

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**JEOFİZİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**GÖMÜLÜ YAPILARIN YER RADARI VE DOĞRU AKIM
ÖZDİRENÇ YÖNTEMİ İLE ARAŞTIRILMASI: İZMİT ÖRNEĞİ**

MUSTAFA YALTIRAK

KOCAELİ 2021

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

JEOFİZİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

GÖMÜLÜ YAPILARIN YER RADARI VE DOĞRU AKIM
ÖZDİRENÇ YÖNTEMİ İLE ARAŞTIRILMASI: İZMİT
ÖRNEĞİ

MUSTAFA YALTIRAK

Doç.Dr. Ertan PEKŞEN

Danışman, Kocaeli Üniv.

.....

Doç.Dr. İbrahim SERTÇELİK

Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.

.....

Dr.Öğr. Üyesi Ayhan KESKİNSEZER

Jüri Üyesi, Sakarya Üniv.

.....

Tezin Savunulduğu Tarih: 16.06.2021

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Çalışmamın ortaya çıkması sürecinden başlayarak her aşamasında gösterdiği destek ve ilgiyle çalışmamın ilerlemesine büyük destek sağlayan ve ufkumu genişleterek yönlendiren danışman hocam Sayın Doç. Dr. Öğr. Üyesi Ertan PEKŞEN'e sonsuz minnet ve teşekkürlerimi sunuyorum.

Arazi verilerinin alınmasında ve değerlendirilmesinde her türlü desteği ve yardımı esirgemeyen Kocaeli Üniversitesi Arş. Gör. Dr. İsmail KAPLANVURAL' a, Kocaeli Büyükşehir Belediyesi mesai arkadaşlarım Recep ÖZ ve Onur KASAP'a teşekkür ederim.

Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Jeofizik Mühendisliği Bölümü'ne bu çalışmada arazide toplanan verileri değerlendirmek için kullandığımız RES2INV, RES3INV yazılımlarını kullandırdıkları için ve Tespit Mühendislik'e yer radarı verilerini değerlendirmede kullandığımız Reflexw programını sağladıkları için teşekkür ederim.

Yoğun tempoda çalıştığım dönemlerde kendilerini ihmal ettiğim fakat her an desteklerini gördüğüm aileme ve bu yoğun tempunun tüm yoğunluğu ve sıkıntılarını aşmada, maddi manevi her anlamda yanımda olan eşim Şule YALTIRAK'a çocuklarım Ceyda, Erva ve Alperen Zekai YALTIRAK'a sonsuz teşekkür ediyorum.

Haziran – 2021

Mustafa YALTIRAK

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER.....	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ	iii
TABLolar DİZİNİ	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	viii
ÖZET	ix
ABSTRACT	x
GİRİŞ	1
1. ÇALIŞMA ALANI	3
2. YER RADARI (GPR) YÖNTEMİ	5
2.1. Yer Radarı (GPR) Yöntemine Giriş	5
2.2. Arkeolojide Yer Radarı Kullanımı	6
2.3. Yer Radarının Çalışma Prensipleri	7
2.4. Araştırma Amacına Göre Belirlenen Parametreler	18
2.5. Yer Radarının Çalışmasına Etki Eden Faktörler	19
2.6. Arazi Ölçüm Tekniği	21
2.7. Uygun Anten Seçimi	23
2.8. Alıcı ve Verici Antenlerinin Dizilimi	27
2.9. Ölçüm Açılım Örnekleri	27
2.9.1. Ortak açılım (CO, Common offset)	28
2.9.2. Ortak orta nokta (CMP, Common mid point)	29
2.10. Yer Radarı Verilerinin Değerlendirilmesi, Yorumu ve Verilere Uygulanan Temel Veri-İşlem Aşamaları	30
2.10.1. Süzgeçleme	32
2.10.2. Genlik kazanç uygulaması	33
2.10.3. Üç boyutlu (3B) veri görüntüleme	34
2.10.4. Çalışma alanı gpr verilerine uygulanan veri işlemler	36
2.11. Çalışma Alanı GPR Verilerinin Toplanması ve Değerlendirilmesi	38
3. ELEKTRİK ÖZDİRENÇ YÖNTEMİ	65
3.1. Elektrik Öz direnç (Rezistivite/DES) Yöntemine Giriş	65
3.2. Kayaçların Elektrik Özellikleri	68
3.3. Veri Toplama	70
3.3.1. Ekipmanların tanıtılması	70
3.3.2. Elektrot açılım sistemleri	71
3.3.3. Ölçü alımı	73
3.4. Düz Çözüm	78
3.5. Ters Çözüm	79
3.6. Çalışma Alanı Çok Elektrotlu Elektrik (Ert) Verilerinin Toplanması ve Değerlendirilmesi	81
4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	97
KAYNAKLAR	98
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER	104
ÖZGEÇMİŞ	105

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	İnceleme alanına ait uydu görüntüsü	3
Şekil 1.2.	Çökme alanı.....	4
Şekil 2.1.	Yer radarı sisteminin basit bir gösterimi.....	8
Şekil 2.2.	Dalga iletim düzenekleri (a) yansıma (b) kırılma (c) kırınım, (d) çınılama	14
Şekil 2.3.	GPR alanın dielektrik sabitleri farklı iki ortam sınırında yansıma ve kırılması.....	16
Şekil 2.4.	Yer radarı ölçümlerinde bir profil üzerinde bir noktada kayıt edilen tek izin genlik düzeltmesi uygulandıktan sonraki gösterimi.....	17
Şekil 2.5.	İnceleme alanı üzerinde belirlenen profiller boyunca alınan sinyal izlerinin yan yana getirilmesiyle elde edilen yer radarı kesiti (radargram), (a) tekrarlı sinyal izlerinin görüntü kesiti, (b) gri renk yoğunluğunda görüntü kesiti	17
Şekil 2.6.	Yer radarı ölçümlerinde derinlik, frekans ve ayrımlılık ilişkisinin gösterimi	21
Şekil 2.7.	Yer radarı arazi ekipmanı.....	22
Şekil 2.8.	Yer radarı yönteminin arazide uygulanışı.....	23
Şekil 2.9.	Aynı hat üzerinde farklı frekanslara sahip antenler ile alınmış ölçüler sonucu elde edilen radagramlar. a) 50 MHz, b) 100 MHz, c) 200 MHz.....	24
Şekil 2.10.	Örnekleme aralığı etkisini göstermek amacıyla yapay yolla elde edilmiş hendek biçimli bir yer altı yapısına ilişkin üç farklı örnekleme aralığından radagramlar. (a) 25,6cm, (b) 51,2cm, (c) 102,4cm	26
Şekil 2.11.	Yer radarı anten dizilimleri a) paralel bakışık b) paralel ardışık c) dik bakışık d) dik ardışık e, f) çapraz kutup.....	27
Şekil 2.12.	Yer radarı ölçümlerinde kullanılan çeşitli anten kombinasyonları.....	27
Şekil 2.13.	Sabit aralıklı yansıma hız sondajı uygulaması usulü derinlik kesiti (a), zaman kesiti (b).....	28
Şekil 2.14.	TX-RX aralığı sabit iken yer radarı yansıma kesitinin elde edilmesinin şematik gösterimi.....	29
Şekil 2.15.	Ortak orta nokta uygulaması usulü derinlik kesiti (a), zaman kesiti (b)	30
Şekil 2.16.	Yer radarı verilerinin hiperbolik dağılımı.....	31
Şekil 2.17.	Yer radarı verilerine uygulanan veri-işlem akış şeması.....	32
Şekil 2.18.	GPR verisinde frekansların süzgeçlenmesi a) Ham yer radarı sinyali, b) Doğru süzgeçlenmiş sinyal, c) Yanlış süzgeçlenmiş sinyal.....	33
Şekil 2.19.	a) Doğru süzgeçlenmiş radagram, b) Yanlış süzgeçlenmiş radagram.....	33

Şekil 2.20. Şekil 2.19'daki radagramlara aynı genlik kazanç fonksiyonunun uygulanması, a) Doğru süzgeçlenmiş radagram, b) Yanlış süzgeçlenmiş radagram.....	34
Şekil 2.21. Paralel 2B verilerin konumlarına göre sıralanarak görünür 3B veri bloğunun elde edilmesi.....	35
Şekil 2.22. Veri işlem adımları tamamlanmış yer radarı verilerinin; (a) 3B düzlem örnekleri ve (b) 3B tüm kesit ve alt dilimlerin görüntüleme örnekleri. (b) de gösterimi yapılan görüntülemeye 3B katı blok görüntüleme denmektedir. İç bölümleri tam olarak görüntülenemeyen katı bloklarda genlik-renk ölçeklemesi değiştirilerek istenilen genlikler belirginleştirilir. Sadece aranan yapının görüntülenebildiği saydam 3B blok görüntüleme yapılabilir.	35
Şekil 2.23. Çalışma alanında alınan toplam 44 yer radarı ölçüsünden KRES_A_01 profiline ait verinin ham radargram görünümü.....	36
Şekil 2.24. Subtract mean (dewow) düzeltmesi uygulanmış radargram.....	37
Şekil 2.25. Genlik kazanç (gain) düzeltmesi uygulanmış radargram.....	37
Şekil 2.26. Bant geçişli süzgeç (bandpass frequency) işlemi uygulanmış radargram	38
Şekil 2.27. Background removal veri işlemi uygulanmış radargram.....	38
Şekil 2.28. Çökme bölgesi birinci araştırma alanı	39
Şekil 2.29. Yer radarı ile ölçü alınan profillerin yerleri sarı renkli çizgilerle, elektrik özdirenç yöntemi ile ölçü alınan profillerin yerleri kırmızı renkli çizgilerle gösterilmektedir.....	39
Şekil 2.30. Çalışma Alanı 1 (Çökmenin Olduğu Alan) 1 ve 2 nolu profillerin ham verileri.....	40
Şekil 2.31. Çalışma Alanı 1 (Çökmenin Olduğu Alan) 3 ve 4 nolu profillerin ham verileri.....	41
Şekil 2.32. Çalışma Alanı 1 (Çökmenin Olduğu Alan) 5 ve 6 nolu profillerin ham verileri.....	42
Şekil 2.33. Çalışma Alanı 1 (Çökmenin Olduğu Alan) 7 ve 8 nolu profillerin ham verileri.....	43
Şekil 2.34. Çalışma Alanı 1 (Çökmenin Olduğu Alan) 9 ve 10 nolu profillerin ham verileri.....	44
Şekil 2.35. Çalışma Alanı 1 (Çökmenin Olduğu Alan) 11 ve 12 nolu profillerin ham verileri.....	45
Şekil 2.36. Çalışma Alanı 1 (Çökmenin Olduğu Alan) 13 ve 14 nolu profillerin ham verileri.....	46
Şekil 2.37. Çalışma Alanı 1 (Çökmenin Olduğu Alan) 15 ve 16 nolu profillerin ham verileri.....	47
Şekil 2.38. Çalışma Alanı 1 (Çökmenin Olduğu Alan) 0,0 m.-0,6 m. arası sonuç radargramları	48
Şekil 2.39. Çalışma Alanı 1 (Çökmenin Olduğu Alan) 0,5 m.-1,2 m. arası sonuç radargramları	49
Şekil 2.40. Çalışma Alanı 1 (Çökmenin Olduğu Alan) 1,1 m.-1,6 m. arası sonuç radargramları	50
Şekil 2.41. 1.Alan Güney-Kuzey yönlerinde alınan GPR ölçülerinden elde edilen radargramlar.	51

Şekil 2.42.	1. Alan Batı-Doğu yönlerinde alınan GPR ölçülerinden elde edilen radargramlar	52
Şekil 2.43.	Profil aralığı 0,5 m ve profil uzunluğu 8 m olan, birbirine dik 32 profilden oluşan 1. alanın yapılan değerlendirmesi	53
Şekil 2.44.	Çalışma Alanı 2 (Üst-Arka) 1 ve 2 nolu profillerin ham verileri	54
Şekil 2.45.	Çalışma Alanı 2 (Üst-Arka) 3 ve 4 nolu profillerin ham verileri	55
Şekil 2.46.	Çalışma Alanı 2 (Üst-Arka) 5 ve 6 nolu profillerin ham verileri	56
Şekil 2.47.	Çalışma Alanı 2 (Üst-Arka) 7 ve 8 nolu profillerin ham verileri	57
Şekil 2.48.	Çalışma Alanı 2 (Üst-Arka) 9 ve 10 nolu profillerin ham verileri	58
Şekil 2.49.	Çalışma Alanı 2 (Üst-Arka) 11 ve 12 nolu profillerin ham verileri.....	59
Şekil 2.50.	Çalışma Alanı 2 (Üst-Arka) 0,0m.-0,6 m. arası sonuç radargramları	60
Şekil 2.51.	Çalışma Alanı 2 (Üst-Arka) 0,5m.-1,2 m. arası sonuç radargramları	61
Şekil 2.52.	Çalışma Alanı 2 (Üst-Arka) 1,1m.-1,6 m. arası sonuç radargramları	62
Şekil 2.53.	2. Alanda ölçülen GPR verileri Batı-Doğu	63
Şekil 2.54.	Profil aralığı 0,5 m ve profil uzunluğu 27 m olan 12 profilden oluşan 2. alanın yapılan değerlendirmesi	64
Şekil 3.1.	(a) Çok elektrotlu öz direnç cihazı ve ekipmanları (b) Homojen kabul edilen bir yer altında elektrik akımı ve buna bağlı oluşan voltaj hatlarının düşey düzlemde gösterimi	66
Şekil 3.2.	Elektrik öz direnç görüntüleme yönteminin bazı uygulama örnekleri	68
Şekil 3.3.	Numune öz direncinin ölçülmesi.....	69
Şekil 3.4.	Homojen yer altında elektrik akım ve eş potansiyel hatlarının yatay düzlemde dağılımı	70
Şekil 3.5.	Yüksek öz dirençli bir yer altı modeli olması durumunda yatay düzlem içinde akım ve eş gerilim (potansiyel) hatlarının dağılış şekli.....	70
Şekil 3.6.	Çok kanallı ve elektrotlu doğru akım öz direnç cihazı ve arazideki konumları. Cihaz akü, alıcı-verici ünitesi, switcher, kablo ve elektrotlardan oluşmaktadır.....	71
Şekil 3.7.	Elektrot dizilim örnekleri ve geometrik faktörleri.....	73
Şekil 3.8.	WDJD-3 öz direnç ölçüm cihazıyla WDZJ-3 anahtarlayıcısının bağlantı şeması	74
Şekil 3.9.	İki boyutlu elektrik öz direnç araştırmaları için elektrot dizilimleri	75
Şekil 3.10.	Wenner α dizilimine göre çok elektrotlu öz direnç yöntemi arazi ölçüm düzeneği.....	77
Şekil 3.11.	a) 1B model, b) 2B model, c) 3B model	78
Şekil 3.12.	Nicel yorumlamanın basitleştirilmiş akış şeması	79
Şekil 3.13.	1B elektrik öz direnç ters-çözüm şeması	80
Şekil 3.14.	Birinci alanın içerisinde elde edilen öz direnç kesiti örneği	82
Şekil 3.15.	Wenner Profil 1-3 için görünür, hesaplanan ve ters çözüm gerçek öz direnç tomografi kesitleri	83
Şekil 3.16.	Wenner Profil 4-6 için görünür, hesaplanan ve ters çözüm gerçek öz direnç tomografi kesitleri	84

Şekil 3.17. Wenner Profil 6-9 için görünür, hesaplanan ve ters çözüm gerçek özdirenç tomografi kesitleri	85
Şekil 3.18. Schlumberger Profil 1-3 için görünür, hesaplanan ve ters çözüm gerçek özdirenç tomografi kesitleri	86
Şekil 3.19. Schlumberger Profil 4-6 için görünür, hesaplanan ve ters çözüm gerçek özdirenç tomografi kesitleri	87
Şekil 3.20. Schlumberger Profil 6-9 için görünür, hesaplanan ve ters çözüm gerçek özdirenç tomografi kesitleri	88
Şekil 3.21. Wenner Alfa dizilimine göre alınan ölçülerin 3B görüntülerinden elde edilen 0,5m-2,5m aralığındaki özdirenç kesitleri.....	89
Şekil 3.22. Wenner Alfa dizilimine göre alınan ölçülerin 3B görüntülerinden elde edilen 2,5m-5,53m aralığındaki özdirenç kesitleri	90
Şekil 3.23. Schlumberger dizilimine göre alınan ölçülerin 3B görüntülerinden elde edilen 0,0m-1,74m aralığındaki özdirenç kesitleri	91
Şekil 3.24. Schlumberger dizilimine göre alınan ölçülerin 3B görüntülerinden elde edilen 1,74m-4,48m aralığındaki özdirenç kesitleri	92
Şekil 3.25. Schlumberger dizilimine göre alınan ölçülerin 3B görüntülerinden elde edilen 4,38m-6,86m aralığındaki özdirenç kesitleri	93
Şekil 3.26. Elektrot aralığı 1 m ve profil uzunluğu 29 m olan 30 elektrotlu Wenner elektrot dizilimi ölçülerinden elde edilen özdirenç seviye haritaları.	94
Şekil 3.27. Elektrot aralığı 1 m ve profil uzunluğu 29 m olan 30 elektrotlu Schlumberger elektrot dizilimi ölçülerinden elde edilen özdirenç seviye haritaları	95
Şekil 3.28. 4,48m-5,53 m derinlik için özdirenç seviye haritası	96

TABLULAR DİZİNİ

Tablo 2.1. Bazı malzemelerin elektriksel özellikleri.....	11
Tablo 2.2. Anten frekansına bağlı yaklaşık araştırma derinliği	12
Tablo 2.3. Yer radarı çalışmalarında anten frekansları, elektrik iletkenlik ve dielektrik sabitleri arasındaki ilişki.....	20
Tablo 2.4. Farklı dielektrik geçirgenlik değerlerine sahip ortamlarda seçilen anten frekanslarına göre frekans dalga boylarının değişimi	24



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

α	:	Alfa
β	:	Beta
γ	:	Gama
ρ	:	Elektrik Özdirenç
a	:	Görünür Özdirenç
σ	:	Elektrik İletkenlik
Ω	:	Ohm
ϵ	:	Dielektrik Geçirgenlik
μ	:	Manyetik Geçirgenlik
$i\beta$:	İletkenlik Akımı
v	:	Elektromanyetik Dalganın Faz Hızı
λ	:	Elektromanyetik Dalga Boyu
η	:	Elektromanyetik Dalganın Sönümü
Δ	:	Fark

Kısaltmalar

CMP	:	Common Mid Point (Ortak Orta Nokta)
CO	:	Common Offset (Ortak Açılım)
CR	:	Common Receiver (Ortak Alıcı)
CS	:	Common Source (Ortak Kaynak)
CU	:	Control Unit (Control Ünitesi)
DES	:	Düşey Elektrik Sondaj
EM	:	Elektromanyetik
f	:	Frekans
FM	:	Frequency Modulation (Frekans Modülasyonu)
GPR	:	Ground Penetrating Radar (Yer Radarı)
GPS	:	Global Positioning System (Küresel Konumlandırma Sistemi)
I	:	Yere Uygulanan Akım
IP	:	Induced Polarization (İndüklenmiş Polarizasyon)
L	:	Uzunluk
R	:	Direnç
RMS	:	Root Mean Square (Karekök Ortalama)
S	:	Alan
SP	:	Self Potential (Öz Potansiyel)
UTM	:	Universal Transverse Mercator (Evrensel Enlem Merkatörü)
V	:	Gerilim

GÖMÜLÜ YAPILARIN YER RADARI VE DOĞRU AKIM ÖZDİRENÇ YÖNTEMİ İLE ARAŞTIRILMASI: İZMİT ÖRNEĞİ

ÖZET

Bu çalışmada İzmit ilçesindeki bir anaokulu bahçesinde meydana gelen doğal çöküntüler yer radarı ve doğru akım özdirenç yöntemleri ile incelenmiştir. Araştırma alanı, Kocaeli ilinin İzmit ilçesinde kreş olarak kullanılan bir binanın bahçesidir. Bahçede yapılan yer radarı çalışması, oluşturulan 8x8 metrelik ve 12x27 metrelik iki alan içinde 0,5m profil aralıkları ile ölçüler alınarak gerçekleştirilmiştir. Özdirenç çalışmaları ise toplamda 9 profilde ve 2m aralıklı gerçekleştirilmiştir. Gerek yer radarı ve gerekse özdirenç yöntemleri ile ölçülen verilerin değerlendirilmesi sonucunda anaokulu bahçesinde özdirenci yüksek anomali bölgeleri tespit edilmiştir. İlgili anomaliler bu bölgenin 1.derece sit alanı (Nikomedia) olması nedeniyle arkeolojik kalıntı olma olasılığını yükseltmektedir.

Anahtar Kelimeler: Arkeojeofizik, Doğru Akım Özdirenç, Yer Radarı.

INVESTIGATION OF BURIED STRUCTURE BY GROUND PENETRATING RADAR AND DIRECT CURRENT RESISTIVITY METHODS: A CASE STUDY OF İZMİT

ABSTRACT

In this study, a piece of subsidence area in the garden of a day-care center was investigated by ground-penetrating radar (GPR) and electrical resistivity tomography (ERT) methods. The study area is the garden of a day-care center located in İzmit, Kocaeli, Turkey. In the study areas, two parts were investigated in 8x8 and 12x27m² dimensions of 0.5m profile spacing. The resistivity method has 9 profiles with a 2m profile spacing. As a result of the evaluation of the data measured by GPR and ERT methods, regions with high resistivity anomalies were determined in the garden of the day-care center. The results suggest that the subsidence area can be related to the archaeological remains, since the study area is a part of Nicomedia ancient city.

Keywords: Archeogeophysics, Direct Current Resistivity, Ground Radar.

GİRİŞ

Jeofizik yöntemlerden yer radarı (Ground Penetrating Radar, GPR) ve çok elektrotlu doğru akım özdirenç yöntemi (Electrical Resistivity Tomography, ERT) sığ problemlerin araştırılmasında, uygulamalı jeofiziğin pek çok alanında başarılı bir şekilde sıklıkla kullanılmaktadır (Loke, 2019, Erkul vd. 2011; Reynolds, 2011). Bu çalışmada anaokulu bahçesinde oluşan çökme problemini araştırmak için GPR ve ERT yöntemleri uygulanmıştır.

Yer radarı yöntemi, sığ yer altı araştırmalarında sıklıkla kullanılan ve başarılı sonuçlar veren bir yöntemdir. Yer altı içerisinde birçok bilinmeyi barındıran karmaşık bir yapıdır. Yeryüzündeki oturma ve çöküntülerin sebepleri de yer altı zemin problemleri ile ilgilidir. Yeryüzünde oluşan doğal çöküntülerin çok çeşitli nedenleri olabilir. Kireçtaşı içeren formasyonlarda yer altı suyu hareketlerinden dolayı olan çöküntüler dünyanın pek çok çeşitli yerlerinde gerçekleşmektedir. Çalışma yapılan alan dikkate alındığında göz önüne alınan problem, arkeolojik bir kalıntı ile ilişkilendirilebilir.

Jeofizik yöntemlerin her biri farklı fiziksel özelliklere duyarlıdır. Bu nedenle birden fazla jeofizik yöntemi birlikte kullanmak sonuçların ya da kesitlerin daha kolay yorumlanmasını sağlayabilir. Bu duruma örnek olarak Carrara vd. (2001), yer radarı ve elektrik özdirenç yöntemlerini, Osella vd. (2005) ise elektrik ve EM yöntemleri bir arada kullanarak yürüttükleri arkeolojik alan araştırmaları verilebilir. Jeofizik araştırmaların tek hedefi gömülü cisimleri bulmak değildir. Örneğin Negri ve Leucci (2006), Hierapolis antik kentindeki Apollo Tapınağı altından geçtiğini düşündükleri bir fayı jeofizik yöntemlerle görüntülemeye çalışmışlardır. Çalışmalarında yer radarı ve elektrik özdirenç yöntemlerini kullanmışlardır.

Çalışma yapılan bölge Nicomedia antik kentinin ana yerleşim alanı içinde kalmaktadır. Antik dönemde çarşı olarak kullanılan alan üzerindeki kreşin, çocuk oyun bahçesinde bir yıldan fazla bir süredir zaman zaman çökme meydana geldiği ve düzenli olarak çöken kısma kum doldurulduğu, ancak zamanla yine çökmelerin

devam ettiği görölmüştür. Bunun üzerine alan jeofizik yöntemlerle araştırılmıştır. Çalışma alanında; birbirine paralel, 8x8m ve 12x27 m² ebatlarındaki iki ayrı kısımda, 300 MHz lik kapalı anten ve Zond 12 yer radarı cihazı ile 0,5 m profil aralıkları ile toplam 44 profil ölçü alınmıştır. Yapılan değerlendirmede GPR sinyallerinin; zeminin dolgu, kil ve su içeriği özellikleri nedeniyle 1,6 metreden daha aşağıya inemediği görölmüştür. Çok elektrotlu rezistivite yöntemi ile 9 profil ölçüler alınarak 5 m derinliğe kadar araştırılmıştır.



1. ÇALIŞMA ALANI

Doğal olarak oluşan çöküntünün sebebini araştırmak amacıyla yer radarı çalışması Kocaeli Büyükşehir Belediyesine bağlı olarak işletilen özel kreşin bahçesinde yapılmıştır. Kreş bahçesi, Kocaeli ilinin İzmit ilçesi, Kozluk Mahallesi, Sümer Sokağı'nda yer almaktadır (Şekil 1.1). Söz konusu inceleme alanı 1. derece sit alanı içerisinde kalmaktadır. Antik dönemde alanın çarşı olduğu ve inceleme alanında dükkanların olduğu bilinmektedir (Fıratlı, 1964)



Şekil 1.1. İnceleme alanına ait uydu görüntüsü

MTA 1/100.000 ölçekli jeoloji haritasına göre alan; Kuvaterner yaşlı alüvyon ve çakıltaşı-kumtaşı-çamurtaşı çökellerinden oluşmaktadır. Eğim %0-5 aralığında değişmektedir. Çöken (Şekil 1.2) kısmın kum vb. dolgularla kapatıldığı, çökmenin en son 26 Eylül 2019 tarihinde İstanbul Silivri açıkları Marmara Denizi'nde, aletsel büyüklüğü Kandilli Rasathanesi verilerine göre $M_L=5.7$, odak derinliği ise yaklaşık 13 km civarında olan sığ odaklı ve İzmit ilçesinde de hissedilen depremden sonra tekrar meydana geldiği kreş çalışanları tarafından ifade edilmiştir.



Şekil 1.2. Çökme alanı

2. YER RADARI (GPR) YÖNTEMİ

2.1. Yer Radarı (GPR) Yöntemine Giriş

Jeoradar/Yer altı radarı/Yapı Radarı (GPR: Ground Penetrating Radar) yöntemi, diğer jeofizik yöntemler gibi gözle görülemeyen ancak birçok bilgi barındıran sinyallerin analizine dayanan, yüzey araştırmalar için kullanılan yüksek frekanslı elektromanyetik bir jeofizik yöntemdir. RADAR kelimesi 1934'de "Radio Detection And Ranging" cümlesinden türetilmiştir (Buder, 1996). Tıptaki MR tekniğinin yer bilimlerindeki karşılığı olan yer altı radarı bir verici anten, alıcı anten, kontrol ünitesi ve kayıtçıdan oluşmaktadır. İnceleme alanına göre değişiklik gösterecek olan profil uzunluğu ve profil aralıklarına göre; verici anten ile yer içine gönderilen elektromanyetik dalgalar, alıcı anten ile zamanın fonksiyonu olarak kayıt edilirler. Yöntemde kullanılan sinyallerin yer içerisinde karşılaştıkları zemin birimleri ve yer altı yapılarından sonra gösterdiği davranışlar, oluşturdukları anomaliler, yansıma ve saçılmalar kaydedilerek yer yapısı hakkında bilgiler edinilmeye çalışılır. Ölçülerin zaman birimi, saniyenin milyarda biri küçüklüğünde olan nanosaniyedir. Yansıma ve saçılmaya uğrayarak alıcı anten-kayıtçı tarafından kaydedilen sinyallere "Radar İzi" veya "Elektromanyetik Dalga Alanı" adı verilir. Karmaşık yer altı sinyallerine veri işlem uygulanması gerekmektedir. Ham verilere bir takım veri işlem adımları ile gerekli filtreler uygulanarak yer içi yapıların verdiği yansıma ve anomaliler ortaya çıkartılır. Radar izlerinin birleştirilmesiyle inceleme alanı kesitlerini verecek olan radargramlar elde edilir. Radargramlar sismik yansıma yöntemindeki sismik kesitlere çok benzemektedir. Uygulanan veri işlem aşamaları sismik yöntemler ile birbirine benzerken, fark kullanılan dalgalardır. Sismik yöntemlerde elastik dalgalar kullanılır iken yer radarı yönteminde elektromanyetik dalgalar kullanılır. Radargramlarda birleştirilerek üç boyutlu kesitler elde edilebilir. Sığ yüzey araştırmalarında santimetre duyarlılığa sahip yöntem kolay, hızlı, yüksek çözünürlüklü ve tahribatsız olması nedeniyle de son dönemde kullanım alanı oldukça genişleyen bir yöntem haline gelmiştir.

Arkeolojik çalışmalarda, yer altı kablo ve boru hatlarının tespitinde en çok kullanılan jeofizik yöntemdir. İlk olarak 1904 yılında Hulsmeyer tarafından yer altındaki gömülü bir metal nesneyi bulmak için uygulanmıştır. Daha sonra 1911 yılında Lowy tarafından geliştirilen yöntem 1929 yılında Stern tarafından Avusturya'da buz kütlelerinin su altındaki derinliğini bulmak için uygulanmıştır. (Stern, 1929; Stern ve Grundlagen, 1930). Savunma amaçlı İkinci Dünya Savaşı sırasında uygulamaları yaygınlaşan radar sistemleri, analog yer radarı yöntemlerinin gelişmesiyle kullanım alanlarını daha da genişletmiştir. Madenlerde ana kaya haritalaması, göçük ve maden kazalarında ilk yardım amaçlı yer tespitleri, su kaçakları, endüstriyel atık ve çevre kirliliği tespitleri, tarihi kalıntıların bulunması, yer altındaki her türlü metal, kablo ve boru hatlarının tespitlerinde kullanılmaya başlamıştır. Killi, suya doygun, nemli, yüksek iletkenli zeminlerde sağlıklı veri elde edilememesi ve derinlik arttıkça çözünürlüğün azalması yöntemin dezavantajlarıdır. Bu çalışmamızda da benzer sorunlarla karşılaşmıştır.

Bunun yanında yöntem; deprem kuşağı üzerindeki ülkemizde mevcut yapı stoklarının incelenmesinde, yer radarının çalışma prensibine dayalı hasarsız yapı inceleme yöntemleri hızla gelişmektedir. (Jol, 2008; Kadioğlu ve diğ.,2008; Kaplanvural ve diğ., 2018) fay ve kırıkları (Grandjean ve Gourry, 1996; Dérobert ve Abraham, 2000; Kadioğlu ve diğ., 2005; Aldaş ve diğ., 2004; 2005; Green ve diğ., 2003), karstik ve benzeri yer altı boşluğu (Kadioğlu ve Ulugergerli, 2004; Ulugergerli ve Kadioğlu, 2005), mezar- duvar- temel gibi tarihi arkeolojik yapılar (Saka ve diğ., 2002; Cezar ve diğ., 2001; Hruska ve Fuchs, 1999), yer altı boru hatları ve endüstriyel atıklar (Kadioğlu ve Daniels, 2002; 2004), jeolojik yapıların tespiti (Kadioğlu, 2003) gibi her türlü yer altı yapılarının görüntülenmesinde etkin olarak kullanılmaktadır.

2.2. Arkeolojide Yer Radarı Kullanımı

Arkeolojik aramalarda yer radarı yöntemi son yıllarda yoğun bir şekilde kullanılmaya başlamıştır. Hızlı ve kolay ölçüm, cm seviyelerinde duyarlılık, yapı derinliğinin verilebilmesi, karlı-buzlu alanlarda çalışabilmesi arkeolojik çalışmalarda yer radarını vazgeçilmez kılmaktadır. Yer radarı yöntemi ile yer altında gömülü arkeolojik yapıların dielektrik ve öz direnç özelliklerindeki farklılıklarından

kaynaklanan anomaliler haritalandırılmaktadır. Yer içine gönderilen farklı frekanslardaki radar sinyalleri yer altındaki birbirinden farklı dielektrik özelliklere sahip ortamlardan yansiyarak kayıt edilir. Yer radarı duvar/mezar benzeri yapıların, metalik olan ve olmayan tüm nesnelere belirlenmesine duyarlı bir yöntemdir. Radar ölçümleri ile tapınak, mezar, duvarlar, hendekler, temeller, çukurlar, taşlar, bina tabanları gibi birçok arkeolojik yapı, duyarlı bir derinlik aralığında saptanabilmektedir (Kaya, 2007).

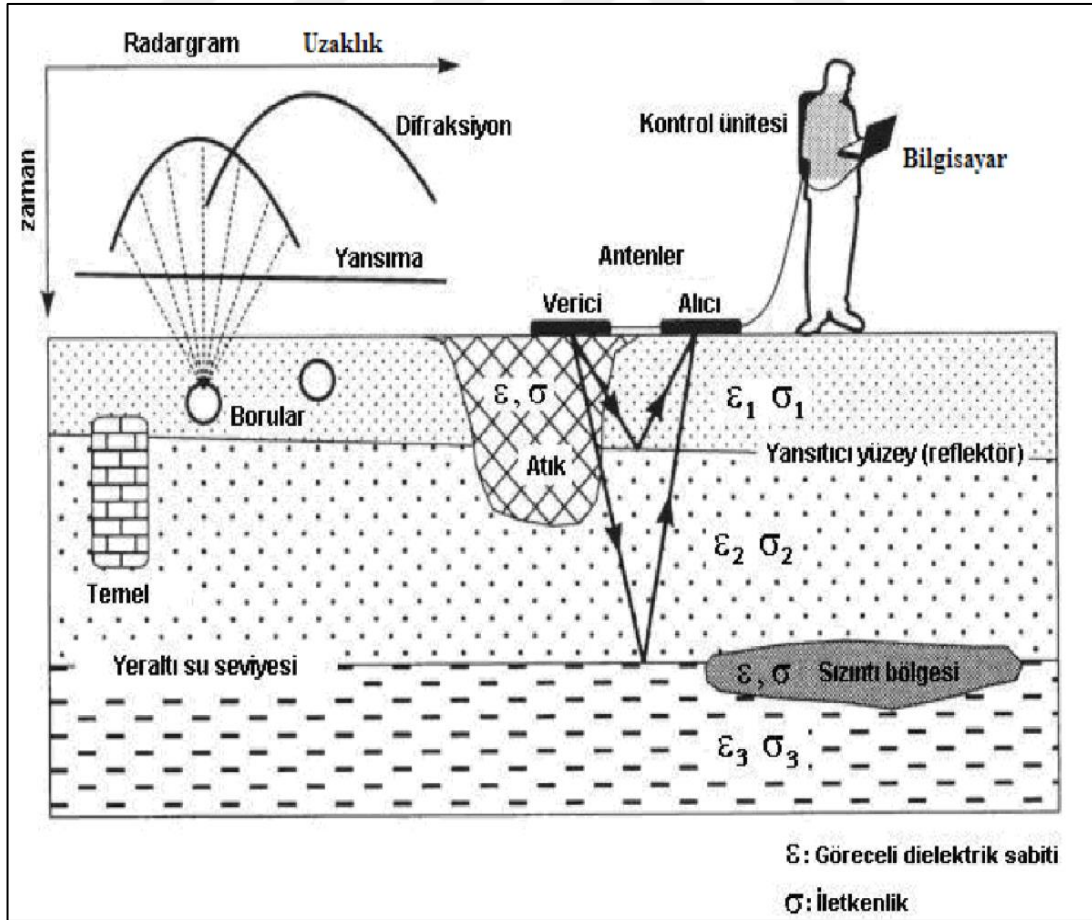
2.3. Yer Radarının Çalışma Prensipleri

Yer radarı yönteminde yüksek frekanslı elektromanyetik dalgalar verici antenler yardımı ile yer içine gönderilir. Yer içerisinde farklı elektromanyetik özellikteki jeolojik yapı ya da boru hatları, duvar, boşluklar vb. nesnelere yansiyarak alıcı anten tarafından kaydedilerek kontrol ünitesine aktarılır. Bu işlemler saniyenin milyarda biri olan nanosaniye zaman biriminde gerçekleşmektedir (Çataklı, 2003). Temeli elektromanyetik teoriye dayanan yer radarı yönteminde elektromanyetik dalganın yer içerisindeki aynı malzeme boyunca tek hızla yol aldığı kabul edilir. Yayılan dalganın hızı; yer altındaki malzemenin elektriksel özelliği, manyetik süsebtibilitesi ve dielektrik sabiti ile bağlantılıdır. Dalga frekansına ve ilerlediği ortamın elektriksel iletkenliğine bağlı olarakta dalganın ulaşabileceği maksimum derinlik değişmektedir (Weeds, 1994).

Sismik yöntemlerde olduğu gibi elektromanyetik yöntemlerde de uzayda ve maddede yayılan ve enerjinin taşınmasına yol açan titreşim olarak tanımlanan dalgaların hızından faydalanılır. Elektromanyetik dalganın farklı malzemelerdeki hızı farklıdır. Yani farklı iki malzeme boyunca aynı mesafeyi farklı zaman süresinde kateder. Dalganın verici antenden çıkıp alıcı anten de kaydedilmesine kadar geçen süreye dalganın seyahat zamanı denir. EM dalganın zaman birimi nanosaniye (ns)'dir. $1\text{ ns} = 10^{-9}\text{ sn}$ 'dir. EM dalganın yer içerisindeki seyahat zamanı havadaki seyahat zamanından daha büyüktür. Başka bir deyişle elektromanyetik dalganın boşlukta ki hızı seyahat ettiği malzeme içindeki hızından büyüktür. Bunun nedeni ise EM dalga hızının içinde yayıldığı malzemenin dielektrik sabitinin (yalıtkanlık sabiti) karekökünün tersiyle orantılı olmasıdır. Yerin yalıtkanlık sabiti havanın yalıtkanlık sabitinden daha büyük olduğu için dalganın yer içerisindeki seyahat zamanı her

zaman havadaki seyahat zamanından büyük olur. EM dalganın havadaki hızı 3×10^8 m/sn (0,3m/ns) dir. EM dalga havada 1m yolu yaklaşık olarak 3,3333 ns'de alır (Daniels, 1996).

Yer radarı çalışma düzeneği ile elektromanyetik dalganın izlediği yolların basit bir gösterimi Şekil 2.1'de görülmektedir. Dalgalardan yararlanılarak yapılan incelemelerde en önemli problemlerden birisi de istenmeyen sinyallerdir. Yer altı yapısının çok karmaşık oluşu, kaya, taş, çakıl ve kum gibi malzemelerin dalgaları yansıtması ve kırması, aranan malzemenin dışında da yansıma ve saçılmaların kaydedilmesine sebep olmaktadır. Bunun dışında verici antenden çıkıp yer içerisine nüfuz etmeden direkt alıcı anten tarafından kaydedilen sinyaller, yer yüzeyinden kırılarak doğrudan gelen sinyallerde istenmeyen sinyaller olarak değerlendirilmektedir. Çalışma alanının eğimli ve engebeli oluşu, alıcı ve verici antenler arası mesafe, anten yükseklikleri gibi birçok parametre istenen sinyalleri etkilemektedir (Daniels, 1996).



Yer radarı kuramının temeli Maxwell denklemlerine dayanır. İskoç fizikçi ve matematikçi olan ve 1861-1862 yıllarında bu denklemlerin ilk biçimini yayımlayan James Clerk Maxwell' in ismi ile adlandırılmıştır. Elektromanyetik teoriyi başlıca Faraday, Maxwell, Amper, Gauss gibi bilim adamları ilerletmiştir. Ancak Maxwell bu yasalara son halini veren bilim adamı olarak tanınmaktadır. Maxwell denklemleri 4 tane yasadandır.

1) Gauss yasası: kapalı bir yüzeyde net bir elektrik yükü varsa yüzeyden bir elektrik alan akısı geçer. Elektrik alanın kaynağı elektrik yüküdür. Elektrik alan akısı, bu yüzey tarafından çevrelenmiş olan hacimde bulunan net elektrik yükü ile orantılıdır ve Denklem (2.1);

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho_c \quad (2.1)$$

ile gösterilir.

2) Kapalı bir yüzeyden geçen manyetik akı sıfırdır,

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.2)$$

ile gösterilir.

3) Faraday Yasasına göre manyetik alanların zamanla değişimi elektrik alanları oluşturur. Buna Faraday'ın indüksiyon yasası da denir. Değişken manyetik alan değişken elektrik alan üretir ve Denklem (2.3) ile,

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.3)$$

formüle edilir.

4) Amper yasasına göre bir ortamdan akım geçerse mutlaka manyetik alan oluşur. Faraday yasasının tam tersidir. Denklem (2.4) ile gösterilir;

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J}_f + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2.4)$$

ve değişken elektrik alan değişken manyetik alan doğurur.

Denklemlerdeki;

E : Elektrik Alan Şiddeti (V/m)

D : Elektrik Akı Yoğunluğu (Coulomb/ m²)

H : Manyetik Alan Şiddeti (A/m)

B : Manyetik Akı Yoğunluğu (W/m²)

J_f : İletkenlik, Akım Yoğunluğu (A/m²)

ρ_c : Serbest Elektrik Yük Yoğunluğu (C/m³)

σ : Öziletkenlik (Siemens/m)

ε : Ortamın Dielektrik Sabiti (Birimsiz)

μ : Ortamın Manyetik Geçirgenliği (Birimsiz)

Burada $\nabla \times$ veya curl vektörel çarpımı, $\nabla \cdot$ veya diverjansı göstermektedir.

Yer radarı için fiziksel özellikler, elektriksel ve manyetik özellikler önemlidir. Yer radarı temel prensibi Maxwell denklemlerine dayanmaktadır. Maxwell denklemleri elektromanyetik alanların fiziksel özelliklerini matematiksel olarak açıklarken, ortamların özelliklerini de belirler.

Dalga yayılım sabiti veya dalga yayılım sayısı k aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır;

$$k^2 = \epsilon\mu\omega^2 + i\mu\sigma\omega = \alpha + i\beta \quad (2.5)$$

Burada;

σ : Elektrik İletkenlik (S/m)

ε : Dielektrik Geçirgenlik (F/m)

μ : Manyetik Geçirgenlik (H/m)

ω=2πf (f) : Uygulanan Alternatif Manyetik Alanın Frekansı

α : Yer Değiştirme Akımı

$i\beta$: İletkenlik Akımı

ile bağlantılıdır.

Kayaçlarda alçak frekanslarda iletkenlik, yüksek frekanslarda ise yer değiştirme akımı etkilidir. Yüksek frekans bandına sahip yer radarında uygulanan EM alanın frekansı 10 MHz - 2 GHz arasında olduğundan EM yayılım katsayısı veya dalga sayısı $k=\epsilon\mu\omega^2$ olur. σ , μ , ϵ özellikleri sabit bir ortamda, alçak frekanslarda ortamın özellikleri $\omega^{1/2}$ 'ye bağlıdır. Yer radarında olduğu gibi yüksek elektromanyetik frekanslarda ortamın özellikleri frekansa bağımlı olmamaktadır. Denklem (2.5)'de ϵ (dielektrik geçirgenlik) önemli bir parametredir. Dielektrik sabit veya göreceli dielektrik geçirgenlik $\epsilon^*=\epsilon/\epsilon_0$ şeklinde tanımlanır. Burada serbest ortamın dielektrik geçirgenliği ϵ_0 'dır ve değeri $\epsilon_0=8.85 \times 10^{-12}$ F/m dir. Tablo 2.1'de bazı malzemelerin dielektrik sabiti değerleri verilmiştir.

Tablo 2.1. Bazı malzemelerin elektriksel özellikleri

Malzeme	Dielektirik Sabiti	İletkenlik (mS/m)	Hız (m/ns)	Attenüasyon (dB/m)
Hava	1	0	0,3	0
Saf su	80	0,001	0,033	0,002
Taze su	80	0,5	0,033	0,1
Deniz suyu	80	30	0,01	1
Kuru kum	3-5	0,01	0,15	0,01
Doymuş kum	20-30	0,1-1	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	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

Verici antenin merkez frekansı arttıkça araştırma derinliği azalırken, anten frekansı azaldıkça araştırma derinliği artmaktadır. (Tablo 2.2) Buna karşın yüksek frekanslı antenlerde çözünürlük artarak zemin içindeki aranan yapının yeri 5 cm hassasiyetle tespit edilebilmektedir.

Tablo 2.2. Anten frekansına bağlı yaklaşık araştırma derinliği

Yaklaşık Araştırma Derinliği	
Derinlik (m)	Merkez Frekans (MHz)
0,5	1000
1	500
2	200
5	100

Dalga boyu (λ) bağıntısı:

$$\lambda = \frac{2\pi}{k} = \frac{v}{f} = \frac{2\pi}{\omega(\mu\epsilon)^{1/2}} \quad (2.6)$$

olup burada v , EM dalganın faz hızıdır. Denklem (2.6)'da sadeleştirme yapıldığında dalga hızı V ve dalga uzunluğu k ;

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}} \quad (2.7)$$

$$k = \frac{1000c}{f\sqrt{\epsilon^*}} \quad (2.8)$$

bulunur. EM dalga hızı $V = \frac{30}{\sqrt{\epsilon_r}}$ (cm/ns) formülü ile yaklaşık hesaplanabilir.

Manyetik geçirgenlik μ değerlerindeki değişmeler yalıtkan (dielektrik) ortamlarda ihmal edilebilir. EM dalganın bir ortamda saçılmalara uğramadan ilerlemesi durumunda EM dalganın hızı: V , sönümü: η ,

$$f(x,t) = f(x \pm vt)e^{-Ax} \quad (2.9)$$

bağıntısı ile verilir. X yayılma doğrultusundaki uzaklık ve A attenüasyondur. Ortamın attenüasyonu (dB/m) olup $A=1635\sigma/\epsilon^*$ şeklinde tanımlanır. Dalga parametreleri aşağıdaki gibi tanımlanır;

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon^*}} \quad (2.10)$$

$$A = \frac{\sigma}{2} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} = Z_0 \frac{\sigma}{2\sqrt{\epsilon^*}} \quad (2.11)$$

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \quad (2.12)$$

$$Z = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} = \frac{Z_0}{\sqrt{\epsilon^*}} \quad (2.13)$$

Denklem (2.10)'da c ışığın saniyede kat ettiği mesafe olan ışık hızıdır ve değeri $c=300.000 \text{ km/s} = 0,3 \text{ m/ns}$ dir.

$$\frac{1}{A} = \delta = \left(\frac{2}{A}\right) \left(\frac{\epsilon}{\mu_0}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.14)$$

Sismik yöntemde olduğu gibi elektromanyetik yöntemde dalgaların yer içerisinde iletken kütle içeren ortamlarda yansımaları, kırılması ve iki farklı yapıdaki lokasyonların sınırlarından geçme özellikleri Snell kanununa göre olmaktadır. Buna göre yer radarı yöntemi; dalga cephesinin bir kısmının, yalıtkanlık sabiti çevreden farklı bir nesneyle karşılaşması sonucu, saçılması ve dalganın yönünü değiştirmesi ile elde edilen verilere bağlıdır. Saçılma ana malzemeyle diğer nesnelere arasındaki yüzeylerde gerçekleşir ve dört ana türü vardır (Keçeli, 2009). Bunlar;

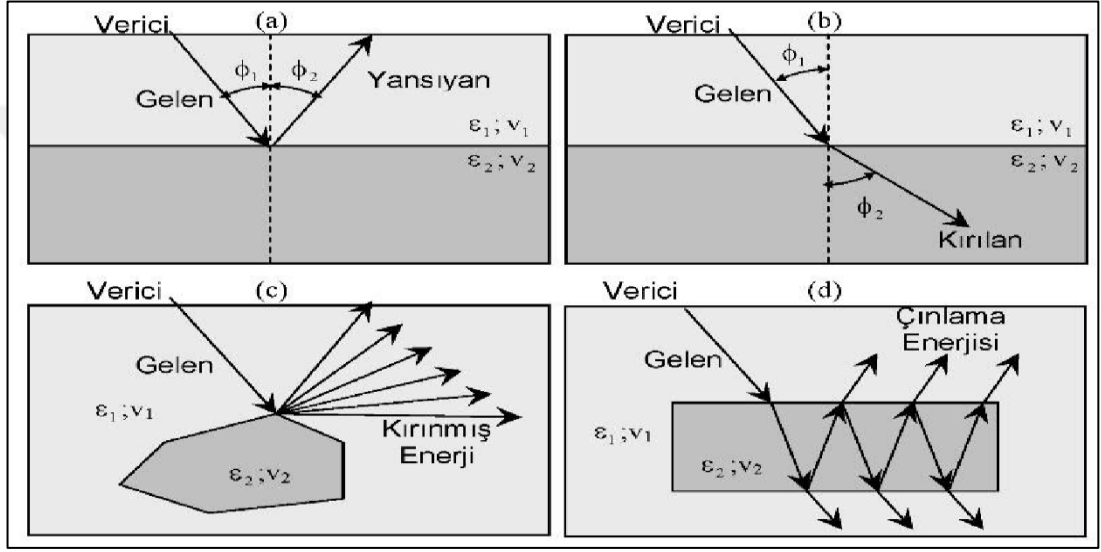
- 1) Yansıma (reflection scattering)
- 2) Kırılma (refraction scattering)
- 3) Kırınım (diffraction scattering)
- 4) Çınlama (resonant scattering) şeklinde tanımlanmaktadır.

Dalga bir ortamdan başka bir ortama geçerken ortamların hızının farklı olmasından dolayı yansımaya uğrar. Bu yansıma yasasına dayanmaktadır. Yansıma yasası Snell

Kanunu olarak bilinmektedir. Snell kanununa göre Şekil 2.2 (a)'daki gibi yansıma açısı geliş açısına eşit olmaktadır ($\theta_1 = \theta_2$). Snell kanunu aşağıdaki şekildedir;

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} \quad (2.15)$$

Burada V_1 üst tabaka ya da üstteki malzeme boyunca, V_2 alt tabaka ya da alttaki malzeme boyunca dalganın yayılma hızlarıdır. θ_1 dalganın geliş açısı θ_2 ise dalganın yansıma açısıdır.



Şekil 2.2. Dalga iletim düzenekleri (a) yansıma (b) kırılma (c) kırınım, (d) çınlama (Kesemen, 2007)

Bir dalga ara yüzeye çarptığında, ara yüzeyin şekline ve aynı zamanda nesne ile çevre malzemenin elektrik özelliğinin değişimine bağlı olarak yansıyan enerjinin nesnenin içine yayılan kısmına kırılma denir (Şekil 2.2 (b)). Nesnenin içine yayılan dalganın açısını, Snell yasası belirler.

Ara yüzey düzgün ve sürekli ise (örneğin tabaka sınırı) ve alt sınırdaki (örneğin, nesne veya alt tabaka) dalganın hızı çevre malzemenin veya üst tabakanın hızından büyükse, nesne içindeki dalga ara yüzey boyunca nesnenin hızına eşit bir hızla yol alır. Bu olay gerçekleştiğinde dalganın geliş açısına kritik açı denir ve aşağıdaki eşitlikle belirlenebilir;

$$\frac{\sqrt{\epsilon_2}}{\sqrt{\epsilon_1}} = \frac{v_1}{v_2} = \sin \phi^1 \quad (2.16)$$

EM dalga hızının derinlikle azalım göstermesinden dolayı, yer radarında kırılma dalgalarına, sismiktekinin aksine seyrek karşılaşılr.

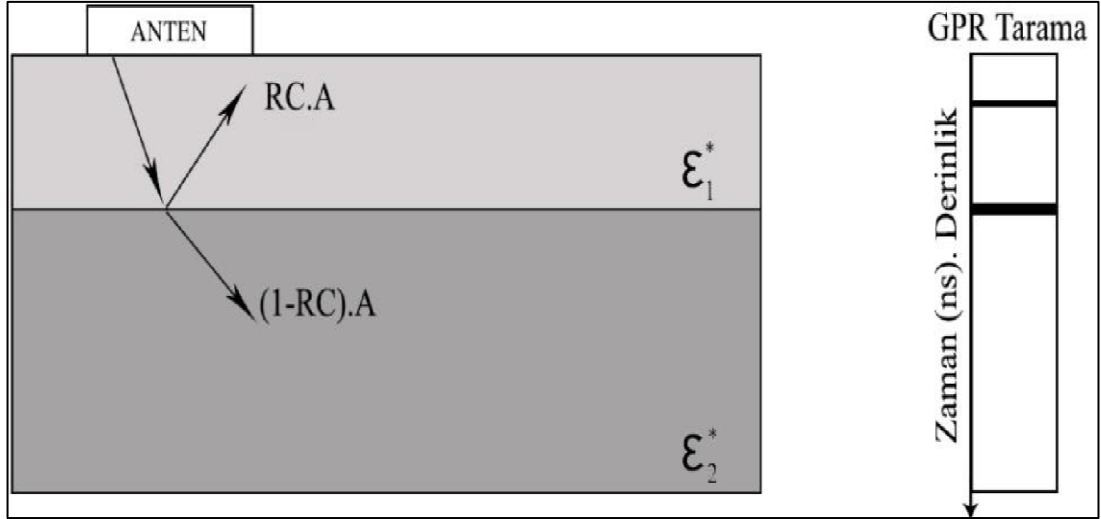
Kırınım, bir dalganın köşelere, keskin yüzeylere çarpması sonucu EM dalganın dağılarak saçılma şeklidir (Şekil 2.2 (c)). Küresel yayılımın Huygens ilkesine göre çalışır. Kırınmış enerjinin doğası, sınırın keskin ucuna ve gelen dalganın boyu ile nesne arasındaki ilişkiye bağlıdır. Kırınım, yer radarında yaygın bir şekilde görülmektedir. Bir noktadan farklı doğrultulara doğru yayılır veya bir doğru boyunca ilerler. Jeolojik olarak, kırınım düşey fay etrafında veya jeolojik tabaka süreksizliğinde sıkça gözlenen bir olaydır.

Çınlama, bir dalganın kapalı bir nesne (örneğin silindir) içinde tekrarlanmasıyla, yani dalganın nesnenin farklı sınır noktaları arasında ileri geri gidip gelmesiyle oluşur (Şekil 2.2 (d)). Nesne içindeki dalga her zaman bir sınıra çarpar ve enerjinin bir kısmı ana malzemeye doğru kırılarak iletilirken, diğer kısmı nesnenin içine geri yansır. Bu durum EM enerjinin nesne içinde tekrarlanmasına neden olur. Çınlama enerjisi nesnenin içinde kapana sıkışır ve hemen hızla geri yayılarak enerjisinin bir kısmını nesnenin dışına doğru yayar. Nesnenin çınlama frekansı, nesnenin boyutlarına, nesnenin ve çevre malzemenin elektriksel özelliklerine bağlıdır. Yine de, bir nesnede çınlama olabilmesi, dalga boyuyla (nesnenin hızının, dalganın frekansına bölümü) nesnenin boyuna bağlıdır. Bir nesnenin çınlamasının zamansal uzunluğu, nesne ile çevre malzeme arasındaki permittivite değişimiyle belirlenir (Daniels, 1996; Kesemen, 2007).

Yansıma, sinyalin frekansına ve geliş açısınada bağlıdır. En güzel yansıma sinyali kayıtları düzlemsel sınırları olan tabaka modellerinden elde edilir. Yer radarı çalışmalarında yansıma katsayısı (RC) (reflection coefficient) Şekil 2.3’de görüldüğü gibi iki farklı dielektrik özelliğe, iki farklı hıza sahip iki ortam sınırında aşağıdaki gibi tanımlanır;

$$RC = \frac{\sqrt{\epsilon_1^*} - \sqrt{\epsilon_2^*}}{\sqrt{\epsilon_1^*} + \sqrt{\epsilon_2^*}} = \frac{V_2 - V_1}{V_2 + V_1} \quad (2.17)$$

Denklem (2.17)’de ϵ_1^* ve ϵ_2^* birinci ve ikinci ortamın dielektrik sabitleri, V_1 ve V_2 elektromanyetik dalga hızlarıdır. Yansıma katsayısı, R , $R = 1 - RC$ olarak tanımlanır.



Şekil 2.3. GPR alanın dielektrik sabitleri farklı iki ortam sınırında yansıma ve kırılması (Keçeli, 2009)

Elektromanyetik dalganın yansıma katsayısı (RC), Şekil 2.3’de görüldüğü gibi, jeolojik birimlerin hızları ve dielektrik sabitleri arasındaki farklılıklara bağlıdır. RC yansıma katsayısı, dalganın ne kadarının yansıtacağına ne kadarının yer içine nüfuz edeceğini gösteren bir katsayıdır. Yansıyan dalganın büyüklüğü, şiddeti ölçüm hattı boyunca kaydedilir ve dik eksen üzerinde gösterilir. Alıcı antene mesafe olarak yakın arayüzeylerden gelen yansımalar uzaktaki arayüzey yansımalarına göre daha erken gelir. Yansımaların şiddeti farklı periyotlarda görülür ve farklı renklerde gösterilir. Ölçü alanındaki profiller boyunca yapılan taramalardan elde edilen tüm yansıma kayıtları birleştirilerek kesit haritaları ve modelleme çalışmaları yapılır. Bu taramalarda yatay eksen zaman-nanosaniye ve düşey eksen derinlik h-metre olarak gösterilir. Derinlik aşağıdaki gibi elde edilir;

$$h = \frac{Vt}{2} \quad (2.18)$$

h : Derinlik (anten ile yansıma yüzeyi arasındaki uzaklık)

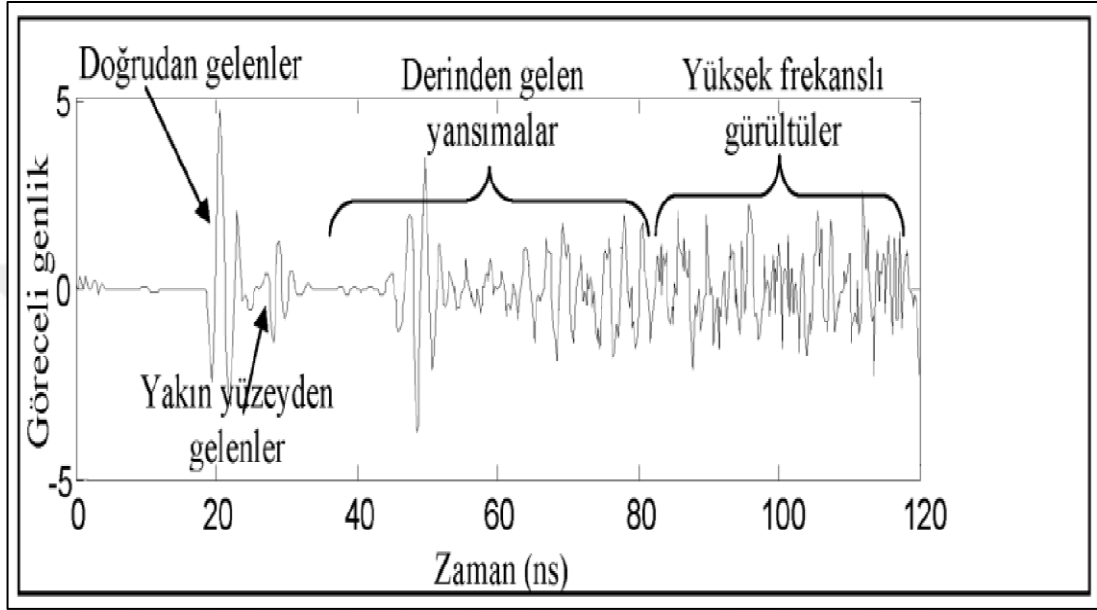
t : Gönderilen ve alınan dalga zamanları arasındaki geliş gidiş süresi

Yansımada geliş gidiş zamanı ns = 10⁻⁹ mertebelerindedir. Yer radarı nüfuz derinliği;

$$d = \frac{\rho}{30} \quad (2.19)$$

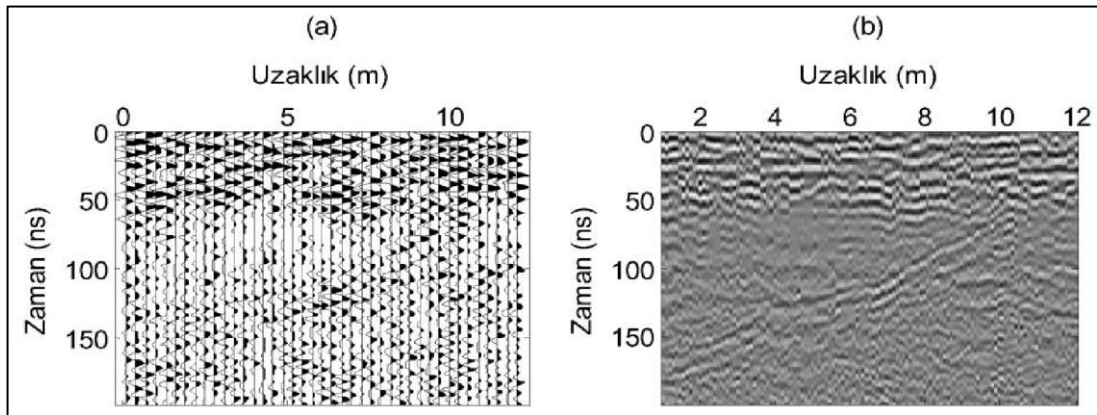
bağıntısı ile tanımlanır.

GPR çalışmalarında arazi ölçümleri; profil uzunluğu ve aralığı daha önceden belirlenerek uygulanmaya başlanır. Profillerden alınan izler yan yana getirilerek iki boyutlu (2B) radargram adı verilen birleştirilmiş radar kesitleri elde edilir. Değerlendirme sonuçları üç boyutlu (3B) görüntülenebilir. Bu izlerin barındırdığı yansımalar, kırılmalar ve gürültüler gibi bileşenler Şekil 2.4.'de verilmektedir.



Şekil 2.4. Yer radarı ölçümlerinde bir profil üzerinde bir noktada kayıtlı tek izin genlik düzeltilmesi uygulandıktan sonraki gösterimi (Kesemen, 2007)

Şekil 2.5 (a)'da İzlerin yan yana çizilmesiyle oluşan tekrarlı sinyal izleri kesiti, Şekil 2.5 (b)'de gri renk yoğunluklu kesitler gösterilmektedir. (Annan, 2000; Kadioğlu, 2006, Kesemen, 2007; Kadioğlu ve Demirci, 2012).



Şekil 2.5. İnceleme alanı üzerinde belirlenen profiller boyunca alınan sinyal izlerinin yan yana getirilmesiyle elde edilen yer radarı kesiti (radargram), (a) tekrarlı sinyal izlerinin görüntü kesiti, (b) gri renk yoğunluğunda görüntü kesiti (Kesemen, 2007)

2.4. Araştırma Amacına Göre Belirlenen Parametreler

Yer radarı çalışmalarında frekans en önemli değişkendir. Frekansa göre diğer parametreler belirlenir. Alıcı verici antenler arası uzaklık, durak aralığı, kayıt uzunluğu ve örnekleme aralığı araştırma amacına göre belirlenmesi gereken parametrelerdir. Eğer d derinlik çözünürlüğü alınırsa uygun frekans Denklem (2.20)'deki gibi;

$$f = \frac{150}{d\sqrt{\epsilon}} \quad (2.20)$$

ile elde edilir. Birimi (MHz)'dir. Burada derinlik çözünürlüğü hedeflenen uzaklığın dörtte biri (%25) olarak alınır (Annan vd., 1975).

Arazi çalışmalarında elektromanyetik dalgaların nüfuz derinliği ve çözünürlük genelde karmaşık sorunlar içerir. Bu nedenle uygulamada ve veri işlem adımlarında bu hususa dikkat edilmelidir. Çözünürlük durak aralığı ile de alakalıdır. Sabit aralıklı hatlarda dalga boyunun 1/4'ünden daha büyük olan iki durak arası uzaklık (Dx) söz konusu ise tanımlanacak hedefler kuramsal olarak belirlenemez. Bu durum Denklem (2.21)'deki gibi yaklaşık olarak;

$$Dx = \frac{75}{f\sqrt{\epsilon}} \quad (2.21)$$

ile verilebilir.

Birimi (m)'dir. Başka bir deyişle her iki işlemten Dx araştırma derinliğinin en fazla 1/8 i kadar veya daha az olması gerektiği görülmektedir. Anten dizilimleri genelde yan yana olarak yapılmasına rağmen uygulamada uç uca dizilimlerde kullanılır. Eğer jeolojik yapının uzanımı biliniyor ise antenler yapıya paralel olarak tutularak ölçüler alınmalıdır. Uygulamalarda anten aralığı hedeflenen araştırma derinliğinin 1/5 veya daha azı tutulursa daha iyi sonuçlar verdiğini göstermiştir. Derinliğe bağlı olarak ampirik bağıntı ise Denklem (2.22)'deki gibi;

$$D_{\text{anten}} = \frac{2h}{\sqrt{\epsilon-1}} \quad (2.22)$$

ile verilir. Birimi metredir. Örnekleme kuramı dikkate alınarak örnekleme frekansının seçimi yapılmalıdır. Yer radarında kullanılan en yüksek frekans merkezi frekansın 1,5 katı olduğuna göre örnekleme aralığı merkezi frekansın en az 3 katı olmalıdır. Sağlıklı ölçüm için 2 katsayının da kullanımı önerilir. Bu durumda 100 MHz merkezi frekansta örnekleme aralığı (∇f); bulunur (Weymouth, 1986).

$\Delta f=100.3.2=600$ MHz (Weymouth, 1986).

2.5. Yer Radarının Çalışmasına Etki Eden Faktörler

Yer Radarı çalışmalarında frekans, örnekleme aralığı, kayıt uzunluğu, anten ve durak aralığının her araştırmanın amacına göre yeniden belirlenmesi gerekir. Yer radarı araştırmalarında zemin iletkenliği ve dielektrik sabit en önemli iki faktördür. Bu faktörler aranan zeminin yüzeysel özelliklerinin bulunmasını etkilemektedir (Ulriksen,1982). Zeminin nemliliği, ıslak veya kuru oluşu, yoğunluğu, zemin içeriği, kil durumu ve tuzluluk miktarındaki değişiklikler de yer radarı sinyallerini etkilemektedir.

Yer radarı çalışmalarını olumsuz etkileyen önemli faktörlerden biri yüksek iletkenliktir. Sahip olduğu kil ve su içeriği nedeniyle yüksek iletkenli olan zemin düşük iletkenli zeminlere (kuru kum) göre daha fazla enerji soğurur (Griffin ve Pippet, 2002). İletkenliği yüksek zeminler, sinyalin soğurulması ve araştırma derinliğinin azalmasına neden olduğundan dolayı yer radarı çalışmalarında istenmez. Tercih edilen ortamın iletkenliğinin düşük olmasıdır (Bristow ve Jol, 2003).

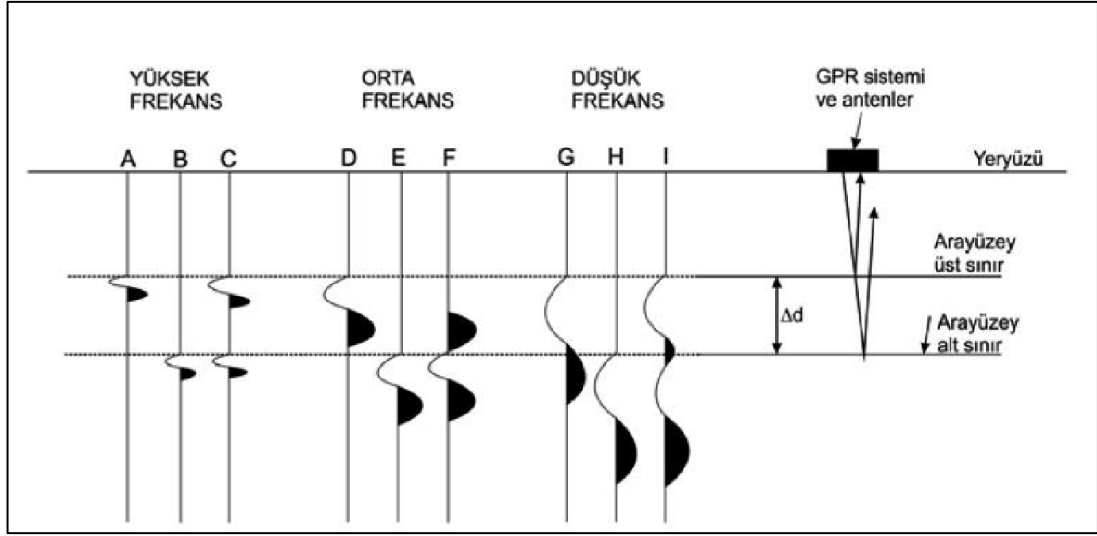
EM dalganın yayılma hızı ile dielektrik (yalıtkanlık) sabiti ters orantılıdır. Başka bir deyişle dalganın yayılma hızını büyük oranda ortamın dielektrik sabiti belirlemektedir. Dielektrik sabitinin arttığı kil gibi su içeriği yüksek yalıtkan ortamlarda, elektromanyetik dalga hızı azalır ve soğurularak enerji kaybına uğrar. Bundan dolayı bu tür zeminlerde yer radarı ile çalışmak oldukça güçtür. Benzer şekilde yer altına gönderilen EM dalgaların hızı, dielektrik sabitinin ani bir düşüşü ile de yükselmektedir. Böyle bir ortam değişikliği yeni yansıma yüzeyi oluşturduğundan bu yüzeyde ilerleyen dalgaların bir kısmı yansıtılarak geri dönmekte ve alıcı anten tarafından kaydedilmektedir (Weeds, 1994).

Zemin iletkenliği ve dielektrik sabiti sudan önemli bir şekilde etkilenmektedir. Bu nedenle su, yer radarının çalışma performansı üzerinde büyük etkiye sahiptir (Griffin ve Pippet, 2002). Su içeriği yüksek kutuplaşma özelliğinden dolayı yüksek dielektrik sabite sahiptir. Bu nedenle elektromanyetik dalgalar böyle dirençli ortamlarda ilerlemekte zorlanırlar. Eğer ortamın su içeriği yüksekse; dalgaların derine doğru penetrasyonu azalacağından, sonuçlar olumsuz yönde etkilenecektir. Bu nedenle; su içeriği yüksek alanlarda bu yöntemin kullanılması iyi sonuçlar vermemektedir.

Yer radarı çalışmalarını etkileyen bir diğer faktör de kullanılan antenlerin frekansdır. GPR çalışmalarında 25MHz - 2GHz aralığında antenler kullanılmaktadır. İnceleme derinliğine bağlı olarak bu frekanslar değiştirilmektedir. Yüksek frekanslı antenler daha sığ derinlikten daha hassas ölçümler yaparken düşük frekanslı antenler daha derinlerden bilgi almaktadır. Ancak yüksek frekanslı elektromanyetik dalgalar çok hızlı soğuruldukları için ulaştıkları derinlikler düşük frekansların ulaştığı derinlikler kadar iyi değildir (Griffin ve Pippet, 2002). Yer radarı dalgalarının nüfuz derinliği ve sinyallerin çözünürlüğü kullanılan antenin frekansına bağlıdır (Tablo 2.3) (Takahashi, 2004; Griffin ve Pipet 2002). Sonuç olarak, yüksek frekans ile çözünürlük arasında doğru orantı; derinlik ile ters orantı vardır. Şekil 2.6'da frekans, ayrımlılık ve derinlik arasındaki ilişki verilmiştir.

Tablo 2.3. Yer radarı çalışmalarında anten frekansları, elektrik iletkenlik ve dielektrik sabitleri arasındaki ilişki

Yer Radarı Parametreleri	Dielektrik Sabit		Elektrik İletkenlik		Anten Frekansı	
	Düşük	Yüksek	Düşük	Yüksek	Düşük	Yüksek
Yayıma Hızı	Yüksek	Düşük				
Penetrasyon	Kısa	Uzun	Uzun	Kısa	Uzun	Kısa
Dalga Boyu	Uzun	Kısa			Uzun	Kısa
Çözünürlük	Düşük	Yüksek			Düşük	Yüksek



Şekil 2.6. Yer radarı ölçümlerinde derinlik, frekans ve ayrırlılık ilişkisinin gösterimi (Conyers, 2004'ten uyarlanmıştır)

Yer radarı anten frekansı seçimi yapılırken dikkat edilmesi gereken koşullar vardır. Bu seçim yapılırken aşağıdakiler göz önünde bulundurulmalıdır;

- Alanın yüzey engebeleri ve bitki örtüsü,
- Gömülü nesnenin içinde yer aldığı zemin ve kayanın özellikleri,
- Yer radarı penetrasyonunu etkileyen su varlığı, nem ve kil içeriği,
- Hedef araştırmanın boyutu, derinliği, materyal türüdür.

Veri işlem ve yorumlama kısmında dikkate alınmak üzere, ölçümleri olumsuz etkileyebilecek; arazide yaşanan sıkıntılar, olağanüstü durumlar, kirlilik, nemlilik, su ve çamur içeriği, kil durumu, dolgu durumu, arazi eğimi, bitki örtüsü, çevredeki metalik ve EM kaynaklar not edilmelidir (Annan, 2000).

2.6. Arazi Ölçüm Tekniği

Arazide uygulanacak uygun frekans, kayıt pencereleri yığılma sayısı vb değerler kontrol ünitesine işlenerek önceden belirlenen profil aralığı, uzunluğu ve karelaclar boyunca ölçüler alınmaya başlanır. Bir yer radarı verici anten, alıcı anten, bilgisayar, kontrol ünitesi ve kayıtçıdan oluşmaktadır.

Antenler ayrı ayrı olabileceği gibi tek parça halinde de olabilirler. Hatta son dönemlerde birbirinden farklı üç ayrı frekanslı verici ve alıcı antenler ile aynı anda üç farklı frekansta ölçümler alınabilmektedir. Kayıt pencereleri 32–2448 ns

aralığında olabilirken yığma 2049 ize kadar yapılabilir. Ölçü alımlarında bir dizüstü bilgisayar, zor arazi şartlarında kolay taşınma, ölçümler sırasında veri işlem ve düzeltmeler yapabileceği için tercih sebebidir.

Arazi ölçü alma yöntemi iki farklı ölçüm sistemi ile uygulanmaktadır. Bu iki ölçüm yönteminden birincisi sabit ölçüm yöntemi, diğeri ise kayan ölçüm yöntemidir. Bunlardan en çok kullanılanı sabit aralıklı, alıcı anten ile verici antenin aynı anda hareket ettiği sabit yöntemidir. Diğere yöntem ise ortak bir orta noktadan alıcı ve vericinin birbirinden farklı yönlere uzaklaşması ile uygulanan kayan yöntemidir. Sabit yöntem istenilen mesafede ve istenilen türde veri toplaması açısından üstünken, kayan yöntemin üstünlüğü ise hızlı veri toplamasıdır. Uygulamada, sabit yöntem ölçüm türü ile kayan yöntem ölçüm türü beraber şekilde uygulanırsa daha fazla kazanımlar elde edilebilir. Aynı anda istenilen şekilde veri toplanırken zamandan da kazanılmış olunur. Sabit yöntemde yapılan ölçülerle kayan yöntem için uygulanabilecek en iyi uzaklık ve anten dizilimi belirlenebilir (Daniels, 1996). Şekil 2.7’de yer radarı arazi ekipmanlarını, Şekil 2.8’de yer radarının arazide uygulama biçimi gösterilmektedir.

*Zond 12e Kontrol Ünitesi *Dizüstü bilgisayar *2x5m ve 2x30m bağlantı kablosu
*2GHz ve 300 MHz Kapalı Anten *38, 75 ve 150 MHz Açık Anten



Şekil 2.7. Yer radarı arazi ekipmanı



Şekil 2.8. Yer radarı yönteminin arazide uygulanişı

2.7. Uygun Anten Seçimi

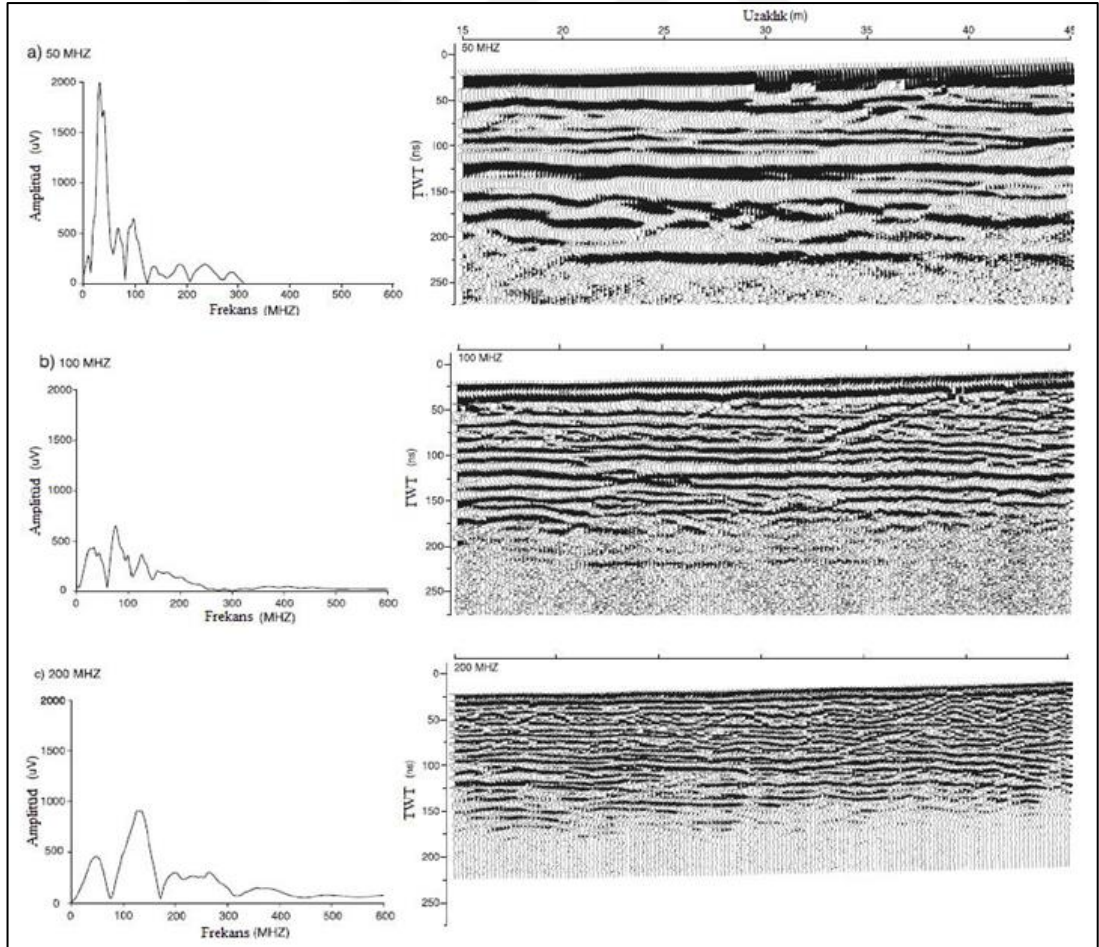
Birim zamanda dalğanın tekrar sayısı olarak tanımlanan frekanslarda, dalga boyu frekansın düşmesini ya da artmasını belirleyen parametredir. Diğer sinyal analizlerinde olduğu gibi elektromanyetik yer radarı analizlerinde de dalga boyu, tespit edilmeye çalışılan yer altı yapısının çözünürlüğünü etkileyen önemli bir parametredir. Bundan dolayı yer radarı uygulamalarında istenen sonuca ulaşabilmek için dikkate alınması gereken en önemli seçimlerden biri uygun anten tercih etmektir. Frekans değeri düştükçe araştırma derinliği artarken düşey ayrımlılık olarak adlandırılan çözünürlük azalmaktadır. İnce kalınlıklı tabakalar ile küçük cisimler tespit edilememektedir. Buna karşın frekans değeri arttıkça derinlik azalmakta düşey ayrımlılık (çözünürlük) ise cm duyarlılığına kadar artmaktadır. Küçük cisimler ile çizgisel geçişler belirlenebilmektedir. Dolayısı ile anten frekansı seçilirken bu husus dikkate alınmalıdır.

Farklı bağıl dielektrik geçirgenlik değerleri için anten frekanslarına bağı olarak, EM dalga boylarındaki değişim, GPR dalgalarının ortam içindeki yayınında etkilidir. Bu değişimi gösteren farklı anten merkez frekanslarına bağı olarak dalga boyundaki farklılıklar Tablo 2.4'de verilmektedir. Görüldüğü gibi, ortamın dielektrik özelliği dalga boylarını önemli ölçüde etkilemektedir ve ortamda dielektrik artışla birlikte dalga boylarında hızlı bir düşüş ortaya çıkmaktadır (Conyers ve Goodman, 1997).

Tablo 2.4. Farklı dielektrik geçirgenlik değerlerine sahip ortamlarda seçilen anten frekanslarına göre frekans dalga boylarının değişimi

Anten Frekansı (MHz)	Frekansın dalga boyu			
	ϵ_r (Havada)	ϵ_r (5)	ϵ_r (15)	ϵ_r (25)
1000	0,33	0,13	0,08	0,06
900	0,33	0,15	0,09	0,07
500	0,60	0,27	0,15	0,12
300	1,00	0,45	0,26	0,20
120	2,50	1,12	0,65	0,50
100	3,00	1,34	0,77	0,60
80	3,75	1,68	0,97	0,75
40	7,50	3,35	1,94	1,50
32	9,38	4,19	2,42	1,88

Bunun için araştırmanın amacına uygun merkez frekansta bir anten seçilmelidir. Şekil 2.9.'da aynı hat üzerinde farklı merkez frekansa sahip antenler kullanılarak elde edilmiş radargramlar gösterilmektedir.



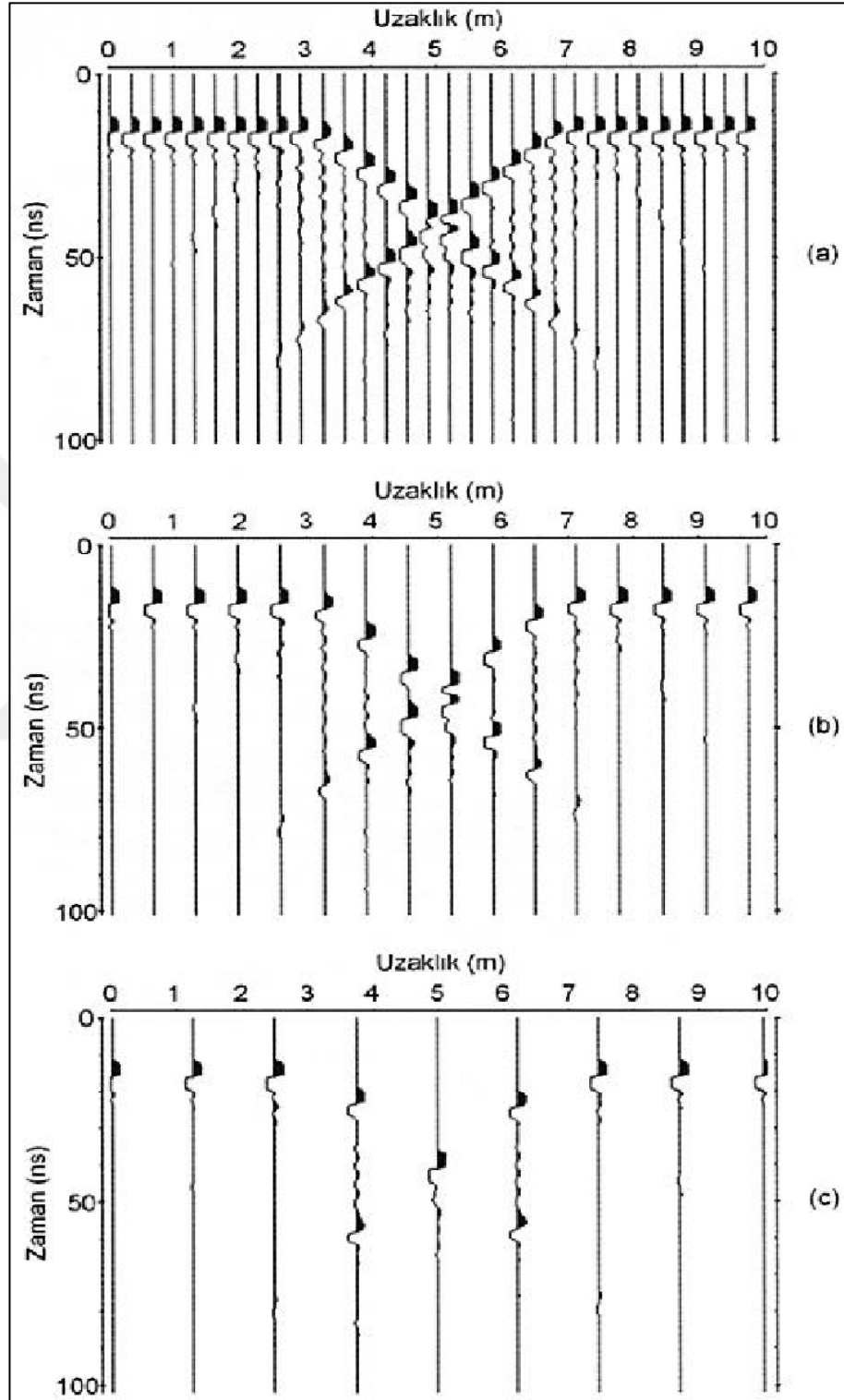
Şekil 2.9. Aynı hat üzerinde farklı frekanslara sahip antenler ile alınmış ölçüler sonucu elde edilen radargramlar. a) 50 MHz, b) 100 MHz, c) 200 MHz (Neal, 2004)

Alçak frekanslı antenle elde edilen birinci radargramda daha derinlerden bilgi elde edilmesine karşın ayrımlılık oldukça düşük ve yüzeye yakın sinyallerde bozulmalar oldukça fazladır. İkinci radargramda ise derinlerden gelen yansımalar enerjilerini kaybetmeye başlarken çözünürlüğün birinci radargrama göre arttığı görülmektedir. Aynı profil üzerinde yüksek frekanslı anten kullanılarak elde edilen 3. radargramda ise diğer radargramlarda aynı derinlikte olan izler daha ayrımlı bir biçimde görülebilmekte, hatta yapılardan kaynaklanan bazı hiperboller açık bir şekilde görülmektedir. Dolayısıyla aranılan yapının derinliği ve istenilen çözünürlüğün elde edilmesinde temel etken anten seçimidir.

GPR ile yapılan aramalarda ölçü alınan profil aralıkları da önemlidir. Boyutları küçük nesnelere aranmasında profillerin birbirlerine uzaklıkları kısa tutulur. Ayrıca birbirine dik profillerde alınacak ölçülerde hassasiyet oranı artırılmış olur. Arkeolojik aramalarda genellikle 0,5 m profil aralıkları tercih edilir. Ancak incelenecek nesneye göre bu aralıklar daha da kısaltılabilir ya da artırılabilir.

Örnekleme aralıkları yine yer radarı ölçülerini etkileyen başka bir etmendir. Örnekleme aralığı arttırıldıkça düşük çözünürlüğe sahip yansımalar elde edilirken aralık azaltıldıkça daha iyi yansıma kayıtları elde edilmektedir. Ancak bu aralığın istenilenden çok daha fazla olması veri işlemi zorlaştırmaktadır. Şekil 2.10'da yapay yolla elde edilen hendek biçimli bir yer altı yapısından elde edilen radargramlar görülmektedir. Şekilde de görüleceği üzere örnekleme aralığı, aralık yeterli tutulduğunda daha iyi yorumlanabilecek yüksek çözünürlüklü yansımalar elde edilirken (Şekil 2.10 (a)), aralık çok büyük tutulduğunda düşük çözünürlüklü yansımalar elde edilecektir (Şekil 2.10 (b ve c)). Ancak çok fazla örnekleme aralığı veri işlem adımlarını artıracak izlerin çok iç içe geçmesi ve zaman kaybına sebep olacaktır. Bunun için uygun bir örnekleme aralığı seçilmelidir. Uygulamalarda genellikle araştırma hedefine göre 1 ila 10 cm arasında değişen örnekleme aralıkları tercih edilmektedir. Ölçüler arazide uygun hatlar boyunca birbirine paralel, birbirine dik ve zigzag çizecek şekilde alınabilmektedir. Burada karelejler iyi yapılmalı ve başlangıç bitiş koordinatlarına dikkat edilerek not alınmalı, nokta kaymalarına sebebiyet verilmemelidir. Aksi halde yorumlamada sıkıntılar yaşanacak ve yanlış bulgulara ulaşılabilecektir. Karelejlere uygun hatlar üzerinden toplanan verilerin

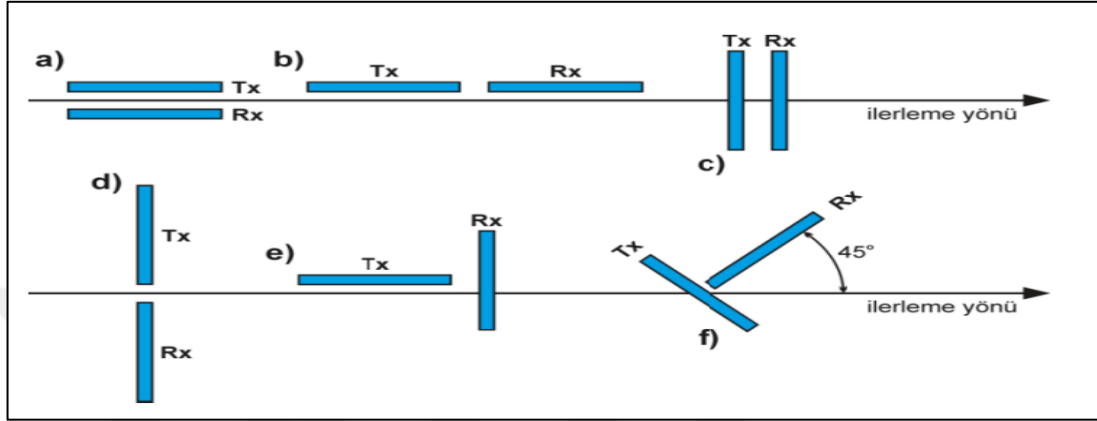
birleştirilmesi ile ortamın 3B görüntülerini elde edilecektir. Böylece yer altı zaman kesitleri yardımıyla çalışmanın yorumlanmasına olanak sağlanacaktır (Drahor, 2006).



Şekil 2.10. Örnekleme aralığı etkisini göstermek amacıyla yapay yolla elde edilmiş hendek biçimli bir yer altı yapısına ilişkin üç farklı örnekleme aralığından radargramlar (a) 25,6 cm, (b) 51,2 cm, (c) 102,4 cm (Drahor, 2006)

2.8. Alıcı ve Verici Antenlerinin Dizilimi

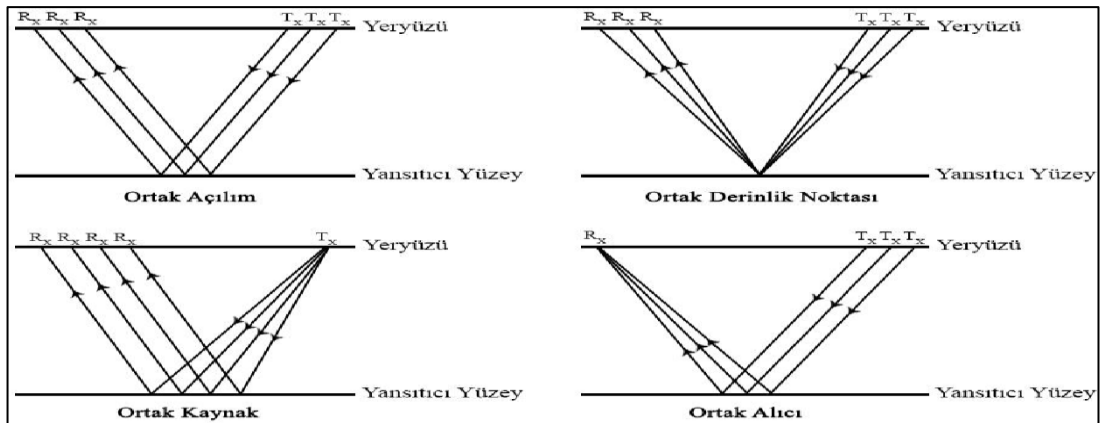
Antenler yer normaline göre düzenlenirler. Ölçü alım sırasında, alıcı ve verici antenler ilerleme yönüne ve birbirlerine göre farklı pozisyonlarda olabilirler (Şekil 2.11).



Şekil 2.11. Yer radarı anten dizilimleri a) paralel bakışık b) paralel ardışık c) dik bakışık d) dik ardışık e, f) çapraz kutup (Balkaya, 2010)

2.9. Ölçüm Açılım Örnekleri

Yer radarı çalışmalarında alıcı ve vericinin aynı yöne aynı mesafede ilerlediği ortak açılım (CO, Common Offset), belirlenen bir ortak noktanın farklı yönlerine aynı mesafede ilerlediği ortak orta nokta (CMP, Common Mid Point), vericinin sabit kaldığı alıcının ilerlediği ortak kaynak (CS, Common Source) ve vericinin sabit kaldığı alıcının ilerlediği ortak alıcı (CR, Common Receiver) açılımları kullanılır (Şekil 2.12).



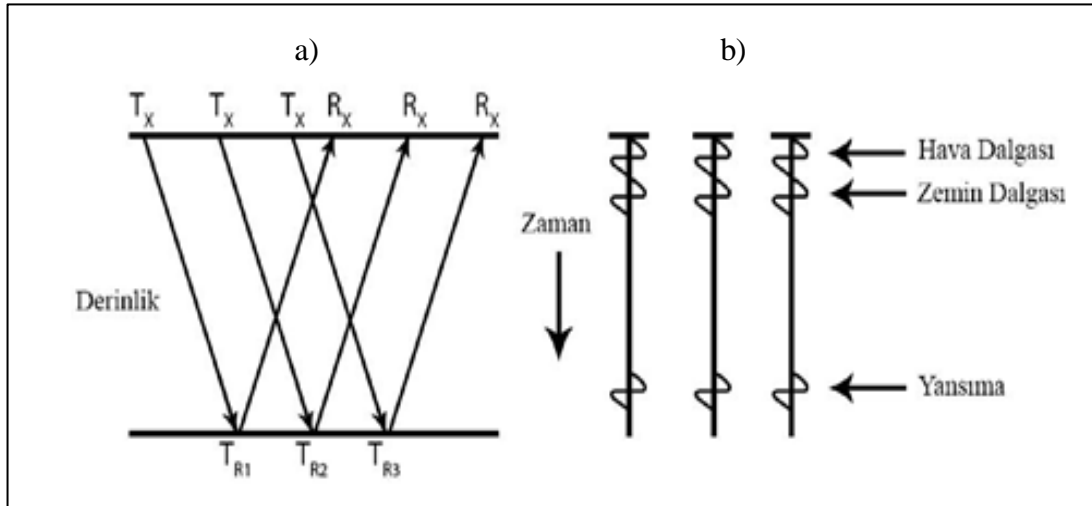
Şekil 2.12. Yer radarı ölçümlerinde kullanılan çeşitli anten kombinasyonları (Daniels, 1996)

Yer radarı çalışmalarında çoğu zaman sabit anten aralığı yani ortak açılım (CO, Common Offset) kullanılır. Diğer sıkça kullanılan açılım ise ortak orta nokta (CMP, Common Mid Point) açılımıdır ve bu açılım genellikle hız ölçümleri için tercih edilir.

2.9.1. Ortak açılım (CO, Common ofset)

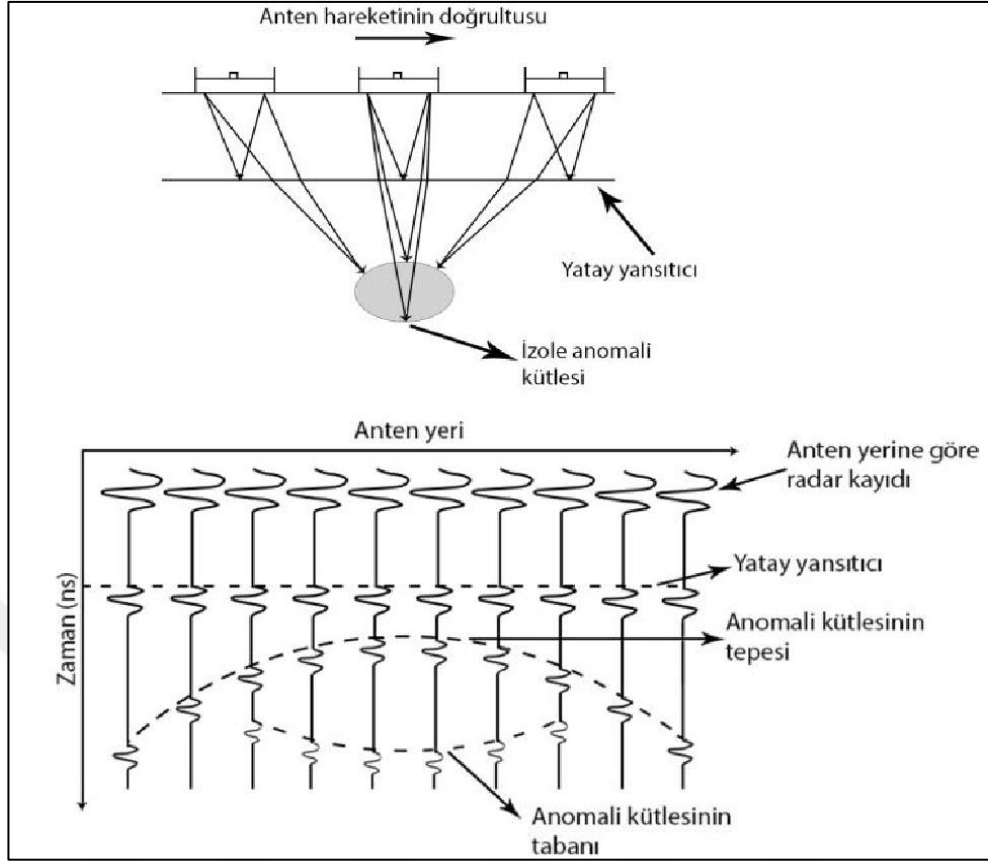
Genelde ortak açılım ölçü düzeneği yer altındaki nesnelere bulmak veya yer altındaki süreksizlikleri belirlemek için kullanılır. Ölçümler, sistemin bir doğrultu boyunca sabit bir aralıkla kaydırılmasıyla yarı sürekli bir şekilde alınır ve aynı işlem tekrarlanarak doğrultu boyunca ölçüm alınır. Bu yöntem hızlı olduğundan dolayı ucuzdur. Fakat bu yöntemin temel eksikliği, ölçümlerde elde edilecek veriden yer altındaki dalga hızı bilgisinin belirlenmesindeki zorluktur. Yinede, yer altında bir nesne olduğunda veride bir saçılma hiperbolu oluşmaktadır. Bu hiperbolden yer altındaki dalga hızı kestirilebilir (Kruk, 2001, Kesemen, 2007).

Ortak açılım arazi uygulaması Şekil 2.13’de görüldüğü gibi verici (transmitter) TX, alıcı (receiver) RX arası uzaklık sabit (fixed offset), (a), ve çoklu uzaklıklı (multi offset), (b), şeklinde yapılır.



Şekil 2.13. Sabit aralıklı yansımaya hız sondajı uygulaması usulü derinlik kesiti (a), zaman kesiti (b) (Keçeli, 2009)

TX-RX aralığı sabit iken EM dalgalarını yansıtıcı bir kütle üzerinde yer radarı yansımaya kesitinin elde edilmesinin şematik örneğini Şekil 2.14’de gösterilmektedir.

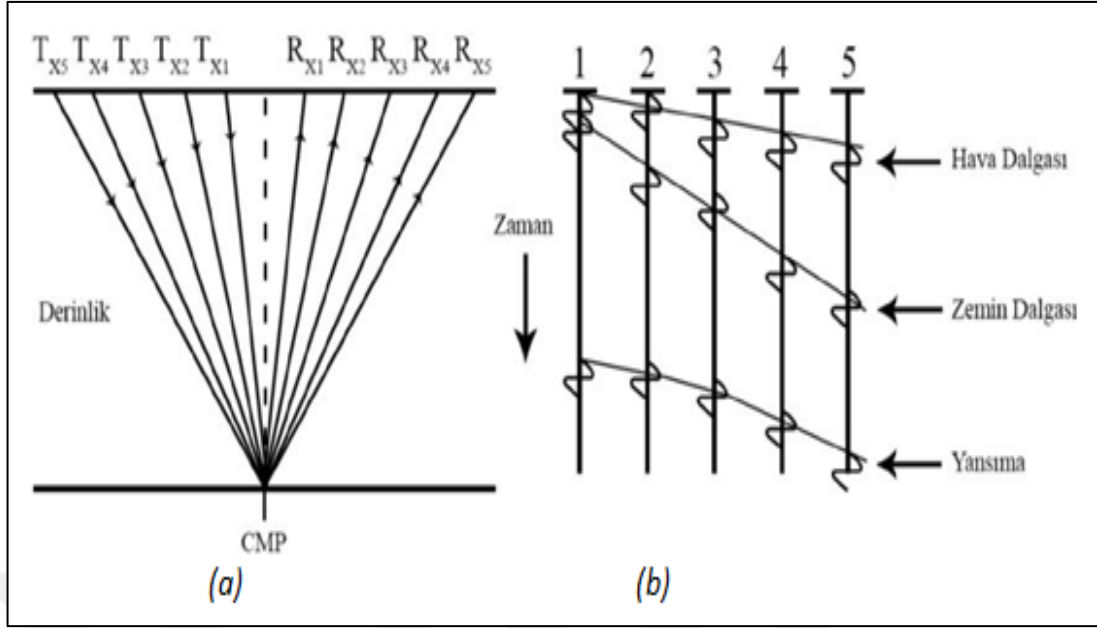


Şekil 2.14. T_X - R_X aralığı sabit iken yer radarı yansıma kesitinin elde edilmesinin şematik gösterimi (Neelembari, 2004'ten uyarlanmıştır)

2.9.2. Ortak orta nokta (CMP, Common mid point)

CMP çalışmalarında, sismik yönteme benzer biçimde, açılıma bağlı olarak oluşan yansımalarından elde edilen değişimler kullanılarak EM dalga hızları belirlenmektedir.

Bu yöntem uygulanması zor olduğundan çalışmalarda sadece hız tespiti amaçlı uygulanmaktadır. Yer radarında da sismik yansımada olduğu gibi verici ve alıcı arasındaki mesafe değiştirilerek ortak orta nokta (CMP) usulü ile şekilde görüldüğü gibi sinyal gidiş ve yansıyan sinyalin geliş zamanındaki değişimler saptanır. Ortak orta nokta usulü her bir ölçü noktası için tekrarlanır. Sismik yansımaya benzer hız düşey kesiti elde edilir (Şekil 2.15). Hız ölçümlerini mümkün olduğunca doğru yapabilmek için ölçümler, arazinin bir noktası yerine birkaç farklı noktasında yapılmalıdır. Bu çalışmalar sonucunda araştırılan tabaka, yapı veya objenin derinliği tespit edilebilmektedir. Ancak, bu yapıların konumları gerçek anlamda sondaj ve kazı çalışmalarıyla belirlenebilmektedir (Daniels, 1996; Kesemen, 2007; Keçeli, 2009).



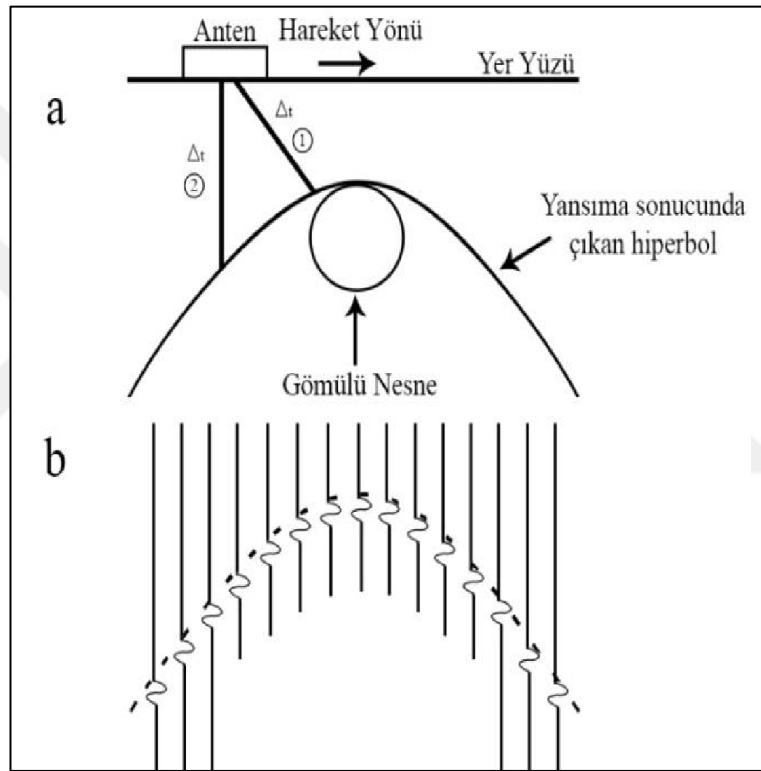
Şekil 2.15. Ortak orta nokta uygulaması usulü derinlik kesiti (a), zaman kesiti (b) (Keçeli, 2009)

2.10. Yer Radarı Verilerinin Değerlendirilmesi, Yorumu ve Verilere Uygulanan Temel Veri-İşlem Aşamaları

Sayısal olarak kayıt edilen yer radarı verileri çok fazla veri- işlem gerektirir. Yer altı yapılarının çok karmaşık oluşu, kum ve çakıl gibi malzemelerin bile kırılma ve yansımalar oluşturması, ışık hızı ve nanosaniye mertebelerinde çalışılması veride çok fazla istenmeyen sinyallerin oluşmasına neden olmaktadır. Yüksek tekrarlanmalardan istifade ederek istenilen sayıda iz elde etmek için yığma yapılabilir. Yığma sayısına arazi koşullarında, ölçü alımı sırasında karar verilir. Sinyallerin genliğinde zamana bağlı gelişen birçok veri-işlem aşaması arazi koşullarında yapılabilmesine rağmen veriler genelde ham olarak saklanır.

GPR verilerinin yorumlanması sismik sinyallerin yorumlanmasına benzemektedir. Birçok veri işlem sismiktekinin aynısıdır. Veriler eş aralıklı sayısal değerler olarak kayıt edilirken, kesitler yan yana dizilen her bir izin işlenmesi ile elde edilir. Gösterimde yatay eksen uzaklık, düşey eksen gidiş geliş zamanını gösterir. Düşey eksende kullanılan birim nano saniyedir. Bu da kesiti oluşturan verilerin sismikte kullanılan ses dalgasından farkını, kaynağın akustik empedans değil radar tarafından üretilen elektromanyetik dalgadan oluştuğunu gösterir. Elde edilen radar verileri sismik yöntemlerde olduğu gibi kesitler halinde sunulur (Şekil 2.16).

Analizleri yapılmamış yer radarı kesitleri hiçbir zaman yer altının 2B kesitlerine karşılık gelmez. GPR yönteminde; jeolojik bir ara yüzeyde, tabaka sınırlarında hiperboller görülmez ancak yer altında gömülü yapılar araştırılırken yer radarı kesitlerinde en çok görülen şekil hiperbollerdir. Bu hiperbolik sinyal imleri, yer altında bulunan borulara, duvar vb. her türlü gömülü nesnelere işaret etmektedir. Çünkü bu nesnelerin ara yüzeylerinin oluşturacağı yansımalar ve manyetik duyarlılıklarındaki farklar yapının şeklini verecek hiperboller oluşturacaktır ve ortam özelliklerinin tespitinde önemli bilgiler sağlayacaktır.



Şekil 2.16. Yer radarı verilerinin hiperbolik dağılımı (Conyers, 2004)

(a) Konikal olarak gösterilen radar enerjisinin dağılımı ile gömülü durumda bulunan hedefi oblik olarak kesmesini göstermektedir. Gidiş-geliş zamanı (Δt) toplam olarak kayıt edilir (1 ve 2), (b) ise kayıt sonunda işlenen veri üzerinde oluşan dalga değişimleri ve bunların hiperbol oluşturmalarının gösterimidir.

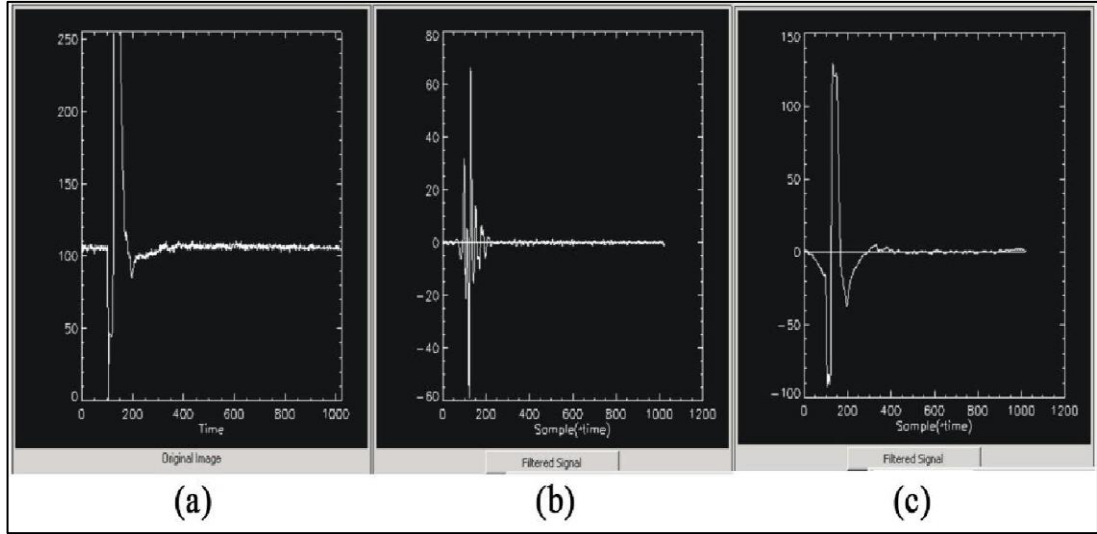
Yer radarı verilerine uygulanan veri işlem adımları sırasıyla Şekil 2.17'de gösterilmiştir.



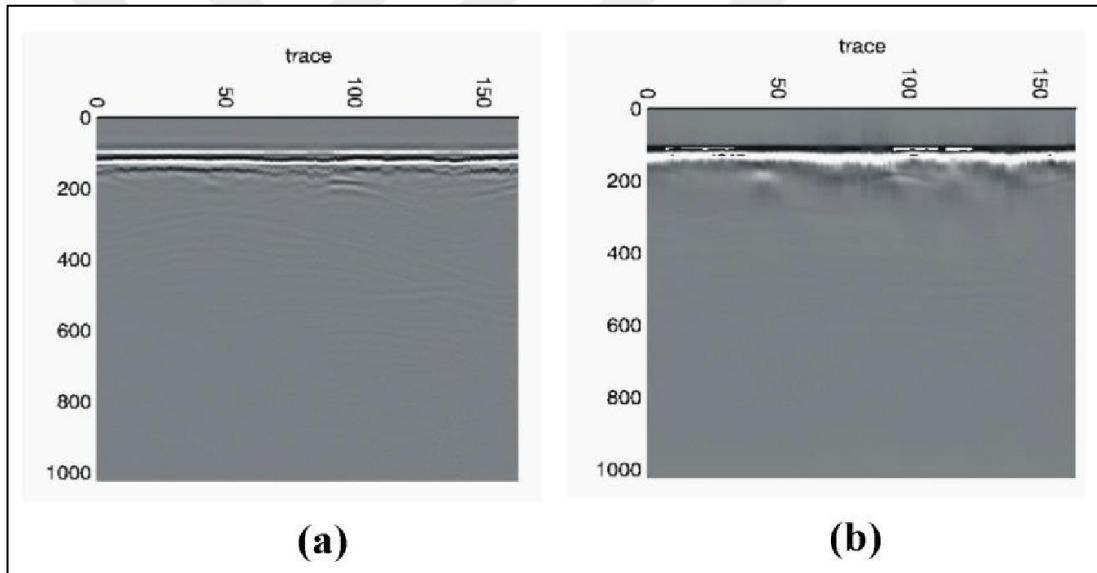
Şekil 2.17. Yer radarı verilerine uygulanan veri-işlem akış şeması (Kadioğlu, 2003)

2.10.1. Süzgeçleme

Elde ettiğimiz veriler birleştirildikten sonra yer radarı verilerindeki çok düşük frekanslı gürültüler veriden uzaklaştırılır. Gerçek yansımaları örten bu düşük frekansların bu etkisine "wow" etkisi denir. Bu etkiyi gidermek için yapılan işleme "dewow" süzgeçlemesi denir. Bunun ardından çalışmada hedeflenen duruma göre alçak geçişli, yüksek geçişli ve band geçişli süzgeçlemeler uygulanabilir. Alçak geçişli süzgeçleme uzun dalga boylarını veride tutarken yatay ayrımlılığı artırır, yüksek geçişli süzgeç ise kısa dalga boylarını veride tutarken saçılma sinyallerini belirginleştirir. Bant geçişli süzgeçleme ise istediğimiz frekans aralıklarını veride tutarken bu belirlediğimiz frekans dışındaki sinyalleri veriden atmak için kullanılır. Dewow ve diğer süzgeçleme işlemleri bant geçişli süzgeçleme kullanılarak yapılabilir. Şekil 2.18 ve Şekil 2.19 doğru süzgeçleme örneği gösterilmektedir (Kadioğlu, 2003).



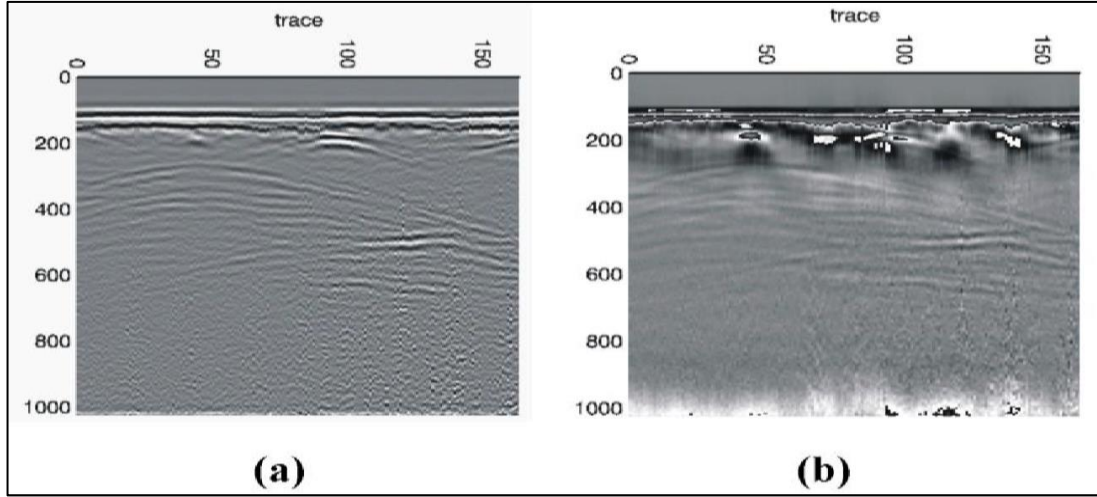
Şekil 2.18. GPR verisinde frekansların süzgeçlenmesi a) Ham yer radarı sinyali, b) Doğru süzgeçlenmiş sinyal, c) Yanlış süzgeçlenmiş sinyal (Kadioğlu, 2003)



Şekil 2.19. a) Doğru süzgeçlenmiş radagram, b) Yanlış süzgeçlenmiş radagram (Kadioğlu, 2003)

2.10.2. Genlik kazanç uygulaması

GPR verisi yüksek iletkenli ortamlarda hızla sönümlendiği için daha derinlerden alınan sinyal genlikleri yakın yüzey bölgelerinden gelen sinyal genliklerine göre daha zayıf olmaktadır. Bu sorunu ortadan kaldırmak için sinyallere genlik kazanç düzeltmesi uygulanır. Kazanç uygulamasında seçim yorumcuya göre değişir. Şekil 2.20 genlik kazanç uygulamasının bir örneğini göstermektedir.

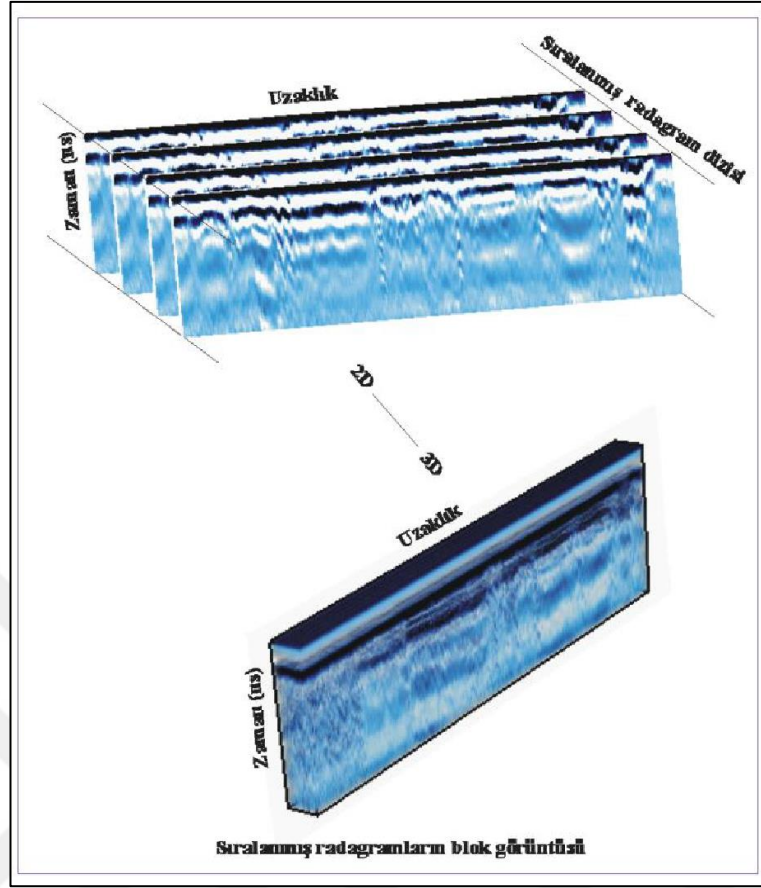


Şekil 2.20. Şekil 2.19'daki radagramlara aynı genlik kazanç fonksiyonunun uygulanması, a) Doğru süzgeçlenmiş radagram, b) Yanlış süzgeçlenmiş radagram (Kadıoğlu, 2003)

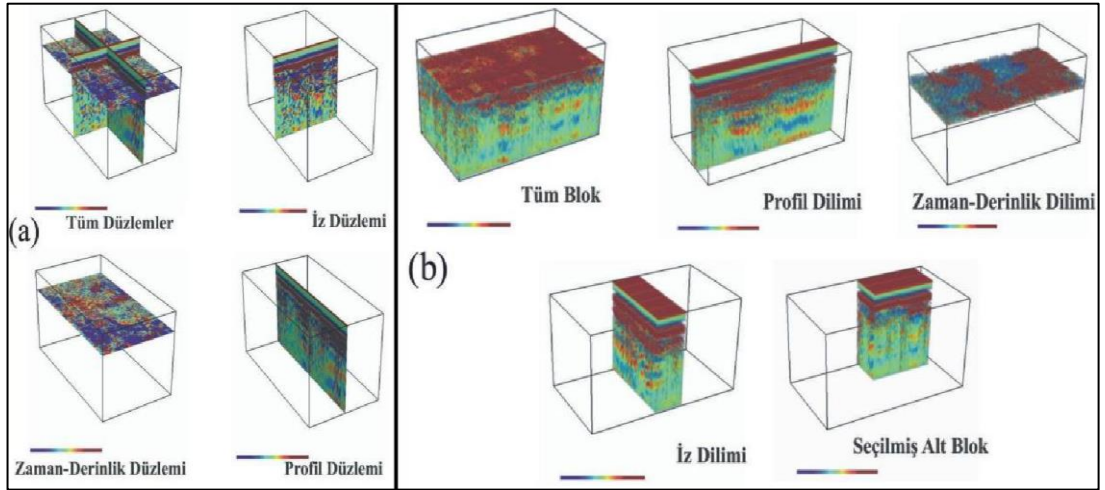
2.10.3. Üç boyutlu (3B) veri görüntüleme

Elde ettiğimiz bir boyutlu (1B) ve iki boyutlu (2B) görüntüler yorumlamada kolaylıklar sağlamasına rağmen yer altı yapılarının ya da aranan malzemenin çeşidinin ve geometrisinin netleştirilmesinde yeterli olmamaktadır. Bu nedenle üç boyutlu (3B) görüntüleme ve modelleme yöntemleri devreye girmektedir. Profillerin konumlandırılmasından sonra üretilen zaman kesitleri ile oluşturulan 2B görüntülerden sonra 3B olarak görüntülemeler yapılmaktadır. Verilerin sıralanması, çok yüksek, çok düşük ve gürültü olabilecek sinyallerin veriden atılması, genlik kazancı hızların bulunması, göç gibi veri işlem adımları yapıldıktan sonra elde edilen 2B radargramlar konumlarına göre sıralanarak 3B görünümü hale dönüştürülür. (Şekil 2.21). 3B veri görüntüleme ile zaman- uzaklık değişimleri, derinlik değişimleri, profil izlerindeki değişimler yada birden fazla kesitin birlikte gösterildiği görüntüler şeklinde Şekil 2.22'deki gibi etkileşimli gösterimler sunulabilir (Kadıoğlu, 2012).

Üç boyutlu görüntülemenin; yer altı yapısını, ölçümlerin zaman uzaklık kesitlerini birleştirerek derinlik, anomali, hız ve geometri ile gösterebilmesi yorumlamada araştırmacıya büyük kolaylıklar sağlamaktadır. Kesitlere farklı açılardan bakma olanağının yanında kesitleri döndürme, anomalilerin sürekliliğini takip etme seçenekleri sunar. Kesitleri yatay ve dikey daha küçük bloklara bölerek zaman ve hız dilimleri ile de görüntüleyebilir.



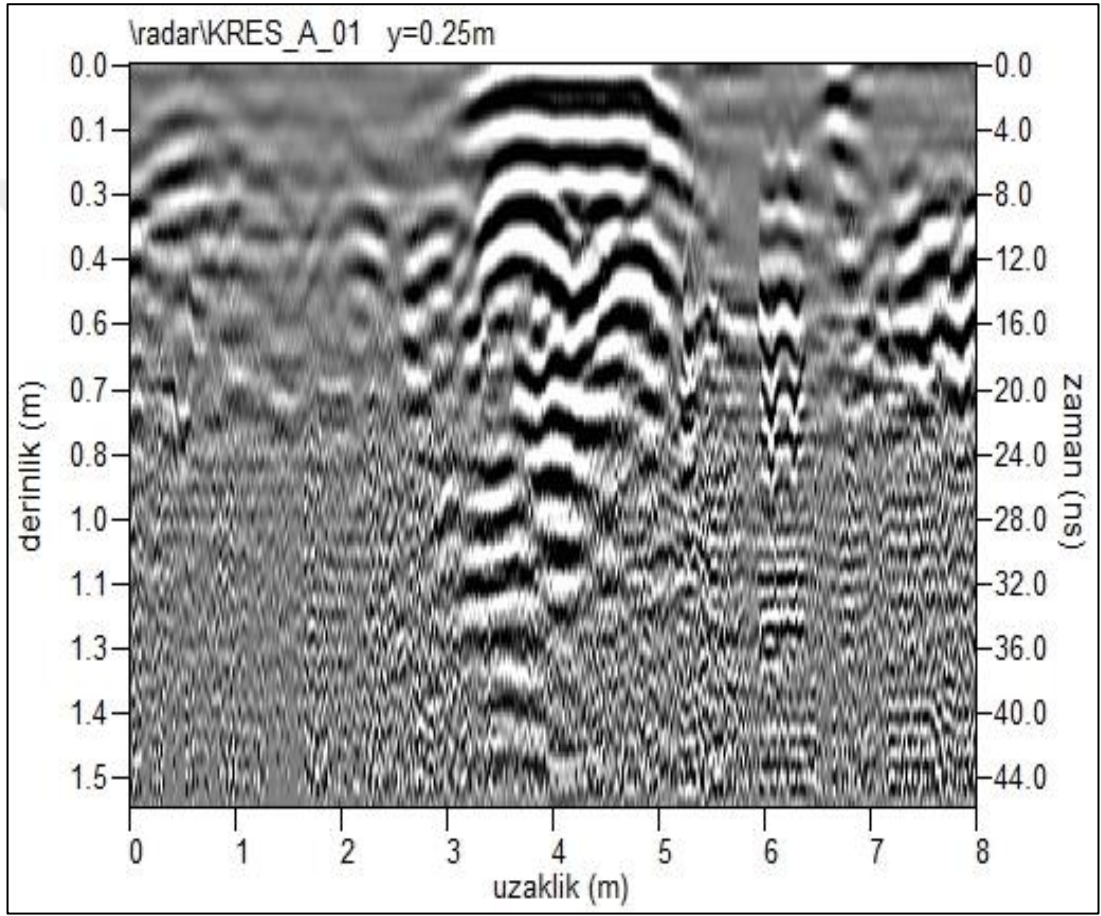
Şekil 2.21. Paralel 2B verilerin konumlarına göre sıralanarak görünür 3B veri bloğunun elde edilmesi (Kadioğlu and Daniels, 2002; Kadioğlu, 2003)



Şekil 2.22. Veri işlem adımları tamamlanmış yer radarı verilerinin; (a) 3B düzlem örnekleri ve (b) 3B tüm kesit ve alt dilimlerin görüntüleme örnekleri. (b) de gösterimi yapılan görüntülemeye 3B katı blok görüntüleme denmektedir. İç bölümleri tam olarak görüntülenemeyen katı bloklarda genlik-renk ölçeklemesi değiştirilerek istenilen genlikler belirginleştirilir. Sadece aranan yapının görüntülenebildiği saydam 3B blok görüntüleme yapılabilir. (Kadioğlu, 2012)

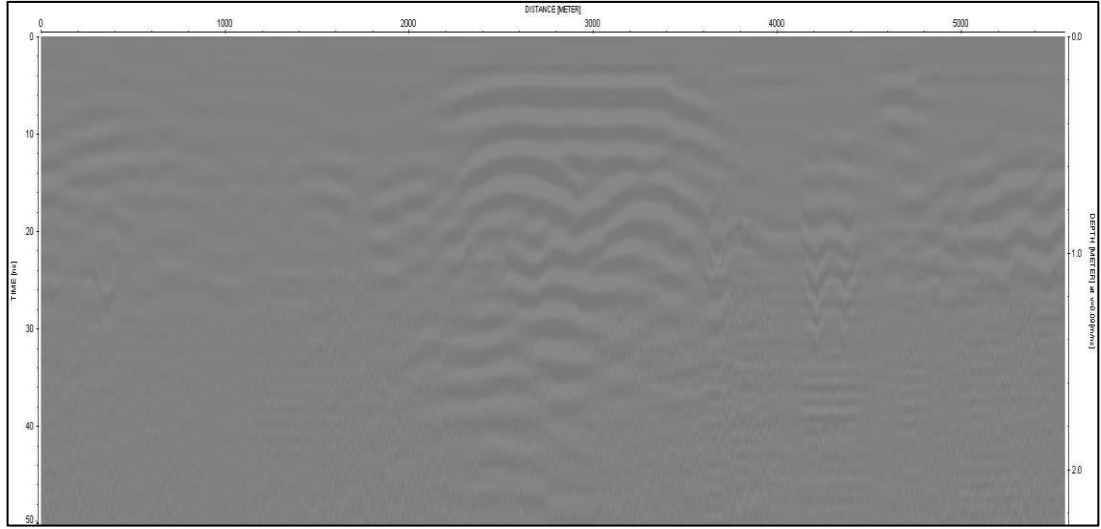
2.10.4. Çalışma alanı gpr verilerine uygulanan veri işlemler

Çalışma alanında; çökmenin olduğu 1. Alanda 36, bu alanın kuzeyinde üst arka olarak adlandırdığımız 2. Alanda 12 adet olmak üzere toplam 44 profilde yer radarı ölçüleri alınmıştır. Bu ölçülerden elde edilen radargramlar mesafe-zaman-derinlik eksenli 2B görüntülerdir (Şekil 2.23). Derinlik dönüşümü ortalama hız 0,1m/ns alınarak yapılmıştır.



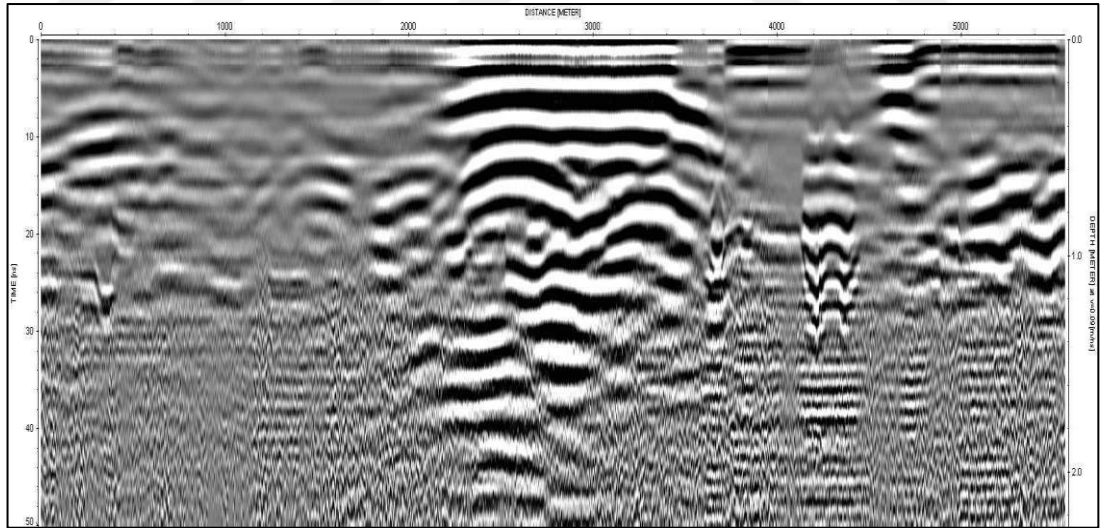
Şekil 2.23. Çalışma alanında alınan toplam 44 yer radarı ölçüsünden KRES_A_01 profiline ait verinin ham radargram görünümü

Alınan ölçüler Reflex-Win 7.0.3 programı ile görüntülenerek değerlendirilmiştir. İlk olarak ölçü alınan profil hatlarına ait veri dosyaları sırasına göre birleştirilerek tek bir dosya haline getirilmiştir. Ardından aranan gerçek veriyi örten çok düşük frekanslı gürültüleri (wow) gidermek için “Substract Mean- (dewow)” veri işlem adımı uygulanmıştır. KRES_A_01 profiline ait ham veriye dewow (çıkarma/ortalama) süzgeçleme işlemi uygulandıktan sonraki radargram görüntüsü Şekil 2.24’de verilmiştir.



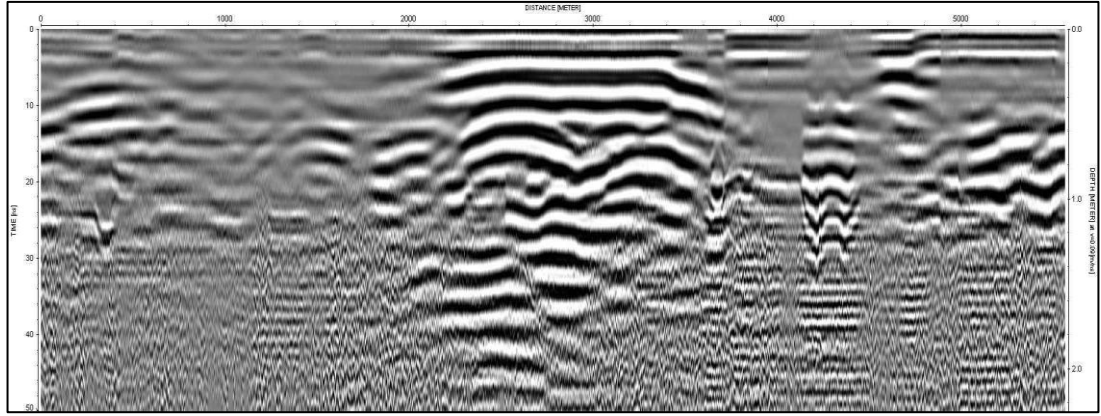
Şekil 2.24. Subtract mean (dewow) düzeltmesi uygulanmış radargram

Elektromanyetik radar sinyali zamanla çok hızlı sönümlendiği için kaydedilen verilere genlik kazancı düzeltmesi uygulanmaktadır. Bu sayede yüzeye yakın bölgelere göre genliği daha düşük olan derinden gelen sinyallerin genlikleri güçlendirilmektedir. Bu sorunu düzeltmek için veriye genlik kazanç düzeltmesi (gain) adımı uygulanmıştır (Şekil 2. 25).



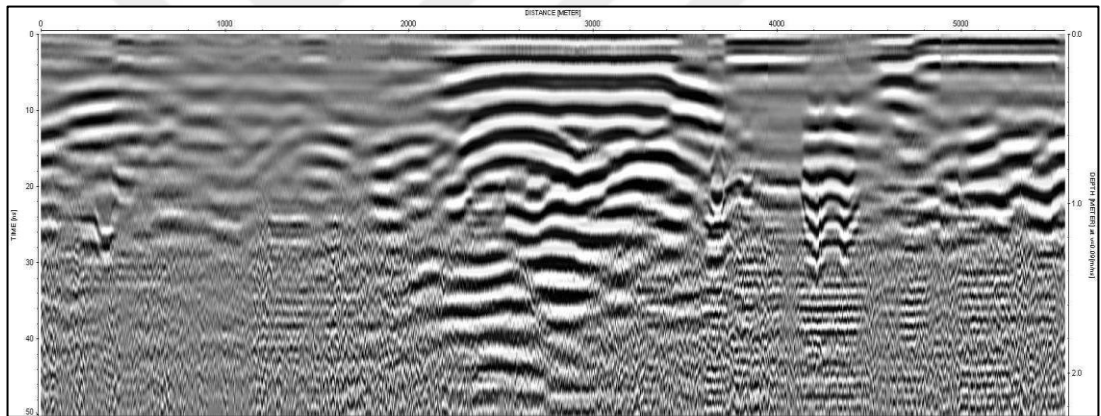
Şekil 2.25. Genlik kazanç (gain) düzeltmesi uygulanmış radargram

Veride baskın olan frekans aralığını koruyarak bu aralığın altındaki ve üstündeki verileri uzaklaştırma işlemine bant geçişli süzgeçleme denmektedir. İki frekans aralığındaki olayları geçiren, kısa dalga boyundaki olayları baskın hale getirerek saçılma verilerini belirginleştiren bant geçişli süzgeçleme (bandpass frequency) adımı veriye uygulanmıştır (Şekil 2.26).



Şekil 2.26. Bant geçişli süzgeç (bandpass frequency) işlemi uygulanmış radargram

Yer altı nesnelere görüntülemek amacıyla elde ettiğimiz ham verilere son olarak, arka plan gürültülerinin kaldırılması (background removal) veri işlem adımı uygulanmıştır (Şekil 2.27).



Şekil 2.27. Background removal veri işlemi uygulanmış radargram

İnceleme alanında alınan toplam 44 adet profilin her birine yukarıda anlatılan veri işlem adımları teker teker uygulanarak her profile ait sonuç radargramları çizdirilmiştir.

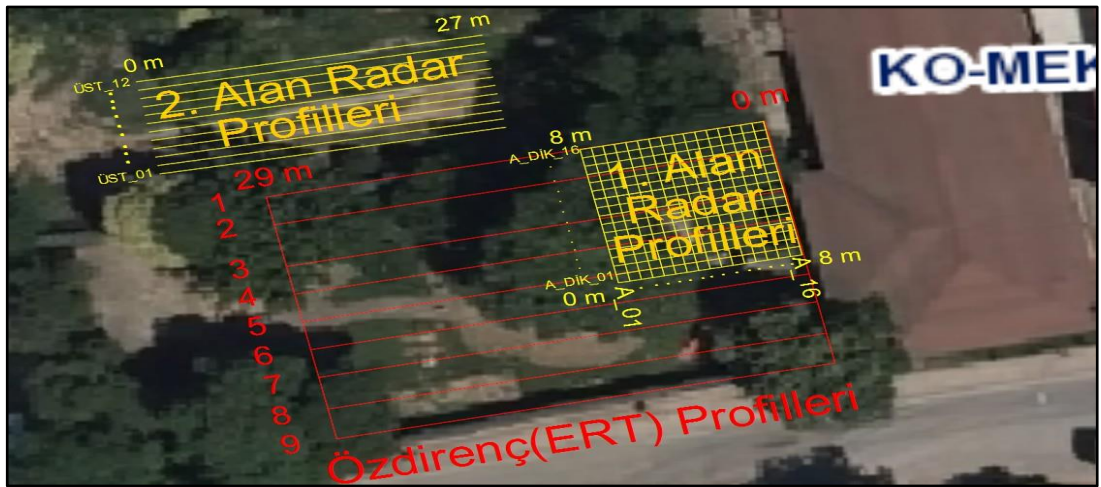
2.11. Çalışma Alanı GPR Verilerinin Toplanması ve Değerlendirilmesi

Çalışma alanında; birbirine bitişik, 8x8 ve 12x27 m boyutlarındaki iki ayrı kısımda, 300 MHz lik kapalı anten ile ölçüler alınmıştır. Birinci alan çökmenin de olduğu 8x8 m lik kısımdır (Şekil 2.28). Burada profil aralığı 0,5 m, profil uzunluğu 8 m olan ve birbirine dik 16+16= 32 adet ölçü alınmıştır. İkinci alan, çökme alanının kuzey ve kuzeydoğusunda kalan ve yaklaşık 1,20 m daha yüksek kottaki bölümdür. Burada profil aralığı 0,5m, profil uzunluğu 27 m olan 12 adet ölçü alınmıştır (Şekil 2.29).



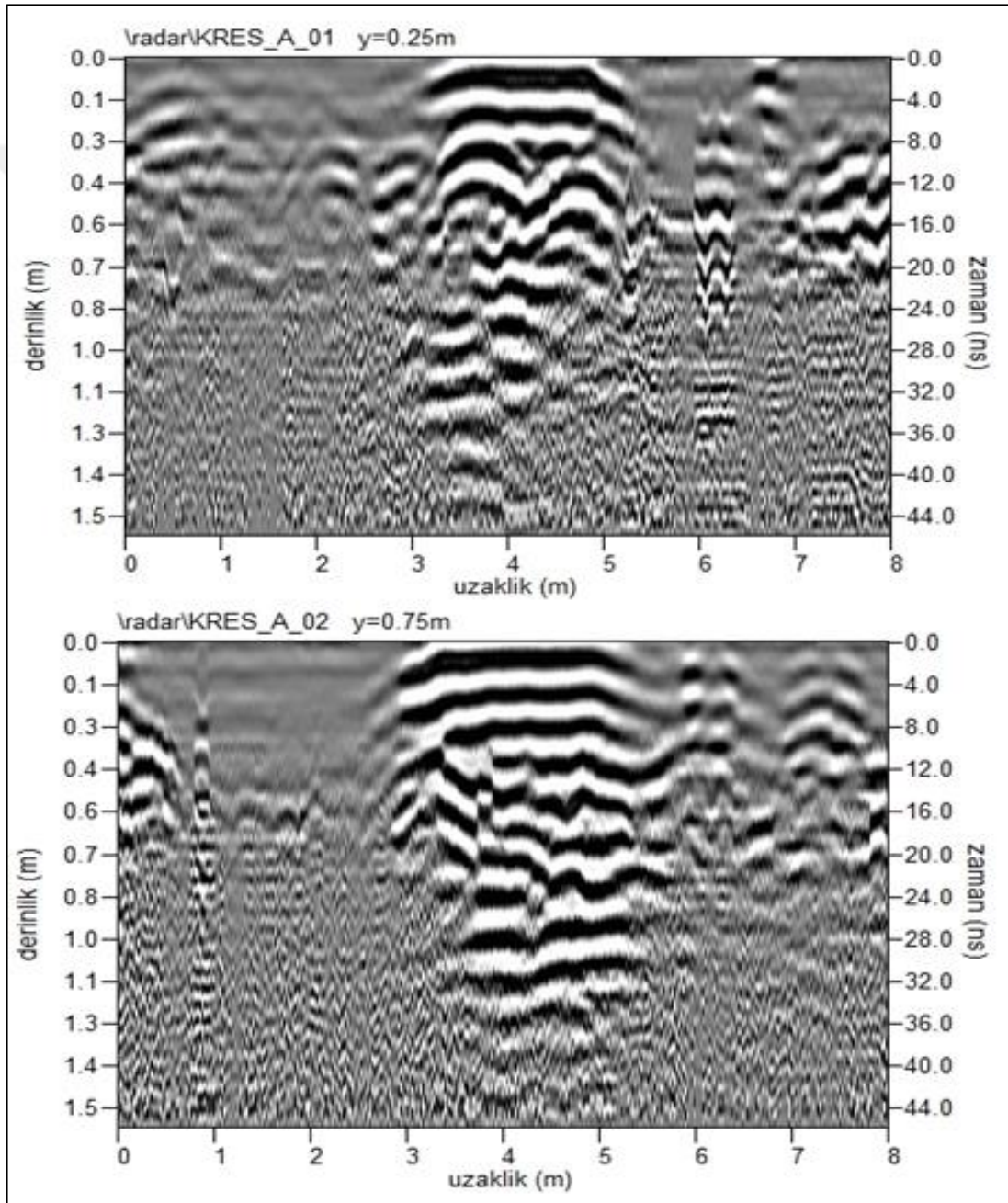
Şekil 2.28. Çökme bölgesi birinci araştırma alanı

Esas çökmenin olduğu alan 1. alan olarak isimlendirilmiştir. Çökme alanının kuzey ve kuzeydoğusunda kalan ve yaklaşık 1,20 m daha yüksek kottaki bölüm ise 2. alan olarak isimlendirilmiştir. 1.alandaki kuzey-güney yönlü yatay profillerden alınan ölçüler ile batı-doğu yönlü dikey profillerden alınan ölçüler ve 2. alandaki batı-doğu yönlü dikey profillerden alınan ölçülerde kayıt edilen izlerin birleştirilmesi ile radargramlar elde edilmiştir. Alınan bu ölçülere uygulanan veri işlem aşamalarında Reflexw programı kullanılmıştır. Öncelikle çok düşük frekansları atmak için dewow filtre uygulanmıştır. Ardından genlik kazancı AGC, bant geçişli, arka plan gürültünün atılması (background removal) veri işlem yöntemleri uygulanarak yer altındaki yüksek ve düşük genlikli yansımalar belirlenerek yer altı yapıları ile ilgili bilgiler elde edilmiştir.

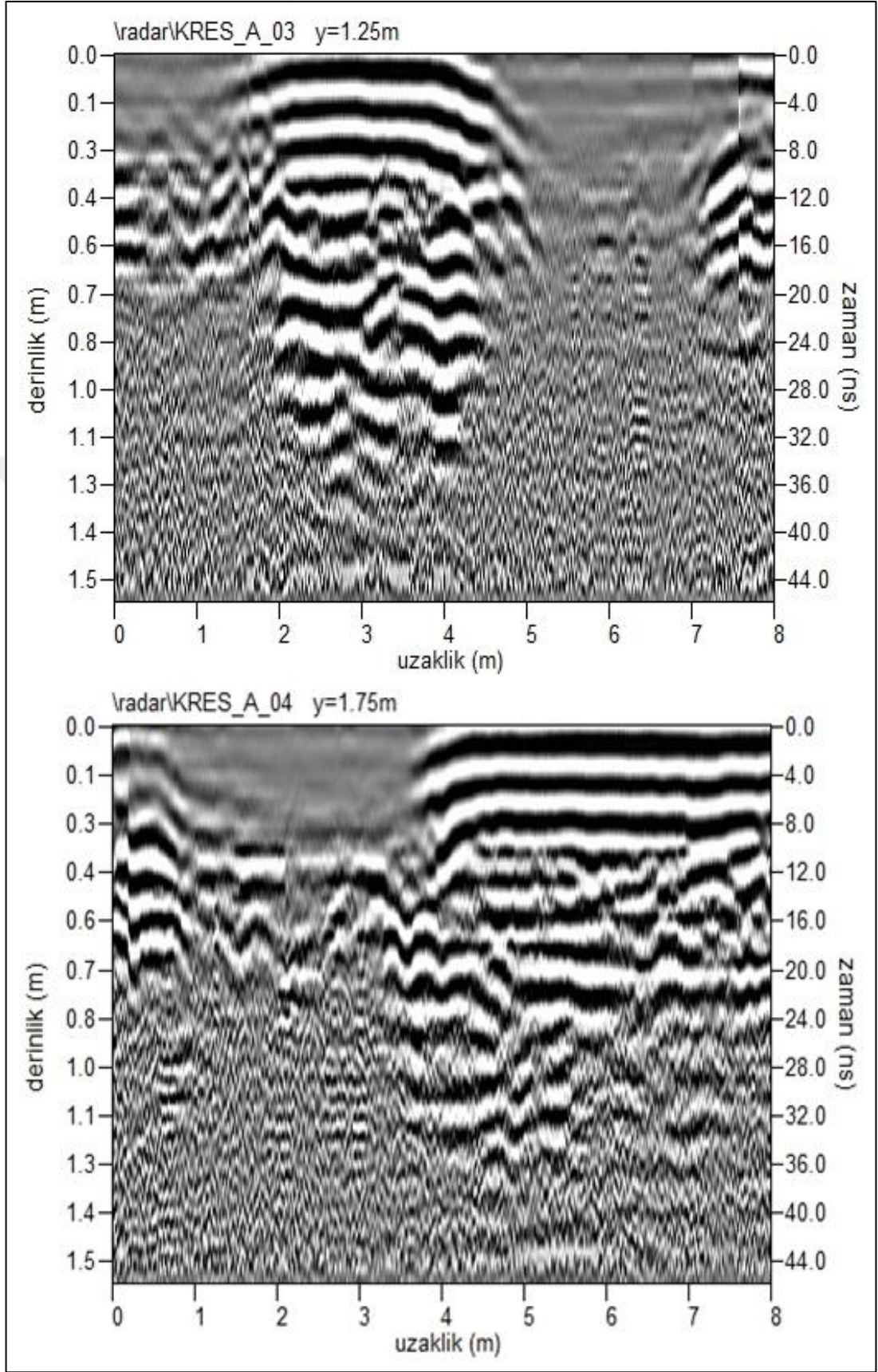


Şekil 2.29. Yer radarı ile ölçü alınan profillerin yerleri sarı renkli çizgilerle, elektrik öz direnç yöntemi ile ölçü alınan profillerin yerleri kırmızı renkli çizgilerle gösterilmektedir.

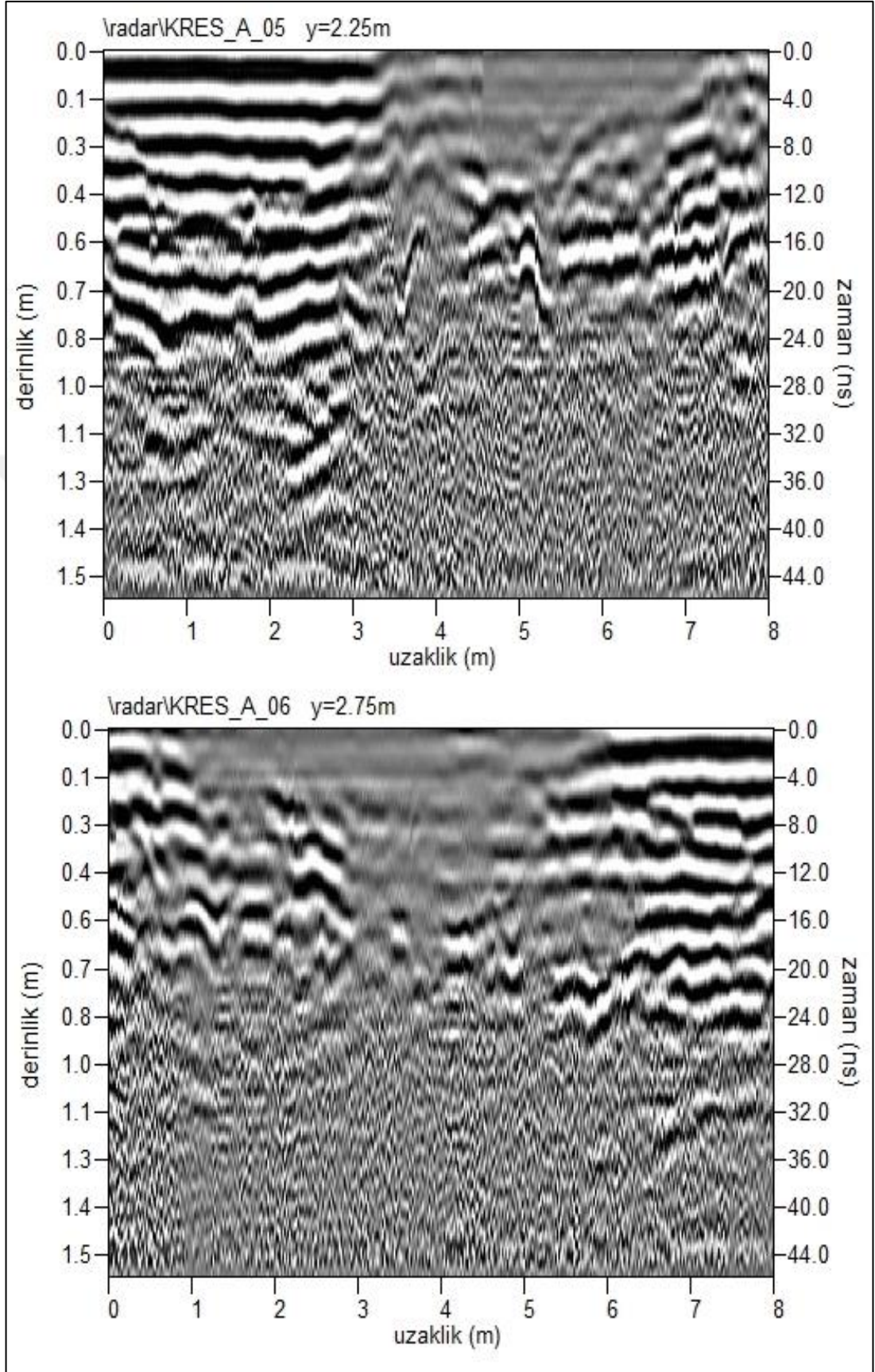
Yer radarı ölçümleri sonucunda elde edilen radar izlerinin gösterimi mesafe-zaman eksenli 2B görüntülerdir. Radagram görüntülerinde yatay eksen ölçüm alınan profilin uzunluğunu, sol taraftaki düşey eksen ise derinlik değerini göstermektedir. Sağ taraftaki düşey eksen ise yüksek frekanslı EM dalganın yer içindeki gidiş-dönüş seyahat zamanını göstermektedir. Ortalama hız 0,1 m/ns alınarak derinlik dönüşümü yapılmıştır. 1 Nolu Çalışma alanından elde edilen ham veriler (Şekil 2.30-2.37) aralığında gösterilmiştir.



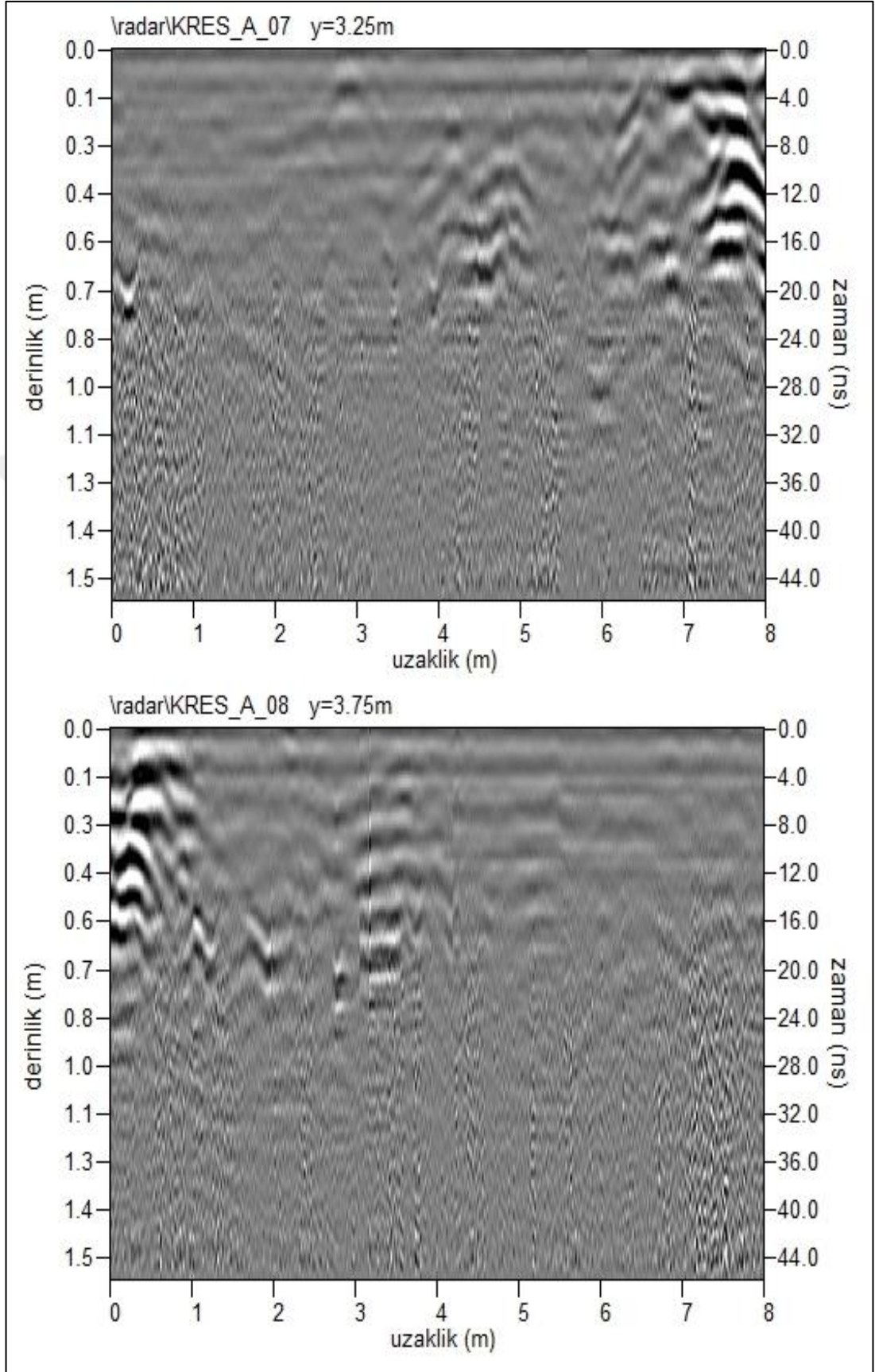
Şekil 2.30. Çalışma Alanı 1 (Çökmenin Olduğu Alan) 1 ve 2 nolu profillerin ham verileri



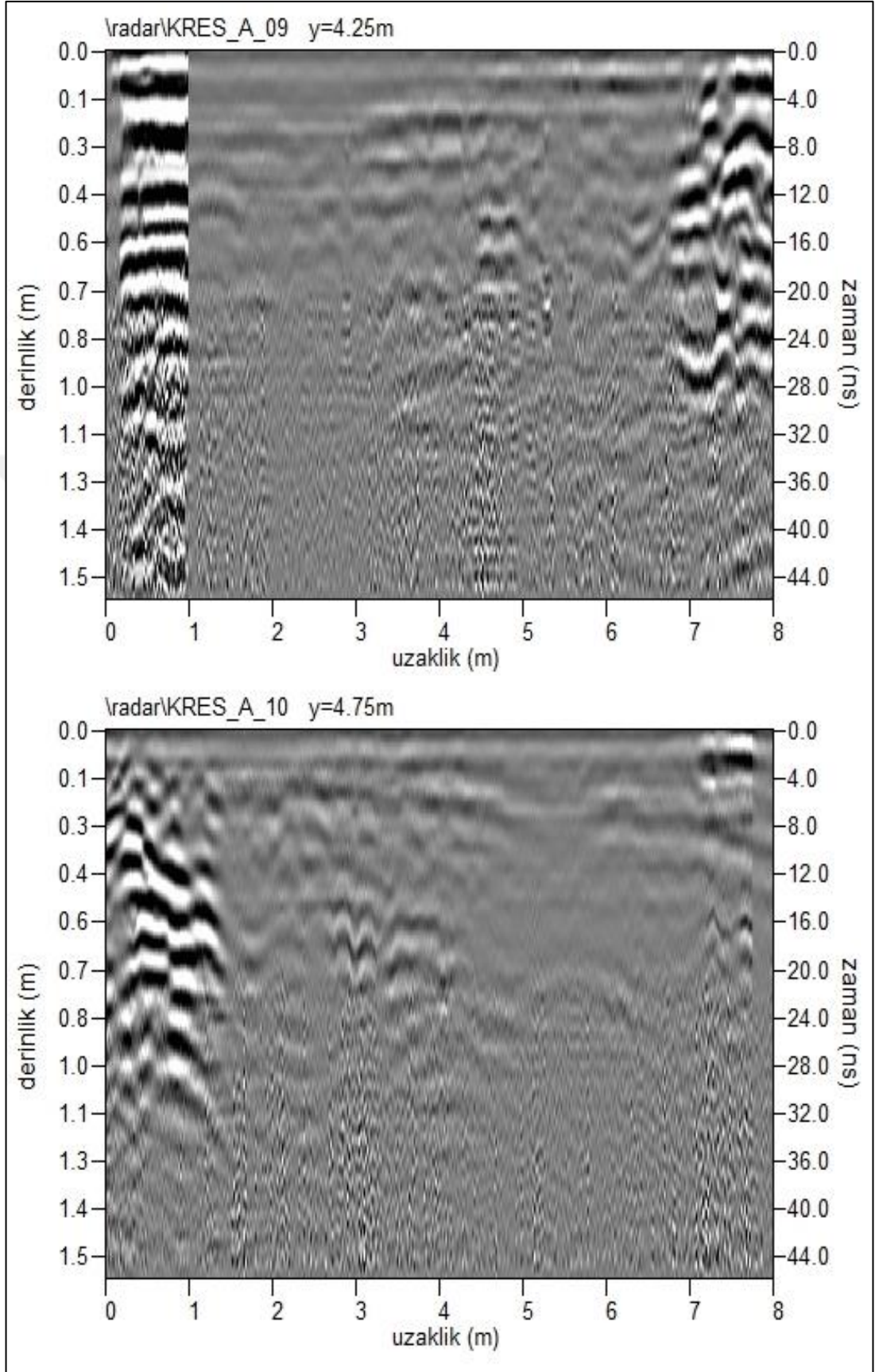
Şekil 2.31. Çalışma Alanı 1 (Çökmenin Olduğu Alan) 3 ve 4 nolu profillerin ham verileri



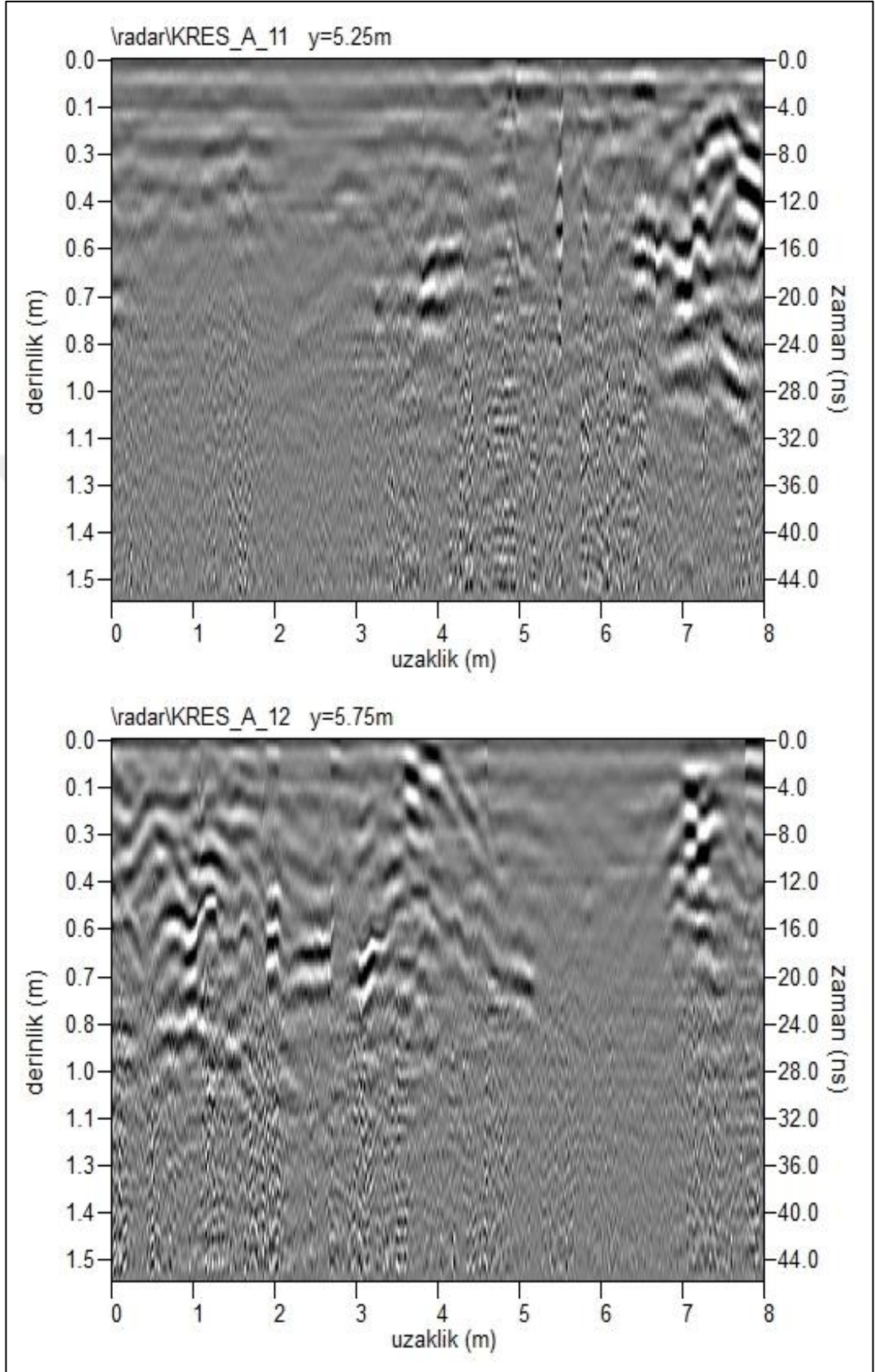
Şekil 2.32. Çalışma Alanı 1 (Çökmenin Olduğu Alan) 5 ve 6 nolu profillerin ham verileri



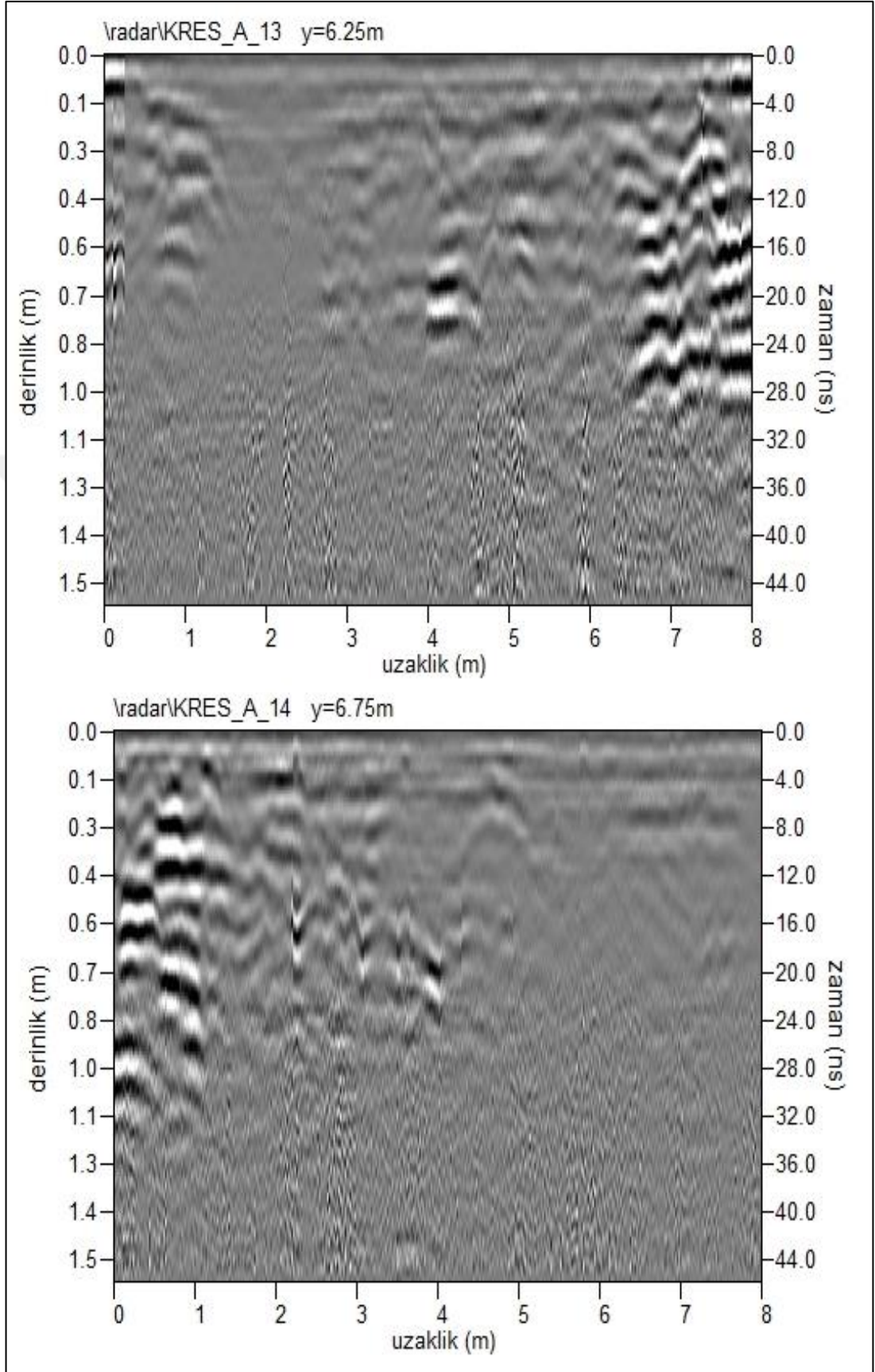
Şekil 2.33. Çalışma Alanı 1 (Çökmenin Olduğu Alan) 7 ve 8 nolu profillerin ham verileri



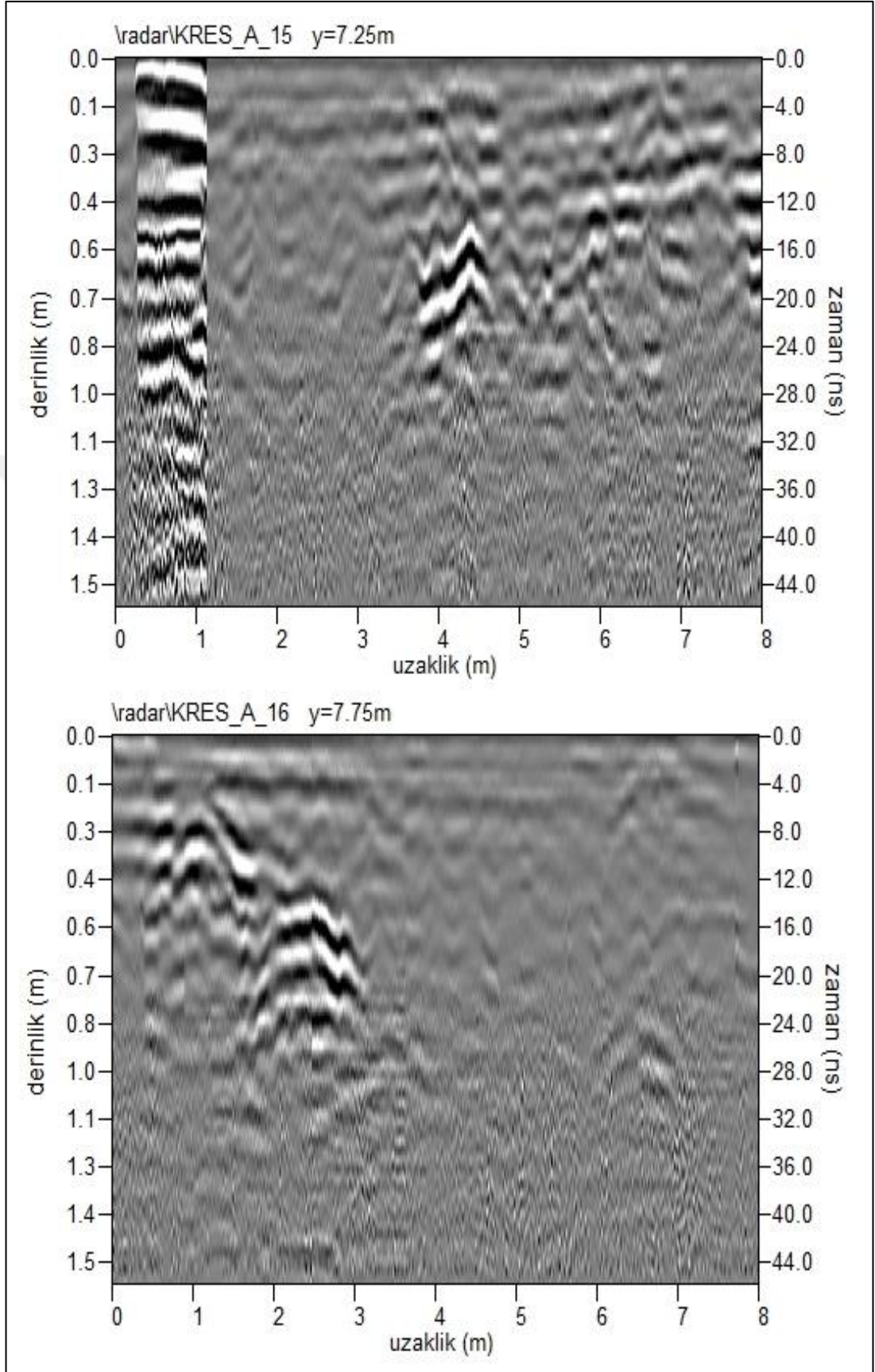
Şekil 2.34. Çalışma Alanı 1 (Çökmenin Olduğu Alan) 9 ve 10 nolu profillerin ham verileri



Şekil 2.35. Çalışma Alanı 1 (Çökmenin Olduğu Alan) 11 ve 12 nolu profillerin ham verileri

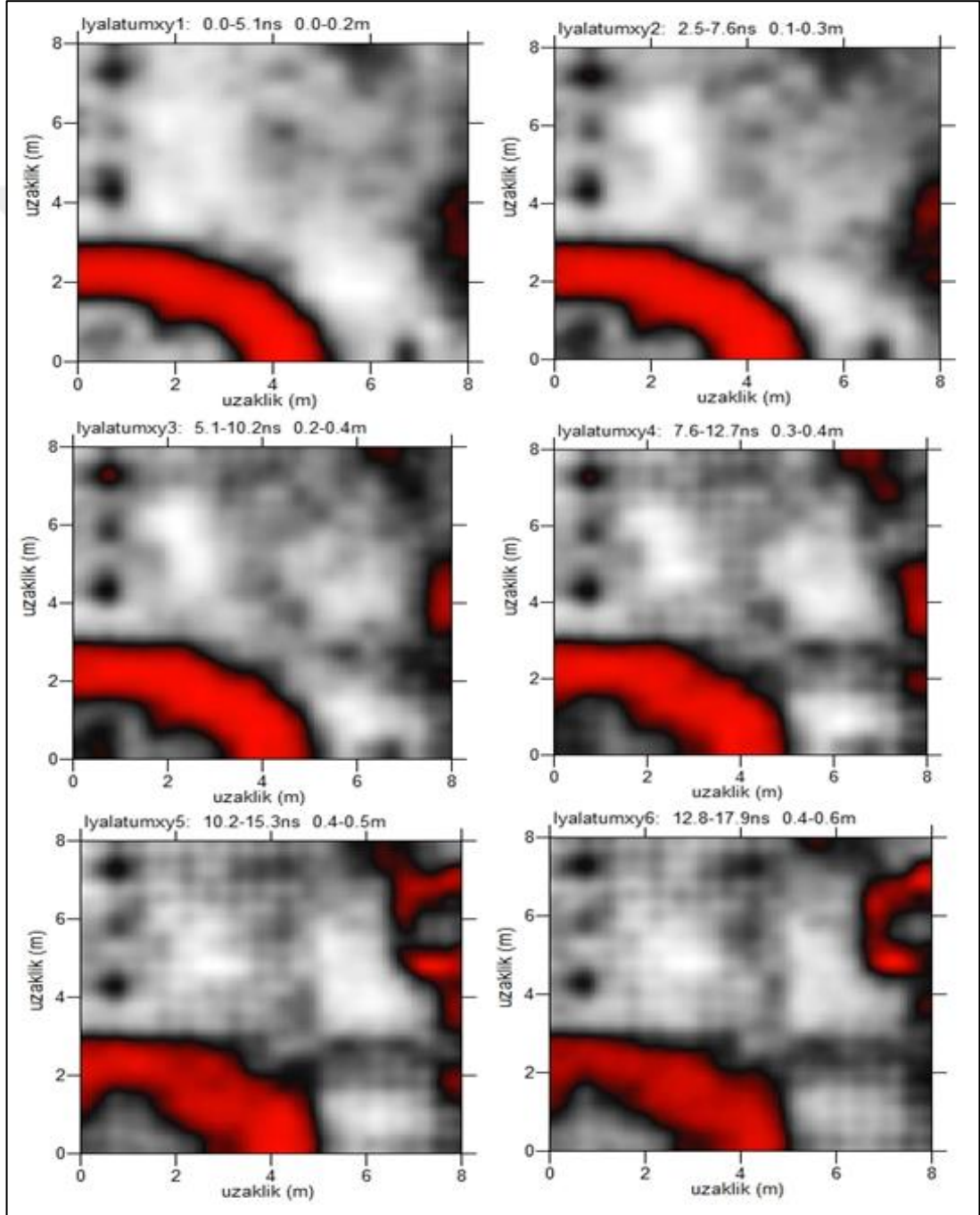


Şekil 2.36. Çalışma Alanı 1 (Çökmenin Olduğu Alan) 13 ve 14 nolu profillerin ham verileri

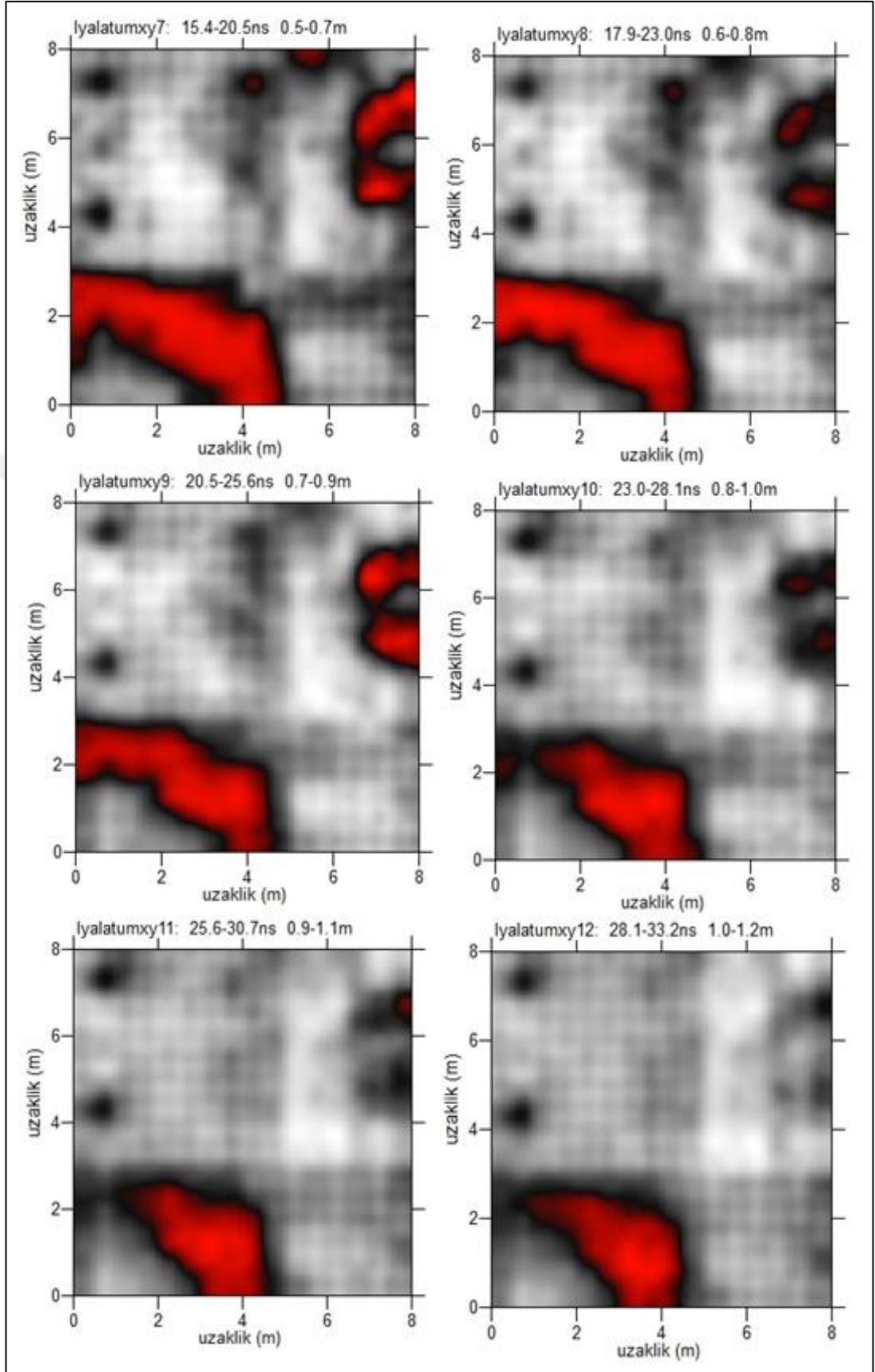


Şekil 2.37. Çalışma Alanı 1 (Çökmenin Olduğu Alan) 15 ve 16 nolu profillerin ham verileri

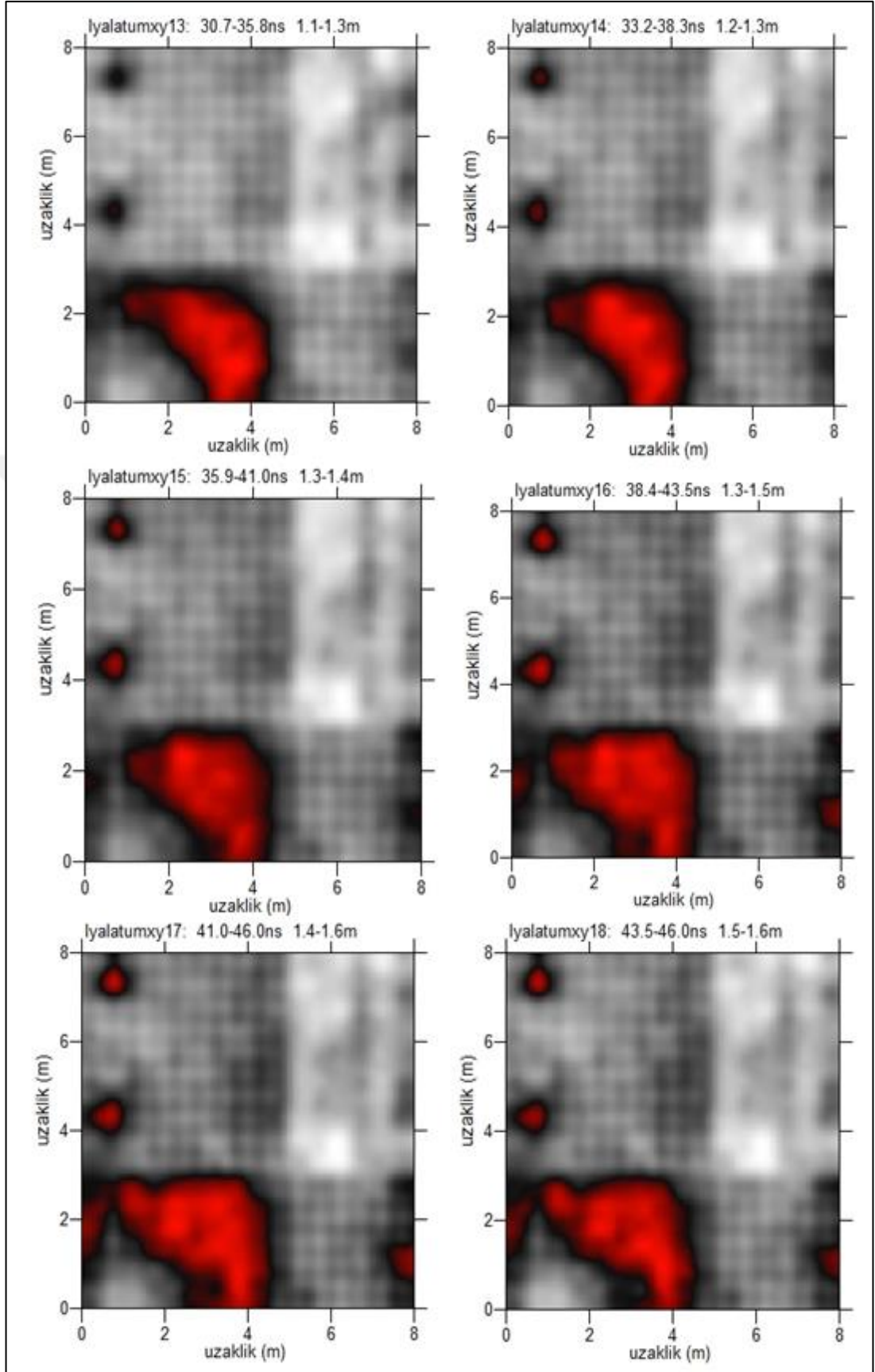
Profil aralığı 0,5 m ve profil uzunluğu 8 m olan, birbirine dik 32 profilden oluşan 1. Alanın yapılan değerlendirmesine göre; zeminin dolgu birimlerden (kalıntı, hafriyat vs.) oluşması nedeniyle maksimum 1,5-1,6 m derinliğe kadar veri elde edilebilmiştir. Bu verilerde kırmızı renkle gösterilen yüksek genlikli yansımalar mevcut yüzeydeki parke yol ile 0-1,6 m aralığında görülen dolgu birimlerdeki daha büyük hacimli malzemeler olarak değerlendirilmiştir (Şekil 2.38-2.40).



Şekil 2.38. Çalışma Alanı 1 (Çökmenin Olduğu Alan) 0,0 m.-0,6 m. arası sonuç radarogramları

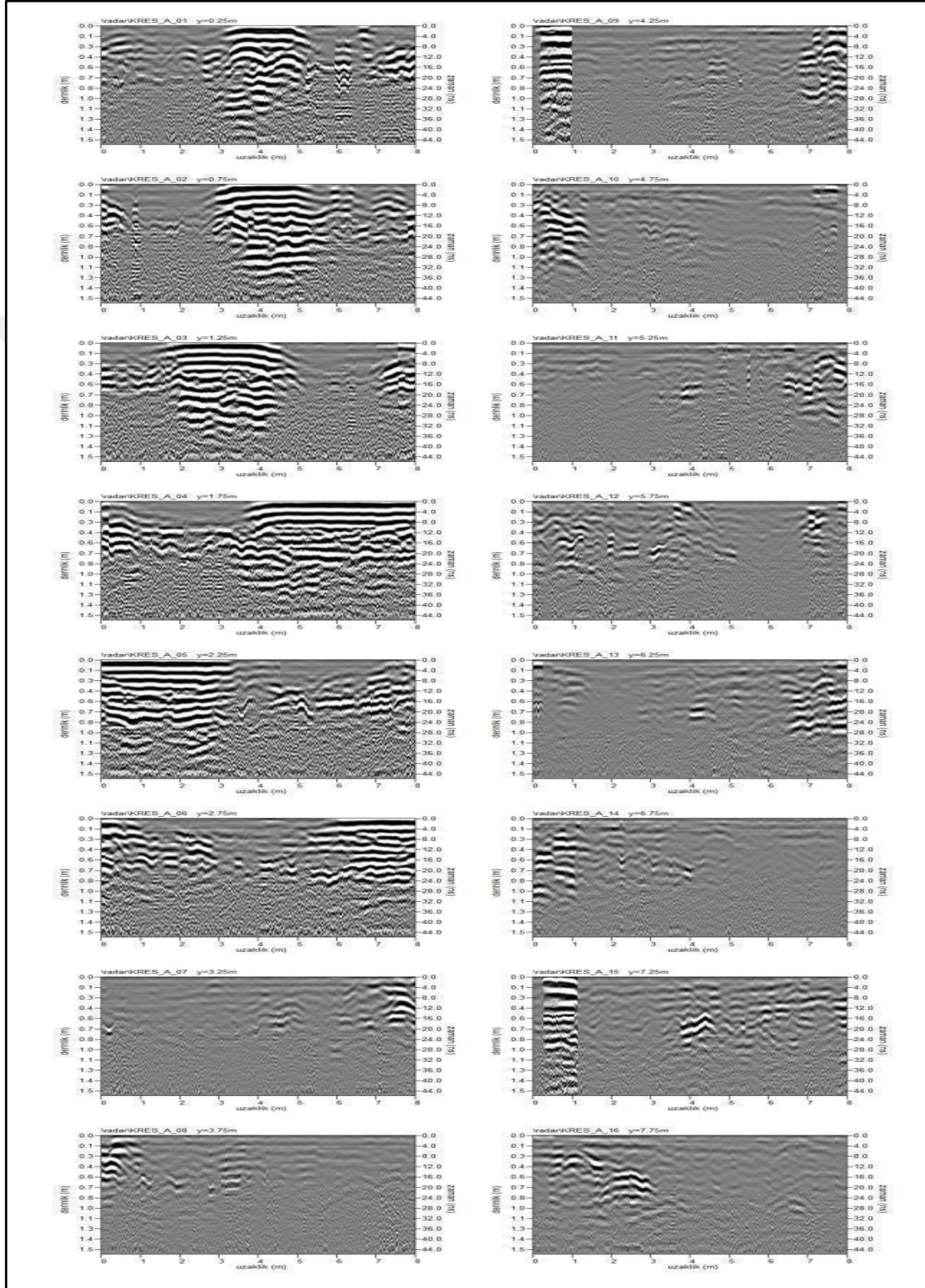


Şekil 2.39. Çalışma Alanı 1 (Çökmenin Olduğu Alan) 0,5 m.-1,2 m. arası sonuç radargramları

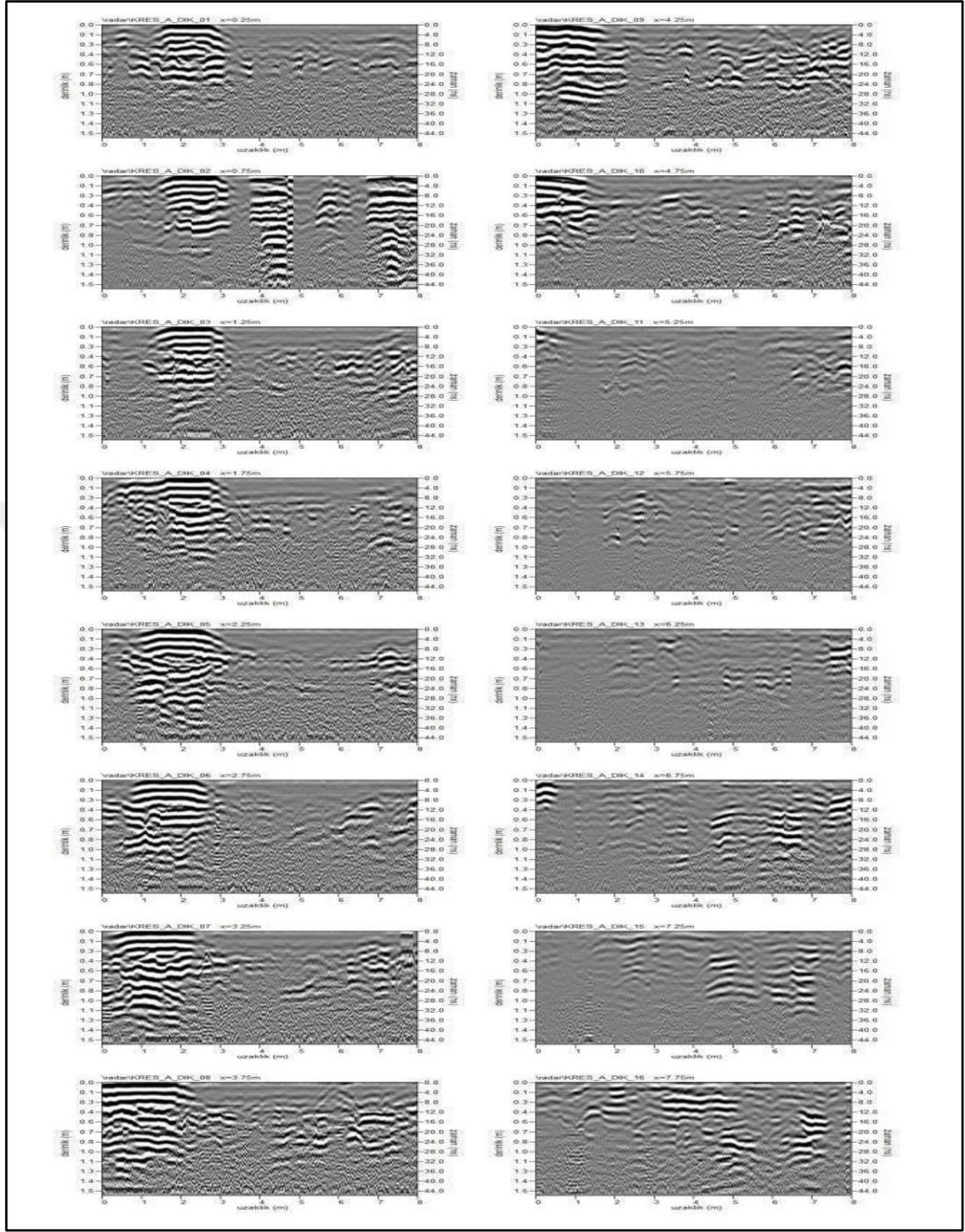


Şekil 2.40. Çalışma Alanı 1 (Çökmenin Olduğu Alan) 1,1 m.-1,6 m. arası sonuç radargramları

Çalışma Alanı 1 de elde edilen izlerin güney kuzey yönlü olanlarının toplu gösterimi (Şekil 2.41) ve bu profillere dik olarak alınan batı-doğu yönlü izlerin toplu gösterimi (Şekil 2.42) da verilmiştir.

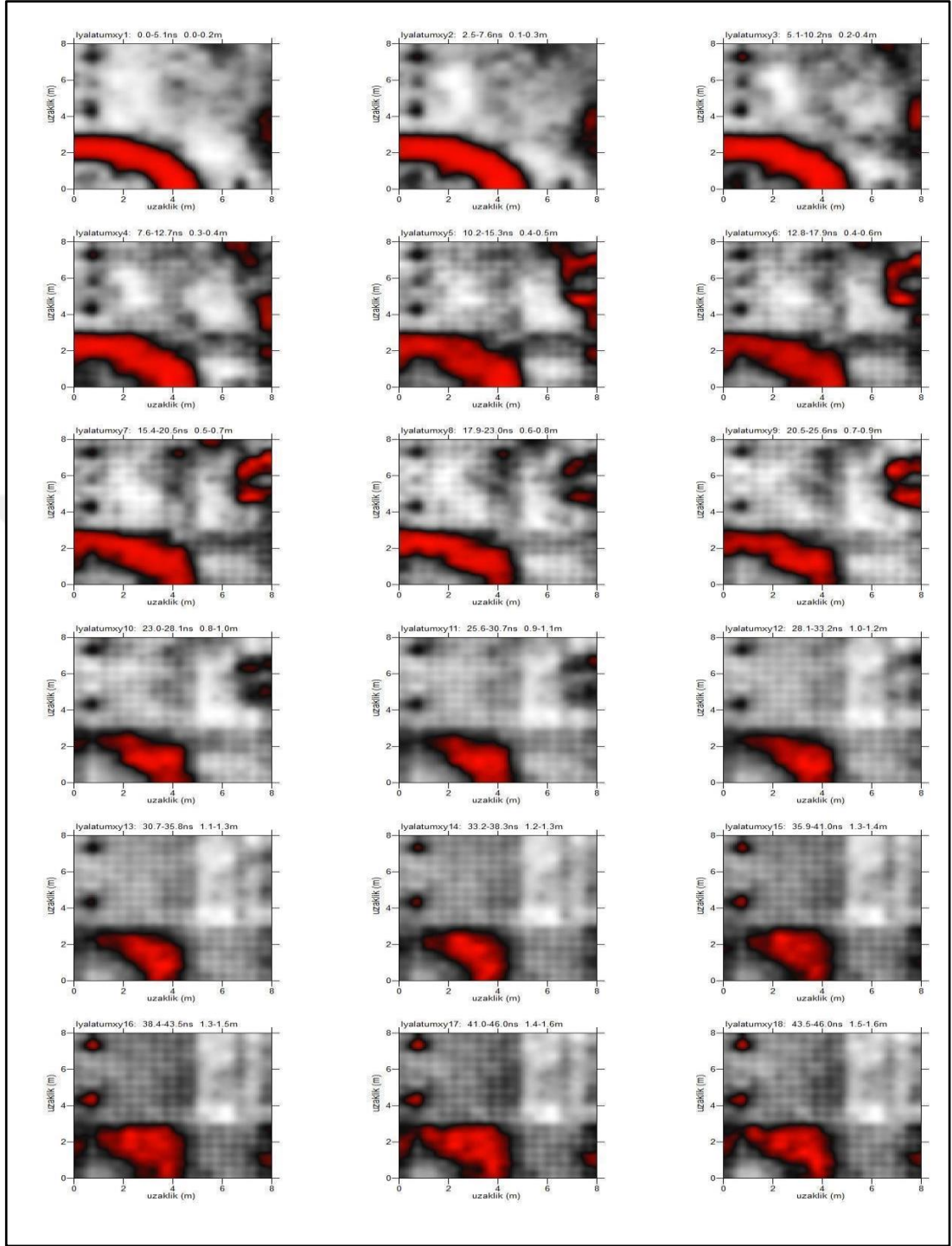


Şekil 2.41. 1.Alan Güney-Kuzey yönlerinde alınan GPR ölçülerinden elde edilen radargramlar.



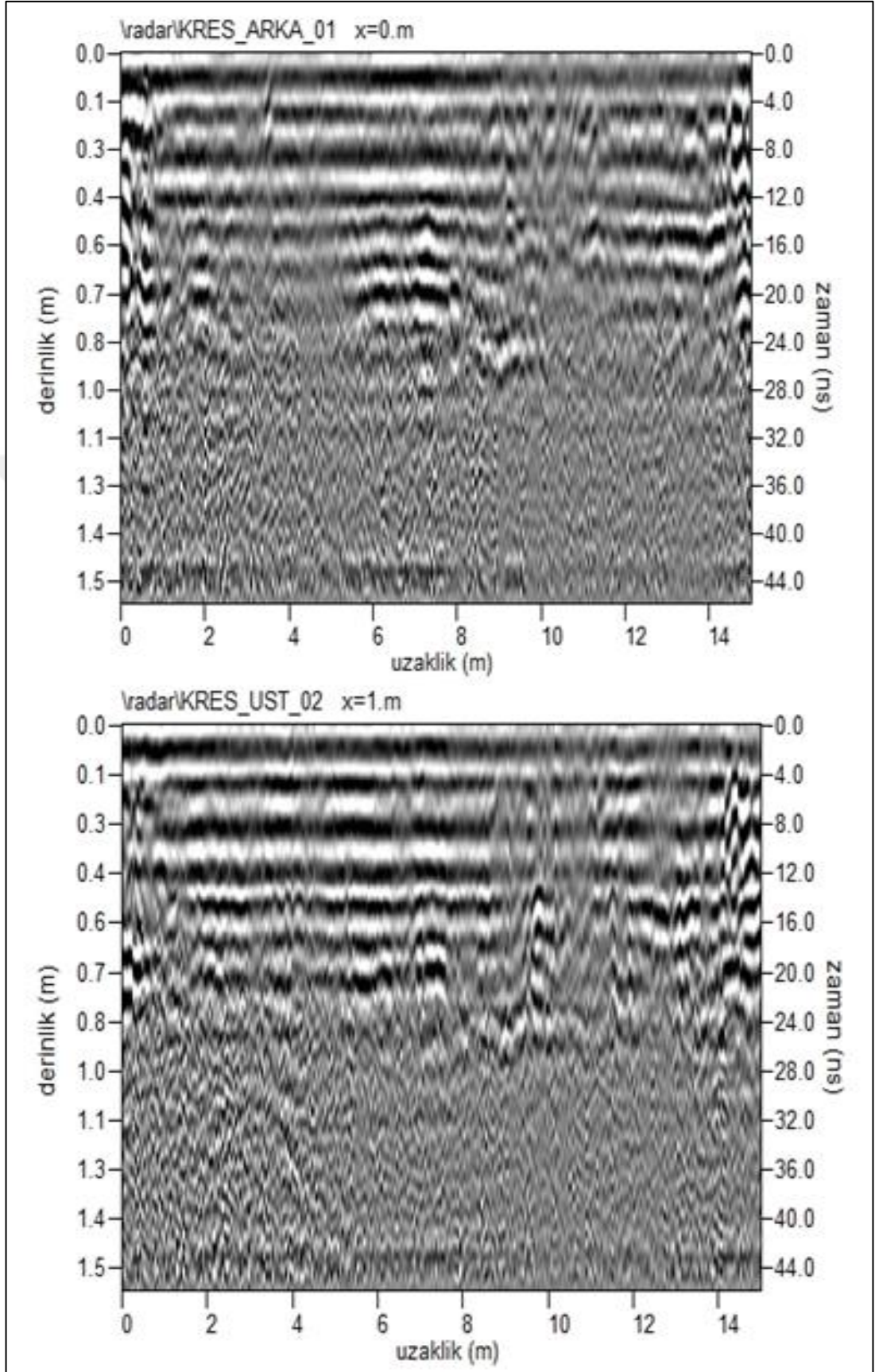
Şekil 2.42. 1. Alan Batı-Doğu yönlerinde alınan GPR ölçülerinden elde edilen radargramlar.

Çalışma Alanı 1 de birbirine dik 32 profilden elde edilen izlerin yapılan değerlendirmesi sonuç radargramları toplu gösterimi (Şekil 2.43) de gösterilmiştir. Buna göre; verilerde kırmızı renkle gösterilen yüksek genlikli yansımalar mevcut yüzeydeki parke yol ile 0-1,6 m aralığında görülen dolgu birimlerdeki daha büyük hacimli malzemeler olarak değerlendirilmiştir.

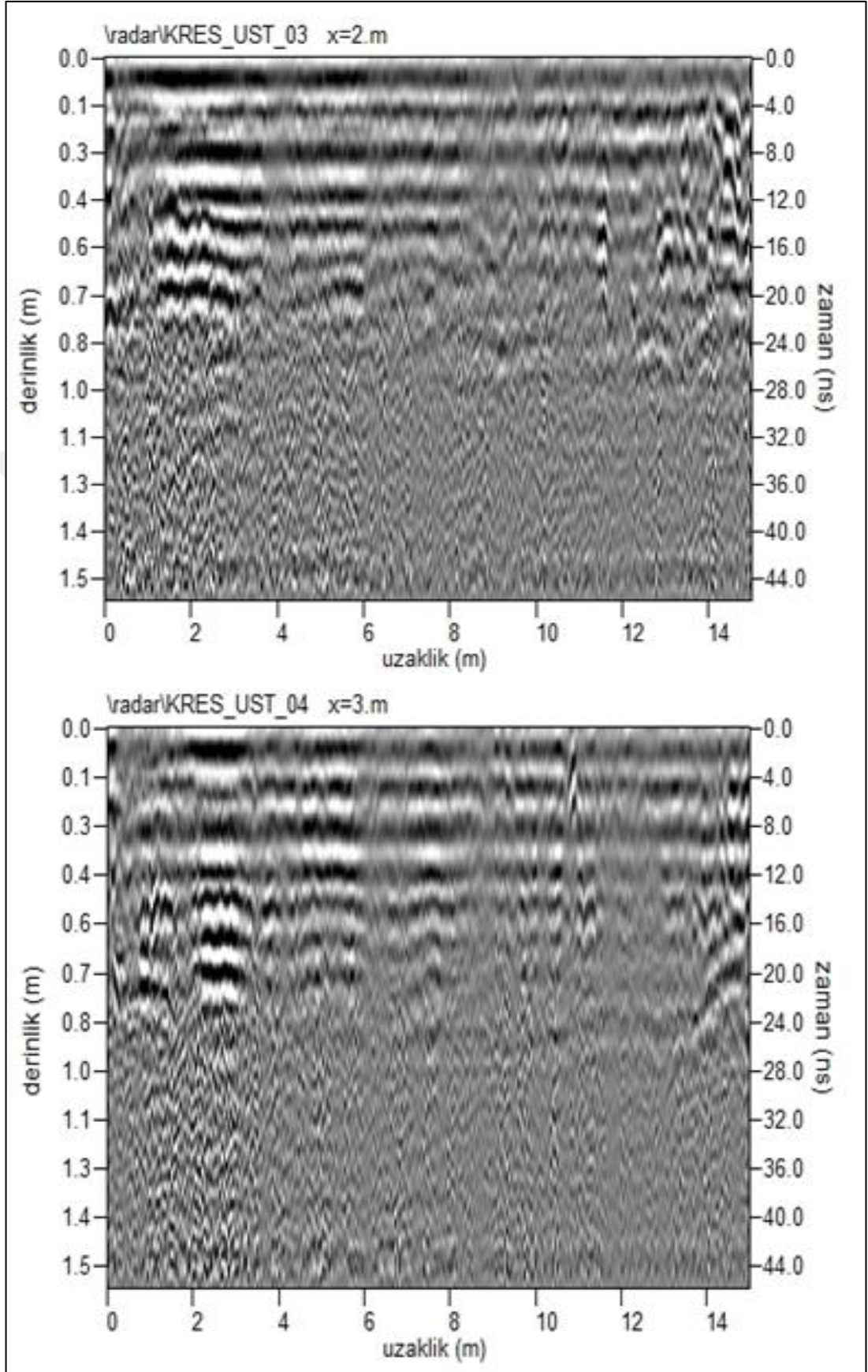


Şekil 2.43. Profil aralığı 0,5 m ve profil uzunluğu 8 m olan, birbirine dik 32 profilden oluşan 1. alanın yapılan değerlendirmesi.

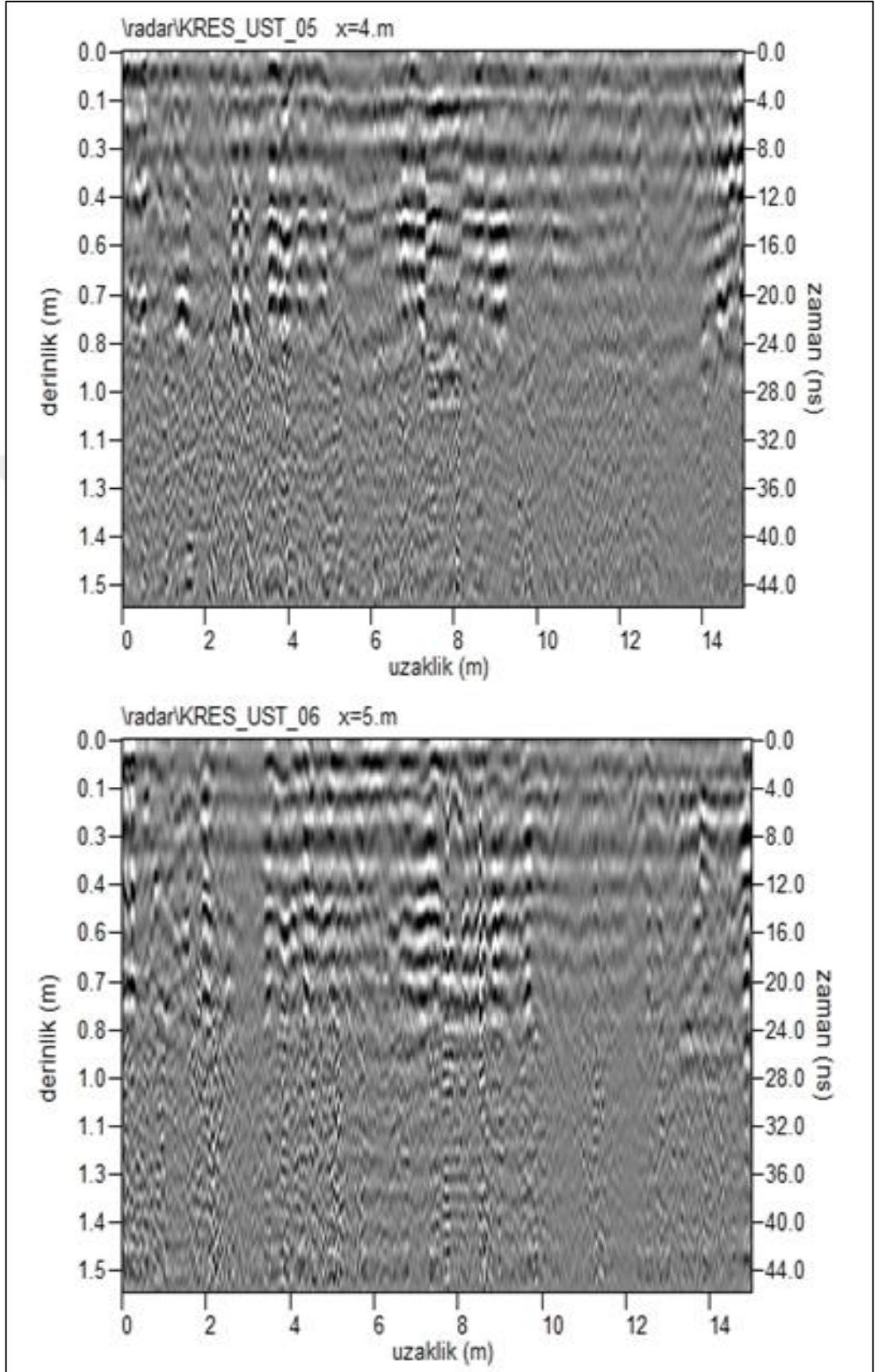
Yine 2. Alanın 2B radargram kesimlerinde yatay eksen profil uzunluğu, sol düşey eksen derinliği, sağ düşey eksen EM dalganın geliş gidiş seyahat zamanını göstermektedir. 2 Nolu Çalışma alanından elde edilen ham veriler (Şekil 2.44-2.49) aralığında gösterilmiştir.



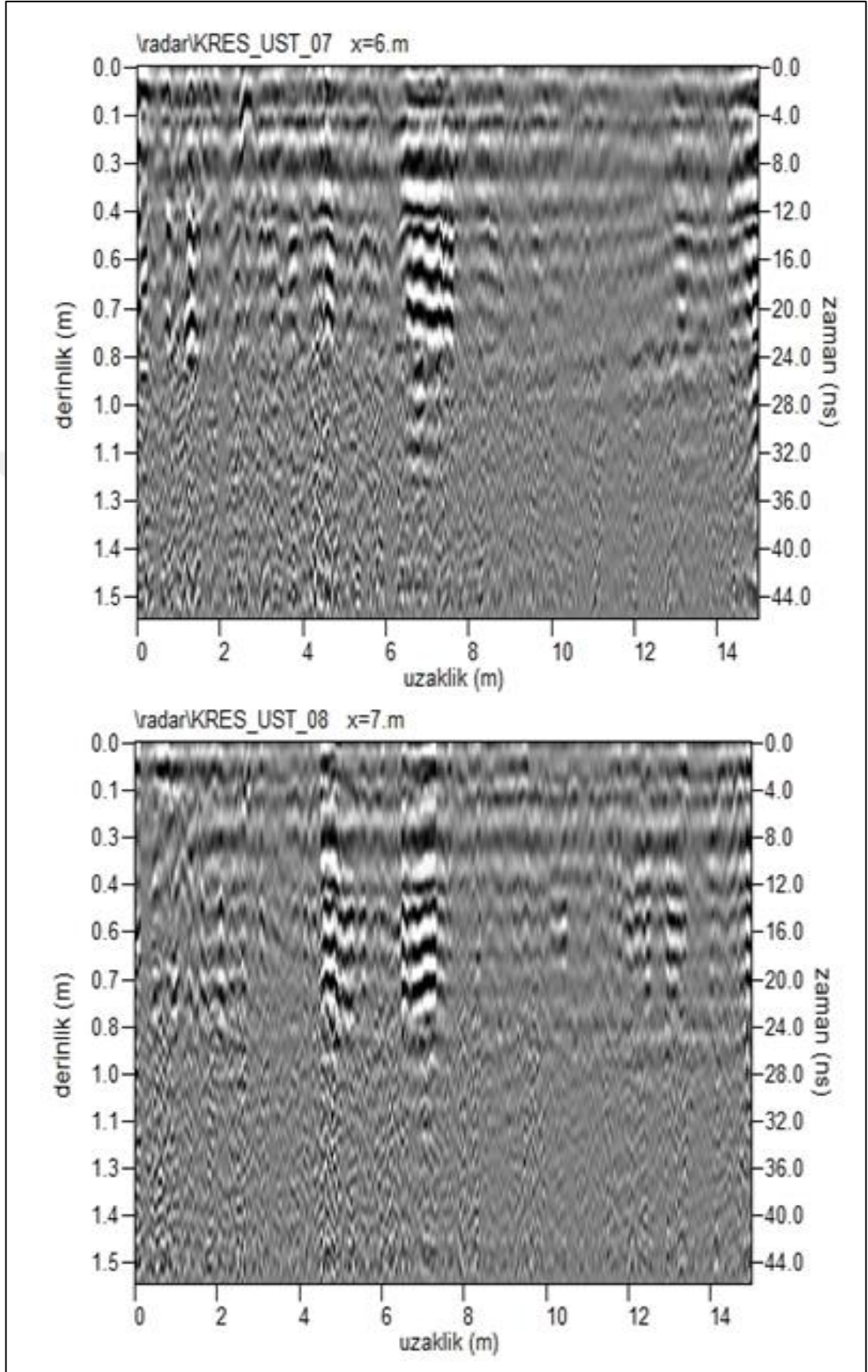
Şekil 2.44. Çalışma Alanı 2 (Üst-Arka) 1 ve 2 nolu profillerin ham verileri



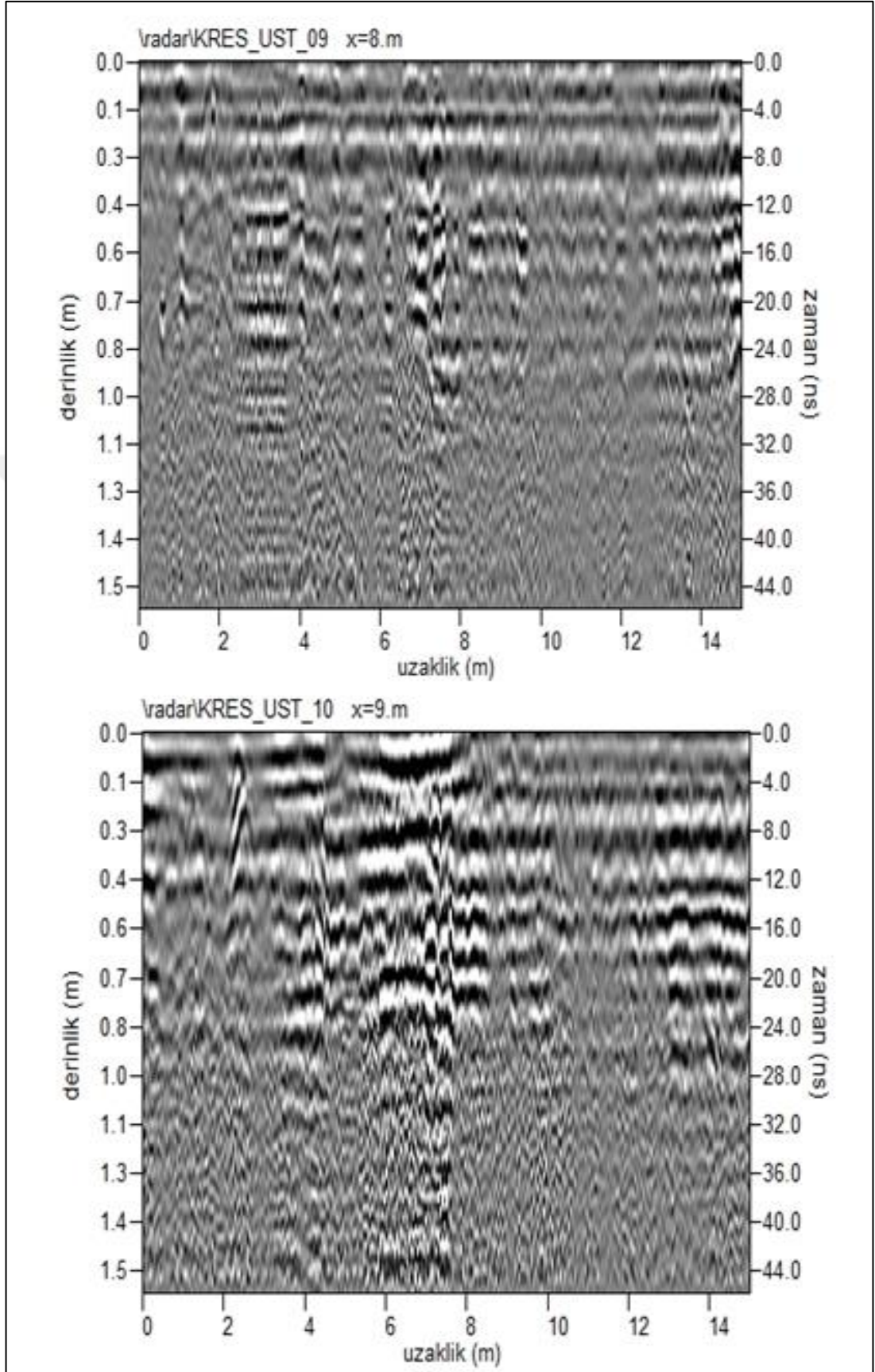
Şekil 2.45. Çalışma Alanı 2 (Üst-Arka) 3 ve 4 nolu profillerin ham verileri



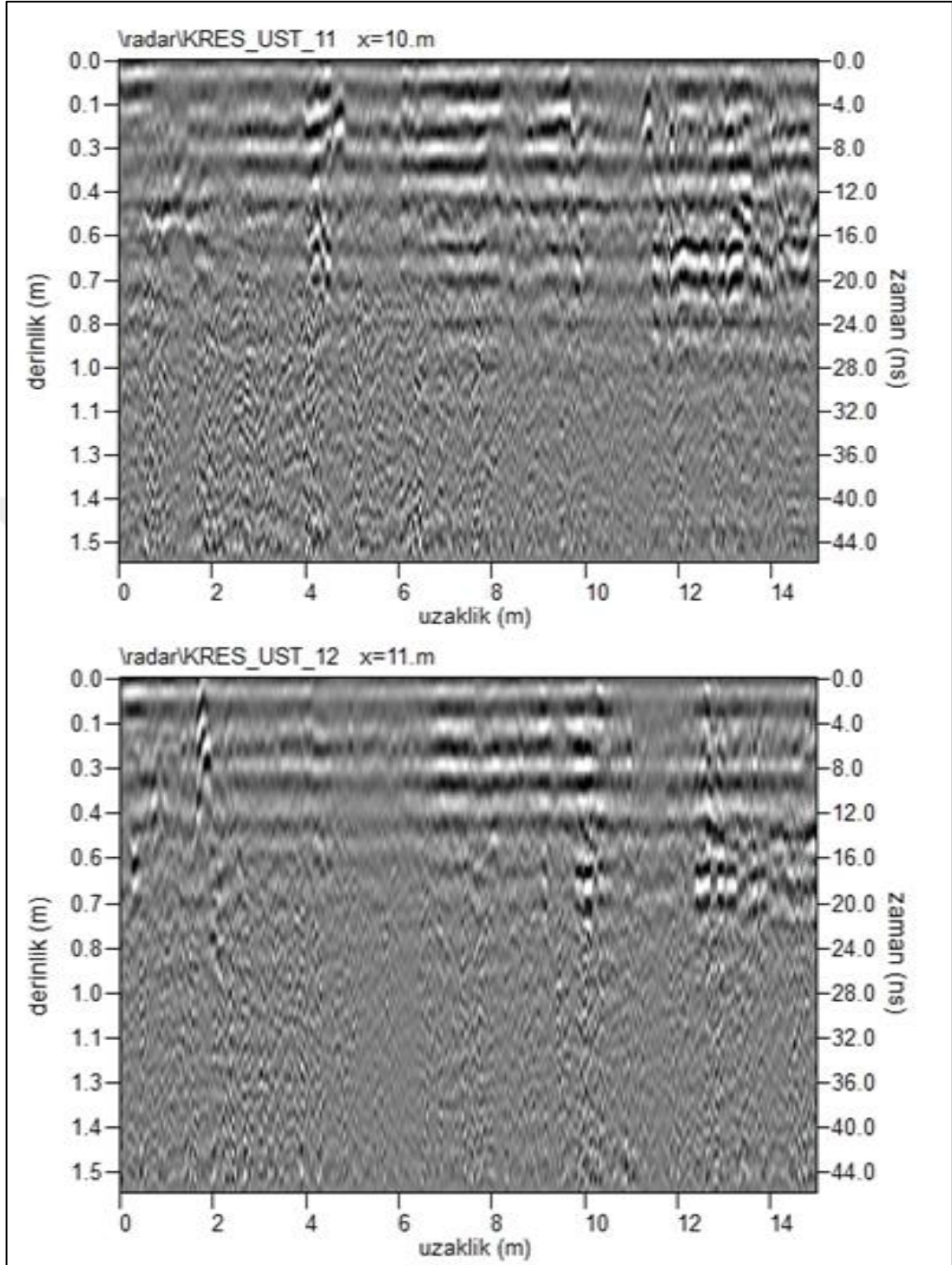
Şekil 2.46. Çalışma Alanı 2 (Üst-Arka) 5 ve 6 nolu profillerin ham verileri



Şekil 2.47. Çalışma Alanı 2 (Üst-Arka) 7 ve 8 nolu profillerin ham verileri

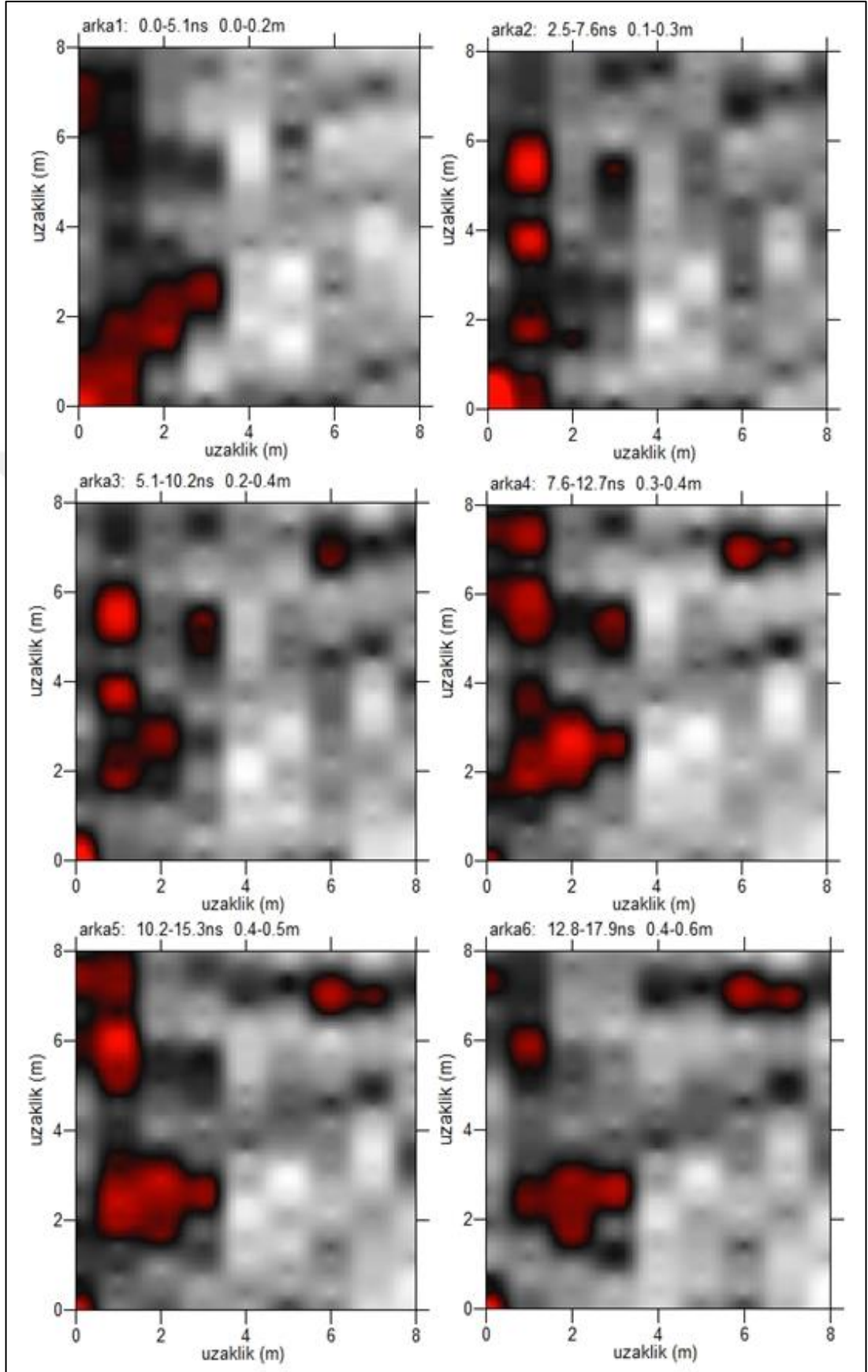


Şekil 2.48. Çalışma Alanı 2 (Üst-Arka) 9 ve 10 nolu profillerin ham verileri

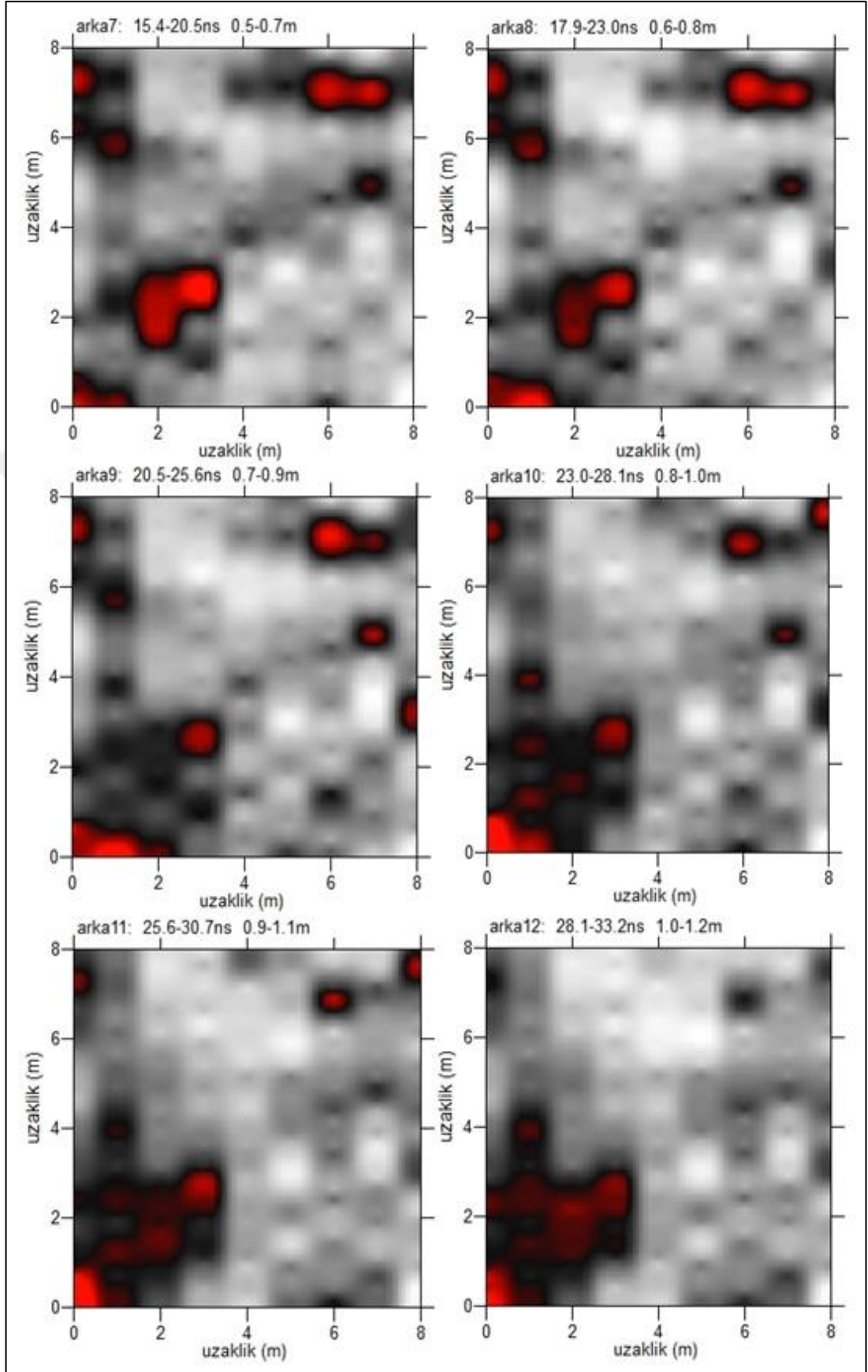


Şekil 2.49. Çalışma Alanı 2 (Üst-Arka) 11 ve 12 nolu profillerin ham verileri

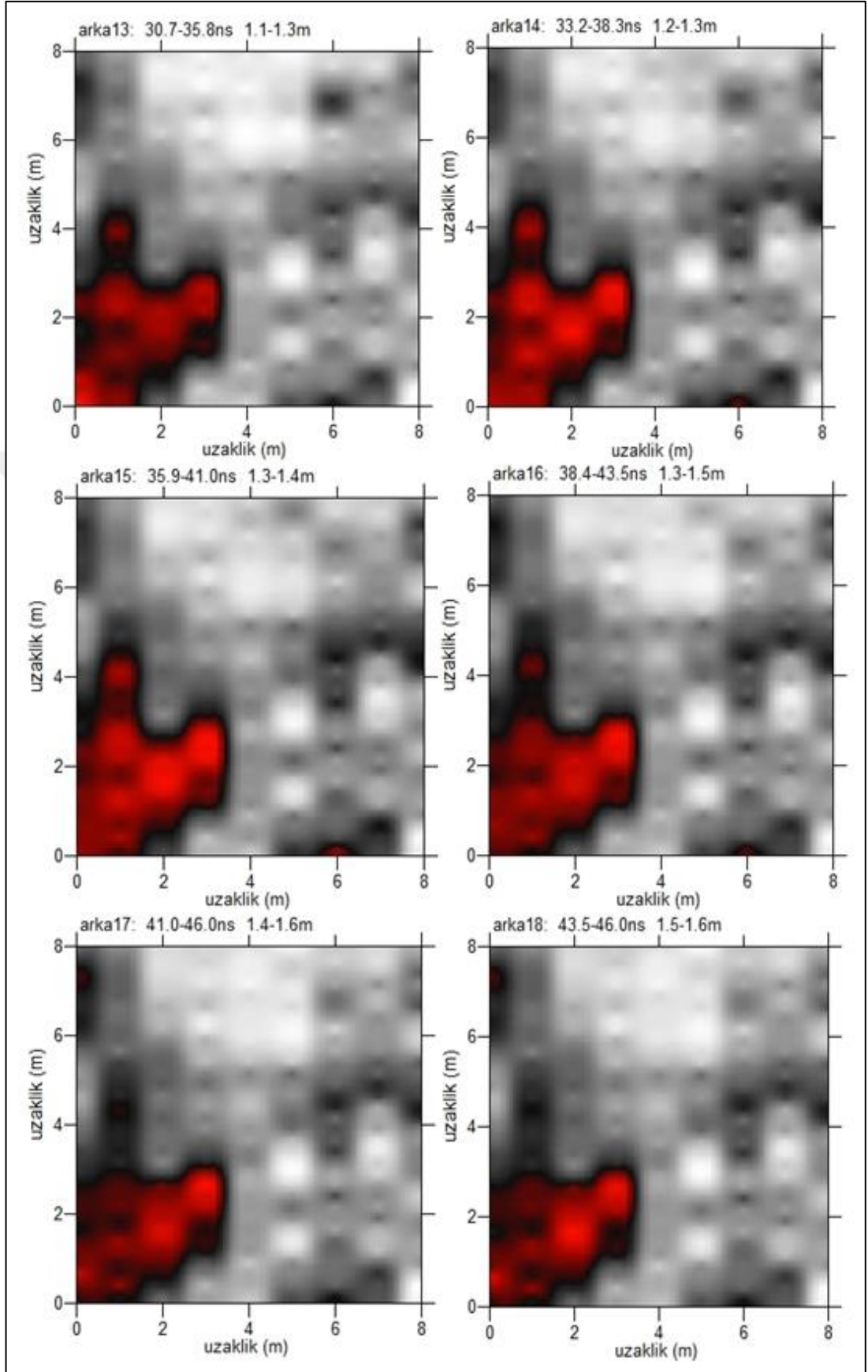
Profil aralığı 0,5 m ve profil uzunluğu 27 m olan 12 profilden oluşan 2. alanın yapılan değerlendirmesine göre; zeminin dolgu birimlerden (kalıntı, hafriyat vs.) oluşması nedeniyle maksimum 1,5-1,6 m derinliğe kadar veri elde edilmiştir. Bu verilerde kırmızı renkle gösterilen yüksek genlikli yansımalar herhangi bir arkeolojik kalıntı, bir duvar yapısı olarak değerlendirilmiştir.(Şekil 2.50-2.52)



Şekil 2.50. Çalışma Alanı 2 (Üst-Arka) 0,0m.-0,6 m. arası sonuç radargramları

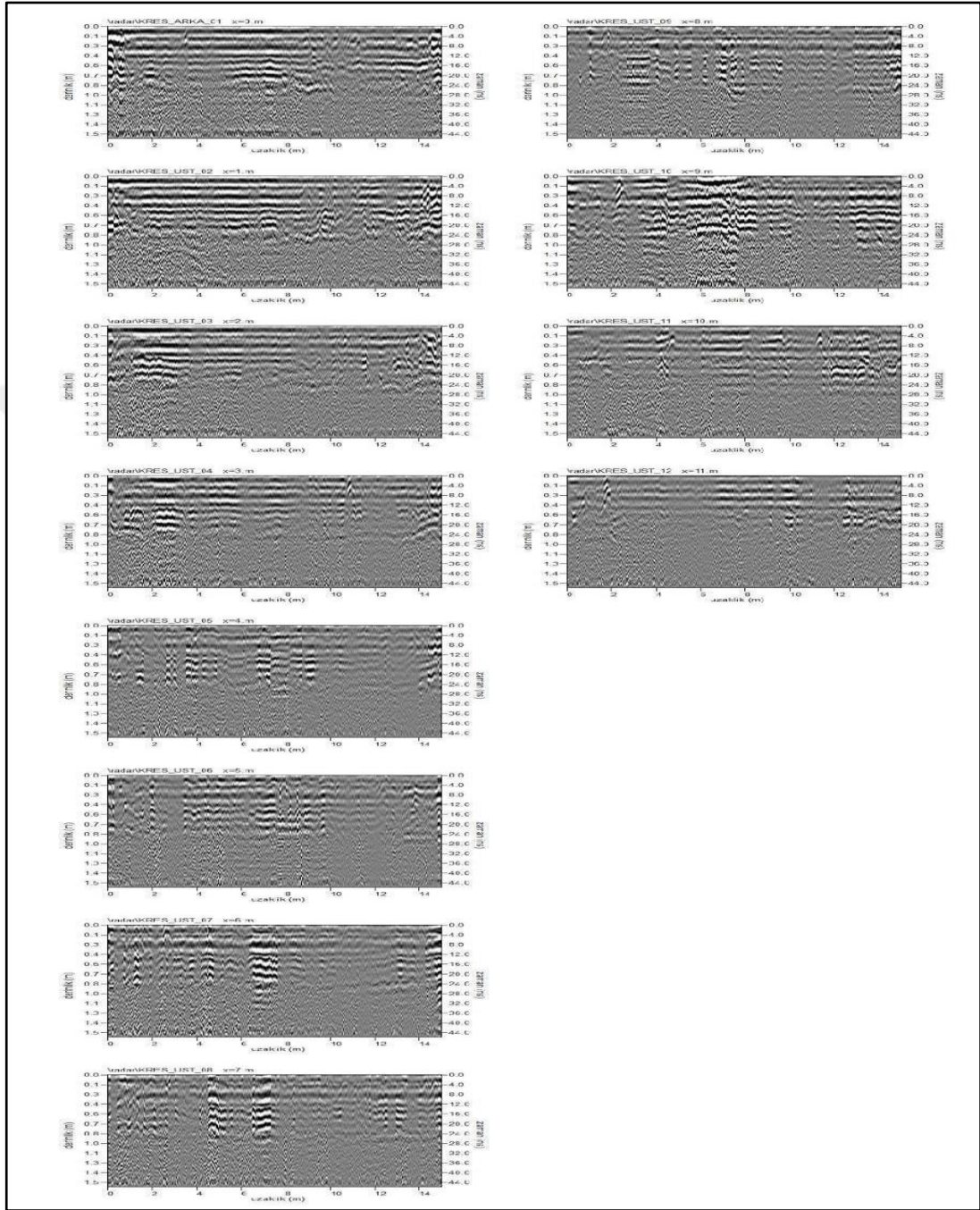


Şekil 2.51. Çalışma Alanı 2 (Üst-Arka) 0,5m.-1,2 m. arası sonuç radargramları



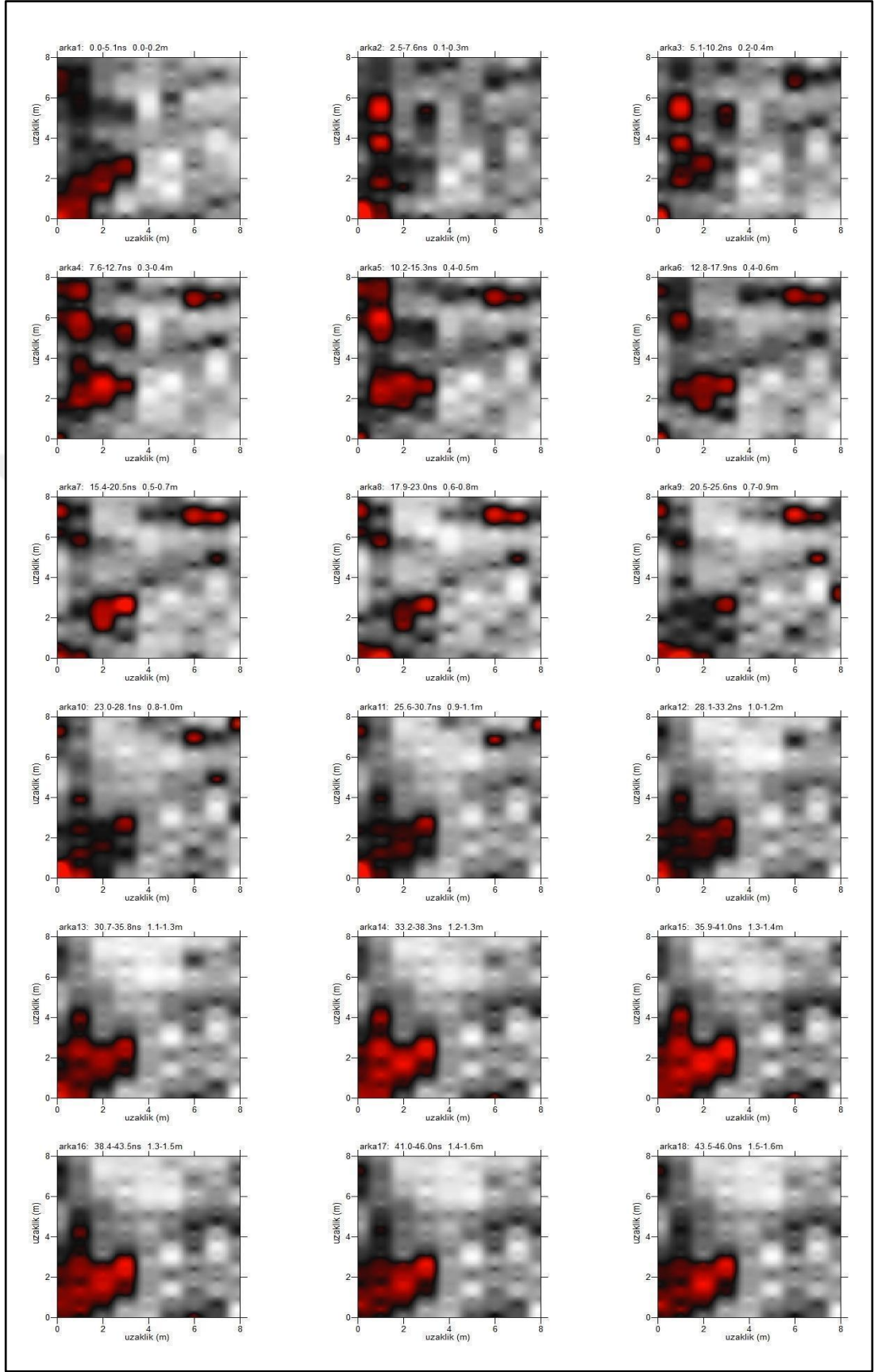
Şekil 2.52. Çalışma Alanı 2 (Üst-Arka) 1,1m.-1,6 m. arası sonuç radargramları

Çalışma Alanı 2 de elde edilen yer radarı sinyali radargramlarının toplu gösterimi (Şekil 2.53) de verilmiştir.



Şekil 2.53. 2. Alanda ölçülen GPR verileri Batı-Doğu

Çalışma Alanı 2 de 12 profilden elde edilen izlerin yapılan değerlendirmesi sonuç radargramlarının toplu gösterimi (Şekil 2.54) 'da verilmiştir. Buna göre verilerde kırmızı renkle gösterilen yüksek genlikli yansımalar herhangi bir arkeolojik kalıntı, bir duvar yapısı olarak değerlendirilmiştir.



Şekil 2.54. Profil aralığı 0,5 m ve profil uzunluğu 27 m olan 12 profilden oluşan 2. alanın yapılan değerlendirilmesi.

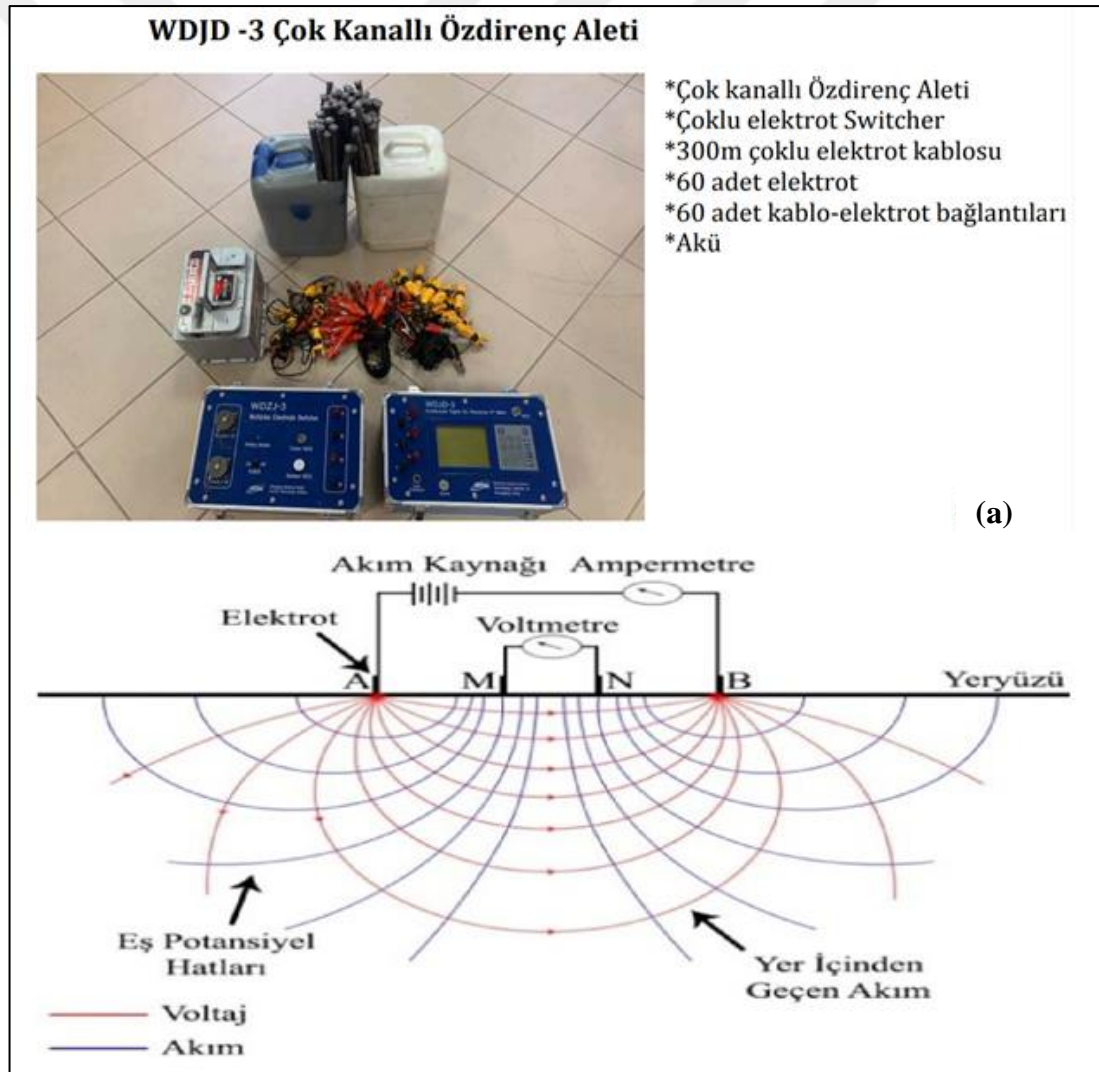
3. ELEKTRİK ÖZDİRENÇ YÖNTEMİ

3.1. Elektrik Özdirenç (Rezistivite/DES) Yöntemine Giriş

Elektrik özdirenç yöntemi sık kullanılan ve en eski jeofizik yöntemlerden biridir ve yerbilimlerinde geniş bir uygulama alanına sahiptir. Maden ve yer altı suyu aramaları, baraj ve tünel yeri belirlenmesi gibi derin mühendislik problemlerinde kullanılabilirdiği gibi, yüzeye yakın gömülü kütlelerin araştırılması çalışmalarında da sıklıkla kullanılmaktadır. 2 ve 3 boyutlu rezistivite araştırmaları, yer elektrik(özdirenç) özelliklerinin yanal ve düşey yöndeki değişimleri hakkında önemli bilgiler vermektedir. Özellikle karmaşık yapıya sahip yer modellerinin belirlenmesi bu araştırmalarla oldukça iyi sonuçlar vermektedir. Bu yöntemde amaç; formasyonların, yer altı yapılarının sahip olduğu özdirenç değişimlerine bağlı olarak yatay ve düşey yöndeki elektrik akımını iletme veya direnç gösterme özelliğinin ölçülmesidir. Yere akım verilir ve potansiyel fark ölçülerek formasyonların özdirenç değerleri hesaplanabilir. Kayaçların özdirençleri formasyon katsayılarının yanı sıra ortamın sıcaklığı, tuzluluğu, porozitesi, su içeriği ve formasyon sıvısının özdirenç değerlerinden etkilenir. Arkeolojik amaçlı çalışmalarda arkeolojik objelerin yapım malzemesi önemlidir. Bazı arkeolojik alanlarda (kerpiçten yapılan duvarlar örneğinin) elektrik yöntemlere duyarlı değildir. Ancak arkeolojik alanlarda en çok kullanılan yöntemlerden biri olan elektrik özdirenç yöntemi, yapı temelleri, duvarlar vb. gibi yapısal unsurların çevresindeki birimlerden daha farklı özdirenç değerlerinde olmasından dolayı bu yapıların yerleri ve konumları yüzeyden ölçülen elektrik ölçüleri ile bulunabilmektedir. ERT yöntemi hidrojeolojik problemlerin çözümünde, maden araştırmalarında, çevre ile ilgili problemlerde, geoteknik çalışmalarda, ziraat, arkeoloji gibi alanlarda başarılı şekilde kullanılmıştır (Kemna vd., 2002; Hubbard ve Rubin, 2005; Ismail vd., 2005; Singh vd., 2011; Corwin ve Lesch, 2003; de Franco vd., 2009; Santarato vd. 2011; Xu ve Noel, 1991).

Kayaçların, yer altı yapılarının elektriksel iletkenlik farklarından yararlanılarak ortaya çıkarılmasını sağlayan bir yöntem olan elektrik özdirenç yönteminde; yer

içerisine bir kaynaktan iki akım elektrodu (A,B) yardımı ile verilen elektrik akımının oluşturduğu potansiyel farkı, diğer bir çift elektrot yardımı ile ölçülür. Başka bir deyişle akım elektrotları ile yere verilen elektrik akımının farklı noktadaki potansiyel elektrotlarının arasında oluşturduğu gerilim farkının ölçülmesidir. Yere verilen elektrik akımının zeminde iyonlar ve elektronlarla taşınarak meydana getirdiği potansiyel farkları, yapıların elektrik özdirenç farklarından yararlanılarak tespit edilmesine olanak sağlar. Son yıllarda en çok yer altı suyu aramalarında kullanılan yöntem maden, jeotermal enerji, mühendislik yapıları zemin problemleri, petrol rezervleri, jeolojik yapılar ve arkeolojik yapıların tespiti gibi birçok inceleme alanında kullanılmaktadır (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. (a) Çok elektrotlu özdirenç cihazı ve ekipmanları (b) Homojen kabul edilen bir yer altında elektrik akımı ve buna bağlı oluşan voltaj hatlarının düşey düzlemde gösterimi

Yöntemde yer içinin yüzeye yakın sığ derinlikleri ölçülebilirken bin metreleri bulan araştırma derinliğine ulaşılabilir. Elektrotlar arası mesafe arttıkça uygulanan akımın nüfuz derinliği de artmaktadır. Ölçülen potansiyel farkı inceleme alanının jeolojik yapısına ve elektrotlar arası uzaklığa bağlıdır.

Yöntemde ölçülen potansiyel farkı olduğu için yorumlamada bu fark öz dirence dönüştürülmektedir. Bunun için Denklem (3.1);

$$\rho_a = K \frac{\Delta v}{I} \quad (3.1)$$

bağıntısından dönüşümü uygulanır.

K : Geometrik faktör(elektrot konumlarına göre değişir)

I : Uygulanan akım

ΔV : Ölçülen potansiyel (gerilim) farkı

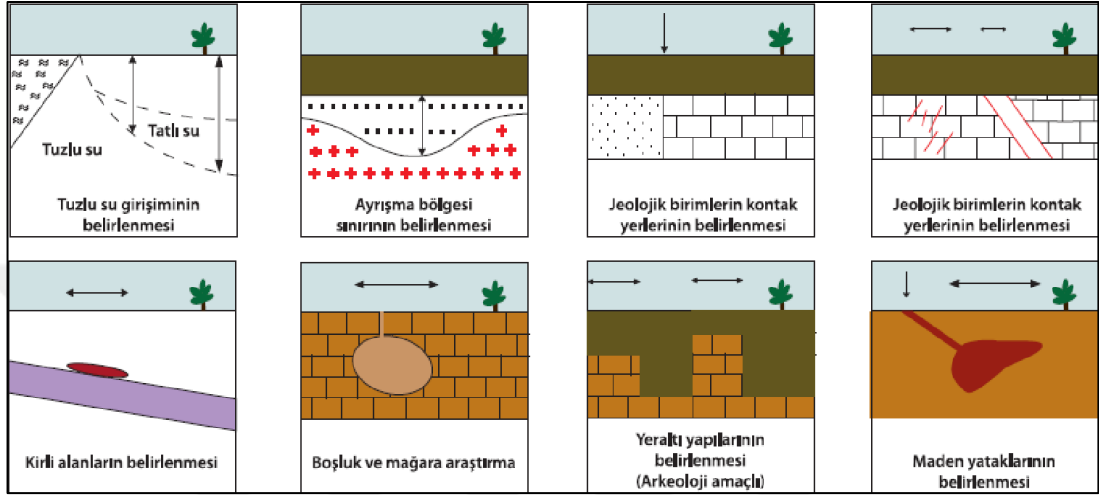
Bağıntı ortamın homojen ve izotrop bir ortam olduğu varsayımından üretilmiştir. Gerçekte yer homojen değildir içeriğinde pek çok malzeme barındırır ve bu bağıntıdan hesaplanan öz direnç değerleri “Görünür Öz direnç” olarak adlandırılır ρ_a ile gösterilir. Denklem (3.2)’deki gibi, k geometrik faktör yarı sonsuz uzayda;

$$k = \frac{2\pi}{\frac{1}{AM} + \frac{1}{BM} + \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}} \quad (3.2)$$

ile hesaplanır.

Ortam homojen ve izotrop ise görünür öz direnç, ortamın öz direncine eşittir. Görünür öz direnç yapının şekline, öz direnci ve ölçü alınan elektrot dizilimine bağlı olarak değişir. Tabakalı ortamlarda görünür öz direnç eğrisi akım elektrotları arası uzaklığın ($AB/2$) kısa olduğu değerler için ilk tabakanın öz direncine, akım elektrotları arası uzaklığın uzun olduğu değerler için son tabakanın öz direncine asimptot olmalıdır. Bununla birlikte görünür öz direnç, akım elektrotlar arası uzaklığın ara değerlerinde aradaki tabakaların öz direnç değerlerine yakın olmalıdır (Başokur, 1994).

Uygulama alanlarının çokluğu, gelişen ölçü cihazları ve değerlendirmede kullanılan ileri teknikler, modellemeler sayesinde oldukça başarılı sonuçlar veren yöntem 2B ve 3B görüntüleme yöntemlerinin uygulanmasıyla etkinliğini daha da artırmıştır. İki ve üç boyutlu öz direnç görüntülerinin gerçeğe yakın başarılı sonuçlar vermesi birçok jeolojik problemin çözümünde yöntemi kullanılabilir hale getirmiştir (Şekil 3.2).



Şekil 3.2. Elektrik öz direnç görüntüleme yönteminin bazı uygulama örnekleri (Özdemir, 2008)

3.2. Kayaçların Elektrik Özellikleri

Ohm kanununa göre iki iletken arasındaki potansiyel fark ile iletken üzerinden geçen akım şiddetinin oranı sabittir. Bu oran Denklem (3.3)'teki R direnci (resistance) olarak;

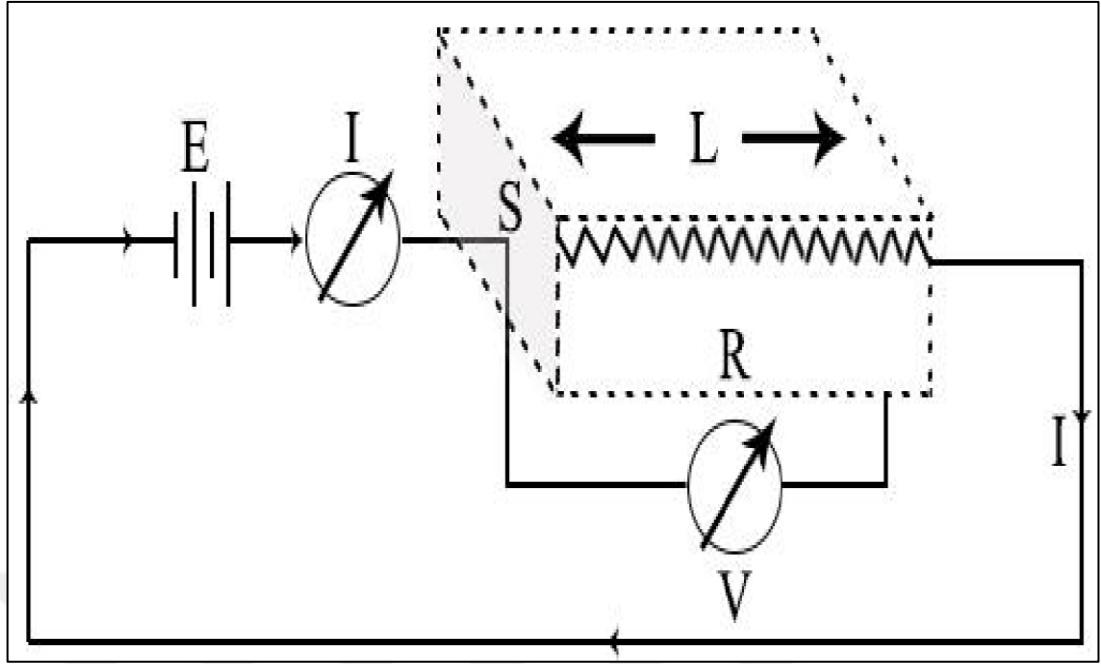
$$R = \frac{V}{I} \quad (3.3)$$

ohm (Ω) kanunu ile tanımlanır. Burada V: potansiyel, I: akım miktarını temsil etmektedir.

Elektrik devresinde direnç elemanı yerine Şekil 3.3'te görüldüğü gibi noktalı çizilmiş olan L uzunluklu S alanlı bir prizmatik homojen izotropik ρ elektrik öz dirençli bir malzeme olması durumunda R direnci;

$$R = \rho \frac{L}{S} \quad (3.4)$$

formülü ile ifade edilir.



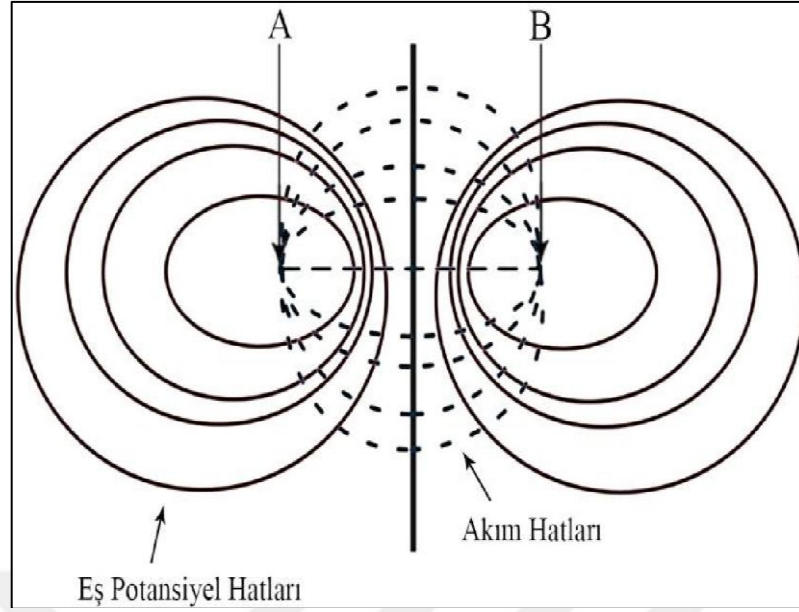
Şekil 3.3. Numune öz direncinin ölçülmesi (Keçeli, 2009)

Bir nesnenin elektrik iletkenliği ile öz direnci arasında ters orantı vardır. Bu durum;

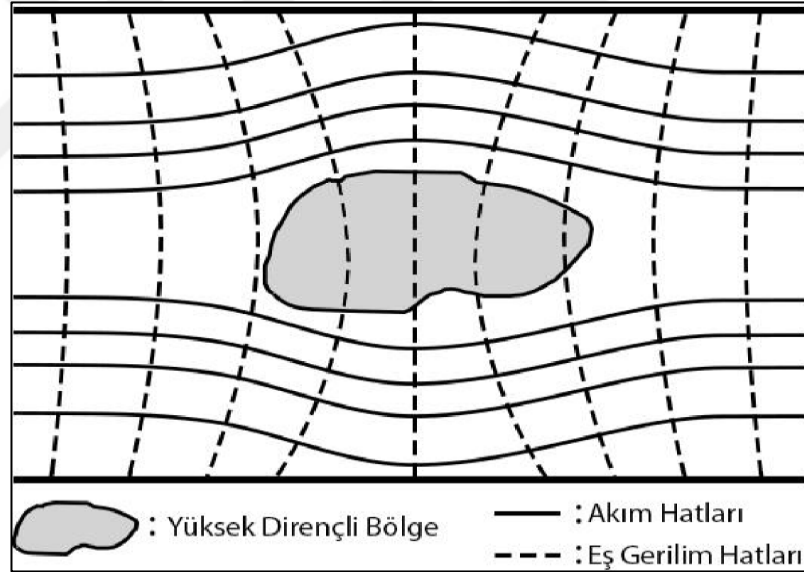
$$\rho = \frac{1}{\sigma} \quad (3.5)$$

formülü ile ifade edilir. Burada; ρ : Elektrik öz direnç, σ : Elektrik iletkenlik olmaktadır. Ohm kanunu deneysel bir kanundur ve en önemli özelliği lineer (doğrusal gösterimi) olmasıdır. Yüzeğe yakın kayaçların elektrik iletkenlikleri; metalik ortamlarda elektronların bunun dışındaki ortamlarda iyonların taşınmasına bağlıdır. Bununla birlikte kayaçların iletkenliği genellikle ara yüzeylerde, gözeneklerin birbiriyle olan bağlantılarında, tane sınırlarında, kırıklarda, faylarda, ezilme ve çökme bölgelerinde bulunan sıvı ile alakalıdır. İletkenlik bu bölgeler içindeki iyon türüne ve konsantrasyonuna bağlıdır. Su içindeki tuzların çözünmesiyle oluşan iyonlar elektrik akımının akışını sağlar. Dolayısıyla kayaçların içerisindeki çözülmüş iyon bileşikleri iletkenliği artırır (Keçeli, 2009).

Yer içine verilen akım ve oluşan potansiyel akımları yer altında yüksek öz dirençli bir ortamda değişime uğrarlar. Şekil 3.4 homojen yer altı durumlarında, Şekil 3.5 ise yüksek öz dirençli yer altı yapıları ile karşılaşılması durumunda yatay düzlemde akım ve potansiyel (eş gerilim) hatlarının dağılımlarını göstermektedir.



Şekil 3.4. Homojen yer altında elektrik akım ve eş potansiyel hatlarının yatay düzlemde dağılımı (Keçeli, 2009)

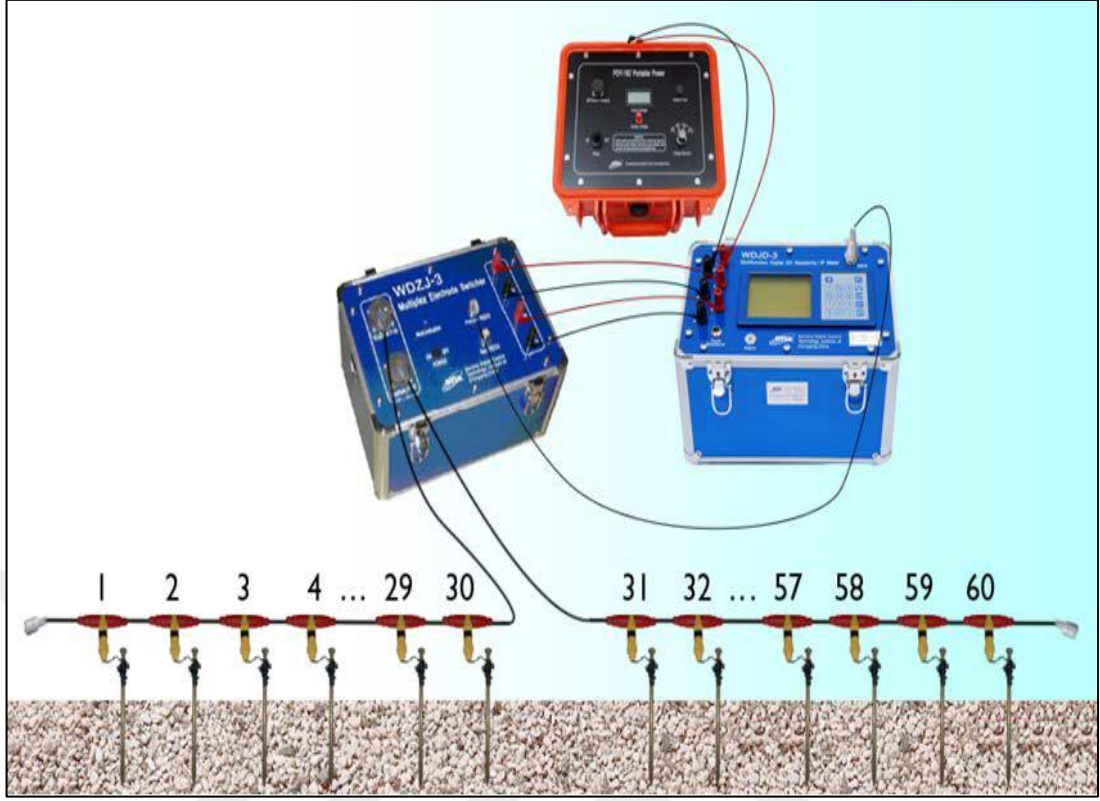


Şekil 3.5. Yüksek öz dirençli bir yer altı modeli olması durumunda yatay düzlem içinde akım ve eş gerilim (potansiyel) hatlarının dağılımı şekli (Keçeli, 2009)

3.3. Veri Toplama

3.3.1. Ekipmanların tanıtılması

Şekil 3.6'da çok kanallı öz direnç cihazı ve ekipmanları görülmektedir. Sistemin ana malzemeleri; öz direnç cihazı, alıcı-verici ünitesi, güç kaynağı, switcher, kablo ve elektrotlardan meydana gelir.



Şekil 3.6. Çok kanallı ve elektrotlu doğru akım özdirenç cihazı ve arazideki konumları. Cihaz akü, alıcı-verici ünitesi, switcher, kablo ve elektrotlardan oluşmaktadır.

WDJD-3 yeni nesil çok fonksiyonlu gelişmiş bir model olup özellikle çok elektrotlu otomatik sistemler ile beraber çalışmak üzere tasarlanmış bir ölçüm cihazıdır.

Transmitter (verici) ve receiver (alıcı) üniteleri bir arada bulunmaktadır. Yer altı toprak direnci, akülenme süresi değerlerini yüksek hassasiyetle ölçerek kayıt eder. Yüksek ölçüm hızı nedeniyle geniş alanları kısa sürede taramaya elverişlidir. Çoklu elektrot düzeni ile çalışabildiği gibi geleneksel elle idare metodu ile de hassasiyetle çalışır. WDJD 3 özdirenç ölçüm cihazının çok kanallı ölçüm almasını sağlayan diğer bir cihaz WDZJ 3 anahtarlayıcı (switcher) cihazıdır. Bu cihaz çok kanallı ölçümler sırasında, belirlenen parametrelere göre hangi elektrotların kullanılacağına karar veren cihazdır.

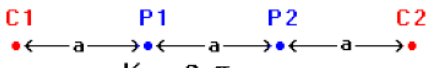
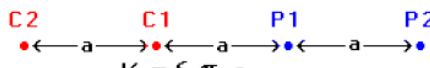
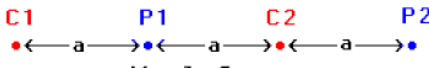
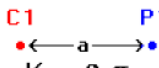
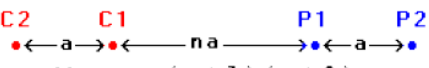

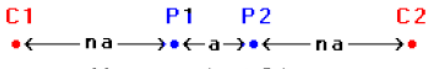
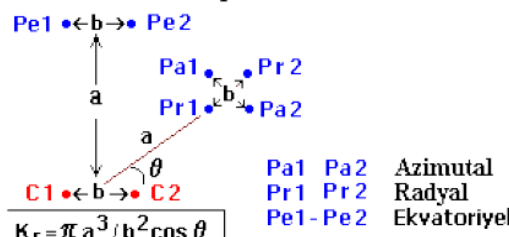
3.3.2. Elektrot açılım sistemleri

Doğru akım özdirenç ölçümleri akımın yere iki elektrod (akım elektrodları, Şekil 3.1'teki A ve B) vasıtasıyla verilerek, diğer iki elektrod (potansiyel elektrodları,

Şekil 3.1'teki M ve N) arasındaki gerilim farkının ölçülmesi şeklinde yapılır. Akım (I) ve voltaj (V) değerlerinden görünür öz direnç hesaplanır (Loke, 2000).

Elektrik öz direnç yönteminde farklı jeolojik problemlerin çözümü için farklı ölçüm teknikleri geliştirilmiştir. Yerin düşey yöndeki değişimini tespit etmek amacıyla geliştirilen düşey elektrik sondajında (DES) sabit bir noktadan simetrik açılımlar yaparak ölçümler alınır. Yatay kaydırma yöntemi ile alınan ölçüler yanal süreksizlikleri araştırmak için yapılırken hem yatay hem de düşey yöndeki değişimleri araştırmak için çok elektrotlu öz direnç yöntemi geliştirilmiştir. DES ölçümünde, akım elektrotları arasındaki uzaklığın artırılması, akımın derinlere inmesini sağladığı için daha derinlerdeki yapıların öz direnç özellikleri hakkında bilgi toplanmasını sağlar. Bu sayede sabit bir noktanın düşey yöndeki değişimi belirlenmiş olur. Profil ölçümü, bir hat boyunca yanal süreksizliklerin belirlenmesi amacıyla uygulanır. Araştırılmak istenen derinliğe göre belirlenmiş sabit bir elektrot aralığı ile kurulan dizilim her ölçüden sonra profil boyunca kaydırılarak ölçme işlemi sürdürülür. Bu ölçü tekniği daha çok kırık-çatlakların, fayların yerlerinin belirlenmesinde ve dayk gibi yapıların araştırılmasında kullanılır. Çok elektrotlu öz direnç yönteminde (sondaj-profil), DES ve profil ölçü teknikleri birlikte kullanılır. Bir hat boyunca belirlenmiş noktalar üzerinde ölçülmüş DES değerleri birlikte sunulur. Bu yöntem ile yer altında hem yanal hem de düşey yöndeki öz direnç dağılımı belirlenir. Bu şekilde ölçülen görünür öz direnç andıran kesit (pseudosection) verileri, bir ters-çözüm algoritması ile profil boyunca olası belirti yerlerini gösteren öz direnç-derinlik kesitleri elde edilmektedir. Son yıllarda, elektronik ve bilgisayar bileşenlerinin evrimi, çok elektrotlu öz direnç yönteminin geliştirilmesine olanak sağlamıştır (Bernard vd., 2004). Şekil 3.7'de bazı elektrot dizizimleri ve onlara ait geometrik faktörler gösterilmektedir.

Arkeolojik yapılar, mezar, taş duvar, boşluk gibi yer altı nesnelere içlerinde buldukları ortamdaki daha yüksek öz direnç değerlerine sahiptirler. Bu fiziksel gerçeklikten faydalanılarak buldukları ortama göre daha yüksek öz dirence sahip arkeolojik yapıların aranmasında elektrik öz direnç yöntemi kullanımı etkili hale gelmiştir. Arkeojeofizik araştırmalarda elektrik öz direnç yöntemi sıkça kullanılmaktadır (Başokur, 1992).

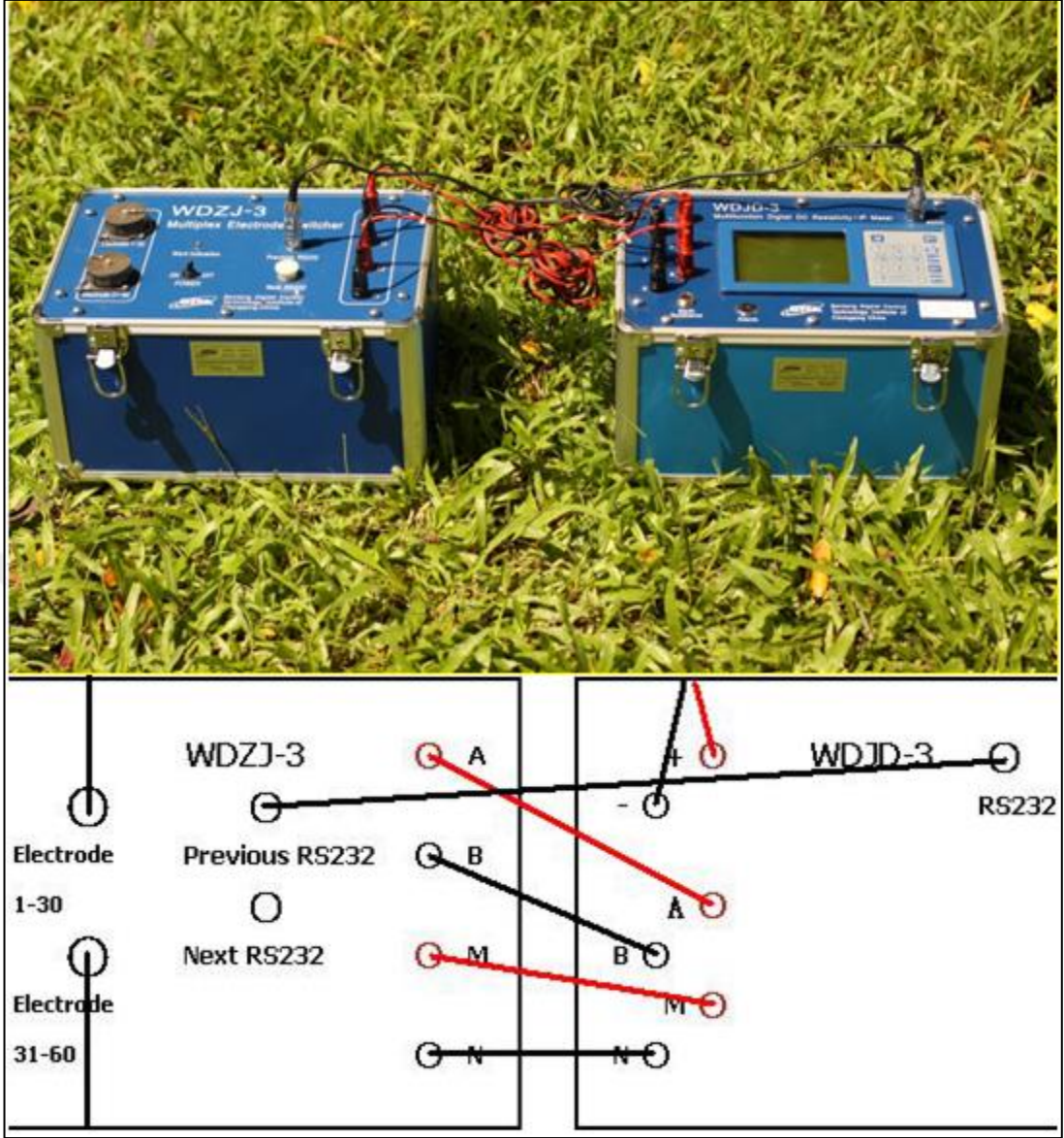
<p style="text-align: center;">Wenner Alfa</p> <p style="text-align: center;">C1 P1 P2 C2  $K = 2 \pi a$</p>	<p style="text-align: center;">Wenner Beta</p> <p style="text-align: center;">C2 C1 P1 P2  $K = 6 \pi a$</p>
<p style="text-align: center;">Wenner Gamma</p> <p style="text-align: center;">C1 P1 C2 P2  $K = 1.5 \pi a$</p>	<p style="text-align: center;">Pol - Pol</p> <p style="text-align: center;">C1 P1  $K = 2 \pi a$</p>
<p style="text-align: center;">Dipol - Dipol</p> <p style="text-align: center;">C2 C1 P1 P2  $K = \pi n(n+1)(n+2) a$</p>	<p style="text-align: center;">Pol - Dipol</p> <p style="text-align: center;">C1 P1 P2  $K = 2 \pi n(n+1) a$</p>
<p style="text-align: center;">Wenner - Schlumberger</p> <p style="text-align: center;">C1 P1 P2 C2  $K = \pi n(n+1) a$</p>	<p style="text-align: center;">Dipol Dizilimleri</p>  <p style="text-align: right;">Pa1 Pa2 Azimutal Pr1 Pr2 Radyal Pe1 - Pe2 Ekvatoriyel</p> <p style="text-align: center;"> $K_r = \pi a^3 / b^2 \cos \theta$ $K_e = 2 \pi a^3 / b^2$ $K_a = 2 \pi a^3 / b^2 \sin \theta$ </p>
<p>NOT: K= dizilim katsayısı C = akım P = gerilim a = aralık ; n = tam sayı=1,2,3</p>	

Şekil 3.7. Elektrot dizilim örnekleri ve geometrik faktörleri (Loke, 2000)

3.3.3. Ölçü alımı

Elektrotların belirlenen profil hattı üzerine belirlenen aralıklar ile çakılmasıyla birlikte ölçü alımına başlamadan önce cihazların kurulumu yapılır. Cihaza 30 kanallı bulunan 2 adet kablo ile toplamda 60 adet elektrot bağlanabilmektedir. Cihazların bağlantı şekilleri Şekil 3.8. de gösterilmiştir.

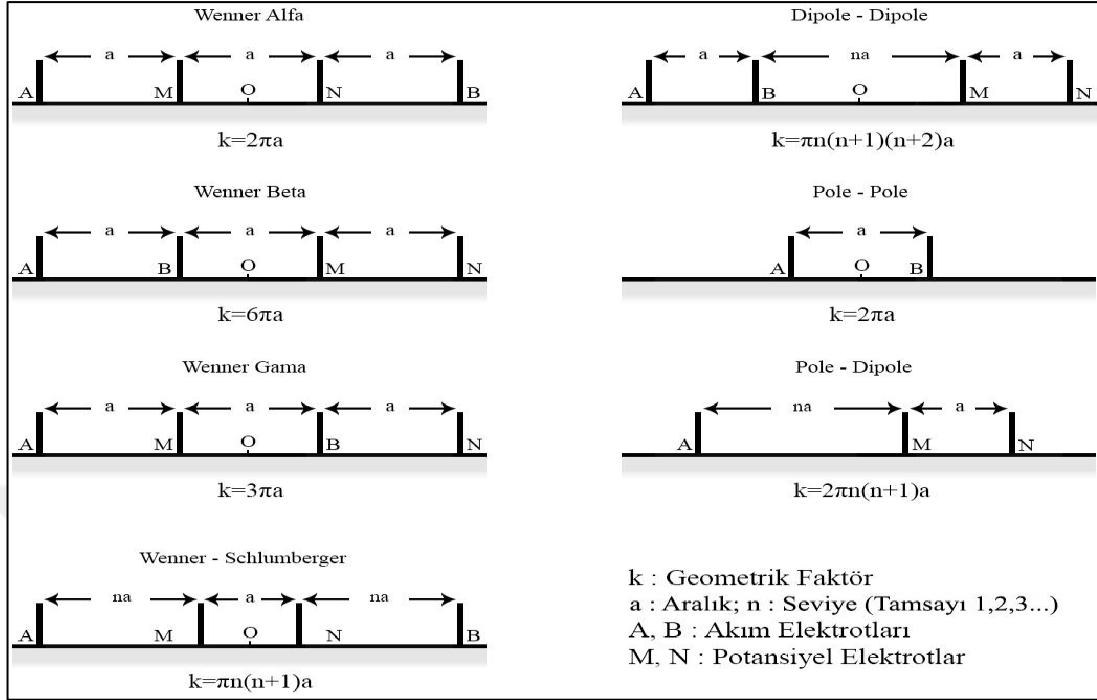
İlk olarak ölçüm cihazıyla anahtarlayıcı (switcher) arasındaki bağlantı yapılır. Bunun için ölçüm cihazındaki “RS232” girişiyle, anahtarlayıcıdaki “Forward” girişi arasında bağlantı gerçekleştirilir. Ardından şekilde görüldüğü gibi her iki cihazda da bulunan A, B, M ve N girişleri birbirlerine şekilde görüldüğü gibi bağlanır. Birinci elektrot kablomuzun herhangi bir ucu anahtarlayıcıdaki “Electrodes 1~30” girişine bağlanır. Eğer bir tane daha elektrot kablomuz varsa o kaborda “Electrodes 31~60” girişine bağlanır. Ardından cihazın aküyle bağlantısı yapılır. Son olarak anahtarlayıcı üzerindeki siyah açma/kapama düğmesi “ON” konumuna getirilerek cihaz ölçü almaya hazır hale gelir. (Bostan, 2012)



Şekil 3.8. WDJJ-3 özdirenç ölçüm cihazıyla WDZJ-3 anahtarlayıcısının bağlantı şeması

Elektrik özdirenç yönteminde veri toplama aşamasında iki akım elektrodu ve iki potansiyel elektrotu olmak üzere genel olarak 4 elektrottan oluşan dizilimler kullanılmaktadır. Pratikte çeşitli amaçlara ve çeşitli sorunların çözümüne göre akım ve potansiyel elektrotları için çeşitli elektrot dizilimleri kullanılır. Elektrik özdirenç verileri, probleme bağlı olarak, DES, profil ve çok elektrotlu özdirenç ölçü tekniklerinden biriyle toplanabilir. Yine, farklı duyarlılıkları, üstün ve zayıf yönleri dikkate alınarak gereken en uygun elektrot dizilimi seçilmektedir. Elektrik özdirenç yönteminde kullanılan çok elektrotlu dizilimler genel olarak; Wenner, Wenner40 Schlumberger ve Dipol dizilimleri olarak üç ana grupta toplanabilir (Öztürk, 2004).

Dipol elektrot dizilimleri de kendi içinde gruplara ayrılmaktadır (Şekil 3.9).



Şekil 3.9. İki boyutlu elektrik özdirenç araştırmaları için elektrot dizilimleri (Loke, 2000)

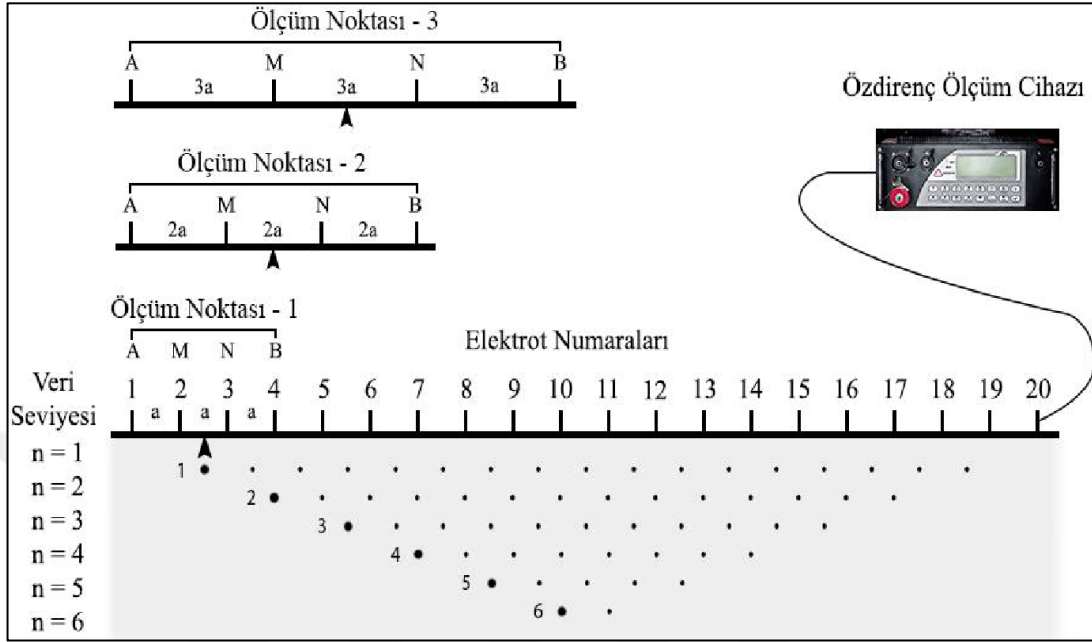
Bu farklı elektrot dizilimlerinin birbirlerine göre avantaj, dezavantaj ve duyarlılıkları vardır. Elektrot diziliminin tercihinde, işgücü yoğunluğunun yanında uygulanabileceği uygun bir alanın olması önemli rol oynamaktadır. Diğer dikkat edilmesi gereken noktalar ise elektrot dizilimlerinin yanal süreksizlikler ve ara yüzeylere olan duyarlılıklarıdır (Griffiths ve Barker., 1993). Bu çalışmada da çalışmanın amacına uygun olarak elektrot dizilimleri bu özellikler dikkate alınarak tercih edilmiştir. Schlumberger dizilimi derin amaçlı, wenner dizilimi ise sığ araştırma çalışmalarında kullanılmaktadır. Yanal yönde değişen süreksizliklerin tespit edilmesinde ise "Pol-Dipol" dizilimi daha iyi sonuç vermektedir. Maden araştırmalarında ise en çok tercih edilen Dipol- Dipol dizilimleridir.

Yarım-Wenner, yarım Schulumberger, Gradient (Schlutz, 1985), üç gerilim elektrot (α , β , γ) (Carpenter ve Habberjam, 1956), iki yönlü üç-elektrot (Candansayar ve Başokur, 2001) dizilimleri ise arkeolojik amaçlı çalışmalarda kullanılmaktadır. Belirtilen dizilimlerin uygulamalarda ve araştırmacılar tarafından yapılan incelemelerinde, arkeolojik aramalarda geleneksel dizilişlere göre daha iyi sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. (Brizzollari ve Bernabini 1979, Orlando vd., 1987).

Elektrik özdirenç yönteminin arazide uygulanması profil ya da DES yöntemi ile sınırlı değildir. Günümüzde geliştirilen çok elektrotlu sistemler sayesinde ölçü alımı kolay ve hızlı hale getirildiğinden aynı anda birden fazla sondaj-profil ölçüleri alınabilmekte ve ölçüler 2B ve 3B değerlendirilebilmektedir (Van Overmeeren ve Ritsera, 1988; Griffiths ve Barker., 1993; Dahlin, 1996). Sığ yapıların araştırılmasında genellikle, çok elektrotlu özdirenç ölçüm tekniği kullanılır. Bu teknikte; uygulanacak elektrot dizilimine bağlı olarak, farklı görünür özdirenç derinlik düzeyleri için, yer altının görünür özdirenç yapma kesitleri elde edilir. Son yıllarda, kısa sürede duyarlı veri elde etmeyi sağlayan çok-kanallı ölçüm cihazları, sığ yapıların araştırılmasında yaygın olarak kullanılmaya başlamıştır (Dahlin, 1996). Bu teknik birçok dizilim kullanarak uygulanabilir. Elde edilen verilerden yer altının hem düşey hem de yatay yöndeki özdirenç tabaka yapıları hakkında bilgi edinilebilir. Yöntem sondaj ve profil ölçü alım tekniklerinin avantajlarını kullanmaktadır. Görünür özdirenç değerleri ile çizilen yapma kesit haritaları yer içinin yanal ve düşey yöndeki değişimlerini iki boyutlu olarak vermektedir. Çizilen bu yapma kesit haritaları ile nitel yorum yapılabilir. Nicel yorum ise, görünür özdirenç yapma kesit değerlerinin 2B ters-çözümünün yapılması ile elde edilir. (Candansayar, 2005). Çok elektrotlu sistem üniteleri, elektrot sayısına göre birçok okumayı sırayla alabilecek şekilde geliştirilmiştir. Bu avantaj sayesinde, toplam ölçü süresi büyük oranda azalırken daha çok veri elde edilmektedir.

Çok elektrotlu özdirenç (ERT) yöntemi; eşit aralıklarla inceleme alanında yere çakılan elektrotlar ile bunların bağlantılarını sağlayan kablolar ve özdirenç ölçüm cihazından oluşmaktadır (Şekil 4.7). Çalışma alanının büyüklüğüne ve hedeflenen amaca göre ölçüm alınacak profil hatlarının birbirlerine olan uzaklığı, elektrotların aralığı ve sayısına önceden karar verilerek uygulamaya başlanır. Elektrot sayısı çalışmanın amaç ve kapsamına göre farklılık gösterebilir. Uygulamalarda daha çok 24 ve 48 elektrot kullanılmaktadır. Elektrotlar paslanmaz çelikten üretilmiştir. Elektrotların yere çakılması ve bağlantı kabloları ile sisteme bağlanmalarından sonra ölçü alımına hazır hale gelmiş olur. Ölçüme başlamadan önce kablo ve elektrotların temas durumları ve diğer kontrolleri yapılmalıdır. Son kontrolden sonra ölçü alınır ve diğer profil hattı ölçü alımlarına geçilerek aynı işlemler tekrarlanır.

Anlatılan sistemi gösteren ana elemanlar ve ölçüm sistemi Şekil 3.10'de verilmiştir (Drahor vd., 2004)



Şekil 3.10. Wenner α dizilimine göre çok elektrotlu özdirenç yöntemi arazi ölçüm düzeneği (Loke, 2000)

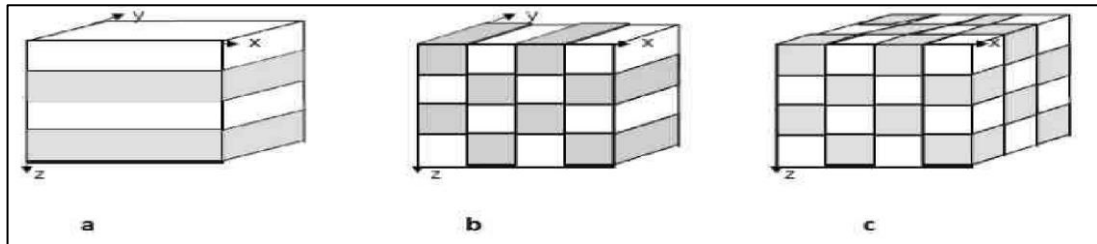
Şekil 3.10'da elektrotlar, çoklu iletken bir kablo ve özdirenç ölçüm cihazından oluşan bir düzenek ile Wenner α dizilimine göre yapılan bir ölçüm gösterilmektedir. Öncelikle ölçüm noktası 1'de elektrot aralıklarının "a" olduğu durumda, akım elektrotları olarak 1 ve 4, potansiyel elektrot olarak da 2 ve 3 konumlanmakta ve böylece bu noktanın ölçümü 2 ile 3 noktasının ortasına atanarak, işlem tamamlanmaktadır.

Aynı işlem her bir elektrotun bir kez ötelenmesiyle oluşan yeni konumlamalarda da yapılarak, işlem profil sonuna kadar sürdürülür ve n=1 düzeyi için görünür özdirenç verileri elde edilir. Daha sonra elektrot aralıkları "2a" mesafesi için yeni konumlamalar oluşturulur ve bir öncekine benzer işlemler yinelenerek, bu seviyeye ait görünür özdirenç verileri toplanır. Ölçümler, planlanan "n" düzeylerine kadar sürdürülür ve böylece ilk ölçüm hattındaki veri toplama işlemi tamamlanır. Daha sonra düzenek ölçülecek diğer ölçü profil hattına kaydırılır ve aynı işlemler tekrarlanır. Böylece tasarlanan ölçüm hatları üzerinde "n" düzeyine değin yapılan ölçümlerle, ortamın üç boyutlu görünür özdirenç haritaları ve hacimsel görüntüleri elde edilir (Drahor vd., 2004).

3.4. Düz Çözüm

Ölçülmeye çalışılan sürecin bilinen bir yer altı modeline benzeştirilmesi modelleme olarak adlandırılır. Bu model içerisinde, süreci kontrol eden ve bulunması istenen değerlerin, sayılarının tespit edilmesi, anlamlandırılması ve sınıflandırılması “parametreleştirme” olarak adlandırılır. Jeofizik bilimi; yer altı modelinin fiziksel özellikleri ve geometrisi gibi birçok bileşenini oluşturan parametrelerin çözülmesi prensibine dayalı bir bilim dalıdır. Yer yapısının geometrik parametreleri yer altının biçimlendirilmesinde önemlidir. Jeolojik yapıların kalınlığı, genişliği, şekli gibi değişkenler geometrik parametreleri oluşturur. Geometrik parametreler bu yapıların konum ve biçimlerini tanımlar. Fiziksel parametreler ise kullanılan jeofizik yöntemde ölçülen alana neden olan fiziksel özelliklerdir. Örneğin, elektrik öz direnç yönteminde öz direnç değişimi, ölçülen elektrik alanda değişimlere neden olur. Bu nedenle elektrik yöntemlerde fiziksel parametre olarak, her geometrik birimin öz direnci kullanılır (Başokur, 2002).

Şekil 3.11’de görüldüğü üzere 1B modellemede yer içinin homojen ve izotrop tabakalardan oluştuğu varsayılır (Şekil 3.11.a). 2B modellemede ise yer içinin iletkenliğinin x ve z yönünde değişken, y yönünde sabit kalan bloklardan oluştuğu varsayılır (Şekil 3.11.b). 3B modellemede ise kendi içerisinde homojen ve izotrop iletkenliğe sahip küplerden meydana geldiği varsayılmaktadır. (Şekil 3.11.c) (Candansayar, 1997).



Şekil 3.11. a) 1B model, b) 2B model, c) 3B model (Candansayar, 1997)

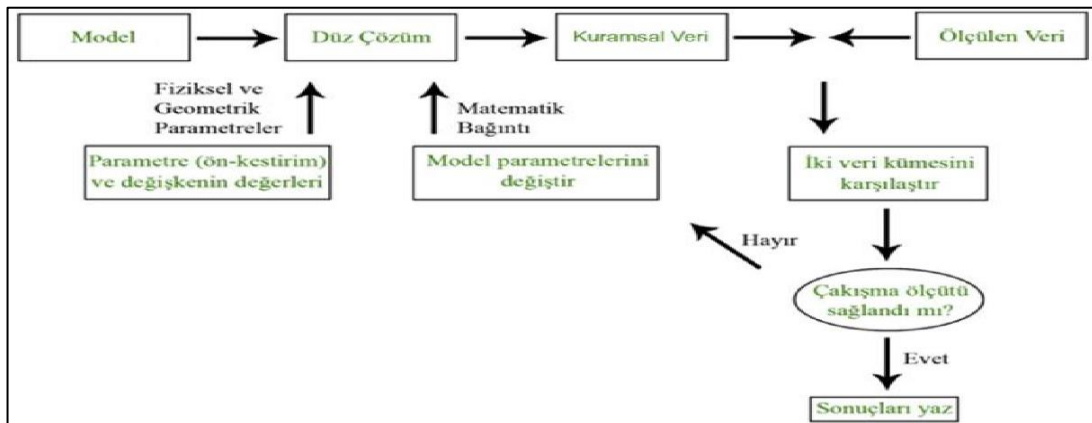
Düz-çözüm elektrot düzeni ve tabakalanmaya bağlı görünür öz dirençleri matematik olarak hesaplamaktan ve jeolojik kesitin veya modelin tahmininden oluşur. Daha sağlıklı bir model geliştirmek için kuyu kontrolü sağlanabilir, tahmin edilen sonuçlar hesaplanabilir, etkin bir arazi programı tasarımı yapılabilir. 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 şekiller için daha çok sayısal yöntemler kullanılır (Keçeli, 2009).

Elektrik öz direnç 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 yapılır. İntegral denklemleri sonlu elemanlar ve sonlu farklar yöntemi, elektrik öz direnç verilerinin modellemesinde kullanılan başlıca hesaplama yöntemleridir (Candansayar, 1997).

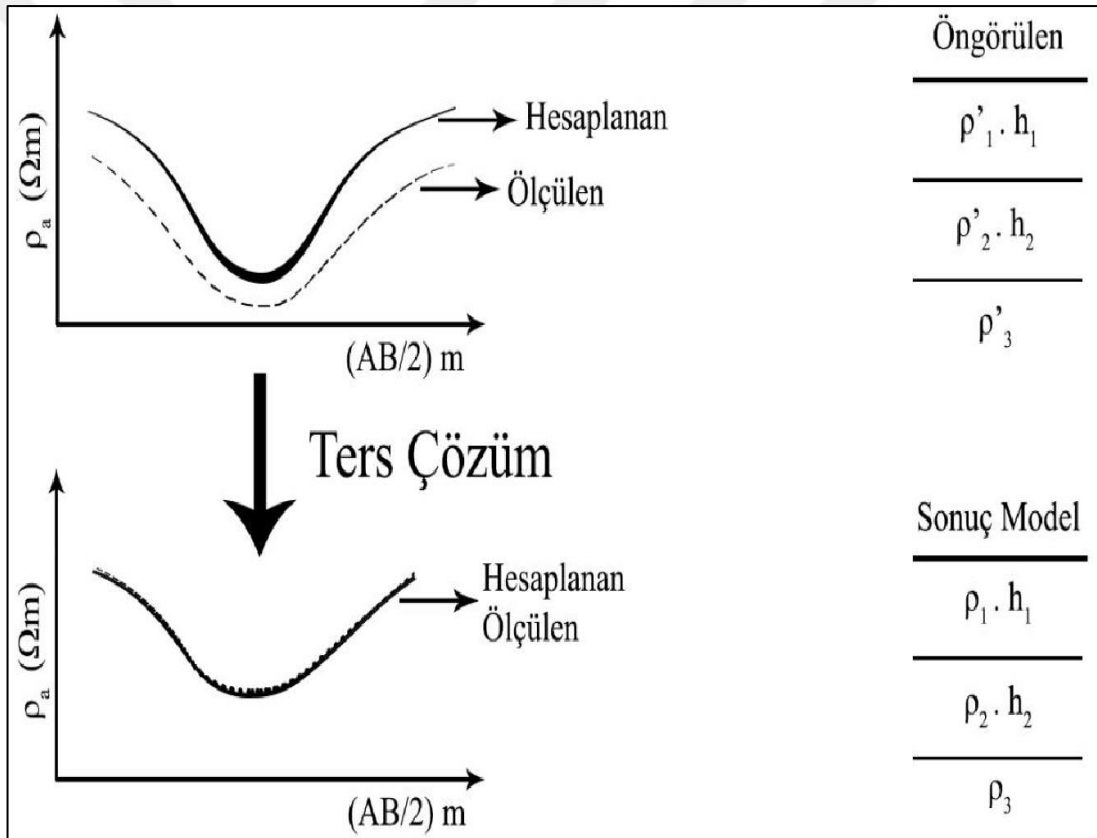
3.5. Ters Çözüm

Elde edilen verilerden, parametre değerlerinin hesaplanarak ölçülen değerler ile hesaplanan değerler arasında en yakın yer altı modelinin oluşturulması “ters-çözüm” olarak adlandırılır. Ters-çözüm, doğrusal ve doğrusal olmayan problemler olarak, veri-parametre ilişkisine bağlı iki problemi barındırır. Veri ve parametre arasındaki ilişki bir dizi denklemi ile ifade edilebiliyor ise, problem lineerdir ve parametreler, ölçülen veriden tek bir işlem adımı ile hesaplanabilmektedir. Veri ve parametreler arasındaki ilişki, düzey denklemleri ile ifade edilemediği durumlarda, problem doğrusal olmaktan çıkar ve parametreleri çözmek için birçok kez model yanıtın hesaplanması gerekir. Şekil 3.12’de doğrusal olmayan problem için yer altı parametrelerinin çözümünde kullanılan strateji ve kavramlar görülmektedir (Başokur, 2002).



Şekil 3.12. Nicel yorumlamanın basitleştirilmiş akış şeması (Başokur, 2002)

Görünür özdirenç değerlerinden gerçek yer altı özdirencini saptamak ters-çözüm problemidir. Ters-çözüm tekniği, günümüzde, tüm jeofizik yöntemlerin değerlendirme ve yorumunda kullanılan temel bir teknik durumuna gelmiştir. Elde edilen arazi verilerine benzeyen veya uyan verileri oluşturan jeoelektrik modelin fiziksel parametrelerini saptamaktır. Ters-çözüme başlamadan önce arazi eğrisi uygun bir teorik eğri ile karşılaştırılarak ilk yaklaşım yorumu yapılır (Şekil 3.13). 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 (Başokur, 2002).



Şekil 3.13. 1B elektrik özdirenç ters-çözüm şeması (Keçeli, 2009)

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

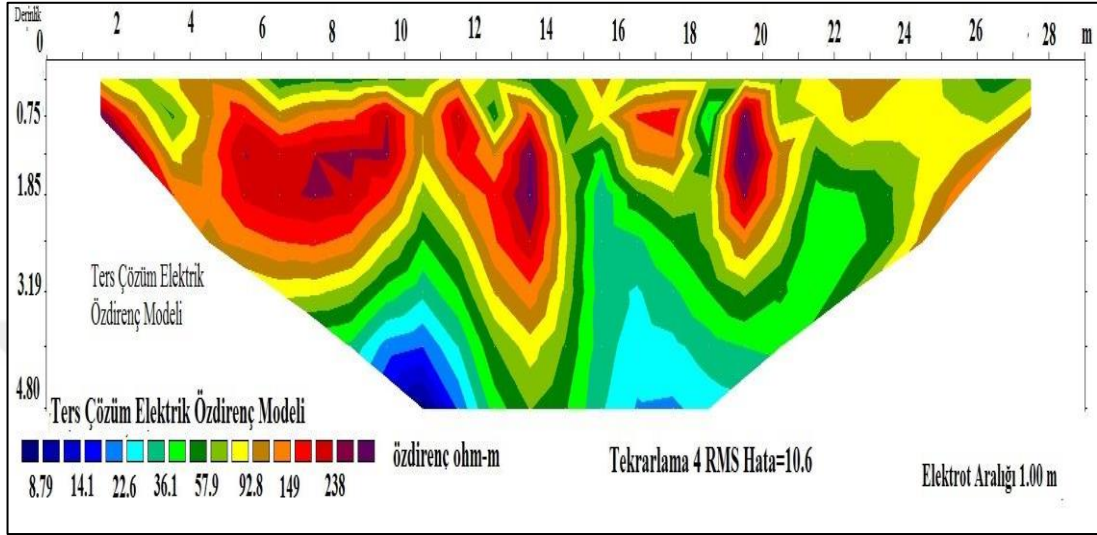
Ters-çözüm işlemi ince katmanları açığa çıkarabilir. Ters-çözümün en önemli sonuçlarından biri yer altı değişiminin daha iyi uyum içine dönüşen yapma kesitlerin, derinlik kesitlerinin daha iyi tahminleridir. Bu yöntemde başlangıç modeline bağlı olup deneme yanılmadaki benzeri sorunlar mevcuttur. Özdirenç derinlik sondajı yönteminin 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 satırlarda sınırlıdır ve kabadır. Elektrik özdirenç yönteminde ters-çözüm genel olarak nonlinear bir usuldür ve çözüm tekil değildir. Verilerdeki küçük değişiklikler çözümde büyük farkların oluşmasına 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).

Doğru sonuca ulaşabilmek için yer altını en iyi yansıtabilecek jeolojik modelin seçilmesi gerekmektedir. Değerlendirmelerde 1B model seçilirse hesaplamalar daha kolay yapılır ancak 1B ters-çözüm sadece yer altı katmanlarının yatay olması durumunda başarılı sonuçlar üretmektedir. Yer altının yatay katmanlardan oluşmadığı durumlarda (birçok arazi koşulu bu şekildedir) 2B ters-çözüm yönteminin kullanılması gerekmektedir. Düz bir profil hat üzerinde birçok ölçü noktası bulunuyor ise 2B ters-çözüm uygulanabilmektedir. Bu nedenle 2B ve 3B ters çözümlerinde bilgisayarın bellek ihtiyacı dahada yüksektir. Özellikle 3B ters çözümünde daha güçlü bilgisayarlar kullanılmalıdır. Çalışmada çok sayıda ölçü hattı kullanılarak veriler toplanmış ise en iyi yöntem 3B ters-çözüm modellemesidir. (Başokur, 2002).

3.6. Çalışma Alanı Çok Elektrotlu Elektrik (Ert) Verilerinin Toplanması ve Değerlendirilmesi

GPR verilerinin değerlendirilmesinde zeminin kil içeriği, dolgu birimlerin varlığı ve su içeriği nedeniyle sinyallerin 1,6 metreden daha fazla ilerlemediği görülmüştür. Bu nedenle çökmenin olduğu 1. Alanı kapsayacak şekilde 9 profil Wenner ve Schlumberger elektrot dizilimlerine göre 30 elektrotlu doğru akım özdirenç cihazı ile

ölçüler alınmıştır. Profiller arası uzaklık 2 m dir. Sadece profil 3 ve 4 ün arasında arazi koşulu gereği zorunlu olarak 3 m uzaklık vardır. Elektrotlar arası uzaklık 1 m dir. Profillerin uzunluğu 29 m dir. Çalışma alanında toplanan ERT verileri RES2INV ile 2D ve RES3DINV yazılımı ile 3D değerlendirilmiştir.

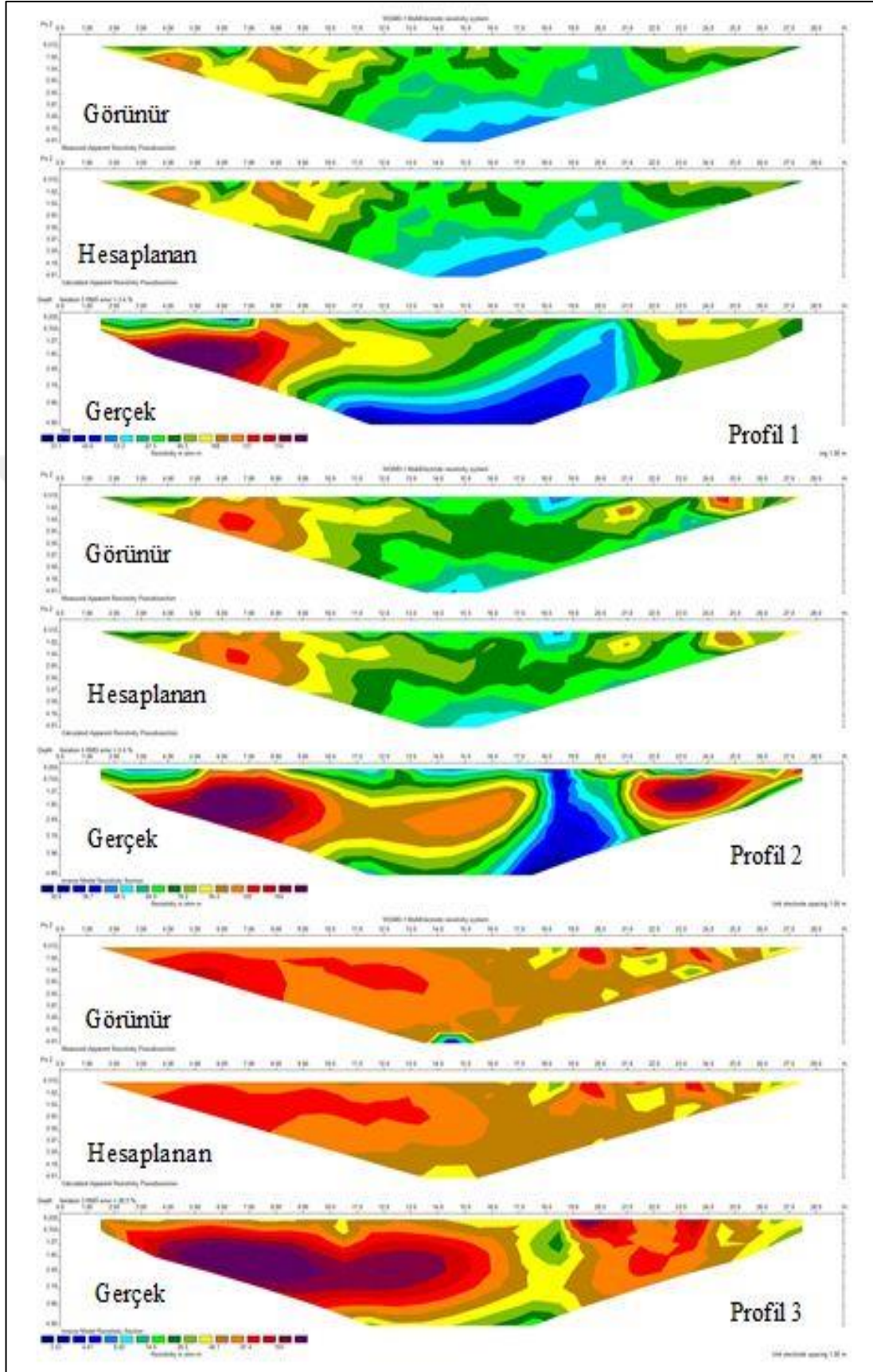


Şekil 3.14. Birinci alanın içerisinde elde edilen özdirenç kesiti örneği.

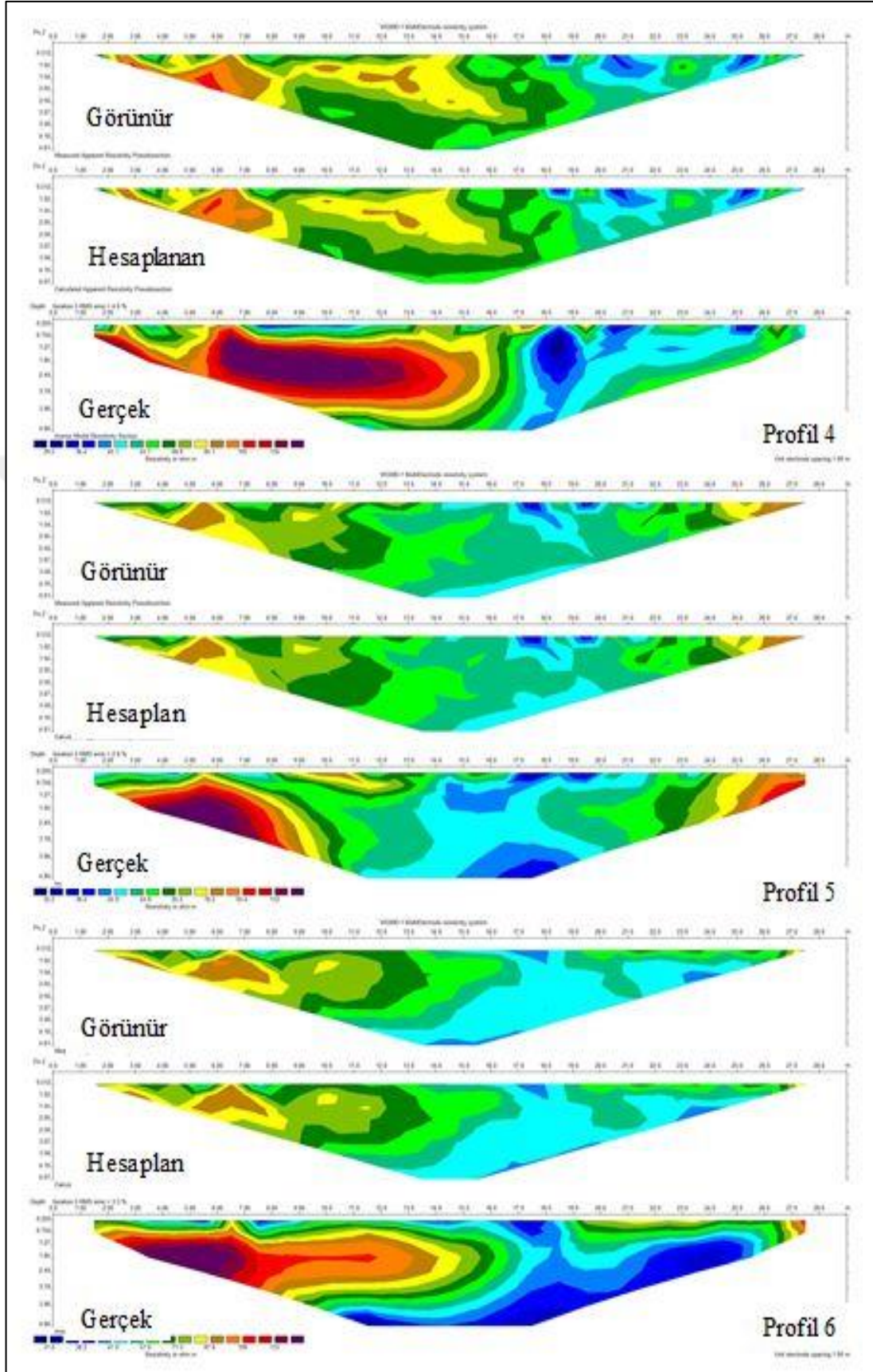
Yer altının gerçek özdirenç değişimini elde etmek için, görünür özdirenç verilerinin ters çözümü yapılır. Bu yönde geliştirilen ters çözüm algoritmaları yer altının tomografik görüntülerinin iki- ve üç- boyutta elde edilmesine olanak sağlamaktadır. ERT ters çözümünde amaç sınırlı sayıdaki görünür özdirenç verisinden yer altı modeli olan özdirenç dağılımına ulaşmaktır. (Şekil 3.14)

Özdirenç kesitlerinde yatay eksen ölçü profil uzunluğunu, düşey eksen derinliği göstermektedir. RES2INV ile 2D ve RES3DINV yazılımı ile değerlendirilen verilerden üç farklı kesit elde edilir. Bunlardan birincisi görünür özdirenç, ikincisi hesaplanan özdirenç ve üçüncüsü ters çözüm işlemi yapılarak elde edilen gerçek özdirenç kesitidir.

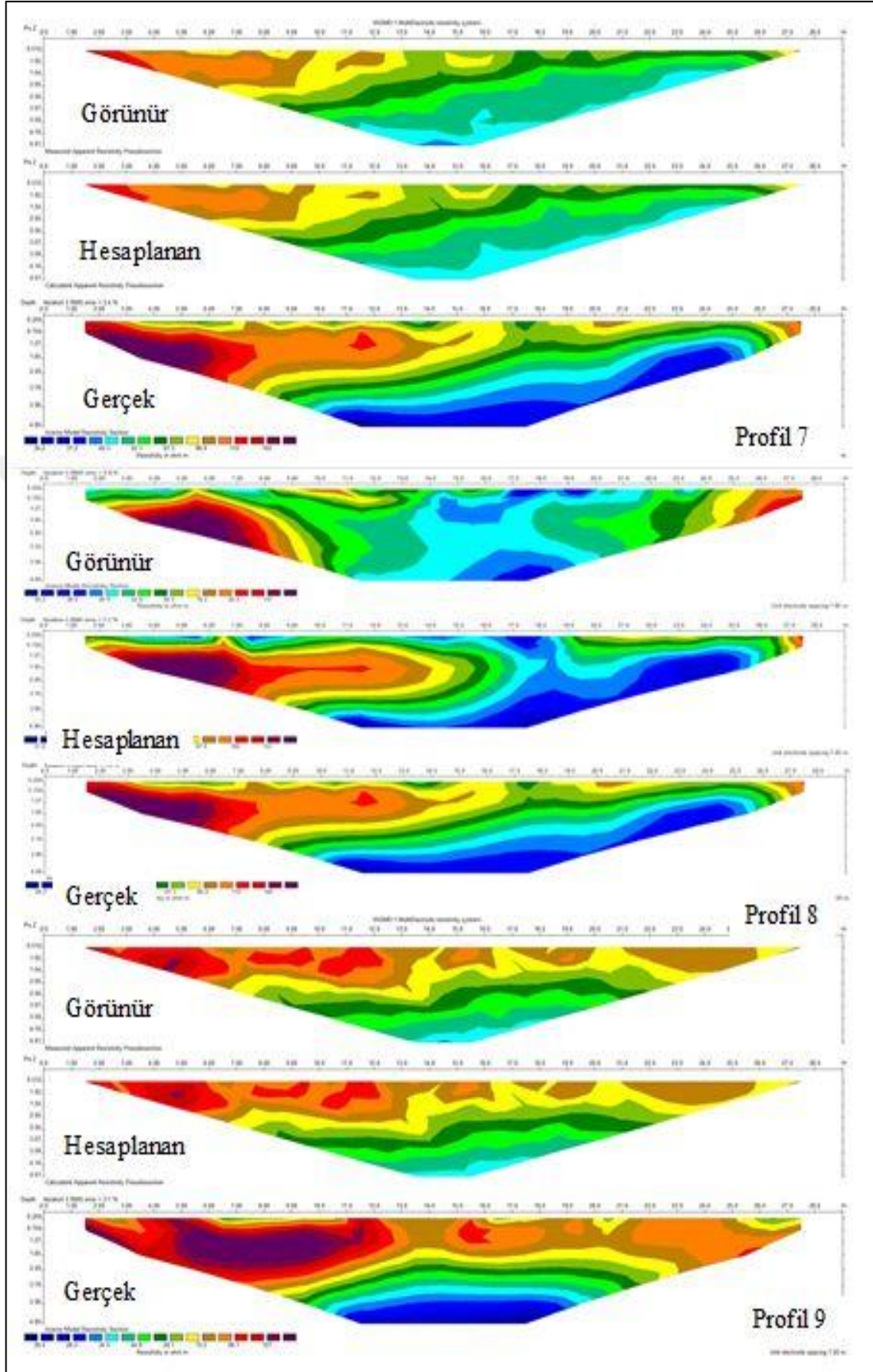
Çalışma alanından elde edilen 9 adet profile ters çözüm işlemleri uygulanarak her profile ait özdirenç tomografi kesitleri elde edilmiştir. Wenner dizilimi için 9 seviye ve en düşük %4,2 en yüksek %13,5 RMS hata değerleriyle, Schlumberger dizilimi için 12 seviye en düşük %4,2 en yüksek %13,5 RMS hata ile 2B kesitler elde edilmiştir. Elde edilen Wenner dizilimlere ait kesitler Şekil 3.15-3.17 aralığında verilmiştir.



Şekil 3.15. Wenner Profil 1-3 için görünür, hesaplanan ve ters çözüm gerçek öz direnç tomografi kesitleri

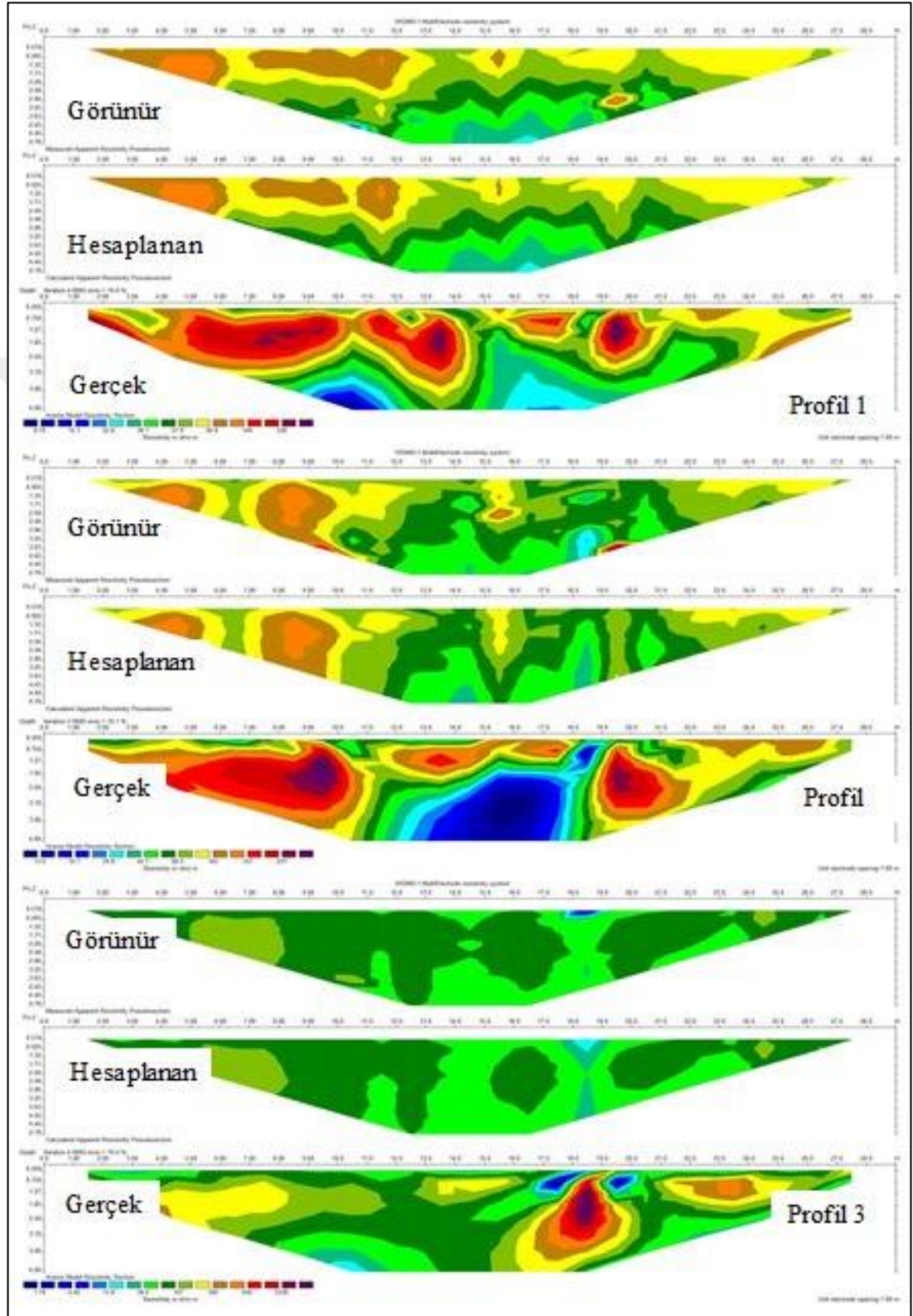


Şekil 3.16. Wenner Profil 4-6 için görünür, hesaplanan ve ters çözüm gerçek öz direnç tomografi kesitleri

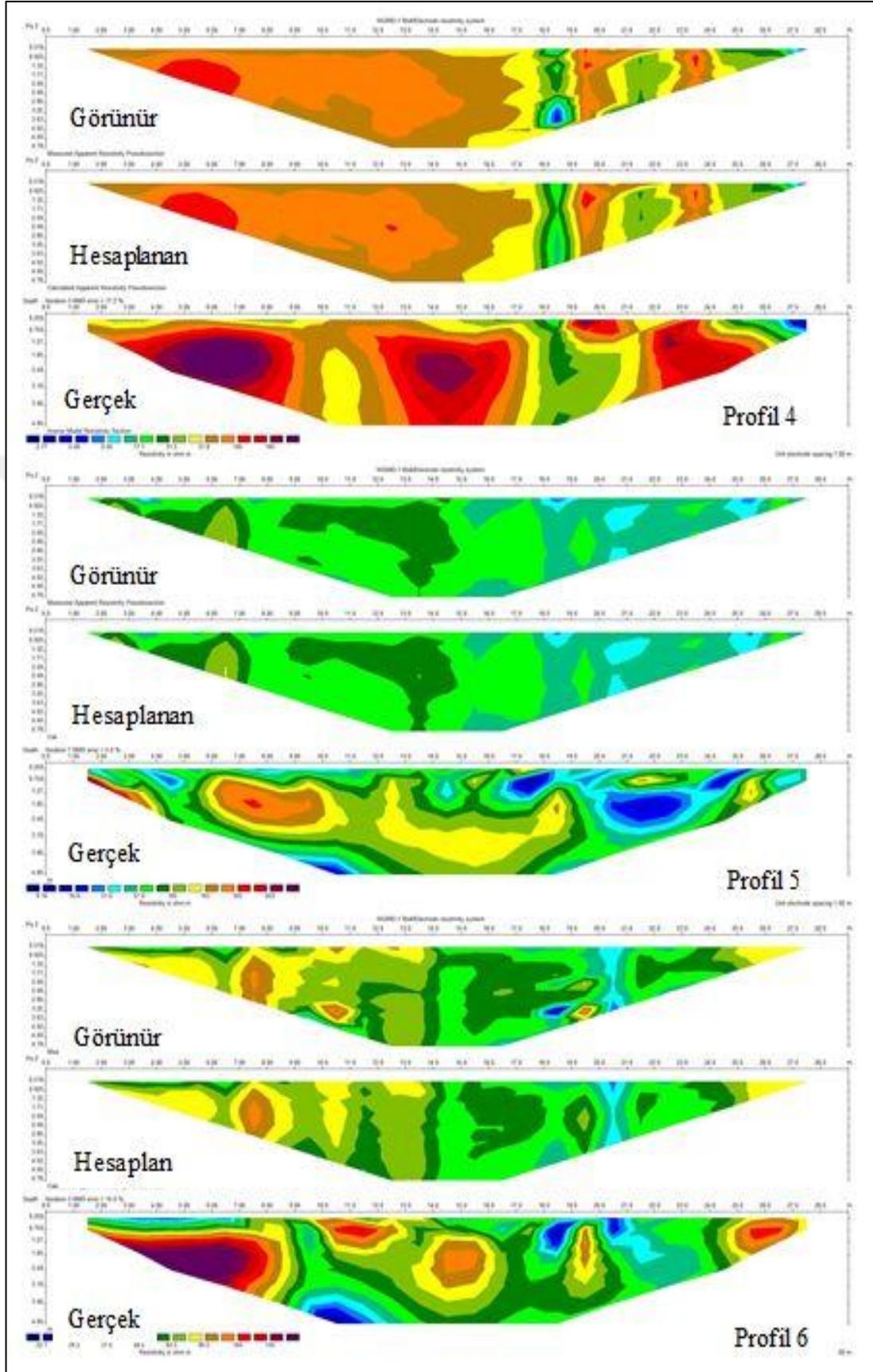


Şekil 3.17. Wenner Profil 6-9 için görünür, hesaplanan ve ters çözüm gerçek öz direnç tomografi kesitleri

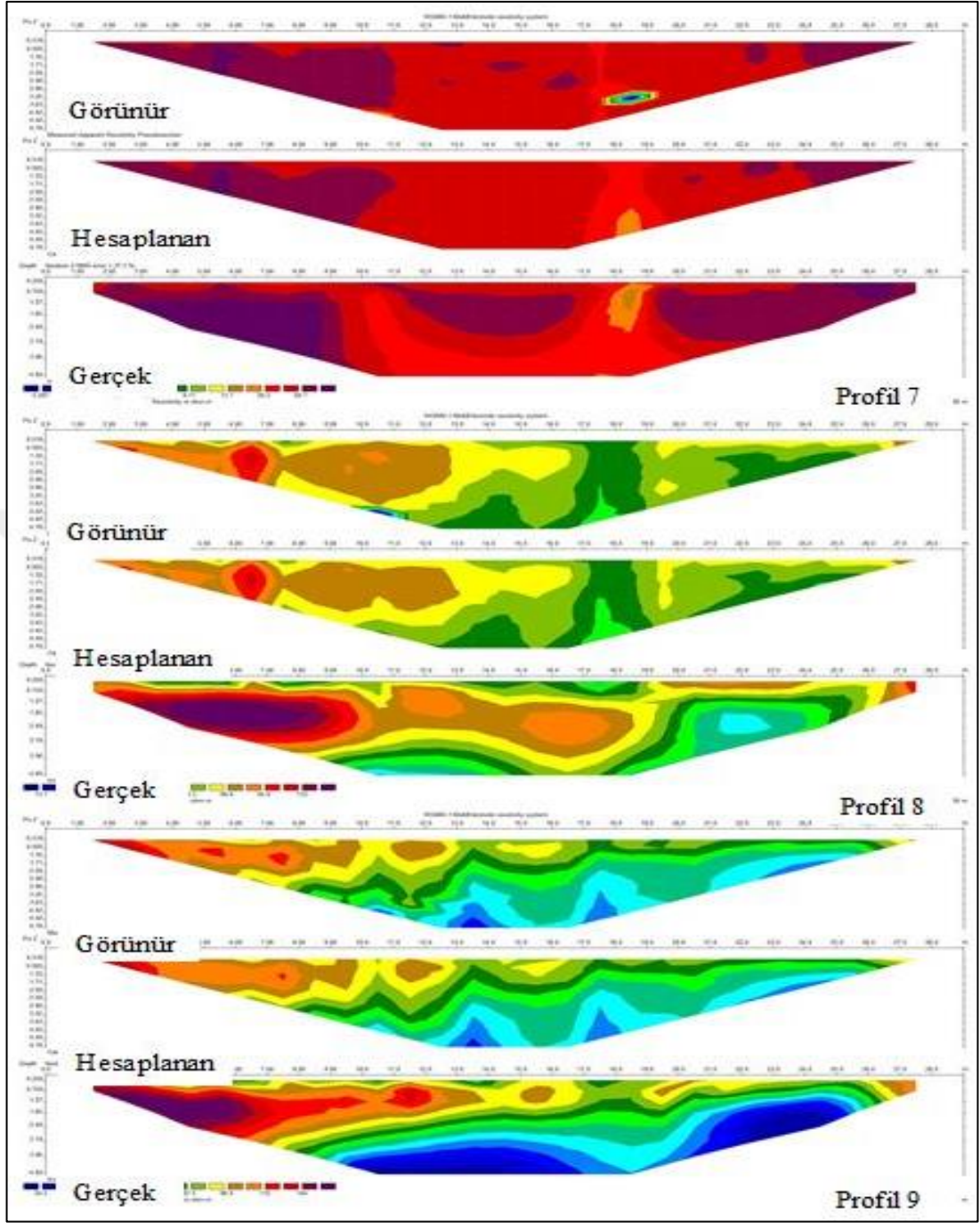
Elde edilen Schlumberger dizilimlere ait kesitler ise Şekil 3.18-3.20 aralığında verilmiştir.



Şekil 3.18 Schlumberger Profil 1-3 için görünür, hesaplanan ve ters çözüm gerçek öz direnç tomografi kesitleri

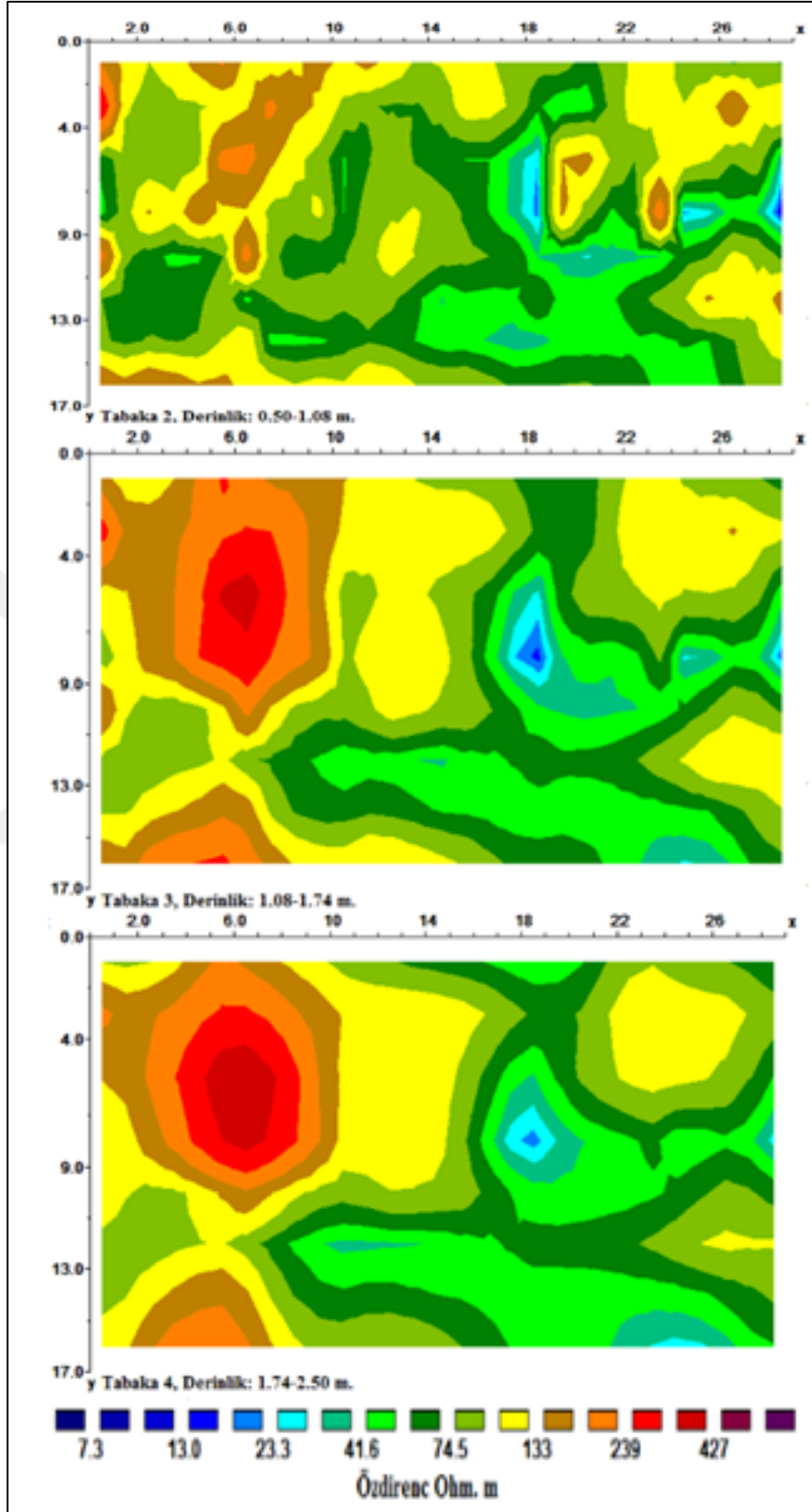


Şekil 3.19. Schlumberger Profil 4-6 için görünür, hesaplanan ve ters çözüm gerçek öz direnç tomografi kesitleri

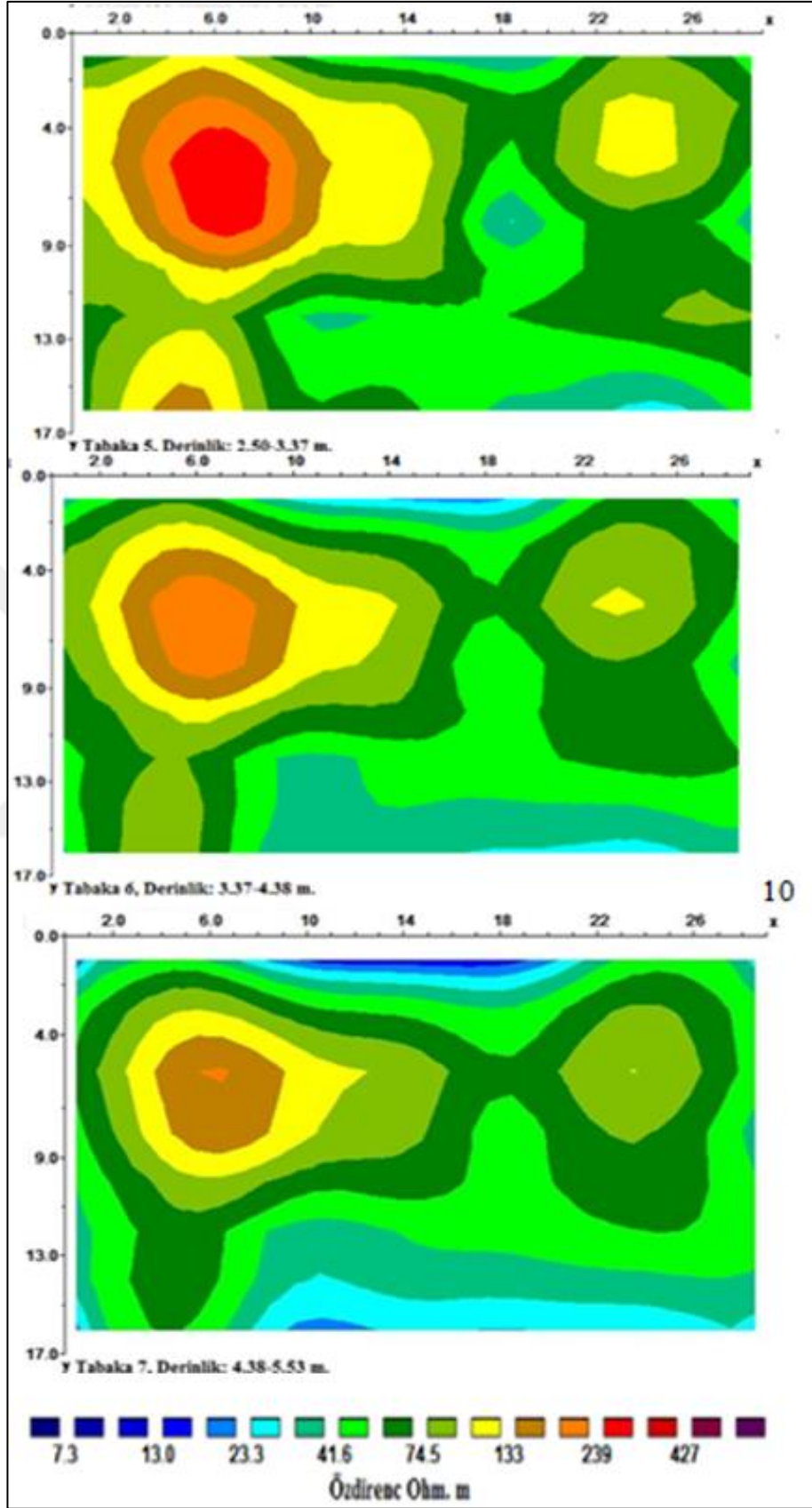


Şekil 3.20. Schlumberger Profil 6-9 için görünür, hesaplanan ve ters çözüm gerçek öz direnç tomografi kesitleri

Kesitlerde özellikle çökmenin olduğu alanlarda yüksek öz dirençli anomalilere tespit edilmiştir. 2B öz direnç değerlendirmeleri ile elde edilen yer altı öz direnç değerleri dağılımlarının ardından 3B değerlendirmelere geçilmiştir. 3B değerlendirmeler RES3DINV yazılımı ile yapılmıştır. Wenner dizilimine göre 3B görüntüleme sonucunda elde edilen farklı derinliklere ait kesitler Şekil 3.21 ve Şekil 3.22’de gösterilmiştir.

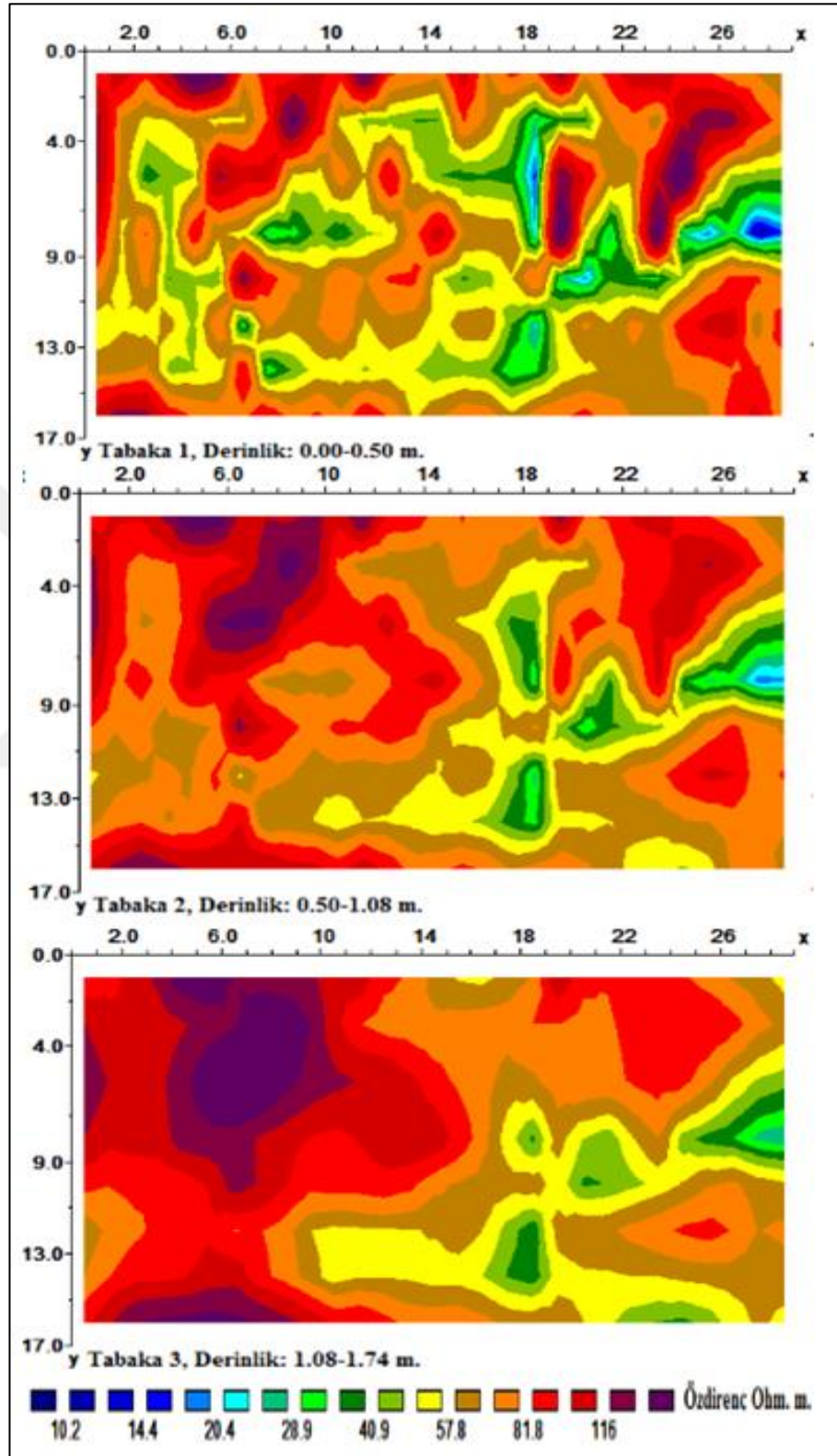


Şekil 3.21. Wenner Alfa dizilimine göre alınan ölçülerin 3B görüntülerinden elde edilen 0,5m-2,5m aralığındaki özdirenç seviye haritaları

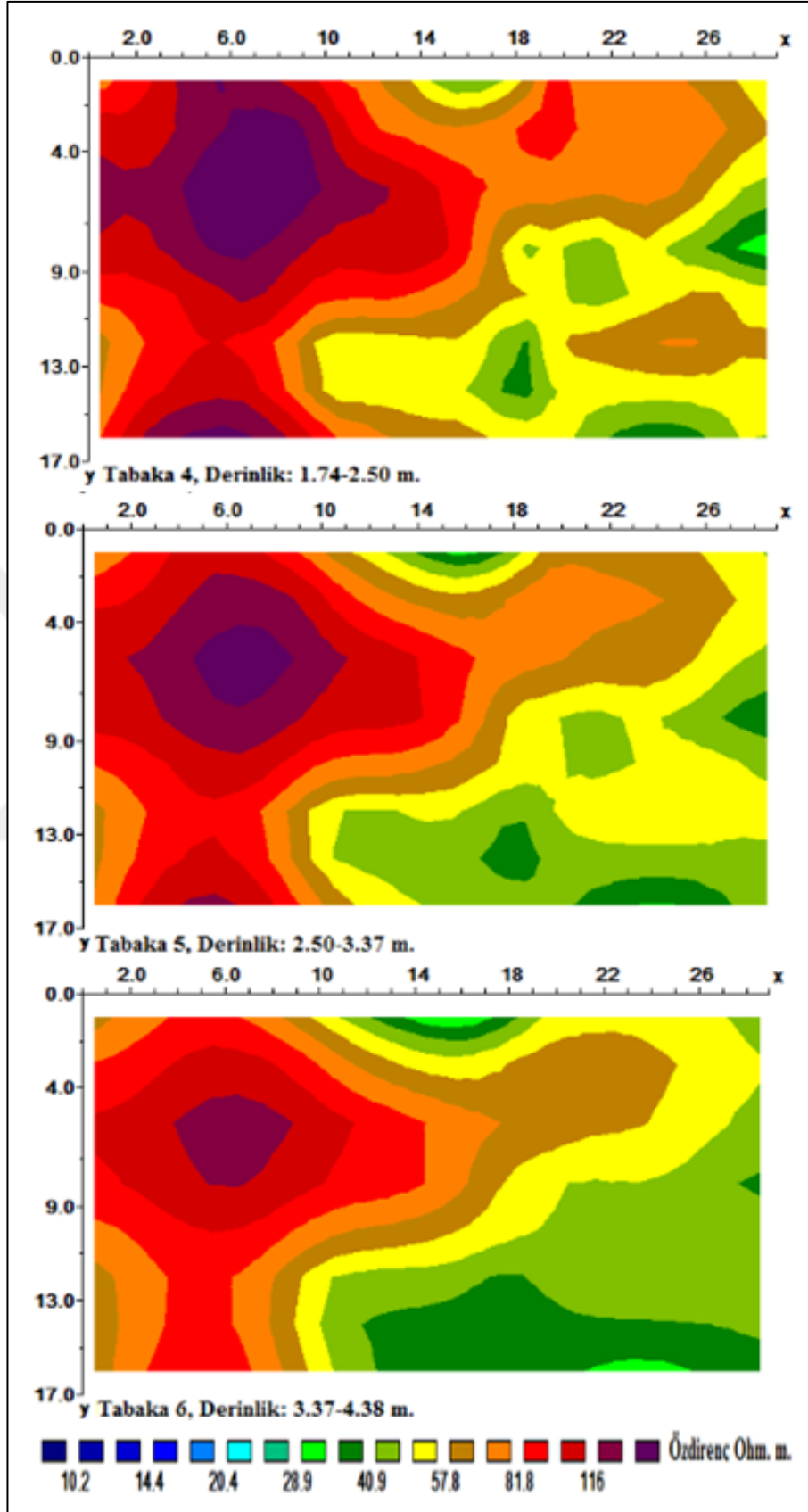


Şekil 3.22. Wenner Alfa dizilimine göre alınan ölçülerin 3B görüntülerinden elde edilen 2,5 m-5,53 m aralığındaki öz direnç seviye haritaları

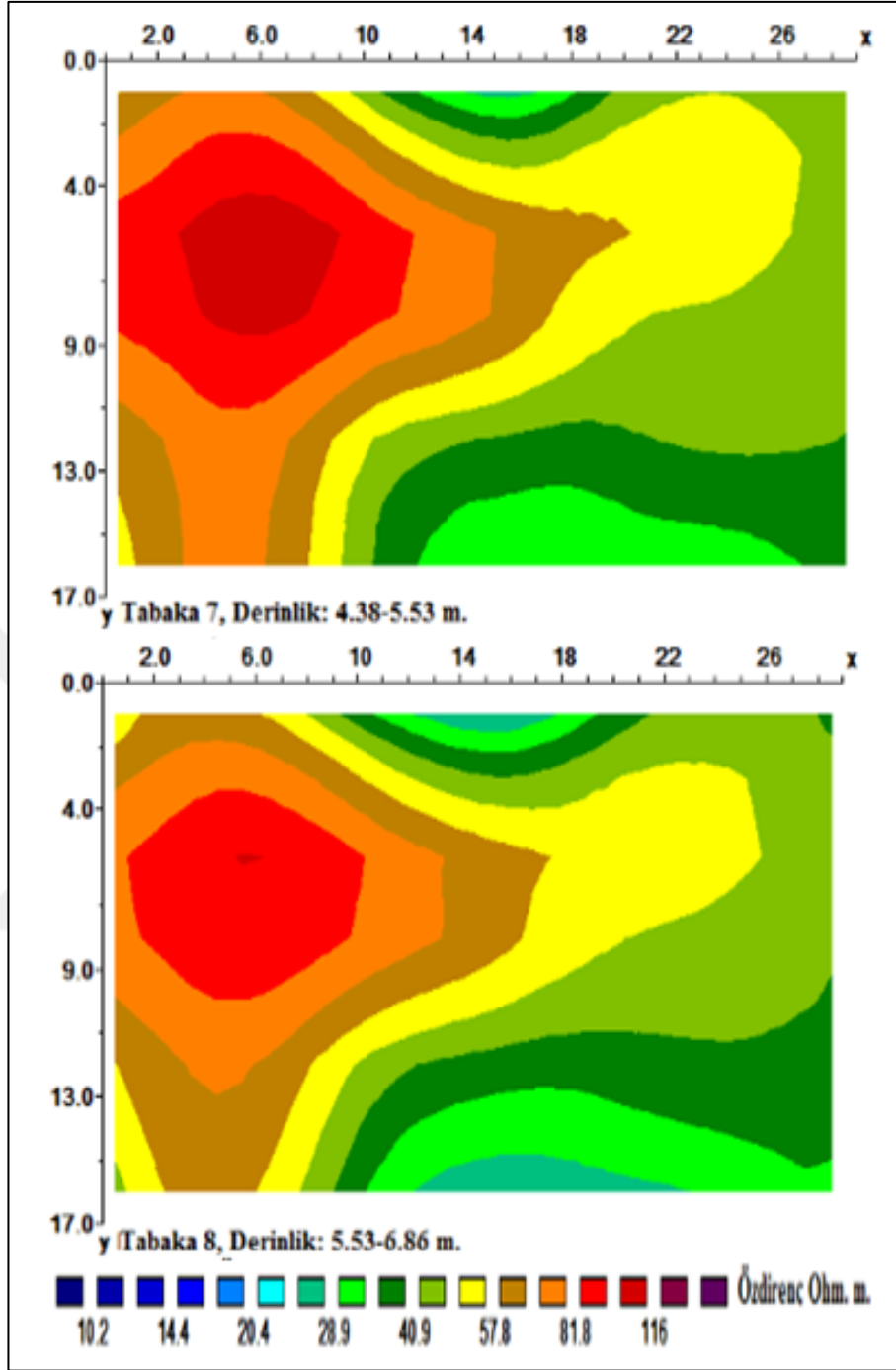
Schlumberger dizilimine göre 3B görüntüleme sonucunda elde edilen farklı derinliklere ait kesitler Şekil 3.23-3.25 aralığında gösterilmiştir.



Şekil 3.23. Schlumberger dizilimine göre alınan ölçülerin 3B görüntülerinden elde edilen 0,0 m-1,74 m aralığındaki öz direnç seviye haritaları

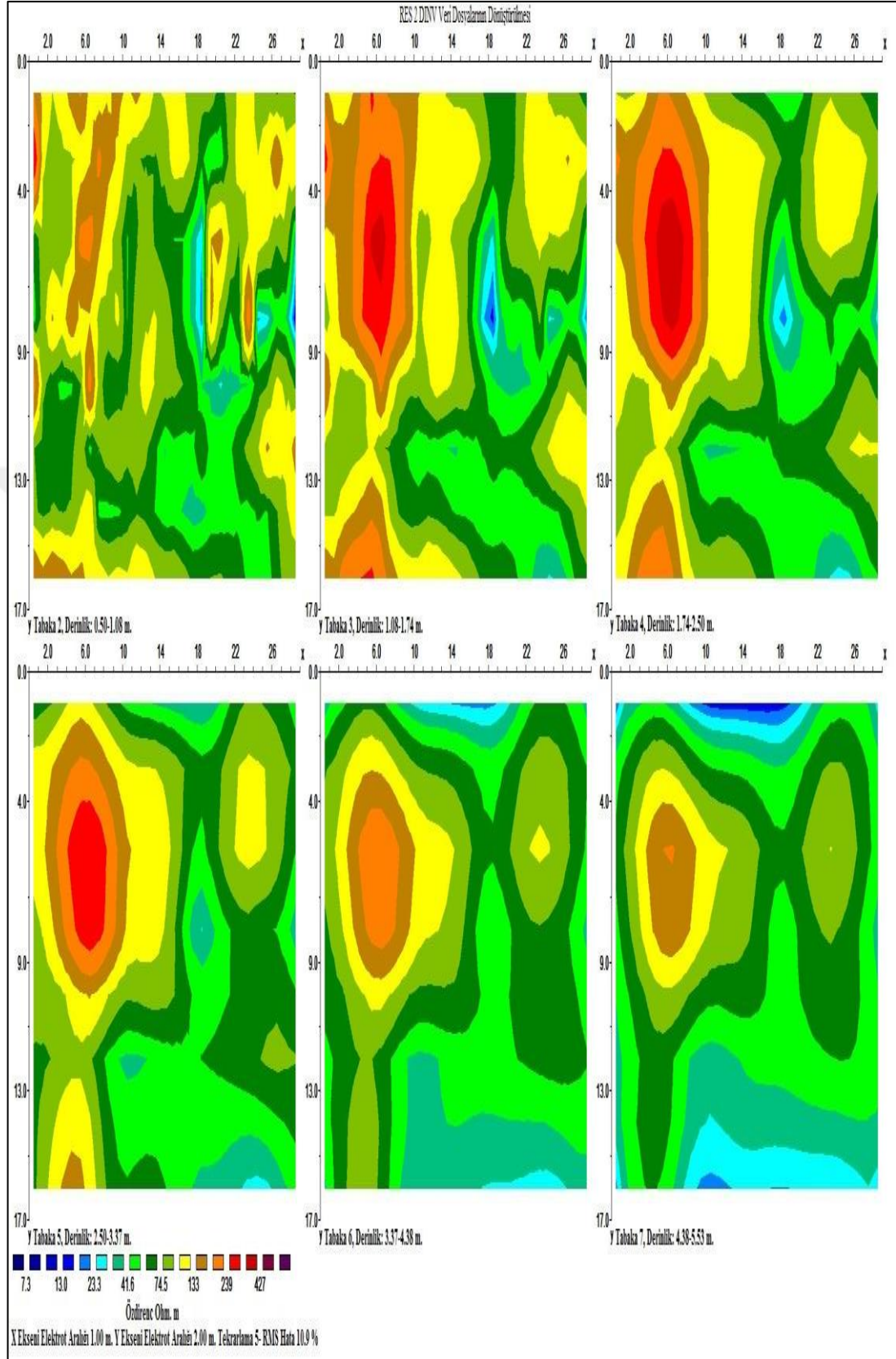


Şekil 3.24. Schlumberger dizilimine göre alınan ölçülerin 3B görüntülerinden elde edilen 1,74 m- 4,38 m aralığındaki özdirenç seviye haritaları

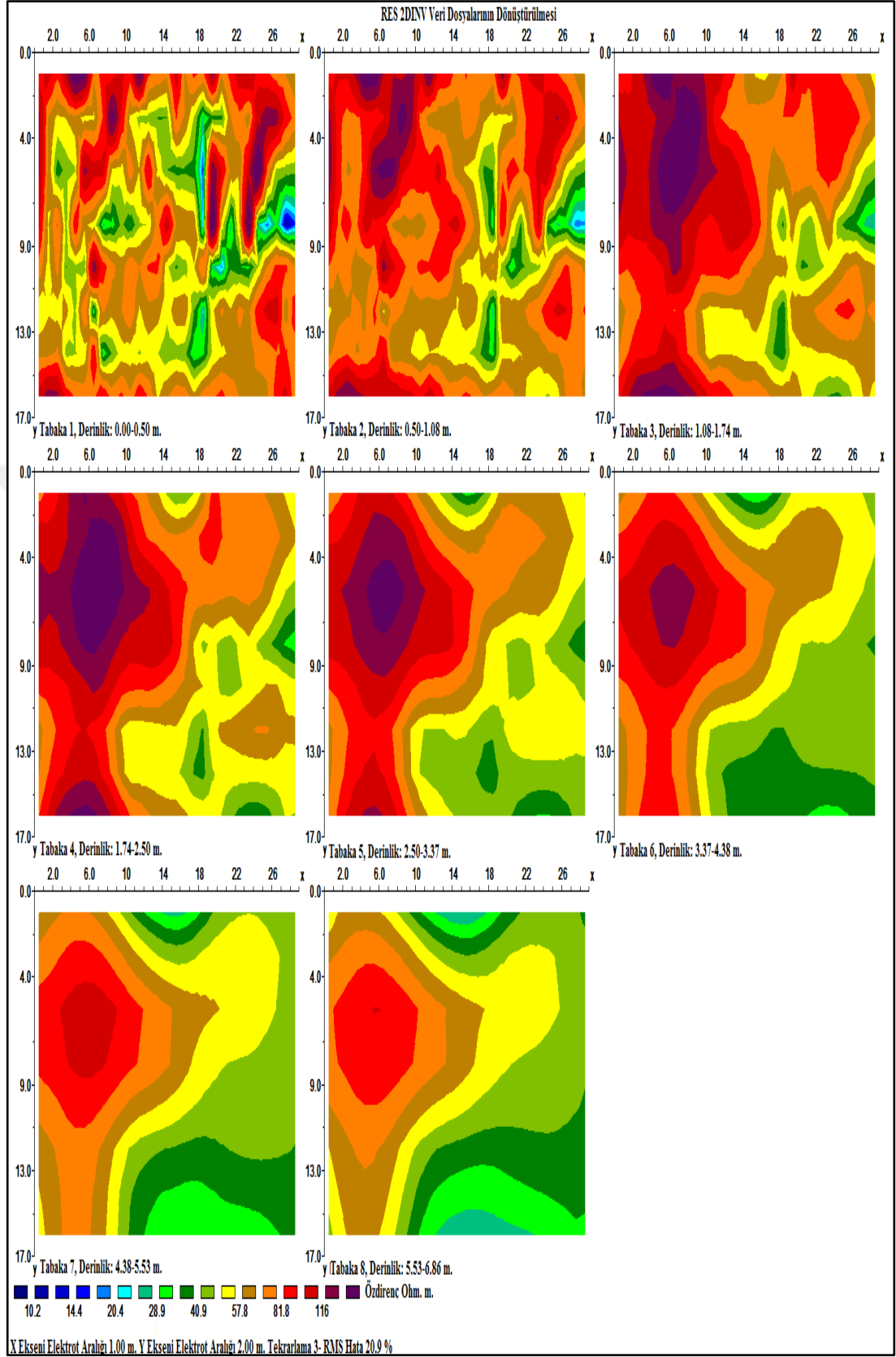


Şekil 3.25. Schlumberger dizilimine göre alınan ölçülerin 3B görüntülerinden elde edilen 4,38m-6,86m aralığındaki öz direnç seviye haritaları

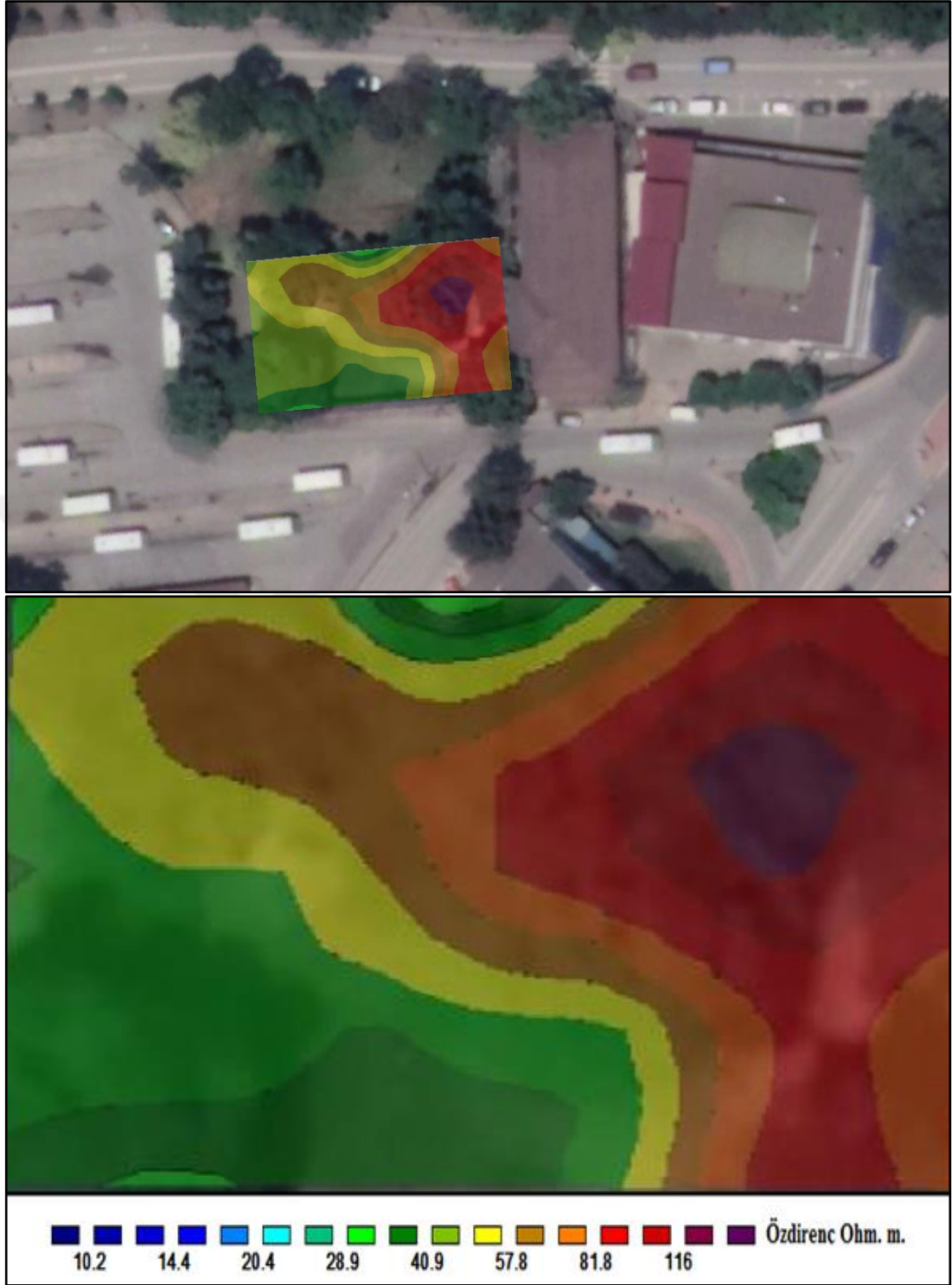
Wenner ve Schulumberger dizilimlerine göre alınan ölçülerin yapılan 3B değerlendirmesine göre yaklaşık 1 metrede başlayan, ölçülebilen son derinliğe kadar devam eden (Wennerde 5,53m Schulumbergerde 6,86 m) ve çökme alanına karşılık gelen kısımlarda yine yüksek öz direnç değerlerine sahip anomaliler elde edilmiştir. Bu dizilimlere ait toplu gösterimler Şekil 3.26 ve Şekil 3.27 de verilmiştir.



Şekil 3.26. Elektrot aralığı 1 m ve profil uzunluğu 29 m olan 30 elektrotlu Wenner elektrot dizilimi ölçülerinden elde edilen özdirenç seviye haritaları.



Şekil 3.27. Elektrot aralığı 1 m ve profil uzunluğu 29 m olan 30 elektrotlu Schlumberger elektrot dizilimi ölçülerinden elde edilen özdirenç seviye haritaları.



Şekil 3.28. 4,48-5,53 m derinlik için özdirenç seviye haritası.

Çok elektrotlu elektrik sondajı verilerine göre kreş bahçesi içerisinde tarihi yapılar olarak değerlendirebilecek yüksek özdirençli anomaliler tespit edilmiştir (Şekil 3.26 ve Şekil 3.27). Özellikle çökmenin olduğu kısımda en yüksek özdirenç değerleri elde edilmiştir. (Şekil 3.28)

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Kocaeli ili, İzmit ilçesinde kreş olarak kullanılan binanın bahçesinde GPR ve ERT ölçümleri yapılmıştır. İnceleme alanının 1. derece sit alanı olması, bölgenin birçok medeniyete ev sahipliği yapmış olması, Roma İmparatorluğu'nun başkenti olması ve bu dönemde çarşı olarak kullanılması arkeolojik olarak yer altında tarihi yapıların bulunma olasılığını güçlendirmektedir. Çökmenin olduğu birinci alanda yapmış olduğumuz GPR ölçümleri; zeminin dolgu olması nedeniyle 1,6 metreye kadar bilgi verebilmiştir. Bu kısımda belirtilen derinlikte herhangi bir yer altı boşluğuna ya da tarihi yapıya rastlanmamıştır. İkinci alanın yapılan değerlendirmesine göre; zeminin dolgu birimlerden (kalıntı, hafriyat vs.) oluşması nedeniyle maksimum 1,5-1,6 m derinliğe kadar veri elde edilebilmiştir. Ancak bu verilerde yüksek genlikli yansımalar arkeolojik kalıntı, bir duvar yapısı olarak değerlendirilmiştir. Profil aralığı 0,5 m ve profil uzunluğu 8 m olan, birbirine dik 32 profilden oluşan 1. alanın yapılan değerlendirmesine göre; zeminin dolgu birimlerden (kalıntı, hafriyat vs.) oluşması nedeniyle maksimum 1,5-1,6 m derinliğe kadar veri elde edilebilmiştir. Bu verilerde kırmızı renkle gösterilen yüksek genlikli yansımalar mevcut yüzeydeki parke yol ile 0-1,6 m aralığında görülen dolgu birimlerdeki daha büyük hacimli malzemeler olabilir. Profil aralığı 0,5 m ve profil uzunluğu 27 m olan 12 profilden oluşan 2. alanın yapılan değerlendirmesine göre; zeminin dolgu birimlerden (kalıntı, hafriyat vs.) oluşması nedeniyle maksimum 1,5-1,6 m derinliğe kadar veri elde edilebilmiştir. Ancak bu verilerde kırmızı renkle gösterilen yüksek genlikli yansımalar arkeolojik kalıntı, bir duvar yapısı olabilir. Çok elektrotlu elektrik sondajı verilerine göre kreş bahçesi içerisinde tarihi yapılar olarak değerlendirebilecek yüksek öz dirençli anomaliler tespit edilmiştir. Wenner ölçü diziliminde yaklaşık 5,53 metre, Schumberger ölçü diziliminde yaklaşık 6,86 metreden öz direnç değerleri elde edilmiştir. Alınan ölçülerin yapılan 2B ve 3B değerlendirmesinde; yaklaşık 1 metrede başlayan ve 5 metreye kadar devam eden, incelenen bölgenin çökme alanına karşılık gelen kısımlarında yüksek öz direnç değerlerine sahip anomaliler elde edilmiştir. Çöküntüyü oluşturan, arkeolojik yapı kalıntılarının oluşturduğu boşluk olabilir.

KAYNAKLAR

Aldaş G. U., Kadioğlu S., Ulugergerli E. U., The Effects of Concealed Discontinuities in Blast Design Pattern, *4th Int. Scientific and Technical Conference of Young Scientists and Specialists*, St. Petersburg, Russia, 2004.

Aldaş G. U., Kadioğlu S., Ulugergerli E. U., The Usage of Ground Penetrating Radar (GPR) in Designing Blast Pattern, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, DOI:10.1007/s00603-005-0074-3.

Annan A. P., *Ground Penetrating Radar Workshop Notes*, Sensors and Software Nc, Canada, 2000.

Annan A. P., Waller W. M., Strangway D. W., Rossiter J. R., Redman J. D., Watts R.D., The Electromagnetic Response of a Low-Loss, 2- Layer, Dielectric Earth for Horizontal Electric Dipole Excitation, *Geophysics*, 1975, **40**(2), 285.

Balkaya Ç., Karşılıklı Kuyu Yer Radarı Verisinin İki Boyutlu Seyahat Zamanı Tomografisi, Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 2010, 283667.

Başokur A. T., Magnesia Ad Meandrum (Ortaklar) Argavlı Tümüüsünde Jeofizik Araştırmalar, *8. Arkeometri Sonuçları Toplantısı*, Ankara, 1992.

Başokur A. T., Definitions of Apparent Resistivity for the Presentation of Magneotelluric Sounding Data, *Geophysical Prospecting*, 1994, **42**(2), 141-150.

Başokur A.T., *Doğrusal ve Doğrusal Olmayan Problemlerin Ters Çözümleri*, TMMOB, Jeofizik Mühendisleri Odası Eğitim Yayınları 4, Ankara, 166, 2002.

Başokur A.T., Düşey Elektrik Sondaj Verilerinin Yorumu Ders Notları, Ankara Üniversitesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, 2004, Ankara

Bernard J., Orlando L., Vermeersch F., Electrical Resistivity İmaging for Environmental Applications, *16th International Geophysical Congress and Exhibition of Turkey*, Abstracts Book, 376-379, 07-10 Aralık 2004.

Bostan C., WJD-3 Çoklu Elektrot Sistemiyle Doğru Akım Özdirenç (DAÖ) Verilerinin Elde Edilmesi ve Bu Verilerin RES2DINV Ticari Bir Yazılımıyla 2 Boyutlu Modellenmesi, Bitirme Çalışması, Kocaeli Üniversitesi, Jeofizik Mühendisliği, 2012.

Bristow C. S., Ground Penetrating Radar in Sediments, Editors: Jol H.M., *Geological Society Special Publications*, 211, Geological Society of London, London, 191-198, 2003.

Brizzollari E., Bernabini M., Comparison Between Schlumberger Electrode Arrangement and Some Focused Electrode Arrangements in Resistivity Profiles. *Geophysical Prospecting*, 1979, **27**(1), 233-244.

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

Candansayar M. E., Doğru Akım Özdirenç Yönteminde Modelleme ve İki Boyutlu Sığ Yapıların Aranmasında Elektrot Dizilimlerinin Ayrımlılıklarının Karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1997, 58319.

Candansayar M.E., *Doğru Akım Özdirenç Yöntemi ile Yer Altı Suyu Aramaları*, Mühendislik Jeofiziği ve Uygulamaları Semineri Notları, Jeofizik Mühendisleri Odası, 52-114, 2005.

Candansayar M. E., Başokur A. T., Detecting Small-Scale Targets by the 2-D Inversion of Two-Sided Three-Electrode Data Application to an Archaeological Survey, *Geophysical Prospecting*, 2001, **49** (11), 13-25.

Carpenter E. W., Habberjam G.M., A Tri-Potential Method of Resistivity Prospecting, *Geophysics*, 1956, **21**(2), 455-469.

Carrara E., Carozzo, M.T., Fedi M., Florio G., Negri S., Paoletti V., Paolillo G., Quarta T., Rapolla A., Roberti N., Resistivity and Radar Surveys at The Archaeological Site of Ercolano. *J. Environ. Eng, Geophysics*, 2001, **6**(3), 123-132.

Cezar G. S., Rocha P. L. F., Baurque A., Costa A., Two Brezilian archeological sites investigated br GPR: Serrano and Morro Grande, *Journal of Applied Geophysics*, 2001, **47**(3-4), 227-240.

Conyers L.B., *Ground-Penetrating Radar for Archaeology*, Left Coast Press, Walnut Creek, California, 2004.

Conyers L. B., Goodman D., *Ground Penetrating Radar An Introduction for Archaeologists*, Altamirapres, California, 1997.

Corwin D. L., Lesch S. M, Application of Soil Electrical Conductivity to Precision Griculture, *Agronomy Journal*, 2003, **95**(3), 455-471.

Çataklı A., Sığ Yer Altının Görüntülenmesinde Yer Radarı Yöntemi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2003, 139105.

Dahlin T., 2D Resistivity Surveying for Environmental and Engineering Applications, *First Break*, 1996, **14**(7), 275-283.

Daniels D.J., 1996. *Surface-Penetrating Radar, IEE Radar, Sonar, Navigation and Avionics*, 6, Inst of Engineering&Technology, London, 1996.

Drahor M. G., Göktürkler G., Berge M. A., Kurtulmuş Ö. T., Dört farklı Elektrot Dizilimine Göre Bazı Üç Boyutlu Sığ Yer altı Yapılarının Görünür Öz direnç Modellemesi, *Yerbilimleri*, 2004, **25**(30), 115-128.

Drahor M. G., Integrated Geophysical Studies in the Upper Part of Sardis Archaeological Site, *Journal of Applied Geophysics*, 2006, **59**(3), 205-223.

De Franco R., Biella G., Tosi L., Teatini P., Lozej A., Chiozzotto B., Bassan V., Monitoring The Saltwater Intrusion by Time Lapse Electrical Resistivity Tomography: The Chioggia Test Site (Venice Lagoon, Italy), *Journal of Applied Geophysics*, 2009, **69**(3-4), 117-130.

De Robert X., Abraham O., GPR and Seismic Imaging in a Gypsum Quarry, *Journal of Applied Geophysics*, 2000, **45**(3), 157-169

Fıratlı N., *İzmit (Nicomedie)*, Türkiye Turing ve Otomobil Kurumu Yayını, İstanbul, 1964.

Grandjean G., Gourry J. C., GPR Data Processing for 3D Fracture Mapping in a Marble Quarry (Thassos, Greece), *Applied Geophys*, 1996, **36**(1), 19-30.

Green A., Gross R., Holliger K., Horstmeyer H., Baldwin J., Results of 3-D Georadar Surveying and Trenching the San Andreas Fault Near Its Northern Landward Limit, *Tectonophysics*, 2003, **368**(1), 7-23.

Griffin S. ve Pipet T., Ground Penetrating Radar. Geophysical and Remote Sensing Methods for Regolith Exploration, 2002, **144**, 80-89.

Griffiths D. H., Barker R. D., Twodimensional Resistivity İmaging and Modeling in Areas of Complex Geology, *Journal of Applied Geophysics*, 1993, **29**(3-4), 211-226.

Hammon III W., McMechan G. A., Zeng X., Forensic GPR: Finite Difference Simulations of Responses From Buried Human Remains, *Journal of Applied Geophysics*, 2000, **45**, 171-186.

Hubbard S. S., Rubin Y., Introduction to Hydrogeophysics, *Hydrogeophysics*, , 1nd ed, Springer Netherlands, Dordrecht, 3-21, 2005,

Huruska J., Fuchs G., GPR Prospection in Ancient Ephesos, *Journal of Applied Geophysics*, 1999, **41**(2-3), 293-312

Ismail A., Anderson N. L., Rogers J. D., Hydrogeophysical Investigation at Luxor, Southern Egypt, *Journal of Environmental & Engineering Geophysics*, 2005, **10**(1), 35-49.

Jol H. M., Ground Penetrating Radar Antennae Frequencies and Transmitter Power Compared for Penetration Depth, Resolution and Reflection Continuity, *Geophysical Prospecting*, 1995, **43**(5), 693-709.

Jol Harry M., *Ground Penetrating Radar Theory and Applications*, Elsevier, 2008.

Kadioğlu S., 3D Ground Penetrating Radar-Data Acquisition, Processing, and Interpretation, *14th International Petroleum Congress and Natural Gas Congress and Exhibition of Turkey*, Ankara-Türkiye, 12 Mayıs 2003.

Kadioğlu S., Daniels J., A Hybrid 2D/3D Ground Penetrating Radar (GPR) Survey of Brownfield Site Along Lake Street in Chicago, *Illinois (USA), Istanbul University Engineering Faculty ICESE*, 2002, **2**, 255-261.

Kadioğlu S., Daniels J., Integrated 3D Visualization of GPR Data and EM-61 Data, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2004, **68**(11), A468.

Kadioğlu S., Ulugergerli E. U., Determination of Cavities Using Ground Penetrating Radar in Dalaman-Akköprü Dam Construction Area, *The 16th International Geophysical Congress and Exhibition of Turkey*, MTA Cultural Center-Ankara, 7-10 December 2004.

Kaplanvural İ., Pekşen E., Erkul E., Wunderlich T., Yer Radarı Yöntemi ile Yapıların Boru Tesisatının İç ve Dış Malzemesinin Belirlenmesi, *Türkiye 20. Uluslararası Jeofizik Kongre ve Sergisi*, Antalya, Türkiye, 25-27 Kasım 2013.

Kaplanvural İ., Pekşen E., Erkul E., Yer Radarı Verilerinin İki Boyutta Sonlu Farklar Yöntemi İle Modellenmesi, *4. Yer Elektrik Çalıştayı*. İzmir, Türkiye, 21-23 Mayıs 2012.

Kaplanvural İ., Pekşen E., Özkap K., Volumetric Water Content Estimation of C-30 Concrete Using GPR, *Construction and Building Materials*, 2018, **166**, 141-146.

Kaya M. A., *Arkeoloji Jeofiziği, Meslek İçi Eğitim ve Belgelendirme Kurs Notları-2*. TMMOB Jeofizik Mühendisleri Odası, 107, Ankara, 2007.

Keçeli A., *Uygulamalı Jeofizik*, 9, JFMO Eğitim Yayınları, Ankara, 2009.

Kemna A., Vanderborght J., Kulesa B., Vereecken H., Imaging and Characterisation of Subsurface Solute Transport Using Electrical Resistivity Tomography (ERT) and Equivalent Transport Models, *Journal of Hydrology*, 2002, **267**(3-4), 125-146.

Kesemen O., Yer Radarı (GPR) Verilerinin İşlenmesinde Yeni Yaklaşımlar, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2007, 200018.

Knödel E., Krummel M., Lanke J., Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten/BGR Bd.3, Geophysik Springer-Verlag, Berlin- Heidelberg, 1997.

Köse M., Kurt B. B., Kadioğlu S. Yer Radarı Yöntemi ile Yapı Kolonu İncelemesi (Researching Structure Column with Ground Penetrating Radar Method) *Uluslararası 18. Jeofizik Kongresi*, Ankara, 14-17 Ekim 2010.

Loke M. H., RES2DINV Version 3.44 for Windows 95/98 and NT: Rapid 2D Resistivity and IP Inversion Using the Least Squares Method, Geotomo Software, Malaysia, 2003.

Loke M. H., Topographic Modelling in Electrical Imaging Inversion, *EAGE 62nd Conference and Technical Exhibition*, Glasgow, Scotland, 29 May-2 June 2000.

Loke M. H., *Tutorial: 2-D and 3-D Electrical Imaging Surveys*, Geotomo Software, Malaysia, 2019.

Loke M. H., Barker R. D., Rapid Least-Squares Inversion of Apparent Resistivity Pseudosection Using a Quasi-Newton Method, *Geophysical Prospecting*, 1996, **44**(1), 131-152.

Neal A., Ground-Penetrating Radar and its Use in Sedimentology: Principles, Problems and Progress, *Earth Science*, 2004, **66**(3-4), 261-330.

Neelambari S., Ground Penetrating Radar Technique to Locate Coal Mining Related Features: Case Studies in Texas, A & M University, Texas, 2004.

Negri S., Leucci G., Geophysical Investigation of The Temple of Apollo (Hierapolis, Turkey), *Journal of Archaeological Science*, 2006, **33**(11), 1505-1513.

Noel M., Xu B., Archaeological Investigation by Electrical Resistivity Tomography: a Preliminary Study, *Geophysical Journal International*, 1991, **107**(1), 95-102.

Orlando L., Piro S., Versino V., Location of Sub-Surface Geoelectric Anomalies for Archaeological Work; A Comparison Between Experimental Arrays and Interpretation Using Numerical Methods, *Geoexploration*, 1987, **24**, 227-237.

Osella A., Vega M., Lascano E., 3D Electrical Imaging of an Archaeological Site Using Electrical and Electromagnetic Methods, *Geophysics*, 2005, **70**, 101-107.

Özdemir A., Çok-Elektrotlu Jeofizik Rezistivite Ölçümlerinin Yer Altısu ve Jeotermal Arama Alanlarındaki Uygulamalarının Değerlendirilmesi, *Sondaj ve Uygulamalı Yerbilimleri Dergisi*, 2008, **7**, 11-21.

Öztürk C., Kelenderis Antik Kentindeki Arkeolojik Yapıların Özdirenç Yöntemiyle Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 2004,184309

Erkul E., Wunderlich T., Stümpel H., Rabbel W., Pasteka R., Barış Ş., Pekşen E., Discovering A Byzantine Cross-In-Square Church in İznik Using Geophysics, *9th International Conference on Archaeological Prospection*, İzmir, Turkey, 19-24 Eylül 2011.

Reynolds J. M., *An Introduction To Applied And Environmental Geophysics*, 2nd ed., Wiley-Blackwell, West Sussex, 2011.

Saka Ö., Önal K. M., Gündoğdu N. Y., Dönmez Ş., Kadioğlu S., Ulugergerli E. U., Akalan Kalesinde (Samsun) Yapılan Jeofizik Ön Çalışmaları ve Radar Ölçüm Örneği, *S.D.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 2002, **6**(1), 1-5.

Santarato G., Ranieri G., Occhi M., Morelli G., Fischanger F., Gualerzi D., Three-Dimensional Electrical Resistivity Tomography to Control The Injection of

Expanding Resins For The Treatment and Stabilization of Foundation Soils, *Engineering Geology*, 2011, **119**(1-2), 18-30.

Schlutz R., Interpretation and Depth of Investigation of Gradient Measurements in Direct Current Geoelectrics, *Geophysical Prospecting*, 1985, **33**, 1240-1253.

Singh K. K. K., Singh K. B., Lokhande R. D., Prakash A., Multielectrode Resistivity Imaging Technique For The Study of Coal Seam, *Journal of Scientific & Industrial Research*, 2004, **63**, 927-930.

Stern W., Versuch Einer Electrodynamischer Dickenmessung Von Gletschereis, *Ger. Beitrzur Geophysic*, 1929, **23**, 292-333.

Stern W., Grundlagen U., Methodik Und Bisherige Ergebnisse Elektrodynamischer Dickenmessung Von Gletschereis, *Z. Gletscherkunde*, 1930, **15**, 24-42.

Takahaski, T., Suggested Methods for Land Geophysics in Rock Engineering, *Rock Mechanics and Mining Science*, 2004, **41**(6), 885-914.

Ulriksen C. P. F., Application of Impulse Radar to Civil Engineering, Ph. D. Thesis, University Technology, Lund, Sweden, 1982.

Ulugergerli E. U., Kadioğlu S., Detecting Cavities and Archeological Remains With GPR, *9th International Congress of Brazilian Geophysical Society*, Salvador, Brazil, 11-14 September 2005.

Van Overmeeren R. A., Ritsera I. L., Continuous Vertical Electrical Sounding, *First Break*, DOI: 10.3997/1365-2397.1988017

Weeds R. D., *Geophysical Characterization of Sites*, Balkema A. A., Rotterdam, 1994.

Weymouth J. W., Geophysical Methods of Archaeological Site Surveying, Editor: Schiffer M. B., *Advances in Archaeological Method and Theory*, 9, Academic Press, New York, 311-395, 1986.

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

Yaltırak M., Öz R., Kaplanvural İ., Pekşen E., Gömülü Yapıların Yer Radarı Ve Doğru Akım Öz direnç Yöntemi İle Araştırılması: İzmit Örneği, *4. Uluslararası Erciyes Bilimsel Araştırmalar Kongresi*, 16-17 Ekim 2020 Kayseri, Türkiye



ÖZGEÇMİŞ

İlköğrenimini Cumhuriyet İlköğretim Okulu'nda, orta öğrenimini Uluborlu Lisesi, lise öğrenimini Senirkent Sağlık Meslek Lisesi'nde tamamladı. 1997 yılında girdiği Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Jeofizik Mühendisliği Bölümü'nden 2001 yılında mezun oldu. 2002-2009 yılları arasında Sağlık Bakanlığına bağlı taşra teşkilatlarında sağlık memuru olarak görev aldı. 2009 yılından bu yana Kocaeli Büyükşehir Belediyesi İmar ve Şehircilik Dairesi Başkanlığında Jeofizik Mühendisi olarak çalışmaktadır.

