kaplanvural (2011) tarafından düzenlenmiştir).

EM dalganın anten geometrisine bağlı olarak TE ve TM modları vardır. Alıcı ve verici antenler profil ile aynı doğrultuda yer alıyorsa TM modu, alıcı ve verici antenler profil doğrultusuna dik konumda ise TE modu adını almaktadır (Şekil 2.6) (Kaplanvural, 2011).



Şekil 2.6. Antenlerin yerleşimine göre TE ve TM modları (Van der Kruk ve diğ., 2006; Kaplanvural (2011) tarafından düzenlenmiştir).

Alan TE ve TM bileşenlerine ayrıldığında yansıma ve kırılma katsayıları TE modu için;

$$T = \frac{E_r}{E_i} = \frac{Z_2 \cos v_i - Z_1 \cos v_t}{Z_2 \cos v_i + Z_1 \cos v_t} \quad (2.22)$$

$$R = \frac{E_t}{E_i} = \frac{2Z_2 \cos v_i}{Z_2 \cos v_i + Z_1 \cos v_t} \quad (2.23)$$

$$1 + T = R \quad (2.24)$$

TM Modu için;

$$T = \frac{E_r}{E_i} = \frac{Z_2 \cos v_t - Z_1 \cos v_i}{Z_2 \cos v_t + Z_1 \cos v_i} \quad (2.25)$$

$$R = \frac{E_t}{E_i} = \frac{Z_2 \cos v_i}{Z_2 \cos v_i + Z_1 \cos v_i} \quad (2.26)$$

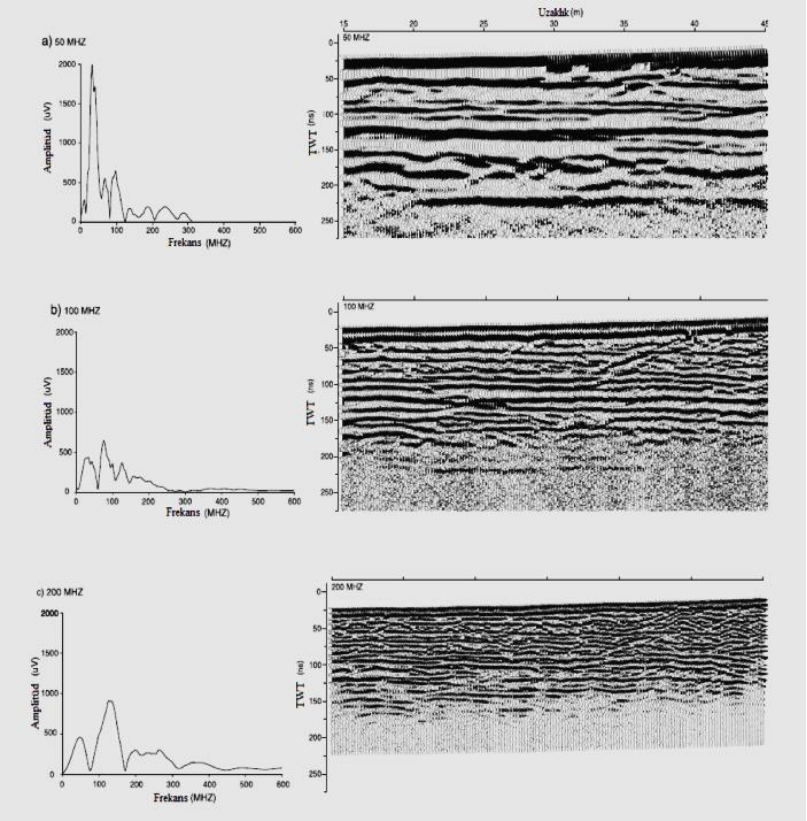
$$1 + T = R \frac{\cos v_t}{\cos v_i} \quad (2.27)$$

olarak verilir (Balanis, 1989). Burada Z_i, i'inci (i: 1,2,3 ...) tabaka için EM empedanstır.

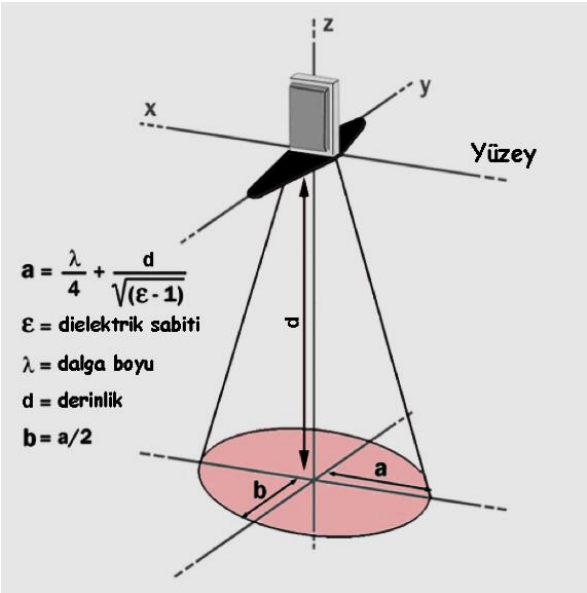
2.2.5. Yatay ve Düşey Ayrımlılık

Düşey ayrımlılık değeri genel olarak dalga boyunun dörtte biri olarak kabul edilir. Ortamın hızı ve antenin merkez frekansından, dalga boyunu hesaplamak mümkündür. Verici antenin merkez frekansı azaldıkça düşey ayrımlılık azalmaktadır, fakat nüfuz derinliği artmaktadır (Şekil 2.7a). Düşük frekanslı anten ile yapılan çalışmalarda ince tabakalar radargramlar da görünmeyebilir. Düşük frekanslı anten ile elde edilen radargram ile daha derinden bilgi alınmasına rağmen ayrımlılık düştüğünden yuvarlatma etkisi açıkça görülebilmektedir. İkinci radargramda (Şekil 2.7b) ise çözünürlük ilk radargrama göre artmaktadır. Fakat derinden gelen yansımaların enerjilerini kaybettiği görülür. Kullanılan yüksek frekanslı anten ile üçüncü radargramda yüzeye yakın saçılmalar daha belirgin bir şekilde görülebilmektedir (Kaplanvural, 2011).

Yatay ayrımlılık değeri ise izler arasındaki mesafe ve Fresnel zonu büyüklüğü ile kontrol edilir (Şekil 2.8). Geniş Fresnel zonu düşük yatay ayrımlılık demektir. Buna göre bir olayın en az iki noktada örneklenmesi gerektiği dikkate alındığında, profil üzerinde ölçüm alınırken seçilen ölçüm aralığı dalga boyunun yarısından daha küçük olmalıdır. İdeal olarak ölçüm aralığı dalga boyunun dörtte biri kadar olmalıdır.



Şekil 2.7. Frekans ile düşey ayrımlılık arasındaki ilişki a) 50 MHz, b) 100 MHz, c) 200MHz (Neal, 2004).

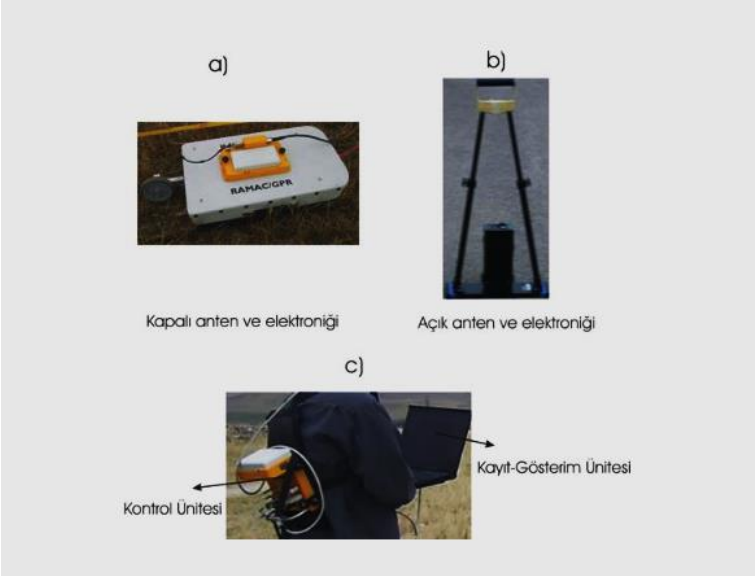


Şekil 2.8. Fresnel zonu ve yatay ayrımlılık (Mala Geoscience, 2003).

2.2.6. GPR Alet ve Donanımı

Yer radarı ölçü sistemi verici anten ve alıcı anten, kontrol ünitesi, kayıt ünitesi ve gösterim ünitesinden oluşmaktadır (Şekil 2.9).

Verici elektroniği ile belirli frekansta, yüksek voltajda oluşturulan EM dalga verici anteni vasıtasıyla yeraltına iletilir ve yayılması sağlanır. Yeraltında ilerleyen ve yansıyarak yer yüzüne dönen EM dalgaları alıcı anten tarafından algılanarak alıcı elektroniğine ulaştırılmaktadır. EM dalgalar kontrol ve kayıt ünitelerinde zamanın fonksiyonu olarak kayıt edilmektedir (Sezer, 2010). Kayıt edilen EM dalgalar gösterim ünitesinin vasıtasıyla görüntülenmektedir.



Şekil 2.9. Yer radarı donanımı; a. Kapalı anten ve elektroniği, b. Açık anten ve elektroniği, c. Kayıt-Gösterim ve kontrol ünitesi (Kaplavural, 2011).

2.2.7. Uygun Anten Seçimi

Yer radarı uygulamalarında sorunun çözümüne uygun anteni seçmek gerekir. Bu nedenle ilgilenilen yapının çözünürlüğü ve araştırılması hedeflenen derinlik göz önüne alınarak anten frekansının seçimine özen gösterilmelidir. Yeraltına gönderilen dalganın nüfuz derinliği verici antenin merkez frekansına bağlı olsa da ortamın dieleketrik sabiti,

iletkenliği ve manyetik geçirgenliğine göre de değişim göstereceğinden frekans değerini tahmin etmek kolay değildir. Ortamın nem içeriği ve gözenekliliği de bu değişimi etkilemektedir (Kaplanvural, 2011).

Çizelge 2.3. Anten merkez frekansı ile maksimum nüfuz derinliği arasındaki ilişki (Mala Geoscience, 2003).

Merkez Frekans (MHz)	Derinlik (m)
1000	1.5
500	6
200	12
100	25
50	40
25	50
10	60

Çizelge 2.3'te anten merkez frekansına bağlı olarak verilen araştırma derinliği değerleri yapılan arazi çalışmalarında elde edilen deneyimsel bilgiler kaynaklıdır. Yer altının tekdüze olmamasından dolayı bu bilgiler sadece yapılacak yer radarı çalışması öncesinde anten seçimi için kabaca fikir vermektedir.

Yer radarı çalışmasına başlamadan önce yapılması gereken bir başka seçim örnekleme aralığıdır (Kaplanvural, 2011). Örnekleme aralığı kayıttaki en yüksek frekanslı dalgacığın periyodunun en fazla yarısı kadar olmalıdır. Örnekleme aralığı ile merkez frekans arasındaki ilişki;

$$t = \frac{1000}{6 f_c} \tag{2.28}$$

bağıntısı ile verilir. Burada f_c, MHZ mertebesinde merkez frekansı ve t ise nanosaniye mertebesinde zamandır (Çizelge 2.4).

Çizelge 2.4. Anten merkez frekansı ile maksimum örnekleme aralığı arasındaki ilişki (Sensors and Softwares, 1999).

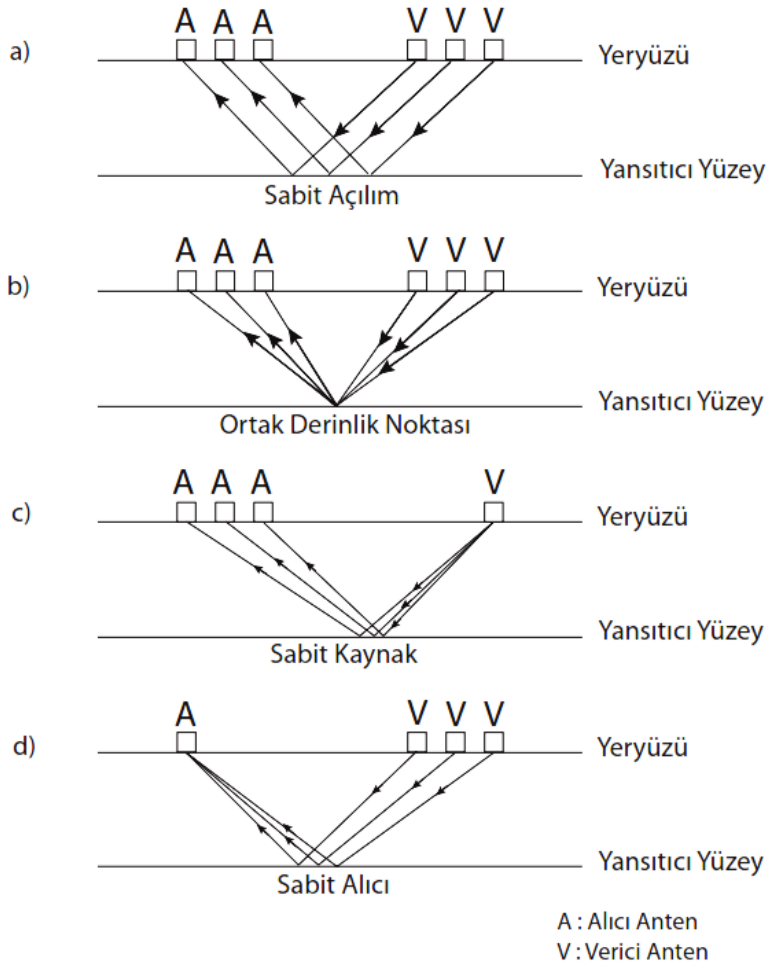
Merkez Frekans (MHz)	Maksimum Örnekleme Aralığı (ns)
10	16.7
20	8.3
50	3.3
100	1.67
200	0.83
500	0.33
1000	0.17

Örnekleme aralığı büyük alınırsa zaman kesintilerindeki ayrımlılık düşük ve yuvarlatılmış görüntüler söz konusudur. Örnekleme aralığı küçük alınırsa veri işlem sırasında bilgisayar performansı düşecektir. En uygun örnekleme aralığının belirlenmesi gerekmektedir (Kaplanvural, 2011).

2.2.8. Anten Dizilimleri

Yer radarı yönteminde farklı uygulamalar için çeşitli anten dizilimleri kullanılmaktadır. Birbirlerine belirli bir mesafede tutulan alıcı ve verici antenler araştırma doğrultusu üzerinde hareketlidir. Çoğu zaman yer radarı çalışmalarında sabit anten aralığı kullanılır ve bu dizilim sabit açılım (Common Offset) olarak adlandırılır. Bunun dışında sıklıkla kullanılan bir diğer anten dizilimi ise ortak derinlik noktası (Common Mid Point) dizilimidir. Ortak derinlik noktası ölçümü genellikle hız ölçümleri için tercih edilir. Verici antenin sabit tutulup alıcı antenin ilerletildiği sabit kaynak (Common Source), alıcı antenin sabit tutulup kaynağın ilerletildiği sabit alıcı (Common Receiver) dizilimleri ender kullanılan anten dizilimleridir (Şekil 2.10).

Ortak derinlik noktası dizilimi ile hız tespitini olabildiğince doğru yapabilmek için ölçüm arazinin birkaç farklı yerinde yapılmalıdır. Elde edilen hız değerleri ile araştırılan yapı veya objenin derinliği tespit edilebilmektedir. Kazı ve sondaj çalışmaları bu tespitlere göre yapılmaktadır (Kaplanvural, 2011).



Şekil 2.10. Yer radarı ölçümlerinde kullanılan çeşitli anten dizilimleri. a) Sabit açılım, b) Ortak derinlik noktası, c) Sabit kaynak, d) Sabit alıcı (Daniels, 1996, Kaplanvural, 2011 tarafından düzenlenmiştir).

2.2.9. Yöntemde Veri Toplama

Çalışma amacına göre, veri toplama tekniği, anten tipi ve anten frekansı seçilmelidir. Profillerin başlangıç noktaları, yönü ve uzunluğu, belirlenir. Antenler arası mesafe genellikle anten boyu kadar olmaktadır (Annan 2000). Kuşkusuz kapalı anten sisteminde antenler yerleşik durumdadır ve mesafe sabittir.

Açık anten düzeneklerinde antenlerin birbirlerine göre pozisyonları dikkate alınarak değişik veri toplama teknikleri geliştirilmiştir. En yaygın kullanılanı, sabit

anten aralıklı profil ölçümüdür. Bir profil boyunca gerçekleştirilen ölçümlerde; antenler arası mesafe sabit tutulurken, antenlerin kaydırılması suretiyle ölçüm gerçekleştirilmektedir. Kapalı anten kullanımında sistem zaten bu tekniğe uygun olup harici bir düzenlemeye ihtiyaç duymamaktadır (Üstol, 2013).

2.3 Doğru Akım Özdirenç Yöntemi

Doğru akım özdirenç yöntemi (DAÖ), en eski ve en yaygın kullanılan jeofizik yöntemlerdendir. Yöntem, 1915'de ilk kez Wenner tarafından kullanılmış ve 1920 yılında Schlumberger tarafından ortaya konmuştur (Sünbül 2007). Çalışma ilkesi, yere iki noktadan elektrik akımı uygulayarak farklı iki nokta arasındaki gerilim farkını ölçmektir. Buradan hesaplanan görünür özdirenç (GÖ) yardımıyla jeolojik yapıların ayrımlılığı belirlenmeye çalışılmaktadır. Anlaşılacağı gibi, yöntemin duyarlı olduğu fiziksel parametre özdirençtir.

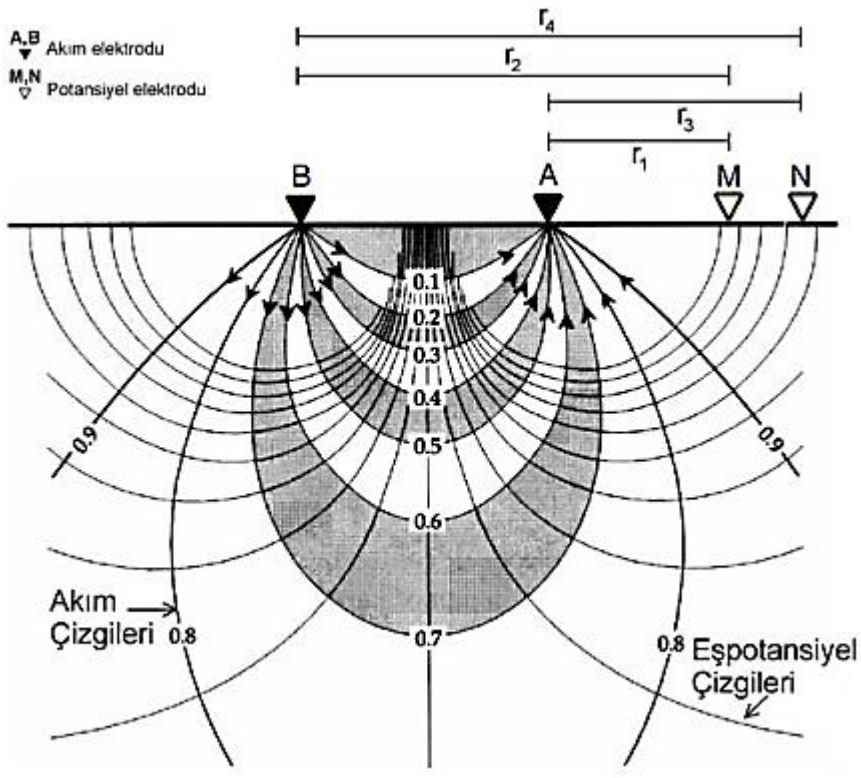
Günümüzde, uygulanması kolay olması ve birçok problemin çözümünde etkili sonuç vermesi nedeniyle; maden, jeotermal, arkeoloji, çevre (atık alanları, kirlenmeler), jeolojik birimlerin tanımlanması, kırık çatlak sistemleri, yeraltı suyu, heyelan vb. araştırmalarda kullanılmaktadır.

DAÖ yöntemi, arkeolojik araştırmalarda ilk kez Atkinson tarafından 1946 yılında uygulanmış olup arkeolojik çalışmalarda aranan yapının jeolojik özellikleri ile onu saran jeolojik birimin elektriksel iletkenlik farklılığı antik yapı kalıntısının bulunmasını kolaylaştırmaktadır (Kaya, 2017b).

Yöntemde son yıllarda geliştirilen çok elektrotlu ölçü sistemleri sayesinde veri toplama hızlanmış ve 2B ve 3B ters çözüme uygun hale gelmiştir. Bu nedenle günümüzde veriler çoğunlukla birbirine paralel hatlar boyunca sondaj-profil ölçü tekniği ile toplanmakta ve bunlar 2B/3B ters çözüm algoritmaları ile yorumlanmaktadır (Sabbağ, 2012).

2.3.1 Yöntemin Esasları

Yöntem en genel olarak iki akım elektrotu yardımıyla bir güç kaynağından üretilen akımın yere verilmesiyle oluşan potansiyelin, yeryüzüne yerleştirilen iki potansiyel elektrodu yardımıyla ölçülmesi esasına dayanmaktadır (Şekil 2.11). Ölçülen potansiyel farkı değerleri, yeraltındaki ortamların fiziksel ve kimyasal özelliklerindeki farklılıklardan (tabakalanma, karstik yapılar, su/nem içeriği, gömülü yapılar, domlar vb.) kaynaklanmaktadır.



Şekil 2.11. Yarı sonsuz homojen ortamda akım ve potansiyel çizgilerinin dağılımı (Stummer, 2003; Van Nostran ve Cook, 1966; Berge (2011) tarafından düzenlenmiştir).

Elektrik özdirenç yönteminde kullanılan donanım; yeraltına gönderilen akımın okunması için ampermetre, yeraltında oluşan gerilim farkını ölçmek için voltmetre (günümüzde resistivite cihazları bu iki işlemi de yerine getirebilmektedir), akım kaynağı

(doğru akım özdirenç yöntemi için akü, kuru pil; alternatif akım kullanılıyorsa veya daha yüksek voltaj gerektiren doğru akım uygulamaları için jeneratör), yere akım vermek ve yerde oluşan gerilim farkını ölçmek için elektrotlar ve akımın iletilmesi için belirli uzunluktaki kablolardan oluşmaktadır.

2.3.2 Kayaç Özdirencini Etkileyen Etkenler ve Kayaç içinde Elektriksel İletkenlik

Ward (1990)'da da belirtildiği gibi, özdirenci etkileyen etkenler; **Kayaç bileşimi:** Jeolojik ortamları oluşturan kayaçlar minerallerden, mineraller elementlerden meydana gelmektedir. Bilindiği gibi metaller elektriksel açıdan diğer elementlere nazaran daha iletkenlerdir. Altın, gümüş, bakır, … gibi elementler ve pirit, kalkopirit, … gibi mineraller, kayaç içerisindeki miktarına bağlı olarak kayaç özdirencini düşürmektedirler. **Gözeneklilik ve Saturasyon:** Kayaçların içerisinde bulunan gözenekler, içerlerinde hava olduğu zaman özdirenci artırırken, gözenek içerisinde su, kil bulunması durumunda özdirenci düşürmektedir. **Kil:** Yerin özdirencini etkileyen bir diğer materyal kil' dir. Kil minerallerinde gözeneklilik yüksek, geçirgenlik ise çok düşüktür. İyon alış - verişleri de yüksektir. Bu nedenle suya doygun killer, özdirenci düşürmektedir. **Anizotropi:** Hem homojen hem de izotrop (yön bağımsız) yer modeli hemen hemen olanaksızdır. Bu nedenle kayaç ortamında elektrik akımı da yön bağımlı olacağından özdirenci etkilemektedir. **Tuzluluk:** Ortamda bulunan, özellikle çözünmüş, tuz iyon miktarını artıracağı için özdirenci düşürecektir. **Sıcaklık:** Sıcaklığın artmasıyla çözünürlük artacak ve bu da iyon hareketliliğini artıracağı için özdirenç düşecektir. **Yaş ve Derinlik:** Kayacın yaşı ve bulunduğu derinlik özdirenci etkiler. Aynı kayaç için, aynı yaşta olmak koşulunda derindeki kayaç daha sığdaki kayaca oranla, daha masif olduğundan dirençlidir.

2.3.2.1 Elektronik İletim

Elektronik iletim, metallerde görülen iletim türüdür. Metallerde akım serbest ve hareketli elektronlarla iletilmektedir.

2.3.2.2 Elektrolitik İletim

Elektrolitik iletim, sıvılarda görülen iletimdir. Sıvı ortamında akım, iyonlarla iletilirken elektronik iletime göre daha yavaştır.

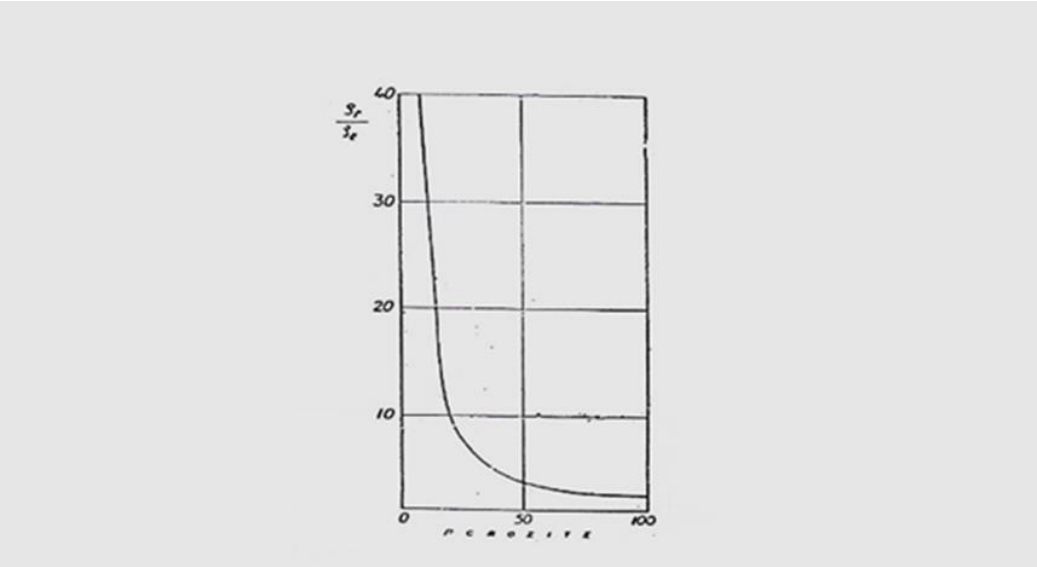
Kayaçlardaki iletimde gözeneklilik çok önemlidir. Gözenekli kayaçta iletkenlik gözeneklerin hacmi, miktarı ve gözenekteki suya bağlıdır.

$$\rho_e = a\emptyset^{-m}S^{-n}\rho_w \tag{2.29}$$

Burada; Φ, Gözeneklerin hacmi, S, Su içeren gözenek kısmı, ρ_w, Suyun özdirenci, $n \cong 2$, a,m, Sabitler, $0.5 \leq a \leq 2.5$,$1.3 \leq m \leq 2.5$.

Bu yasa Archie Yasası (1942) olarak kabul edilmiştir. $\frac{\rho_e}{\rho_w}$ ise 'Özdirenç Formasyon Faktörü' dür. Burada,

$F = \frac{\rho_e}{\rho_w} = a\emptyset^{-m}$Şeklinde ifade edilebilir. $\emptyset$:$\frac{V_e}{V_r}$'dir ve V_e, Boşlukları dolduran suyun hacmi, V_r, Kayaç hacmini göstermektedir.



Şekil 2.12. Özdirencin gözeneklilik ile değişim eğrisi, ρ_r; kayacın özdirenci, ρ_e; gözeneklerdeki suyun özdirenci (Candansayar, 1997).

2.3.2.3 Dielektrik İletim

Dieletrik iletim, zayıf iletkenler veya yalıtkanlarda görülen iletim şeklidir. Elektrik akımını iletecek herhangi bir taşıyıcı yok veya çok azıdr. Bir elektrik alan uygulandığında atomun yörüngesindeki elektronlar uygulanan alanın tersi yönde yer değiştirirler. Bu olayın net etkisi, maddenin elektriksel geçirgenliğinin (permittivitesinin) ε_0 dan bir başka değere ε değerine doğru değişmesidir (Varlı, 2005).

$$\varepsilon = K.\varepsilon_0 \tag{2.30}$$

Burada K, dielektrik sabiti olup birimsiz bir değerdir.

Uygulanan akımın alternatif olması durumunda, alternatif akımın frekansı önemlidir. Frekans arttıkça dielektrik etki artar. Düşük frekans kullanan EM yöntemler için dielektrik etki ihmal edilebilmektedir. Georadar gibi MHz ya da GHz mertebesinde çok yüksek frekansların kullanıldığı durumlarda dielektrik iletim ve dielektrik sabiti önem kazanmaktadır (Varlı, 2005).

Yukarda belirtilen özdirenci etkileyen faktörler ve iletkenlik türleri dikkate alındığında herhangi bir kayaç veya mineralin özdirencinin aşağıdaki tablolarda görüldüğü gibi çok geniş bir aralıkta değiştiği gözlenmektedir.

Çizelge 2.5. Bazı doğal malzemelerin elektrik özdirençleri (İ.T.Ü., 2006).

Kayaç-Malzeme	Elektrik özdirenç(Ω-m)
Islak aşırı killi toprak	1–10
Islak aşırı siltli toprak ve siltli kil	≤ 10
Islak siltli ve kumlu toprak	10–100
Silt ardalanmalı kum ve çakıl	≤ 1000
Kaba kuru kum ve çakıl depozitleri	≥ 1000
Çatlakları ıslak toprakla dolmuş çok kırıklı kayaç	100
Çatlakları kuru kumla dolmuş az çatlaklı kayaç	≤ 1000
Masif ve sağlam olarak oluşmuş kayaç	≥ 1000

Çizelge 2.6. Bazı minerallerin elektrik özdirençleri (İ.T.Ü., 2006).

Mineral	Elektrik özdirenç(Ω-m)	Mineral	Elektrik özdirenç(Ω-m)
Kalkopirit	$4x10^{-3}$	Kromit	$1\text{-}1x10^{6}$
Pirit	$3x10^{-1}$	Wolframit	$10x10^{5}$
Pirotit	$1x10^{-4}$	Hematit	$3.5x10^{-3}\text{-}10^{7}$
Galenit	$2x10^{-3}$	Magnetit	$5x10^{-5}\text{-}5.7x10^{3}$
Sfalerit	$2x10^{2}$	Manganez	$10^{-2}\text{-}0.3$
Zinober	$2x10^{7}$	Kuvars	$4x10^{10}\text{-}2x10^{14}$
Boksit	$2x10^{8}\text{-}6x10^{3}$	Kalsit	$2x10^{12}$
Kalkosit	$1x10^{-4}$	Kaya tuzu	$30\text{-}10^{13}$

Çizelge 2.7. Bazı malzemelerin elektrik özdirençleri (İ.T.Ü., 2006).

Sular	**Elektrik özdirenç (Ω-m)**
Yüzey suları (mağmatik)	$0.1\text{-}3x10^{3}$
Meteorik yüzey suyu	$30\text{-}10^{3}$
Yüzey suları (çökellerde)	$10\text{ -}10^{2}$
Toprak suları	100
Doğal sular (mağmatik kayaçlarda)	9
Doğal sular (çökellerde)	3
Tuzlu sular %3	0.15
Kömürler	**Elektrik özdirenç (Ω-m)**
Çeşitli kömürler	$10\text{-}10^{11}$
Linyit	9–200
Kayaçlar	**Elektrik özdirenç (Ω-m)**
Konglomeralar	$2x10^{3}\text{-}10^{4}$
Kumtaşları	$1\text{ - }6.4x10^{8}$
Kireçtaşları	$50\text{-}10^{7}$
Dolomit	$3.5x10^{2}\text{ -}5x10^{3}$
Marn	3–70
Killer	1–100
Alüvyon ve kumlar	10–800
Petrol kumları	4–800
Granit	$3x10^{2}\text{ -}10^{6}$
Diyorit	$10^{2}\text{ -}10^{6}$
Andezit	$20\text{ -}5x10^{7}$
Diyabaz	$20\text{ -}5x10^{7}$
Gabro	$10^{3}\text{ -}10^{6}$
Bazalt	$10\text{ -}10^{7}$
Gnays	$7x10^{4}\text{ -}3x10^{6}$
Mermer	$10^{2}\text{ -}2.5x10^{8}$
Kuvarsit	$10\text{-}2x10^{8}$
Şeyl	$20\text{ -}2x10^{3}$

2.3.3 Görünür Özdirenç Kavramı

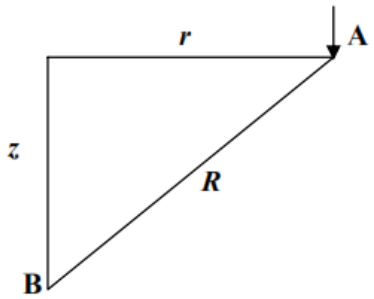
Doğru akım özdirenç (DAÖ) yönteminde ölçülen büyüklük gerilim farkıdır,

$$\Delta V = \frac{\rho . I}{2\pi . r} \tag{2.31}$$

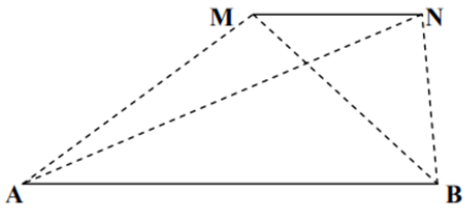
Burada $\Delta V(mv)$ ölçülen potansiyel farkı, ρ $(ohm.m)$ ortamın özdirenci, I (mA) yere verilen akım ve r uzaklıktır. Şekil 2.13'de görüldüğü gibi yeryüzündeki bir A noktasından akım verildiğinde yeraltındaki bir B noktasındaki gerilim,

$$V = \frac{\rho . I}{2\pi (r^2 + z^2)^{\frac{1}{2}}} \tag{2.32}$$

bağıntısıyla verilir. Burada A noktasından akım verildiğinde R uzaklığının yatay düzleme izdüşümü r ve düşey düzleme izdüşümü z'dir (Başokur, 2004).



Şekil 2.13. Akımın verildiği (A) ve gerilimin ölçüldüğü (B) varsayılan noktalar (Başokur, 2004).



Şekil 2.14. Akım ve gerilim elektrotları arasındaki uzaklıklar (Başokur, 2004).

A ve B akım elektrodları ve M ve N'de potansiyel elektrotları olmak üzere (Şekil 2.14) homojen, izotrop ve yarısonsuz bir ortam için M noktasındaki gerilim (2.32) bağıntısı kullanılarak,

$$V_M = \frac{\rho.I}{2\pi}.\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM}\right) \tag{2.33}$$

ve N noktasındaki gerilim,

$$V_N = \frac{\rho.I}{2\pi}.\left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN}\right) \tag{2.34}$$

şeklinde yazılabilir. DAÖ yöntemi uygulamasında M ve N noktaları arasındaki gerilim farkı ölçüldüğünden,

$$V_M - V_N = \nabla V = \frac{\rho.I}{2\pi}.\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}\right) \tag{2.35}$$

ve

$$k = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}\right)} \tag{2.36}$$

varsayımı ile Görünür özdirenç (ohm.m),

$$\rho = k(\nabla V/I) \tag{2.37}$$

bağıntısı elde edilir. Burada k, Geometrik faktör olup birimi mertredir. Denklem (2.37), Ohm-kanunu ve statik elektrik alan integralinin, yoldan bağımsız (konservatif) olması özelliklerinden yararlanarak ortaya konmaktadır (Dizioğlu & Keçeli, 1981; Başokur, 1999; Candansayar, 1997).

Burada özdirenç bağıntısı tekdüze (homogen) ve izotrop bir ortam için verilmektedir. Fakat gerçekte yerküre tekdüze değildir ve arazide ölçülen gerilim farkı (ΔV) kullanılarak, (2.37) denkleminden hesaplanan özdirenç, Görünür Özdirenç (GÖ) olarak adlandırılmaktadır. Tabakalı bir ortamda GÖ eğrisinin AB/2' nin küçük değerleri için birinci tabakanın özdirencine ve büyük değerleri için son tabakanın özdirencine yakınsaması beklenir. GÖ eğrisi, AB/2' nin ara değerlerinde de ara tabakaların özdirencine yakınsamalıdır (Spies & Eggers, 1986; Başokur, 1994).

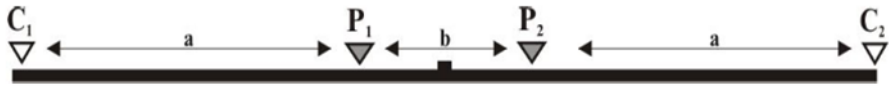
Yöntemin daha etkili, güvenilir, istenilen derinlikte yatay ve düşey süreksizliklerde belirti verecek şekilde veri elde edebilmesi için geliştirilen belirli özdirenç ölçü alma teknikleri (elektrot dizilimleri) kullanılmaktadır.

2.3.4 Özdirenç Ölçü Alma Teknikleri (Elektrot Dizilimleri)

Akım ve gerilim elektrotlarının birbirlerine göre konumları için çeşitli dizilimler türetilmiştir. Elektrot1arın birbirine göre yeri ve aralarındaki uzaklık değişik şekillerde alınabilir. Hesaplamaların kolaylaştırılması açısından, akım ve potansiyel elektrotlarının simetrik olması daha uygundur. Akım elektrotlarının birbirine yakın konumlandırılması, akımın derinlere nüfus etmesini önler ve sığ yüzeylerde görünebilirliği artırır. Potansiyel elektrotların akım elektrotlarına yakın konumlandırılması yeryüzüne yakın cisimlerin etkilerini artırmaktadır. Elektrotlar arasındaki mesafeleri araştırılan yapıya göre belirlemek, en uygun elektrot dizilimini seçmek önemlidir.

2.3.4.1 Schlumberger Elektrot Dizilimi

Schlumberger diziliminde 2 akım ve 2 potansiyel elektrodu bir simetri merkezine göre simetrik yerleştirilmekte ve P_1, P_2 gerilim elektrotları içeride ve C_1, C_2 akım elektrotları dışarıda olacak şekilde düzenlenmektedir. C_1C_2 aralığı P_1P_2 aralığının yaklaşık 10 katı olacak şekilde ayarlanır. Akım nüfus derinliği yaklaşık $C_1C_2/2$'dir (Başokur, 2004). Her ölçüm için, akım elektrotları açıldığında gerilim elektrotlarının sabit kalması dizilimin üstünlüğüdür.



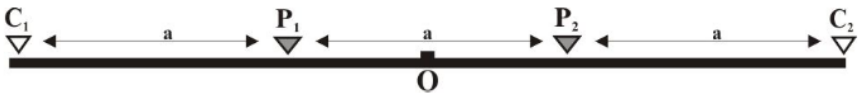
Şekil 2.15. Schlumberger elektrot dizilimi (Karaaslan, 2015).

$$\rho_{aS} = \pi.\left(\frac{s^2}{b} - \frac{b}{4}\right).\frac{\Delta V}{I} \tag{2.38}$$

2.3.4.2 Wenner Elektrot Dizilimi

Wenner elektrot diziliminde 2 akım ve 2 potansiyel elektrodu bir simetri merkezine göre simetrik yerleştirilmekte ve P_1, P_2 gerilim elektrotları içeride ve C_1, C_2 akım elektrotları dışarıda olacak şekilde düzenlenmektedir. Şekil 2.16'da gösterildiği gibi tüm elektrotlar arasında "a" kadar uzaklık bulunmaktadır (Başokur, 2004). Normal Wenner dizilimi Wenner Alfa dizilimi olarak adlandırılır ve elektrodların konumu değişmeden işlevlerinin değişmesine göre Wenner beta ve Wenner gama tipleri de vardır (Şekil 2.17).

Bu dizilim yeraltını düşey yönde değişimini incelemede daha başarılı olmasının nedeni arazide ölçülen veriyi gerilim elektrotlarının orta noktasına atamasındandır. Bu durumda yüzey altına yerleşmiş düşey süreksizliklere de duyarlıdır. Dizilimin tek dezavantajı 2B araştırmalarda elektrotlar arası mesafe arttıkça yanal yönde başarısının azalmasıdır.



Şekil 2.16. Wenner elektrot dizilimi (Karaaslan, 2015).

Wenner α dizilimi için geometrik faktör değeri (2.39) denklemi ile verilebilir.

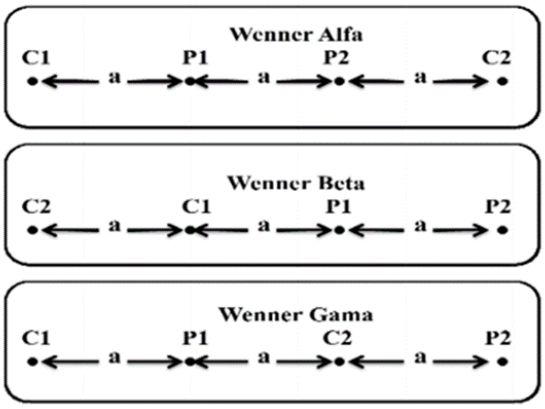
$$k = 2\pi a \tag{2.39}$$

Wenner β dizilimi için geometrik faktör değeri (2.40) denklemi ile verilebilir. Bu dizilim dipol-dipol diziliminin özel halidir.

$$k = 6\pi a \tag{2.40}$$

Wenner γ dizilimi için geometrik faktör değeri (2.41) denklemi ile verilebilir.

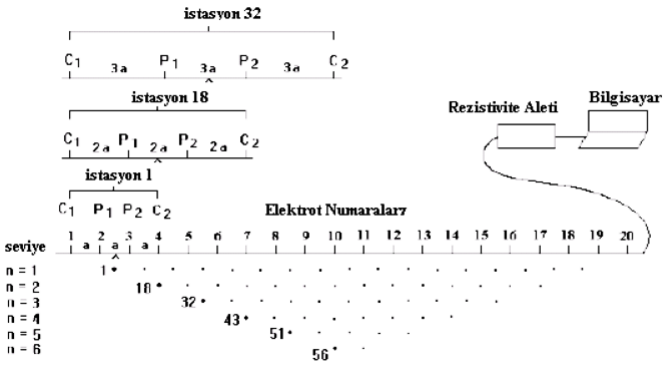
$$k = 3\pi a \tag{2.41}$$



Şekil 2.17. Wenner elektrot dizilimleri çeşitleri (Dağlı, 2011).

2.3.4.3 Wenner-Schlumberger Elektrot Dizilimi

Wenner-Schlumberger elektrot dizilimi daha çok, çok-kanallı özdirenç ölçü düzeneklerinde kullanılan bir dizilimdir. Dizilim ve elektrotların konumları Şekil 2.18'de verilmektedir. Akım elektrotlarının ilk konumları için Wenner dizilimine, ikinci ve daha sonraki konumları için Schlumberger elektrot dizilimine yaklaşıldığı söylenebilmektedir. Wenner-Schlumberger elektrot dizilimine ait geometrik katsayı (2.42) denklemi ile verilmektedir (Öztürk, 2004).

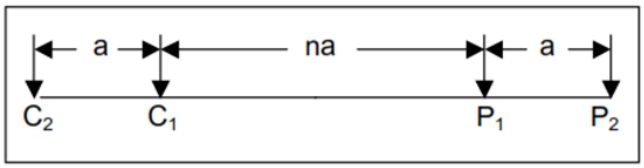


Şekil 2.18. Wenner-Schlumberger elektrot diziliminde elektrotların konumları ve çok kanallı veri toplama düzeneği (Loke, 2000; Öztürk (2004) tarafından düzenlenmiştir).

$$k = \pi n(n+1)a \quad (2.42)$$

2.3.4.4 Dipol-Dipol Elektrot Dizilimi

Dipol-dipol elektrot diziliminde akım elektrodları bir çift ve gerilim elektrodları bir çift olacak şekilde Schlumberger ve Wenner açılımlarından farklı olarak Şekil 2.19'da görüldüğü gibi yanyanadır. Akım elektrodlarının bağımsız olarak dışarıda olması nedeniyle n değeri arttıkça güçlü sinyaller elde edilememektedir. Bu da dizilimin dezavantajıdır. Örneğin sabıt akımda n değeri 1'den 6'ya artarken ölçülen potansiyel değeri 56 kat daha azalmaktadır (Loke, 2000). Burada n çarpanı kadar akım ve potansiyel elektrotları arasında mesafe bulunmaktadır (n=1, 2, 3, … gibi).



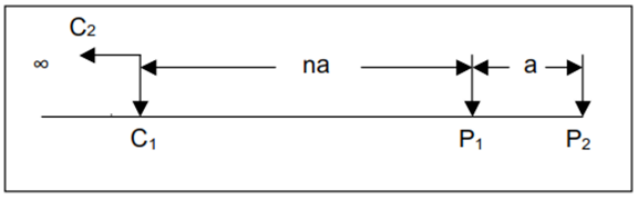
Şekil 2.19. Dipol-Dipol elektrot dizilimi (Başol, 2005).

Burada Dipo-dipol dizilimi için geometrik faktör değeri (2.43) denklemi ile verilebilir;

$$k = \pi n(n+1)(n+2)a \quad (2.43)$$

2.3.4.5 Pol-Dipol Elektrot Dizilimi

Pol-Dipol Dizilimi asimetriktir. Bir elektrot ölçü profili üzerinde sonsuz kabul edilecek uzaklığa yerleştirilmiştir. Dipol-dipol dizilimine göre daha yüksek gerilim farkı ölçülmektedir.



Şekil 2.20. Pol-Dipol elektrot dizilimi (Başol, 2005).

Pol-Dipol elektrot dizilimi için geometrik faktör; k: $2\Pi a$

2.3.4.6 Pol-Pol Elektrot Dizilimi

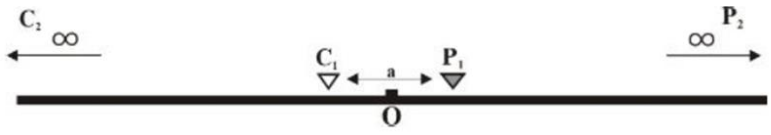
Pol-pol diziliminde akım ve gerilim elektrodlarından birer tanesi ölçü profili üzerinde sonsuz kabul edilecek uzaklığa yerleştirilmişlerdir (Şekil 2.21). C_2 ve P_2 elektrot çifti sonsuzda olduklarından ΔV potansiyel farkı P_1 noktasındaki potansiyele eşittir.

$$\Delta V_a = \frac{\rho_a I}{2\pi a} \tag{2.44}$$

ve görünür özdirenç,

$$\rho_a = 2\pi a \frac{\Delta V_a}{I} \tag{2.45}$$

Bağıntısından hesaplanır.



Şekil 2.21. Pol-pol elektrot dizilimi (Karaaslan, 2015).

2.3.5 Farklı Elektrot Dizilimleri İçin Sinyal Katkı Kesiti

Yeryüzünde herhangi bir elektrot dizilimi için ölçülen toplam gerilim farkı (ΔV) izotrop, yarısonsuz ve homojen ortam için yarım küre hacmi içindeki tüm noktaların gerilim farklarının toplamıdır. Roy ve Apparao (1971), yarısonsuz, tekdüze bir ortamda ölçülen toplam gerilim farklarına (ΔV) katkısı olan yarım küre hacmi içindeki herhangi bir noktanın gerilim farklarının $\Delta V(x,y,z)$;

$$\Delta V(x,y,z) = \frac{\rho I}{2\pi}\left[\frac{x(x-a)+y^2+z^2}{(x^2+y^2+x^2)^{3/2}\{(x-a)^2+y^2+z^2\}^{3/2}} - \frac{(x-a)(x-a-b-c)+y^2+z^2}{\{(x-a)^2+y^2+z^2\}^{3/2}\{(x-a-b-c)^2+y^2+z^2\}^{3/2}} - \frac{x(x-a-b)+y^2+z^2}{(x^2+y^2+z^2)^{3/2}\{(x-a-b)^2+y^2+z^2\}^{3/2}} + \frac{(x-a-b)(x-a-b-c)+y^2+z^2}{\{(x-a-b)^2+y^2+z^2\}^{3/2}\{(x-a-b-c)^2+y^2+z^2\}^{3/2}}\right].dx.dy.dz \quad (2.46)$$

bağıntısı ile hesaplanacağını göstermişlerdir. Bu bağıntı (x,y,z) kartezyen koordinatlarda yazılmıştır (Candansayar, 2016). Burada (x,y) yeryüzü düzlemini ve z-ekseni ise yer içi doğrultusunu göstermektedir. Elektrotlar x-doğrultusu boyunca dizilmiş olsun. Bu durumda A,B akım elektrotu ve M,N gerilim elektrotu olmak üzere; A elektrotu $(0,0,0)$ noktasında, M elektrotu $(a,0,0)$ noktasında, N elektrotu $(a+b,0,0)$ noktasında, B elektrotu ise $(a+b+c,0,0)$ noktasındadır. (x,y,z) noktalarındaki $\Delta V\,(x,y,z)$ istenen elektrot diziliminde hesaplamak için a,b ve c katsayılarını değiştirmek yeterlidir (Roy & Apparao, 1971).

Örneğin $a=b=c$ alınırsa, $\Delta V(x,y,z)$ Wenner elektrot dizilimi için hesaplanır. Denklem (2.31) ile herhangi bir (x,y,z) noktasında hesaplanan $\Delta V(x,y,z)$ yarısonsuz ortamın cevabı olan toplam gerilim farkına bölünür (Roy & Apparao, 1971).

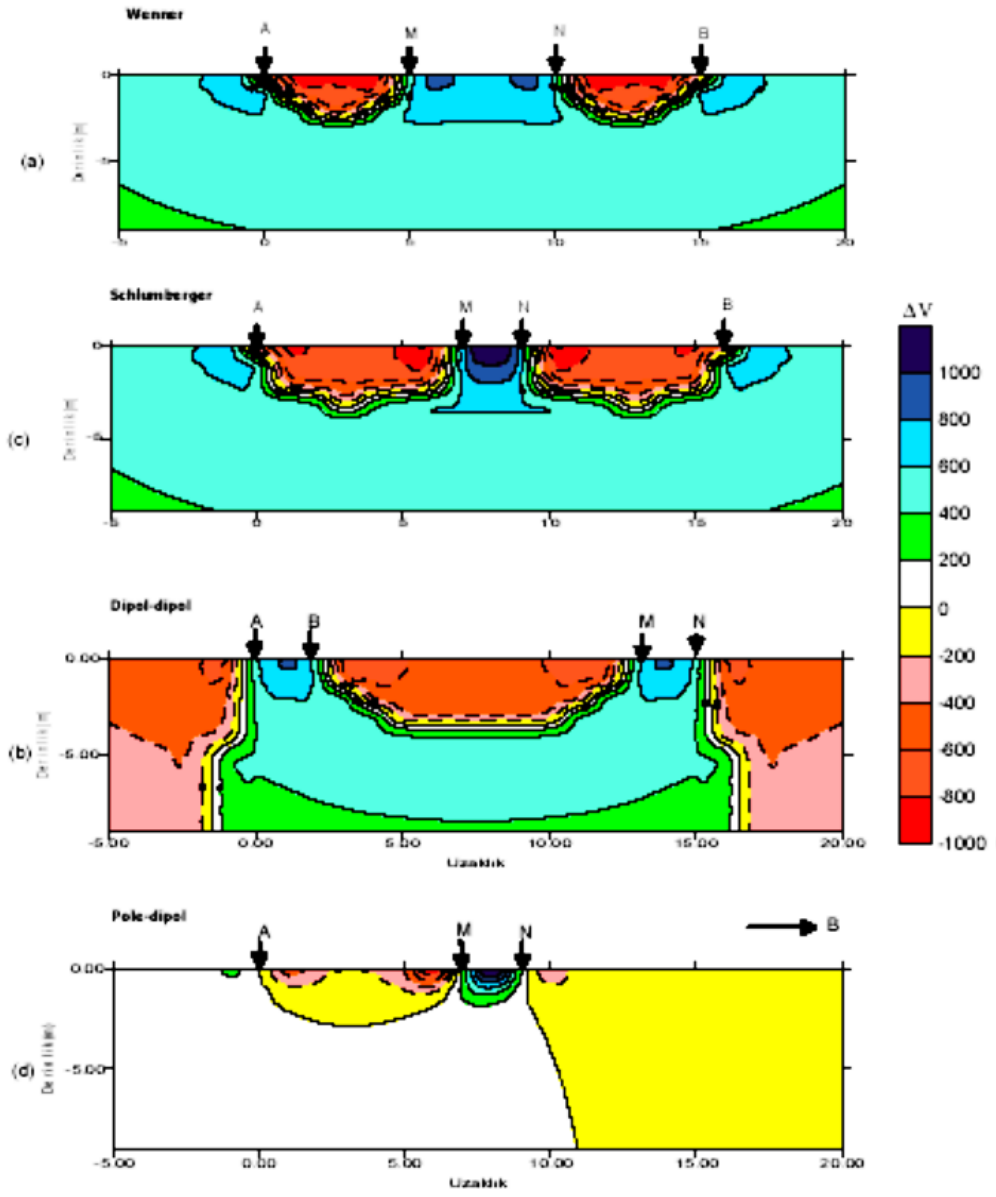
$$\rho_A = k_A(\Delta V/I) \qquad k_A = 2.x.a.n(n+1), \quad n = 1,2,3,\ldots \quad (2.47)$$

Barker (1979), (2.47) denklemini kullanarak x-z düzlemi üzerinde yeryüzünde ölçülen toplam $\Delta V'$na katkısı olan noktaların $\Delta V(x,y,z)$'nı hesaplayarak Schlumberger, Wenner, dipole-dipole ve üç gerilim elektrot dizilimleri (Wenner-α, Wenner-β ve Wenner-γ) için eşdeğer eğri (contour) haritasını çizmiştir. Çizdiği bu haritalarını "Sinyal Katkı Kesiti " (SKK) (Signal Contribution Section) olarak adlandırmaktadır. Sinyal katkı kesiti, elektrotların belli bir konumunda, ölçülen toplam gerilim farkına (ΔV)

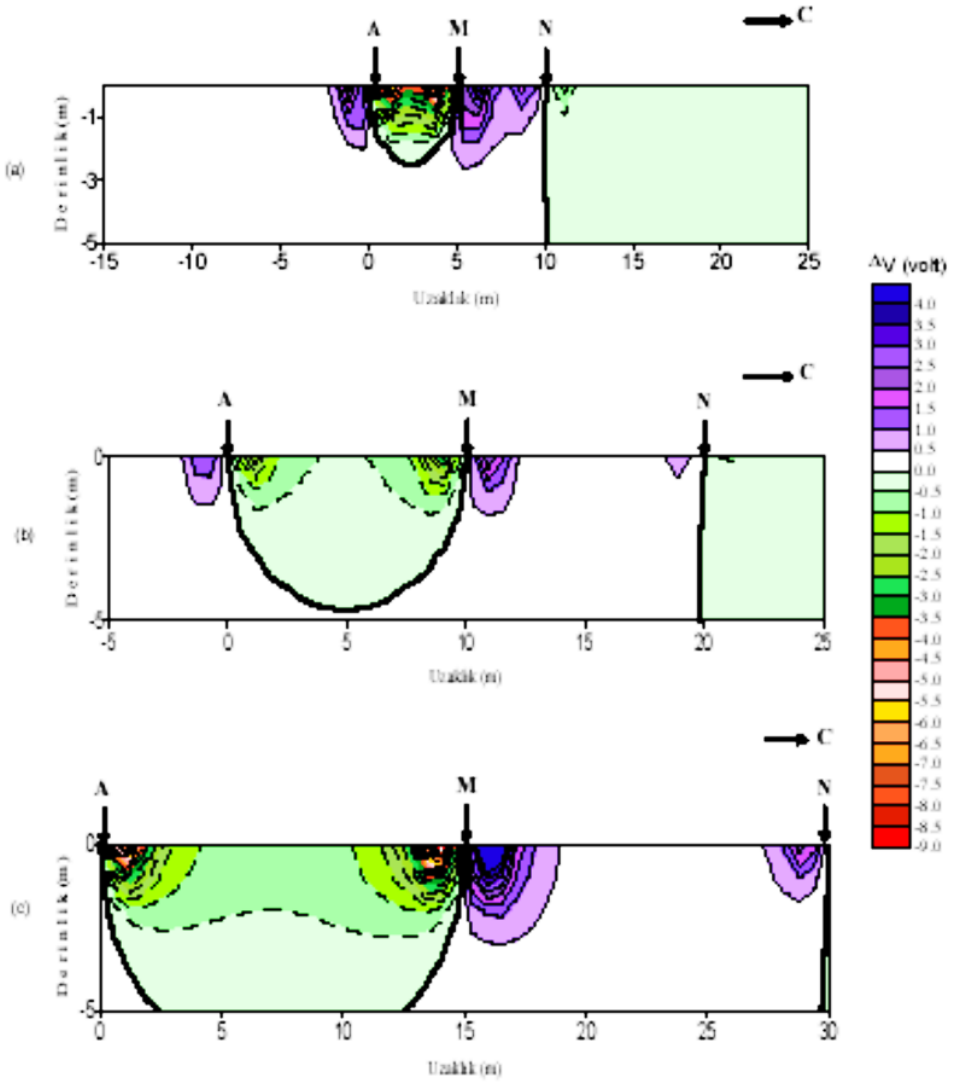
katkısı olan bütün noktalardaki gerilim farklarının $\Delta V(x,y,z)$ elektrot dizilimi doğrultusuna dik düşey yönde bir düzlem üzerinde işaretlenerek çizilen kontur haritalarıdır (Candansayar, 2007).

Wenner, Schlumberger, dipole-dipole ve pole-dipole elektrot dizilimleri için Sinyal Katkı Kesiti şekil 2.22'de, şekil 2.23'te yarım-Wenner ve İYÜE dizilimi için Şekil 2.22'de görülmektedir. Elektrot dizilimleri için çizilen bütün sinyal katkı kesitlerinde, akım ve gerilim elektrotları arasında kalan bölgede $\Delta V(x,y,z)$ değerleri negatif değerli, gerilim elektroları arasında kalan bölgede $\Delta V(x,y,z)$ $i$se pozitif değerli hesaplanmaktadır. Bu durum şu şekilde açıklanabilir. Özdirenci "ρ" olan tekdüze bir ortamda, 0 (sıfır) "ρ" özdirençli bir cisim düşünelim. Burada iki durum söz konusudur. Birinci durum, gömülü cisim bir akım ve gerilim elektrotu arasında kalır ise, kendi özdirencinin tersi yönünde ölçülen özdirenci değiştirmektedir. Örneğin $\rho 0 > \rho$ ise, ölçülen GÖ $\rho a < \rho$ olur. Tersi durumda, yani $\rho 0 < \rho$ ise, ölçülen GÖ $\rho a > \rho$ olur (Candansayar, 2007).

İkinci durum ise gömülü cismin iki gerilim veya dipole-dipole elektrot dizilimi için özel durum olan iki akım elektrotu arasında kalmasıdır. Bu durumda gömülü cisim, ölçülen özdirenç değerini kendi yönünde değiştirir. Örneğin $\rho 0 > \rho$ ise, ölçülen GÖ $\rho a > \rho$ olur. Tersi durumda, yani $\rho 0 < \rho$ ise, ölçülen GÖ $\rho a < \rho$ olur. Bu nedenle birbirine yakın bir akım ve bir gerilim elektrotu arasında kalan bölge "Negatif Katkı Bölgesi" (Şekil 2.22) iki gerilim veya iki akım elektrotu arasında kalan bölge ise "Pozitif Katkı Bölgesi" (Şekil 2.23) olarak isimlendirilir (Barker, 1979; Candansayar, 2007).



Şekil 2.22. Sinyal katkı kesiti; a) Wenner elektrot dizilimi, b) Schlumberger elektrot dizilimi, c) Dipoledipole elektrot dizilimi, d) Pole-dipole elektrot dizilimi (Barker, 1979; Candansayar, 2007 tarafından düzenlenmiştir).



Şekil 2.23. Yarım-Wenner elektrot diziliminde; $AB/3,10$ ve $15\,m$ değerleri için AMN sinyal katkı kesiti $(a),(b),(c)$ (Barker, 1979; Candansayar, 2007 tarafından düzenlenmiştir).

Şekil 2.23 c' de örnek alındığı zaman, $\rho = 100\ ohm.m$ özdirençli homojen bir ortamda $0.25\,m.$ Derinliğinde ve $0.5x0.75\,m$ boyutlarında özdirenci de $\rho a = 10\ ohm.m$ olan bir jeolojik yapı bulunsun. Wenner, yarım-Wenner ve iki yönlü üç elektrod (İYÜE) dizilimleri için 2B modelleme yapılırsa; cisim negatif katkı bölgesinde bulunduğunda GÖ eğrilerinde ortamın özdirencinden daha büyük GÖ' ler hesaplanırken pozitif katkı bölgesinde bulunduğunda ortamın özdirencinden küçük özdirenç değeri

hesaplanmaktadır. Aynı model için homojen ortamın özdirenci $\rho = 10\ ohm.m$ olmak üzere cismin özdirenci $\rho = 100\ ohm.m$ alınırsa yukarıdaki açıklamanın tam tersi ortaya çıkacaktır. Buradan; elektrotlar arasındaki mesafeye göre daha küçük ve sığ bir yapının, negatif veya pozitif katkı bölgesinde olması durumları için ölçülen gerilim farkını artıracak veya azaltacak bir etkisi olmaktadır (Barker, 1979; Candansayar, 2007).

Şekil 2.22 deki SKK incelendiğinde; ölçülen toplam ΔV' na en çok elektrotların yakınındaki noktaların katkısı olduğu görülmektedir. Buradan sığ ve küçük yapıların elektrotlara yakın olması durumunda $\Delta V'$ na esas olarak bu yapının katkısının olacağı söylenebilir. Amaç derin araştırmalar olduğunda, sığ yapının sinyale katkısı gürültü olacak ve bu gürültü giderilecektir. Arkeojeofizik çalışmalarda amaç toprak altındaki sığ yapı kalıntılarını araştırmak olduğu için yapı kalıntılarının katkısı, sinyal olacaktır (Barker, 1981; Candansayar, 2007).

2.3.5.1 Schlumberger Elektrot Dizilimi Sinyal Katkı Kesiti

Açılımın SKK'i, Şekil 2.22 b' de verilmiştir. Gerilim elektrodlarının arası, pozitif katkı bölgesi olup sinyale en çok katkıyı yapmaktadır. Derin araştırma amaçlı DES uygulamasında gerilim elektrodları arasındaki sığ bir yapı, verinin değerlendirilmesinde yanılgılara neden olacaktır (Barker, 1979; Candansayar, 2007).

2.3.5.2 Wenner ve Yarım-Wenner Elektrot Dizilimi Sinyal Katkı Kesiti

Wenner açılımı yarım Wenner dizilimleri için SSK, sırasıyla, Şekil 2.21 ve Şekil 2.22' de verilmiştir. Elektrodlar arası mesafenin eşit olması nedeniye pozitif katkı bölgesi ve negatif katkı bölgeleri eşit hacimli ve yaklaşık eşit değerdedir. Elektrodlar civarı, sinyale en çok katkıyı sağlamaktadır. Şekil 2.22.c' de görülen model için Wenner elektrot diziliminde cisim negatif ya da pozitif katkı bölgesinde olsa da bütün $AB/3$ değerleri için ortamın özdirencinden küçük GÖ değerlerine sahiptir. Yarım-Wenner dizilimi söz konusu olduğunda cisim negatif katkı bölgesinde ise ortamın özdirencinden biraz büyük GÖ değerleri ve cisim pozitif katkı bölgesinde ise ortamın özdirencinden

biraz küçük GÖ değerleri hesaplanmaktadır (Şekil 2.22.a, b). (Barker, 1981; Candansayar, 2007).

2.3.5.3 Dipole-Dipole Elektrot Dizilimi Sinyal Katkı Kesiti

Akım ve gerilim elektrodları çiftlerinin arasındaki iki bölge, pozitif katkı bölgesi olup ölçülen gerilim farkına en çok katkıyı vermektedirler (Şekil 2.22c). Tomografi çalışması yapılıdığında akım veya gerilim elektrot çiftleri arasında bulunan yeraltısındaki bir yapının sinyale katkısı büyük olacaktır (Barker, 1981; Candansayar, 2007).

2.3.6. Özdirenç Çalışma Teknikleri

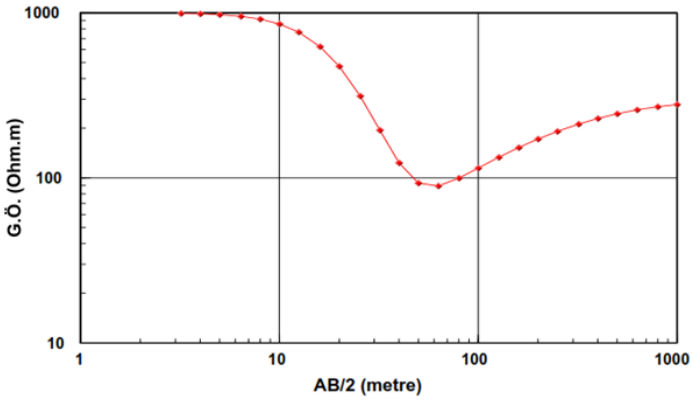
DAÖ yönteminde genel olarak düşey elektrik sondajı, Profil ölçüsü ve Sondaj-profil ölçüsü olmak üzere üç farklı çalışma tekniği vardır (Candansayar, 2007).

2.3.6.1 Düşey Elektrik Sondajı (DES)

Bir simetri merkezine göre akım ve gerilim elektrotlarının, simetri merkezinin iki yanına açılmasıyla yapılan özdirenç ölçümleridir. Böylece simetri merkezi olarak seçilen noktadan derinlere doğru özdirenç değişimi (1B) hakkında bilgi edinilmektedir (Öztürk, 2004).

Düşey elektrik sondajı verileri, yatay eksen akım elektrotları arasındaki mesafe (AB/2 veya AB/3) düşey eksen görünür özdirenci göstermek üzere çift logaritmik kağıtta görünür özdirenç eğrileri şeklinde sunulur. Bunun nedeni, kayaçların özdirençlerinin çok geniş bir aralıkta değişmesi ve derinlerden bilgi alınabilmesi için elektrot aralıklarının çok büyümesi ve ölçülen GÖ değerlerinin de geniş bir aralıkta değişmesidir (Şekil 2.24) (Öztürk, 2004).

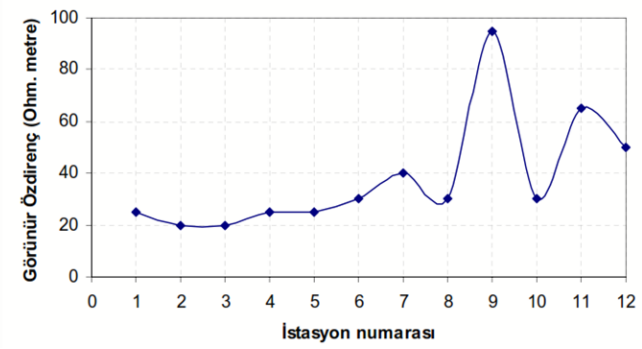
Düşey elektrik sondajı verileri ortamın bir boyutlu olduğu bir başka deyişle yerin yatay, kendi içinde homojen katmanlardan oluştuğu varsayımı ile yorumlanır. Görünür özdirenç eğrisine bakılarak ortamda derinlik yönündeki özdirenç dağılımı nitel olarak yorumlanabilmektedir (Öztürk, 2004).



Şekil 2.24. Görünür özdirenç sondaj eğrisi (Öztürk, 2004).

2.3.6.2 Profil Ölçüsü

Bir profil boyunca yanal süreksizlikleri belirlemek amacıyla uygulanmaktadır. Seçilen bir elektrot aralığı sabit kalmak üzere her ölçüden sonra profil boyunca bütün elektrodlar kaydırılarak ölçme işlemi gerçekleştirilmektedir. Farklı derinliklerin araştırılması isteniyorsa aynı profil üzerinde elektrot aralığı değiştirilerek ölçüm işlemi sürdürülmektedir (Şekil 2.25).

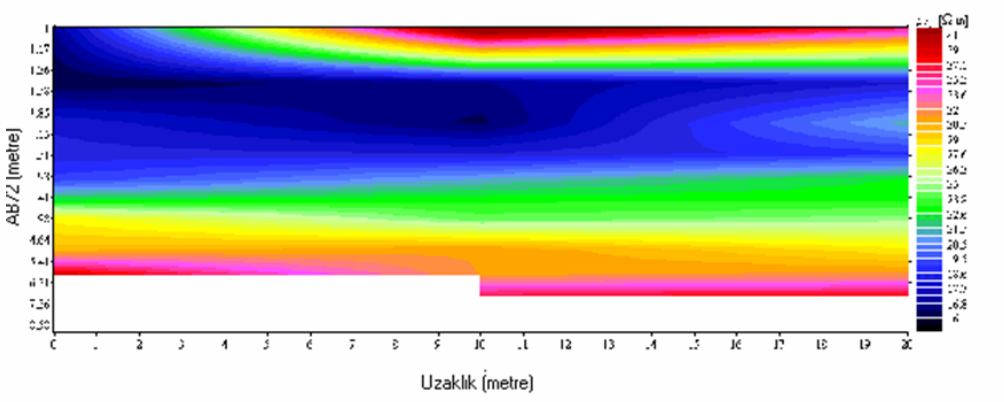


Şekil 2.25. Görünür özdirenç profil eğrisi (Candansayar, 2007)

2.3.6.3 Sondaj Profil Ölçüsü

Bir profil boyunca seçilen noktalardaki DES verileri birlikte sunulur. Ölçülen verilerden her nokta için sondaj eğrisi ve farklı AB/2 değerleri için profil eğrisi elde edilebilmektedir (Şekil2.26). Bu çalışma tekniği ile yer altında yanal ve düşey yöndeki özdirenç dağılımı belirlenmektedir (Candansayar, 1997). Bir profil boyunca belirlenen noktalarda ölçülen DES verilerinin biraraya getirilmesi ile elde edilir. Burada, tüm istasyonlarda farklı AB/2 değerleri için ölçü alımında açılım doğrultusu aynı olmalıdır. Aksi durumda, ölçü değerleri anizotropiden etkilenir ve bu şekilde ölçülen verinin 2B ters çözümü yapılamaz. Ölçülen verilerden, her farklı AB/2 seviyesi için profil eğrisi ve her istasyon için sondaj eğrisi elde edilebilir. Ayrıca, tüm veriler kullanılarak yapma-kesit (Pseudo-section) elde edilmektedir (Şekil 2.26) (Candansayar, 2016).

Çok-elektrodlu ölçü aletleri ile veri toplamak hem hızlı hem de kolaydır. Bu da sondaj-profil ölçüsünün, yaygın kullanılmasını sağlamaktadır. Bu uygulama şekli, hem DES ve hem de profil ölçü tekniklerini kapsamaktadır (Candansayar, 2016).

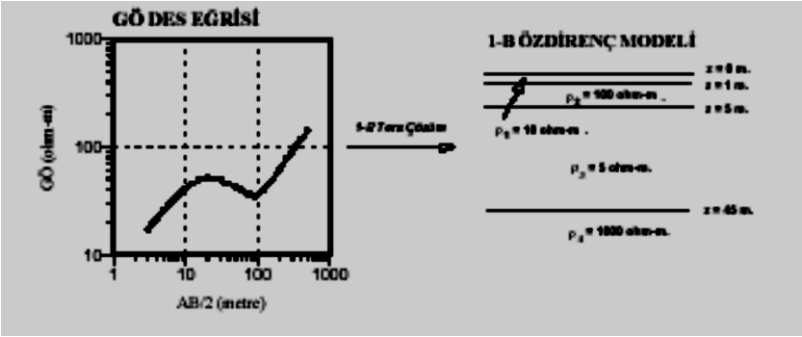


Şekil 2.26. Sondaj Profil ölçü tekniğine göre hazırlanmış görünür özdirenç yapma kesiti (Candansayar, 1997).

2.3.7 Özdirenç Verilerinin Sunumu

2.3.7.1 1B Veri Sunumu

1B gösterim klasik garfik gösterimidir. DES ölçümünde yatay eksen AB/2 (m) ve düşey eksen görünür özdirenç (ohm) olmak üzere logaritmik kâğıda çizilmektedir. Profil ölçüsünde verilen Şekil 2.27 da, aynı zamandai 1B sunum örneğidir.

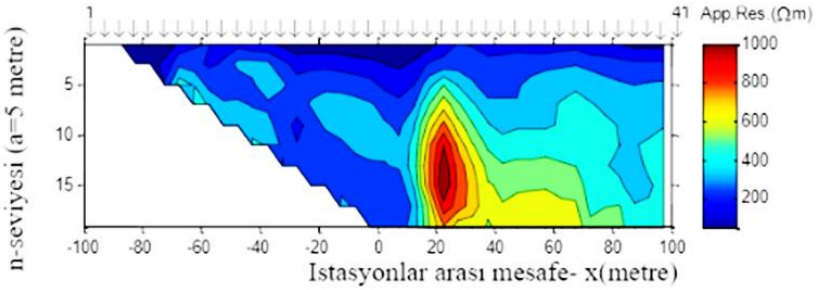


Şekil 2.27. Görünür özdirenç düsey elektrik sondajı egrisi ve 1B ters çözüm sonucu elde edilen 1B özdirenç modeli (Başokur, 1999).

2.3.7.2 Seviye (Kat) Haritaları (2B sunum)

2.3.7.2.1 Düşey Seviye Haritası (Pseudo-Section, Yapma Kesit)

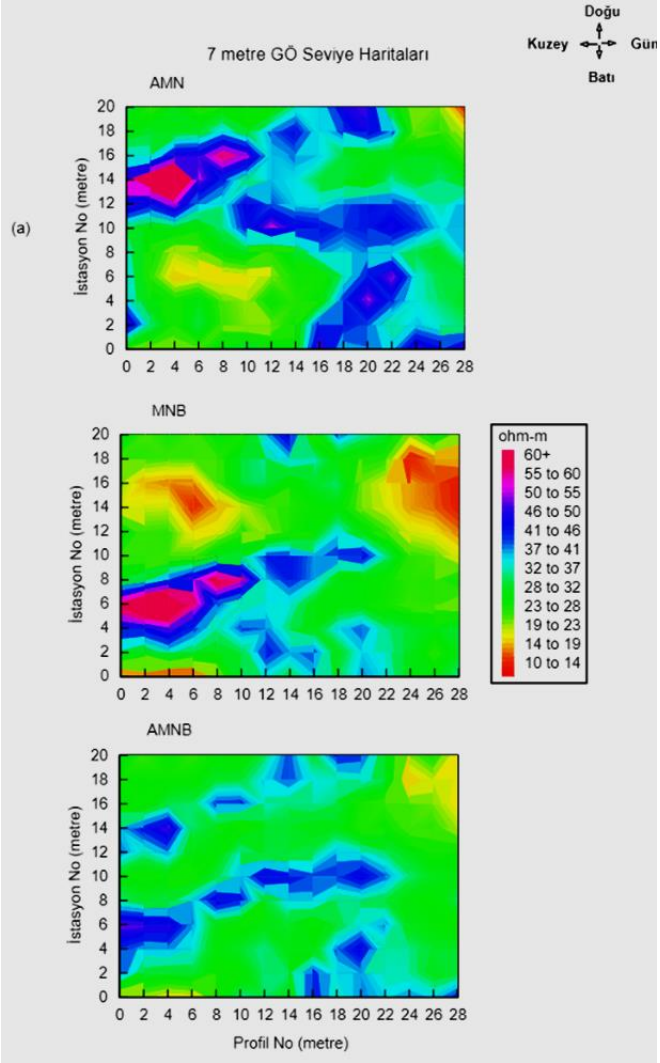
DES veya sondaj-profil ölçü tekniği ile toplanan veriler, düşey eksen, kullanılan elektrot dizilimine bağlı olarak AB/2, AB/3 ya da AB/4 (m) değerlerinden birini, yatay eksen ise ölçüm profili boyunca mesafeyi göstermek üzere her bir veri noktasında ölçülen görünür özdirenç değerlerinin haritalanması ile elde edilen sunumdur (Şekil 2.28). Yapma-kesitler olarak da tanımlanan bu sunum ile bir ölçü doğrultusu boyunca yanal ve düşey yönde görünür özdirencin dağılımı görülebilmektedir (Öztürk, 2004). Çalışma alanındaki tüm profiller için oluşturularak alanın genel durumu profil profil belirlenebilmektedir.



Şekil 2.28. Görünür özdirenç yapma-kesiti (pseudo-section) (Candansayar, 2016).

2.3.7.2.2 Yatay Seviye Haritası (Contour Map)

x-y düzlemi üzerinde, birbirine paralel çizgiler boyunca, sabit bir AB/2 seviyesi için ölçülmüş profil ölçüsü verileri veya DES verileri olsun. Ölçü istasyonlarının bu x-y düzlemi üzerinde işaretlenmesi ve her istasyonda belirli bir AB/2 değeri için ölçülmüş tüm GÖ verilerinin yazılması ile çizilen kontur haritalarına GÖ seviye haritası denilmektedir. Seviye haritalar, belirli bir seviyede, x ve y yönündeki yerin özdirenç yapısı hakkında bilgi verir. Bu tip haritalar, arkeolojik amaçlı araştırmalarda çok kullanılmaktadır. Örneğin, Şekil 2.29' da, Alaca Höyük arkeolojik sahasında AB/2=7 metre seviyesi için GÖ seviye haritası görülmektedir (Candansayar, 2016).



Şekil 2.29. AB/2=7 metre için İki-yönlü üç-elektrod dizilimi AMN, MNB ve AMNB GÖ seviye haritaları. (Candansayar,1997).

2.3.7.3 Yer Elektrik Kesit

Bir profil boyunca yeraltının derinlere doğru değişiminin incelenmesini amaçlamaktadır. Düşey kesit haritasına benzemekle birlikte burada yatay eksen yine bir ölçeğe göre küçültülmüş herhangi bir profil üzerindeki DES noktalarıdır. Düşey eksende AB/2 değerleri değil, kalınlıkların gösterildiği derinliktir. Yani haritalardan farklı olarak ρa ve AB/2 değerleri değil, gerçek özdirenç ve kalınlıklar kullanılmaktadır. Her bir DES eğrisinden elde edilen kalınlıklar veya derinlikler düşey doğrultuda işaretlenerek

üzerlerine gerçek özdirençleri yazılır. Birbirine komşu olan iki katmanın özdirençleri yaklaşık olarak ≅%10 birbirine yakın ise tek katman olarak varsayılır, taban ve tavan seviyeleri birleştirilmektedir. Yani burada eş özdirenç eğrileri değil, katmanların durumuna bakılarak benzer özdirence sahip ortamlar ortaya konmaktadır. Sonuçta jeolojik kesitlere benzeyen fakat özdirençler cinsinden bir kesit elde edilmektedir. Bu elektriksel kesitin jeolojik olarak tanımlanması gerekmektedir (Kaya, 1997).

Günümüzde 2B ve 3B veri toplama sürecinin hızlı olması ve kullanılan yazılımları hızlı bir şekilde koşturan bilgisayarların yardımıyla, yukarıda özetlenen ve uzun yıllar jeofizik araştırmalarda kullanılan sunum biçimleri yerini, gerçek yeraltı modelini ortaya koymayı amaçlayan 2B kesitler ve derinlik kesitlerine bırakmıştır. Yapma kesit (pseudo-section) kavramı, gittikçe azalmış ve gerçek kesitler yoğun olarak kullanılmaya başlanmıştır.

Gerçek kesitlere ulaşabilmek için 1B, 2B veya 3B model ve ters çözüm kavramlarının bilinmesi ve uygulanması gerekmektedir.

2.3.8 Verilerin Modellenmesi

Candansayar (2007), modellemeyi, varsayılan bir yer modelinin fiziksel parametreleri ile jeofizik belirtisini ilişkilendiren matematiksel bağıntı ile tanımlanması ve bu bağıntı yardımıyla modelin jeofizik belirtisinin sayısal olarak hesaplanması olarak tanımlamaktadır.

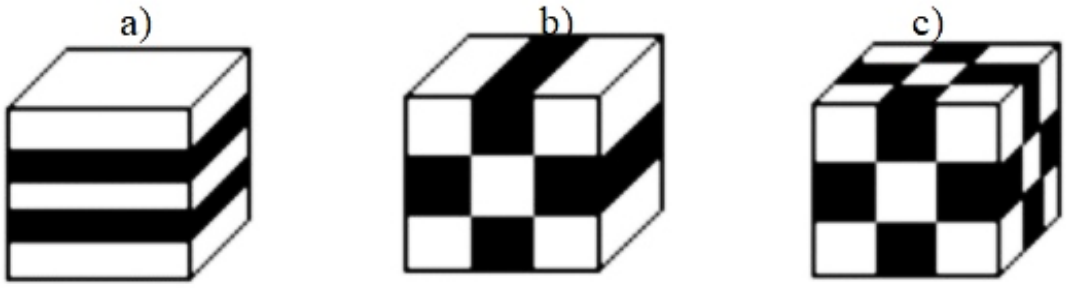
Günümüzde ölçülen DAÖ verilere, veri toplamanın türüne göre, 1B, 2B ve 3B ters çözüm işlemi uygulanmaktadır. Ters çözüm işleminde, kuramsal verilerin ve kısmi türevleri içeren dizeyin (Jacobian matrix) hesaplanması için düz çözüm yapmak gerekir. Düz çözüm, kısaca, modellemedir (Candansayar, 2007).

2.3.8.1 Düz-Çözüm (Forward Modeling)

Bir yeraltı modeli için jeofizik parametrelerin elde edilmesidir. Ölçülmeye çalışılan sürecin bilinen bir modele benzeştirilmesi modelleme olarak tanımlanmakta ve

bu model içerisinde, süreci denetleyen ve çözülmesi istenen niceliklerin (parametrelerin), sınıflandırılması, anlamlandırılması ve sayılarının saptanması "parametreleştirme" olarak adlandırılmaktadır. Bir jeofizik model, fiziksel özelliği ve geometrisi farklı çok sayıda unsurun bir araya gelmesinden oluşmaktadır. Jeofizik biliminde çözülmesi gereken parametreler, bu öğeleri tanımlamak için gereken geometrik ve fiziksel değerlerdir. Geometrik parametreler yeraltının biçimlendirilmesi ile ilişkilidir. Jeolojik yapıların konum ve biçimleri, geometrik parametreleri; jeofizik yöntemlerin uygulanması ile elde edilen anomaliler ise fiziksel parametreleri oluşturmaktadır. GPR yönteminde fiziksel parametre elektromanyetik dalgalar ve bunların varış zamanları iken elektrik özdirenç yönteminde geometrik birimlerin elektriğe olan dirençleri (özdirenç) kullanılması buna örnektir (Başokur, 2002).

Şekil 2.30'da görüldüğü üzere 1B modellemede yer içinin homojen ve izotrop tabakalardan meydana geldiği varsayılır (Şekil 2.30.a). 2B modellemede, yer içinin iletkenliğinin y yönünde sabit, x ve z yönünde değişken bloklardan meydana geldiği (Şekil 2.30.b) ve 3B modellemede, kendi içinde homojen ve izotrop küplerden meydana geldiği varsayılmaktadır (Şekil 2.30.c) (Candansayar, 1997).



Şekil 2.30. a) 1B model, b) 2B model, c) 3B model (Candansayar, 1997).

Düz-çözüm, elektrot düzeni ve tabakalanmaya bağlı görünür özdirençleri matematik olarak hesaplamaktan ve jeolojik kesitin veya modelin tahmininden oluşmaktadır. Daha sağlıklı bir model geliştirmek için kuyu kontrolü sağlanabilir, tahmin edilen sonuçlar hesaplanabilir, etkin bir arazi programı tasarımı yapılabilmektedir. Alternatif olarak, teorik sonuçları mevcut arazi verilerine uyuncaya kadar jeolojik model ardışık olarak ayarlanabilir. Hesaplama yapmada tablolama

programı düz-çözümü hızlandırır. Genel olarak lineer bir usuldür ve çözüm tekildir. Homojen ortamda küre veya fay gibi basit durumlarda analitik yöntemler kullanılmaktadır. Gelişigüzel şekiler için daha çok sayısal yöntemler kullanılır (Keçeli, 2009).

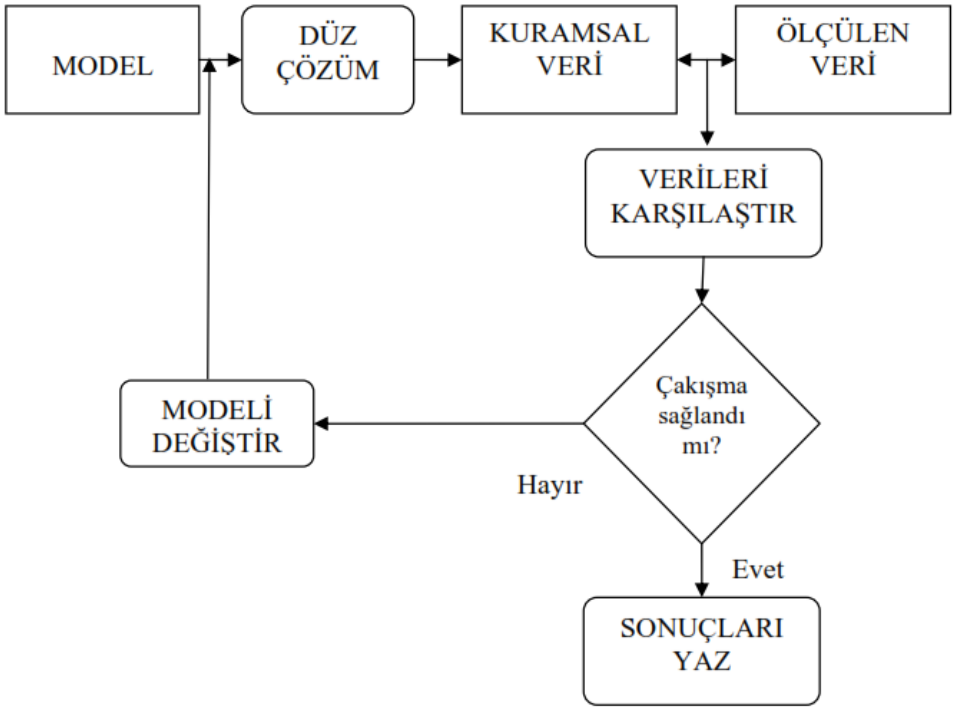
Elektrik özdirenç verilerinin tabakalı bir ortam için 1B modellemesinde belirti analitik olarak hesaplanabilir. Ancak 2B ve 3B modellemede, modeller daha karmaşık olacağından analitik hesap zordur ve hesaplamalar sayısal olarak yapılmaktadır. İntegral denklemi sonlu elemanlar ve sonlu farklar yöntemi, elektrik özdirenç verilerinin modellemesinde kullanılan başlıca hesaplama yöntemleridir (Candansayar, 1997).

2.3.8.2 Ters-Çözüm (Invers Modeling)

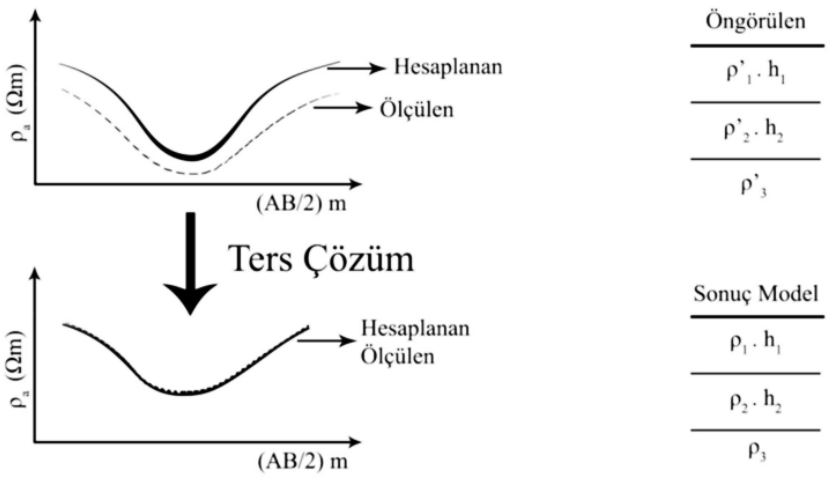
Ters çözüm işlemi, ölçülen verilerden fiziksel parametre değerlerinin hesaplanması olarak tanımlanmaktadır. Ters çözüm işlemi doğrusal ve doğrusal olmayan problemler olarak iki türden oluşur ve bunun temel nedeni veri-parametre ilişkisidir. Veri-parametre ilişkisi bir dizey denklemiyle karakterize edilebiliyor ise problem lineerdir ve parametreler, ölçülen veriden tek bir işlem adımı ile hesaplanabilmektedir. Dizey denklemi ile karakterize edilemediği durumlarda problem doğrusal değildir ve parametrelerin hesaplanması için model yanıtın hesaplanması gerekir. Şekil 2.31'de doğrusal olmayan problem için yeraltı parametrelerinin çözümünde kullanılan strateji ve kavramlar görülmektedir (Başokur, 2002).

Görünür özdirenç değerlerinden gerçek yeraltı yapısını saptamak ters-çözüm problemidir. Ters-çözüm tekniği, günümüzde, tüm jeofizik yöntemlerin değerlendirme ve yorumunda kullanılan temel bir teknik durum haline gelmiştir. Ölçülen arazi verilerine benzeyen veya uyan verileri oluşturan elektrik özdirenç modelin fiziksel parametrelerini saptamaktır. Ters-çözüme başlamadan önce arazi eğrisi uygun bir teorik eğri ile çakıştırılarak ilk yaklaşım yorumu yapılır (Şekil 2.31). Pratikte önce, başlangıç modeli öngörülür yani seçilir, bu değerlerin oluşturduğu görünür özdirenç anomali parametreleri hesaplanır. Daha sonra bilgisayar programı otomatik olarak özdirenç ve

kalınlık olan model parametrelerini ayarlar ve program durur, ekranda en iyi model görünür.



Şekil 2.31. Nicel yorumlamanın basitleştirilmiş akış şeması (Başokur, 2002).



Şekil 2.32. 1B elektrik özdirenç ters-çözüm şeması (Keçeli, 2009).

Bilgisayar programında hesaplanan model veri ile ölçülen arazi verisi çakışıncaya kadar yorumcu tarafından ilk model girişi ardışık olarak değiştirilir. Bu işlem yorumcunun kabul edebileceği hata seviyesi içinde hesaplanan veriler, ölçülen verilere çakışıncaya kadar devam ettirilir. Bilgisayar programı görünür özdirenç verileri ile model arasındaki uyumsuz değerleri minimuma indirger.

Ters-çözüm işlemi ince katmanları açığa çıkarabilir. Özdirenç derinlik sondajının en büyük sınırlaması katmanların özdirençlerinde yanal değişimleri dikkate almamasıdır. Yanal değişimler katmanların özdirenç ve kalınlıklarının yorumunda hataya sebep olabilmektedir. Yöntem hızlı ve en uygun modeli bulmakla beraber yüksek dirençli satıhlarda sınırlıdır ve kabadır. Elektrik özdirenç yönteminde ters-çözüm genel olarak nonlineer bir usuldür ve çözüm tekil değildir. Verilerdeki küçük değişiklikler çözümde büyük değişikliklere sebep olabilir. Genel olarak, kullanılan ters-çözüm yöntemleri uygun stabilize yapıcı fonksiyon kullanılması ile tekil ve duraylı çözümler sağlar. Duraylı yapıcı fonksiyonlar anomali ve kesitleri klasik düzgünleştirici fonksiyonlardan daha belirgin hale getirmektedirler (Başokur, 2002; Candansayar, 2005).

Yeraltını en iyi yansıtan jeolojik modelin seçilmesine yeterli duyarlılığı göstermek gerekmektedir. Eğer, 1B model kullanılırsa hesaplamalar daha kolay yapılmaktadır. Ancak 1B ters-çözüm sadece yeraltı katmanlarının yatay olması durumunda kullanılabilir sonuçlar üretmektedir. Yeraltının yatay katmanlardan oluşmadığı durumlarda 2B ters-çözüm yönteminin kullanılması gerekmektedir. Birçok ölçü noktası düz bir hat üzerinde bulunuyor ise 2B ters-çözüm gerçekleştirilebilmektedir. Çalışma alanında çok sayıda ölçü hattı bulunuyor ise en iyi yöntem 3B ters-çözümdür. 3B ters-çözümde de çok güçlü bilgisayarlara gereksinim duyulmaktadır (Başokur, 2002).

BÖLÜM 3

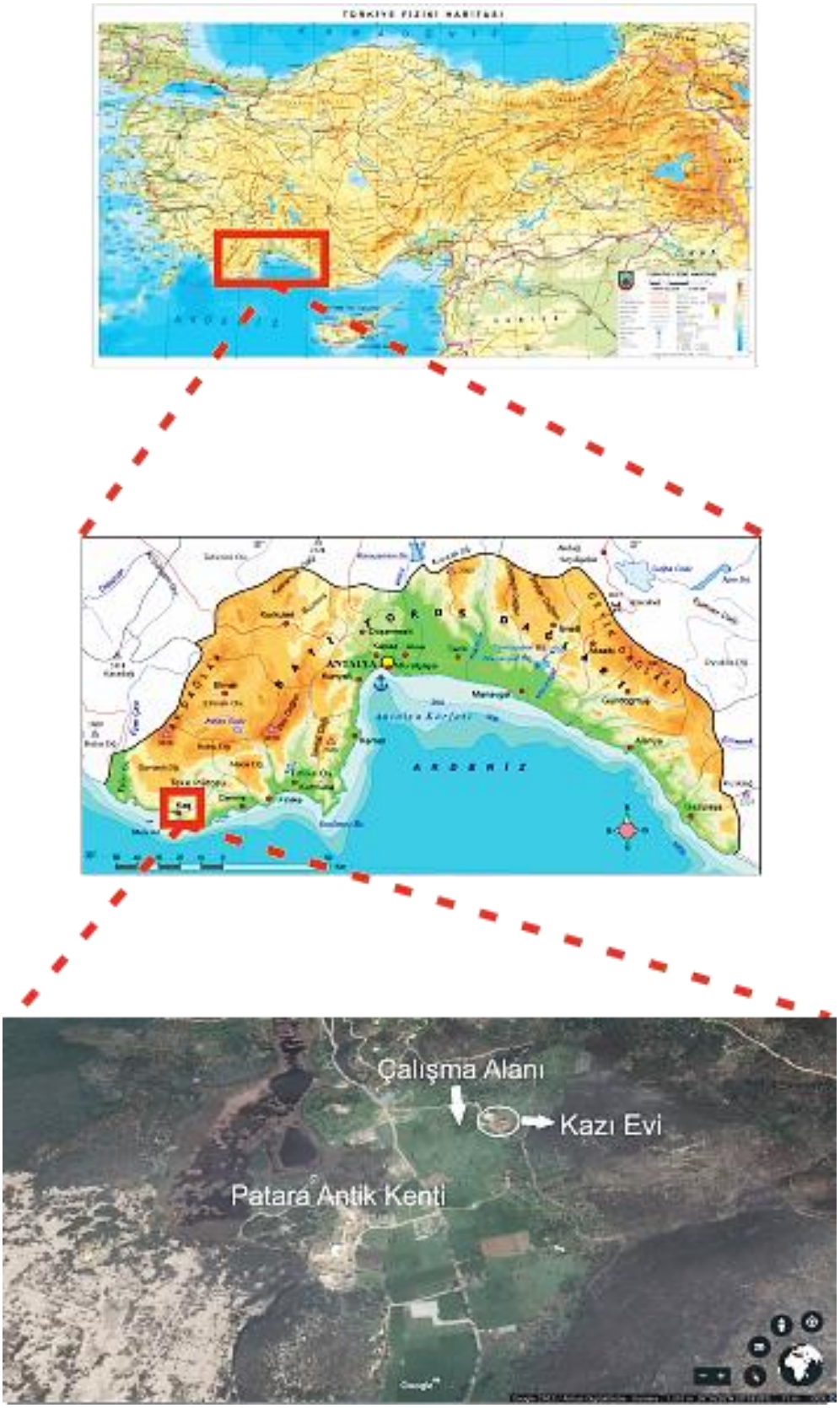
PATARA (KAŞ/ANTALYA) UYGULAMA ALANI

3.1. Çalışma Alanının Konumu

Likya Krallığının başkenti ve dönemin önemli liman kenti olan Patara'nın kalıntıları bugün Antalya'nın 224 km güney batısında, Kaş ilçesinin 43 km batısında ve Muğla'nın Fethiye ilçesinin 75 km güneydoğusunda Kaş ilçesine bağlı Gelemiş köyü yakınlarında bulunmaktadır. Kent ve limanı, Eşen vadisinin girişinde ve sahilden yaklaşık 2 km içeride yer almaktadır (Işık, 2000). Antik kent, limanın doğu yakasında geniş bir alana yayılmış durumdadır (Şekil 3.1). İçinde Patara Antik Kenti'nin de bulunduğu ve 1990 yılında özel çevre koruma bölgesi ilan edilen bölge 193 kilometrekarelik bir yüzölçümüne sahiptir (Kaş, 2016).

3.2. Patara Antik Kenti

Likya birliğinin önemli kentlerinden olan Patara'nın Plinius'a göre "Pataros" olan adı Likçe metinlerde "Pttara" veya "Pttareze" olarak geçmektedir (Akşit, 1967). Hititlerde ise Likyalılar Luvi halklarından olup Lukkalılar olarak bilinmektedirler (Bryce, 1986). Patara'nın Hititçe adı da "Patar" olarak yer almaktadır. IV. Tuthalya'nın M.Ö. 13. yy'ın 3. çeyreğinde yaptığı Lukka seferini anlattığı Yalburt Kaya Tapınağı'ndaki Luvi hiyeroglifi ile hazırlanan yazıtta "Patar" dağından söz edilmesi de bu bilgileri desteklemektedir (Işık, 2011). Sözü edilen dağ, kentin doğusunda yer alan ve üzerinde kaya mihrapları taşıyan Doğucasarı olmalıdır (Varmaz, 2015).



Şekil 3.1. Çalışma alanının konumu (Türkiye ve Antalya Haritası (Harita, 2018).

Kentin kuruluşuna ilişkin en erken izlere Tepecik Akropolü kazılarında ulaşılmaktadır. Bu alanda Patara tarihinin Tunç Çağı'na kadar uzandığının kanıtlarını oluşturan ve M.Ö. 3. bin karakteri taşıyan az sayıda seramik buluntu ile bir taş balta ele geçmiştir (Akşit, 1967). M.Ö. erken 1. binyıla kadar olan sürece ilişkin veriler şimdilik kısıtlıdır. Kentte son yıllarda yapılan çalışmalarla bu kısıtlı verilerin M.Ö. 7. yy başlarından itibaren değiştiği görülmüş, özellikle M.Ö. 7. – 4. yy'lara ilişkin önemli bilgilere ulaşılmaktadır (Işın & Işık (2008)'den aktaran Varmaz, 2015).

M.Ö. 6. yy ortalarından başlayarak Pers hâkimiyetinin görüldüğü kent, M.Ö. 516-515'te Sardeis'teki I. Satraplığa bağlanmış ve bu süreç M.Ö. 334'te Büyük İskender'e kadar devam etmiştir. Hellenistik Dönem ile birlikte Patara hakkında daha ayrıntılı bilgilere ulaşılmaktadır. Patara limanının stratejik bir konumda bulunması özellikle M.Ö. 3. yy başlarında kentin kısa aralıklarla el değiştirmesine neden olmuştur. Kent, Büyük İskender'in ölümünden sonra halefi olan Antigonos'un kontrolüne geçer. M.Ö. 309 yılında donanmasıyla Patara limanı üzerinden Antigonos'un Lykia'daki garnizonu Ksanthos'u ele geçiren Ptolemaios'un buradaki etkisi de kısa süreli olmuştur. Ptolemaios I Soter'in hâkimiyetinden sonra kent tekrar Antigonos'un oğlu Demetrios Poliorketes'in kontrolüne geçer. M.Ö. 305-304 yılında ise Demetrios Poliorketes'in Patara limanındaki gemileri Rhodoslu Menedamos tarafından ani bir baskınla yakılmıştır (Diederichs, 1980; Varmaz, 2015).

M.Ö. 301 yılındaki Ipsos Savaşı'ndan sonra Lykia egemenliği Antigonos'tan Lysimakhos'a geçer. M.Ö. 281 yılında yapılan Krupedion Savaşı'ndan sonra da tüm Anadolu ile birlikte Lykia, Seleukosların kontrolü altına girer. Ancak bölgedeki Seleukos Egemenliği de uzun soluklu olmaz. Bölge yaklaşık olarak M.Ö. 278-277 yıllarında II. Ptolemaios (Philadelphos)'un hâkimiyeti altına girer. Ptolemaios'un bölgeye ve özellikle Patara'ya verdiği önemi, kentin adını kardeşi ve eşi Arsinoe'nin adına ithafen "Arsinoe" olarak değiştirmesi göstermektedir (Pekman, 2005). Lykia'daki Mısır egemenliği yaklaşık yüzyıl sürmüş ve M.Ö. 197'de Seleukos Kralı Antiokhos III'ün egemenliğine girmiştir (Bresson, 1990). Kent, yaklaşık yedi yıl sürecek olan Seleukos hâkimiyetinden sonra, Roma amirali Livius'un, Antiokhos'un direncini kırmak için geniş bir donanmayla limanı kuşatma denemesi ve devamında yine Romalıların L. Aemilius Regillus ile ele geçirmeye çalışması başarısızlıkla sonuçlanır.

M.Ö. 189 yılında Antiokhos'un Romalılara karşı Magnesia Muharebesini kaybetmesinden sonra, M.Ö. 189-88'de yapılan Apameia Barışı ile Roma egemenliğine giren Patara'nın idaresi Rodos'a bırakılır. Likya'nın süregelen özgürlük kavgası M.Ö. 167'de bağımsızlıkla sonuçlanır ve Likya Birliği kurulur. Patara başkent olmanın yanı sıra, bu birliğin üç oy hakkına sahip olan 6 büyük kentinden birisi olur (Işık, 2011; Varmaz, 2015).

I. Mithridates'in M.Ö. 88- 85 yılları arasında süren savaşlarla kenti ele geçirme çabaları ise başarısızlıkla sonuçlanmıştır. M.Ö. 84 yılında Sulla döneminde Likya'nın sadakati az bir vergi karşılığı bağımsızlığa dönüştürülür. Önemli bir liman kenti olan Patara Roma İç Savaşı boyunca da bu özelliğini sürdürmüştür. M.Ö. 43'te Julius Caesar'a verilen donanma desteğinin ardından bölgeye gelen Brutus ise beklediği maddi desteği alamaz ve büyük bir dirençle karşılaşır. Bunun sonucu daha ılımlı bir politika izler ve istediklerini elde ederek ayrılır. Kent, M.S. 43'te Claudius ile birlikte Likya Roma eyaleti olur ve yönetimde Roma valilerinin atandığı dönem başlar. Patara devam eden Lykia Birliği'nin başkenti olmayı sürdürürken eyalet başkenti de olur. M.S. 73-74 yıllarında İmparator Vespasian Lykia ve Pamfilya'yı birleştirir. Olasılıkla bu birleşik eyaletin başkentliğini de Patara yürütmüştür. Bu süreçte Patara Deniz Feneri, Büyük Hamam, Marcia Tapınak Mezarı, Onur Takı, Tiyatro, Korinth Tapınağı ve Granarium gibi çok sayıda mimari yapı ile zengin bir dönem geçirmiştir (Işık, 2011; Varmaz, 2015).

M.S. 312-337 İmparator Konstantin Dönemi'nde Pamphylia'dan ayrılan Lykia yeniden tek eyalet olur ve dinsel merkez Patara'dan Myra'ya geçer. Fakat deniz ticareti açısından önemi devam eden Patara Hıristiyanlık sürecinde de önemini korumuştur. Bu dönemde Patara piskoposu olan Eudemos'un, İmparator Konstantin'in konsülünde imza yetkisi olan tek kişi olması ve günümüzde bu döneme ait 4 bazilika ve 8 kilise kalıntısı ele geçmesi Patara'nın öneminin sürdüğünün göstergesidir (Işık, 2000). Ancak M.S. 541 yılında veba salgını Patara'da nüfus azalması ve dış ticaretin gerilemesine neden olmuştur. M. S. 7- 8. yy. larda süregelen Arap akınları ile de iyice küçülen kent yine de M.S. 10. yy.da Doğu Roma İmparatorluğu deniz üssü olmayı sürdürür. M.S. 12. yy.da ise içe kapalı bir ortaçağ liman köyüne dönüşür. M.S. 13-15. yy. içinde liman ağzı Ksanthos ırmağının getirdiği toprak ve kumla dolarak bir iç göle dönüşür. Kent ile ilgili ulaşılan son bilgiler Fatih Sultan Mehmet'in oğlu Cem Sultan'ı Rodoslularla bir anlaşma

yapması için Patara'ya göndermesi konusundadır (1478- 1479). 1681 yılında tanınırlığı sebebiyle Fransız gezgin A. H. Jaillot'un çizdiği Osmanlı İmparatorluğu haritasında yer alan Patara, sonraki yıllarda da pek çok gezgin'in yol haritasında bulunmuş, 1836 da ise Ch. Texier isimli Fransız gezginin kent tarihi ve dini yapısı hakkında çalışmalarına konu olmuştur. 1842 yılında T. A. B. Spratt ve E. Forbes isimli doğa bilimciler ile 1844'te L. Ross isimli arkeolog tarafından ziyaret edilen kent hakkındaki detaylı bilimsel araştırmalar 1881'de O. Benndorf ve G. Niemann tarafından başlatılmıştır. 1901 ve 1902 yılında E. Kallinka tarafından 2 cilt olarak yayınlanan "Tituli Lyciae" 2. ciltte ise kent hakkında bilgileri sağlayan antik kaynaklar yer almaktadır (Işık, 2000; Varmaz, 2015).

3.3. Patara Villaları (Roma Villaları)

Tezimizin de konusu olan ve Patara antik kentinde jeofizik yöntemler ile olası kalıntılarının (temel, yer mozaikleri, duvar kalıntısı gibi) araştırıldığı Roma Villaları (Roma yamaç evleri ya da Roma villaları) Lake 1937'ye göre, genellikle bir avlu ve etrafında çevrelenmiş veya yan yana dizilmiş oda, atölye ve ambar gibi diğer yapılardan oluşmaktadır.

Patara'daki villalar ile ilgili arkeolojik net bir göstergenin olmaması nedeni ile yeraltında olası yapı kalıntılarının Efes yamaç evleri ve diğer villa rustikalara benzer olduğu düşünülmektedir; bununda en temel nedeni Waites 1914' e göre, Roma mimarisin standartlara sahip olası ve bu standartlar ile Romanın hüküm sürdüğü bölgelerde şehirler inşa etmesidir.

Anadolu'da M.Ö.7.yy'dan itibaren özellikle M.Ö. 5 ve 4.yy' iki farklı ev plan tipi vardır (Açıkders, 2009).

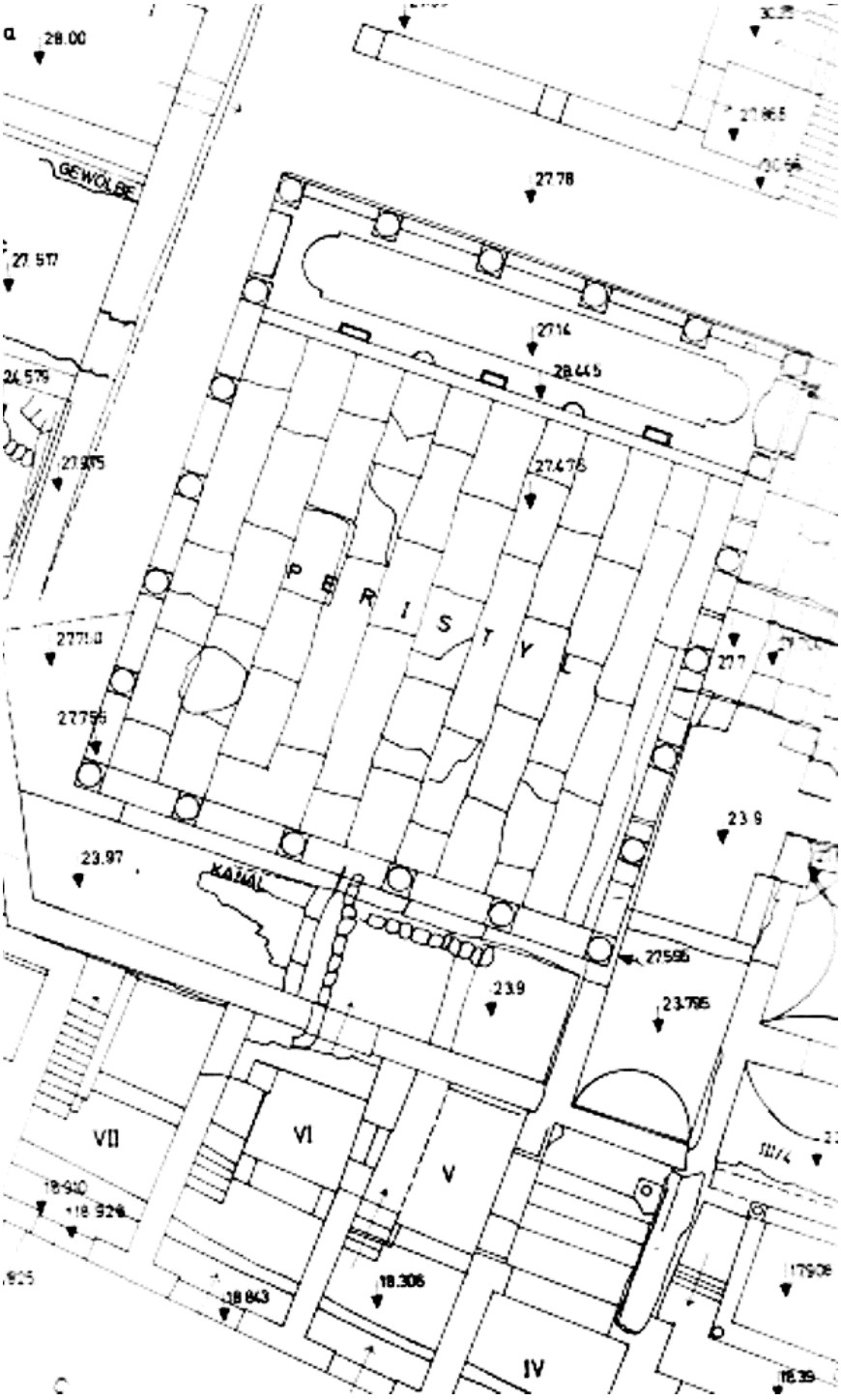
- Protaslı ya da pastalsı Ev Plan Tipi
- Peristili Ev Plan Tipi'dir.

Araştırma konumuz olan yapılar, peristili ev planına sahiptir (Arkeolog Dr. Şevket Aktaş ile kişisel görüşme, 3 Haziran 2018). (Şekil 3.2). Peristili ev plan tipinde inşa

edilen villa rustika olarak da bilinen yamaç evleri hakkındaki bilgilere özellikle M.S. 1. yüzyılda yaşamış olan Lucius Iunius Moderatus Columella (M.S. 4 – M.S. 70) De Re Rustica adlı yapıtında villa yapılarını üç grupta katogorize etmektedir. Bunlar; Villa Urbana (Arazi sahibinin ikamet alanı), Villa Rustica (Vilicusun (kâhya) villası) ve Villa Fructuaria (üretilen ürünün depolandığı villalar)'dır (Açıkders, 2009).

Yamaç Evler Peristili ev tipinin gelişmiş örnekleri olup yerleşim planı olarak da oldukça kullanışlı olan bu evlerin duvarları ve tabanları zengin süslemelere sahiptir. Planlamada başlıca unsur olan peristil, evin merkezine konumlandırılırken büyüklüğü 25–50 metrekare kadardır. Kare veya kareye yakın dikdörtgen formlu peristilin orta kısmında, evin ışık ve havalandırılmasının sağlandığı impluvium bulunmaktadır. Derinliği 15–20 cm olan impluviumun su döngüsü yağmur sularının bir oluk vasıtasıyla buraya aktarılmasıyla gerçekleştirilmektedir. Pencerelerin yokluğu ve impluviumun oluşturduğu açıklığın evin aydınlatmasına yeterli olmaması, bazı odaların loş veya karanlık olmasına neden olmuş bunun sonuçu olarak, oda kapıları genellikle çift kanatlı olarak inşa edilmiş (Erdemgil vd., 1990; Tabanlı, 2007).

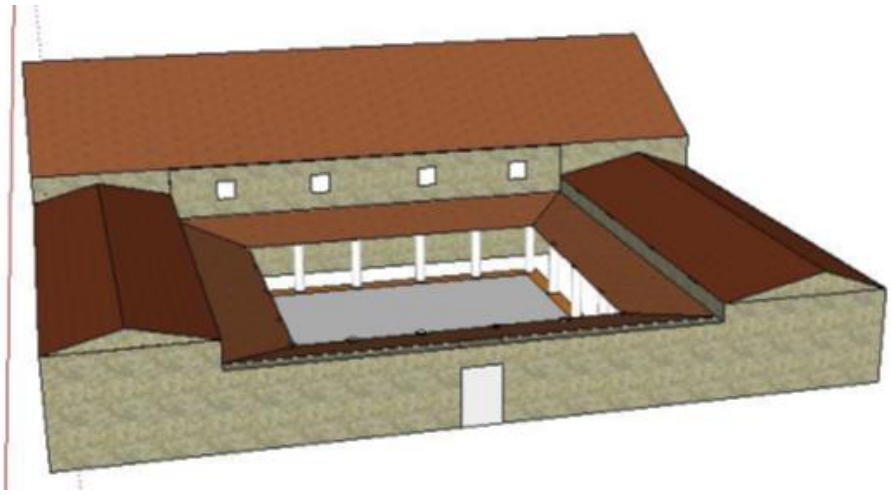
Yunan peristilinin amacı geçiş avlusu iken; Roma peristili içerisinde bir havuzunda bulunduğu yeşil alandır. Avlu, görkemli mimari ve heykeltıraşlık eserleri ile süslenmiş, sütunlu galerilerden oluşan bir gezinti yeridir.. Tabernae (dükkanlar) ile çevrili olan evin girişinden, atriumlu bölüme, buradan da peristile ulaşılır. Peristil çevresinde, zemin döşemesi freskleri ve dekorasyonuyla ötekilerden ayrılan oecus (ana oda) ve triclinium (yemek odası) önemli mekanlardır (Erdemgil vd., 1990; Tabanlı, 2007).



Şekil 3.2. Efes Yamaç Ev-1 Peristili'nin Planı (Lang-Auinger, 1996).



Şekil 3.3. Efes yamaç ev-1 peristil bahçesi ’nin restitüsyonu (Kaynakçı Elinç, 2007).



Şekil 3.4. Avsallar villa rusticası restitüsyonu (Bulut, 2016).

BÖLÜM 4

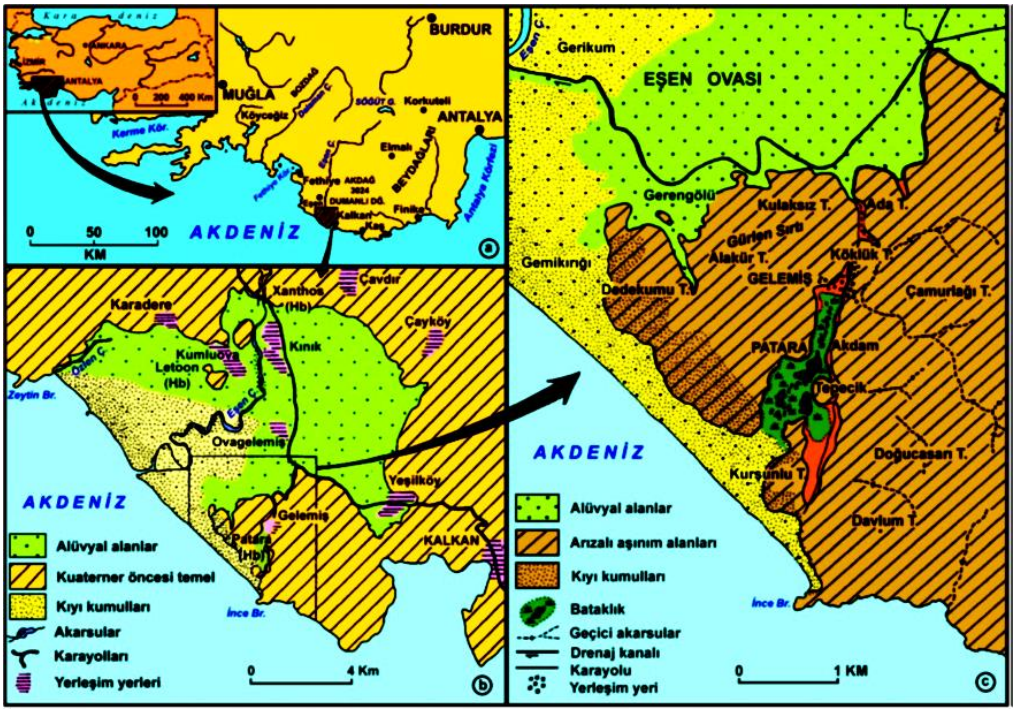
PATARA VİLLALARI ARKEOJEOFİZİK UYGULAMASI

4.1. Bölgenin Jeolojisi

Patara antik kenti, Anadolu Yarımadası'nın güneybatısında; Eşen Çayı'nın (Kocaçay- antik adı Xanthos) oluşturduğu delta ovasının güneydoğusunda yer almaktadır (Şekil 4.1). Patara'nın Eşen ovası ile bağlantısı kısık boğazı ile sağlanmaktadır. Orta ve Geç Holosen dönemlerinde meydana gelen doğal çevre değişimleri, Eşen Çayı'nın taşıdığı taşıdığı alüvyonlar, Eşen Delta Ovasını geliştirirken Patara'nın sahip olduğu doğal limanı da etkilemiştir. Tüm bu jeomorfolojik özellikler bölgenin önem kazanmasını ve gelişimini sağlarken; taşınan alüvyonlar doğal limanın dolmasına da neden olmuştur (Öner ve Akbulut, 2015).

Eşen Çayı, kaynağını Burdur'un Söğüt ilçesinin güneyinde bulunan Çal ve Kızılca dağlardan almakta olup kuzey-güney yönlü tektonik bir graben içinde bulunmaktadır. Eşen çayının akış yönü kuzey-güney istikametinde olup, içinden geçtiği değişik bölgelerde farklı isimler ile adlandırılmaktadır (Şekil 4.2). Eşen vadisinin graben oluşumu, Ege bölgesi grabenlerine benzer şekildedir (Öner ve Akbulut, 2015).

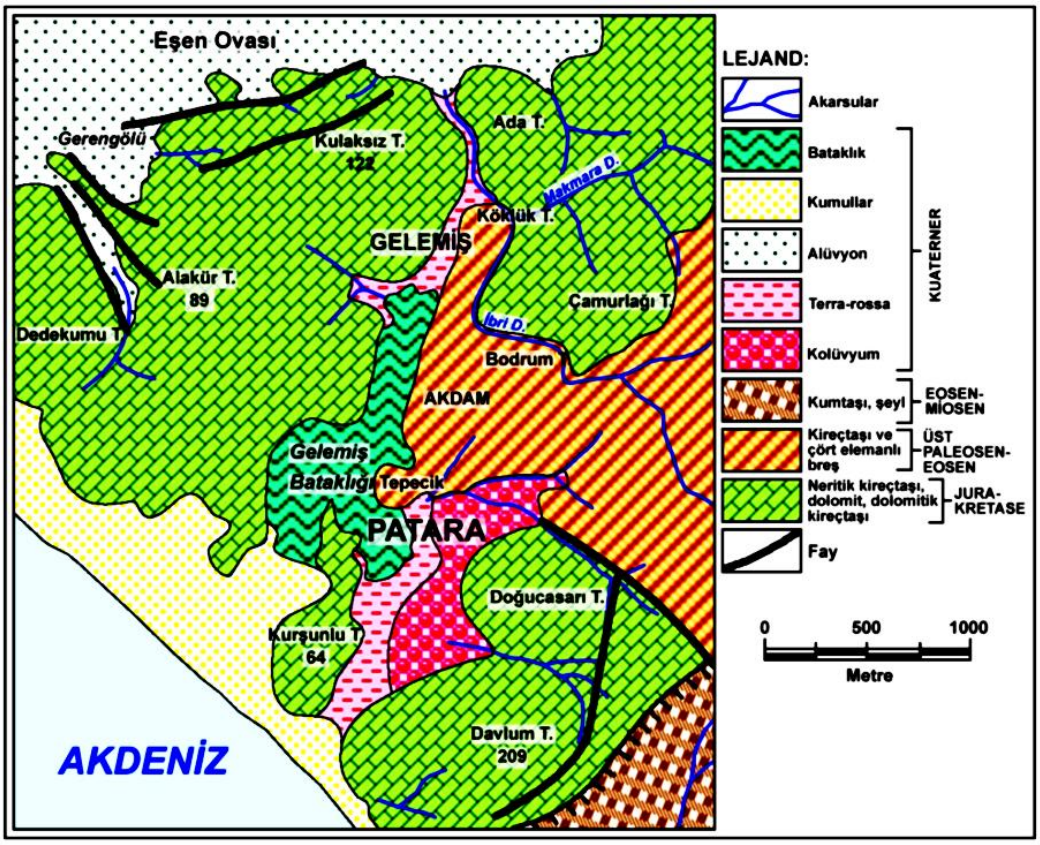
Eşen grabenini çevreleyen kütleler çeşitli yaş ve litolojideki kayaçlardan oluşmaktadır. Bölgede Mesozoik, Tersier ve Kuvaterner'e ait formasyonlar bulunmaktadır. Bölgenin kuzeyinde genellikle karbonatlı kayaçlardan oluşan kütleler yer alırken Fethiye ve Kemer arasında ise ofiyolitler bulunmakta ve karbonatlı kayaçlar, ofiyolit masif üzerine yerleşim göstermektedir (Colin, 1962; Öner, 1997).



Şekil 4.1. Eşen ovası ve Patara'nın lokasyon haritası (Öner, 1993).

Eşen havzası, Likya naplarının üzerinde Geç Miosen-Geç Pliosen zaman aralığında normal faylarla gelişen karasal graben havzasıdır (Alçiçek vd., 2006; Alçiçek, 2007). Dört evreden oluşan bu gelişimde ilk olarak; Geç Miosen'de sınırını doğuda Saklıkent, batıda Kabaağaç faylarını oluşturan graben havzası oluşmuş, alüvyon ve akarsu tortulları ile dolmuştur. İkinci evrede, alüvyal ve akarsu tortulları, havza tabanına çökmeye devam etmiş ve en sık rastlanan ince taneli gölsel ortam tortulları birikmiştir. Üçüncü evrede, Erken Pliosen döneminde havza içindeki sığ-gölsel tortullar yerini yukarı doğru, monoton ardalanan açık-gölsel tortullara bırakmıştır. Pliosen döneminin sonunda, ince taneli gölsel tortullar üzerine yer yer 35 m kalınlığa erişen Gilbert-tipi delta tortulları ilerlemiştir. Delta çökelleri flüviyal üst takımlarla sonlanmakta ve bu düzey Eşen Neojen havza istifinin en üst katmanını meydana getirmektedir. Tüm bu istiflerin üzeri, açılı uyumsuzluk ile çok kaba kırıntılı malzemelerden oluşan, Kuaterner alüvyon yelpazesi birimleri yerleşmiştir. Son evrede; tektonizma yeniden etkinleşerek havza parçalanır. En üstte yer alan delta istifi üzerine açılı uyumsuzlukla gelen kaba taneli alüvyon yelpazesi tortulları bunun işareti olarak kabul edilir. Eşen vadisinin yer

aldığı bölgede, Pliosen dönemimin sonu ya da Pleistosen döneminin başlarında meydana gelen yükselmeler ile büyük faylar oluşmuştur. Vadinin tamamında bulunan farklı seviyeli akarsu taraçalarının varlığı Kuaterner'de meydana gelen alçalmanın, kuzeyde Ören fayı ve güneyde Kınık fayı ile bağlantılı olmasının ve günümüzde de devam eden tektonik hareketlerin sonucudur (Colin, 1962; Öner ve Akbulut, 2015).



Şekil 4.2. Patara ve çevresinin jeoloji haritası (Öner ve Akbulut, 2015).

Patara'yı çevreleyen kütleler; Jura-Kretase yaşlı kireçtaşları, Üst Paleosen-Eosen yaşlı kireçtaşı ve breşler ile Eosen-Miosen yaşlı kumtaşı ve şeyllerden meydana gelmektedir (Şekil4.2). Bölgenin Taban yapısı ise Terra-rossa karakterli kırmızı killerden oluşmaktadır. Bu killer karbonatlı kayaçların erimeleri sonucunda meydana gelmiştir (Öner ve Akbulut, 2015).

4.2. Jeofizik Araştırma

4.2.1. Jeofizik Araştırma Alanı ve Çalışma Profilleri

Jeofizik incelemelerin yapıldığı alanlar Doğucasarı tepesinin kent merkezine bakan batı eteklerindeki terasların bir bölümünü kapsamaktadır. Bu alanların özellikle Hellenistik ve Roma Dönemlerinde konut alanı olarak kullanıldığı bilinmektedir (Işık, 2011). Bu alanda bulunabilecek yeraltındaki muhtemel yapı kalıntılarının tahribatsız jeofizik araştırma ile yüzeyden görüntülenmesi amaçlanmaktadır. Patara kent yerleşimi üzerinde çalışma alanının yeri Şekil 4.3'te verilmektedir.

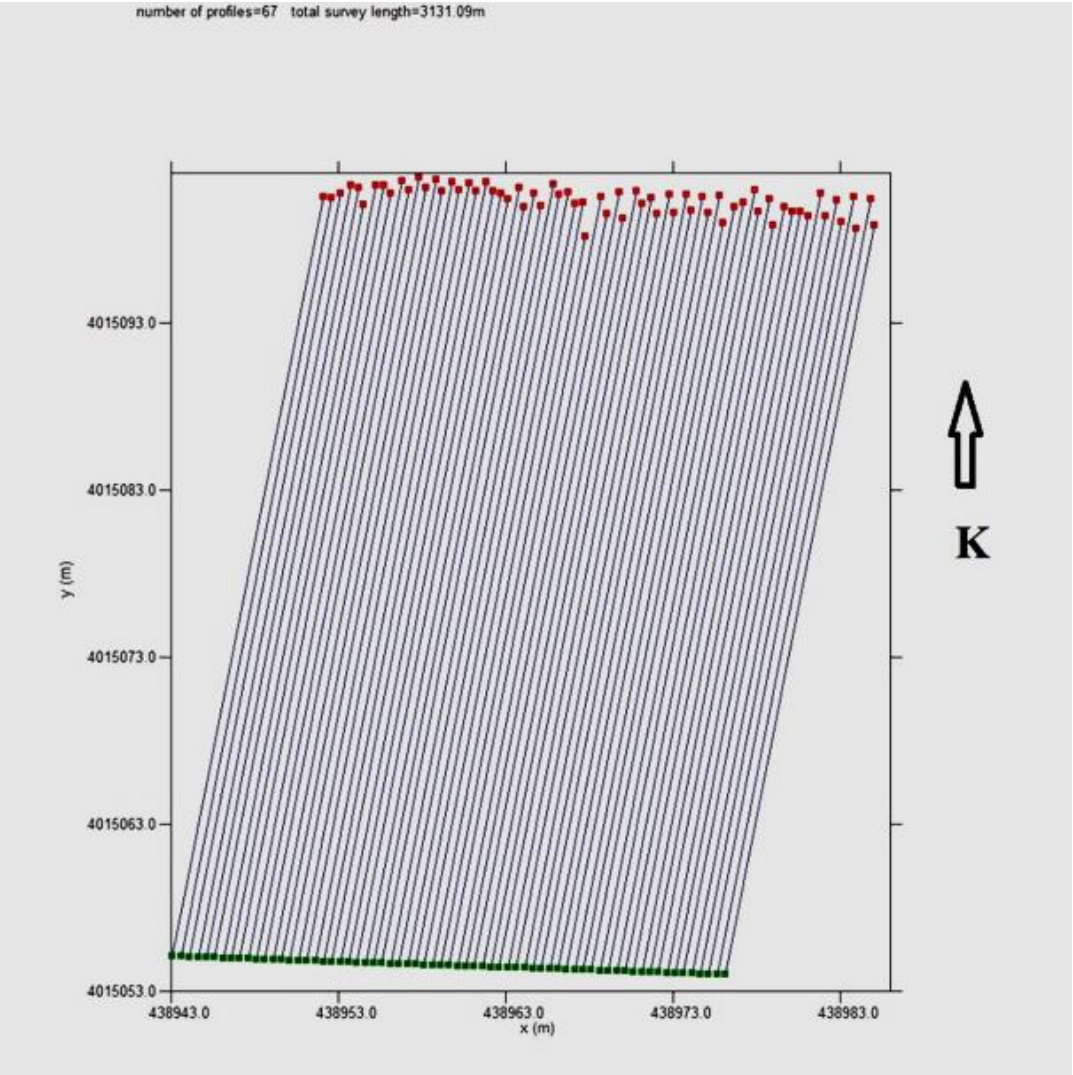
Patara antik kentindeki jeofizik araştırmalar ERT ve GPR ile yürütülmüştür. Turuncu renk ile çevrelenmiş alanın tümünde (kırmızı çevreli alan da dahil olmak üzere) GPR ölçümleri yapılmıştır. Ancak görece daha uzun sürede ve daha fazla işçilik gereksinimi ile yürütülebilen ERT ölçümleri kırmızı ile çevrili alanda ve yalnızca GPR kesitlerinde belirti görülen bölgede gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.3. Çalışma alanının hava fotoğrafı ve araştırma yapılan alanın arazi üzerinde görünüşü.

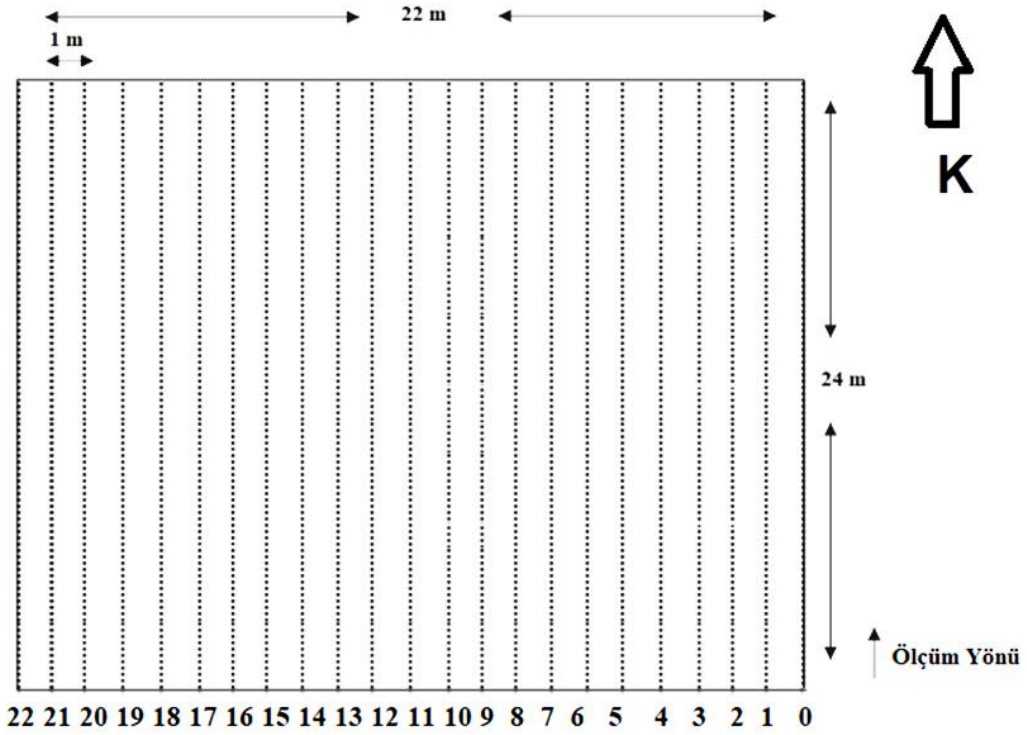
GPR çalışmasında birbirine paralel profiller boyunca yapılan ölçümlerde; profiller arası mesafe 0,5 metre ve iz aralığı 5 santimetre olacak şekilde gerçekleştirilmiştir.

(Şekil 4.4) Belirlenen alanda GPR verileri göz önüne alınarak ERT ölçüm profillerinin yerleri ve aralıkları ile ilgili kararlar verilmiştir.



Şekil 4.4. Çalışma alanında GPR profillerinin alan görünümü.

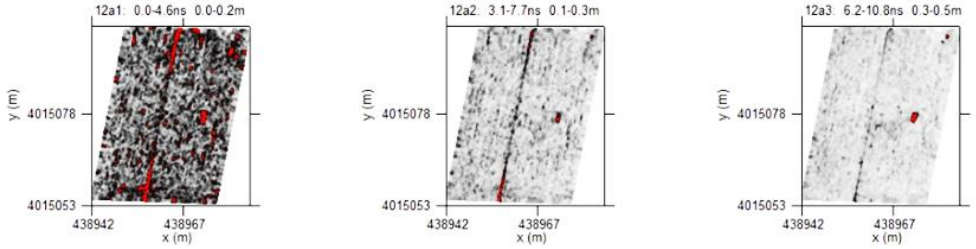
ERT yönteminde elektrot dizilimi olarak Wenner-Schlumberger ve Dipol-Dipol elektrot dizilimleri ayrı ayrı denenmiştir. Wenner-Schlumberger elektrot diziliminin daha net belirtiler ortaya koyması nedeniyle bu dizilim tercih edilmiştir. Patara Kazı Başkanı Prof. Dr. Havva Işık'tan alınan Roma villarına dair bilgiler dikkate alınmış ve yer altındaki sığ derinlikli yapı kalıntılarının görüntülenmesi amacıyla elektrotlar arası ve profiller arası mesafe 1 metre olacak şekilde seçilmiş ve uygulanmıştır (Şekil 4.5).



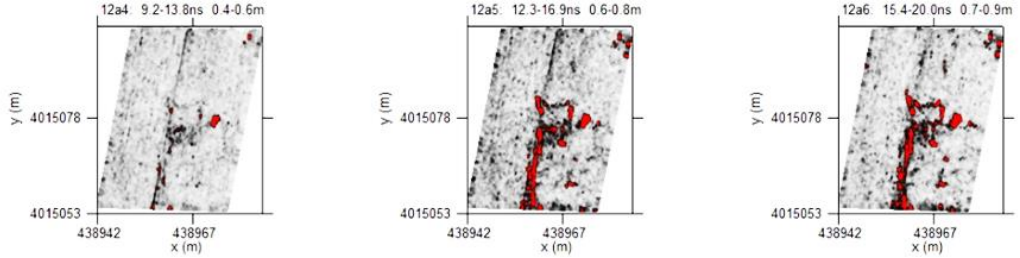
Şekil 4.5. Çalışma alanında ERT profillerinin alan görünümü.

4.2.2. GPR Çalışması

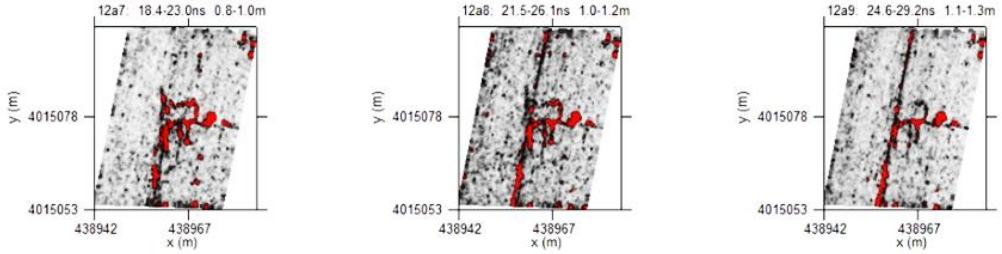
Arazi çalışmaları sırasında paralel profiller boyunca toplanan GPR verileri Reflex2D programı kullanılmış ve 2B ters çözüm tekniği ile değerlendirilerek daha sonra GPR-SLICE programı ile 3B hale getirilip yoruma destek sağlanmıştır. Alet etkisinden kaynaklanan ve çok düşük frekansları bastırmak için dewow filtre kullanılmıştır. Head dalga olarak adlandırılan dalgayı kaldırmak için 6 ns'ye statik düzeltme yapılmıştır. Genlik kazancı uygulanmıştır. Kullanılan aletin merkezi frekansı 500 MHz olduğundan dolayı 250-750 MHz arası bandpass filtre uygulanmıştır. Tekrarlı gürültüleri kaldırmak için background removal filtre uygulanmıştır. Ayrıca büyük genlikli olayları daha baskın hale getirmek için hilbert dönüşümü uygulanmıştır.GPR sonuçları yüzeyden başlayarak 24 farklı derinlik kesiti oluşturularak şekil 4.6, 4.7, 4.8, 4.9, 4.10, 4.11, 4.12, 4.13'teki gibi sunulmaktadır (Kaya, Balkaya & Akca, 2018).



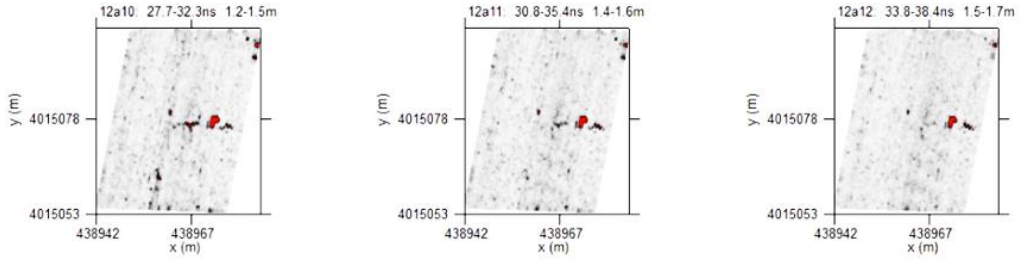
Şekil 4.6. (0-0.2), (0.1-0.3) ve (0.3-0.5 m) derinlik değerleri için GPR sonuçları (Kaya vd., 2018).



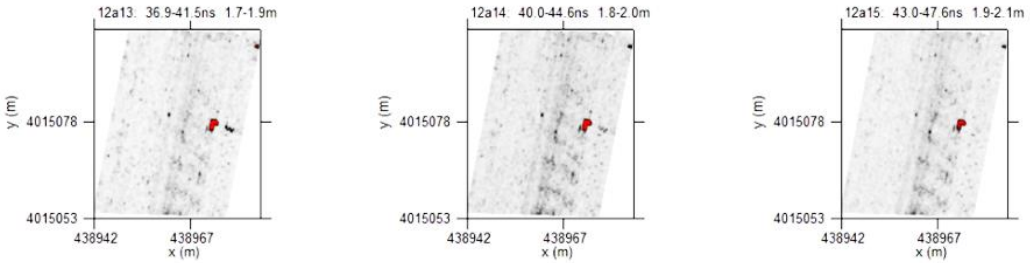
Şekil 4.7. (0.4-0.6), (0.6-0.8) ve (0.7-0.9) m derinlik değerleri için GPR sonuçları (Kaya vd., 2018).



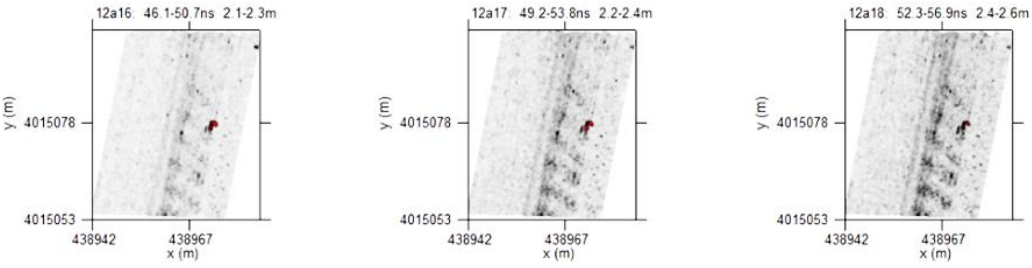
Şekil 4.8. (0.8-1.0), (1.0-1.2) ve (1.1-1.3) m derinlik değerleri için GPR sonuçları (Kaya vd., 2018).



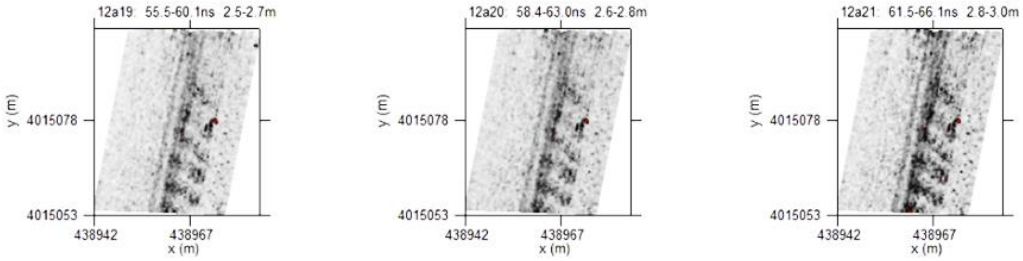
Şekil 4.9. (1.2-1.5), (1.4-1.6) ve (1.5-1.7) m derinlik değerleri için GPR sonuçları (Kaya vd., 2018).



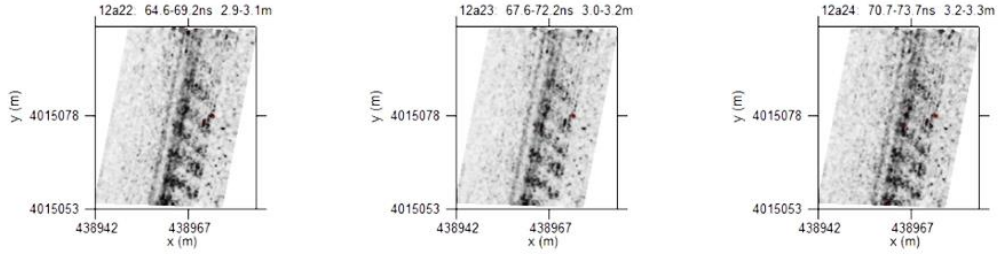
Şekil 4.10. (1.7-1.9), (1.8-2) ve (1.9-2.1) m derinlik değerleri için GPR sonuçları (Kaya vd., 2018).



Şekil 4.11. (2.1-1.9), (2-2.4) ve (2.4-2.6) m derinlik değerleri için GPR sonuçları (Kaya vd., 2018).



Şekil4.12. (2.5-2.7), (2.6-2.8) ve (2.8-3.0) m derinlik değerleri için GPR sonuçları (Kaya vd,, 2018).



Şekil 4.13. (2.9-3.1), (3.0-3.2) ve (3.2-3.3) m derinlik değerleri için GPR sonuçları (Kaya vd., 2018).

Kaya vd. (2018)' den alınan GPR sonuçları, çalışma alanına ait hava fotoğrafı (Şekil 4.14) ile çakıştırılmıştır (Şekil 4.15). Çakıştırma işlemi; GPR sonuçlarını kullanarak, çalışma alanındaki olası yapı kalıntılarını kazmadan ve delmeden ortaya koymaktadır.



Şekil 4.14. Çalışma alanının hava fotoğrafı.



Şekil 4.15. GPR görüntülerinin hava fotoğraflarına çakıştırılması işlemi (0.6m derinlik seviyesi için).

4.2.3. ERT Çalışması

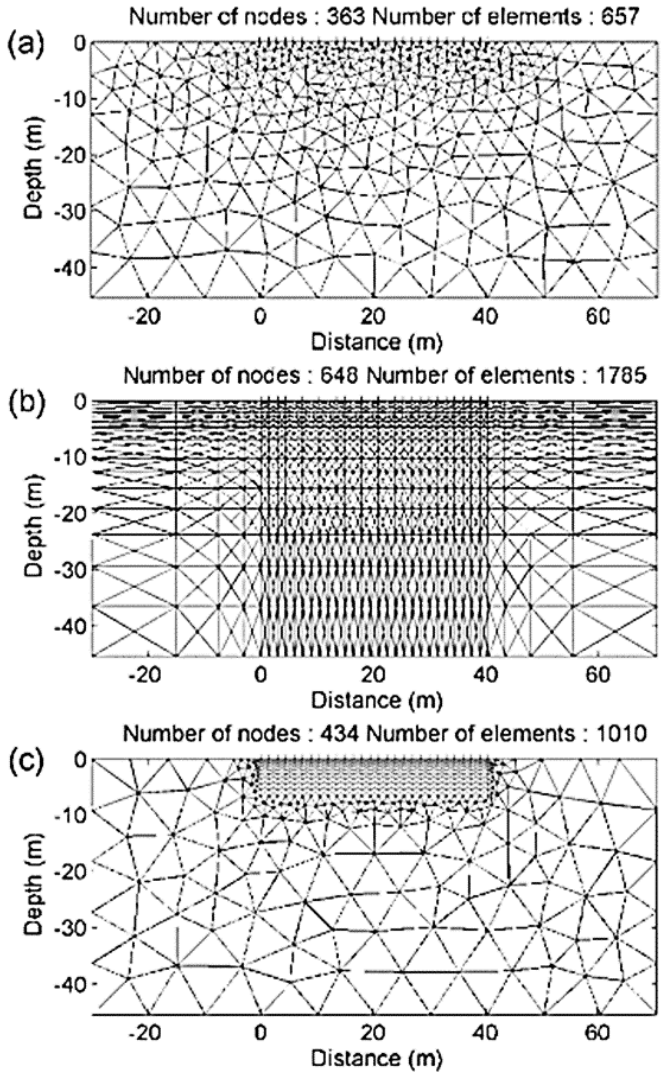
Paralel profiller üzerinde toplanan doğru akım özdirenç verileri, öncelikle günümüzde mühendislik ve arkeojeofizik uygulamalarda geleneksel hale gelen 2B ters çözüm tekniği ile değerlendirilerek ve daha sonra da 3B hale getirilip yoruma destek sağlanmıştır.

Bu amaçla, Akca (2014) tarafından geliştirilen, MATLAB tabanlı bir açık kaynaklı kod olan ve düzgünlük-kısıtlı doğrusallaştırılmış en-küçük kareler yöntemini (smoothness-constrained least squares method) temel alan ERTInv2D yazılımı kullanılmıştır. ERTInv2D yazılımı temel prensib, modelleme ve kullanılan algoritmalar bakımından ELRİS2D yazılımıyla benzer olması nedeni ile programın çalışma felsefesi hakkındaki bilgiler Akca (2015)'ten aktarılmaktadır. Yazılımın, parametre düzeltme vektörü (correction vector) MATLAB yerleşik fonksiyonu "mldivide" ile doğrusal denklem sistemlerinin çözümü için kullanılmaktadır. Ters çözüm işlemini stabilize etmek (/dengelemek) ve yapısal bilgileri yerelektrik modellerden hesaplamak amacıyla düzgünlük operatörü (smoothing operator) tekniği ve beş noktadan (five-points) oluşan bir Laplacian operatörü, sadeleştirmek amacıyla ERTInv2D'deki düzgünlük kısıtlaması (smoothness constrained) olarak kullanılmaktadır (Akca, 2015). Ters çözüm işlemlerinde model ağı elemanları kullanılarak oluşturulan yeraltı modelinin duyarlılığı artırılmaya; belirti veren yapıların sınırları daha iyi ortaya konulmaya çalışılmaktadır. Model ağı hücreleri (cell) olarak üçgen (Şekil 4.16a) ve dörtgen (Şekil 4.16b) elemanlar kullanılmaktadır. Sonlu elemanlar model ağları genellikle düzgün bir örgü (grid) oluşturan dörtgen elemanların köşegenlerinden ikiye ya da dörde bölünmesi veya daha fazla esneklik sağlayan üçgen elemanlar ile oluşturulmaktadır.

Model ağının dikdörtgen bloklardan oluşması ve bir esnekliğinin söz konusu olmaması, bu ağ ile temsil edilebilecek modelleri geometrik olarak sınırlamaktadır. Yapı sınırları, tasarlanan model ağı hücrelerinin sınırları ile örtüşmek zorunda olduğundan, gömülü cisim ve yapılar gerçekte olduklarından daha küçük-daha büyük; daha sığ ya da daha derinde görülebilmektedir. Model ağının esnek üçgen bloklardan oluşması düğüm noktası sayısının azaltılmasını ve modelin duyarlılığının artırılmasını sağladığı gibi (Akca vd., 2010) örneğin, üçgenlerin dizilişinin biraz düzensiz olması nedeniyle ters çözüm işleminde çiçek veya yıldız şeklindeki cisimlerin görünmesine

neden olmaktadır. Bu durum, özdirenç verilerinin yorumlanmasında zorluklara yol açmaktadır (Akca, 2015).

Sabit konumlu dörtgen veya üçgen elemanlardan oluşan model ağlarının modeli temsil etmede zayıf yönlerinin bulunması nedeni ile yapısal olmayan ağ tasarımı jeofizik modelleme ve ters çözümde kullanılmaya başlanmıştır (Akca vd., 2010).



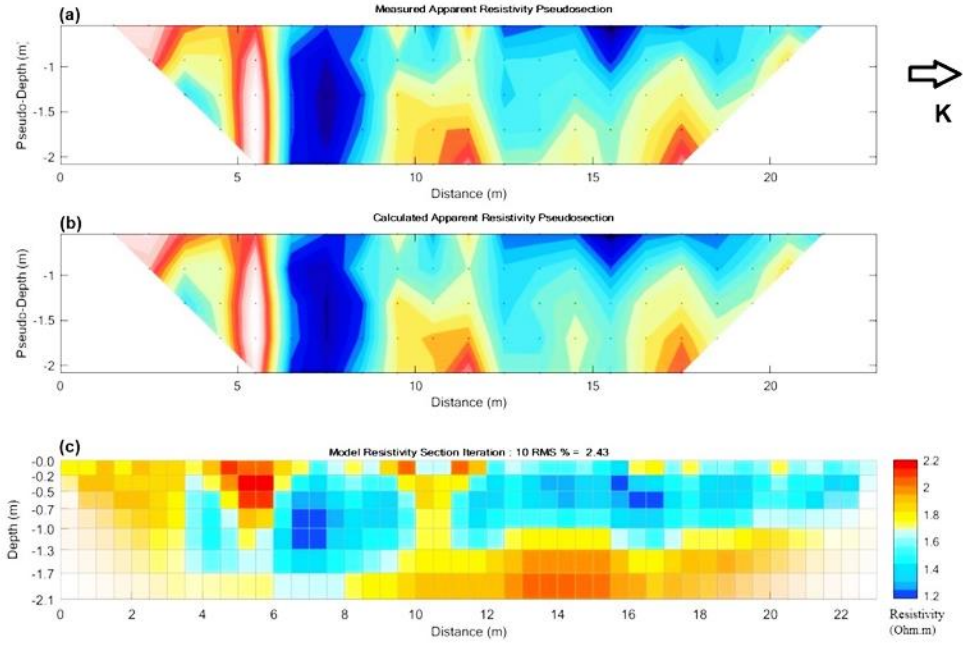
Şekil 4.16. a) Yapısal olmayan ağ, b) yapısal ağ ve c) hibrit sonlu model ağları (Akca, 2015).

ERTInv2D yazılımında, her iki model ağı türünün de avantajlarından yararlanabilmek için yapısal olmayan ağ tasarımı modelleme ve ters çözümde kullanılmıştır. Model ağı iki alt alana ayrılmaktadır. Birinci etki alanı düzenli olarak sıralanmış dikdörtgenleri üçgen elemanlara bölerek ve her bir dikdörtgen hücre, bir model parametresi olarak ele almaktadır. Ağın geri kalan kısmı, sonlu elemanlar algoritmasının sayısal uygulaması için gereklidir ve boyutu ağın dış sınırlarına doğru genişleyen üçgen elemanları kullanmaktadır (Şekil 4.16c). Model ağın yapılandırılmamış kısmı Shewchuk (1997) tarafından geliştirilen bir program tarafından üretilir.

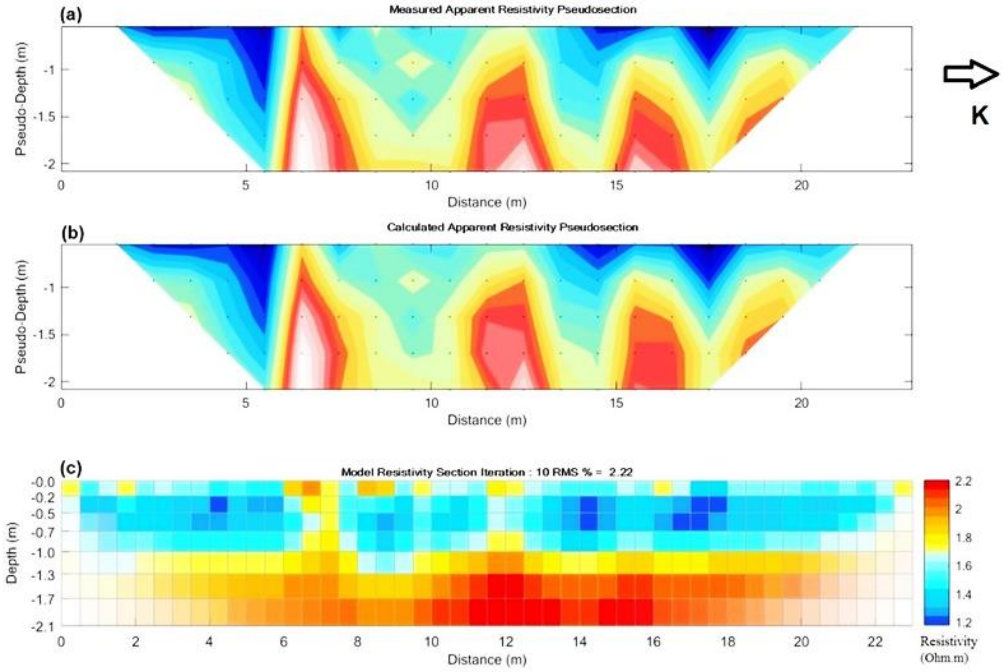
2B ters çözüm tekniği ile değerlendirilen veri kümeleri bir MATLAB kodu ile birleştirilerek tek bir veri dosyası haline getirilmiştir. Söz konusu MATLAB kodu sıralı numaralandırılmış dosyalar kullanıldığını varsayılarak çalışmaktadır. Elde edilen yeni veri dosyası açık kaynak kodlu Paraview adlı veri ve sonuçların görselleştirilmesini sağlayan bilgisayar programı ile 3B hale dönüştürülerek görselleştirilmiştir.

Her bir profildeki veri sayısının oldukça fazla olması ve verilerin gürültü içeriğinin az olması gibi nedenlerden dolayı oldukça başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Yazılım birkaç yinelemeden (iterations) (maksimum iterasyon sayısı 10'dur.) sonra ölçülen ve kuramsal veriler arasında yeterli uyumu sağlayarak durdurulmuştur. Ölçülen veri - kuramsal veri arasındaki uyum RMS (root mean square) parametresi ile denetlenmektedir. Değişik profillerde RMS değerleri 1.4 ile 6.3 arasında değişmektedir. Ölçülen ve hesaplanan veriler arasındaki uyumu göstermek üzere farklı aralıklı profiller seçilerek bunlara ait grafikler hazırlanmış ve şekil 4.17 ve şekil 4.18'de verilmiştir. Şekil 4.17 ve Şekil 4.18'de görüldüğü gibi ölçülen ve hesaplanan veriler arasındaki uyum oldukça iyidir.

Tüm kesitlerde olası arkeolojik yapılara ait olduğu düşünülen izler belirgin şekilde seçilebilmektedir. Bu izler yüzeyin -0.50 m altından başlayarak -2 m seviyesine kadar devam etmektedir. Bunun dışında yine alanının -1.75m'den başlayarak daha derinlere devam eden 2.25 log(ohm.m) özdirençli yapının anakaya olabileceği düşünülmektedir.



Şekil 4.17. (a) Ölçülen veri (6. ERT profili), (b) Hesaplanan (kuramsal) veri (c) 10 Yineleme sonucu bulunan model (RMS = %2.43) (Özdirenç değerleri logaritmiktir).

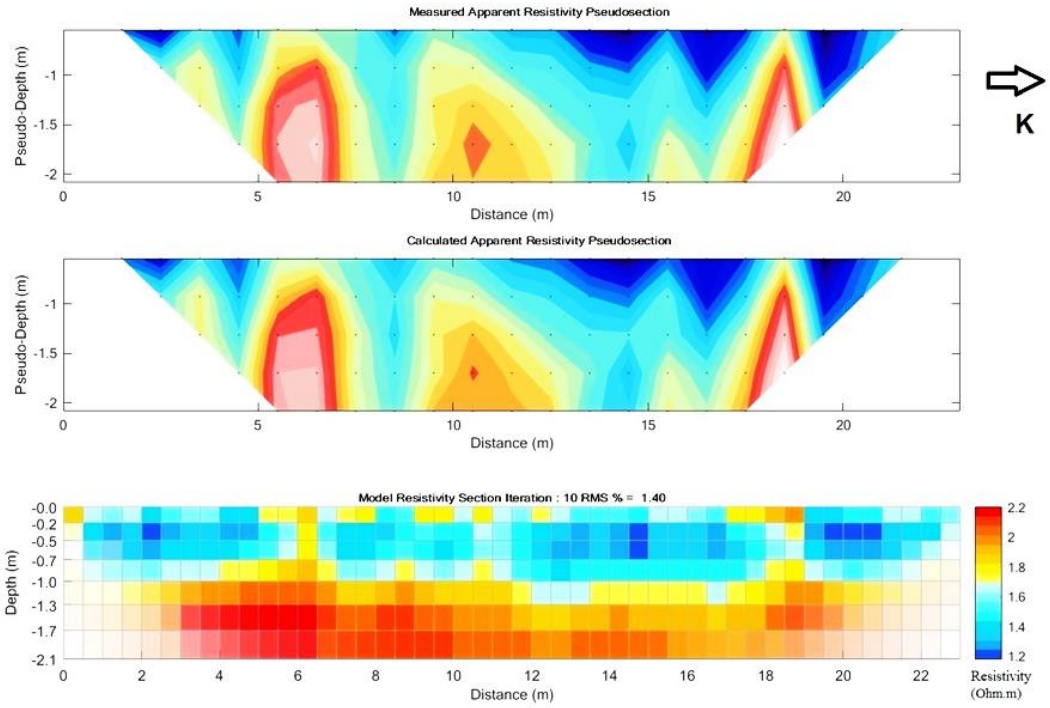


Şekil 4.18. (a) Ölçülen veri (15. ERT profili), (b) Hesaplanan (kuramsal) veri (c) 10 Yineleme sonucu bulunan model (RMS = %2.22) (Özdirenç değerleri logaritmiktir).

4.2.3.1. Profillerin İncelenmesi

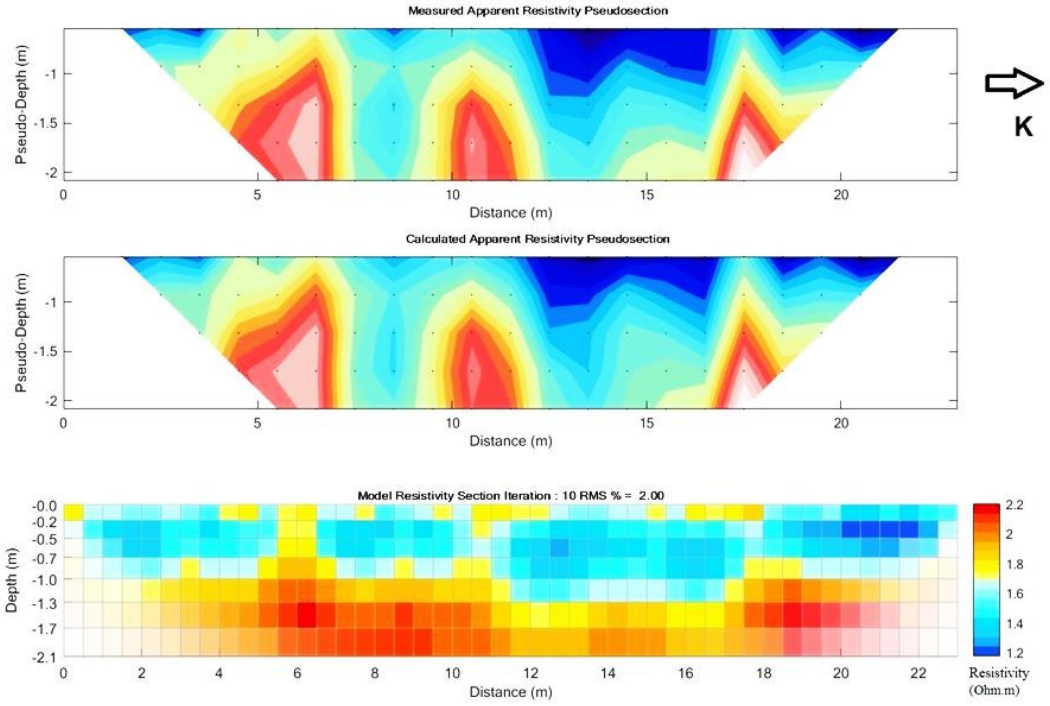
Çalışma alanına ait profillerin ters çözümü sonucunda ortamdaki yapıların özdirencine ve elektrot açılımına bağlı olarak -2 m derinliğe kadar bilgi edinilmiştir. 23 profil boyunca ölçümler yapılmış ve 23 m'ye 24 m'lik bir alan araştırılmıştır. Bu bilgiler ilk olarak izleyen bölümde profil incelemesi olarak sunulmuştur. Karşılaştırmanın kolay olması açısından tüm profiller için renk indeksi aynı alınmıştır. Özdirenç değerleri logaritmiktir. Her bir seviyeye ait derinlik bilgisi ve seviyelerde gözlenen izler şekil açıklamalarında verilmiştir.

Birinci profile ait yeraltı modeli incelendiğinde (Şekil 4.19) en belirgin izi veren yüksek özdirençli yapılar; K-G yönünde 3 ve 7. m'ler arasında -1 ile yaklaşık -2 m derinlikler arasında, 8 ve 10. m'ler arasında -1.30 m derinlikten başlayarak -2 m derinliğe devam eden ve 18 ve 21. m'ler arasında -1 ile -1.7 m derinlikte 2.1-2.2 log(ohm.m) özdirençli olası yapılar gözlemlenmektedir. Yüzeye yakın derinliklerde süreklilik arzeden ve arkeolojik yapı kalıntısını temsil edebilecek sürekli izlere rastlanmamaktadır.



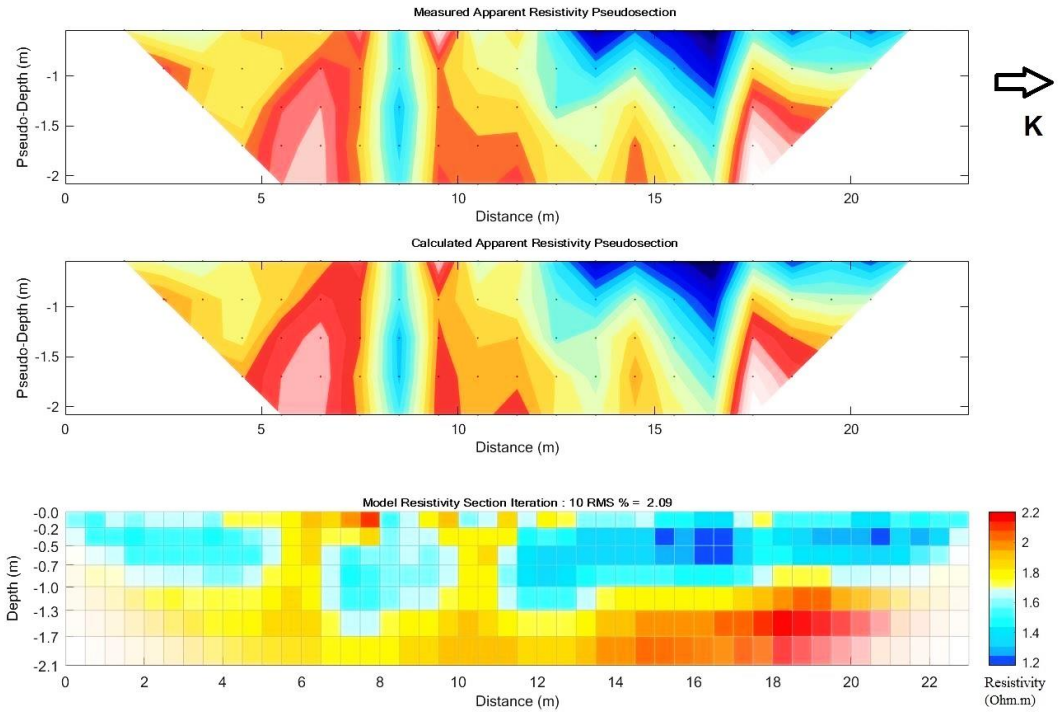
Şekil 4.19. 1. profilin gerçek derinlik kesiti (Özdirenç değerleri logaritmiktir).

İkinci profile ait yeraltı modeli incelendiğinde (Şekil 4.20) en belirgin izi veren yüksek özdirençli yapılar; K-G yönünde 5 ve 11. m'ler arasında-0.7 ile yaklaşık -2 m derinlikler arasında, 17 ve 22. m'ler arasında -1 ve -2 m derinlikte 2.1 log(ohm.m) özdirençli yapının önceki profile benzer biçimde varlığının devam ettiği gözlenmektedir. Yüzeye yakın derinliklerde süreklilik arzeden ve arkeolojik yapı kalıntısını temsil edebilecek izler gözlenmektedir.



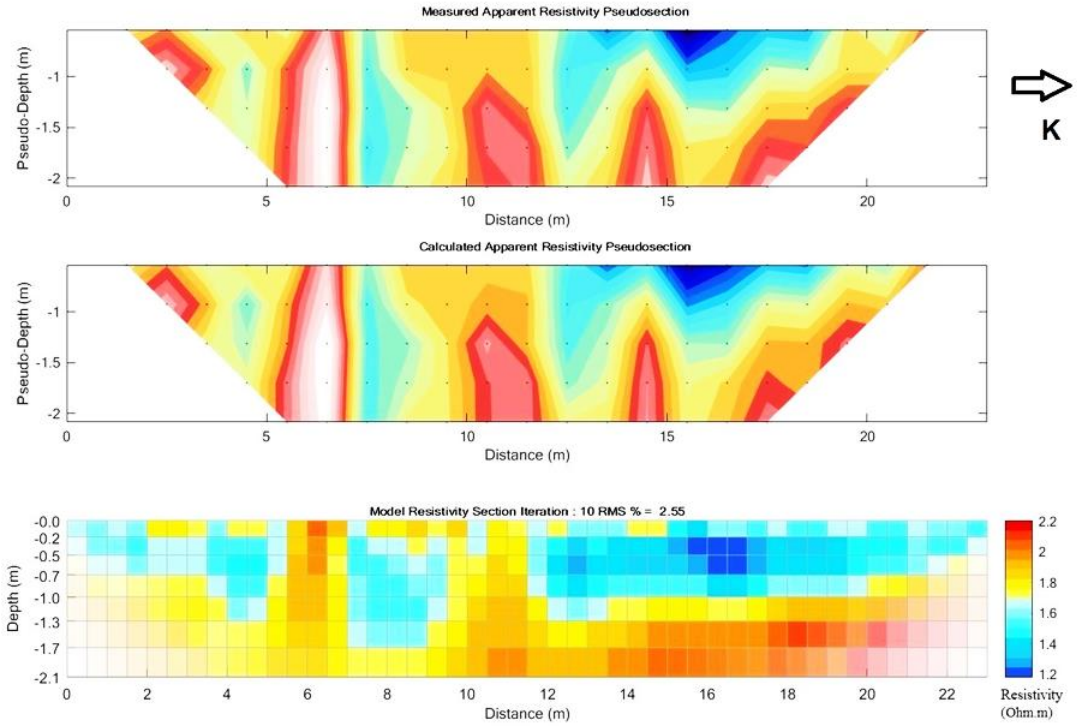
Şekil 4.20. 2. profilin gerçek derinlik kesiti (Özdirenç değerleri logaritmiktir).

Üçüncü profile ait yeraltı modeli incelendiğinde (Şekil 4.21) en belirgin izi veren yüksek özdirençli yapılar; K-G yönünde 17 ile 21. m'ler arasında yüzeyden -1 ve -2 m derinlikte gözlenmektedir. 1. ve 2. Profillerin devamı olabilecek, profilin başlangıcındaki belirtiler burada da gözlenmekte fakat daha düşük özdirenç değerleriyle temsil edilmekltedir. Yüzeye yakın sığ derinlikteki belirtiler dağınıktır.



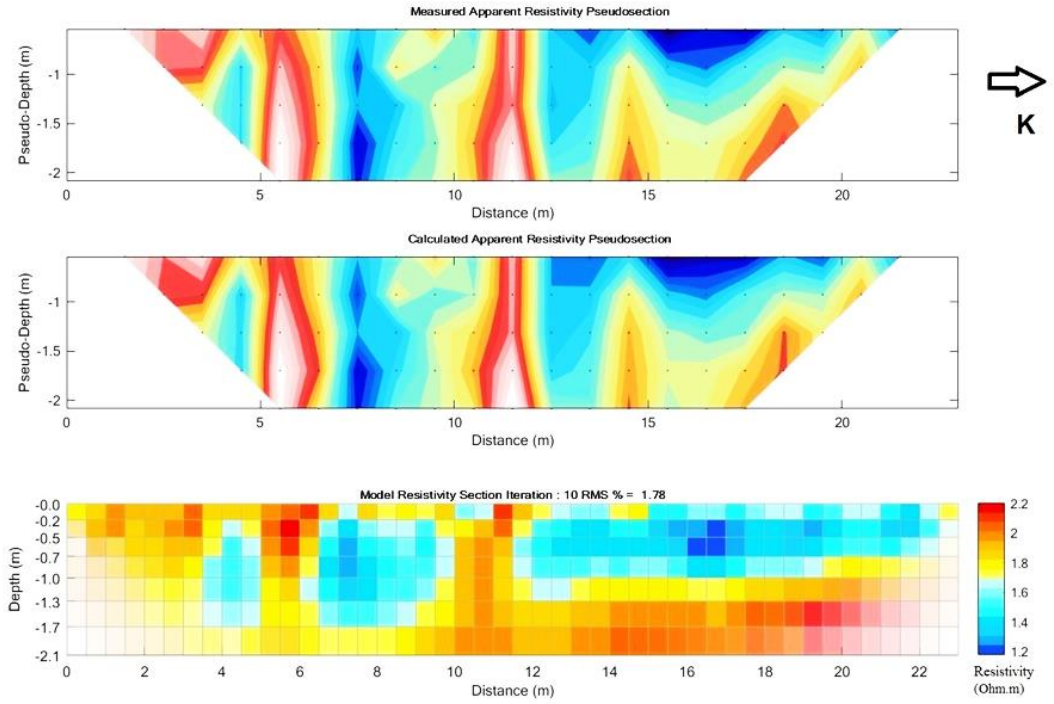
Şekil 4.21. 3. profilin gerçek derinlik kesiti (Özdirenç değerleri logaritmiktir).

Dördüncü profile ait yeraltı modeli (Şekil 4.22)'de verilmiştir. En belirgin izi veren yüksek özdirençli yapılar; K-G yönünde 14 ve 22. m'ler arasında -1 ve -2 m derinlikte 2 log(ohm.m) özdirençli yapının önceki profile benzer biçimde varlığının devam ettiği gözlenmektedir. İlk 3 profilin başlangıcındaki belirtiler burada da gözlenmekte fakat daha düşük özdirenç değerleriyle temsil edilmekltedir. Yüzeye yakın sığ derinlikteki belirtiler dağınıktır. Çok güçlü olmasa da derinlerden yüzeye kadar devam eden bir belirti 6 m'ler civarında egemendir.



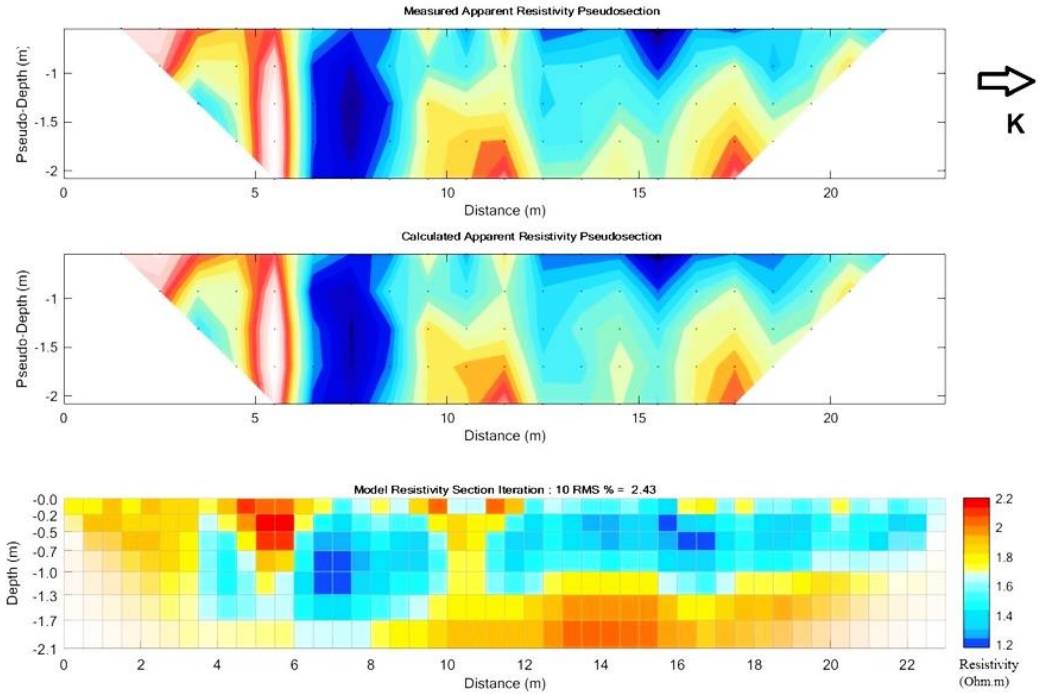
Şekil 4.22. 4. profilin gerçek derinlik kesiti (Özdirenç değerleri logaritmiktir).

Beşinci profile ait yeraltı modeli incelendiğinde (Şekil 4.23) en belirgin izi veren yüksek özdirençli yapılar; 5 ile 6. m'ler de yüzeyden başlayarak -2 m derinliğe devam eden, 10 ile 11. m'ler de yüzeyden başlayarak -2 m derinliğe devam eden ve 13 ile 22. m'ler arasında yüzeyden -1 m derinden başlayarak -2 m derinliğe devam yapının varlığını sürdürdüğü gözlenmektedir. Yüzeye yakın sığ yapılar Profilin başlangıcında sürekli görünse de Profil boyunca rastgele dağılmıştır.



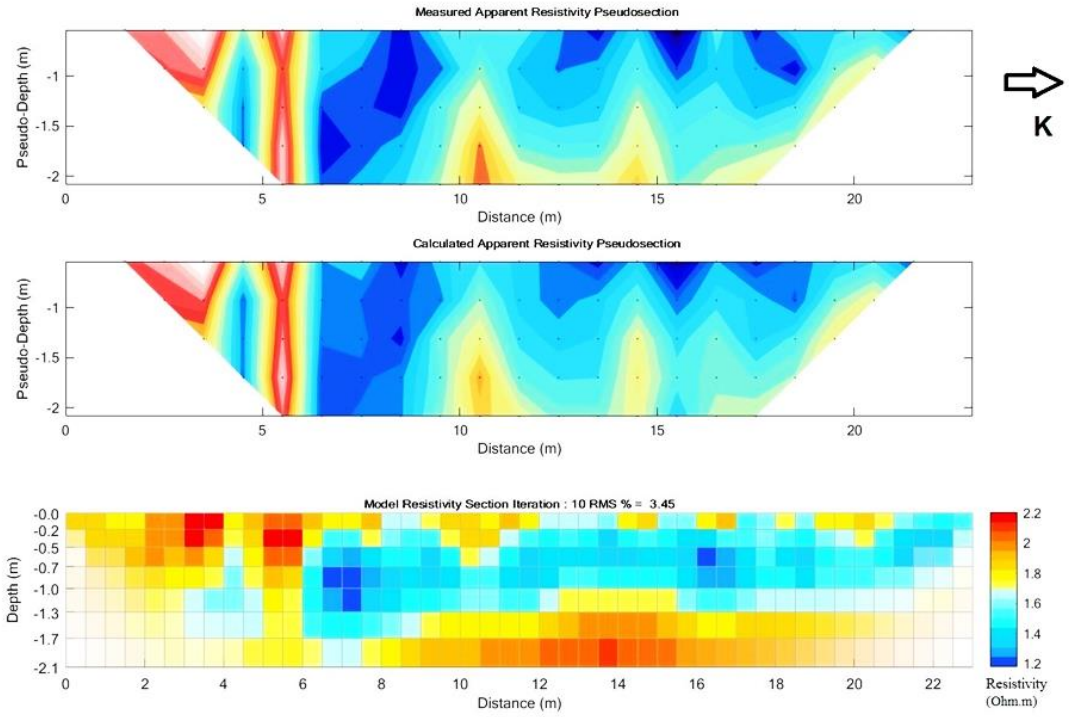
Şekil 4.23. 5. profilin gerçek derinlik kesiti (Özdirenç değerleri logaritmiktir).

Altıncı profile ait yeraltı modeli incelendiğinde (Şekil 4.24) en belirgin izi veren yüksek özdirençli yapılar; 5 ile 6. m'ler de yüzeyden başlayarak -1 m derinliğe devam eden, 10 ile 11. m'ler de yüzeyden başlayarak -2 m derinliğe devam eden yapının özdirenç değerlerinin azalma olduğu ve 13 ile 5. m'ler arasında yüzeyden -1.3 m derinden başlayarak -2 m derinliğe devam yapının varlığını sürdürdüğü ancak özdirenç değerinde azalmanın var olduğu gözlenmektedir.



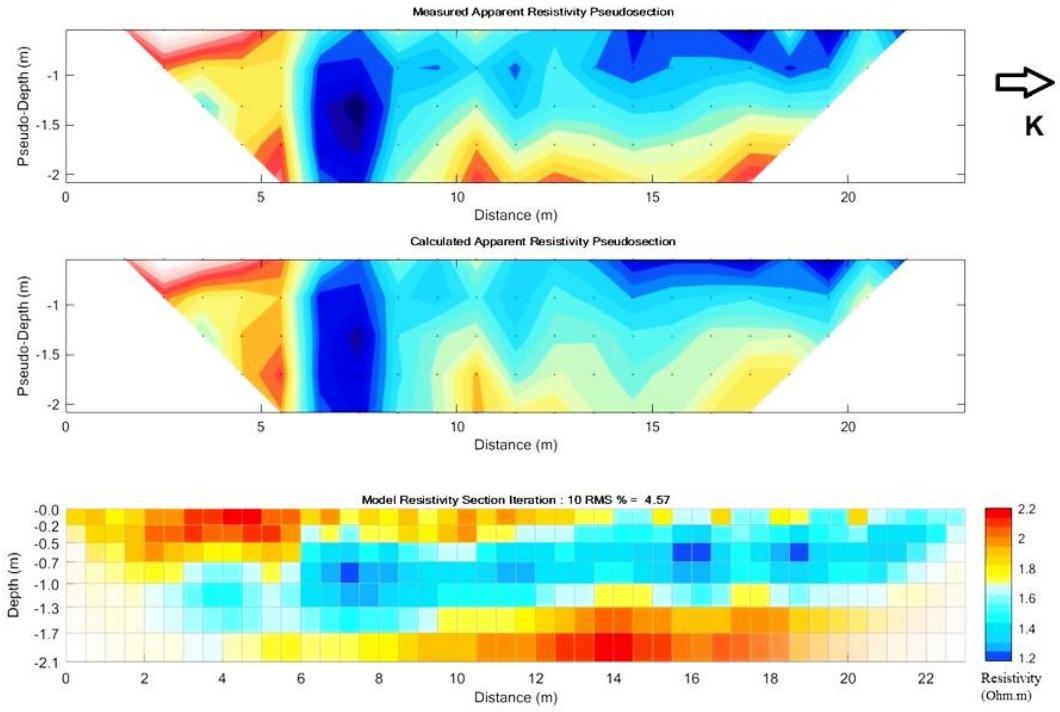
Şekil 4.24. 6. profilin gerçek derinlik kesiti (Özdirenç değerleri logaritmiktir).

Yedinci profile ait yeraltı modeli incelendiğinde (Şekil 4.25) en belirgin izi veren yüksek özdirençli yapılar; 10 ile 16. m'ler de -1.3 m derinlikten -2 m devam eden yapının varlığını sürdürdüğü gözlenmektedir. Yüzeye yakın sığ belirtiler 8 m'ye kadar süreklilik sunarken profilin devamında rastgele dağılımı sürmektedir.

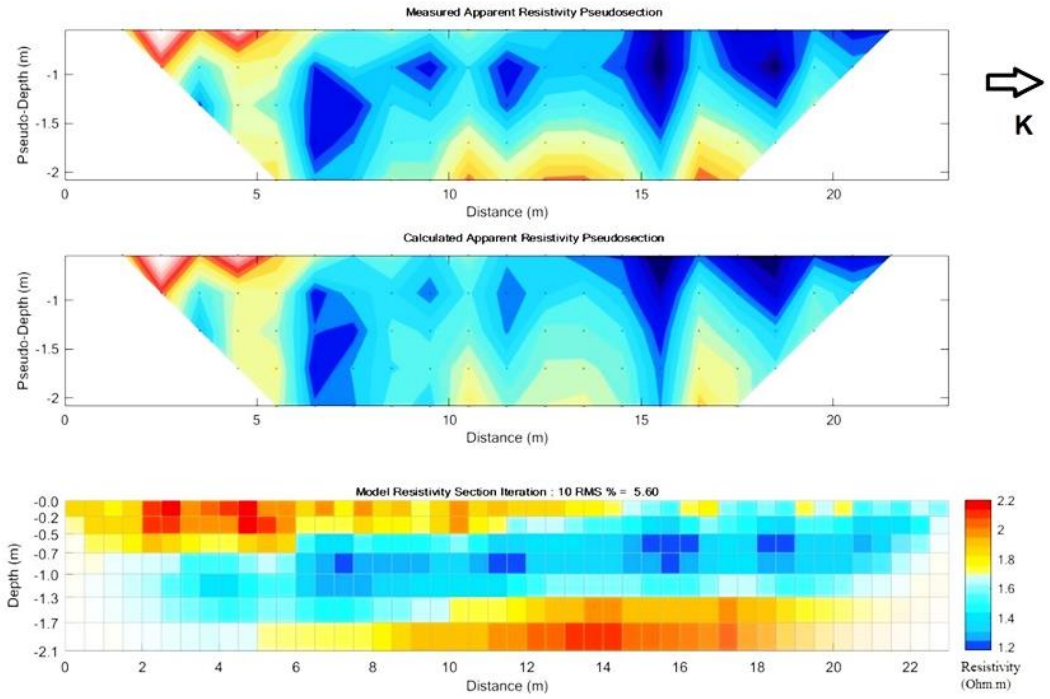


Şekil 4.25. 7. profilin gerçek derinlik kesiti (Özdirenç değerleri logaritmiktir).

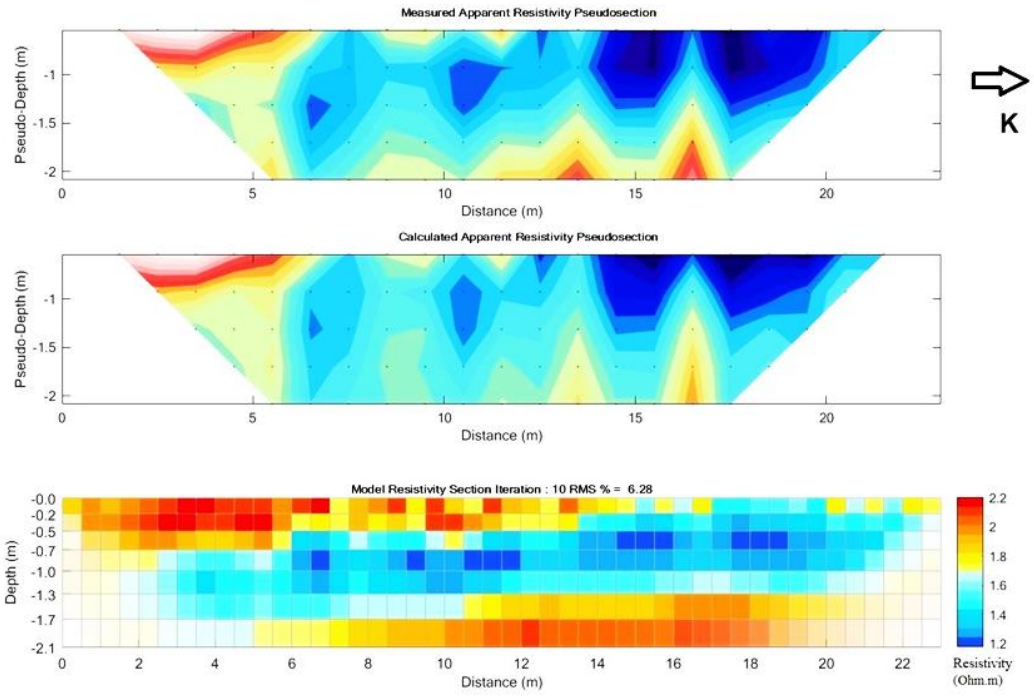
Sekizinci profile ait yeraltı modeli incelendiğinde (Şekil 4.26) en belirgin izi veren yüksek özdirençli yapılar; 10 ile 19. m'ler de -1.3 m derinlikten -2 m devam eden yapının varlığını sürdürdüğü gözlenmektedir. 2 ile 22. m'ler de yüzeyin -1 m altından başlayarak profil doğrultusu boyunca daha sığ derinliğe ulaşan iletken yapıya sahip bölgenin toprak tabakası olabileceği düşünülmektedir. Benzer durum 9-13. profiller için de söylenebilir (Şekil, 4.27, 4.28, 4.29, 4.30, 4.31). 7. Profilin başlangıcında gözlenen dirençli yapının 8. Profilde daha geniş alana yayılıp daha belirgin hale geldiği gözlenmektedir. Söz konusu sığ belirti 9-13. Profillerde de varlığını sürdürmekte daha da önemlisi kalınlığı artarken belirti yeri profillerin orta noktalarına doğru kaymaktadır. Sığ derinliklerde profilin başlangıcında sürekli olan belirti profilin devamında rastgele dağılmaktadır. Profilin başlangıcındaki sığ belirti 9-13. Profillerde daha belirgin ve profillerin ortalarına doğru egemendir.



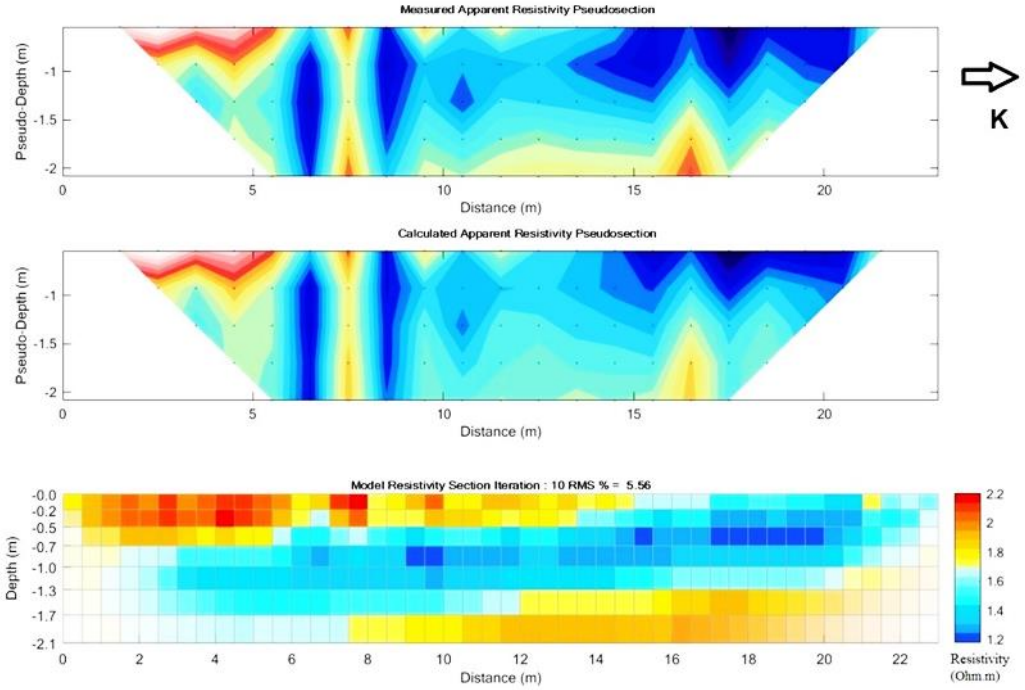
Şekil 4.26. 8. profilin gerçek derinlik kesiti (Özdirenç değerleri logaritmiktir).



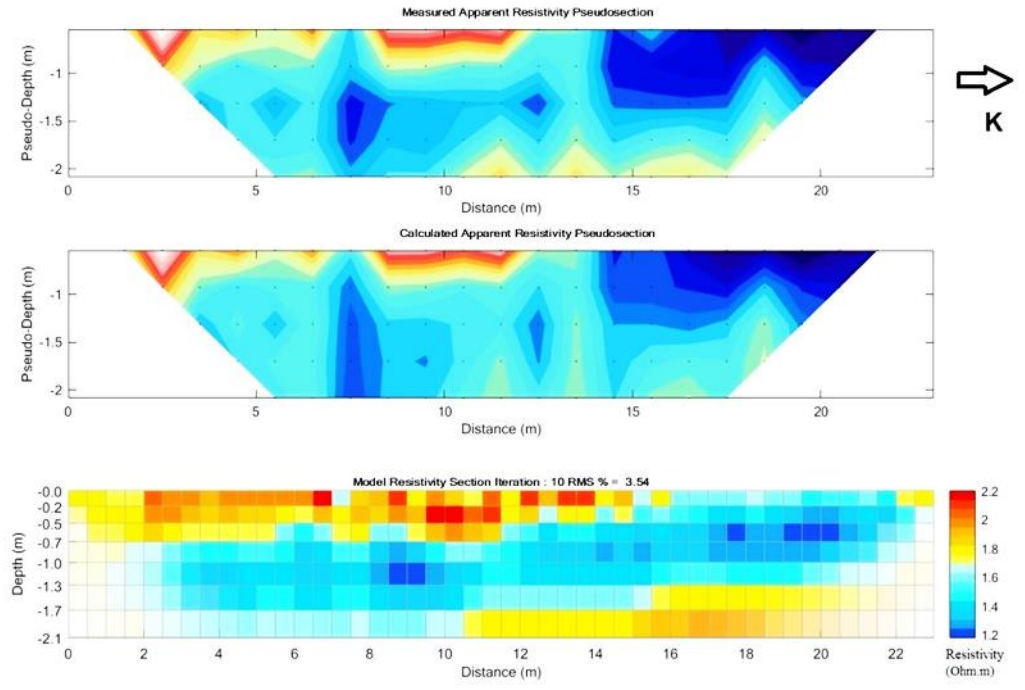
Şekil 4.27. 9. profilin gerçek derinlik kesiti.



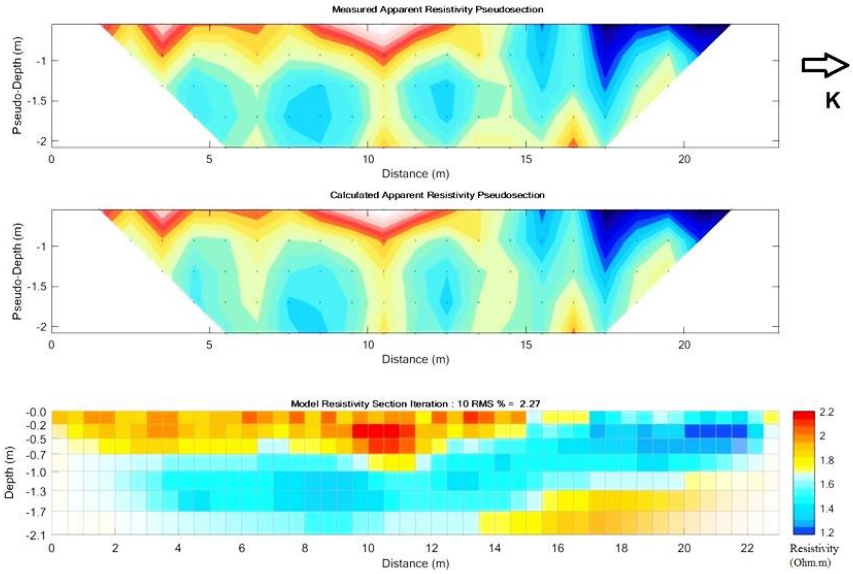
Şekil 4.28. 10. profilin gerçek derinlik kesiti (Özdirenç değerleri logaritmiktir).



Şekil 4.29. 11. profilin gerçek derinlik kesiti (Özdirenç değerleri logaritmiktir).

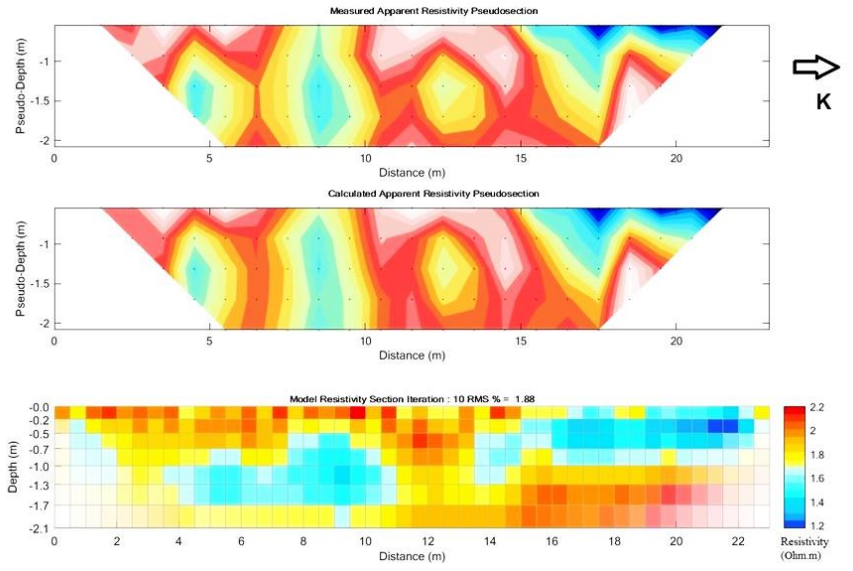


Şekil 4.30. 12. profilin gerçek derinlik kesiti (Özdirenç değerleri logaritmiktir).



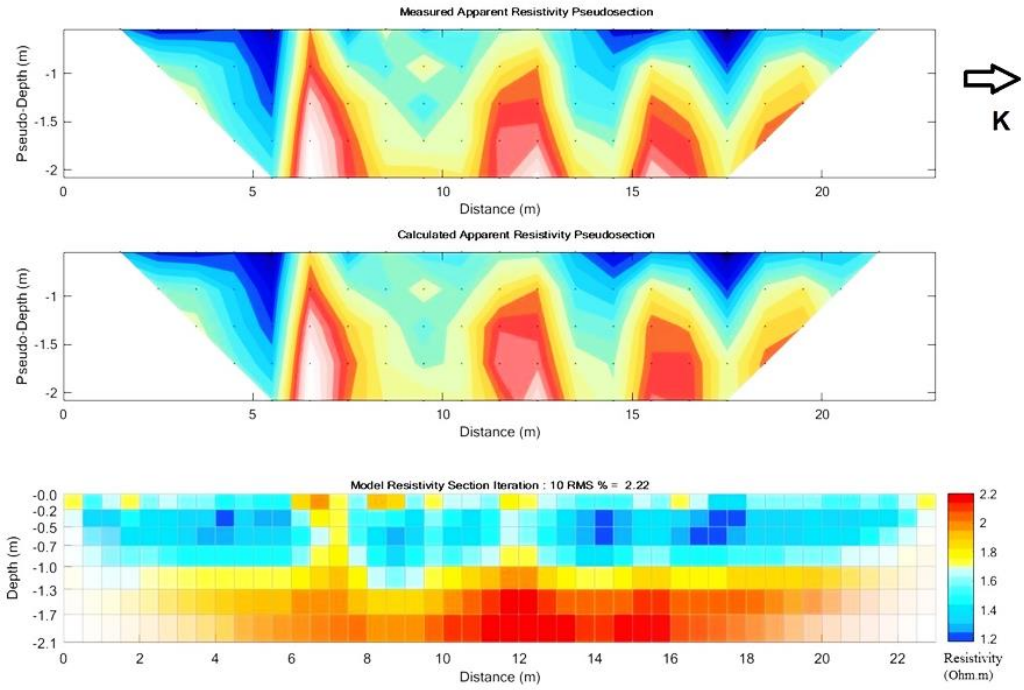
Şekil 4.31. 13. profilin gerçek derinlik kesiti (Özdirenç değerleri logaritmiktir).

14. profile ait yeraltı modeli incelendiğinde (Şekil 4.32) en belirgin izi veren yüksek özdirençli yapıların 12 ile 22. m'ler de -1.3m derinlikten -2 m devam eden yapının varlığını sürdürdüğü ve 2 ile 3. m'lerde ki 2 log(ohm.m) özdirençli yapının ise 3 ile 10. m'ler arasında -0.7 ve -1.7 m derinlikte iletken yapının etrafında kapanım gösterdiği gözlenmektedir.

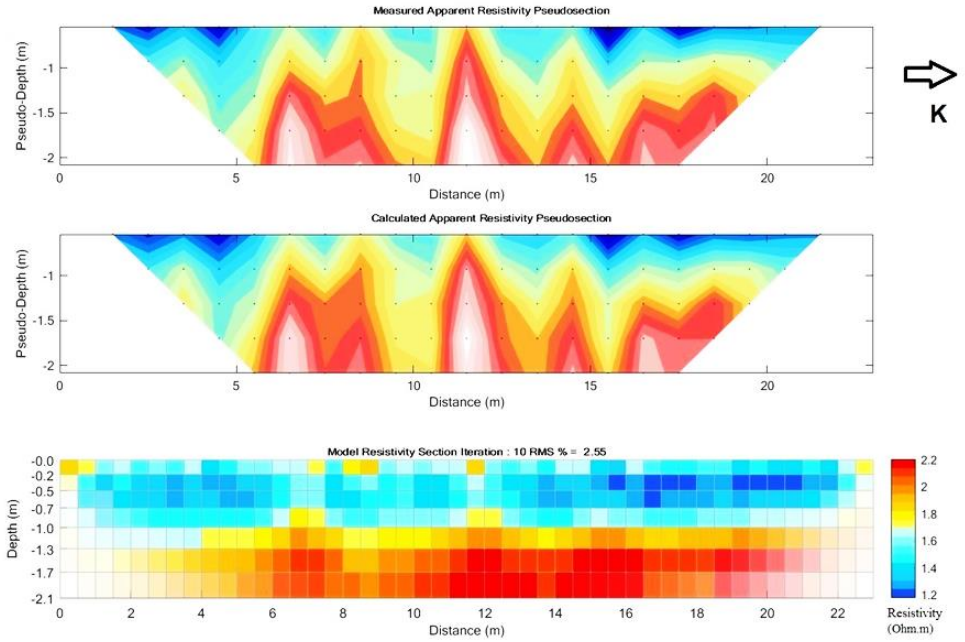


Şekil 4.32. 14. profilin gerçek derinlik kesiti (Özdirenç değerleri logaritmiktir).

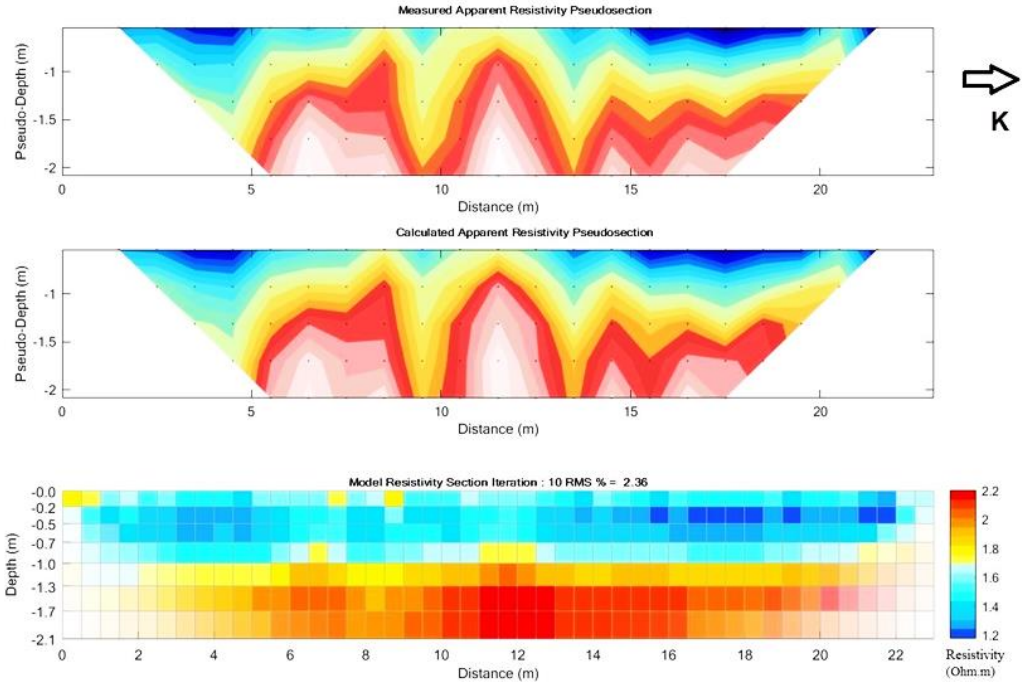
On beşinci profile ait yeraltı modeli incelendiğinde (Şekil 4.33) yüzeye yakın sığ belirtinin kaybolduğu buna karşılık hemen hemen tüm profil boyunca -1 m den başlayıp -2.1 m ye kadar devam eden yüksek belirtili yapının egemen hale geldiği gözlenmektedir. Bu durum 16-22. ve 23. profiller için de geçerli olduğu şekil, 4.34, 4.35, 4.36, 4.37, 4.38, 4.39, 4.40, 4.41'de görülmektedir.



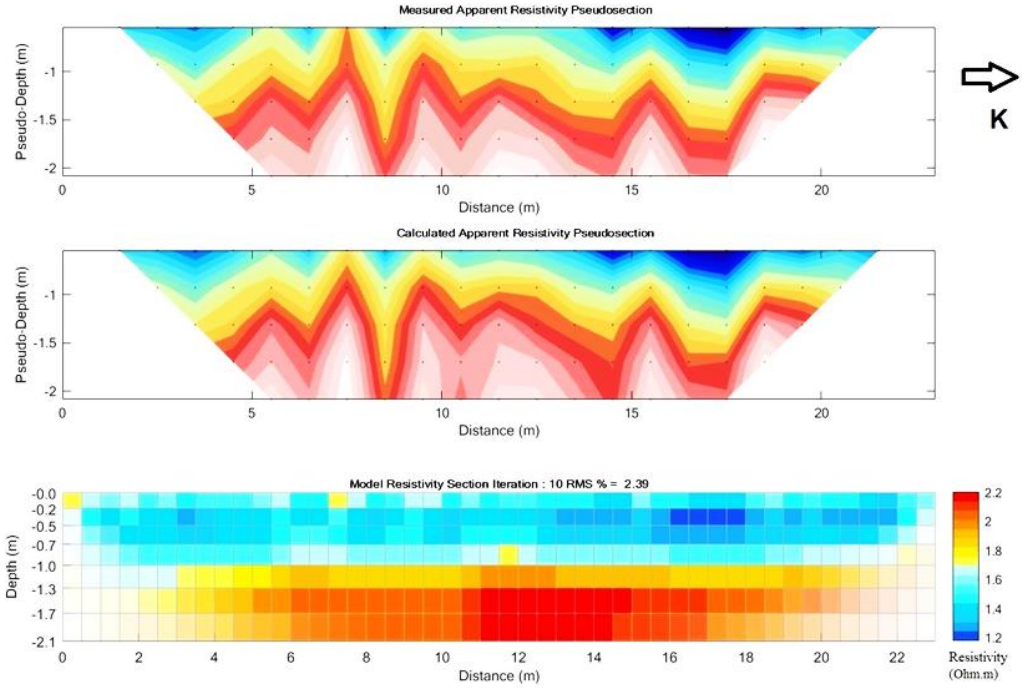
Şekil 4.33. 15. profilin gerçek derinlik kesiti (Özdirenç değerleri logaritmiktir).



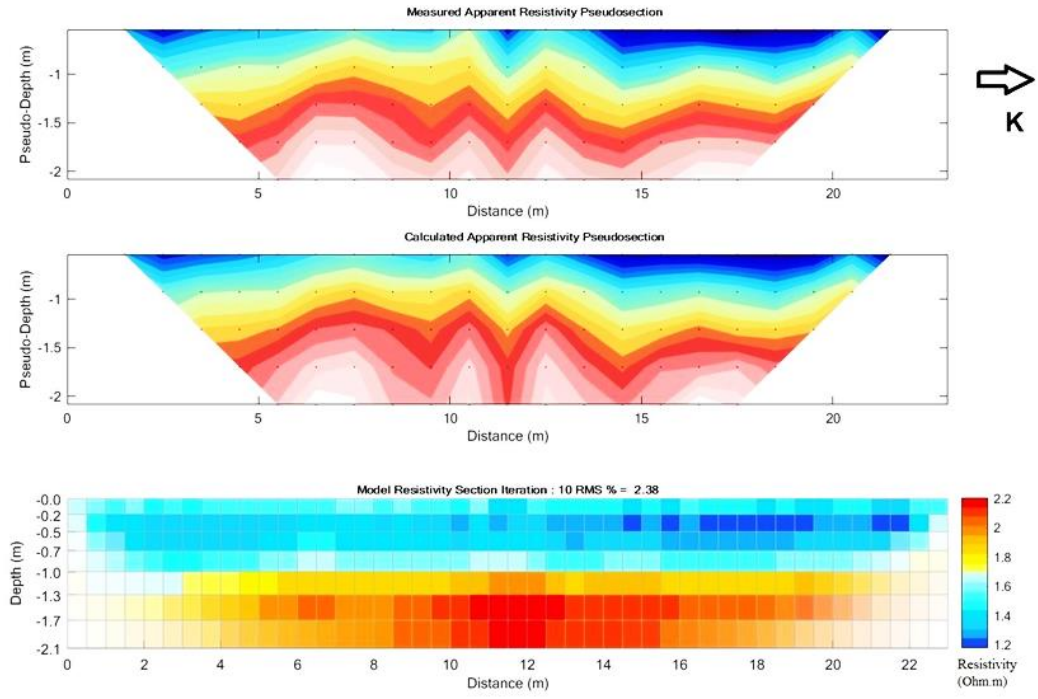
Şekil 4.34. 16. profilin gerçek derinlik kesiti (Özdirenç değerleri logaritmiktir).



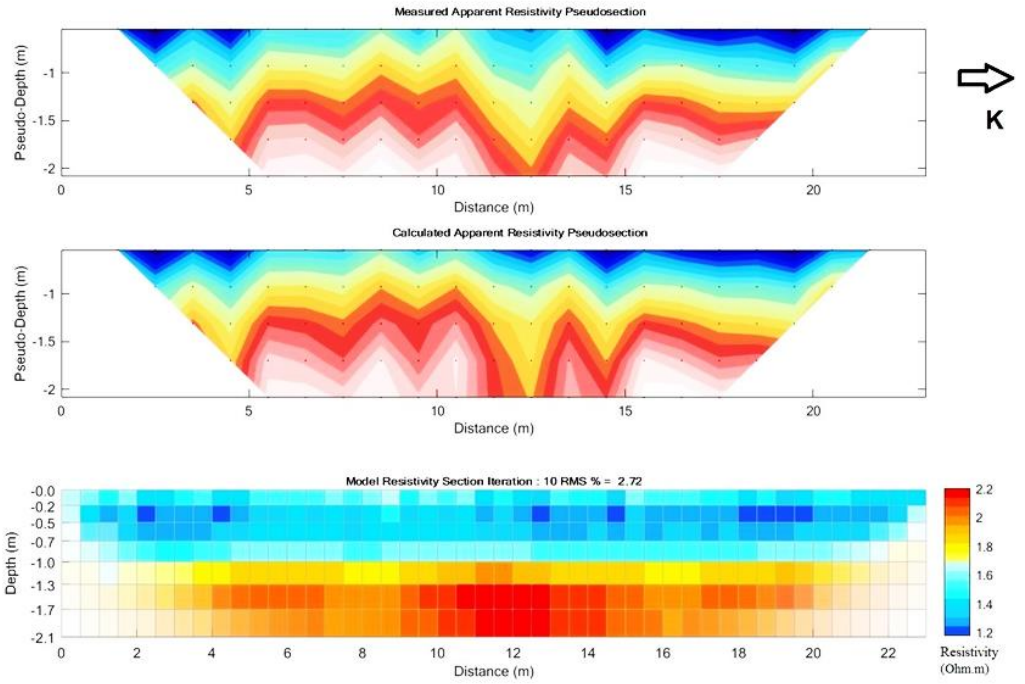
Şekil 4.35. 17. profilin gerçek derinlik kesiti (Özdirenç değerleri logaritmiktir).



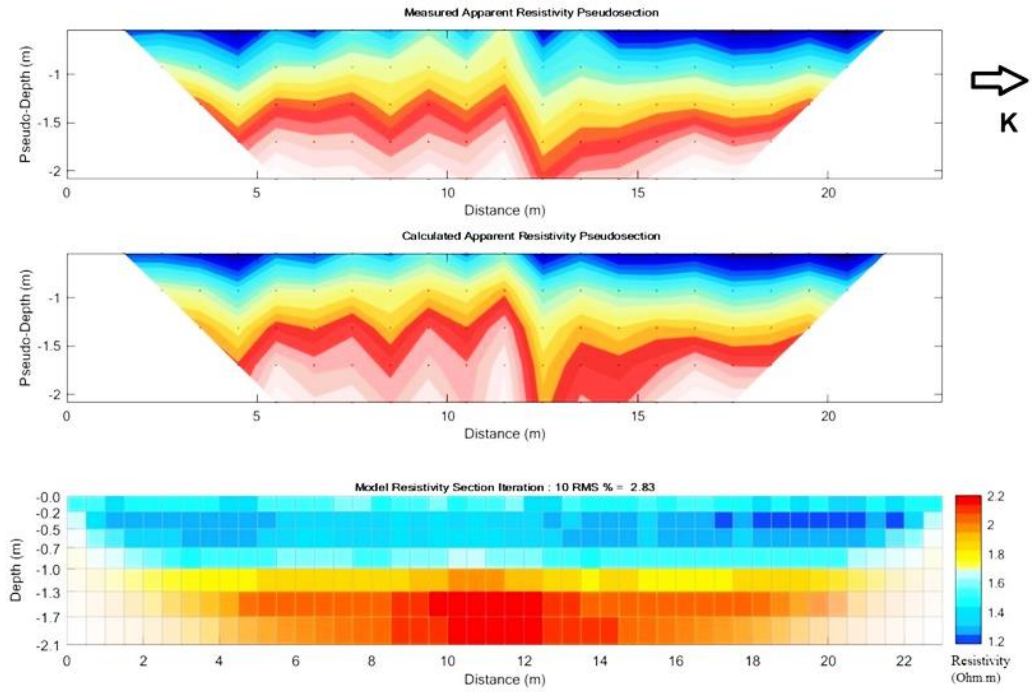
Şekil 4.36. 18. profilin gerçek derinlik kesiti (Özdirenç değerleri logaritmiktir).



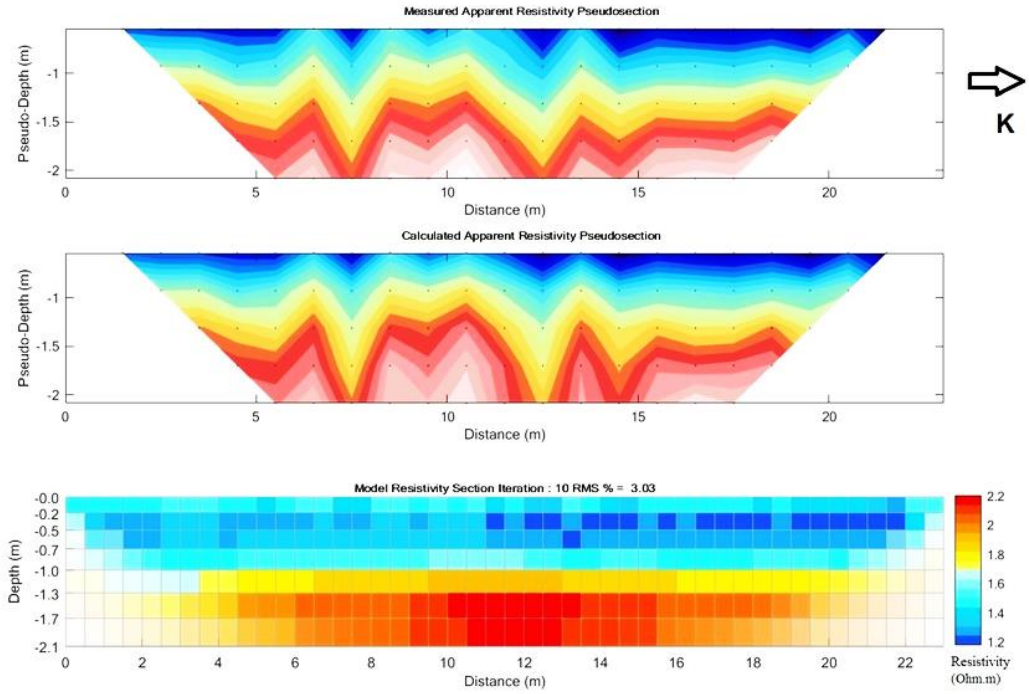
Şekil 4.37. 19. profilin gerçek derinlik kesiti (Özdirenç değerleri logaritmiktir).



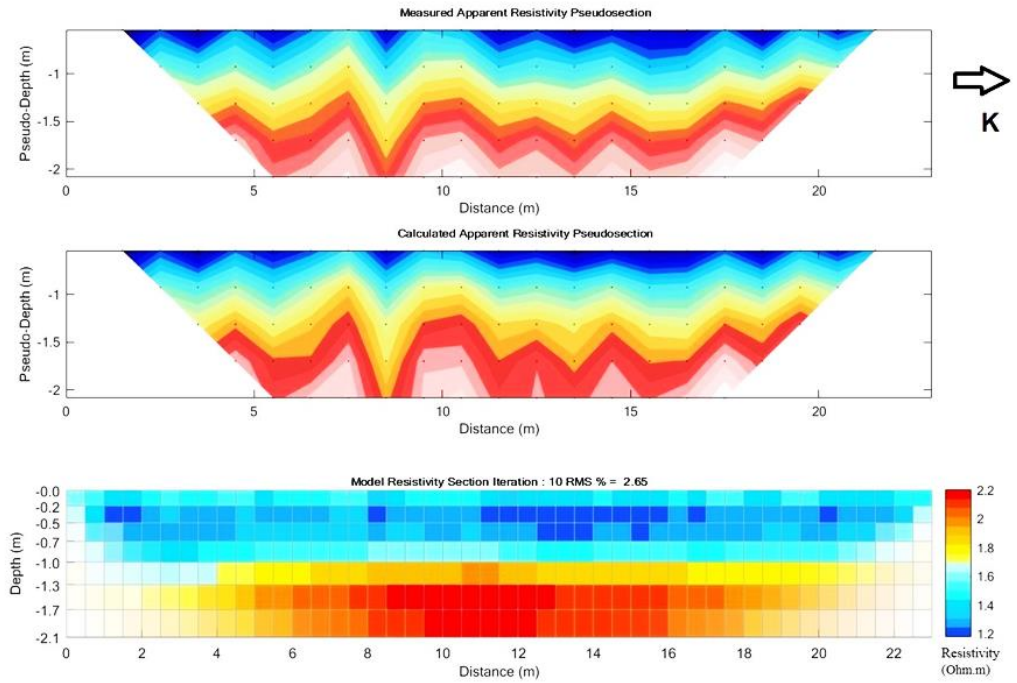
Şekil 4.38. 20. profilin gerçek derinlik kesiti (Özdirenç değerleri logaritmiktir).



Şekil 4.39. 21. profilin gerçek derinlik kesiti (Özdirenç değerleri logaritmiktir).



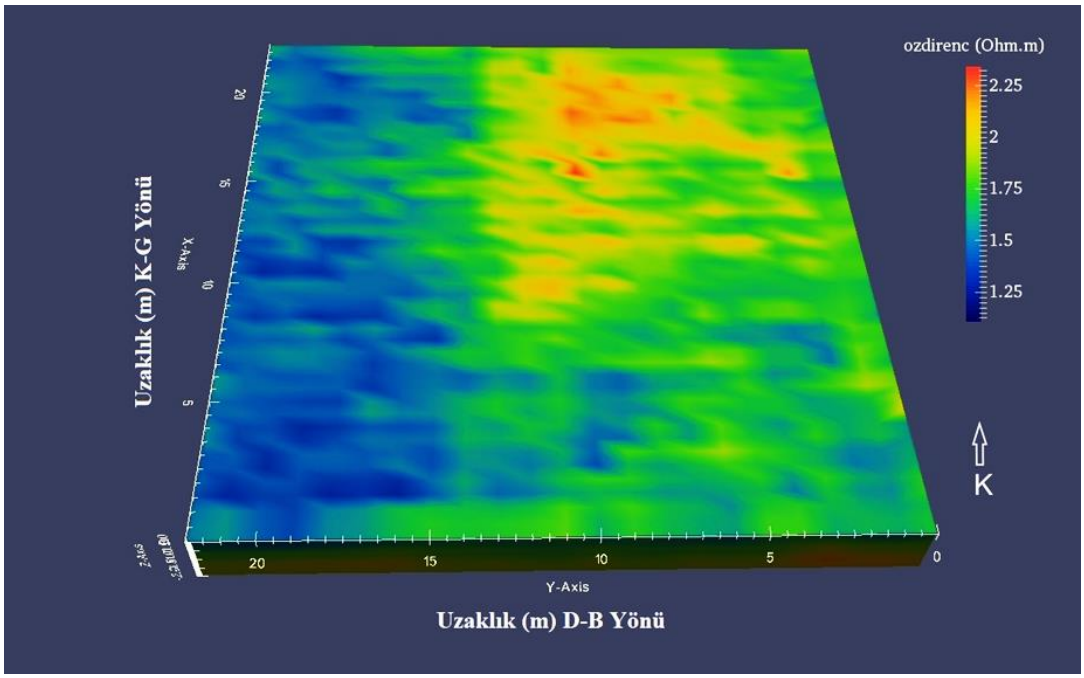
Şekil 4.40. 22. profilin gerçek derinlik kesiti.



Şekil 4.41. 23. profilin gerçek derinlik kesiti (Özdirenç değerleri logaritmiktir).

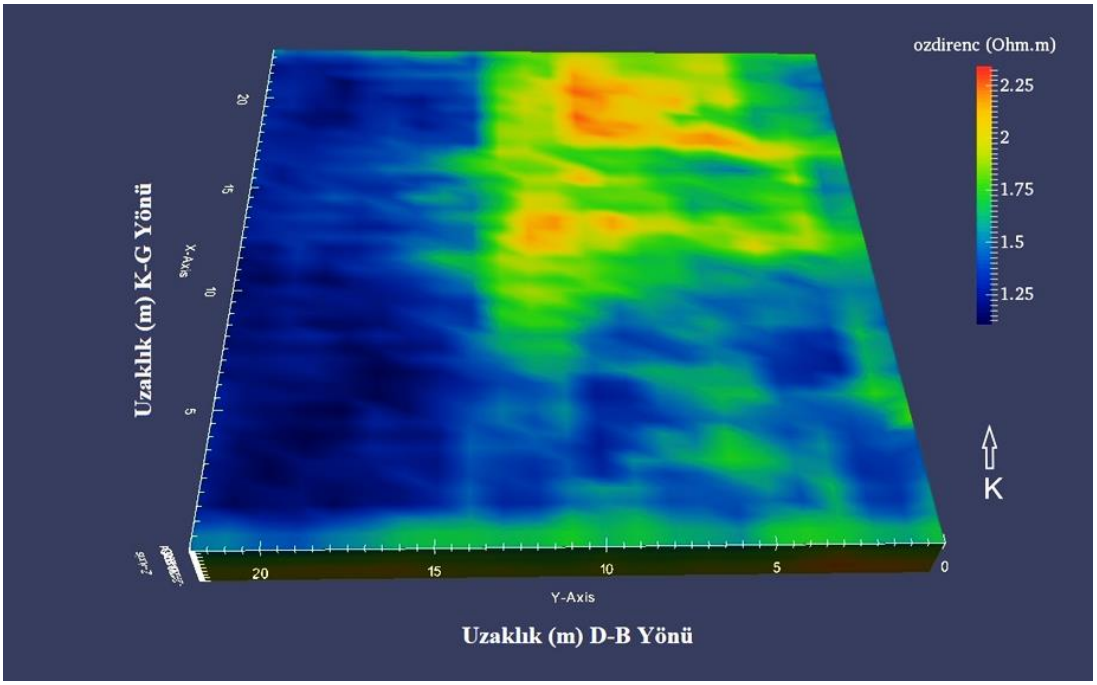
4.2.3.2 Derinlik Kesitleri

Çalışma alanına ait profillerin ters çözümü sonucunda ortamdaki yapıların özdirencine ve elektrot açılımına bağlı olarak -2 m derinliğine kadar bilgi edinilebilmiştir. Bu bilgiler izleyen bölümde derinlik kesitleri olarak sunulmuştur. Yüzey ile -2.0 m arası toplam 9 seviyeye ayrılarak tüm alandaki özdirenç değişimleri gösterilmiştir. Karşılaştırmanın kolay olması açısından tüm seviyelerde renk indeksi aynı alınmıştır. Her bir seviyeye ait derinlik bilgisi ve seviyelerde gözlenen izler şekil açıklamalarında verilmiştir.



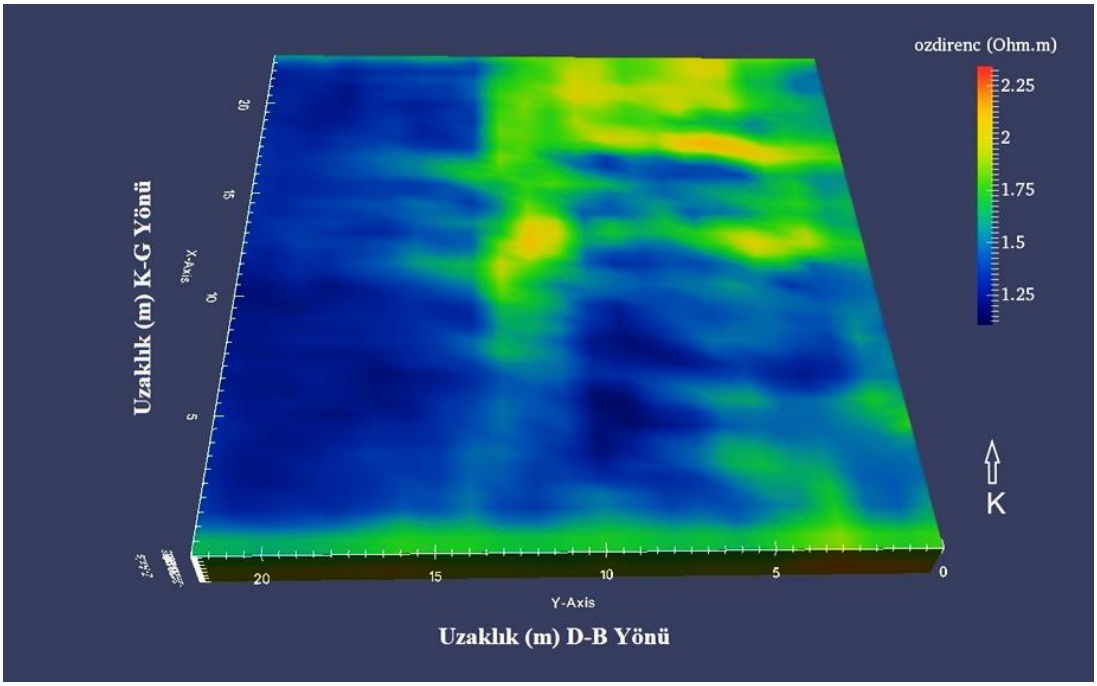
Şekil 4.42. z= 0m için 3B derinlik kesitleri (Özdirenç değerleri logaritmiktir).

Şekil 4.42'de yüzeye yakın sığ belirtilerin belirli bir geometrik yapısı bulunmamaktadır (Özdirenç değerleri logaritmiktir).



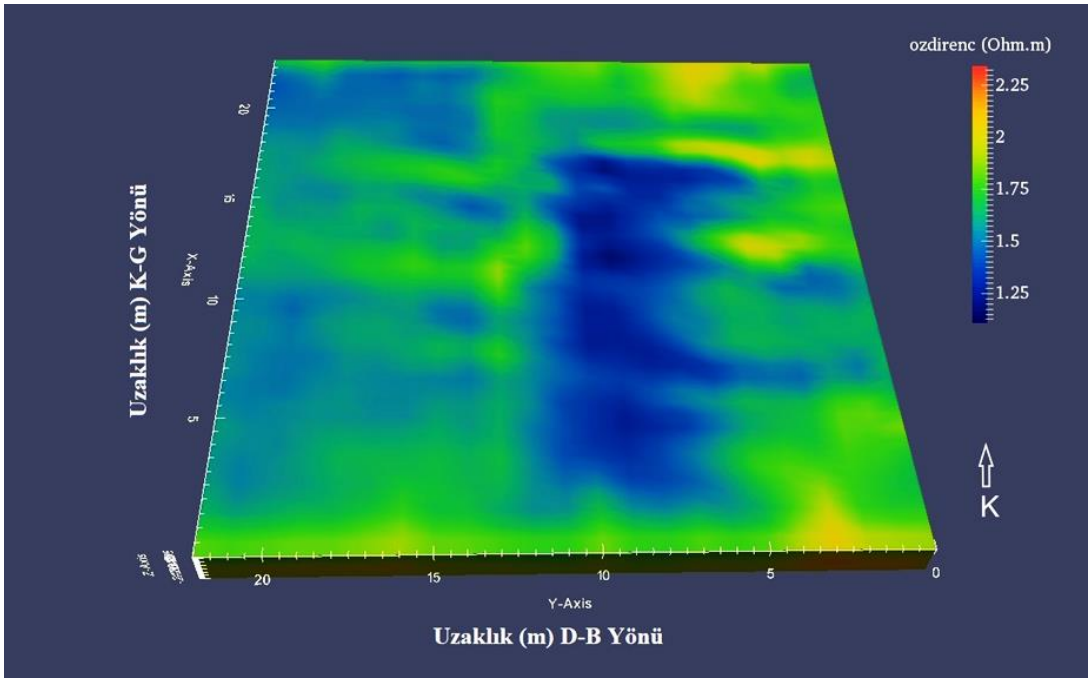
Şekil 4.43. z= 0.25m için 3B derinlik kesiti (Özdirenç değerleri logaritmiktir).

Şekil 4.43'de yüzeyin 0.25 m derinliğe sahip derinlik kesiti incelendiğinde 2-2.25 log(ohm.m) özdirenç değerine sahip geometrik bir yapının ortaya çıkmaya başladığı görülmektedir. Bu derinlik seviyesinde D-B yönünde 5 ile 9. m'ler arasında, K-G yönünde 18 ile 22. m'ler arasında yaklaşık 4m genişliğinde dörtgen forma sahip içi 1.7 log(ohm.m) özdirenç değerlerine sahip bir yapı; ayrıca D-B yönünde 2 ile 13. m'ler arasında, K-G yönünde 13 ile 19. m'ler arasında dörtgen forma sahip ve iç kısmı 1.7-1.5 log(ohm.m) özdirenç değerlerine sahip bir yapı gözlemlenmektedir.



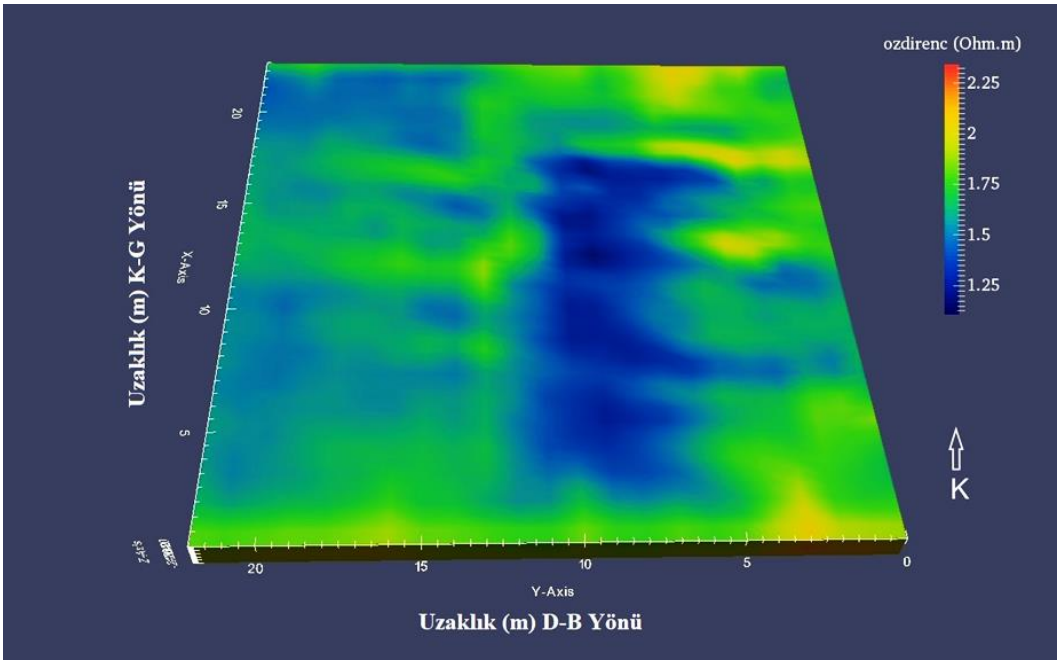
Şekil 4.44. z= 0.50m için 3B derinlik kesiti (Özdirenç değerleri logaritmiktir).

Şekil 4.44'de yüzeyin 0.50 m derinliğe sahip derinlik kesiti incelendiğinde bir önceki (Şekil 4.43) derinlik kesitinde var olan yapıların, 2 log(ohm.m)'lik özdirenç değerlerinde devam etiği gözlenmektedir.



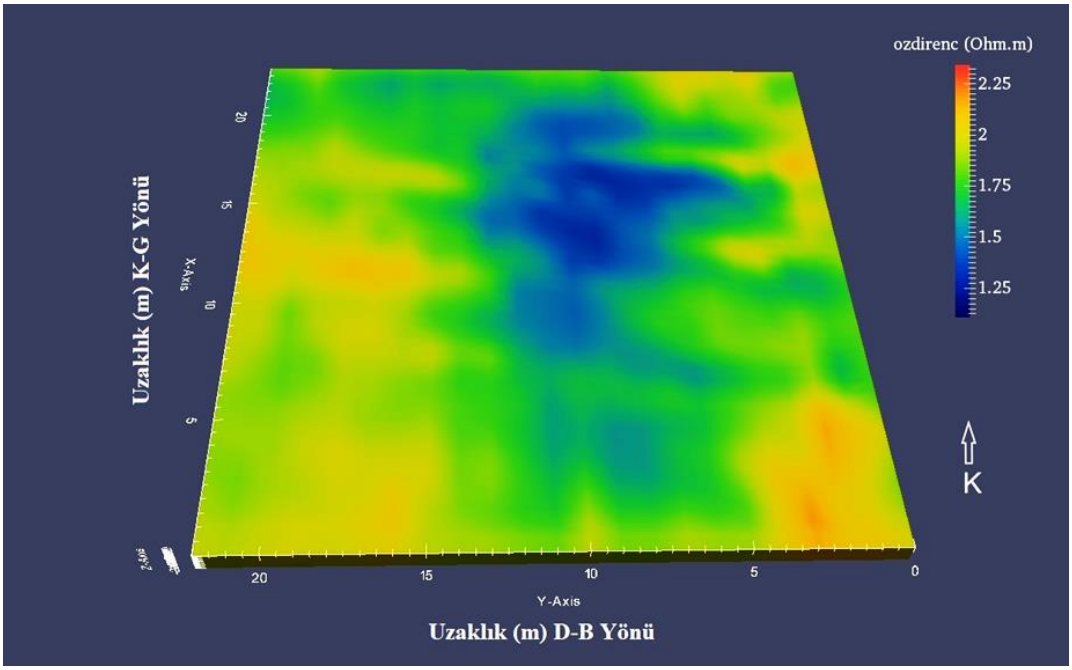
Şekil 4.45. z= 0.75m için 3B derinlik kesiti (Özdirenç değerleri logaritmiktir).

Şekil 4.45 incelendiğinde yüzeyin 0.75 m altında önceki 2 derinlik kestinde (Şekil 4.43 ve 4.44) gözlemlenen dörtgen formlu iki yapının özdirenç değerlerinin azalarak bazı bölgelerde bu değerlerin izlerinin kaybolduğu gözlenmektedir. Diğer yandan yeşil renk ile temsil edilen, geometrik formda yeni yeni yapılar ortaya çıkmaya başlamıştır.



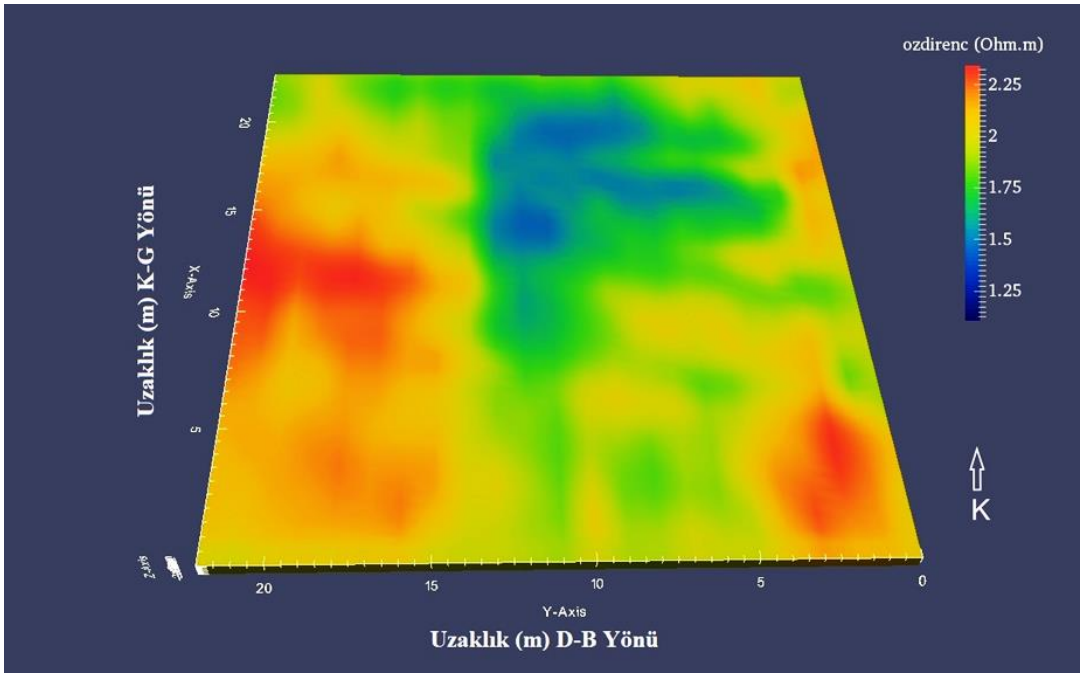
Şekil 4.46. z= 1.0m için 3B derinlik kesiti (Özdirenç değerleri logaritmiktir).

Şekil 4.46 incelendiğinde bir önceki (Şekil 4.45) derinlik kesitinde gözlenen yapıların devam ettiği ek olarak bu yapıların özdirenç değerlerinde belirgin bir değişimin olmadığı görülmektedir.



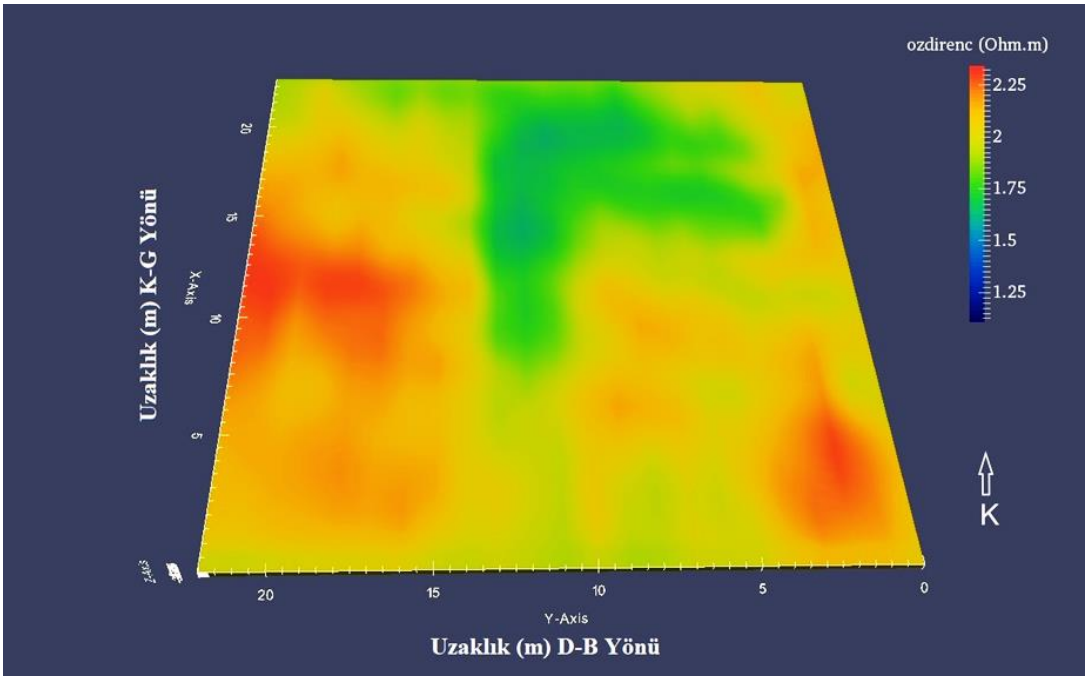
Şekil 4.47. z= 1.25m için 3B derinlik kesiti (Özdirenç değerleri logaritmiktir).

Şekil 4.47 incelendiğinde 1.25 m seviyesinin neredeyse tamamında artış gösteren özdirenç değerlerinin yanı sıra 0.25 m derinlikte başlayarak derinlik artıkça gözlemlenen D-B yönünde 4 ile 10. mler arasında, K-G yönünde 20 ile 22. m arasında ve ayrıca D-B yönünde 2 ile 13. mler arasında, K-G yönünde 13 ile 19. mler arasında bulunan yapının devamı niteliğinde izlerin olduğu düşünülmektedir. Ayrıca D-B yönünde 7 ile 10. mler arasında K-G yönünde ise 0 ile 6. mler arasında dörtgen forma sahip bir yapının silik izlerinin olabileceği düşünülmektedir.



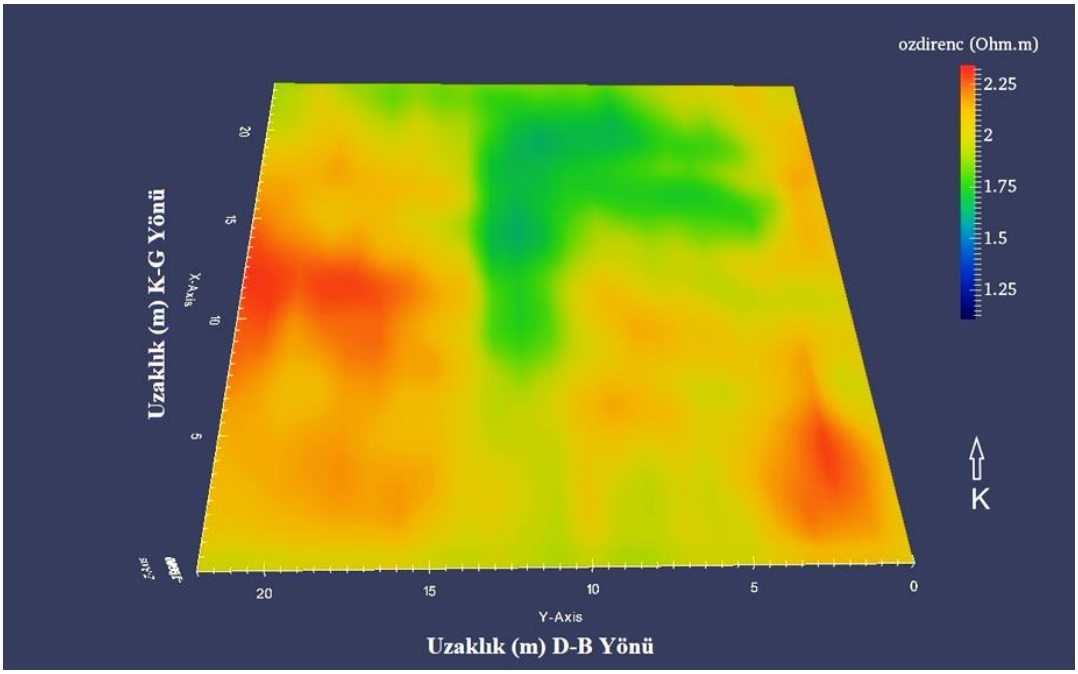
Şekil 4.48. z= 1.50m için 3B derinlik kesiti (Özdirenç değerleri logaritmiktir).

Şekil 4.48 incelendiğinde alanın özdirenç değerlerinin artığını, D-B yönünde 7 ile 10. m'ler arasında K-G yönünde ise 0 ile 6. m'ler arasında dörtgen forma sahip bir yapının olduğu gözlenmektedir.



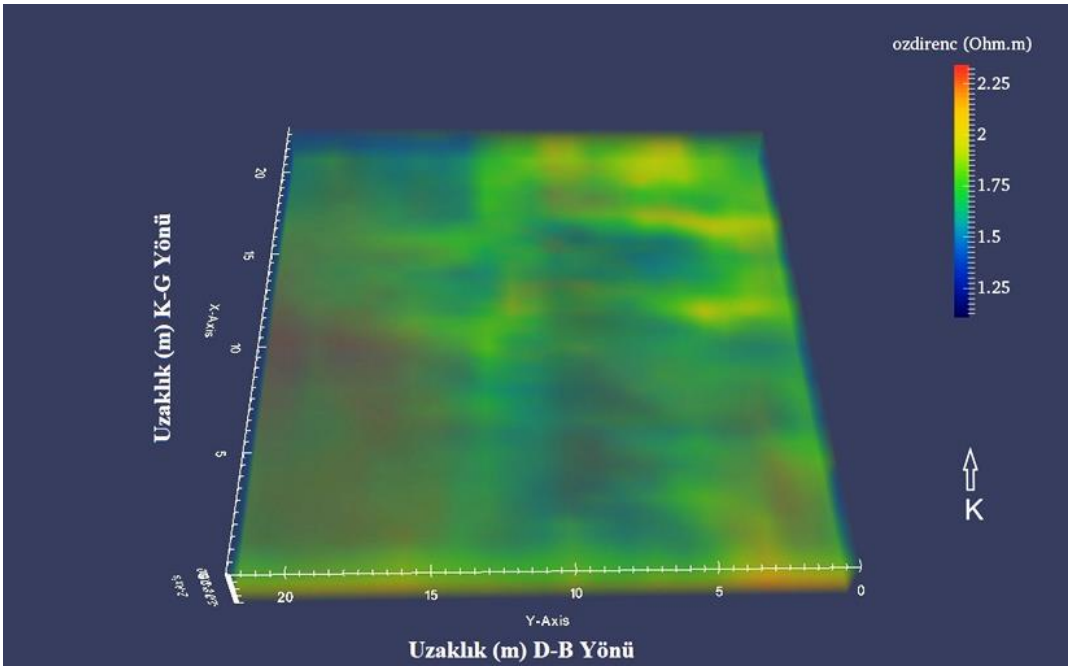
Şekil 4.49. z= 1.75m için 3B derinlik kesiti (Özdirenç değerleri logaritmiktir).

Şekil 4.49 incelendiğinde alanın özdirenç değerlerinin oldukça arttığı ek olarak D-B yönünde 7 ile 10. m'ler arasında K-G yönünde ise 0 ile 6. m'ler arasında dörtgen forma sahip yapının izlerinin artan özdirenç değerleri ile kaybolmaya başladığı gözlemlenmektedir. Özdirençin 2 log(ohm.m) ve üzeri değerlerde olması, yapıların geometri sunmaması, taban kaya düşüncesini güçlendirmektedir.



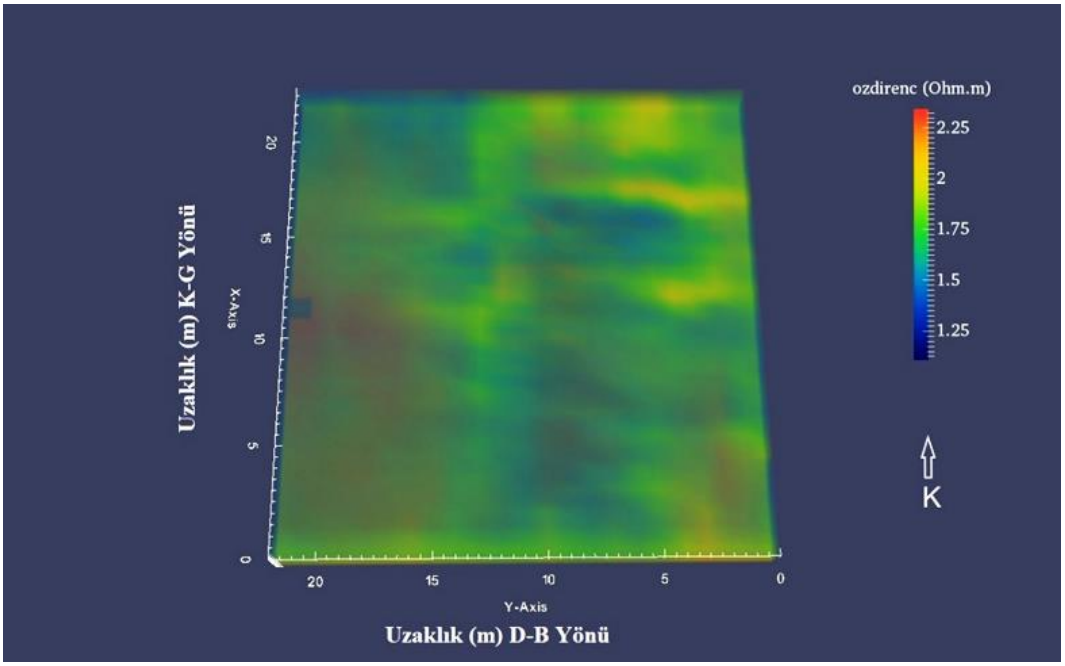
Şekil 4.50. z= 2.0m için 3B derinlik kesiti (Özdirenç değerleri logaritmiktir).

Şekil 4.50 incelendiğinde; ERT sonuçlarının maksimum derinliğinin olmasının yanında özdirenç değerlerindeki bu denli artışın ve alanın genelinde hâkim olmasının villaların alt tabanında bulunan döşeme yapıları (kireç taşı, mermer vb.) veya ana kaya olabileceği de düşünülmektedir. Bunlara ek olarak D-B yönünde 7 ile 10. m'ler arasında K-G yönünde ise 0 ile 6. m'ler arasında dörtgen forma sahip yapının izlerinin artan özdirenç değerleri ile silikleşmeye başladığı gözlemlenmektedir.



Şekil 4.51. Çalışma alanının transparan ERT haritası 1 (Özdirenç değerleri logaritmiktir).

Elde edilen tüm ERT değerleri 0 ve 2 m arasındaki derinlik değerleri için; 3B transparan hale getirilerek, çalışma alanına ait 2-2.25 log(ohm.m) özdirence sahip yapıların uzanım ve boyutları hakkında daha net bilgiler sunmaktadır (Şekil 4.51 ve Şekil 4.52).



Şekil 4.52. Çalışma alanının transparan ERT haritası 2 (Kontrast değerleri değiştirilerek yüksek direnç değerlerine sahip yapıların görünebilirliği artırılmaya çalışılmıştır) (Özdirenç değerleri logaritmiktir).

Ters çözüm işlemleri sonucu elde edilen ve 3B hale getirilen özdirenç bulguları, hava fotoğraflarında ölçüm profillerinin konumlarına göre yerleştirilmiştir. Elde edilen ERT sonuçları GPR sonuçları ile daha kolay karşılaştırılması açısında 0.6 m derinlik değerlerini içeren 3B derinlik haritası tercih edilmiştir. GPR ve ERT sonuçlarının 0.6 m derinlik değerleri için derinlik kesitleri hava fotoğraflarına yerleştirilek; çalışma prensibleri farklı iki jeofizik yöntemin benzer sonuçlar verdiği görülmektedir (Şekil 4.53 ve 4.54). GPR ve ERT sonuçlarının yeraltında benzer yapı kalıntılarını ortaya koymaları birbirlerini desteklemektedir.



Şekil 4.53. GPR görüntülerinin hava fotoğraflarına çakıştırılması işlemi (0.6m derinlik değeri için).



Şekil 4.54. ERT görüntülerinin hava fotoğraflarına çakıştırılması işlemi (0.6m derinlik değeri için).

BÖLÜM 5

SONUÇ VE TARTIŞMA

Hasarsız ve bozucu olmayan arkeojeofizik araştırmalar 1940'lı yıllardan bu yana arkeolojik alanlarının sınırlarının belirlenmesinde, sınırları belirlenmiş (/belirlenmemiş) alanlarda arkeolojik yapı kalıntılarının yeri ve derinliği ile bu yapı kalıntılarının durumlarının belirlenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Patara Antik kentinde 1988 yılında Prof. Dr. Fahri Işık başkanlığında başlatılan arkeolojik kazı çalışmaları günümüzde Prof. Dr. Havva Işık başkanlığında devam etmektedir. Patara antik kentini de içine alan ve hem doğal hem de arkeolojik açıdan önemli 193 kilometrekarelik koruma alanı olarak kabul edilen bu bölgede en önemli amaç, kazı başkanı Prof. Dr. Havva Işık' ın aktardığı gibi, Patara Antik Kentinin UNESCO kalıcı listesine girmesini sağlamaktır (Patara, 2018). Bölgenin bir sit alanı olarak ilan edilmesi, tarım faaliyetleri sürdürülen tarlalarda yeraltındaki yapı kalıntılarının tahribatını önlememektedir. Aletsel tarım faaliyetlerinin (traktör ve biçerdöverlerin ağır tonajları ayrıca pulluk, tırmık gibi keskin uçlu sürücü aletler) yüzeye yakın arkeolojik yapı kalıntılarına çok büyük hasarlar verdiği Kazı Başkanlığınca belirtilmektedir. ERT sonuçları, bu arkeolojik düşünceyi destekler sonuçlar vermiştir. Elde edilen veriler yaklaşık 0.50 m derinlik seviyelerine kadar çok dağınık ve geometrik olmayan belirtiler şeklindedir. Bu da tarımsal faaliyetler sonucu parçalanan ve rastgele dağılan ve geometrik bir yapı sunmayan arkeolojik yapı kalıntılarının varlığını işaret etmektedir.

Patara Antik Kentinde yapılan arkeojeofizik araştırma henüz arkeolojik kazısı gerçekleştirilmemiş Patara Villalarının bulunduğu düşünülen bölgenin bir bölümünde yürütülmüştür. Araştırmada GPR ve ERT yöntemleri birlikte uygulanmış ve çalışmalar sonucu elde edilen yeraltı görüntülerinin uyumu; farklı çalışma prensiplerine sahip iki yöntemin tümleşik kullanılması ile güvenilir sonuçlar alındığını ve yeraltındaki yapı kalıntılarının konum ve derinlikleri ortaya koyduklarını göstermektedir. GPR ve ERT çalışmaları ile ortaya çıkan sonuçlar, belirtilerin boyutları ve geometrik (dörtgen) forma sahip olmaları, söz konusu yapıların belirli derinlik değerlerinde devam etmeleri bunların insan yapımı olduğunu göstermektedir.

Jeofizik araştırmaların, kültürel mirasımız olan arkeolojik yapı kalıntılarının araştırılması ve koruma altına alınmasındaki katkıları büyük önem arz etmektedir. Patara Antik Kentinde yapılan bu çalışmanın da gösterdiği gibi jeofizik araştırmaların; bozucu olmayan, kazısız uygulanan ve hasarsız yöntemlere sahip olmaları, araştırma alanlarında pratik uygulanması, hızlı sonuçlar vermesi ve kazı tasarımına katkısı arkeoloji bilimine olan desteğini ortaya koymaktadır.

GPR ve ERT sonuçlarında en belirgin iz olan araştırma alanının kuzey doğusunda yer alan 4 m'ye 4 m'lik dörtgen formlu yapının yüzeyin yaklaşık 0.50 m altından başlayarak 1.2 m derine kadar devam ettiği ve her iki yöntemin de bu arkeolojik yapı kalıntısını ortaya koyduğu görülmektedir.

ERT sonuçları dikkate alındığında, GPR sonuçlarında gözlenemeyen 2 m derinliklerindeki temel kaya ya da villa taban döşemesi olduğu düşünülen belirtilerinin varlığı dikkat çekicidir. Derinliğin artması ve topraktaki nemliliğinde etkisi ile söz konusu yapı kalıntısının (yüksek özdirenç değerlerinin) görünebilirliğinin arttığı gözlenmektedir. Sığ derinlik seviyelerinde gözlenmeyen 0.75 m ve 1 m derinlik seviyesinde alanın kuzeybatısı ve güney batısında dörtgen formlu yeni yapıların ortaya çıktığı görülmektedir. Söz konusu yapı kalıntılarının varlığının 1.25 m derinlik seviyesinde de sürdüğü gözlenirken özdirenç değerlerindeki yükselme de dikkat çekicidir. 1.25 m derinlik seviyesinde alanın güneyinde gözlenen 3 m'ye 5 m'lik dörtgen formlu bir yapı kalıntısı ortaya konmaktadır. Bu da GPR belirtilerinin 1.30 m derinlik seviyesine kadar devam eden dörtgen formlu yapı kalıntısı ile uyumludur.

1.50 m derinlik seviyesinde alanın güneyinde yer alan 3 m'ye 5 m'lik dörtgen formlu yapı kalıntısının devamı niteliğindeki izler görülmektedir. Özellikle alanın batı tarafında artış gösteren 2.5 log(ohm.m) ve üzeri özdirenç değerleri bölgedeki yapıların taban kaplamaları, duvarların yıkılması ile ortaya çıkan duvar kalıntılarının etkisi olabilir. 1.5 m derinlik seviyesinden sonraki yüksek özdirençli yapının temel kaya olarak algılanması güçtür. Zira araştırma alanının teras biçimli yapısı ve doğu ucunun dağ tarafı dikkate alındığında belirtiye karşılık yerlerde temel kaya daha derinde olmalıdır.

1.75 m ve 2.0 m derinlik seviyelerinde yüksek özdirenç değerleri çalışma alanın büyük bölümde egemen olup yapı kalıntılarına ait belirtileri kısıtlamaya başlamaktadır. Alanın kuzeybatısında 0.25 m derinlik seviyesinden başlayarak devam eden dörtgen formlu yapının izleri ile alanın güneyinde yer alan 3 m'ye 5 m'lik dörtgen formlu yapı kalıntısının devamı niteliğindeki belirtiler, güçlükle, izlenebilmektedir.

ERT sonuçları yapı kalıntılarının olası derinlik ve konumlarını ortaya koymaktadır. Elde edilen sonuçlar Patara Villalarının kalıntılarının ortaya çıkarılması ile tescilinin yapılarak kamulaştırılmamış alanların kamulaştırılması konularında büyük katkılar sağlayacaktır. Tarım faaliyetleri sonucu parçalanıp taş parçası haline gelen yapı kalıntıları, ERT sonuçlarında özellikle ilk 0.50 m derinlik seviyesine kadar belirtilerin hiçbir geometri göstermemesi ve dağınıklığı ile açıklanabilir. Elde edilen sonuçlar jeofizik yöntemlerin, yeraltındaki, arkeolojik yapı kalıntılarının araştırılmasında ve durumlarının belirlenmesinde katkılarının önemini göstermektedir.

Arkeojeofizik çalışması sonucu elde edilen yeraltı görüntülerinde yapı kalıntısı olduğu düşülen çok sayıda dörtgen forma sahip izler görülmüştür. GPR ve ERT çalışmalarından birbiri ile uyumlu sonuçlar elde edilmiş, aynı konum ve doğrultulardaki yapı kalıntıları başarılı bir şekilde tespit edilmiştir. Elde edilen bulguların uyumu yeraltındaki yapı kalıntılarının varlık, konum ve derinlik bilgilerini destekleyici niteliktedir.

3B sonuçlar hava fotoğraflarında konumlarına yerleştirilerek herhangi bir arkeolojik kazı işlemi gerçekleştirilmeden alanın yer altı görüntüsü ortaya konulmuş;

yapı kalıntılarının konum, derinlik ve uzanımları belirlenerek alanın arkeojeofizik çalışması tamamlanmıştır.

Önceki bölümlerde aktarıldığı gibi, jeofizik; görülmeyeni görmektir. Görünmeyeni görmek de tahribatı önlemek, kültürel mirasa sahip çıkmak, zaman ve maddi gücü verimli kullanmaktır. Bunun için de jeofizik araştırmalara ihtiyaç olduğu kesindir. Kültürel mirasın korunması, geçmişin yarına aktarılması; görülmeyeni gören jeofizik biliminin katkıları olmadan mümkün görülmemektedir.

KAYNAKLAR

Açıkders. (2009). 15 Kasım 2018 tarihinde http://www.acikders.org.tr/file.php/100/Lectures/PDF/Ders_5_Notlar.pdf adresine erişildi.

Aeriel. (2016). 10 Eylül 2018 tarihinde http://barbarahorejs.at/wpcontent/uploads/sites/106/2016/07/AerialArchaeology.jpg adresine erişildi.

Airbone. (2008). 20 Eylül 2018 tarihinde http://www.lgs.ie/airborne-lidar.shtml adresine erişildi.

Akca, İ., Öztürk Akca & C., Zoroğlu, L. (2010). *Doğru Akım Özdirenç Verilerinin Üçgen Model Elemanları ile 2-B Ters Çözümü: Kelenderis Antik Kentinde Yapılan Çalışmalar Örneği.* 3. Yer Elektrik Çalıştayı, Ankara.

Akca, İ. (2015). ELRIS2D: A MATLAB Package for the 2D Inversion of DC Resistivity/IP Data. *Acta Geophysica, 41*(1), 62-78. doi: 10.1515/acgeo-2015-0071

Akşit O. (1967). *Likya Tarihi*. İstanbul: Edebiyat Fakültesi.

Alçiçek, M.C. & Boyraz, S., Gül, A. (2006). *Eşen Vadisi Neojen Tortullarının Stratigrafisi ve Sedimantolojisi, GB Anadolu*. *TÜBİTAK* Proje No: ÇAYDAG 104Y242.

Alçiçek, M.C. (2007). Tektonic development of an orogen-top rift recorded by its terretrial sedimantation pattern: The Neogene Eşen Basin of soutwestern Anatolia, Turkey. *Sedimentary Geology, 200*(1), 117–140.

Altunkaynak, Ö. (2005). E*lektrik Özdirenç ve Manyetik Yöntemler ile Arkeolojik Yapıların Saptanması* (Yüksek lisans tezi). Süleyman Demirel Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.

Annan, A.P. (2000). *Ground penetrating radar workshop notes.* Sensors and Software Inc. Canada.

Annan, A.P. (2004). *Ground Penetrating Radar Principles*. Procedures & Applications Sensors and Softwares Inc. Canada

Annan, A.P., (2005). Ground Penetrating Radar, Near Surface Geophysics Part 1: Concept and Fundamentals, Dwain K. Butler (Ed.), *İn Investigations in Geophysics, 13*, 357-434. ISBN 1-56080-130-1

Annan, A.P. (2009). Electromagnetic Principles of Ground Penetrating Radar, Harry M. Jol (Ed.), *In Ground Penetrating Radar: Theory and Applications* (s. 524), Wisconsin: Elsevier.

Ateş, A., (2002). Archaeogeophysical Investigations Aroundthe Bilge Qugan Monument in KhoshoTsaidam, Mongolia. *Archaeological Prospection, 9,* 23-33.

Ateş, A., Erdem, E., Bilim, F. & Aydın, N., (2003) Magnetic Enhancement Over buried Features In Kerkenes Archaeological Site, Yozgat, Turkey. *Journal of the Balkan Geophysical Society, 6*(3), 137 – 143.

Athanasiou, E., Tsourlos, P., Papazachos, C. & Tsokas, G. (2007) Combined weighted inversion of electrical resistivity data arising from different array types. *Journal of Applied Geophysics, 62*(2), 124-140.

Balanis, C.A. (1989). *Advanced Engineering Electromagnetics.* Newyork: John Willey&Sons.

Balkaya, Ç., Çakmak, O., Kalyoncuoğlu, Ü.Y., Özhanlı, M. & Balkaya, E. (2018). Yer Radarı Yöntemi ile Pisidia Antiokheia Aedilicus Bazilikasının Ortaya Çıkarılması. ***7.*** *Yer Elektrik Çalıştayı*. (s. 82-85). Isparta.

Barker, R.D. (1979). Signal contribution section and their use in resistivity studies. *Geophiys. J.R.Astr. Soc. 59*, 123–129.

Barker, R.D. (1981). The offset system of electrical resistivity sounding and its use with a multicore cable. *Geophysical Propescting, 29*, 128–143.

Başokur, A.T. (1984). *Düşey Elektrik Sondajı*, Ankara: TPAO.

Başokur A.T. (1994). Definitions of apparent resistivity for the presentation of magnetotelluric sounding data. *Geophysical Prospecting, 42*, 141-149.

Başokur, A.T. (1999) Automated 1D interpretation of resistivity soundings by simultaneous use of the direct and iterative methods. *Geophysical Propescting, 47*(2), 149–178.

Başokur, A. T. (2002). *Doğrusal ve Doğrusal Olmayan Problemlerin Ters Çözümleri.* Ankara: Jeofizik Mühendisleri Odası Eğitim Yayınları.

Başokur, A.T. (2004). *Düşey Elektrik Sondajı Verilerinin Yorumu*, Ankara Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Jeofizik Mühendisligi Bölümü, Ankara. http://kitaplar.ankara.edu.tr/dosyalar/pdf/365.pdf

Başol, N. (2005). *Arkeolojik Kelenderis Bölgesinin Özdirenç Yöntemi ile İncelenmesi*. (Yüksek lisans tezi). İstanbul Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Bresson, A. (1990). Rhodes and Lycia in Hellenistic Times. V. Gabrielsen, P. Bilde, T. Engberg Pedersen, L. Hannestad & J. Zahle (Ed.), *Hellenistic Rhodes: Politics, Culture and Society* (s. 98-131) England: Oxford.

Brizzolari, E., Ermolli F., Orlando L., Piro S. & Versino L. (1992). Integrated Geophysical Methods in Archaeological Surveys. *Journal Of Applied Geophysics, 29*, 47-55.

Bryce T.R. (1986). The Lycians in Literary and Epigraphic Sources. *The Lycian Volume Is*. Copenhagen: Museum Tuslanum.

Buderi, R. (1996). *The Invention That Changed the World.* New York: Simon & Schuster.

Bulut, S. (2016). *Avsallar Roma Rustikası; Restitüsyon ve Restorasyona Yönelik Arkeolojik Raporu*. Akdeniz Üniversitesi/Fen Edebiyat Fakültesi, Antalya.

Candansayar, M.E. (1997) *Doğru akım özdirenç yönteminde modelleme ve iki-boyutlu sığ yapıların aranmasında elektrot dizilimlerinin ayrımlılıklarının karşılaştırılması.* (Yüksek lisans tezi). Ankara Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Candansayar, M.E. & Başokur, A.T. (2001) Dedecting Small-Scale Targets by the 2-D Inversion of Two-Sided Three-Electrode Data: Application to an Archaeological Survey. *Geophysical Propescting*, 49, 13-25.

Candansayar, M.E. (2005). *Elektrik Yöntemler* Lisans Ders Notu.. Ankara Üniversitesi/Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Mühendisligi Bölümü. Ankara.

Candansayar, M.E. (2007). *Elektrik Yöntemler, Doğru Akım Özdirenç Yöntemi*. Ankara Üniversitesi/Mühendislik Fakültesi. Ders Notları. https://acikders.ankara.edu.tr/pluginfile.php/71239/mod_resource/content/0/B2-JFM316_DAO2.pdf

Candansayar, M. E. (2013). Arkeoloji Jeofiziği. *TMMOB JFMO, Jeofizik Bülteni, 72*, 6-9.

Candansayar, M.E. (2016). *Elektrik Yöntemler, Doğru Akım Özdirenç Yöntemi*. Ankara Üniversitesi/Mühendislik Fakültesi. Ders Notları. https://acikders.ankara.edu.tr/pluginfile.php/8990/mod_resource/content/0/H4_B_JFM316_DAO_2016_1.pdf

Cammarano, F., Mauriello, P. & Piro, S. (1997). High-Resolution Geophysical Prospecting with Integrated Methods. The Ancient Acropolis of Veio (Rome, Italy), *Archaeological Prospection, 4*, 157-164.

Capizzi, P., Martorana, R., Messina, P. & Cosentino, P. L. (2012). Geophysical and geotechnical investigations to support the restoration project of the Roman 'Villa del Casale', Piazza Armerina, Sicily, Italy. *Near Surface Geophysics, 10*, 145–160.

Cardarelli, E., Fishanger, F. & Piro, S. (2008). Integrated geophysical survey to detect buried structures for archaeological prospecting. A case-history at Sabine Necropolis (Rome Italy). *Near Surface Geophysics, 6,* 15–20.

Annan, A.P. (2009). Electrical and Magnetic Properties of Rocks, Soils and Fluids. Harry M. Jol (Ed.), *In Ground Penetrating Radar: Theory and Applications* (s. 524), Wisconsin: Elsevier.

Chavez, R.E., Camara, M.E., Tejero, A., Barba, L. & Manzanilla, L. (2001) Site Characterization by Geophysical Methods in the Archaeological Zone of Teotihuacanm, Mexico. *Journal of Archaeological* Science, 28, 1265-1276.

Colin, H.J. (1962). Fethiye-Antalya-Kaş-Finike (Güneybatı Anadolu) bölgesinde yapılan jeolojik etüdler. *Maden Tetkik ve Arama Enstitüsü Dergisi, 59,* 19-59.

Cott, P.J., 2002. Archaeological Geophysics in East Anglia, UK. *Archaeological Prospection, 9*(3), 157-161.

Daniels, D. (1996). *Surface Penetrating Radar The Institution of Electrical Engineers*. London: Institution of Engineering and Technology.

De La Vega, M., Osella, A., Lascano, E. & Carcione, J.M. (2005). Ground-Penetrating Radar and Geo-Electrical Simulations of Data from the Floridablanca Archaeological Site. *Archaeological Prospection, 12*(1), 19-30.

Dey, A. And Morrison, H.F. (1979). Resistivity Modeling For Arbitrarily Shaped Two-Dimensional. *Geophysical. Prospecting, 27*(1), 106-136.

Diederichs C. (1980). *Salamine De Chypre IX, Ceramiques Hellenistiques, Romaines Et Byzantines.* R. M. Geer (Çev.). Paris: Diffusion De Boccard.

Dizioğlu M.Y. & Keçeli A.D, (1981), *Elektrik ve elektromanyetik prospeksiyon yöntemleri*. İstanbul: İstanbul Üniversitesi.

Drahor, M.G. & Kaya, M.A. (2000). A Large Scale Geophysical Prospection in the Acemhöyük the Site of the Assyrian Trade Colony Period. *TÜBA-AR. 3*, 85-107.

Drahor, M.G., Hesse, A. & Kaya, M.A. (1995). Sinop Amfora Atölyeleri üzerinde Manyetik Çalışmalar. *Jeofizik, 10*, 7-12.

Edwards, W., Okita, M. & Goodman, D. (2000). Investigation of a Subterranean Tomb in Miyazaki, Japan. *Archaeological Prospection, 7*(4), 215-224.

Ekinci, Y.L. & Kaya, M.A. (2006). Manyetik verilerde sınır analizi yöntemi kullanılarak gömülü arkeolojik yapı sınırlarının belirlenmesi. *Yerbilimleri (H.Ü.), 27* (2), 97-107.

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., Başaran, C., Kasapoğlu, 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, Ç., Seren, A., Kaya, M. A. & Lightfoot, c. S., 2014, Geomagnetic and geoelectrical prospection for buried archaeological remains on the Upper City of Amorium, a Byzantine city in midwestern Turkey. *Journal of Geophysics and Engineering, 11*(1),1-17.

Erdemgil, E., Evren, A., Özeren, Ö., Tüzün, D., Büyükkolancı, M., Büyükkolancı, P., İçten, C., Üçbaylar, E. & Yüğrük, Ü. (1990). *Efes Yamaç Evleri.* İstanbul: Hitit Color.

Esin U. (1985). *Arkeolojide Kullanılan Arkeometrik Araştırmalara Genel bir Bakış. 1. Arkeometri Sonuçları Toplantısı.* Ankara. s. 1-7.

Francese, G. R., Finzi, E. & Morell, G. (2009). 3-D High-Resolution Multi-Channel Radar İnvestigation of a Roman Village in Northern Italy. *Journal of Applied Geophysics, 67*, 44–51.

Fort R., Alvarezde-Buergo M. & Perez-Monserrat E.M. (2013). Non-destructive testing for the assessment of granite decay heritage structures compared to quarry stone. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 61,* 296–305. DOI: 10.1016/ j.ijrmms.2012.12.048

Gaffney, C.F., Gater, J.A., Linford, P., Gaffney, V.L. & White R. (2000). Large-Scale Systematic Fluxgate Gradiometry at the Roman City of Wroxeter. *Archaeological Prospection, 7*, 81-99.

Gizzi, F., Leucci, G., Masini, N., Persico, R. & Quarta, G. (2015). Integrated approach based on non-invasive investigations for the structural diagnosis of monuments: the case of the San Francesco della Scarpa Church in Lecce. *Journal of Geophysics and Engineering, 9*(3), 271-281, doi:10.1088/1742-2132/9/3/271.

Goodman, D., Nishumura, Y., Hongo, H. & Higashi, N. (2006). Correcting for Topography and the Tilt of Ground-Penetrating Radar Antennae. *Archaeological Prospection, 13*, 157-161.

Göçmen, K. (1977). Eşen çayı vadisinin jeomorfolojisi. *İstanbul Üniversitesi Coğrafya Enstitüsü Dergisi, 20*(21), 245-251.

GPR. (2016). 22 Ekim 2018 tarihinde http://www.3dgeoimaging.com/gpr-slice adresine erişildi.

Harita. (2018). 1 Eylül 2018 tarihinde http://cografyaharita.com adresine erişildi.

Hoskan, N., Yüksel, F.A., Avcı, K., Ergüven, K.& Korkut, T. (2014). Tlos Antik Kenti Stadion Alanında Jeoradar Çalışmaları. *67. Türkiye Jeoloji Kurultayı.* (s.432-437), Ankara.

Işık F. (2000). *Patara, The History and Ruins of the Capital City of Lycian League*. Antalya: Orkun & Ozan Medya Hizmetleri.

Işık F. (2011). *Caput Gentis Lyciae, Lykia. Soyunun Başkenti Patara.* Havva İşkan Şevket Aktaş, (ed.), *Lykia. Soyunun Başkenti Patara'ını içinden (s. 36-54).* İstanbul: Scala.

Işın G. (2008). The Preliminary Report on the Hellenistic Pottery of Patara from the Tepecik Hill Excavations. *Asia Minor Studien, 55,* 157-171.

Işın G. & Işık F. (2008). Tepecik Bey Sarayı. *KST , 29,*(1), 59- 72.

Dağlı, İ. (2011). *Gömülü Sığ Yapıların Araştırılmasında İki-Boyutlu Özdirenç Uygulaması ve Elektrot Dizilmlerinin Karşılaştırılması.* (Yüksek lisans tezi). Süleyman Demirel Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.

Kaplanvural, İ. (2011). *Yer Radarı Verilerinin Modellenmesi ve Yorumlanması.* (Yüksek lisans tezi). Kocaeli Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.

Karaaslan, H. (2015). *Alabanda Antik Kentin Meclis Binası İçindeki Gömülü Yapıların Elektrik Yöntemlerle Araştırılması.* (Yüksek lisans tezi). Sakarya Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakaraya.

Kaş. (2018). 20 Kasım 2018 tarihinde https://www.antalya.bel.tr/Content/UserFiles/Files/KAS_PLAN_ACIKLAMA_RAPORU.pdf adresine erişildi.

Kaya, M., A. (1997). Elektrik Prospeksiyon. (Yayımlanmamış ders notları). Süleyman Demirel Üniversitesi/Mimarlık ve Mühendislik Fakültesi. Isparta.

Kaya, M.A. (2006). Arkeojeofizik Araştırmalar. Ankara: Jeofizik Mühendisleri Odası.

Kaya, M.A. (2016). Prof. Dr. Ali Keçeli Jeofizik-Jeoteknik Çalıştayı Bildiriler. Osman Uyanık, (Ed.), Su Yapılarında Jeofizik ve Jeoteknik Çalışmaların Yeri ve Önemi (s. 17-32). Ankara: TMMOB JFMO.

Kaya, M.A. (2017a). Yeraltı Suyu ve Toprak Kirliliğtrakayinin Jeofizik Yöntemlerle Belirlenmesi. (Yayımlanmamış yüksek lisans ders notları). Trakya Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü. Edirne.

Kaya, M.A. (2017b). JFMO Prof. Dr. Rahmi Pınar Kentleşme ve Yapı İncelemeleri Çalıştayı. Sinancan Öziçer, Emre Timur, (Ed.), Restorasyon Amaçlı Jeofizik Çalışmalar (s. 61-70). Ankara: TMMOB JFMO.

Kaya, M. A. (2018). Arkeoloji Jeofiziği ve Uygulama Örnekleri. (2. Yerbilim Kongresi Yayımlanmamış Bildiriler Kitabı). KKTC.

Kaya, M. A. ve Balkaya. Ç. (2005). Oygu Mezarların Özdirenç Yöntemi ile Araştırılması: Nagidos ve Patara Örnekleri. Yıldız Teknik Üniversitesi, Jeoarkeoloji-Arkeojeofizik Sempozyumu. İstanbul.

Kaya, M.A., Balkaya, Ç., Ekinci, Y. L. & Demirci, A. (2013). Kültür Mirasımız, Torunlarımızın Emaneti için: Arkeojeofizik. Neden, Nereye?. TMMOB JFMO Jeofizik Bülteni, 72, 29-45.

Kaya, M.A. Balkaya, Ç. & Akça, İ. (2018). Patara Antik Kenti (GB Anadolu) Arkeojeofizik Araştırmalarının Ön Sonuçları. (Patara Kazı Başkanlığı Raporu). Antalya.

Kaya, M.A., Başokur, A.T., Ateş, A., Pekşen, E. & Candansayar, E. (1996). Göndürle-I Höyük Mezarlığının Jeofizik Yöntemlerle Araştırılması. TÜBİTAK YDABÇAG - 142 no'lu Proje Raporu.

Kaya, M.A. Öztürk, C. & Zoroğlu, L. (2004). Kelenderis Antik Kenti Agorasında Antik Yapı Kalıntılarının Özdirenç Yöntemi ile Araştırılması. Türkiye 16. Uluslararası Jeofizik Kongre ve Sergisi. (s. 397-400). Ankara.

Kaya, M., A. ve Özyalın, Ş. (1999). Malos Antik Kentinin Manyetik Yöntemle Araştırılması. (Workshop: Arkeoloji ve Jeofizik). İzmir.Kaynakçı Elinç Z. (2007). *Batı Anadolu'da Hellenistik- Roma Dönemlerinde Bahçe Mimarisi*. (Doktora tezi). Akdeniz Üniversitesi/Sosyal Bilimler Enstitüsü, Antalya.

Keçeli, A. (2009). *Uygulamalı Jeofizik.* Ankara: Jeofizik Mühendisleri Odası.

Kesemen, O. (2007). Yer Radarı (GPR) Verilerinin İşlenmesinde Yeni Yaklaşımlar. (Doktora tezi). Karadeniz Teknik Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

Knight, R. (2001). *Ground Penetrating Radar For Environmental Applications*. Annu. Rev. Earth Planet. Sci.

Knödel, E., Krummel, M. & Lanke, J. (1997). *Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altasten: Geophysik.* Berlin: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe.

Koefoed, O. (1968). The Application Of The Kernel Function İnterpretting Geoelectric Resistivity Measurement. *Geoexploration Monographs, 12*, 111.

Kurt, B. B., Kadioglu, S. & Ekincioglu, E. E. (2009). Yer Radarı Yöntemi ile Gömülü Boruların Konum, Büyüklük ve Fiziksel Özellikleri ile Belirlenmesi. Ankara: *Hacettepe Üniversitesi Yer Bilimleri, 1*, 30.

Küçükdemirci, M., Özer, E., Salvatore, P., Baydemir, N. & Zamuner, D. (2017). An application of integration approaches for archaeogeophysical data: Case study from Aizanoi. *Archaeological Prospection, 25*, 33–44.

Lake, A.K. (1937). The origin of the Roman House. *American Journal of Archaeology, 41*(4), 598-601.

Lang Auinger C. (1996). *Forschungen in Ephesos VIII/3. Hanghaus I in Ephesos: der Baubefund. Wien.* Österreichischen: Österreichischen Akademie der Wissenschaften.

Leopold, M., T. Plöckl, G. Forstenaicher, & J. Völkel. (2010). Integrating pedological and geophysical methods to enhance the informative value of an archaeological prospection – the example of a Roman villa rustica near Regensburg, Germany. *Journal of Archaeological Science, 37*(7),1731–1741. http://dx.doi.org/10.1016/ j.jas.2010.01.03.

Leucci, G. (2002). Ground-Penetrating Radar Survey to Map the Location of Buried Structures under Two Churces. *Archaeological Prospection, 9*, 217-228.

Loke, M. H. (2000). *Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies. A Practical Guide to 2-D and 3-D surveys.*

Mala Geoscience. (2003). *Basic Radar Theory, Fundamentals of Ground Penetrating Radar*. (CD). Sweden.

Marshall, A. (1999). Magnetic Prospection at High Resolution: Survey of Large Silo-pits in Iron Age Enclosures. *Archaeological Prospection, 6*,11-29.

Matias M.S. & Almeida F. (1992). Geophysical Survey on the Archaeological Site of MugardosNw Iberian Peninsula). *Journal of Applied Geophysics, 29*(2), (119-124).

Mufti, I.R. (1976). Finite Difference Resistivity Modeling For Arbitrarily Shaped Two-Dimensional Structures. *Geophysical Prospecting, 41*(1),62-78.

Neal, A. (2004). Ground-penetrating radar and its use in sedimentology: principles, problems and progress. *Earth Science, 66*(3), 261-330.

Niederleithinger, E., Wolf, J., Mielentz, F., Wiggenhauser, H. & Pirskawetz, S. (2015) Embedded Ultrasonic Transducers for Active and Passive Concrete Monitoring. *Sensors, 15*(5), 9756-9772.

Ongar, A. (2014). *Kuyu İçi Jeofizik Uygulamalarda Elektrik Özdirenç Tomografi (ERT) Yöntemi ve Modellenmesi*. (Yüksek lisans tezi).Dokuz Eylül Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.

Öner, E. (1993). *Antik Patara kenti sit alanının jeomorfolojisi*. (Türkiye Kuvaterneri Workshop Bildiri Özleri). İstanbul Teknik Üniversitesi/Maden Fakültesi, İstanbul. 21-23.

Öner, E. (1997b). Eşen Ovasının Alüvyal Jeomorfolojisi ve Likya Antik Kentleri. *Ankara Üniversitesi Türkiye Coğrafyası Araştırma ve Uygulama Merkezi.* 6, 203-242.

Öner, E. (2009). *Güneybatı Anadolu'nun Kıyı Jeomorfolojisi (Teke Yarımadası Kıyı Bölümü).* TÜBİTAK: ÇAYDAG 199Y078 nolu proje.

Öner, E. & Akbulut, H. (2015). Paleocoğrafik jeoarkeolojik bulgular ışığında Patara Apollon Tapınağının yerinin tartışılması Patara Apollon Tapınağı Kısık Boğazında mıydı Eşen Ovası Muğla Antalya. *Ege Coğrafya, 24*(2), 69-105.

Öztürk, C. (2004). *Kalenderis Antik Kentindeki Arkeolojik Yapıların Elektrik Özdirenç Yöntemiyle araştırlması*. (Yükseklisans tezi). Süleyman Demirel Üniversitesi/ Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.

Öztürk, K. (1995). *Elektrik ve Elektromanyetik Prospeksiyon Yöntemleri, Temel Kavramlar, Uygulama ve Yorumlama.* İstanbul: İstanbul Üniversitesi.

Özyalın, Ş., Balkaya, Ç. & Erhan, Z. (2010). Metropolis Antik Kentindeki tümleşik jeofizik çalışmalar. *Türkiye 19. Uluslararası Jeofizik Kongre ve Sergisi.* Ankara.

Palombo A., Pignatti S., Perrone A., Soldovieri F., Stabile T. A. & Pascucci S. (2011). Noninvasive RemoteSensing Techniques for Infrastructures Diagnostics. *Geophysical Journal International, 2011, 9*. doi:10.1155/2011/204976.

Patara. (2018). 30 Kasım 2018 tarihinde http://www.hurriyet.com.tr/patara-antik-kentinde-30uncu-yil-kazilari-40888268 adresine erişildi.

Pattantyus M. (1986). Geophysical Results in Archaeology in Hungry. *Geophysics, 51*(3), 561-567.

Pérez-Gracia, J., Caselles, O., Clapés, J., Martinez, G. & Osorio, R. (2013) Non-destructive analysis in cultural heritage buildings: Evaluating the Mallorca cathedral supporting structures. *Non Destructive Testing and Evaluation, 59*, 40-47.

Robertson, A.H.F. & Dixon J.E. (1984). Aspects of the geological evolution of the eastern Mediterranean. Geological Society, *17*, 1-74. Doi:10.1144/GSL.SP.1984.017.01.02.

Roy, A. & Apparao, A. (1971a). Depth of investigation in direct current methods. *Geophysics, 36*, 943-959.

Roy, A., & Apparao, A. (1971b). The two-electrode system of resistivity prospecting. *Presented at the symposium on 'Exploration techniques for metalliferous deposits' held*. Rajasthan.

Sabbağ, N. (2012). *Atatürk Baraj Gölünün Tuzlanmasına Neden Olabilecek Jeolojik Yapıların Doğru Akım Özdirenç ve Elektro Manyetik Yöntemlerle Tanımlanması*. (Yüksek lisans tezi). Ankara Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Saltuk S. (1993). *Arkeoloji Sözlüğü*, (2. Baskı). İstanbul: İnkilap.

Schön, J. (1998). *Physical Properties of Rocks Fundamentals and Principle of Petrophysics.* Wisconsin: Elsevier.

Sears, F.W., Zemansky, M.W., & Young H.D. (1982). *University Physics* (6th. Edition). Germany: Addison-Westley Publishing.

Sensors & Softwares. (1999). *Practical Processing of GPR Data*. Canada.

Sezer, H. (2010). *Yer Radarı Yöntemi İle Zonguldak Demir Yolu Tünelinin Duraylılığının Ve Çevresel Etkilerinin Araştırılması*. (Yüksek lisans tezi). Ankara Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Snieder, R., Hubbard, S., Haney, M., Bawden, G., Hatchell, P., Revil, A., Calvert, R., Curtis, A., Fehler, M., Gerstoft, P., Hornby, B., Landro, M., Lesmes, D., Mehta, K., Mooney, M., Pacheco, C., Prejean, S., Sato, H., Schuster, J., Wapenaar, K.& Wilt, M. (2007). Advanced non-invasive geophysical monitoring techniques. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences,* 35, 653–683.

Soldovieri, F., Dumoulin, J. & Masini, N. (2011). Noninvasive Sensing Techniques and Geophysical Methods for Cultural Heritage and Civil Infrastructures Monitoring. *International Journal of Geophysics, 38,* 1-2. doi:10.1155/2011/487679

Soldovieri, F., Dumoulin, J., Masini, N. & Solimene, R. (2012). Noninvasive Sensing Techniques. *Journal of Geophysics and Engineering, 10(6),* 201-212. Doi: 10.1088/1742-2132/10/6/060201.

Spies B.R. & Eggers D.E. (1986). The use and misuse of apparent resistivity in electromagnetic methods. *Geophysics, 51,* 1462-1471.

Strabon. (2005). *Antik Anadolu Coğrafyası/ Geographika.* Adnan Pekman (Çev.). İstanbul: Arkeoloji Sanat.

Stern, W. (1929). Versuch Einer Electrodynamischer Dickenmessung von Gletschereis. *Gerlands Beitrzur Geophysic, 23,* 292-333.

Stern, W. & Grundlagen, U. (1930). Methodik und Bisherige Ergebnisse Elektrodynamischer Dickenmessung von Gletschereis. Z., *Gletscherkunde, 15,* 24-42.

Stummer, P. (2003). New developments in electrical resistivity imaging**.** *Natural Resources***,** *5(*12), 2727–2735.

Sutherland, T.L., Schmidt, A. & Dockrill, S.J. (1998). Resistivity Pseudosections and their Topographic. *Archaeological Prospection, 5,* 229-237.

Sünbül, F. (2007). *Balıkesir-Burhaniye-Ören'deki Bergaz Tepe Adremytteıon Antik Alanının Arkeojeofizik Yöntemlerle Tespiti*. (Yüksek lisans tezi). Sakarya Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.

Şenel, M. (1997a). *1/250000 ölçekli Türkiye Jeoloji Haritaları No: 2 Fethiye Paftası.* MTA Jeoloji Etütleri Dairesi, Ankara.

Şengör, A.M.C & Yılmaz, Y. (1981). Tethyan evolution of Turkey: A plate tectonic pproach. *Tectonophysics, 75,* 181-241.

Tabanlı, D. (2007). Roma Dönemi Mozaiklerinin Efes Örneğinde İncelenmesi. (Yükseklisan tezi). Dokuz Eylül Üniversitesi/ Güzel Sanatlar Enstitüsü, İzmir.

TAY.(2008). 16 Kasım 2018 tarihinde http://www.tayproject.org/tahrip.html adresine erişildi.

Testone, V., Longo, V. & Mameli, P. (2014). Geoelectrical Surveys to investigate the Santa Filitica Archaeological Complex (Northern Sardinia). *Archaeological Prospection, 22,* 63–74. Doi: 10.1002/arp.1493.

Tsokas, G. N., Giannopoulos A., Tsourlos P., Vargemezis G., Tealby J.M., Sarris A., Papazachos, C.B. & Savopoulou T. (1994). A Large Scale Geophysical Survey in The Archaeological Site of Europos (Northern Greece). *Journal of Applied Geophysics, 32,* 85-98.

Uluslararası. (2018). (30 Ekim 2018 tarihinde http://teftis.kulturturizm.gov.tr/TR,13908/uluslararasi-sozlesmeler.html adrrsine erişildi.

Üstol, G. (2013). *Pisidia Antiokheia Antik Kentinde (Yalvaç, Isparta) Yer Radarı ve Elektrik Özdirenç Tomografi Araştırması*. (Yüksek lisans tezi). Süleyman Demirel Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.

Üstol, G., Balkaya, Ç. & Kalyoncuoğlu, Ü. Y. (2013). First results of ground penetrating radar and electrical resistivity tomography surveys in the Pisidia Antiokheia Ancient City (Yalvaç, Isparta). *The 20th International Geophysical Congress and Exhibition*. Turkey.

Van der Kruk, J., Streich, R. & Green, A.G. (2006). Properties of surface waveguides derived from separate and joint inversion of dispersive TE and TM GPR data. *Geophysics,* 71, 263-273.

Van Nostrand, R. G. & Cook, K. L. (1966). *Interpretation of resistivity data. USGS Prof.* Washington: Paper, Printing Office.

Varlı, T.B. (2005). *Şehir Alt Yapı Planlamasında Özdirenç Yöntemi ve İki Boyutlu Özdirenç Ters Çözüm Uygulamaları*. (Yüksek lisans tezi). İstanbul Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Varmaz, Ş. (2015). *Patara Su Yolu Çalışmalarında Ele Geçen Hellenistik Dönem Seramikleri.* (Yükseklisan tezi). Pamukkale Üniversitesi/Sosyal Bilimler Enstitüsü, Denizli.

Vaughan C.J. (1986). Ground- Penetrating Radar Surveys Used in Archaeological Investigations. *Geophysics, 51*(3), 595-604.

Waites, M.C. (1914). The From of the Early Etruscan and Roman House. *Classical Philology, 9*(2), 113-133.

Walther, E.G., Pitchford A.M. & Olhoeft G.R. (1986). *A strategy for detecting subsurface organic contaminants Natl. Water Well Assoc./API Conf. Petrol. Hydrocarb. Org. Chem. Ground Water Prev., Detect. Restor., Houston.* (s. 357–81). OH: Natl. Water Well Assoc.

Ward, S. H. (1990). Resistivity and induced polarization methods. In Geotechnical and Environmental Geophysics. *Investigations in Geophysics, 5*, 147-190.

Wynn, J.C. (1986). Archaeological Prospection: An Introduction to The Special Issue. *Geophysics, 51*, 553-537.

Yaramancı A. (1970). *Keban Projesi Jeofizik Araştırmaları Ön Raporu, 1968 Yaz Çalışmaları, ODTÜ Keban Projesi Yayınları, Seri: 1*, (s.13-19). Ankara: TTKB.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı: Serbay KÜÇÜKDUVAN

Doğum Yeri: Edirne

Doğum Yılı: 1991

Medeni Hali: Bekar

Eğitim ve Akademik Durumu:

Lise :2006-2010 1. Murat Lisesi (Edirne)

Lisans :2010-2015 Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Jeofizik Mühendisliği Bölümü (Isparta)

Yüksek Lisans: 2017-…Trakya Üniversitesi, Fenbilimleri Enstitüsü, Uygulamalı Bilimler ve Teknoloji Ana Bilim Dalı (Edirne)

Yabancı Dil: İngilizce

Burslar / Projeler

Patara Antik Kenti Gömülü, Roma Villalarının Jeofizik Elektrik Özdirenç Yöntemi Tomografi Tekniği ile Belirlenmesi. Trakya Üniversitesi Yüksek Lisans Araştırma Projesi (TÜBAP Projesi-2018/160) .

Konferans ve Sempozyumlar

Küçükduvan, S., ve Kaya, M. A., "Yakın Yüzey Jeofizik (Near Surface Geophysics)", Trakya Üniversiteler Birliği 3. Lisans Üstü Öğrenci Kongresi, NKÜ, Tekirdağ, 3 Mayıs 2018 (Poster Sunumu).