

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KENTSEL PEYZAJ ÇALIŞMALARINDA GPR
YÖNTEMİ UYGULAMALARI

Merve AKTAŞ

Ağustos, 2023

İZMİR

KENTSEL PEYZAJ ÇALIŞMALARINDA GPR YÖNTEMİ UYGULAMALARI

Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Yüksek Lisans Tezi

Jeofizik Mühendisliği, Anabilim Dalı Jeofizik Mühendisliği Programı

Merve AKTAŞ

Ağustos, 2023

İZMİR

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

MERVE AKTAŞ tarafından **PROF.DR. COŞKUN SARI** yönetiminde hazırlanan “**KENTSEL PEYZAJ ÇALIŞMALARINDA GPR YÖNTEMİ UYGULAMALARI**” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

.....
Prof. Dr. Coşkun SARI

Yönetici

.....
Prof. Dr. Emin Uğur ULUGERGERLİ

Jüri Üyesi

.....
Doç Dr. Emre TİMUR

Jüri Üyesi

.....
Prof. Dr. Okan FISTIKOĞLU

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Bu çalışmayı bana öneren ve yöneten, çalışma süresince destek ve yardımlarını esirgemeyen hocam Sn. Prof. Dr. Coşkun SARI 'ya teşekkürlerimi sunarım. Ek olarak, projem süresince hem veri toplamam için sponsor olan hem de maddi manevi desteğini esirgemeyen SUMET Yerbilimleri 'nin Genel Müdür'ü Erhan İçöz'e ve çalışanları Ecevit Gökçe Yurtkal, Emre Perinçek ve Semiha Nur Acar'a, veri değerlendirme aşamasında bana yardımcı olan ve ücretli yazılımlarını kullanma fırsatı sunan MKA Geophysic firmasının ortağı Melikhan Karakaş'a ve çalışanı Semih Seçgül'e, ayrıca arazi çalışmalarımda bana yardımcı olan arkadaşım Ege Erdoğan'a ve tez yazma sürecimde benden manevi desteğini esirgemeyen Oğuz Korman'a teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca tüm yaşantım ve öğrenim hayatım boyunca benden maddi, manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen aileme minnettarım. Ek olarak duygusal desteklerini esirgemeyerek tezi bitirmemde katkıları olan arkadaşlarıma da teşekkürler.

Merve AKTAŞ

KENTSEL PEYZAJ ÇALIŞMALARINDA GPR YÖNTEMİ UYGULAMALARI

ÖZ

Sokak ağaçları, kent yaşamının vazgeçilmez bir unsurudur. Toplumun sosyal, ekonomik ve çevresel gelişimine katkıda bulunurlar ve kent estetiği altyapı varlığının ayrılmaz bir peyzaj, kültürel ve işlevsel unsurunu oluştururlar. Bununla birlikte, artan kentleşme ve yol altyapılarının sürdürülebilir yönetimi için kaynak ve yöntem eksikliği kontrolsüz bir kök büyümesine yol açmaktadır. Bu durum, kaldırım yüzeylerinin ve bordürlerin çatlaması ve yükselmesi gibi önemli ve ilerleyen kaplama hasarına neden olarak motorlu araç sürücüleri, bisikletliler ve yayalar için potansiyel tehlikeler yaratabilmektedir.

Ağaç kök sistemlerinin yıkıcı olmayan (tahribatsız) ve ekonomik yöntemlerle çevrelerini tehlikeye atmadan değerlendirilmesi bitki kaynaklarının korunması açısından büyük önem taşımaktadır. Kök ve orman ekolojisi çalışmalarına uygulanan Yere Nüfuz Eden Radar (GPR) yöntemi, kök biokütlesini ve mekânsal dağılımını belirlemek için elektromanyetik dalgaların kullanımına dayalı, önemli bir araştırma tekniğidir.

Son yıllarda GPR, ağaç gövdelerinin iç yapısının incelenmesi, su içeriği tahmini, kök stresi değerlendirmesi, kök biokütle modellemesi ve kök lokasyonu uygulamaları sayesinde orman mühendisliği araştırmalarında da popülerlik kazanmıştır. Bu çalışmada, yüzeye yakın ağaç köklerinin haritalanması için yere nüfuz eden radarın (GPR) uygulamalarına ve saha çalışmasına ilişkin bilgiler sunulmaktadır. Çalışma kapsamında 182 profilde veri toplanmış, 2B-3B görüntülenerek ağaç köklerinin konumları saptanmıştır.

Anahtar kelimeler: Ağaçlar, Tahribatsız Ağaç Kökleri Tespiti, Yere Nüfuz Eden Radar (GPR), Kaldırım Hasarı, Yol Güvenliği

GPR METHOD APPLICATION IN URBAN LANDSCAPE STUDIES

ABSTRACT

Street trees are an indispensable element of city life. They contribute to the social, economic and environmental development of the society and form an integral landscape, cultural and functional element of the urban aesthetic infrastructure existence. However, increasing urbanization and lack of resources and methods for sustainable management of road infrastructures lead to uncontrolled root growth. This can cause significant and progressive pavement damage, such as cracking and elevation of pavement surfaces and curbs, creating potential hazards for motor vehicle drivers, cyclists and pedestrians.

The evaluation of tree root systems with non-destructive and economical methods without endangering their environment is of great importance in terms of protecting plant resources. Ground Penetrating Radar (GPR) method applied to root and forest ecology studies is an important research technique based on the use of electromagnetic waves to determine root biomass and spatial distribution.

In recent years, GPR has also gained popularity in forest engineering research, thanks to its applications in the study of the internal structure of tree trunks, water content estimation, root stress assessment, root biomass modeling, and root location. This paper provides information on applications and fieldwork of ground penetrating radar (GPR) for mapping near-surface tree roots. Within the scope of the study, data were collected in 182 profiles, and the locations of tree roots were determined by viewing 2D-3D.

Keywords: Trees, Non-Destructive Tree Roots Detection, Ground Penetrating Radar (GPR), Pavement Damage, Road Safety

İÇİNDEKİLER

Sayfa

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZ	iv
ABSTRACT.....	v
İÇİNDEKİLER	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ	viii

BÖLÜM BİR - GİRİŞ.....	1
-------------------------------	----------

BÖLÜM İKİ - YER RADARI (GPR) YÖNTEMİ.....	5
--	----------

2.1 Yer Radarı (GPR) Yönteminin Tarihçesi.....	5
2.2 Yer Radarı Yöntemi ve Yöntemin Çalışma İlkesi.....	7
2.3 Yer Radarı Yönteminin Kullanıldığı Alanlar.....	10
2.3.1 Yer Radarı Yönteminin Jeolojik Amaçlı Araştırmalarda Kullanılması	10
2.3.2 Yer Radarı Yönteminin Çevre Araştırmalarında Kullanılması.....	11
2.3.3 Yer Radarı Yönteminin Mühendislik Amaçlı Araştırmalarda Kullanılması.....	11
2.3.4 Yer Radarı Yönteminin Arkeolojik Amaçlı Araştırmalarda Kullanılması	12
2.3.5 Yer Radarı Yönteminin Diğer Kullanım Alanları.....	12
2.4 Yer Radarı Yönteminin Avantaj ve Dezavantajları	12
2.4.1 Yer Radarı Yönteminin Avantajları	13
2.4.2 Yer Radarı Yönteminin Dezavantajları.....	13
2.5 Yer Radarı Yönteminin Kuramı	14
2.5.1 Maxwell Denklemleri.....	14
2.5.2 Elektromanyetik Dalganın Yansıması ve İletilmesi.....	18
2.5.3 Elektromanyetik Dalganın Yer Altında İlerlemesini Sağlayan Dielektrik Maddenin Fiziksel Özellikleri	22

2.5.4 Yatay ve Düşey Ayrımlılık	24
2.6 Yer Radarı Yönteminde Veri Toplama	26
2.6.1 Veri Toplama Ekipmanları	26
2.6.2 Veri Toplama Seçenekleri	28
2.7 Yer Radarı Yönteminde Veri İşleme	33
2.7.1 Yer Radarı Yönteminde İki Boyutlu Veri işleme Adımları	33
2.7.2 Yer Radarı Yönteminde Üç Boyutlu Veri işleme Adımları	40
BÖLÜM ÜÇ - LİTERATÜR ÖZETİ	48
BÖLÜM DÖRT - SAHA ÇALIŞMALARI	59
4.1 Çalışmanın Amacı	59
4.2 Çalışmanın Alanının Yeri	64
4.3 Yer Radarı Yönteminin Çalışma Sahasında Uygulanması	66
4.3.1 Refüj A Toplanan Ham Veriler	68
4.3.2 Refüj B Toplanan Ham Veriler	80
4.4 Yer Radarı Verilerinin 2B Değerlendirilmesi	93
4.4.1 Refüj A Verilerinin Prism Yazılımında 2B Değerlendirilmesi ve Hız Analizi	93
4.4.2 Refüj B Verilerinin Prism Yazılımında 2B Değerlendirilmesi ve Hız Analizi	106
4.5 Yer Radarı Verilerinin 3B Değerlendirilmesi	119
BÖLÜM BEŞ - SONUÇ VE ÖNERİLER	138
KAYNAKLAR	140

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 Potansiyel yol güvenliği açısından kritik unsurlarla birlikte ağaç kök sisteminin 3 boyutlu görünümü (Tosti ve diğ., 2018)	2
Şekil 1.2 Çınar Ağacı Kök Gelişiminin Kaldırım Döşemesinde Neden Olduğu Deformasyon.....	3
Şekil 1.3 Yanal şeridin kenarında ve eşikte ağaç köklerinin yükselmesi nedeniyle asfalt hasarına bir örnek (Tosti ve diğ., 2018).....	3
Şekil 2.1 GPR Yönteminin Çalışma İlkesi (Kurt, 2009)	8
Şekil 2.2 Zamanla oluşan elektrik alan manyetik alan döngüsü (Annan, 2009).....	15
Şekil 2.3 Radar dalgasının yer içerisindeki davranışı (Keçeli, 2009).....	20
Şekil 2.4'a) TE modu, b) TM modu (Kara, 2020).....	21
Şekil 2.5 Yüksek, orta ve düşük frekans ile düşey ayrırlılık ilişkisi (Kadıoğlu, 2006)	24
Şekil 2.6 Fresnel bölge ve yatay ayrırlılık ilişkisi (Özkap, 2008; Geoscience, 2003).	25
Şekil 2.7 Kapalı anten GPR ölçüm aleti (Anten, bilgisayar ve aküden oluşmaktadır.) (GSSI,2021)	26
Şekil 2.8 Yer radarı ölçü düzeni (a) Radar sistemi parçaları, (b) İncelenen bölüm, (c) Radargram görüntüsü (Butler vd., 1991; Daniels vd., 1988).....	27
Şekil 2.9 Sabit aralıklı anten ile uygulanan yer radarı (GPR) ölçümü, (a) Sabit anten aralığının şematik gösterimi, (b) Sabit anten aralığı ile alınmış örnek bir yer radarı (GPR) profili (Anaran ve Şengül, 2020).....	28
Şekil 2.10 Tx ve Rx anten dizilimleri; (a) antenlerin birbirine ve hatta paralel olduğu XX durumu, (b) antenler yan yana ve hatta paralel olduğu durum, (c) antenlerin birbirine paralel olup hatta dik olduğu YY durumu, (d) antenlerin hatta dik olduğu durum, (e) verici antenin hatta paralel, alıcı antenin ise hatta dik olduğu durum (Alemdağ, 2019; Reppert vd.,2000).....	29

Şekil 2.11 WARR tekniği şematik gösterimi (Annan ve Davis, 1977).....	30
Şekil 2.12 Ortak orta nokta metodu ile uygulanan yer radarı (GPR) ölçümü, (a) Ortak orta nokta metodunun şematik gösterimi, (b) Ortak orta nokta ile alınmış örnek bir yer radarı (GPR) profili (Anaran ve Şengül, 2020; De Menezes Travassos ve Menezes, 2004).....	30
Şekil 2.13 Kuyu yer radarı yöntemleri. (a) Bir madende galeriler içerisinde, (b) kuyular veya kuyu-yüzey arasında, (c) Bir beton sütun içerisinde (Annan ve Davis, 1977).....	31
Şekil 2.14 Ham radargram.....	33
Şekil 2.15 Başlangıç zamanı düzeltmesi uygulanmış veri.....	33
Şekil 2.16 Dewow filtresi uygulanmış veri.....	34
Şekil 2.17 AGC genlik kazanımı filtresi uygulanmış veri.....	35
Şekil 2.18 Arka Planı Giderme (Background Removal) Süzgeci için pencere büyüklüğü.....	36
Şekil 2.19 Arka Planı Giderme (Background Removal) Süzgeci uygulanmış ve yüzey gürültülerinden arınmış veri.....	36
Şekil 2.20 a) Seçilen band geçişli süzgeç aralığı. b) Band geçişli süzgeç uygulanmış ve kazanç işlevi uygulanmış veri. c) Uygulanan kazanç işlevi.....	37
Şekil 2.21 a) Seçilen hız değeri. b) Göç süzgeci uygulanmış veri.....	38
Şekil 2.22 a) Çakıştırılan yansıma hiperbolü. b) Radar analizi sonucu elde edilen zaman, derinlik, hız ve geçirgenlik bilgisi.....	38
Şekil 2.23 İşlenecek olan veri setine ait parametrelerin sisteme tanıtılması.....	39
Şekil 2.24 a) Oluşturulan yeni proje. b) Seçilen proje adı ve cihaz bilgileri. c) Seçilen verinin formatı ve proje içerisindeki veriler.....	40
Şekil 2.25 a) Oluşturulan projenin profil seçimi. b) Y profilinde alınan ölçülerin zaman ve kayıt uzunluğunun girilmesi.....	41

Şekil 2.26 a) Uygulanan Kazanç Süzgeci (AGC).....	42
Şekil 2.27 Uygulanan arka planı giderme, bant geçirme ve veri sıkıştırıp pencere sayısını belirleme süzgeci ile akım düzeltmesi ve göç işlemi.....	43
Şekil 2.28 Seçilen veri klasörü, girilen seviye sayısı ile örnekleme aralığı ve oluşturulan seviyeler.....	43
Şekil 2.29 Cihaz ve hava boşluğundan kaynaklı oluşan gürültünün veriden atılması..	44
Şekil 2.30 %50 bindirme sonucu oluşan seviyeler.....	45
Şekil 2.31 Seviye haritası oluşturmak için girilen grid bilgileri.....	45
Şekil 2.32 a) Yapılan çizim ayarları. b) Çizilen seviye haritaları.....	46
Şekil 2.33 Katı model, seviye haritası ve radargram içeren 3D Yer Radarı modellemesi.....	47
Şekil 4.1 Ağaç köklerinin kaldırımında yarattığı tahribata bir örnek.....	62
Şekil 4.2 Yüzeylenmiş köklerin orta refüjdeki görüntüsüne bir örnek.....	62
Şekil 4.3 Ağaç köklerinin asfaltta yarattığı tahribat sonucu asfaltın yenilenme çalışması.....	63
Şekil 4.4 Çalışma alanı yer bulduru haritası.....	64
Şekil 4.5 Refüj A'ya ait kroki.....	65
Şekil 4.6 Refüj B'ye ait kroki.....	65
Şekil 4.7 Refüj A için oluşturulan profiller.....	66
Şekil 4.8 Refüj B için oluşturulan profiller.....	67
Şekil 4.9 Refüj A Bölüm 1 Y profiline ait ham radargramlar ve ölçü krokisi.....	68
Şekil 4.10 Refüj A Bölüm 1 Y doğrultusuna ait görüntü.....	69
Şekil 4.11 Refüj A Bölüm 1 X profiline ait ham radargramlar ve ölçü krokisi.....	69
Şekil 4.12 Refüj A Bölüm 1 X doğrultusuna ait görüntü.....	70

Şekil 4.13 Refüj A Bölüm 2 Y profiline ait ham radargramlar ve ölçü krokisi.....	70
Şekil 4.14 Refüj A Bölüm 2 Y doğrultusuna ait görüntü.....	71
Şekil 4.15 Refüj A Bölüm 2 X profiline ait ham radargramlar ve ölçü krokisi.....	71
Şekil 4.16 Refüj A Bölüm 2 X doğrultusuna ait görüntü.....	72
Şekil 4.17 Refüj A Bölüm 3 Y profiline ait ham radargramlar ve ölçü krokisi.....	72
Şekil 4.18 Refüj A Bölüm 3 Y doğrultusuna ait görüntü.....	73
Şekil 4.19 Refüj A Bölüm 3 X profiline ait ham radargramlar ve ölçü krokisi.....	73
Şekil 4.20 Refüj A Bölüm 3 X doğrultusuna ait görüntü.....	74
Şekil 4.21 Refüj A Bölüm 4 Y profiline ait ham radargramlar ve ölçü krokisi.....	74
Şekil 4.22 Refüj A Bölüm 4 Y doğrultusuna ait görüntü.....	75
Şekil 4.23 Refüj A Bölüm 4 X profiline ait ham radargramlar ve ölçü krokisi.....	75
Şekil 4.24 Refüj A Bölüm 4 X doğrultusuna ait görüntü.....	76
Şekil 4.25 Refüj A Bölüm 5 Y profiline ait ham radargramlar ve ölçü krokisi.....	76
Şekil 4.26 Refüj A Bölüm 5 Y doğrultusuna ait görüntü.....	77
Şekil 4.27 Refüj A Bölüm 5 X profiline ait ham radargramlar ve ölçü krokisi.....	77
Şekil 4.28 Refüj A Bölüm 5 X doğrultusuna ait görüntü.....	78
Şekil 4.29 Refüj A Bölüm 6 Y profiline ait ham radargramlar ve ölçü krokisi.....	78
Şekil 4.30 Refüj A Bölüm 6 Y doğrultusuna ait görüntü.....	79
Şekil 4.31 Refüj A Bölüm 6 X profiline ait ham radargramlar ve ölçü krokisi.....	79
Şekil 4.32 Refüj A Bölüm 6 X doğrultusuna ait görüntü.....	80
Şekil 4.33 Refüj B Bölüm 1 Y profiline ait ham radargramlar ve ölçü krokisi.....	81
Şekil 4.34 Refüj B Bölüm 1 Y doğrultusuna ait görüntü.....	81

Şekil 4.35 Refüj B Bölüm 1 X profiline ait ham radargramlar ve ölçü krokisi.....	82
Şekil 4.36 Refüj B Bölüm 1 X doğrultusuna ait görüntü.....	82
Şekil 4.37 Refüj B Bölüm 2 Y profiline ait ham radargramlar ve ölçü krokisi.....	83
Şekil 4.38 Refüj B Bölüm 2 Y doğrultusuna ait görüntü.....	83
Şekil 4.39 Refüj B Bölüm 2 X profiline ait ham radargramlar ve ölçü krokisi.....	84
Şekil 4.40 Refüj B Bölüm 2 X doğrultusuna ait görüntü.....	84
Şekil 4.41 Refüj B Bölüm 3 Y profiline ait ham radargramlar ve ölçü krokisi.....	85
Şekil 4.42 Refüj B Bölüm 3 Y doğrultusuna ait görüntü.....	85
Şekil 4.43 Refüj B Bölüm 3 X profiline ait ham radargramlar ve ölçü krokisi.....	86
Şekil 4.44 Refüj B Bölüm 3 X doğrultusuna ait görüntü.....	86
Şekil 4.45 Refüj B Bölüm 4 Y profiline ait ham radargramlar ve ölçü krokisi.....	87
Şekil 4.46 Refüj B Bölüm 4 Y doğrultusuna ait görüntü.....	87
Şekil 4.47 Refüj B Bölüm 4 X profiline ait ham radargramlar ve ölçü krokisi.....	88
Şekil 4.48 Refüj B Bölüm 4 X doğrultusuna ait görüntü.....	88
Şekil 4.49 Refüj B Bölüm 5 Y profiline ait ham radargramlar ve ölçü krokisi.....	89
Şekil 4.50 Refüj B Bölüm 5 Y doğrultusuna ait görüntü.....	89
Şekil 4.51 Refüj B Bölüm 5 X profiline ait ham radargramlar ve ölçü krokisi.....	90
Şekil 4.52 Refüj B Bölüm 5 X doğrultusuna ait görüntü.....	90
Şekil 4.53 Refüj B Bölüm 6 Y profiline ait ham radargramlar ve ölçü krokisi.....	91
Şekil 4.54 Refüj B Bölüm 6 Y doğrultusuna ait görüntü.....	91
Şekil 4.55 Refüj B Bölüm 6 X profiline ait ham radargramlar ve ölçü krokisi.....	92
Şekil 4.56 Refüj B Bölüm 6 X doğrultusuna ait görüntü.....	92

Şekil 4.57 A) X60 profiline ait ham radargram, B) Başlangıç zamanı düzeltmesi uygulanmış radargram, C) Akım Düzeltmesi uygulanmış radargram, D) Kazanç Süzgeci uygulanmış radargram, E) Arka Planı Giderme Süzgeci uygulanmış radargram ve F) Band geçişli süzgeç uygulanmış radargram.....	94
Şekil 4.58 A) Y4 profiline ait ham radargram, B) Başlangıç zamanı düzeltmesi uygulanmış radargram, C) Akım Düzeltmesi uygulanmış radargram, D) Kazanç Süzgeci uygulanmış radargram, E) Arka Planı Giderme Süzgeci uygulanmış radargram ve F) Band geçişli süzgeç uygulanmış radargram.....	95
Şekil 4.59 G) Kazanç (Gain) uygulanmış radargram, H) Göç işlemi uygulanmış radargram, I) Hız analizi sonucu değerlendirilen parametreler ve J) Kök olan yansımanın genlik spektrumu.....	96
Şekil 4.60 G) Kazanç (Gain) uygulanmış radargram, H) Göç işlemi uygulanmış radargram, I) Gözlemlenen ilk köke ait hız analizi sonucu değerlendirilen parametreler, J) Gözlemlenen ikinci köke ait hız analizi sonucu değerlendirilen parametreler, K) Gözlemlenen ilk kökün genlik spektrumu ve L) Gözlemlenen ikinci kökün genlik spektrumu.....	97
Şekil 4.61 X profiline ait değerlendirilmiş radargramlar 1. kısım.....	98
Şekil 4.62 X profiline ait değerlendirilmiş radargramlar 2. kısım.....	99
Şekil 4.63 Y profiline ait değerlendirilmiş radargramlar.....	100
Şekil 4.64 A) Bölüm 1'e ait Y1 profilinde yansıyan kök görüntüsü ve B) Bölüm 1'e ait X11 profilinde yansıyan kök görüntüsü (Şekillerde gözlemlenen fuşya renk kökleri temsil etmektedir.).....	101
Şekil 4.65 A) Bölüm 2'ye ait Y4 profilinde yansıyan kök görüntüsü ve B) Bölüm 2'ye ait X17 profilinde yansıyan kök görüntüsü (Şekillerde gözlemlenen fuşya renk kökleri temsil etmektedir.).....	102

Şekil 4.66 A) Bölüm 3'e ait Y17 profilinde yansıyan kök görüntüsü ve B) Bölüm 3'e ait X29 profilinde yansıyan kök görüntüsü (Şekillerde gözlemlenen fuşya renk kökleri temsil etmektedir.).....	103
Şekil 4.67 A) Bölüm 4'e ait Y19 profilinde yansıyan kök görüntüsü ve B) Bölüm 4'e ait X42 profilinde yansıyan kök görüntüsü (Şekillerde gözlemlenen fuşya renk kökleri temsil etmektedir.).....	104
Şekil 4.68 A) Bölüm 5'e ait Y21 profilinde yansıyan kök görüntüsü ve B) Bölüm 5'e ait X56 profilinde yansıyan kök görüntüsü (Şekillerde gözlemlenen fuşya renk kökleri temsil etmektedir.)	105
Şekil 4.69 A) Bölüm 6'ya ait Y24 profilinde yansıyan kök görüntüsü ve B) Bölüm 6'ya ait X65 profilinde yansıyan kök görüntüsü (Şekillerde gözlemlenen fuşya renk kökleri temsil etmektedir.).....	106
Şekil 4.70 A) X58 profiline ait ham radargram, B) Başlangıç zamanı düzeltmesi uygulanmış radargram, C) Akım Düzeltmesi uygulanmış radargram, D) Kazanç Süzgeci uygulanmış radargram, E) Arka Planı Giderme Süzgeci uygulanmış radargram ve F) Band geçişli süzgeç uygulanmış radargram.....	107
Şekil 4.71 A) Y5 profiline ait ham radargram, B) Başlangıç zamanı düzeltmesi uygulanmış radargram, C) Akım Düzeltmesi uygulanmış radargram, D) Kazanç Süzgeci uygulanmış radargram, E) Arka Planı Giderme Süzgeci uygulanmış radargram ve F) Band geçişli süzgeç uygulanmış radargram.....	108
Şekil 4.72 G) Kazanç (Gain) uygulanmış radargram, H) Göç işlemi uygulanmış radargram, I) Hız analizi sonucu değerlendirilen parametreler ve J) Kök olan yansımanın genlik spektrumu.....	109
Şekil 4.73 G) Kazanç (Gain) uygulanmış radargram, H) Göç işlemi uygulanmış radargram, I) Gözlemlenen ilk köke ait hız analizi sonucu değerlendirilen parametreler, J) Gözlemlenen ikinci köke ait hız analizi sonucu değerlendirilen parametreler, K) Gözlemlenen ilk kökün genlik spektrumu ve L) Gözlemlenen ikinci kökün genlik spektrumu.....	110

Şekil 4.74 X profiline ait değerlendirilmiş radargramlar 1. kısım.....	111
Şekil 4.75 X profiline ait değerlendirilmiş radargramlar 2. kısım.....	112
Şekil 4.76 Y profiline ait değerlendirilmiş radargramlar.....	113
Şekil 4.77 A) Bölüm 1'e ait Y1 profilinde yansıyan kök görüntüsü ve B) Bölüm 1'e ait X3 profilinde yansıyan kök görüntüsü (Şekillerde gözlemlenen fuşya renk kökleri temsil etmektedir).....	114
Şekil 4.78 A) Bölüm 2'ye ait Y3 profilinde yansıyan kök görüntüsü ve B) Bölüm 2'ye ait X11 profilinde yansıyan kök görüntüsü (Şekillerde gözlemlenen fuşya renk kökleri temsil etmektedir).....	115
Şekil 4.79 A) Bölüm 3'e ait Y5 profilinde yansıyan kök görüntüsü ve B) Bölüm 3'e ait X30 profilinde yansıyan kök görüntüsü (Şekillerde gözlemlenen fuşya renk kökleri temsil etmektedir).....	116
Şekil 4.80 A) Bölüm 4'e ait Y7 profilinde yansıyan kök görüntüsü ve B) Bölüm 4'e ait X40 profilinde yansıyan kök görüntüsü (Şekillerde gözlemlenen fuşya renk kökleri temsil etmektedir).....	117
Şekil 4.81 A) Bölüm 5'e ait Y9 profilinde yansıyan kök görüntüsü ve B) Bölüm 5'e ait X67 profilinde yansıyan kök görüntüsü (Şekillerde gözlemlenen fuşya renk kökleri temsil etmektedir).....	118
Şekil 4.82 A) Bölüm 6'ya ait Y11 profilinde yansıyan kök görüntüsü ve B) Bölüm 6'ya ait X65 profilinde yansıyan kök görüntüsü (Şekillerde gözlemlenen fuşya renk kökleri temsil etmektedir).....	119
Şekil 4.83 Refüj A Bölüm 1'e ait oluşturulan seviye haritaları.....	121
Şekil 4.84 Refüj A Bölüm 2'ye ait oluşturulan seviye haritaları.....	122
Şekil 4.85 Refüj A Bölüm 3'e ait oluşturulan seviye haritaları.....	123
Şekil 4.86 Refüj A Bölüm 4'e ait oluşturulan seviye haritaları.....	124
Şekil 4.87 Refüj A Bölüm 5'e ait oluşturulan seviye haritaları.....	125

Şekil 4.88 Refüj A Bölüm 6'ya ait oluşturulan seviye haritaları.....	126
Şekil 4.89 Refüj B Bölüm 1'e ait oluşturulan seviye haritaları.....	127
Şekil 4.90 Refüj B Bölüm 2'ye ait oluşturulan seviye haritaları.....	128
Şekil 4.91 Refüj B Bölüm 3'e ait oluşturulan seviye haritaları.....	129
Şekil 4.92 Refüj B Bölüm 4'e ait oluşturulan seviye haritaları.....	130
Şekil 4.93 Refüj B Bölüm 5'e ait oluşturulan seviye haritaları.....	131
Şekil 4.94 Refüj B Bölüm 6'ya ait oluşturulan seviye haritaları.....	132
Şekil 4.95 Refüj A'ya ait oluşturulan seviye haritaları.....	133
Şekil 4.96 Refüj B'ye ait oluşturulan seviye haritaları.....	134
Şekil 4.97 Refüj A ve Refüj B'ye ait toplu GPRSlice ile oluşturulan 3B modeli (Kahverengi renkler kökleri temsil etmektedir.).....	135
Şekil 4.98 Refüj A'ya ait 6 bölümün GPRSlice ile oluşturulan 3B modeli (Kahverengi renkler kökleri temsil etmektedir.).....	136
Şekil 4.99 Refüj B'ye ait 6 bölümün GPRSlice ile oluşturulan 3B modeli (Kahverengi renkler kökleri temsil etmektedir.).....	137

TABLÖLAR LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1 Bazı jeolojik malzemelere ait dielektrik, elektrik iletkenlik, hız değerleri (Annan, 2000; Kurt 2009).....	9
Tablo 2.2 Frekansa bağlı nüfuz derinliği (Keçeli, 2009).....	21

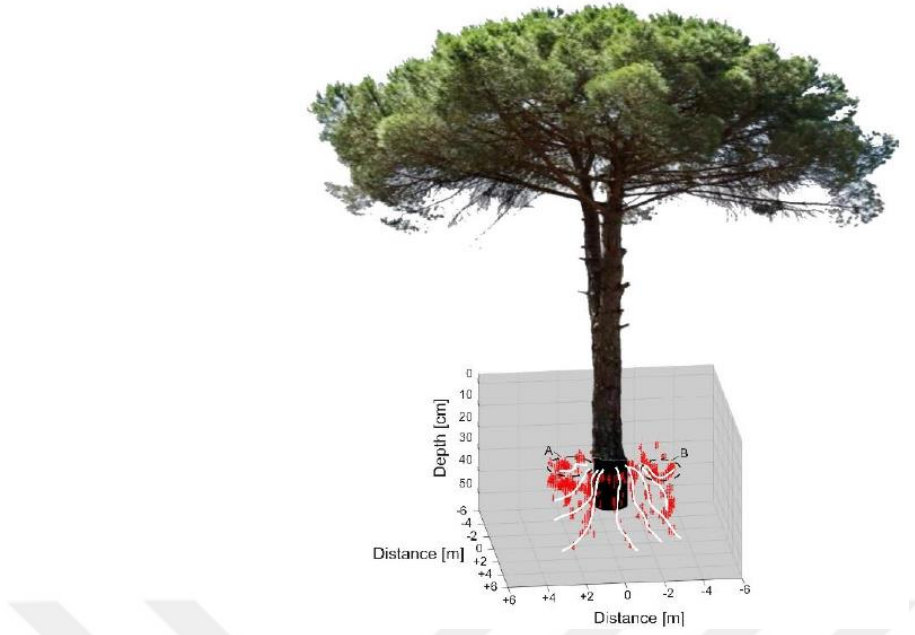


BÖLÜM BİR

GİRİŞ

Yer altı yapısını, matematik ve fizik kuralları çerçevesinde kontrollü deneylerle ve nesnel gözlemlerle inceleyen Jeofizik bilimi, yaşamın her alanında uygulama bulmaktadır ve çözümler sunabilmektedir. Jeofizik biliminin tarihine ve dünyadaki gelişimine bakıldığında, geçmişteki öncelikli amacının deprem, kabuk araştırmaları, maden ve jeotermal araştırmalar olduğu görülmektedir. 1900’lü yıllardan sonra ise Jeofizik bilimi ekonomi, tarih ve bilim alanında gelişmeye başlayarak kendisine önemli bir yer edinmiştir (Özçep ve Orbay, 1999). Güncel bilime ve paleo-bilime katkı sunan jeofiziğin inceleme alanları sismoloji, hidroloji, jeomanyetizma, volkanoloji ve oşinografi ile sınırlı iken; günümüzde tarımdan arkeolojiye, biyolojiden geotekniğe, askeri ve adli tıp araştırmalarından çevre çalışmalarına kadar çok geniş alanlarda öncelikli amaç haline gelmiştir. Jeofizik biliminin, yaşamın her alanında olduğu gibi, ağaç köklerinin yeraltında nasıl yayıldığı ve gelecekte yolları ve yapıları nasıl etkileyeceğinin belirlenmesi konusunda da kentleşmeye yeni bir katkı sunabilmesi özellikle yerel yönetimler açısından büyük önem taşımaktadır.

Çevre ve insan sağlığı için oldukça önemli olan sokak ağaçları, kentsel peyzaj çalışmalarında sürdürülebilir bir yaşam için kullanılan en önemli materyaldir. İklim krizlerinde biyoçeşitlilik, doğa için oksijen sağlayan sokak ağaçları, su akışını düzenleyerek heyelan (yer kayması) gibi doğal afet riskini azaltma da önemli bir rol oynamaktadır. Doğa ve yaşam için çok fazla faydası olan sokak ağaçlarının ekonomik açıdan zararı da bulunmaktadır. Bu zarar, ağacın kökleriyle doğrudan ilişkilidir. Ana işlevi bitkiyi toprağa bağlamak olan köklerin yer altı suyuna doğru büyümesi sonucu önce birincil kökler oluşur ve oluşan bu köklerin uzayıp kalınlaşması sonucu, birincil köklere paralel ikincil, üçüncül kökler oluşur. Oluşan yan kökler, türlere bağlı olarak farklılık gösterir ve yan köklerin zamanla dallanıp uzaması sonucu işlev bakımından ana köke benzer. Ağaç kökleri incelendiğinde öncelikli olarak derine doğru büyüdüğü yalnızca ikincil köklerin yanal yönde yayıldığı bilinmektedir. Ancak yapılan yol ve temel çalışmaları sırasındaki drenaj ile toprağın sıkışması köklerin yönlerinin değişmesine sebep olmaktadır (Şekil 1.1).



Şekil 1.1 Potansiyel yol güvenliği açısından kritik unsurlarla birlikte ağaç kök sisteminin 3 boyutlu görünümü (A ve B köklerin yanal yayılımını göstermektedir.) (Tosti ve diğ., 2018)

Köklerin yöneliminde meydana gelen bu değişim, köklerin neredeyse yüzeyden yayılmasına ve yayılırken önündeki nesneleri tahrip etmesine neden olmaktadır (Şekil 1.2). Ağaç köklerinin kontrolsüz ve radyal yönde büyüyerek yayılması ve hidrofilik köklerin kaldırımların alt tarafında yoğunlaşması; asfaltta ve kaldırımlarda çatlamaya, mülklerin temelinde ve alt yapı sistemlerinde tahribata, ek olarak yollarda meydana gelen hasarlar nedeniyle kazalara neden olmaktadır (Tosti, Ciampoli, Brancadoro ve Alani, 2018) (Şekil 1.3). Bu sebeplerle ortaya çıkan maliyet yerel yönetim bütçelerinde oldukça fazla ekonomik artışa sebep olmaktadır. Yapılan araştırmalara göre 1988 ve 1992 yılları arasında, Birleşik Krallık'ta binalarda ağaç kaynaklı çökme hasarı 1,6 milyar Sterlin'i aşarken, Amerika Birleşik Devletleri'nde, yıllık beton ve kanalizasyon hattının ağaçla ilgili hasar nedeniyle kentsel peyzaj bütçelerinin %25'i onarım çalışmalarına ayrılmaktadır (Moore ve Ryder, 2015). Oluşan bu hasarı minimize etmek için ağaç köklerinin yönelimlerinin önceden bilinmesi, önlem alma şansını arttıracaktır. Bu çalışmada, ağaç köklerinin yönelimlerini ve yer altındaki uzanımlarını belirlemek için tahribatsız Jeofizik yöntemlerden olan Yer Radarı (GPR) yöntemi kullanılmıştır.



Şekil 1.2 Çınar Ağacı Kök Gelişiminin Kaldırım Döşemesinde Neden Olduğu Deformasyon.



Şekil 1.3 Yanal şeridin kenarında ve eşikte ağaç köklerinin yükselmesi nedeniyle asfalt hasarına bir örnek (Tosti ve diğ., 2018)

Ağaç Köklerinin araştırılması çalışmaları önceki yıllarda arkeolojik yöntemlerle kazılarak yapılmaktaydı. Ancak, kazı yöntemlerinin hem maliyetli olması hem de yapıyı tahrip etmesi açısından günümüzde tercih edilmemektedir. Bu nedenle, tahribatsız olması ve sığ derinliklerde oldukça iyi sonuçlar vermesi açısından uygulamalı jeofiziğin elektromanyetik yöntemlerinden olan yer altı radarı (GPR) uygulaması tercih edilmektedir. Yer içerisine elektromanyetik dalga göndererek yerin

tepkisini ölçen GPR; verici, alıcı, kayıtçı ve kontrol ünitesinden oluşan bir yöntemdir. Yüksek frekanslı elektromanyetik alandan faydalanan yer altı radarı, verici antenin üretmiş olduğu birkaç nanosaniyeli olarak kaydedilen elektromanyetik dalganın yer içerisinde yayılırken karşılaştığı nesneye göre yansıtılarak veya saçılarak tekrar yukarı çıkıp alıcı anten ile algılanması ve zamanın işlevi olarak kayıtçıya kaydedilmesi ilkesine göre çalışır. Belirlenen ölçü noktalarında toplanan radar izleri ölçüm sonunda bir araya getirilerek radargram adlı kesitler oluşturulur ve veriler işlenerek yorum yapılabilir hale getirilir (Kadıoğlu ve Kadıoğlu, 2006). Arkeolojik aramalarda (mezar yeri, antik kalıntı, gömülü eser vb.), geoteknik amaçlı aramalarda (inşaat, köprü, yol, altyapı, kaldırım, güzergâh ve tünel çalışmaları), adli tıp ve askeri amaçlı yapılan araştırmalarda, çevresel amaçlarla yapılan araştırmalarda (atık borularının konumu, yer altı suyu kirliliği, gezegen yapısı, tarım ve biyoloji alanlarında yapılan bilimsel amaçlı araştırmalarda, maden ve karstik boşluk aramalarında, buz dağlarının ve göllerin don (buzul) çatlak ve kırıklarının araştırılmasında, haritalama çalışmalarında ve tortul yapıların incelenmesinde kullanılan ve yer altının manyetik ve elektrik özelliklerini açıklayan yer altı radarı yönteminin ilkesi Maxwell denklemlerine dayanmaktadır (Arslan, 2016).

Bu çalışmada, geniş uygulama yelpazesi olan yer altı radarı yönteminin kentsel peyzaj çalışmalarında şehir içi ulaşımında önemli bir yeri bulunan bulvarların orta refüjlerinin ve yaya kaldırımalarının düzenlenmesinde kullanılan ağaç ve benzer bitkilerin saçak köklerinin, büyüyüp yayılarak yol üzerindeki asfalt/beton kaplamada vb. yaratabileceği kabarma ve çatlamların olumsuz etkilerinin önceden belirlenebilmesinin araştırılması amaçlanmıştır. Bu sayede, yüzeye yönelen veya yüzeye çok yakın ağaç köklerinin durumu belirlenerek yol üzerindeki asfalt/beton kaplamalara veya kaldırım döşemelerine verebileceği zarar önceden saptanacak ve yol satırlarında hasar oluşmadan önlem alınabilmesi sağlanmış olacaktır. Böylece, bakım onarımların zaman ve maliyet açısından daha ekonomik olması sağlanırken diğer yandan da yayaların kaldırımlarda, araçların trafikte daha güvenli seyretmeleri amaçlanmaktadır. Bu çalışma kapsamında ölçümler 350 MHz anten ile yer altı radarı cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiş, kaydedilen veriler Geolitix, Prism ve GPRSlice yazılımlarıyla değerlendirilmiştir. Oluşturulan yer altı radarı kesit görüntüleri ölçüm alınan profil boyunca yeraltının görünümünü yansıtmaktadır. Elde edilen sonuçlar, yer altı radarı yönteminin köklerin 3B yayılımını gösterebileceğini ortaya koymuştur.

BÖLÜM İKİ

YER RADARI (GPR) YÖNTEMİ

2.1 Yer Radarı (GPR) Yönteminin Tarihçesi

Yer altı radarı yöntemi, jeofizik yöntemler içerisinde oldukça yeni olup 19. yüzyılda ışığın bir elektromanyetik dalga olduğunun anlaşılması ile gelişmeye başlayan bir yöntemdir. Jeofiziğin ve elektromanyetik alan kuramının gelişmesiyle yer radarı yönteminin temel ilkeleri 20. yüzyıl boyunca geliştirilmiş, ancak görüntüleme tekniklerinin piko saniye aralığında bir izi örneklemek için yeterince hızlı olmamasından dolayı yeterince yorum yapılamamıştır (Leckebusch, 2003). 1960'larda bu talebi karşılayan bir sistem kurulana kadar, radyo yansıma sinyalleri kullanılarak birkaç darbe (puls) ile genlik biraz kaydırılmış bir zamanda gömülü cisimleri araştırmak amacıyla ölçülmüştür. Ancak görüntüleme kaynağının yalnızca osiloskop olması ve yöntemin karmaşık görüntüleme geometrisinin olması profil oluşturup yorumlamayı zorlaştırmıştır. Yer altı radarı yöntemi tamamen sayısal sistemlerin gelişmesi ile araştırmalarda oldukça başarı sağlamış olup, 1980'li yılların ortalarından itibaren elektromanyetik dalgaların nanosaniye mertebesinde ölçülmesi ile mühendislik, çevre, arkeoloji ve jeoloji alalarında oldukça geniş bir uygulama alanına sahip olmuştur (Leckebusch, 2003). Günümüzde uygulamasının işlevsel olması ile hayatın her alanına giren yer altı radarının gelişimi kronolojik sırası ile aşağıda verilmiştir (Wolff, 2022).

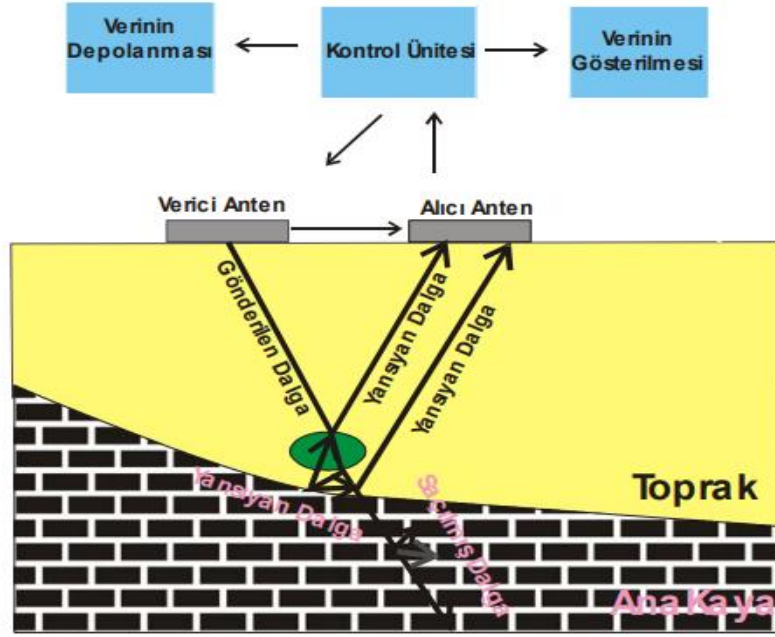
- 1865 yılında elektromanyetik dalga ve ışın teorisi James Clerk Maxwell tarafından ortaya kondu.
- 1886 yılında Alman fizikçi Heinrich Rudolf Hertz tarafından elektromanyetik dalgalar keşfedilerek Maxwell'in kuramını zincirlendi.
- 1897 yılında Guglielmo Marconi tarafından uzay dalgaları ilk kez çok uzun menzillere taşındı. İlk denemesinde ağaçtan yapılmış çadır direkleri üzerinden geçirdiği bir iletkeni kullanarak bugünkü anteni buldu.

- 1900 yılında Nicola Tesla tarafından elektromanyetik dalgaların yansıması ile hareketli nesnelerin algılanabileceği ortaya konuldu.
- 1904 yılında Christian Hülsmeyer tarafından gemi trafiğini yönetmek amacıyla icat edilen ve ilk radar denemesi olan “telemobiloskopu”, bir nesneye(gemiye) çarparak dönen elektromanyetik dalgaların süresinden menzili hesaplanabiliyordu.
- 1921 yılında Albert Wallace Hull tarafından güçlü gönderici olarak kullanılan magnetron icat edildi.
- 1922 yılında ABD Donanma laboratuvarında yer alan Albert H. Taylor ve Leo C. Young tarafından ilk kez bir ahşap geminin yeri belirlendi.
- 1930 yılında ABD Donanması laboratuvarında yer alan L.A. Hyland ilk kez bir uçak algıladı. Uçağın yönü tesadüfen tespit edilen bu çalışmada uçağa 2 mil uzaklıkta yer alan 33 MHz’lik vericide değişim algılandı. Bu olumlu değişim üzerinde yapılan çalışmalar sonucu 1932 yılında uçağa 50 mil mesafedeki değişimi algılayan radar geliştirildi (Aydın,2006).
- 1931 yılında William A.S. Butement ve P.E. Pollard tarafından İngiliz radar sistemi bir gemiye kurularak kısa mesafelerde başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Alıcı ve verici anteni olarak boynuz ısı yayıcılar bulunan parabolik antenler kullanılmıştır.
- 1933 yılında Rudolph Kühnhold 1931’de kendisi tarafından geliştirilen ve 1938’de üretime başlayan "radyo ölçüm cihazı"nı tanıttı.
- 1935 yılında Robert A. Watson- Watt ve Arnold F. Wilkins tarafından Bir erken uyarı radarının ilk pratik denemesi yapıldı.
- 1936 yılında General Electric firması araştırma mühendisleri Metcalf ve Hahn tarafından yükselteç veya osilatör tüpü olarak kullanılan klistron kanalı geliştirildi.
- 1939 yılında Birmingham Üniversitesi fizikçileri John Randall ve Henry Boot tarafından hafif ama güçlü magnetrona sahip mikro radarı geliştirildi.
- 1940 yılında ABD, Rusya, Almanya ve Japonya’da karmaşık birçok radar sistemleri kuruldu. İkinci dünya savaşı boyunca radar sistemleri gelişmiş ve savunma amaçlı da kullanılmaya başlamıştır.
- 1940 yılında radar gömülü cisimlerin yerinin tespiti amacıyla ilk kullanılmıştır.

- 1960 yılında J. C. Cook tarafından radyo yansıma sinyalleri kullanılarak ilk sivil araştırmalar yapılmıştır (Cook, 1960).
- 1970'li yıllarda buzul amaçlı dürtü radar ilk kez Watts ve diğerleri tarafından kullanılmıştır (Watts, England, Vickers ve Meier, 1975).

2.2 Yer Radarı Yöntemi ve Yöntemin Çalışma İlkesi

Yer Altı Radarı, yeraltında meydana gelen değişimleri ve yer altı radarı, sinyallerinin iletiildiği ortamdaki fiziksel değişiklikleri belirlemek amacıyla yüksek frekanslı elektromanyetik dalgaları kullanan jeofiziksel bir algılama yöntemidir. Yöntem, genel olarak verici antenin ürettiği elektromanyetik sinyallerin yeraltındaki gidiş-geliş yolculuğu sırasında uğradığı değişimlerin alıcı anten tarafından algılanmasıyla gözlemlenen orijinal sinyallerden farkı ile ilgilenir (Utsi, 2006). Yer altı radarı düzeneği; verici sistem, kontrol sistemi, alıcı sistem ve kayıt ünitesi olmak üzere dört ana elemandan oluşmaktadır. Yüksek hızla yayılan radyo dalgalarının üretilmesini sağlayan verici anten (Tsc) ile üretilen yüksek frekanslı elektromanyetik dalga yer içerisine gönderilir. Seyahat zamanı birkaç bin nanosaniye mertebesinde olan elektromanyetik dalga, doğrudan veya bir ara yüzeye çarpıp yansiyarak alıcı antene (Rx) ulaşır. Alıcı antene ulaşan dalga kayıt ünitesi tarafından kaydedilerek bilgisayar ortamında görüntülenebilir ve işlenebilir hale gelir (Şekil 2.1) (Kurt, 2009). Sismograma benzeyen ve radargram adı verilen görüntü, antenlerin zeminde hareket ettirilirken alınan sinyallerin verici tarafından gerçekleştirilen yayılım anından, alıcı tarafından algılanma anına kadar geçen süre olan gidiş-geliş seyahat zamanlarının bir işlevidir (Peters, Daniels ve Young, 1994). Dalganın verici antenden çıkıp kayıt sisteminde zamanın bir işlevi olarak görüntülenmesine kadar geçen süre ve işleyiş ise kontrol ünitesi ile kontrol edilir.



Şekil 2.1 GPR Yönteminin Çalışma İlkesi (Kurt, 2009)

Yer altı radarı sinyalleri seyahat ortamlarının fiziksel ve kimyasal özelliklerine göre oluşan elektromanyetik dalga hızları ile hedefe ulaşır ve hedef yolu boyunca bilgi toplar. Zeminin yapısı, aşağıya doğru giden elektromanyetik dalganın hem şeklini hem de süresini etkiler. Bu nedenle kaynak dalga birden fazla dalga boyu içeriğine ve karmaşık bir dalga biçimine sahiptir. Yer altı radarı sinyalleri, elektromanyetik dalga yayılımının toprak gibi bir ortamdan ne kadar iyi geçtiğinin genel bir ölçümü olan bağıl dielektrik geçirgenliğine yanıt verir (Moore ve Ryder, 2015). Yer altı radarı sinyallerinin geçtiği tabakaların, içerdiği mineral farklılıkları nedeniyle hem kimyasal hem de fiziksel özellikleri farklıdır. Dolayısıyla, her jeolojik malzemenin elektrik iletkenlik ve dielektrik katsayısı ve yayılım hızı birbirinden farklıdır (Tablo 2.1).

Tablo 2.1 Bazı jeolojik malzemelere ait dielektrik, elektrik iletkenlik, hız değerleri (Annan, 2000; Kurt 2009)

MALZEME	Bağıl Dielektrik Katsayısı (ϵ_r)	Elektrik İletkenlik (σ , ms/m)	Elektromanyetik Dalga Yayılım Hızı (V, m/ns)
Hava	1	0	0,3
Buz	3-4	0,01	0,16
Su (taze)	80	0,5	0,033
Su (tuzlu)	80	3000	0,01
<i>Topraklar</i>			
Kil	5-40	2-1000	0,06
Toprak (kuru)	3-5	0,01	0,15
Toprak (doğgun)	20-30	0,1-1,0	0,06
Silt	5-30	1-100	0,07
<i>Mineraller</i>			
Kalsit	7,8-8,5	$5 \cdot 10^{-10}$	0,11
Kuvars	4,2-5	$3 \cdot 10^{-4}$ - $5 \cdot 10^{-12}$	0,13-0,15
<i>Tortul Kayaçlar</i>			
Kireçtaşı	4-8	0,5-2	0,12
Tuz (kuru)	5-6	0,01-1	0,13
Kumtaşı	4<7-12	$1 \cdot 10^{-0,7}$	0,09-0,14
Şeyl	5-15	1-100	0,09
<i>Magmatik Kayaçlar</i>			
Bazalt	12	$8 \cdot 10^{-6}$ - 0,025	0,09
Dasit	6,8-8,2	0,05	0,12
Diyabaz	10,5-34,5	$2 \cdot 10^{-5}$ - 50	0,05-0,09
Diyorit	6	0,0002-0,002	0,12
Gabro	8,5-40	0,001-1	0,05-0,10
Granit	4,6	0,01-1	0,13
Norit	61	0,02-1	0,04
Peridotit	8,6	0,15-0,33	0,1

Yer altının tekdüze olmaması ve Tablo 2.1’de görüldüğü gibi jeolojik birimlerin fiziksel özelliklerinin farklı olması sebebiyle GPR sistemleri üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda monostatik (sinyal gönderme ve almanın aynı antenle yapıldığı sistem) ve bistatik (sinyal gönderme ve alma için farklı antenlerin kullanıldığı sistem) konumda kullanılan anten mekanizmaları elde edilmiştir. Monostatik konumda, tek anten içerisinde hem alıcı hem de verici bulunurken, bistatik konumda Şekil 2.1’de de gözlemlediğimiz gibi alıcı ve verici anten ayrı ayrı olacak şekilde yer alır (Qasimi, 2014). Bu tez çalışmasında monostatik konumda yer alan anten kullanılmıştır.

2.3 Yer Radarı Yönteminin Kullanıldığı Alanlar

Sığ jeofizik çalışmalarda tahribatsız bir yöntem olması ve mikro teknolojinin artması ile kendisine geniş bir uygulama yelpazesi oluşturan GPR teknolojisi, jeolojik, çevresel, mühendislik, askeri, adli ve arkeolojik amaçlı çalışmalarda ve ek olarak gömülü nesneleri (yeraltı elektrik, telefon, kanalizasyon ve içme suyu dağıtım şebekesi gibi) aramaya dayalı diğer uygulamalarda kullanılmaktadır.

2.3.1 Yer Radarı Yönteminin Jeolojik Amaçlı Araştırmalarda Kullanılması

- Karstik boşlukların tespit edilmesi (Sarıbudak, 2019)
- Buz dağları, buzul kalınlığı ve temel buzul yarıklarının araştırılması (De Pascale, Pollard ve Williams, 2008)
- Fay, kırık ve çatlakların tespit edilip haritalanması (Gündoğdu, Kurban, Yalçın ve Özden, 2017)
- Yer altı boşluklarının taranması (Mochales vd. 2008)
- Göl ve nehirlerin don kırıklarının araştırılması (Jones vd. 2013)
- Sedimentolojik yapıların araştırılması (Neal, 2004)
- Yer altı suyu araştırmaları (Elkhetali, 2006)
- Jeolojik inceleme ve haritalama çalışmaları (Hammam, Gaber, Abdelwahed ve Hammed, 2020)
- Maden ve mineral arama (Francke, 2012)
- Jeolojik amaçlı kuyu logu uygulamaları (Blindow, Eisenburger, Illich, Petzold ve Richter, 2007)
- Kömür damarlarının tespiti (Zhang, Li, Zhao ve Guo, 2012)
- Heyelan araştırmaları (Gelişli, 2018)

2.3.2 Yer Radarı Yönteminin Çevre Araştırmalarında Kullanılması

- Atık drenaj borularının konumu ve geçtiği yerlerin tespiti (Allred vd. 2005)
- Yer altı suyu kirliliğinin araştırılması (Wijewardana, Galagedara ve Mowjood, 2012)
- Sığ hidrokarbon araştırmaları (Kim, Daniels, Guy, Radzevicius ve Holt, 2000)
- Yüzey suyu kirlilik araştırmaları (Huo, Dang, Song, Chen ve Mao, 2016)
- Petrol ve gaz sahalarındaki kaçak tespiti çalışmaları ve gömülü gaz ve petrol tanklarının bulunması (Meribout, Khezzar, Azzi ve Ghendour, 2020)
- Ağır metal ve kayaç kirliliği araştırmaları (Canbay)

2.3.3 Yer Radarı Yönteminin Mühendislik Amaçlı Araştırmalarda Kullanılması

- Karayolları, havaalanları, demiryolları ve kaldırımlar gibi ulaştırma seçeneklerinin alt yapılarının değerlendirilmesi ve izlenmesi (Pajewski, Fontul ve Solla, 2019)
- Demiryolu tasarımı (Correia, 2008)
- Beton takviyesi gereken yerlerin belirlenmesi (Joshaghani ve Shokrabadi, 2022)
- Kamu hizmetlerinin (kablolar, borular) yerlerinin ve temel altı zeminlerin elektriksel özelliklerinin belirlenmesi (Saarenketo, 2006)
- Su temini ve kanalizasyon sistemlerinin izlenmesi (Stoianov, Nachman, Whittle, Madden ve Kling, 2008)
- Telefon, gaz, elektrik gibi yeraltı kablolarının araştırılması (Bachiri, Alsharahi, Khamlichi, Bezzazi ve Faize, 2020)
- Jeoteknik araştırmalarda (Yelf, 2007)
- İnşaatlarda (Morcous ve Erdogmus, 2009)
- Tünel aramalarında (Zhang, Xie ve Huang, 2010)
- Köprü tabliyesinin belirlenmesinde (Alani, Aboutalebi ve Kilic, 2013)

2.3.4 Yer Radarı Yönteminin Arkeolojik Amaçlı Araştırmalarda Kullanılması

- Antik mezar yeri arama (Ruffell, McCabe, Donnelly ve Sloan, 2009)
- Adli tıp çalışmaları için mezar ve insan kalıntısı arama (Schultz, 2012; Mellett, 1992)
- Arkeolojik araştırmalarda (Imai, Sakayama ve Kanemori, 1987)
- Antropolojik araştırmalarda (Conyers, 2010)

2.3.5 Yer Radarı Yönteminin Diğer Kullanım Alanları

- Tarım alanlarının incelenmesi (Liu, Dongn ve Leskovar, 2016)
- Biyolojik ve biyofiziksel araştırmalarda (André, Jonard ve Lambot, 2014)
- Gömülü patlayıcı cihazların tespiti (Machado Brito-da-Costa, vd. 2022)
- Ay ve gezegenlerin araştırılması (Esmaili, vd. 2020)
- Yerleri belli olmayan mezar yerlerinin araştırılması (Bevan, 1991)
- Ormanlardaki ağaçların gövde içlerinin araştırılması (Ježová, Mertens ve Lambot, 2016)
- Şehitlik ve muharebe alanındaki savaş gereçlerinin araştırılması (Koşaroğlu, Kamacı ve Bektaş, 2021)

2.4 Yer Radarı Yönteminin Üstünlükleri ve Zayıflıkları

Yer altı radarı yöntemi, tahribatsız bir yöntem olması ve kolay ölçü alınabilmesi nedeniyle günümüzde en çok tercih edilen elektromanyetik yöntemlerden biridir. Yer altı radarı yöntemlerinin geniş uygulama alanı ve sürekli gelişimi, GPR verilerinin işlenmesi ve yorumlanması giderek daha önemli hale gelmektedir (Zhou, Zeng ve Li, 2019). En çok tercih edilen bu yöntemin avantajlarının yanı sıra dezavantajları da mevcuttur.

2.4.1 Yer Radarı Yönteminin Üstünlükleri

- Yüksek frekanslı elektromanyetik dalgalar üreten antenler ile yüksek çözünürlükte veri toplanır (Zhou, Zeng ve Li, 2019). Araştırma çözünürlüğünün derinliği; hedeflenen yapının elektriksel iletkenliğine bağlı olarak seçilen frekans ile hassas bir şekilde belirlenebilir.
- Kullanılan yer altı radarı cihazı hızlı algılama özelliği ile çalışmaktadır.
- Ekipmanlarının diğer yöntemlere göre hafif olması, uygulamanın işlevsel olması ve verilerin hemen erişilip kolayca işlenebilir olması sahada oldukça kolaylık sağlar.
- Geniş frekans bandına içeren antenleri sayesinde farklı ortamlarda, farklı derinliklerde bilgi toplamak mümkündür (Kara, 2020).
- Veri işlem esnasında yapılan yığılma işlemi, hedef derinliğinin çözünürlüğünü artırır.
- Veri işlem sırasında ölçümden ve çevreden kaynaklı gürültüler giderilerek veri çözünürlüğü artırılır. Yüzeyde metalik bir malzemeden kaynaklı oluşan gürültü, kayıta tekrarlı yansıma olarak gözlemlenir ve bu nedenle ayırt etmek kolaydır.
- Gömülü nesnelerin yeraltındaki konumları büyük bir duyarlılıkla saptanır.

2.4.2 Yer Radarı Yönteminin Zayıflıkları

- Yüksek frekanslı elektromanyetik dalgaların, dalga boyları düşük olduğundan yöntem yalnızca sığ çalışmalarda yüksek çözünürlükte sonuç verir. Hedef derinliği arttıkça çözünürlük azalır.
- GPR yöntemi ile su içeriği yüksek, suya doymun ve nemli ortamlarda toplanan verilerin çözünürlükleri düşüktür (Kütükcüoğlu, 2020).
- Sinyal/gürültü oranı jeolojik parametrelere bağlı olarak değiştiğinden GPR yönteminde yorum yapmak oldukça karmaşıktır.

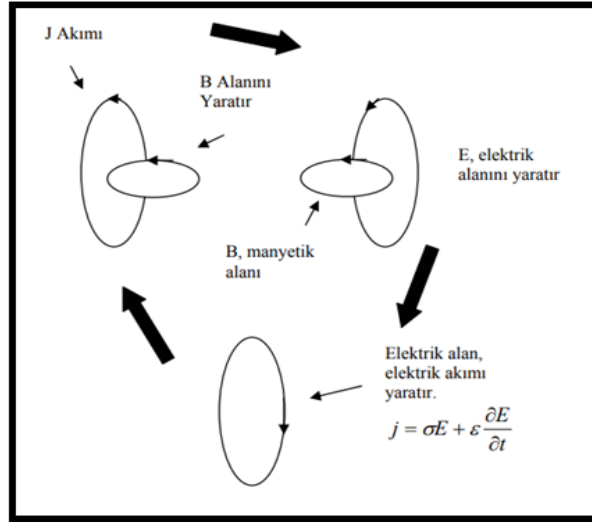
- Çevrede yer alan radyo dalgaları ve elektrik üreten kablolar yöntem için bozucu etki oluşturur.
- Yüksek iletkenliğe sebep olan nesnelerin var olduğu ortamlarda, tekrarlı yansıma oluşacağından ana sinyali ayırt etmek zorlaşır.
- İletkenliğin yüksek olduğu jeolojik bir ara tabakada keskin bir yansıma oluşacağından alt ortamları ayırt etmek zordur. Yer altı su seviyesine ulaştığında verideki ani iletkenlik değişimi, veride çözünürlük değişimine neden olur (Kütükcüoğlu, 2020).

2.5 Yer Radarı Yönteminin Kuramı

Yeraltındaki hedef cismin ya da yapının elektriksel uzanımını, eğimini, derinliğini, iletkenliğini uzunluğunu ve konumunu belirleyen Yer Radarı yöntemi, elektromanyetik dalga üreten verici anten ve oluşan elektrik akımının yer altında gösterdiği elektromanyetik direnci algılayan alıcı anten sistemi ile yer altından bilgi toplar. Malzemelerin elektromanyetik özellikleri malzemenin bileşim ve su içeriğine bağlıdır. Bu iki özellik elektromanyetik dalganın yayılım hızını ve dalgaların sönümünü kontrol eder. Yer altına iletilen elektromanyetik dalgaların hızı; ışık hızına, elektrik alana ve manyetik geçirgenliğe bağlıdır. Yer radarı ışınımı elektromanyetik kuramına dayalıdır ve oluşan elektrik alan (E) bileşeni ve onun dik olduğu manyetik alan (H) bileşeni Maxwell bağıntıları ile tanımlanır.

2.5.1 Maxwell Denklemleri

Zamana bağlı değişen elektromanyetik alanları tanımlayan Maxwell denklemleri, elektromanyetik kuramının temelini oluşturur. Zaman içerisinde elektromanyetik dalgaların oluşturduğu elektrik alan manyetik alan oluşmasına neden olur. Bu döngü manyetik alan için de geçerlidir. Oluşan manyetik alan, elektrik alan oluşmasına neden olur. Oluşan bu döngü Şekil 2.2’de şema halinde aktarılmıştır.



Şekil 2.2 Zamanla oluşan elektrik alan manyetik alan döngüsü (Annan, 2009)

Yer radarı yönteminde; yüksek frekanslı elektromanyetik dalga ile oluşan ve sürekli olarak ardışık bir şekilde tekrarlanan elektrik alan manyetik alan döngüsü, ortamda ilerleyerek devam eder. İlerleme, genlik ve frekans gibi özelliklere bağlı olarak dalga hareketi şeklinde gelişir.

Maxwell bağıntıları elektromanyetik alanın bileşenleri arası ilişkilerin ve elektrik alan şiddeti, manyetik alan şiddeti, manyetik akı yoğunluğu, elektrik yüklenme yoğunluğu ve elektrik akım yoğunluğu gibi yer altı fiziksel özelliklerinin matematiksel ifadesidir. Maxwell bağıntıları, ortamların elektrik özelliklerini tanımlamak için zaman ortamında izleyen bağıntılarla ifade edilir.

Faraday Yasası; zamanla değişen manyetik akı yoğunluğunun elektrik alanı yarattığını gösteren Maxwell denklemidir.

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.1)$$

Amper Yasası; manyetik alan şiddetinin manyetik alan ortamında akan elektrik akımları tarafından oluşturulduğunu gösteren Maxwell bağıntısıdır.

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = - \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2.2)$$

Gauss Yasası; elektrik alanın kaynağının elektriksel yüklemeye olduğunu ve manyetik indüksiyonun selenoid olduğunu gösteren Maxwell bağıntısıdır.

$$\vec{\nabla} \times \vec{D} = q \quad (2.3)$$

Manyetik alan için Gauss Yasası; kapalı bir yüzeyden geçen toplam manyetik akının sıfır olduğunu gösteren Maxwell bağıntısıdır.

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = 0 \quad (2.4)$$

GPR yöntemi için elektrik ve manyetik özellikler önemlidir ve ortamın fiziksel özelliklerine bağlı olan ve Maxwell bağıntıları temelinde yatan bağıntılar, bir malzemenin elektromanyetik alanlara tepkisini tanımlamanın aracıdır. Temel bağıntılar; elektronların, atomların ve moleküllerin bir elektromanyetik alanın uygulanmasına toplu halde nasıl tepki verdiğinin tanımını sağlar. Ortamın fiziksel özelliklerine bağlı olan temel bağıntı takımları aşağıda ifade edilmiştir.

1. Manyetik alan şiddeti ile manyetik akı yoğunluğu doğru orantılıdır. Bu orantı Bağıntı 2.5'te verilmiştir.

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (2.5)$$

2. Elektrik alan şiddeti ile yer değiştirme akımları arasında ilişki vardır. Bu ilişki dielektrik geçirgenlik ile tanımlanır ve Denklem 2.6'da ki bağıntı ile ifade edilir.

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (2.6)$$

3. Dalga yayılımını etkileyen bir diğer parametre ise iletkenliğin yöne bağımlı olduğudur. Malzemenin kristal yapısı, moleküler düzenlemesi ve elektron

hareketine bağılı olarak iletkenlik, yöne bağımlı olabilir. İletkenlik ile akım yoğunluğu arasındaki ilişki aşağıda verilmiştir.

$$\vec{J} = \vec{\sigma} \vec{E} \quad (2.7)$$

Burada E= Elektrik alan şiddeti (V/m); H= Manyetik alan şiddeti (A/m); D= Elektrik akı yoğunluğu (C/m²); B= Manyetik Akı Yoğunluğu (T) J= elektrik akım yoğunluğu (A/ m²); q= elektrik yük yoğunluğu (C/m³); t= zaman (s)'dır.

Zaman ortamında ele alınan Maxwell bağıntıları, Fourier dönüşümü ile frekans ortamına aktarılır. Maxwell bağıntıları ortamların elektrik özelliklerini tanımlamak için frekans ortamında izleyen bağıntılar ifade edilir.

$$\nabla^2 \vec{E} + k^2 \vec{E} = 0 \quad (2.8)$$

$$\nabla^2 \vec{H} + k^2 \vec{H} = 0 \quad (2.9)$$

$$k^2 = (\mu \epsilon \omega^2 - i \mu \sigma \omega) \quad (2.10)$$

Bağıntıda yer alan k: dalga sayısı, σ : elektrik iletkenlik (S/m), ϵ : dielektrik geçirgenlik (F/m), μ : manyetik geçirgenlik (H/m) ve ω : açısal hızı tanımlar. $\omega = 2\pi f$ şeklinde ifade edilen hız bağıntısındaki f, elektromanyetik dalga oluşturan antenin merkezi frekansıdır. Fourier dönüşümü ile sürekli ve sinüzoidal olan elektromanyetik dalga, yukarıda tanımlanan bağıntılarla ayrık hale gelmiştir. Burada k, elektromanyetik dalganın temelini oluşturan ve frekansa bağılı olarak değişen dalga sayısıdır. Karmaşık bir sayı olan k, inceleme alanının yer değiştirme ve iletkenlik akımı ile ilgili bilgi veren değişkendir. k, frekans ile doğrudan ilişkili olduğundan uygulanacak yöntemde frekans seçimi önemlidir. Frekans; dalga sayısı ile doğru orantılı, dalga boyu ile ters orantılıdır. Dalga boyu,

$$\lambda = \frac{2\pi}{k} = \frac{v}{f} = \frac{2\pi}{\omega(\mu\epsilon)^{1/2}} \quad (2.11)$$

bağıntısı ile ifade edilir. Burada v : elektromanyetik dalga hızını ve λ : dalga boyunu ifade etmektedir.

Alçak frekansta elektrik alan bileşeninin küçük olması nedeniyle iletkenlik akımı yer değiştirme akımına baskın gelir ve dalga sönümlenerek derinlere ulaşamaz. Yüksek frekansta ise yer değiştirme akımı daha baskındır ve istenilen derinliğe nüfuz etmek daha mümkündür. Nüfuz derinliğini ifade eden bağıntı, Bağıntı 2.12’de verilmiştir.

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{2\pi\omega\mu\sigma}} \quad (2.12)$$

Burada δ : nüfuz derinliği, σ : elektrik iletkenlik (S/m), ϵ : dielektrik geçirgenlik (F/m) ve μ : manyetik geçirgenlik (H/m) tir. Bu bağıntıya göre, yüksek dirençli ortamlarda düşük frekanslı elektromanyetik dalga, düşük dirençli ortamlarda yüksek frekanslı elektromanyetik dalga daha derine derinlere nüfuz eder. Yer altı radarı yönteminin frekans bandı 10 MHz ile 2 GHz arasındadır. Oldukça yüksek frekans bandı tercih edilerek uygulama yapılan Yer altı radarı yönteminde ortamın özellikleri, düşük frekans bandı kullanılarak uygulama yapılan çalışmalarda olduğu gibi açısız frekansa bağımlıdır (Keçeli, 2009).

2.5.2 Elektromanyetik Dalganın Yansıması ve İletilmesi

Yer içerisine gönderilen elektromanyetik dalga; yer içerisinde ilerlerken bir katmanın ara yüzeyiyle veya bir nesneyle karşılaştığında, cismin veya ortamın dielektrik geçirgenliklerine bağlı olarak yansımaya veya saçılmaya uğrar. İki katman arasındaki dielektrik sabiti farkının sebep olduğu yansıma, Snell Yasası ilkelerine göre yansır.

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} \quad (2.13)$$

Burada θ_1 : geliş açısı, θ_2 : yansıma açısı, v_1 : birinci katmanın elektromanyetik dalga hızı ve v_2 : ikinci katmanın elektromanyetik dalga hızıdır. Elektromanyetik dalga hızı, temelde manyetik geçirgenliğe (μ) ve dielektrik katsayısına (ϵ) bağlıdır. Dolaylı yoldan ise elektrik iletkenlik (σ) ve sönüm (A) ile ilişkilidir. Çünkü dalga yayılırken bir kısmı belirli bir yansıma katsayısı olan R ile yansırken, $1-R$ bağıntısı ile iletilir. Bu iletim ve yansıma sırasında sinyalin genliği, ısı, manyetik dağıtıcı mineraller ve yön bağımlılık (anizotropi) gibi fiziksel özellikler nedeniyle belirli oranlarda sönümlenir. Fiziksel özelliklere ek olarak, dik olarak yer içerisine gönderilen elektromanyetik dalga, geometrik olarak yayıldığından sinyal kaynağından uzaklaştıkça $1/r^2$ oranında azalır. Burada r : elektromanyetik dalganın kaynaktan uzaklaşma uzaklığıdır.

Sönüm ile nüfuz derinliği arasında da ters orantı vardır. Sönüm arttıkça δ azalır. Sönüm elektrik iletkenlik ve dielektrik arasındaki ilişki Bağıntı 2.15'te ifade edilmiştir.

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}} \quad (2.14)$$

$$A = \frac{\sigma}{2} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad (2.15)$$

$$\delta = \frac{1}{A} \quad (2.16)$$

Yansıyan enerji, yansıma katsayısı (R) ile ifade edilen ve elektromanyetik dalga hızları ile ilişkili olan bir bağıntıdır ve Bağıntı 2.17'de ifade edilmiştir.

$$R = \frac{v_2 - v_1}{v_2 + v_1} \quad (2.17)$$

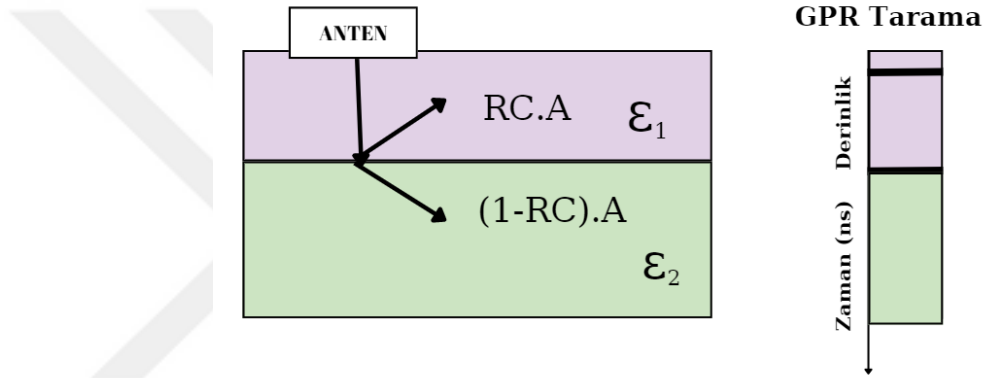
Burada T : iletim katsayısı olmak üzere $T=1-R$ olarak ifade edilmektedir.

Elektromanyetik ışımanın yansıma ilkeleri göz önünde bulundurulduğunda, yer altı radarı yönteminde oluşan sonuç sinyali, Şekil 2.3'te görüldüğü üzere kaydedilen yansıma ve saçılmalara ve ortamın yansıma özellikleri ise alanın geliş açısına,

frekansına ve jeolojik birimlerin dielektrik sabitleri arasındaki farka bağlıdır. Yer radarı yönteminde yansımaya katsayısı RC olarak ifade edilir ve dielektrik özelliğe sahip iki ortam sınırında tanımlanır.

RC yansımaya katsayısı, verici antenden çıkan dalganın yüzde kaçının geri yansıtacağını ve yüzde kaçının yer içine nüfuz edeceğini gösteren ve Bağntı 2.18’de ifade edilen bağıntıdır. Bu bağıntıda ϵ , yansıtıcı sınırın dielektrik sabiti olarak ifade edilmektedir.

$$RC = \frac{\sqrt{\epsilon_1} - \sqrt{\epsilon_2}}{\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2}} \quad (2.18)$$



Şekil 2.3 Radar dalgasının yer içerisindeki davranışı (Keçeli, 2009)

Yer altı radarı yönteminde yansıyan dalga, bir profil boyunca tarama yapılarak nanosaniye zaman diliminde düşey eksenle kaydedilir. Bir taramada Şekil 2.3’te olduğu gibi profil yatay eksenle, zamana ve frekansa bağlı artan derinlik ise düşey eksenle gösterilir. Yer radarı yönteminde, kabuk derinliği yer radarının etki derinliğine eşit değildir. Bunun temel nedeni Bağntı 2.15’te gösterilen sönümdür. Buna ek olarak yer altı radarı cihazından kaynaklanan etmenler de göz önünde bulundurulmalıdır. Yer radarı yönteminde toplam veri kaybı, anten kayıpları, hava ve zemin arasındaki iletim kayıpları, geometrik yayılımdan kaynaklı menzil kaybı, verici antenden çıkan sinyalin saçılmasından kaynaklanan kayıp ve hem frekansa hem de malzeme özelliklerinin işlevi olan sönümden kaynaklanan kayıpların toplamından oluşur. Yer altı radarı yönteminde derinlik, Bağntı 2.19 ile hesaplanır.

$$h = \frac{vt}{2} \quad (2.19)$$

Burada h: derinlik (m), t: iletilen ve yansıyan dalga arasındaki geliş gidiş zamanıdır (ns). GPR yönteminde elektromanyetik dalganın nüfuz derinliği frekansla değişir.

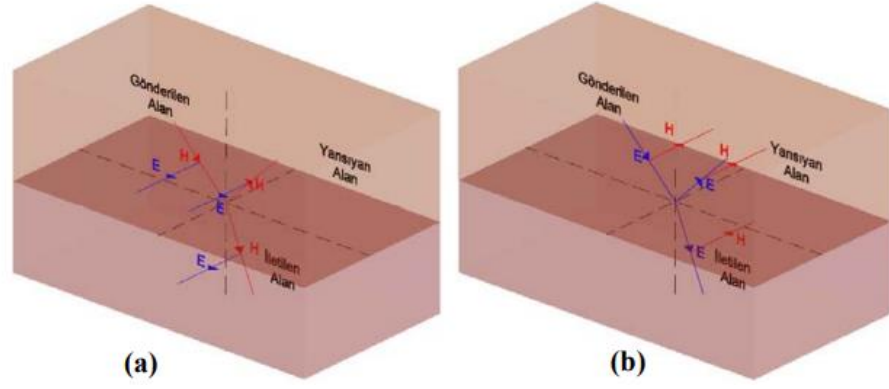
Derinlik ve elektriksel geçirgenlik ilişkisi Bağntı 2.20’de verilmiş ve Tablo 2.2’de de elektromanyetik alanın frekansa bağlı derinlik değişimi ifade edilmiştir.

$$d = \frac{\rho}{30} \quad (2.20)$$

Tablo 2.2 Frekansa bağlı nüfuz derinliği (Keçeli, 2009)

Derinlik (m)	Frekans (MHz)
0.5	1000
1	500
2	200
5	100
10	50
30	25
50	10

Şekil 2.3’te tek boyutlu ortamda dalganın yansıması verilmiştir. İki boyutlu ortamda düzlemsel bir ara yüzey olması halinde, elektromanyetik dalga enine elektik alan (TE) ve enine manyetik alan (TM) olmak üzere iki moda ayrılır. TE modu profil yönüne dik, TM modu ise profil yönüne paraleldir. İki boyutlu bir ortamda TE ve TM modunun yansıması, Şekil 2.4’te gösterilmiştir.



Şekil 2.4'a) TE modu, b) TM modu (Kara, 2020)

2.5.3 Elektromanyetik Dalganın Yer Altında İlerlemesini Sağlayan Dielektrik Maddenin Fiziksel Özellikleri

2.5.3.1 Manyetik Geçirgenlik (μ)

Elektromanyetik yöntemin temel değiştirgeni olan manyetik geçirgenlik, bir malzemenin elektromanyetik alan varlığında mıknatıslanabilmesinin bir ölçütüdür. Manyetize olan ortamda, jeolojik birime gönderilen elektromanyetik radar dalgasının manyetik kısmı iletilirken elektrik kısmı sönümlenir. Manyetik özelliği oldukça yüksek olan ve mıknatıslanma özelliği gösteren demir, nikel ve kobalt gibi minerallerin yer altında bulunması, yüzeyden gönderilen elektromanyetik dalganın sönümlenmesine neden olacağından sığ çözüm yapılabilir. Demir, nikel ve kobalt gibi ferromanyetik mineral ve türevlerini içeren jeolojik birimlerde ferromanyetik mineral oranı %2'den küçükse, yansıtıcı bir sönümlenme görülmemektedir. Ancak bu oran %10 ve üzeri ise, jeolojik zemine gönderilen yer altı radarı sinyallerinin hızı sönümlenir (Kaya, 2020).

2.5.3.2 Elektrik İletkenlik (σ)

Elektrik iletkenlik, uygulanan elektromanyetik alan içerisinde yüklerin taşınımı ile gerçekleşir. Maddeyi oluşturan atomların dış yörüngesinde yer alan değerlik elektronları (bir atomun en dıştaki elektron kabuğundaki elektron sayısı), uygun miktarda kuvvete maruz kaldığında atomdan ayrılıp serbest elektronlar haline gelir. Serbest hale geçen bu yüklerin akışı elektrik iletkenlik oluşmasına neden olur. Elektrik iletkenliğin tersi elektrik öz dirençtir. Yer radarı yönteminde, jeolojik birime gönderilen sinyal elektromanyetik sinyaldir. İletken bir ortamda sinyalin elektrik kısmı derinlere iletilirken, manyetik kısmı sönümlenir. Bu nedenle yer radarı yönteminde, sinyal gönderilen ortamın öz direnci düşükse elektromanyetik dalga sönümleneceği için sığ çözüm yapılabilir. Elektrik iletkenlik, elektrik geçirgenlikle de doğru orantılıdır. Elektrik geçirgenlik (σ), elektromanyetik alan sonucu indüklenen yani serbest kalan yükün depolanıp, iletilmesi ile ilişkilidir.

Ferromanyetik minarellerin ve iletkenliğin yer radarında sebep olduğu gibi sönümlenmeye neden olan bir diğer sebep ise zeminin su içeriğidir. Jeolojik birimlerin su içeriği arttıkça iletkenliği artacağından yer radarı sinyalinin sönümlenme oranı da o kadar artar. Kuru kumdaki sinyalin iletilme oranı ıslak killi zemine göre daha fazladır.

Manyetik geçirgenlik, elektrik iletkenlik ve elektrik geçirgenlik doğrudan elektrik alanın manyetik alan oranı olan elektromanyetik empedans ile ilişkilidir. Elektromanyetik empedansı ifade eden bağıntı, Bağıntı 2.21’de verilmiştir.

$$Z = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon + i\frac{\sigma}{w}}} \quad (2.21)$$

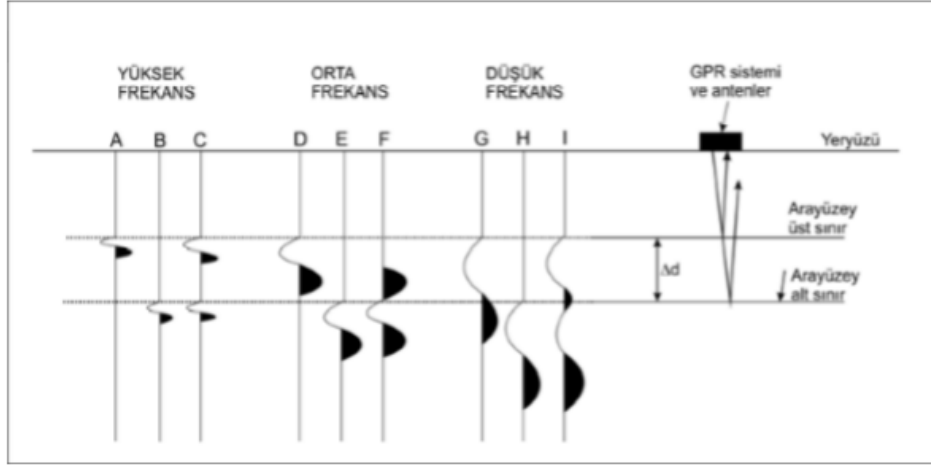
Bu bağıntıda, Z: elektromanyetik empedans, μ ; manyetik geçirgenlik (Wb/m^2), σ ; elektrik iletkenlik (S), ϵ ; dielektrik sabiti (Farad/m), w; açısal hız (radyan/saniye) ve i; elektrik akımıdır (amper).

2.5.4 Yatay ve Düşey Ayrımlılık

Elektromanyetik dalgalar, dalga cepheleri şeklinde elektrik ve manyetik alana dik olarak yayılırlar. Bu yayılma anten frekansı ve ortamın hızı ile doğrudan ilişkilidir. Ortamdan ve kullanılan Yer Radarı cihazından etkilenen dalganın dalga boyu (λ), yatay ve düşey ayrımlılığı etkileyen temel parametredir.

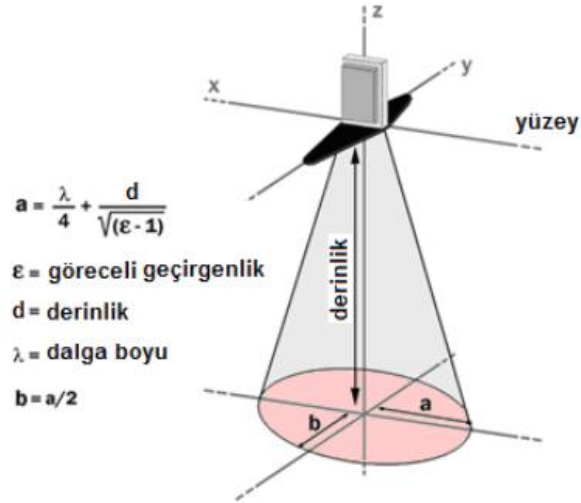
Düşey ayrımlılık, zaman ortamında birbirine çok yakın iki sinyal arasındaki farkın belirlenme yeteneğinin ölçüsüdür. Diğer bir tanımla, düşey ayrımlılık frekansın bir fonksiyonudur. Ayrımlılık, gelen ışınımın dalga uzunluğunun (λ) dörtte biri kadardır. Kuramsal olarak radyo dalga hızına ve radyo frekansına bağlı olan ışımanın ayrımlılığı, gerçekte dörtte bir oranından düşüktür. Çünkü kaynak dalga biçiminin karmaşık yapısı, jeolojik zeminin masif ya da ayrışmış olması dalganın yayılımını ve dolayısıyla Fresnel zonunu etkiler. Fresnel zonu, elektromanyetik dalgaların bir anten veya bir engel etrafında serbestçe yayılabilmesi için gereken bölgeyi ifade eder. Fresnel zonu, direkt yol ve yansıyan yolların arasında herhangi bir faz farkı olmadan birleşmesine izin veren bölgedir. Eğer Fresnel zonu engeller veya yansımalar tarafından engellenirse, iletişim sinyalleri bozulabilir veya zayıflayabilir. Bu nedenle, Fresnel zonunun engellerden serbest olması veya minimum düzeyde engellenmesi, güvenilir iletişim ve sinyal kalitesi için önemlidir.

Zemin üzerine doğrudan yerleştirilen antenin ürettiği dalga dizisi, aşağı doğru iletilirken şekli ve genliği zeminden doğrudan etkilenir yani zemin dalga dizisini etkin olarak süzer. Yüksek frekanslar tercihen alçak frekanslara göre sönümlenirken sinyal içindeki daha yüksek frekanslı bileşenlerin kaybı nedeniyle aşağıya giden radar dalgasında uzama olur. Şekil 2.5'te farklı frekanslardaki düşey ayrımlılık şematize edilmiştir. Şemaya göre ince ara yüzeyde ayrımlılığı en yüksek olan yüksek frekanstır.



Şekil 2.5 Yüksek, orta ve düşük frekans ile düşey ayrımlılık ilişkisi (Kadioğlu, 2006)

Radar dalgasının geçtiği jeolojik birimlerdeki iki ara yüzey sadece birkaç 10 cm ile ayrılırsa, ilk ara yüzeyden gelen yansıma ile ikinci ara yüzeyden gelen yansıma arasındaki zaman aralığı kaynak dalga dizisinin sürecinden daha kısa olduğu için ikinci yansımanın başlangıcı ile ilk yansımanın bitişi örtüşür ve ayrımlılık gerçekleşmez. Ancak yer altı tekdüze olmadığından ve katmanlar arası ayırım 10 cm'den büyük olduğundan bir Fresnel bölge oluşmasına ve bu bölgedeki hem düşey ayrımlılığı (ara yüzeyler dik olarak eğimli ise) hem de yatak ayrımlılığı etkiler. Düşey ayrımlılık artarsa, birinci Fresnel bölge genişler ve yakın hedefler arasındaki ayırt edilebilirliği sağlayan yatay ayrımlılık azalır. Yatay ayrımlılık sönüm katsayısı ile ters orantılıdır. Fresnel bölge ve yatay ayrımlılık arasındaki bağıntıyı veren ve düşey ayrımlılık – yatay ayrımlılık ilişkisini aktaran şema Şekil 2.6'da verilmiştir.



Şekil 2.6 Fresnel bölge ve yatay ayrımlılık ilişkisi (Pembe olarak ifade edilen bölge Fresnel zonu tanımlamaktadır.) (Özkap, 2008; Geoscience, 2003)

2.6 Yer Radarı Yönteminde Veri Toplama

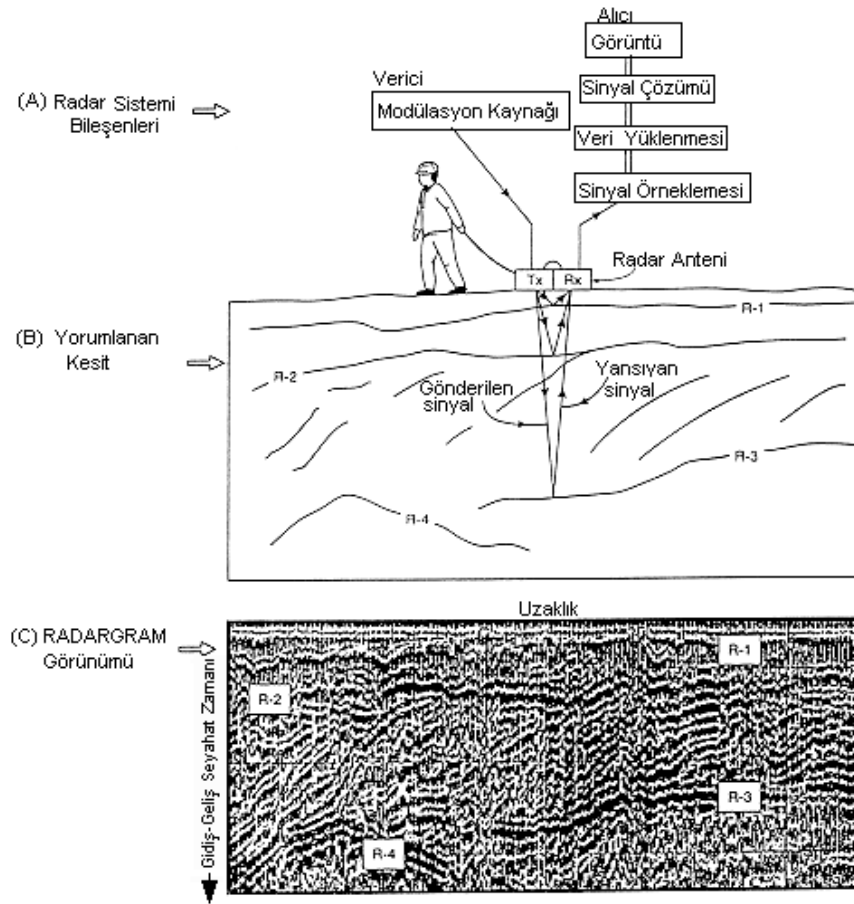
2.6.1 Veri Toplama Ekipmanları

Yer radarı yönteminin uygulama ekipmanları; kontrol ünitesi, anten sistemi ve görüntüleme ünitesi olmak üzere üç ana birimden oluşur. Anten sistemi; Şekil 2.8.a'da da görüldüğü gibi Tx olarak adlandırılan verici antenden ve Rx olarak adlandırılan alıcı antenden oluşur. Tx, jeolojik birimde ulaşılmak istenen nüfuz derinliği göz önünde bulundurularak frekansı belirlenen elektromanyetik dalgayı üretir ve bunun jeolojik birime gönderilmesini sağlar. Rx ise, jeolojik birimden doğrudan veya yansıtılarak gelen ve zamanın işlevi olan elektromanyetik sinyalleri kaydeder (Şekil 2.8.b). Anten sistemi kapalı anten ve açık anten olmak üzere ikiye ayrılır. Alıcı ve verici antenin tek bir mekanizma içinde olduğu sistem kapalı anten, alıcı anten ile verici antenin ayrı olduğu ve birbirinden belirli bir mesafede yerleştirilerek ölçü alınan sistem ise açık anten sistemi olarak adlandırılır. Açık anten sisteminde alıcı ve verici anten zemine dik ve birbirine paralel olarak yerleştirilir. Bu mekanizma kapalı anten içerisinde otomatik olarak ölçü alım sırasında ayarlanabilir. Kapalı anten sistemi

üzerindeki tüm radar ekipmanları Şekil 2.7’de gösterilmiştir. Ulaşılmak istenilen derinliğe ve araştırma yapılacak jeolojik yapıya uygun olacak şekilde anten seçimi yapılır. Görüntüleme ünitesi; alıcı anten tarafından bir profil boyunca algılanan sinyallerin zaman-uzaklık grafiğinin Şekil 2.8.c’deki gibi “radargram” olarak görüntülenmesini sağlar. Kontrol ünitesi ise; istenilen frekansta radar frekansı üretilmesini ve genlik değişiminin zamanın bir işlevi olarak kaydedilmesi sürecini kontrol eder. Kontrol ünitesi kullanılarak ölçümün yapılacağı zaman penceresi (ns) ve radargramda görüntülenmek istenen yığma (iz sayısı) ayarları yapılır (Yeşilmen, 2019). Kayıt ünitesi eş zamanlı olarak, elektrik devresinin doğru çalışmasını da kontrol eden sistemdir.



Şekil 2.7 Kapalı anten GPR ölçüm aleti (Anten, bilgisayar ve aküden oluşmaktadır.) (GSSI, 2021)



Şekil 2.8 Yer radarı ölçü düzeni (a) Radar sistemi parçaları, (b) İncelenen bölüm, (c) Radargram görüntüsü (Butler vd., 1991; Daniels vd., 1988).

Bu tez çalışmasında Amerika menşekli GSSI Utilityscan GPR ve merkez frekansı 350 Mhz olan korumalı anten kullanılmıştır.

2.6.2 Veri Toplama Seçenekleri

Yer radarı yönteminde, veri toplama yöntemine karar vermeden önce ortamın jeolojisi ve elektrik iletkenliğini ve manyetik geçirgenliğini etkileyen kile doygunluğu ve su içeriği hakkında bilgi sahibi olunmalıdır. Çünkü bu fiziksel özellikler, anten, frekans ve yöntem seçimini etkileyen temel parametrelerdir. Ortamın jeolojisi antenin açık anten ya da kapalı anten oluşunu etkilerken, ulaşılmak istenilen derinlik de antenin merkez frekansı seçiminde belirleyici olmaktadır.

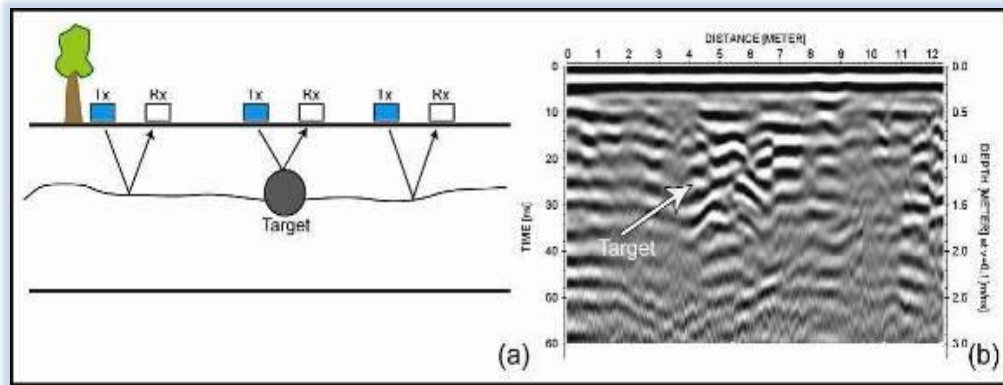
Açık antenlerin frekans aralığı 10-200 MHz 'dir ve bu antenlerde alıcı anten ile verici anten birbirine paralel olacak şekilde ayrı ayrı konumlanır. Kapalı antenlerde ise frekans bandı 100 MHz ve üzerini kapsamakta ve alıcı anten ile verici anten korumalı olacak şekilde bir arada bulunur (Kara, 2020).

Yer radarı yönteminde üç çeşit veri toplama seçeneği bulunmaktadır. Bunlar;

- a) Yansıma profili
 - b) Geniş açılı yansıma ve kırılma (WARR) veya ortak-orta nokta (CMP) sondajı
 - c) Yer Radarı tomografisi ve kuyu içi yer radarı uygulaması
- olarak ayrılır.

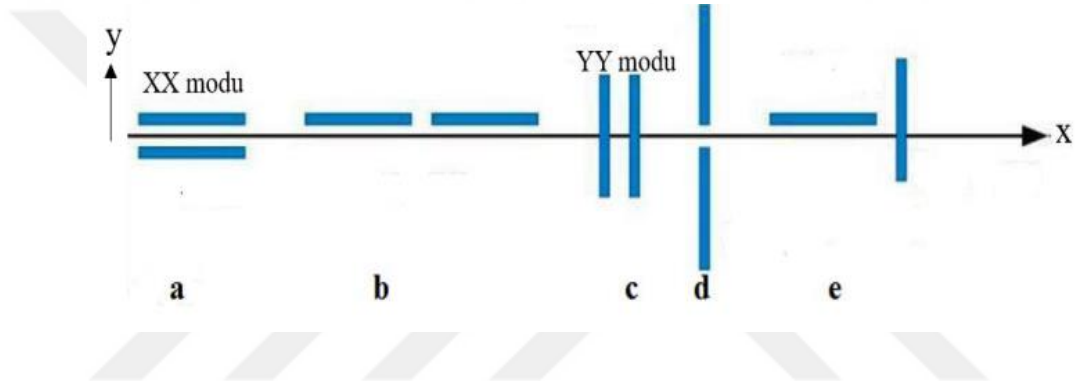
2.6.2.1 Yansıma Profili

Bir hat boyunca, aralıkları sabit olacak şekilde yerleştirilen alıcı ve verici antenler aracılığı ile yer altının haritalanmasını sağlayan teknikte düzenli aralıklarla yer altından yansımalar kaydedilir. Yansıma profili veya ortak ofset ölçü tekniğinde anten merkez frekansı, zamana bağlı kayıt penceresi ve örnekleme aralığı, alıcı verici anten aralığı, bistatik anten sistemi arasındaki aralık ve ölçü profilleri arasındaki aralık ölçümün temel parametreleridir (Kara, 2020). Ölçüm sistemini şematize eden ve örnek yansıma profilini bir radargramda anlatan görsel, Şekil 2.9' da verilmiştir.



Şekil 2.9 Sabit aralıklı anten ile uygulanan yer radarı (GPR) ölçümü, (a) Sabit anten aralığının şematik gösterimi, (b) Sabit anten aralığı ile alınmış örnek bir yer radarı (GPR) profili (Anaran ve Şengül, 2020).

Şekil 2.9’da bir yansımada profilini elde etmek için kullanılan bir yer radarı ölçüm örneği ve sonucu görülmektedir. Bir veya daha fazla yer radarı anteninin, yer yüzeyinde aynı anda hareket ettirilmesiyle çalışan sistemde, antenler yatay ekseninde hareket ederken, yer radarı yansıtıcılarına olan ölçülen seyahat zamanları düşey ekseninde görüntülenirler. Yan yana profiller boyunca alınan bu ölçümlerin birlikte değerlendirilmesi sonucu yansıtıcı yüzeyin derinliği saptanır. Yansımada profili uygulamasında, Tx ve Rx antenleri araştırılmak istenen jeolojiye uygun olacak şekilde birbirlerine göre farklı konumlarda yer alabilirler. Antenlerin beş farklı dizilimi Şekil 2.10’da gösterilmiştir.

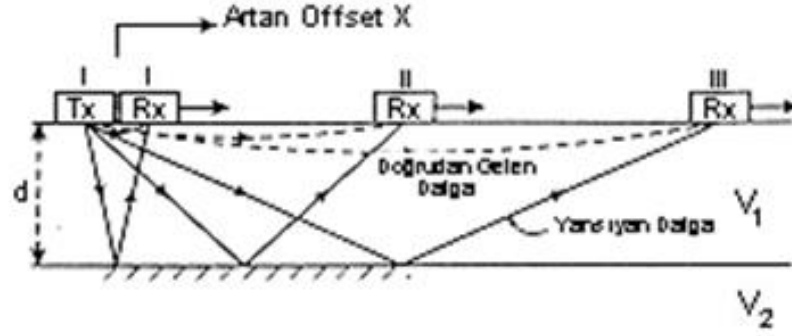


Şekil 2.10 Tx ve Rx anten dizilimleri; (a) antenlerin birbirine ve hatta paralel olduğu XX durumu, (b) antenler yan yana ve hatta paralel olduğu durum, (c) antenlerin birbirine paralel olup hatta dik olduğu YY durumu, (d) antenlerin hatta dik olduğu durum, (e) verici antenin hatta paralel, alıcı antenin ise hatta dik olduğu durum (Alemdağ, 2019; Reppert vd.,2000).

2.6.2.2 Geniş açılı yansımada ve kırılma (WARR) veya ortak-orta nokta (CMP) sondajı

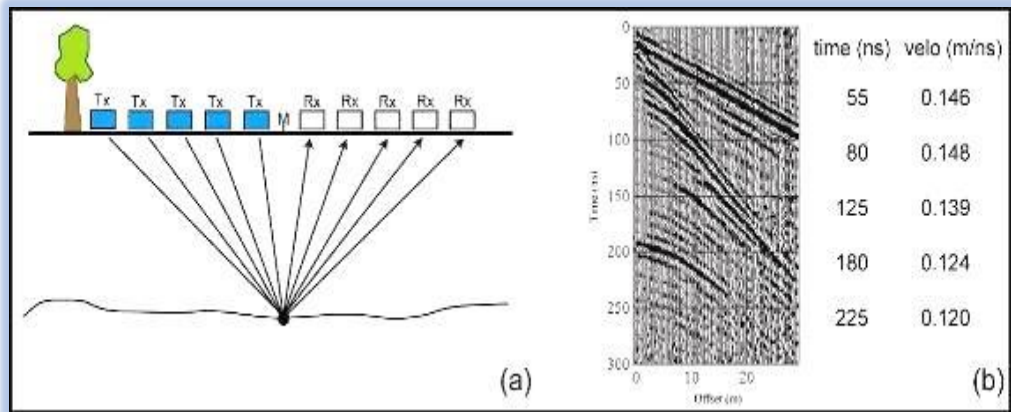
WARR olarak kısaltılan geniş açılı yansımada ve kırılma olarak bilinen ve amacı elektromanyetik dalganın hız bilgisini hesaplamak olan veri toplama yönteminde, verici Tx anteni sabit bir noktada tutulur ve alıcı Rx anteni, ilk konumuna göre artan uzaklıklarla ilerletilerek ölçü alınır. WARR anten dizilimi Şekil 2.11 ’de gösterilmektedir. Şekil 2.11’de de görüldüğü üzere bu ölçüm sisteminde, Tx ve Rx anteninin ota noktasından ara yüzeye çarparak gelen yansımalar kaydedilir. Kaydedilen yansımalar, Uzaklık(X)-Gidiş Geliş Zamanı (T) grafiğine aktarılır. T- X

grafiğine karşılık gelen $T^2 - X^2$ grafiği çizilir ve elde edilen grafikte çizilen doğrudan gelen ve yansımayla gelen dalgaların eğimlerinden hız ve derinlik bilgisi hesaplanır.



Şekil 2.11 WARR tekniği şematik gösterimi (Annan ve Davis, 1977).

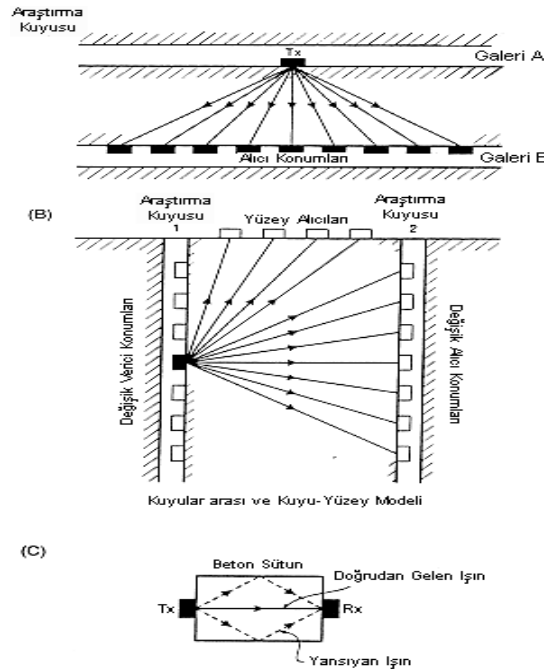
WARR ölçü tekniğinde ortam tekdüze kabul edilmektedir. Çünkü konumlanan alıcı antenlerin yansıtıcı ara yüzeye paralel olması gereklidir. Ancak yeraltı tekdüze ve yön bağımsız değildir ve her ortam tek düze kabul edilemez. Tekdüze olmayan, yansıtıcı yüzey ile ölçü profilinin paralel olmadığı durumlarda orta nokta (CMP) sondajı kullanılır. CMP sondajında Tx anteni ve Rx anteni aynı anda birbirinden uzaklaşır ve orta noktasından gelen yansıma kaydedilir. CMP sondajının şematik gösterimi ve bu yöntemle toplanmış veri kaydı Şekil 2.12’de verilmiştir.



Şekil 2.12 Ortak orta nokta metodu ile uygulanan yer radarı (GPR) ölçümü, (a) Ortak orta nokta metodunun şematik gösterimi, (b) Ortak orta nokta ile alınmış örnek bir yer radarı (GPR) profili (Anaran ve Şengül, 2020; De Menezes Travassos ve Menezes, 2004).

2.6.2.3 Yer Radarı Tomografisi ve Kuyu İçi Yer Radarı Uygulaması

Yanal süreksizlikleri saptamakta başarılı olan bu yöntemde alıcı anten ile verici anten karşılıklı kuyulara yerleştirilir. Verici antenden çıkan radar sinyalleri iki kuyu arasındaki ortam içerisinden geçerek sürekli olarak alıcı antene ulaşır ve ortamın bağıl dielektrik katsayısı haritalanır. Yer Radarı tomografisi yönteminde verici (Tx) ve alıcı (Rx) anteni arasındaki mesafe bilinmektedir. Yöntemde karşı kuyuya iletim temel esas olduğundan, düşük frekanslı ve boyutu küçük cihazlar kullanılır. Antenlerin durumları ve aralarındaki uzaklıklar bilindiği sürece, uygun ışın yolunun ortalama radyo dalga hızını hesaplamak basittir. Eğer seyahat zamanlarına ek olarak sinyal genliği ölçülürse, sönüm saptanabilir (Annan ve Davis, 1977). Yöntem kalınlığı bilinen maden galerilerinde ve duvar restorasyonu çalışmalarında verimli sonuçlar üretmektedir. Şekil 2.13'te tomografi uygulamasının şematik gösterimi verilmiştir. Şekil 2.13.a bir maden galerisine yerleştirilen verici ve alıcı antenlerin konumunu, Şekil 2.13. b karşılıklı iki kuyuya ve yüzeye yerleştirilen antenlerin yansıma profilini, Şekil 2.13. c bir duvar üzerinde alınan radar tomografi ölçüsünde dalgaların yönünü göstermektedir.



Şekil 2.13 Kuyu yer radarı yöntemleri. (a) Bir madende galeriler içerisinde, (b) kuyular veya kuyu-yüzey arasında, (c) Bir beton sütun içerisinde (Annan ve Davis, 1977).

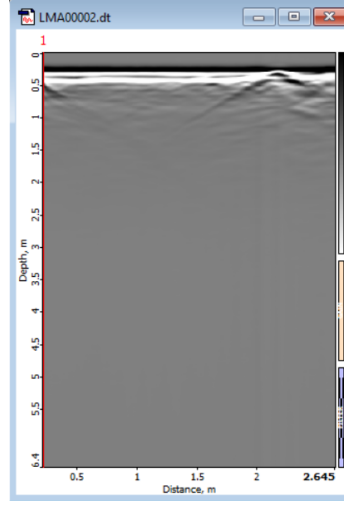
2.7 Yer Radarı Yönteminde Veri İşleme

Yer radarı yönteminde arazide toplanan ham veriler, gürültülü ve karmaşık verilerdir ve dolayısıyla zemin, yapı, aranan materyal ilgili yorum yapılmasına uygun değildir. Çünkü elektromanyetik dalga yer içerisine gönderildiğinde, alıcı anten tarafından yalnızca bu dalga sonucu oluşan yansımalar kaydedilmez. Alıcı anten yansımaların yanında rastgele veya düzenli gürültüleri de kaydettiği için görüntü karmaşık bir hal alır. Gürültülerin yanı sıra jeolojik birimin fiziksel özellikleri nedeniyle elektromanyetik dalganın genliğinin bir kısmı sönümlenir yani tamamı iletilmez veya yansımaz. Şekil 2.14'te ham radargram örneği görülmektedir. Ham radargramda da görüldüğü üzere, cihaz kaynaklı, zemin kaynaklı, boşluk kaynaklı yüksek genlikli gürültüler, düşük genlikli radar sinyallerini bastırır, sönümler ve veriden atılmazsa aranılan derinlik ve hız hesaplanamaz. Bu nedenle, GPR arazi uygulaması sonucu elde edilen ham radargram çeşitli yazılımlar ile veri işlem aşamalarından geçirilerek gürültüden ayrıştırılır ve genlik kazanımı sağlanır. Veri işleme adımları iki boyutlu ve üç boyutlu olabilir. Hız analizi derinlik analizi yapmak için iki boyutlu çözümleme yeterli iken, seviye haritaları, uzanım ve şekil tespiti için üç boyutlu çözümleme de gereklidir.

Bu tez çalışmasında veriler hız analizi için Geolix ve Prism programları ile üç boyutlu modelleme ve seviye haritası için GPRSlice programı ile değerlendirilmiştir.

2.7.1 Yer Radarı Yönteminde İki Boyutlu Veri İşleme Adımları

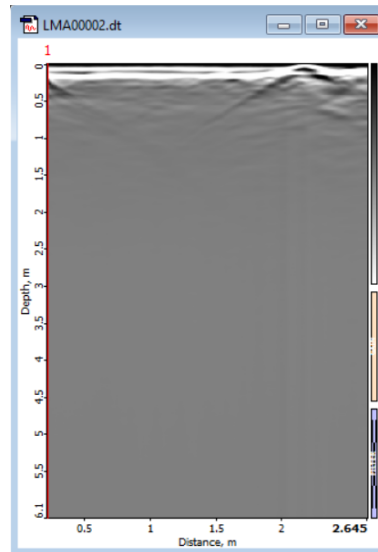
1. Veri programa uygun formatta yüklenir. Radar dosyaları, kullanılan cihazın kendi formatına göre kaydedilir ancak her program her formatı açmaz. Bu nedenle öncelikle veri programa uygun hale getirilir. Ve ham radargram olarak açılır. Ham radargram örneği Şekil 2.14' verilmiştir.



Şekil 2.14 Ham radargram

2. Başlangıç Zamanı Düzeltmesi

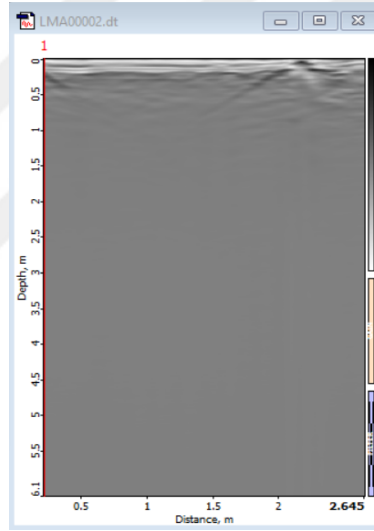
Alıcı ve verici anten doğrudan zemine temas etmez. Çünkü cihazda metrenin bulunduğu ve ölçüm profilini ölçen tekerlekler bulunur. Bundan dolayı radargramda yansımalar doğrudan 0.0 zamanında başlamaz. Buna ek olarak, verici antenden alıcı antene ilk ulaşan doğrudan dalga da zamanda kaymaya neden olur. Başlangıç zamanı düzeltmesi uygulanan veriden hava ve doğrudan dalga etkisini atarak başlangıç zamanını ve başlangıç derinliğini 0 olarak ayarlar. Böylece, Şekil 2.15'te bir önceki adımda ham hali verilmiş olan veriye başlangıç düzeltmesi uygulanmış olur ve veri 0.0 noktasına getirilmiş olur.



Şekil 2.15 Başlangıç zamanı düzeltmesi uygulanmış veri

3. Dewow Filtresi

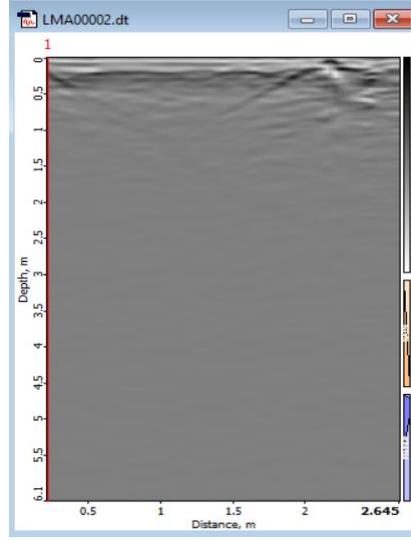
Elektromanyetik dalga yer içerisinde ilerlerken elektrik alan ve dolayısıyla elektrik akımı oluşturur. Oluşan bu akım nedeniyle, çok düşük frekanslı gürültüler radargramda gerçek veriyi örter. Buna “wow” etkisi denir (Kütükcüoğlu, 2020). Akım kaynaklı bu gürültüyü veriden atmak için yüksek geçişli süzgeç çalışma ilkesine dayalı ve “dewow” olarak adlandırılan frekans süzgeçleme işlemi yapılır. Şekil 2.16’da uygulanan yüksek geçişli süzgeç ve Şekil 2.17’de süzgeç sonucu oluşan radargram gösterilmektedir. Uygulanan süzgece göre frekansı 3 Mhz ve altında yer alan sinyaller veriden atılmış olur. Otomatik olarak veriye uygulanan bu süzgecin çalışma ilkesi aslında her iz için tek uygulamasıdır. Her iz üzerinde onu baskılayan düşük frekanslı dalgayı süzer.



Şekil 2.16 Dewow filtresi uygulanmış veri

4. Kazanç İşlemi (Automatic Gain Control (AGC))

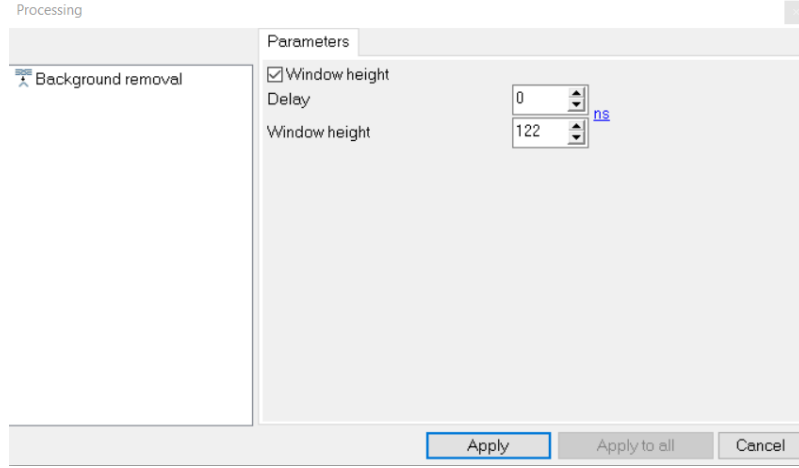
Elektromanyetik dalganın yayıldığı ortamda uzaklığa bağlı olarak sinyalin genliğinde azalma ve varış zamanında gecikme olur. Genlik azalımı veri yapısını etkileyeceğinden yorumlama güçleşir ve hız ve derinlik hesapları doğru yapılamaz. AGC kazanç süzgeci, her bir iz üzerinde sönüm etkisi ve derinlik etkisi ile sönümlenen veriyi güçlendirerek, görünürlüğü artırır. Bu süzgeç veride hem genliği değiştirir hem de görünürlüğü artırır. Şekil 2.17’de AGC süzgeci uygulanmış, dewow süzgeçli veri gösterilmiştir.



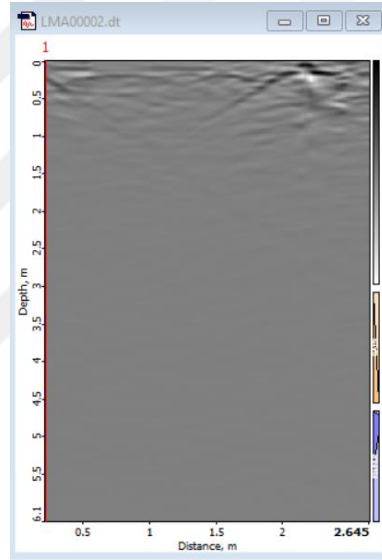
Şekil 2.17 AGC genlik kazanımı filtresi uygulanmış veri

5. Arka Planı Giderme (Background Removal) İşlemi

Bir profil boyunca toplanan tüm dalgacıkların birleşiminden oluşan radargramın 0.0 zamanında, sürekli ölçü alımından kaynaklanan ve ana veriyi etkileyen gürültüler oluşur. Hem yatay hem de düşey çizgisellik olarak beliren bu izlerin giderilmesi amacıyla, Arka Planı Giderme İşlemi uygulanır. Arka Planı Giderme işlemi ile yatay boyunca oluşan gürültüler veriden atılır. Düşey çizgisellik ise tekrarlı yansıma olarak adlandırılır. Tekrarlı yansıma yüzey etkisi ile başlayıp derine doğru devam eder. Bu süzgeç uygulanırken seçilen pencere büyüklüğü, AGC pencere sayısı ile aynı seçilir. Çünkü gürültü gibi görülen ancak veri niteliği taşıyan izlerin radargramdan atılmaması gerekir. Seçilen pencere büyüklüğü Şekil 2.17’de ve süzgeç uygulanmış veri Şekil 2.19’da verilmiştir.



Şekil 2.18 Arka Planı Giderme (Background Removal) Süzgeci için pencere büyüklüğü

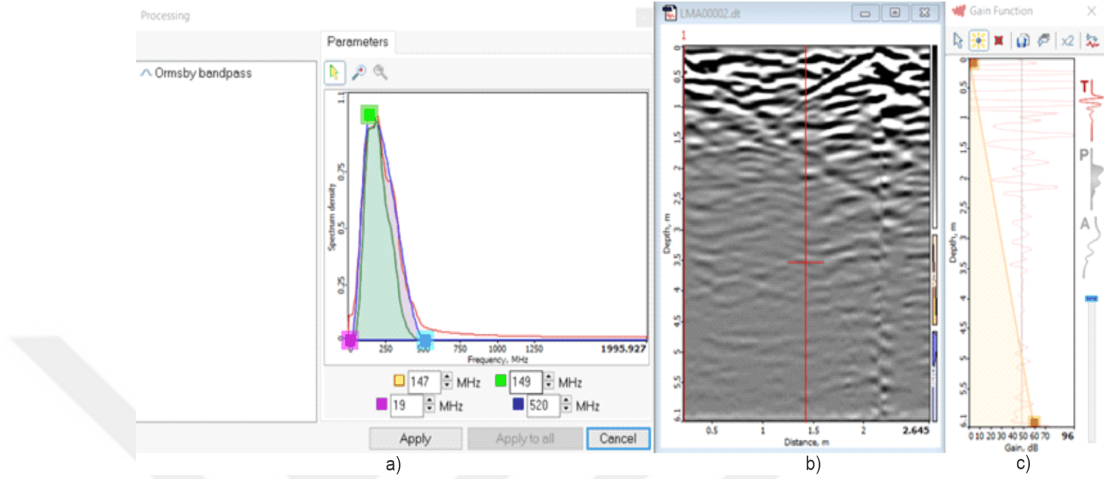


Şekil 2.19 Arka Planı Giderme (Background Removal) Süzgeci uygulanmış ve yüzey gürültülerinden arınmış veri

6. Frekans Süzgeçleme ve Genlik Arttırımı

Cihaz ve ölçü alımından kaynaklanan gürültülerin yanı sıra, çevresel ve insan kaynaklı gürültüler de mevcuttur. Bu nedenle veriye bir süzgeç daha uygulamak gereklidir. Bu süzgeç ise “Bandpass filtresi” olarak adlandırılan ve hem alçak hem yüksek geçişli süzgeç özelliği olan band geçişli süzgecin veriye uygulanmasıdır. Bu süzgeçte, verideki belirgin iki frekans arasındaki değişimleri geçirip, bu alanın dışındakileri veriden atarak veriyi belirginleştirir. Band geçişli süzgeç uygulayıp, belirgin frekansları daha da yorum yapılabilir hale getirdikten sonra veriye genlik kazanımı işlemi yapılır. Genlik kazanımı

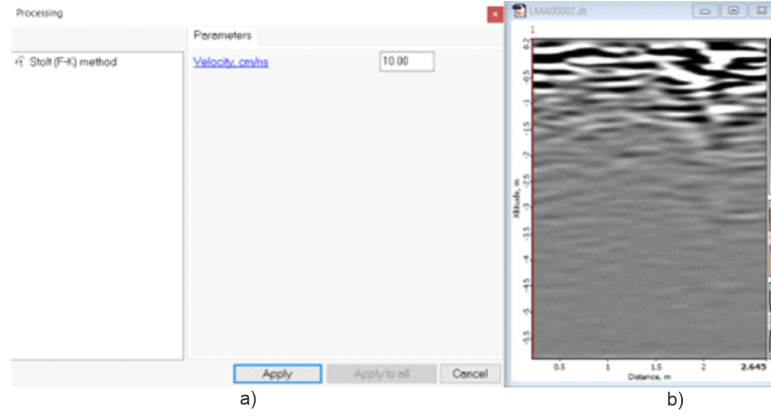
ise “kazanç (gain) işlevi” olarak adlandırılan işlev ile yapılır. Veriyi bozmadan belirli bir oranda arttırılan genlik, derinlik analizi için önemlidir. Şekil 2.19.a’da veriye uygulanan band geçişli süzgeç, Şekil 2.19.b’de süzgeç ve kazanç uygulanmış veri ve Şekil 2.19.c’de uygulanan kazanç işlevi verilmiştir.



Şekil 2.20 a) Seçilen band geçişli süzgeç aralığı. b) Band geçişli süzgeç uygulanmış ve kazanç işlevi uygulanmış veri. c) Uygulanan kazanç işlevi

7. Göç (Migration)

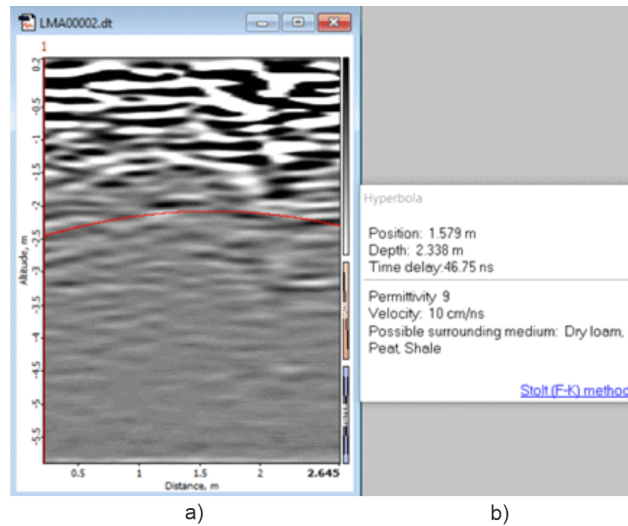
Yeraltı tekdüze değildir. Bu nedenle kaydedilen yansımaların hepsi doğrudan yansımanın altından değildir. Yansımanın yerinin çıkış noktası ve yansıma noktasına göre yeniden düzenlenmesi işlemine göç işlemi denir (Kütükcüoğlu, 2020). Yansımanın gerçek yeri göç işlemi ile bulunur. Göç işlemi veriye iki şekilde uygulanır. Bu çalışmada F-K Stolt yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde frekanslar zeminin hız bilgisini girilmek suretiyle dalga sayısına çevrilir. Burada Tablo 2.1’de verilen jeolojik birimlerin elektromanyetik hızlarından yararlanılır. Şekil 2.20’ de göç uygulanmış veri, asfalt üzerinden toplanmış veri olduğu için hızı 10 m/s olarak seçilmiş ve göç işlemi uygulanmıştır. Her zaman asfalt gibi düz bir zemin üzerinde veri toplanmayabilir. Engebeli bir arazide toplanmış veri setinde göç işlemi yapmadan önce topoğrafya bilgisini girip, topoğrafya düzeltmesi yapmak gereklidir.



Şekil 2.21 a) Seçilen hız değeri. b) Göç süzgeci uygulanmış veri.

8. Hız Analizi

Uygulanan süzgeçler sonucu elde edilen radargramda gözlemlenen yansımalarla karşılaştırılan yansıma hiperbollerine atanan değerlerin birebir karşılaştırılması sonucu elektromanyetik dalganın hızı hesaplanır. Şekil 2.21’de temel yansıması gözlemlenen 2.00-2.50 m arasında çok net gözlemlenen radargram örneğinde, yansıma hiperbolü gözlemlenen yansıma ile karşılaştırılmıştır. Çakışmayı sağlayan hız değeri 10 m/s’dir. Şekil 2.21.b’de derinlik, zaman, dielektrik geçirgenlik (permittivity) değerleri gözlemlenmektedir.



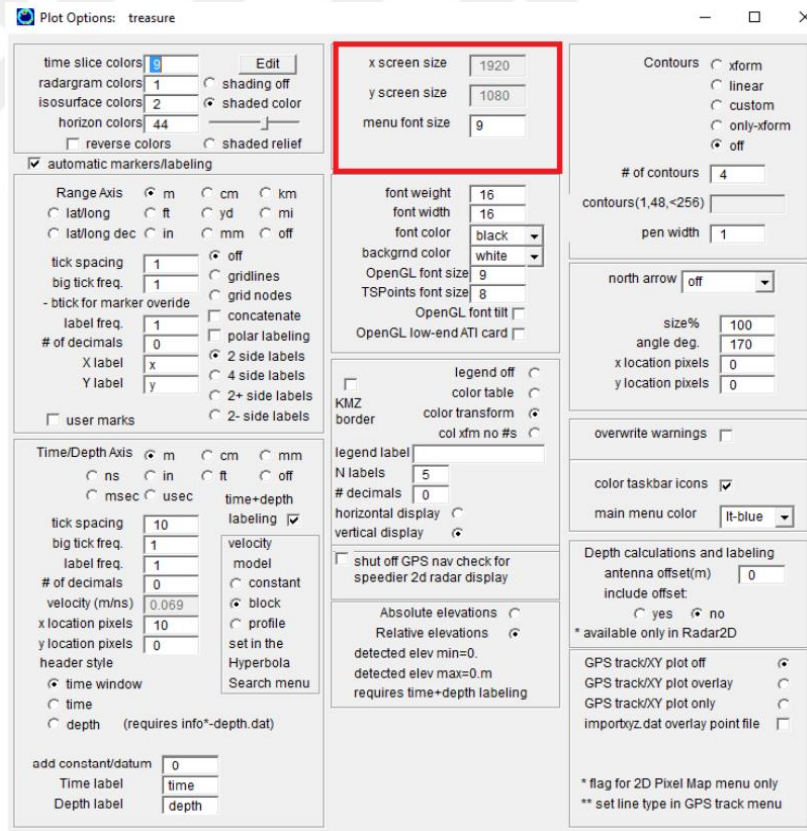
Şekil 2.22 a) Çakıştırılan yansıma hiperbolü. b) Radar analizi sonucu elde edilen zaman, derinlik, hız ve geçirgenlik bilgisi

2.7.2 Yer Radarı Yönteminde Üç Boyutlu Veri İşleme Adımları

GPRSlice programında üç boyutlu modelleme için gerekli veri işlem adımları aşağıda verilmektedir.

1. Veri Parametrelerinin Sisteme İşlenmesi

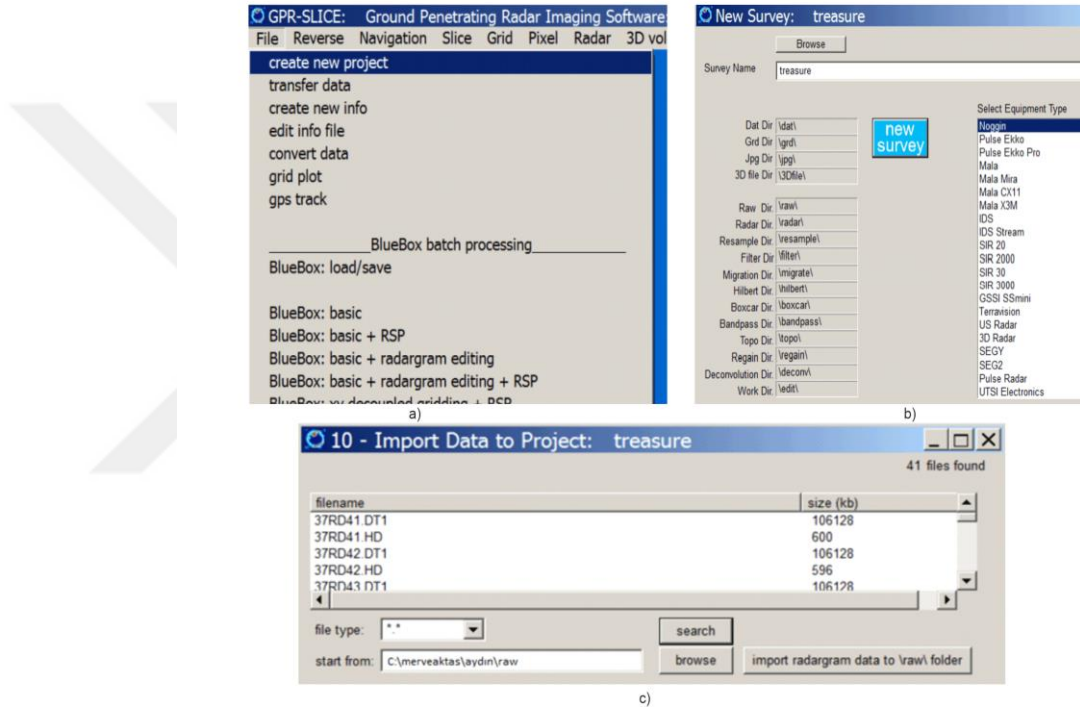
Veri seti programda açılmadan önce program ana ekranında bulunan “Plot Options” seçeneği kullanılarak, veri hakkında tanımlamalar yapılır. Ortamın hız bilgisi, ortamın dielektrik sabiti bilgileri programa tanımlanır. Girilecek verinin birimleri işaretlenir. Bu çalışmada X profilinin uzunluğu metre ve zaman birimi olan t, nanosaniye cinsinden işaretlenmiş ve hız bilgisi 0,07 m/ns olarak girilmiştir. Hız bilgisi Tablo 2.1’den yararlanılarak uygun zemine göre seçilmiştir. Şekil 2.22’de Plot Options ekranı gösterilmiştir.



Şekil 2.23 İşlenecek olan veri setine ait parametrelerin sisteme tanıtılması

2. Programda Yeni Proje Oluşturulması

Kullanılan modelleme programı, yapılan her projeyi bünyesinde barındırdığı için yeni veri setini açmadan önce yeni proje oluşturulur ve veri toplarken kullanılan cihaz programa tanıtılır. Bu veri işlem adımlarını anlatmak için kullanılan veriler, Noggin GPR cihazı ile Aydın’da toplanmıştır. Daha sonra veri setinin yer aldığı klasör seçilerek yeni bir çalışma sayfası oluşturulur. Oluşturulan proje, cihaz seçimi ve çalışma sayfası Şekil 2.23’te gösterilmiştir.

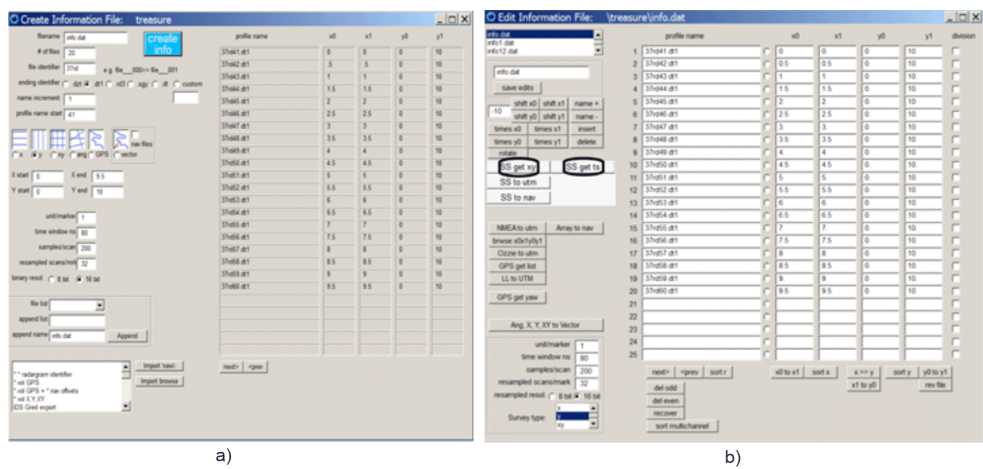


Şekil 2.24 a) Oluşturulan yeni proje. b) Seçilen proje adı ve cihaz bilgileri. c) Seçilen verinin formatı ve proje içerisindeki veriler

Şekil 2.23.c’de görülen 3. adım, 1. adımda gösterilen butonda yer alan “transfer data” seçeneğini kullanarak oluşturulur. Transfer data komutundan sonra açılan ekranda verinin formatı ve yeri seçilir. “Search” seçeneği kullanılarak istenilen formattaki veriler programa çağırılır. Programa çağırılan veriler, “import radargram data to \raw\folder” seçeneği kullanılarak, C klasörü içerisinde programın oluşturduğu proje içerisine atılarak, proje tarafından okunabilir hale gelir.

3. Oluşturulan Projenin Profil Bilgilerinin Girilmesi

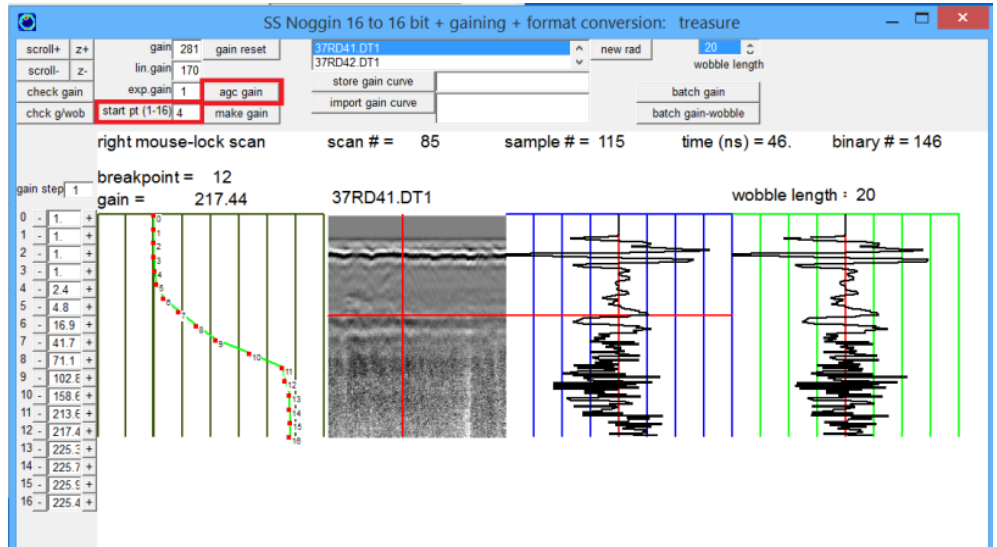
“Raw” klasörü içerisine atılan veriler, “Create new info” seçeneği ile ekrana getirilir ve açılan pencerede toplanan verilerin hangi profilde olduğu ve profillerin başlangıç ve bitiş noktaları girilir. Girilen bilgiler tamamlandıktan sonra “Create info” seçeneği ile seçtiğimiz özelliğe uyan tüm veriler ekrana gelir. Yapılan işlem kaydedilir ve “Edit\info file” seçeneği kullanılarak, kayıt türü, kayıt uzunluğu (tekerleğe göre kayıt boyu) girilerek ölçü profilinin geometrisi oluşturulur. Tekerleğe göre kayıt boyu program tarafından okunur ancak problem bazı durumlarda küsuratları ihmal edebilir. Küsuratlar ihmal edildiğinde kayıtlar Bölüm 2.7.1’de anlatılan Prism programında açılır ve gerçek uzunluklarına göre veri setinin geometrisi oluşturulur. Burada kullanılan Üç boyutlu model, seviye haritalarının üst üste gelmesinden oluşur. Bu nedenle seviye haritaları geometriye doğru oturtulmalıdır. Şekil 2.24’te geometriyi oluşturma aşamaları gösterilmiştir. Şekil 2.24.a’da ölçümler yalnızca Y profilinde olduğundan Y profili işaretlenmiş olup, X ve Y’nin başlangıç ve bitiş değerleri girilmiştir. Şekil 2.24.b’de gösterilen verilerin gerçek koordinat bilgileri ve kayıt süreleri “get ts” ve “get xy” seçenekleri ile oluşturulmaktadır. “SS get ts” nanosaniye cinsinden kayıt süresini, “SS get xy” ise metre cinsinden tekerleğin ölçtüğü kayıt boyunu göstermektedir. Komutun başında yer alan SS ifadesi cihaz türüne göre değişiklik gösterir. Kullanılan cihaz GSSI olduğu zaman, veri işlem yaparken “GSSI get ts” ve “GSSI get xy” seçeneği oluşmaktadır. Oluşturulan geometri bilgisi “save” butonu ile kaydedilir. Ve geometri harita olarak oluşturulan proje içerisine kaydedilir.



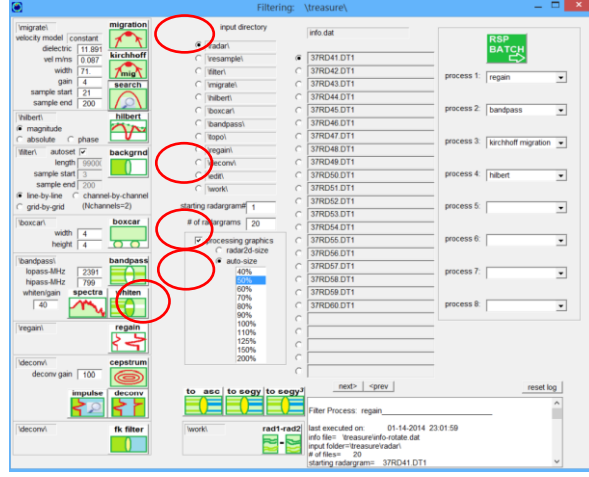
Şekil 2.25 a) Oluşturulan projenin profil seçimi. b) Y profilinde alınan ölçülerin zaman ve kayıt uzunluğunun girilmesi.

4. Veri Setini Güçlendirme

Ham olarak GPRSlice içerisinde oluşturulan proje içerisine atılan veri seti “Convert data” seçeneği ile 16 bit veya 32 bit olacak şekilde seçilerek, “radar” klasörü içine atılır. Burada 32 bit olarak seçilmiştir. Radar klasörü içerisine atılan ham veri setine, Bölüm 2.7.1’de anlatılan veri güçlendirme adımlarının tamamı uygulanır. Öncelikli olarak, Kazanç Süzgeci (AGC) ardından, Arka Planı Giderme (Background Removal) Süzgeci ve son olarak Frekans Süzgeçleme ve Genlik Arttırımı (Spectra gain ve Bandpass Filtresi) uygulanır. Şekil 2.25’te veriye uygulanan Kazanç Süzgeci eğrisi gösterilmiştir. Kazanç süzgeci bir veri üzerinde düzgün bir kazanç eğrisi oluşturmak koşuluyla işaretlenir ve daha sonra “batch gain wobble” seçeneği ile tüm veriye uygulanır. Kazanç uygulanan tüm veri radar klasörü içerisine kaydedilir ve arka planı giderme süzgeci için hazır hale gelir. Şekil 2.26’da gösterilen “radar\background removal” seçeneği ile tüm veriye arka planı giderme süzgeci uygulanır ve otomatik olarak kaydedilir. “Filter\spectragain” seçeneği kullanılarak, belli bir veri arası sıkıştırılır ve veriye hem kazanç hem de pencere uygulanır. Bu filtrelere ek olarak, bant geçişli süzgeç, akım düzeltmesi ve göç işlemi de bu aşamada yapılır. Daha sonra ise Frekans süzgeçleme uygulayarak veri seviye haritası için hazır hale getirilir.



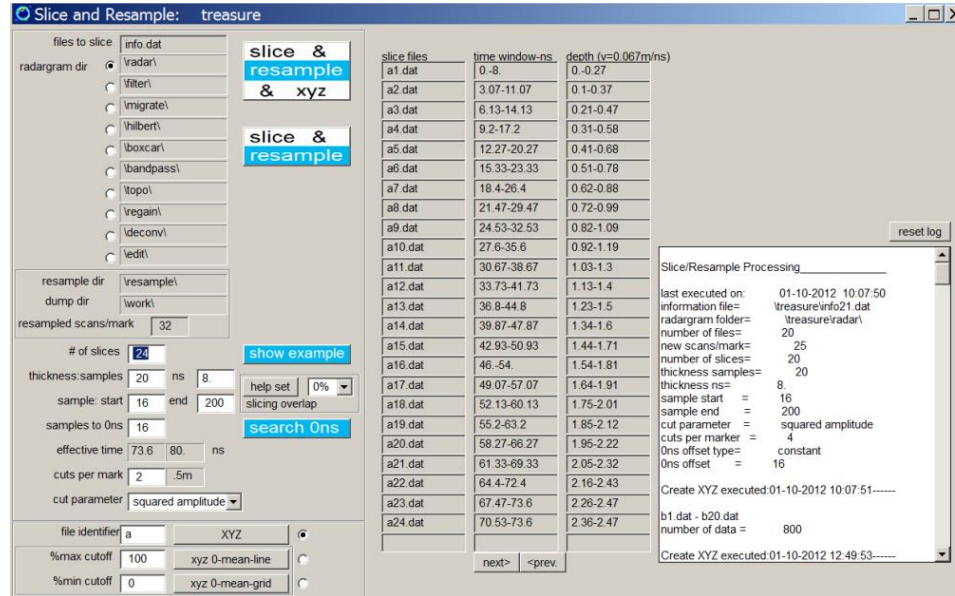
Şekil 2.26 a) Uygulanan Kazanç Süzgeci (AGC).



Şekil 2.27 Uygulanan arka planı giderme, bant geçirme ve veri sıkıştırıp pencere sayısını belirleme süzgeci ile akım düzeltmesi ve göç işlemi.

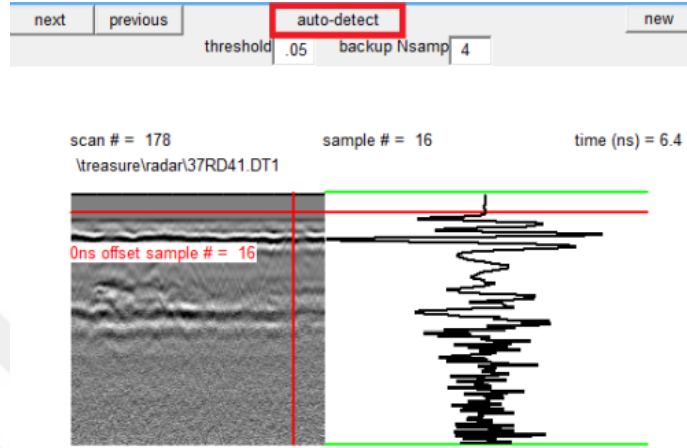
5. Seviye Haritalarının Oluşturulması

Uygulanan süzgeçler sonucu oluşan işlenmiş radargramlar, oluşturulan proje içerisinde radar klasörüne seviye haritası oluşturmak üzere otomatik olarak kaydedilir. “Slice” bölümü kullanılarak oluşturulacak seviye haritası için bilgiler girilir. Seviye sayısı, örnekleme aralığı gibi bilgiler girildikten sonra “slice resample” seçeneği kullanılarak girilen bilgilere göre seviyeler oluşturulur. Şekil 2.27’de seçilen veri klasörü, örnekleme aralığı, seviye sayısı ve oluşturulan seviyelerin bilgileri gösterilmiştir.



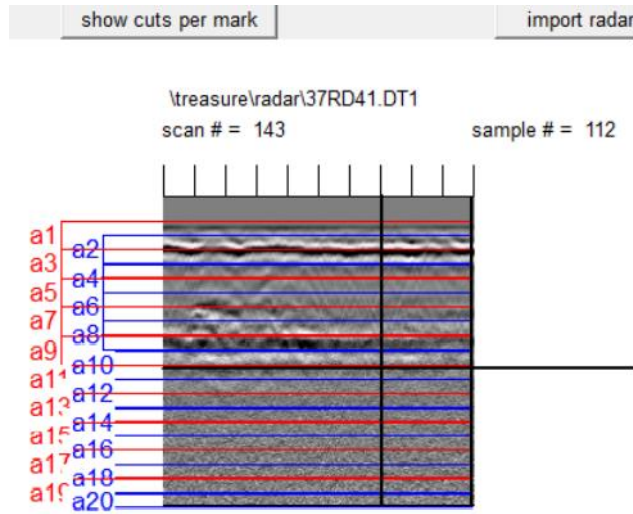
Şekil 2.28 Seçilen veri klasörü, girilen seviye sayısı ile örnekleme aralığı ve oluşturulan seviyeler.

Oluşturulan radargramlarda, cihazın ölçü alımından ve havadan kaynaklı olan gürültü mevcuttur. Mevcut olan bu gürültüyü veriden atmak için “slice” ekranındaki “search ons” seçeneği kullanılır. Search ons seçeneği ile radargram serisinden biri ekrana gelir ve bu verideki hava boşluğu işaretlenip, “auto-detect” seçeneği ile tüm veriye uygulanır. Şekil 2.28’de hava boşluğunu veriden atmak için yapılan veri işlem adımı gösterilmiştir.



Şekil 2.29 Cihaz ve hava boşluğundan kaynaklı oluşan gürültünün veriden atılması

Gürültü veriden atıldıktan sonra, “slice” ekranında yer alan “help set” bölümüne bindirme yapılması istenen yüzde değeri girilir. Bu çalışmada bindirme yüzdesi %50 olarak seçilmiş ve seviyeler oluşturulmuştur. Yapılan %50 bindirme sonucu oluşan seviyeler Şekil 2.29’da gösterilmiştir.

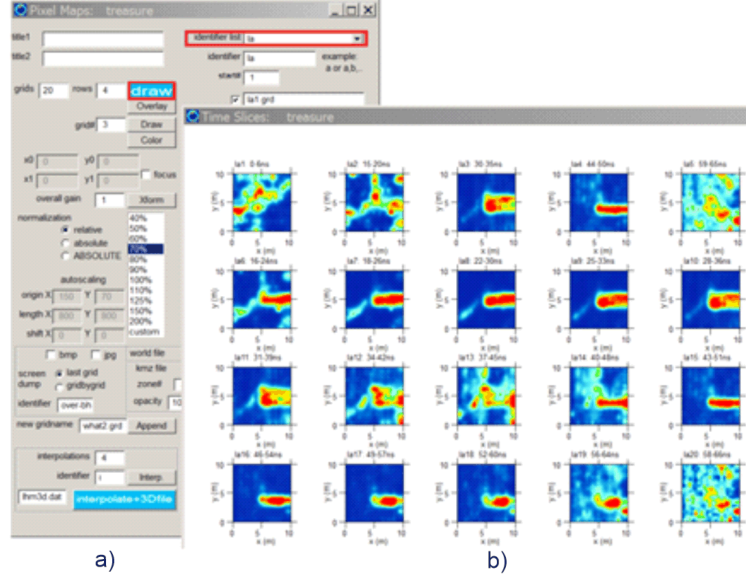


Şekil 2.30 %50 bindirme sonucu oluşan seviyeler

Yapılan bindirmeler sonucu oluşan seviyeleri seviye haritası şeklinde çizdirmek “Grid” butonu kullanılır. Açılan grid ekranında X ve Y doğrultusunda seviyelerinin aralığı ve başlangıç, bitişleri girilir. Hücre sınırlama yapması için “help set” seçeneği kullanılır. Yapılan ayarlamalardan sonra “gridding” seçeneğine basılır ve oluşturulan her seviyenin seviye haritası çizilir. Yapılan çizim ayarları Şekil 2.30’da verilmiştir.

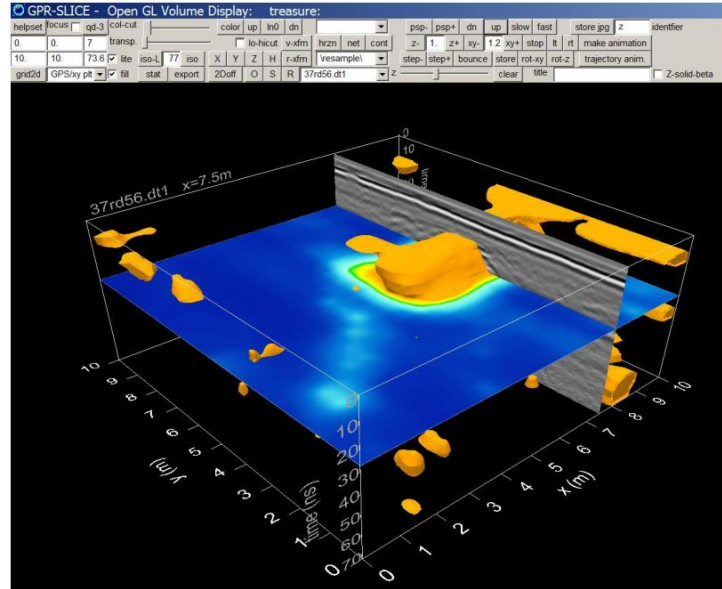
Şekil 2.31 Seviye haritası oluşturmak için girilen grid bilgileri

Seviye haritası çizmek için bilgiler girildikten sonra çizdirip, kaydetmek için “pixel” butonu kullanılır. Açılan pixel ekranında, “identifier list” bölümünde oluşturulan seviye haritalarının bilgileri açılır. Daha sonra küçültme oranı ve yan yana çizdirme ayarları yapılır. Tüm seviyeleri ayrı ayrı çizmek için “grid by grid” seçeneği, tek bir sayfada hepsini çizmek için “last by grid” seçeneği kullanılır. Şekil 2.31.a’da yapılan çizim ayarları ve Şekil 2.31.b’de oluşan seviye haritaları görülmektedir.



Şekil 2.32 a) Yapılan çizim ayarları. b) Çizilen seviye haritaları

GPR yönteminde üç boyutlu modelleme oluşturulan seviye haritalarının birleştirilmesi ile oluşur. Seviye haritalarını birleştirip üç boyutlu model yapmak için pixel ekranında yer alan “interpolate +3D file” seçeneği kullanılarak 3D model dosyası oluşturulur. Oluşturulan 3D modeli çizmek için “open GL” butonu, katı model çizmek için ise open GL sayfasında yer alan “iso-l” butonu kullanılır. Seviye haritaları ile çizilen 3D model ve katı model Şekil 2.32’te verilmiştir. Verilen şekilde radargram, seviye haritası ve katı model birlikte gösterilmiştir.



Şekil 2.33 Katı model, seviye haritası ve radargram içeren 3D Yer Radarı modellemesi

BÖLÜM ÜÇ

LİTERATÜR ÖZETİ

Altyapı çalışmalarının ayrılmaz bir peyzaj, kültürel ve işlevsel unsurunu oluşturan sokak ağaçları, kentsel yaşamın vazgeçilmez unsuru olmuştur. Ancak artan şehirleşme karşısında inşa edilen yol yapılarındaki eksik uygulamalar, ağaç köklerinin kontrolsüz büyümesine ve ilerleyen süreçte yaya kaldırımlarında ve yollarda hasarlara neden olmaktadır. Bu hasar, öncelikle komşu toprağı yerinden eden ve kaldırım yüzeyinin ve bordürlerinin çatlamasına ve yükselmesine neden olacak kadar büyüyen köklerden kaynaklanmaktadır (Tighe, Li, Falls ve Haas, 2000). Tahribatsız yöntem olan Yer Altı Radarı yönteminin kullanılması yer altı düzensizliklerinin ve hasarın ne boyutta olacağı saptanarak yol güvenliğine ilişkin sorunların ortadan kaldırılıp, onarım faaliyetlerinin planlanmasına olanak tanır. Aşağıda verilen kapsamlı literatür çalışmaları, yer altı radarı kullanarak ağaç köklerinin belirlenmesi çalışmalarının özeti niteliğindedir. Yapılan çalışmalarda genellikle düşük frekanslı antenler tercih edilmiş olup, daha derini görme şansı yakalanmıştır. Bu tez çalışması kapsamında ise 350 MHz frekansa sahip bir antenle düşey yönde maksimum 2 m’de yüksek çözünürlük sağlayan bir anten tercih edilmiştir. Ağaç kökleri ile ilgili yapılan elektromanyetik çalışmaların temeli 1993 tarihine kadar uzanmaktadır. Torgovnikov (1993), yayınladığı makalede 5 cm’lik sabit bir kök çapına dayanarak toprağın ve hedefin dielektrik geçirgenlik, manyetik geçirgenlik ve elektriksel iletkenlik gibi elektromanyetik özelliklerini belirlemiş ve yapılan tahribatsız yöntemli çalışmalara ışık tutmuştur. Aspiron (1998) yere nüfuz eden radar kullanılarak akifer mimarisi analizi yaparken Torgovnikov (1993) tarafından hazırlanan elektromanyetik parametreleri geliştirmiş ve nem içeriğine göre elektromanyetik özellikleri yeniden yorumlamıştır.

- Hruska ve diğ. (1999) kök haritalama amacıyla tahribatsız yöntem olan yere nüfuz eden radarı kullanan ilk yazarlardandır. Büyük meşe ağaçlarının kök sistemlerini nispeten kuru bir deney ortamında 450 MHz frekanslı bir anten kullanarak inceleyen yazarlar, yere nüfuz eden radar sisteminin yıkıcı/bozucu olmadığını ve ağaçların kaba kök sistemlerinin dağılımının nispeten hızlı ve tekrarlanan ölçümlerine izin verdiğini kanıtlamışlardır.

- Cermak ve diğ. (2000) tarafından kentsel ağaç kök sistemleri ve bunların evlerin yakınında bulunmaları, zemine nüfuz eden radar kullanılarak analiz edilmiştir. Kök sistemlerinin üzerindeki zemin yüzeyi asfaltla kaplanmış ve büyüyen kök alanı izlenmiştir. Gerekli büyüme sağlandıktan sonra deney ortamında yer altı radarı ölçümü, 400 MHz anten vasıtasıyla kök sistemleri üzerinde gerçekleştirilmiştir.
- Wielopolski ve diğ. (2000, 2002) 1.5 Ghz merkez frekans anteni ile kökleri yerinde incelemek için bozucu olmayan bir görüntüleme işlemi olan yer altı radarı yöntemini önermiş, karbon emisyonuna ve sera gazı çıkışına topraktan sebep olan kök çürümesini yıkıcı olmayan ve daha az emek gerektiren GPR yöntemi ile araştırarak yerinde ağaç kök sistemlerini görüntüleyerek 3 boyutlu değerlendirmeler sunmuştur. Sunulan sonuçlar yer altı radarı yönteminin görüntü ağacı kök sistemlerine faydasını göstermektedir. Mevcut teknik yetenekler ve gelecekteki gelişmelerle, kökleri 2 ila 3 mm çapında görüntülemenin gerçekçi bir hedef olduğunu ispatlamıştır.
- Butnor ve diğ. (2001) Amerika Birleşik Devletleri'nin güneydoğusundaki çok çeşitli toprak koşullarında kökleri incelemek için yer altı radarı kullanmanın fizibilitesini değerlendirmişlerdir. Her bölgede, uygun antenin (400 MHz'e karşı 1,5 GHz) seçimi test edilerek, yer altı radarı yönteminin kökleri ve gömülü organik kalıntıları çözme yeteneği, kök boyutu ve kök biyokütlesi ile değerlendirilmiştir. Yapılan çalışma sonucunda köklerin çözünürlüğünün en iyi kumlu, aşırı derecede drene edilmiş topraklarda olurken, yüksek toprak suyu ve kil içeriğine sahip toprakların çözünürlüğü ve gözlem derinliğini ciddi şekilde bozduğu görülmüştür.
- Stokes ve diğ. (2002) yer altı radarı yöntemini kentsel ağaçların kök sistemlerini yerinde haritalama etkinliğini değerlendirmek için örnek ağaçların tabanları çevresinde uygulamışlardır. Test sonuçları kapsamında kök sistemleri toprağı köklerden çıkarmak için kullanılan süpersonik bir hava akımı üreten bir hava küreği ile kazılmış ve yer altı radarı görüntüleri ile karşılaştırmışlardır. Gerçek köklerin yer altı radarı verilerinden elle çizilmiş görüntülerle karşılaştırılması, tekniğin yalnızca yatay düzlemde büyük kökleri haritalamak için güvenilir olduğunu göstermiştir. yer altı radarı yöntemindeki verilerdeki

çoğu hatanın, düşey düzlemde elektromanyetik sinyale paralel uzanan köklerden kaynaklandığı gözlemlenmiştir.

- Annan ve diğ. (2002) yer altı radarı sensörünün beton üzerinde nasıl konumlayacağını belirlemiştir. XX verici ve alıcı dipollerinin her ikisinin de anten hareket yönünde hizalandığını ve YY dipol eksenlerinin dik (ortogonal) olarak hizalandığını göstermiştir ve bu parametreler asfalt üzerinde alıcı ve verici dipollerin konumlanması için ileride yapılan çalışmalara ışık tutmuştur.
- Pérez-Gracia ve diğ. (2002) polarimetrik teknikler kullanarak ağaç kök sistemlerini haritalamak için yer altı radarı kullanımını analiz etmişlerdir. Çalışmada hem gövde analizi hem de kök analizi yapılmıştır. 2 farklı frekansta anten kullanılarak paralel hatlar boyunca ölçü alınmış kök derinliğini ve kök hızını hesaplamışlardır. Köklerin incelenmesi sırasında en iyi sonuçların alıcı ve verici dipolleri antenin hareket yönüne dik olan 900 MHz merkez frekansı olan antenle elde edildiğini göstermişlerdir.
- Annan (2003) ve Conyers (2004), yer altı radarı yönteminin farklı kullanım alanları ile ilgili yaptıkları çalışmalarda yeraltında yayılan yer altı radarı dalgalarının üç boyutlu doğasından dolayı kök görüntüsü oluşturulurken hedefin geometrisinin önemli olduğunu göstermiş ve ileride yapılacak çalışmalara ışık tutmuşlardır.
- Butnor ve diğ. (2003) kaba kök sistemlerini haritalamak ve kök biyokütlesini tahmin etmek için yer altı radarı yöntemini kullanmışlar ve yer altı radarı yönteminin kök tespitinde başarılı bir şekilde uygulanabilmesinin sahaya özgü olduğunu çok sayıda etmenin kök çözünürlüğünü olumsuz anlamda etkilediğini göstermişlerdir.
- Nicolotti ve diğ. (2003) ağaçlardaki gövde çürümesinin saptanması için elektrik, ultrasonik ve yer altı radarı tomografinin uygulamalarını kullanmışlar ve yer altı radarı tekniğinin, iç çürümüş kısım ile dış bölümü arasında ölçülen elektromanyetik empedansın yüksek kontrastın, yansıma modunda radar edinimi kullanılarak ağacın dış ve çürümüş bölümü arasındaki arayüzün saptanmasına olanak sağladığını kanıtlamışlardır.
- Barton ve Montagu (2004), bir ağacın kök sistemi toplam biyokütlesinin %10 ila 65'ini oluşturduğundan ağaç kök sistemlerini incelemenin gerekli olduğunu vurgulamışlar ve bu inceleme için tahribatsız yöntem olan yer altı radarı

yöntemini seçmişlerdir. İki farklı derinliğe gömülü köklere dik kesitler alınarak radar profillerinde karakteristik yansıma hiperbolleri oluşturulmuş ve çoğu kök konumunun görsel olarak tanımlanmasına olanak sağlamışlardır. Sonuçları sinyal gücünden bağımsız olarak üreten yer altı radarı yönteminin ağaç kök sistemlerini incelemek için değerli bir araç haline getirebileceği sonucuna varmışlardır.

- Miller ve diğ. (2004) yüksek kil veya su içeriğine sahip topraklarda ve engebeli arazilerde yer altı radarı yönteminin zor ve daha az etkili olduğunu belirlemişler ve doğru kök derinliği ve boyutu ölçümleri için uygun saha koşullarının hala net belirlenemediğini göstererek sonraki çalışmalara ışık tutmuşlardır.
- Butnor ve diğ. (2006) yer altı radarı ile yansıma modunda yüzey tabanlı antenler kullanarak ağaç köklerini saptamak ve haritalamak için kullanmışlardır. Tomografi ile yüzeye yakın odunsu hedefleri modellemek için çapraz kuyu (cross-hole) ve sondaj kuyusundan yüzeye seyahat süresi verilerinin etkinliğini test etmek için gömülü kütükler üzerinde bir dizi kontrollü deneyler kullanılmıştır. Bu sonuçlar kullanılarak beş *Pinus silvestris* ağacı sondaj kuyusundan yüzeye radarla taranmış ve kök sistemlerinin tomogramları oluşturulmuştur. Bu çalışma, düşey ağaç köklerini incelemek için sondaj radarının kullanıldığı ilk rapordur.
- Morelli ve diğ. (2007) çam ormanı ve kavak plantasyonunda ağaç kökleri hacmini incelemek için yer altı radarı ve Elektrik Direnç Tomografisi (ERT) kullanmışlardır. Çalışmanın yer altı radarı bölümünde kök sisteminin bir tür 3B yeniden yapılandırmasını elde etmeye çalışmak amacıyla test ağaçlarının her birinin etrafında iki yönde paralel çizgilerden oluşan bir karelaj (grid) elde edilmiş ve yer altı radarı yönteminin ağaç köklerinin toprak altındaki dağılımını daha yüksek çözünürlükle tespit edilebildiğini kanıtlamışlardır.
- Stover ve diğ. (2007) büyük köklerin, yer altında karbon tutulmasında kritik bir rol oynamasından ötürü yer altı ekolojisi açısından bir boşluk olduğunu düşünerek kaba köklerin zaman ve mekânda büyümesi ve dağılımını yer altı radarı kullanarak ölçmüşlerdir. ABD, Florida, Kennedy Uzay Merkezi'ndeki bir bodur meşe ekosistemindeki üstü açık bir oda deneyinden kaba kök biyokütlesi 1500 MHz'lik bir anten ile ölçülmüştür. Uygulama sonucunda yer

altı radarı sinyal yansıması ile biyokütle arasında anlamlı bir ilişki bulunmuş ve bu tahribatsız yöntemin, yer altındaki kaba köklerin hızlı ve tekrarlanabilir bir şekilde ölçülmesi için çok umut verici olduğu ortaya konmuştur.

- Attia al Hagrey (2007) köklerde ve ağaç gövdelerinde su durumunu ve hareketini incelemek için elektrik, radar ve sismik yöntemlerin uygulamalarını kullanmıştır. Bir kök bölgesinin elektriksel özelliklerinin, nem içeriğinin bir sonucu olması ve nem içeriğinin dielektrik ve mekanik özellikleri de güçlü bir şekilde etkilemesi bu çalışmada jeofizik yöntemlerin uygulanarak kök bölgesini görüntülemenin ana amacıdır. Elektriksel görüntüleme dirençli, odunsu kökleri iletken, yumuşak köklerden ayırırken her iki kök tipinin de düşük radar hızları ve yüksek sönümlenme ile tanımlandığı görülmüştür. Tek kökler, radargramlarda kırınım hiperbollerini üretmiştir.
- Butnor ve diğ. (2008) Tarımsal Jeofizik El Kitabı'nda yayımlanan bildirilerinde bitkileri, özellikle ağaç kökü dağılımını, boyutunu, morfolojisini ve biyokütlesini incelemek için yerinde tahribatsız yüksek hassasiyetli ölçümler sağlama konusundaki yetenekleri nedeniyle yer altı radarı yönteminin kullanımına dikkat çekmişlerdir.
- Dannoura ve diğ. (2008) bu çalışmada Japonya'da önemli bir plantasyon türü olan *Cryptomeria Japonica*'nın köklerinin yer altı radarı yöntemi ile belirlenip belirlenemeyeceğini incelenmiş ve köklerin analizini ve belirlenmesini etkileyen etmenler saptanmıştır. Gömülü kökler net bir şekilde belirlenerek 1,1–5,2 cm çaplarındaki kökler ayırt edilebilmiştir. Kök çapı ile elde edilen GPR dalga biçiminden çıkarılan parametreler arasında anlamlı pozitif ilişkiler saptanmıştır. Kökler ve toprak arasındaki su içeriğindeki farkın, yer altı radarının kökleri algılama yeteneğini etkileyen çok önemli bir etmen olduğu belirlenmiştir.
- Hirano ve diğ. (2009) optimal kumlu toprak koşullarında yer altı radarı yöntemini kullanarak hangi ağaç kök etmenlerinin kök belirlenmesini etkileyebileceğini belirlemeyi amaçlamıştır. Özellikle, kök çapının, kök hacimsel su içeriğinin ve kökler arasındaki düşey ve yatay aralıkların 900 MHz yer altı radarı kullanılarak kök belirlenmesi üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Yapılan çalışmada, gömülü köklerin aralıklarının ve

hacimsel su içeriklerinin yer altı radarı yöntemi ile kök belirlenmesinde etkili olduğu saptanmıştır.

- Satriani ve diğ. (2010) Ağaç köklerinden kaynaklanan bina hasarını Yer Altı Radarı ve Elektriksel Öz direnç Tomografisi (ERT) gibi algılama tekniklerini köklerin hızlı ve bozucu (invazif) olmayan ilkesini kullanarak saptayarak, tanımlamışlardır. Bu çalışmada, ağaç kök sistemini belirlemek amacıyla bir kum-kil kutusu içinde bir şeftali bitkisi ile kontrollü koşullarda gerçekleştirilen laboratuvar ölçümleri aracılığıyla yer altı radarı ve ERT yönteminin bir fizibilite çalışması gerçekleştirilmiş ve oluşturulan homojen toprak ortamında, her iki yöntemle yüksek çözünürlüklü görüntüler elde edilmiştir. Görüntüler, ince ve odunsu köklerin yüksek yoğunluklu toprak hacimlerinin varlığını açıkça göstermiştir.
- Bassuk ve diğ. (2011) ağaç köklerinin Yere Altı Radarı sistemi ile konumlandırılmasını ve ardından yer altı radarı sisteminin doğruluğunu gerçek kök konumu ile karşılaştırmak için aynı toprak hacmindeki kazılan kökleri incelemişlerdir. Yapılan bu çalışma, yer altı radarı verilerinin iki sıkıştırılmış toprakta beton kaplamanın altındaki köklerin varlığının ve konumlarının güvenilir bir şekilde belirlenebildiğini göstermiştir.
- Cui ve diğ. (2011) 2 GHz frekanslı yer altı radarı yönteminin üstünlüğüne dayanarak, kök biyokütlesini belirlemek için yeni ve pratik bir yöntem geliştirmişlerdir. İlk olarak, az sayıda kök örneği toplanarak ortalama kök madde yoğunluğu ölçülmüştür. İkinci olarak, kumlu bir alanda kontrollü, deneysel koşullar altında, kök çapının tahmin edildiği yer altı radarı yöntemine dayalı bir kök çapı tahmin modeli geliştirilmiştir. Üçüncü olarak, kök hacmi, tahmini kök çapı kullanılarak ve köklerin şeklinin silindirik olduğu varsayılarak hesaplanmıştır. Son olarak, kök biyokütlesi, kök madde yoğunluğu ve kök hacminin ortalaması alınarak tahmin edilmiştir. Uygulama ve hesaplamalar sonucu elde edilen bulgular, yer altı radarı tabanlı kök çapı ve biyokütle tahmin modellerini geliştirmek için yararlı olduğunu ve yer altı radarı verilerinin kök sistemlerini incelemedeki potansiyelini ortaya koymuştur.
- Rodríguez-Abad ve diğ. (2011) Pinus pinaster'ın kurutma işlemi sırasında elektromanyetik dalgaların değişiminin hızını ve genliğini kaydetmek için 1,6

GHz merkezi frekans kapasiteli bir anten kullanan yer altı radarı analizine odaklanmışlardır. İncelenen değişkenler arasında bulunan yüksek korelasyon, yer altı radarı verimliliğini ve bu tekniğin, özellikle nem içeriğini incelerken, ahşap yapılar için tahribatsız bir değerlendirme aracı olarak yenilikçi uygulamasını göstermiştir.

- Butnor ve diğ. (2012) yer altı radarı yöntemini kaba odunsu kökleri belirlemek, biyokütleyi, kök çapını ve köklerin mekânsal dağılımını kestirmek için uygulamışlar, kök değerlendirme tekniklerinin gelişimini ve yer altı radarı yönteminin başarılı olduğu saha uygulama örneklerini modelleyerek göstermişlerdir.
- Parsekian ve diğ. (2012) yer altı radarı kullanarak hacimsel kök içeriğini değerlendirme potansiyelini belirlemek amacıyla ince köklerin toprağın toplu dielektrik özellikleri üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Yapılan çalışmanın sonucunda hacimsel kök içeriğindeki değişikliklerin yer altı radarı tarafından basit ve kontrollü koşullar altında saptanabileceğini göstermiştir; ancak boşluk suyunun varlığı, mekânsal değişkenliği, zeminlerin doğal yapısal heterojenliği ve görünürlüğü minimize etmiştir.
- Guo ve diğ. (2013) Kaba köklerin (>2 mm çap) bitki fonksiyonlarında ve karasal ekosistemlerde oynadığı kritik rol nedeniyle, kaba köklerin boyutunun, yapısının ve biyokütlesinin saptanması ve miktarının belirlenmesi amacıyla tahribatsız bir jeofizik yöntem olarak, yer altı radarı yöntemini uygulamışlar ve tek bir kaba kök tanımlaması ile kaba kök sistemi haritalamasını yapmışlardır.
- Martínez-Sala ve diğ. (2013) ahşap yapıların fiziksel özelliklerini yerinde değerlendirmek için tahribatsız bir teknik olarak Yere Nüfuz Eden Radar kullanmışlardır. 1.6 GHz antenli bir yer altı radarı kullanarak yönlerine göre dielektrik tepkilerini incelemek için farklı türlere (yoğunluklara) sahip biçilmiş kereste örnekleri üzerinde bir deney yapılmışlardır.
- Tanikawa ve diğ. (2013) Kaba ağaç köklerini belirlemek için yer altı radarı yöntemini uygulamışlardır. Bu çalışmada, kök oryantasyonunun (x, derece) iki ana dalga formu parametresi, genlik alanı (A, dB × ns) ve sıfır geçişleri arasındaki zaman aralığı (T, ns) üzerindeki etkisi nicel olarak değerlendirilmiştir. Çalışma sonucunda kök oryantasyonunun kökün

belirlenmesini ve genlik alanı (A) değerlerini önemli ölçüde etkilediğini açıklamışlardır.

- Ferrara ve diğ. (2014) yer altı radarı yöntemini su içeriği kestirimi, kök stresi değerlendirmesi, kök biyokütle modellemesi ve kök lokasyonu uygulamaları amacıyla ormancılık alanında kullanılmasını önermişler, çok profilli bir veri toplama ve üç boyutlu bir yazılım paketinin kullanımı sayesinde de sığ ve yüzeye gömülü kök sistemlerinin geometrik özelliklerini yeniden görüntülemeyi başarmışlardır.
- Freeland (2015) Huanglongbing enfeksiyonunun kökler üzerindeki etkisini araştırmak için yüksek frekanslı yer altı radarı kullanmanın tanısal yararını değerlendirmiş, 2.600 MHz frekanslı dalganın penetrasyon derinliğinin kutunun dibine ulaşmak ve örneklerle etkileşime geçmek için yeterli olduğunu söylemiştir. Yapılan çalışma sonucunda yüzeyin yaklaşık 5-5.50 cm altında değişen bir üst tabakada daha küçük 2. mertebe ve daha yüksek yanal kökler bulunmuş ve yer altı radarı yönteminin kök belirlenmesinde başarılı olduğunu göstermiştir.
- Guo ve diğ. (2015) alan kökü araştırması için bozucu olmayan bir araç olan yer altı radarı yöntemini kullanmışlardır. Bir araştırma hattını kesen kök oryantasyonunun yatay çapraz açısının (x), bir kökten yansıyan genlik alanını (A) önemli ölçüde etkilemesi ve yer altı radarı tabanlı kök ölçümünün doğruluğunu bozması nedeniyle her seferinde bir örnek yere paralel olarak gömülmüş ve kökler ile radarın elektromanyetik dalgaları arasındaki etkileşimi iyileştirmek için ölçümler enine yapılmıştır. Ayrıca kök görüntüleme için frekansları 1 GHz'in üzerinde olan antenleri başarıyla kullanmışlardır.
- Moore ve Ryder (2015), yöntemin uzaysal doğruluğunu ve ağaç köklerini tespit etme yeteneğini değerlendirmeyi amaçlamışlardır. 900 MHz yer altı radarı cihazı (Tree Radar®) kullanılarak üç deney yapılmıştır. İlk deneyde, yer radarı yönteminin 200 mm, 400 mm ve 800 mm derinliklerde 10 mm, 20 mm ve 40 mm çapındaki kökleri tespit etme yeteneğini test edilirken, ikinci deney yakın yerleştirilmiş iki kökü bir arada belirleme kapasitesini test edilmiştir. Son deneyde ise, küçük bir *Pistacia chinensis*'in (Çin fıstığı) kök sistemini analiz etmek için yer altı radarı yöntemi kullanılmış, ardından kök sistemi bir

AirSpade® ile kazılarak kök sayımları yapılmış ve kestirilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

- Butnor ve diğ. (2016) önceki yapılan çalışmalardan yanal kök kütlesinin, yer altı radarı ile kolayca saptanabilirken, bir ağacın altındaki köklerin (kütüğün altı) ve büyük ağaçların yakınında üst üste binen yanal köklerin, yansıma modunda çalışan yüzey tabanlı antenler için sorun yarattığını belirlemişler, yeni bir çalışma ile düzeltme uygulanıp uygulanmayacağını saptamaya çalışmışlardır.
- Ježová ve diğ. (2016) radar konfigürasyonunun ve gövde kesit yapılarının bir işlevi olarak çevresel veri toplama geometrisini göz önünde bulundurarak ağaç gövdeleri radar görüntülerinin özelliklerini araştırmayı amaçlamışlardır. Bu tür verileri daha iyi anlamak için analitik olarak bir hedef yansıma eğrisi tanımlanmış, ardından toplam iç yansıma (TIR) olgusu açıklanmış ve gösterilmiştir.
- Ferrara ve diğ. (2017) yer altı radarı tekniğini, çam ağaçlarının kök yapısını, kök yönelimini ve toprak hacmi kullanımını kesin ve hızlı bir şekilde ölçmek için yıkıcı/bozucu olmayan bir araç olarak kullanmışlardır. Çalışma sonucunda iki farklı çamın ağaç kökleri yıldız mimarileri, yaklaşık 0,30 m derinlikte hassas bir şekilde haritalanmıştır. Bu sonuç kentsel/orman ortamlarının istikrarını ve sağlığını korumak için kent-ormancılık sektöründe ve kent parkları yönetim politikalarında planlamalar yapmadan önce yer altı radarı yönteminin kullanılabileceğini doğrular niteliktedir.
- Nichols ve diğ. (2017), üç farklı prototip geçirgen üstyapı tasarımının, geniş yapraklı sokak ağacı köklerinin (*Melaleuca quinquenervia*) yol açtığı üstyapı hasarını azaltmadaki etkinliğini değerlendirmek için yer altı radarı yöntemini kullanmışlardır. Yer altı radarı yönteminin bir kentsel ortamda ağaç kök boyutunu, yönünü ve kaldırımların altındaki derinliği belirleme yeteneğini araştırmak için üç aşamalı bir doğrulama ve kalibrasyon prosedürü kullanılarak yapılmıştır. Deneysel bir ortamda gerçekleştirilen ilk uygulamalar, daha sonra GPR yönteminin performansını incelemek amacıyla sahada tekrarlanmıştır. İlk uygulama sonuçlarının olumlu sonuçlanması, bu tekniğin en küçük hata ile ağaç kök boyutunu ve kaplama altındaki derinliğini güvenilir bir şekilde belirlemek için kullanılabileceğini göstermişlerdir.

- Tosti ve diğ. (2018) yer altı radarı tahribatsız kontrol (NDT) yöntemini kullanarak, yer altı anormalliklerinin ve bozulmalarının müdahaleci olmayan ve uygun maliyetli (düşük edinme süresi ve operatörlerin kullanımı) değerlendirilmesini ve trafikte en az rahatsızlık ile izlenmesini sağlamayı amaçlamışlardır. Bu amaçla 70 yaşındaki bir köknar ağacının etrafındaki toprak, 600 MHz ve 1600 MHz'lik merkezi frekans antenlerine sahip zemin bağlantılı bir GPR sistemi ile araştırılmıştır. Toplanan yer altı radarı verilerinin (600 MHz merkezi frekans) kartezyenden kutupsal koordinatlara dönüştürülmesine ve çeşitli veri görselleştirme modlarından gelen bilgilerin çapraz eşleşmesine dayanan bir veri işlem yönteminin, ağaç köklerinin üç boyutlu olarak etkili bir şekilde tanımladığı kanıtlanmıştır.
- Aboudourib ve diğ. (2019) yer altı radarı kullanarak kök tespitini sınırlayan birkaç faktörün var olması üzerine, mod çalışması açısından optimum koşullar altında benzeşimler/simülasyonlar kullanarak, köklerin çaplarına ve su içeriğine göre saptanabilirliğini değerlendirmeye olanak tanıyan iki boyutlu bir grid/kareli oluşturmuşlardır. Katlanmış tamamlayıcı antenleri içeren bi-statik bir yer altı radarı sistemi kullanarak, deneysel radargramlar elde etmek ve benzeşim/simülasyon renk ölçeği için bir referansa sahip olmak amacıyla yankısız bir oda içindeki "yeni çıkarılmış" kökler üzerinde laboratuvar deneyleri de gerçekleştirerek yöntemin kökler üzerindeki kullanılabilirliğini göstermişlerdir.
- Alani ve Lantini (2019) ağaç köklerinin ve bunların toprakla etkileşimlerinin değerlendirilmesi ve izlenmesi konusundaki literatüre genel bir bakış sunmuş, ağaç kök sistemleri, ağaçların sağlığı ve stabilitesi ile ağaçların yapıli çevre üzerindeki etkisini tahribatlı ve tahribatsız muayene (NDT) yöntemleri açısından incelemiştir. Çalışmada tahribatsız yöntemlerin, özellikle de yere nüfuz eden radarın, ağaç kökü konfigürasyonlarının ve bunların birbirine bağlanabilirliğinin haritalanmasındaki etkinliği gösterilmiştir.
- Mihai ve diğ. (2019) 50 MHz frekanstan 3 GHz'e kadar olan frekanslarda taze kesilmiş ağaç kökü bölümlerinin göreceli geçirgenliğinin doğrudan ölçümlemlerini almak için ticari bir açık uçlu koaksiyel problu bir vektör ağ analizörü kullanmışlardır. Sonuçlar, gerçek saha araştırmalarında karşılaşılabilecek çeşitli gerçekçi senaryoları tasvir eden gprMax açık kaynak

yazılımı kullanılarak yer radarı ileri modelleme girdileri olarak kullanılmıştır. Geliştirilen modellerin uygulanabilirliği, farklı ortamlardaki ağaç köklerini tespit etmek için yer radarı araştırmalarının potansiyeli ve sınırlamaları, gelecekteki araştırmaların geliştirilmesine yardımcı olacağı belirtilmiştir.

- Wang ve diğ. (2020) Kaba kökleri saptamak ve tanımak için yer altı radarı kullanmışlardır. Tek bir kaba kökün koordinatlarını elde etmek ve bir simetri eğrisi ve bağıl hata (RE) aracılığıyla kök yönünün kaba kökün hiperbolü üzerindeki etkisini analiz etmek için bir algoritma önermişlerdir. Kök oryantasyonunun etkisini göstermek için, algoritma seçilen arazide uygulanmış ve sonuçlar, yeraltı kök dağılımının görece doğru olduğunu göstermiştir. Ancak, önerilen algoritmanın otomatik algılamayı gerçekleştirmediği ve sonuçların yine de insan müdahalesini gerektirdiğini göstermiştir.
- De Aguiar ve diğ. (2021) köklerin dielektrik geçirgenlik değişiminin yer altı radarından türetilen kök çapı kestirimlerini nasıl etkilediği incelemişlerdir. Dielektrik geçirgenlik ile her kökte bulunan su miktarı arasındaki ilişkinin görüntülenmesi çapı etkilediği gösterilmiştir. Farklı nem içeriğine sahip kök numuneleri için dielektrik geçirgenliği hesaplanmıştır. 2 m çapında bir kum havuzundan kesitler alınmış ve sonuçları sentetik modellerle karşılaştırılmıştır. Analiz edilen endeksler ile sentetik verilerdeki bağıl dielektrik geçirgenliği (ϵ_r) arasında çap tahmininin kök nemi ile büyük ölçüde değişebileceğini gösteren bir korelasyon fark edilmiştir. Su miktarının çap tahmini üzerindeki etkilerini ortadan kaldırmak için bir düzeltme faktörü önerilmiştir. Bu işlem adımı, sentetik modellerde çap tahmini hatasını azaltmıştır.
- Lombardi ve diğ. (2021) Akdeniz kozalaklı *Pinus halepensis* popülasyonları arasındaki kaba kök özelliklerindeki (derinlik, çap ve frekans) değişkenliği tanımlamak için yer altı radarı kullanılmıştır. Yer altı radarı kayıtları, yer üstü büyüme ve popülasyonların kökenindeki iklim değişkenleri ile ilişkili olarak incelenmiştir. Yer altı radarı yönteminin, *P. halepensis* 'in kök özelliklerindeki türler arası değişimin ve bunun kökendeki eko-coğrafik özelliklere bağımlılıklarının saptanmasına olanak tanıyan, böylece türler için kök sistemlerinin uyarlanabilir önemi hakkında bilgi veren yüksek verimli araç olduğu belirlenmiştir.

BÖLÜM DÖRT

SAHA ÇALIŞMALARI

4.1 Çalışmanın Amacı

Sera gazlarının atmosferde birikip ortalama sıcaklığın değişimine sebep olan küresel ısınmanın bir sonucu olan iklim değişikliği, ekolojik dengenin karşısındaki en büyük tehditlerden biridir. Sıcaklık artışına ve mutlak kuraklığa sebep olan iklim değişikliği ile en temel mücadele, sürdürülebilir bir yaşam inşa etmektir. Sürdürülebilir yaşamın temel unsuru ağaçlardır. Ormanlaşma ve tarım alanlarını artırma faaliyetlerinin yanı sıra kentsel peyzaj çalışmalarında da yeşil alan politikası güdülerek küresel ısınma ile mücadele edilebilir. Kentsel Peyzaj çalışmalarında kullanılan sokak ağaçları küresel ısınma ile mücadele ve bir toplumun refahı için gereklidir ve aynı zamanda kent estetiği bakımından da önemlidir. Sokak ağaçlarının faydaları yalnızca sürdürülebilir yaşam için temiz çevre boyutunda değildir. Peyzaj çalışmalarında kullanılan sokak ağaçları kentsel alanda yaşayan bir toplumu sosyal, çevresel ve ekonomik anlamda olumlu olarak etkiler (Donovan ve diğ.,2013; Mullaney ve diğ., 2015). Sosyal olarak incelendiğinde, sokak ağaçlarının toplum refahını ciddi ölçüde arttırdığı gözlemlenmiştir. Yapılan incelemelere göre, yeşil alanlar bir toplumda yaşayan topluluğun sakinleri arasındaki etkileşimi kolaylaştırır ve topluluk parçası olma bilinci aşıladığından suç oranlarının düşmesine sebep olur (Kuo ve Sullivan 2001; Van Dillen ve diğ., 2012). Çevresel, coğrafik ve biyolojik olarak da olumlu etkileri bulunan sokak ağaçları, yağmur suyu akışını azalttığı için sel baskınlarının önüne geçer (Burden, 2006). Sera gazlarının ve karbon içerikli gazlarının emilmesini sağladığı için hava kalitesini artırıp biyolojik çeşitliliğin artmasına sebep olur (Rhodes, 2011). Bu anlamda da çevresel etkileri bakımından da toplumsal yaşama katkıda bulunurlar. Ülke ekonomisine ise enerji kaynak kullanımı azaltarak katkı sunar. Kaynak kullanımına ek olarak etrafındaki mülkiyetlerin satılması yönünde olumlu bir katkı sunduğundan ticareti de canlı tutar (Mullaney ve diğerleri, 2015; Chang ve Lee, 2016; Jasmani ve diğerleri, 2016).

Tüm bu faydalar göz önünde bulundurulduğunda kentsel peyzaj çalışmalarının planlanması ve kent ağaçlarının iyi yönetimi, toplumda yaşayan tüm canlıların ve var olan mülklerin refahını ve güvenliğini sağlamanın anahtarıdır ve başarılı bir planlama için ağaç sağlığının ve duraylılığının kesin bir şekilde değerlendirmesini gerektir. Çünkü sokak ağaçların beraberinde getirdiği ekonomik faydaların yanı sıra olumsuzluklarda mevcuttur. Bu olumsuzlukların temelinde ağaç köklerinin kontrolsüz büyümesinin neden olduğu finansal maliyetler yatmaktadır.

Ağaç kök sistemi, genel olarak su ve besin alma işlevi olan daha küçük çaplı birincil köklerden ve kalınlaşma geçirmiş, odunsu bir yapıya sahip, ince kökleri taşıyan ve bitkiye bağlayan ikincil köklerden oluşur. Kentsel koşullarda büyüyen ağaçlar için köklerin çoğu yüzeye yakındır ve yaygın olarak yanal (lateral) hattının 2-3 katına veya ağaç yüksekliğinin 1-2 katına kadar uzanır (Perry 1982; Pirone ve diğerleri 1988; Schnelle ve diğerleri 1989; Hitchmough 1994). Köklerin yanal hattının çapının yedi katına kadar uzayabileceği ve uygun koşullarla karşılaştığında, uygun toprak koşullarından ve rezervlerinden yararlanmak için yelpaze benzeri bir yapı oluşturarak birçok kez dallandığı öne sürülmektedir (Coder 1998). Ağaç kök sisteminin genel algoritmasına göre, birçok kez dallanabilen kökler, uzun vadede su ve drenaj boruları ve elektrik ve telekomünikasyon kabloları gibi kamu hizmetlerine, yol yüzeylerine, bina temelleri gibi diğer altyapı türlerine ve tarihi binalara ve anıtlara önemli zararlar verebilir (Driscoll, 1983). Kurak mevsimde, binalara ve anıtlara yakın büyüyen ağaç kökleri, çevredeki topraktan daha yüksek bir nem içeriğine ulaşma yolunu buldukları için temellere gidebilirler (Biddle, 1998) ve toprakta farklı çökmeler oluşturarak, üstteki yağma yapılarında olumsuzluklara neden olurlar (Caneva ve diğ. (2009); Navarro ve diğ. (2009). Hasar, büyüyen ağaç köklerinin yakın çevrelerindeki toprağı yerinden oynatmasının bir sonucudur ve sonuç olarak kaldırımların çatlamasına ve/veya bombeleşmesinin neden olur (Day 1991; Kopinga 1994; Barker ve Peper, 1995; Blunt 2008).

Ağaçlar inşa edilmiş sert yapılara, asfalta ve kaldırımlara zarar vermesi ile ilgili en somut örnek, 1988 ve 1992 yılları arasında, Birleşik Krallık 'ta binalarda ağaç kaynaklı çökme hasarının 1,6 milyar sterlini aşması olarak verilmiştir (Lawson ve O'Callaghan 1995). Benzer bir çalışma Amerika Birleşik Devletleri'nde yapılmış ve sonucunda yıllık beton ve kanalizasyon hattının ağaç kökleriyle ilgili hasar nedeniyle onarım

faturalarının ağaç başına 4,28 ABD doları tutarında olduğunu ve bunun yıllık ağaçlandırmaya ayrılan bütçelerinin yaklaşık %25'ini oluşturduğu saptanmıştır (Coder 1998). Bu iki örnek göz önünde bulundurularak değerlendirme yapıldığında ağaç kökü büyümesi, pahalı bir sıkıntı ve önemli bir sorumluluk riski olarak kabul edilir. Sokak ağaçları kent yaşamının ayrılmaz bir parçası olmuştur ancak ağaç kökü büyümesinin öngörülüp önüne geçilememesinin yarattığı tahribat; motorlu taşıt kullananlar, bisikletliler ve yayalar için büyük bir tehlike arz etmektedir. Tüm bu kök büyümesinin yarattığı tahribata ek olarak, birincil köklerde meydana gelen çürüme kuvvetli rüzgarlarda ağaçların devrilmesine ve istenmeyen kazalara neden olabilir. Bu bağlamda ekonomik olarak ağaçların yarattığı maliyetler bakım amaçları, kaldırımların onarımı ve değiştirilmesi (Vogt ve diğ., 2015), yaralanma tazminatları, sokak ağaçlarının kaybolması ve değiştirilmesi (Costello ve diğ., 2001; Kirkpatrick ve diğ., 2012) olarak sıralanabilir. Ek olarak, yaya hareketleri ve darbelerden kaynaklanan dava masrafları ve ağaç kökünün büyümesinin neden olduğu özel mülke verilen zarar için yapılan sigorta talepleri bu mali yüke katkıda bulunur (Randrup ve diğ., 2001). Bu maliyetlerin hükümet bütçeleri üzerinde büyük bir etkisi olabilir ve bu durum yerel konfor kaybıyla sonuçlanabilir. Bu bağlamda, yeraltı anormalliklerinin ve bozulmalarının yani kök yayılımının ve yöneliminin erken aşamada belirlenmesi ve değerlendirilmesi, daha fazla kötüleşmeyi azaltacağından, yol güvenliği sorunlarını ve daha yüksek yönetim maliyetini önlemek için stratejik bakım veya onarım eylemlerinin planlanmasına olanak sağlayacaktır. Şekil 4.1'de verilen fotoğrafta, erken tespit edilmeyen ağaç köklerinin kaldırımda yarattığı tahribat, Şekil 4.2'de verilen fotoğrafta yüzeylemiş köklerin orta refüjdeki görüntüsü ve Şekil 4.3'te onarım çalışmaları amacıyla asfaltın kaldırılması gösterilmiştir. Bu fotoğrafların çekildiği ve fotoğraflanmayan farklı bölgelerde yapılan inceleme ve gözlemler bu tez çalışmasının ana amacını oluşturmuştur.



Şekil 4.1 Ağaç köklerinin kaldırımında yarattığı tahribata bir örnek



Şekil 4.2 Yüzeylemiş köklerin orta refüjdeki görüntüsüne bir örnek



Şekil 4.3 Ağaç köklerinin asfaltta yarattığı tahribat sonucu asfaltın yenilenme çalışması

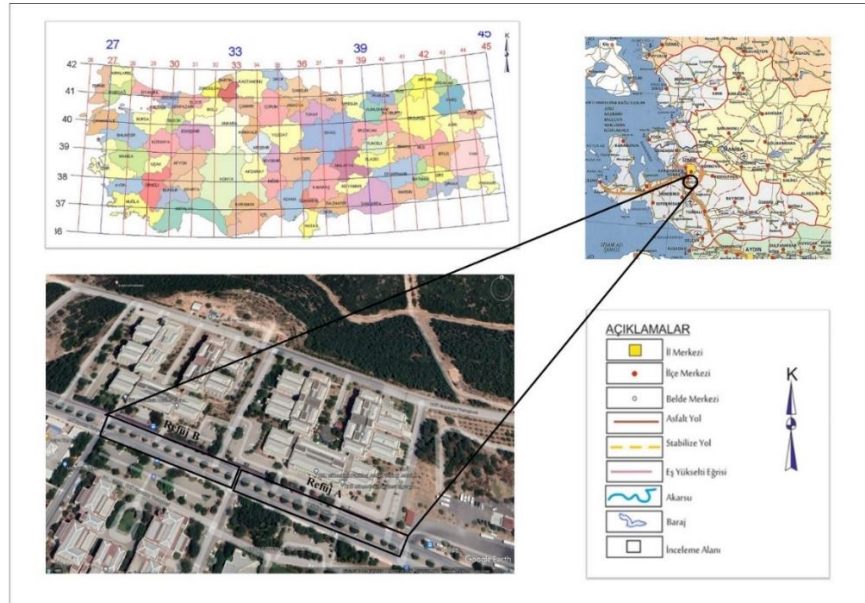
Bu tez çalışması, yer altı radarı yönteminin bir orta refüjde ağaç kök boyutunu, yönünü, yol ve kaldırımların altındaki derinliği belirleme yeteneğini araştırma amacıyla yapılmıştır. Toprak mineral kaynaklarının mevcudiyetine ve gölgelik/radikal (gövde ve yaprakları ile kökleri arasındaki denge) oranına bağlı olarak telafi edici ağaç kökü büyümesi, toprak verimliliği ile doğru orantılıdır. Bu doğru orantı radargramda köklerin yayılımının görüntülenmesine olanak sağlar ve kentsel ortamlarının istikrarını ve sağlığını korumak için kentsel peyzaj sektöründe ve kent parkları yönetim politikalarında değerli destekler sağlamak mümkündür. Delme ve kazma gerektirmeyip tahribatsız olan ve tekrar ölçümlere izin veren yer altı radarı yöntemi ile ağaç köklerinin derinliğinin ve boyutunun haritalanması sağlanır. Tekrarlanabilir olması nedeniyle yer altı radarı, ağaç kökü hasarından şüphelenilen veya tahmin edilen durumlarda bir izleme aracı olarak kullanılabilir.

Ağaç kökleri nem içeriğine göre radargramda farklı görüneceğinden yalnızca kök yayılımı değil, kök çürümesi de saptanabilir. Ağaç çürüme riskinin değerlendirilmesi ve kök yöneliminin tespit edilmesi, karar vericilerin ağaçları verimli bir şekilde yönetmesine, düşmelerle ve oluşan tahribat sonucu meydana gelen kazalarla ilişkili sosyo-ekonomik zararlardan kaçınmasına ve ağaçların sökülmesi veya değiştirilmesi maliyetinden tasarruf etmesine yardımcı olabilir. Kentsel alanlarda bulunan kaldırım yüzeylerinin ve asfaltın genel olarak düz yüzeyleri ve standartlaştırılmış alt temellerinin bilinmesi, yeraltı ağaç köklerinin yerini belirlemek için yer altı radarı

tekniklerinin başarılı bir şekilde kullanılmasına olanak tanır. Potansiyel olarak sorunlu ağaç köklerinin erken belirlenmesi, bakım maliyetlerinde önemli tasarrufların yanı sıra gelecekte yaya ve bisiklet sürücüleri için oluşacak tehlikelerin belirlenmesini ve zamanında ortadan kaldırılmasını sağlayabilir. Bu amaç doğrultusunda Dokuz Eylül Üniversitesi Tınaztepe Kampüsü sahasında orta refüjde bulunan çam ağacı köklerinin gözlemlendiği bir örnek bölge seçilmiş ve Üniversite yönetimi tarafından seçilen bölgede alt yapı olmadığı doğrulanmıştır. 350 MHz merkez frekanslı anteni olan GSSI yer radarı cihazı ile kayıtlar alınmış ve yorumlanmıştır. Alt yapı olmadığı doğrulandığından yorumlanan her verinin köke ait olduğu tespit edilmiştir.

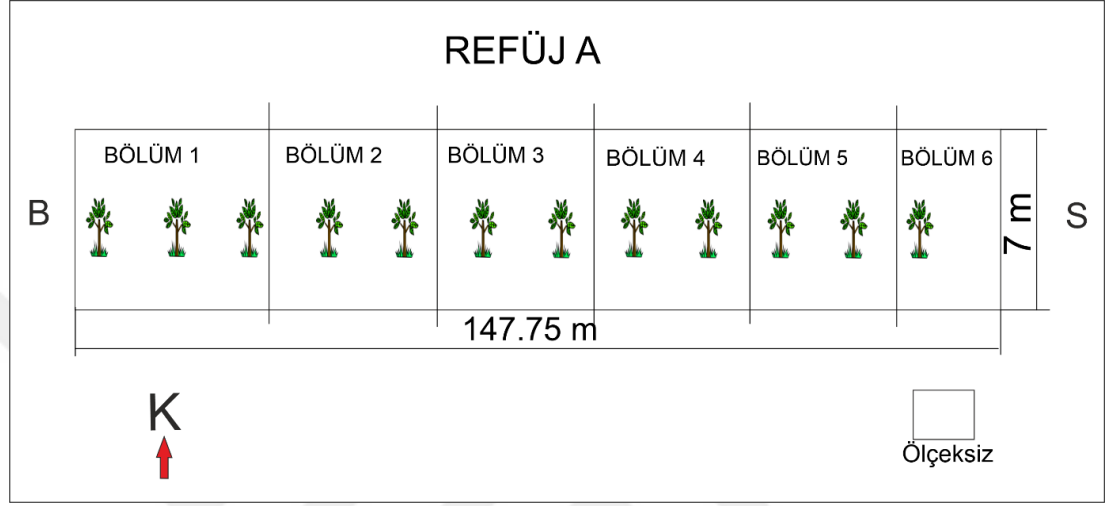
4.2 Çalışmanın Alanının Yeri

Çalışma alanı İzmir İli, Buca İlçesi sınırları içerisinde yer alan Dokuz Eylül Üniversitesi Tınaztepe Kampüsü içinde yer almaktadır. Araştırma amacı doğrultusunda Üniversite kampüsü içerisinde yer alan iğne yapraklı ve kökleri yüzeysel yayılım göstermiş olan ağaçların bulunduğu, az hasarlı iki adet orta refüj seçilmiştir. Refüjler A ve B olarak adlandırılmış ve seçilen çalışma alanına ait yer bulduru haritası Şekil 4.4'te verilmiştir.

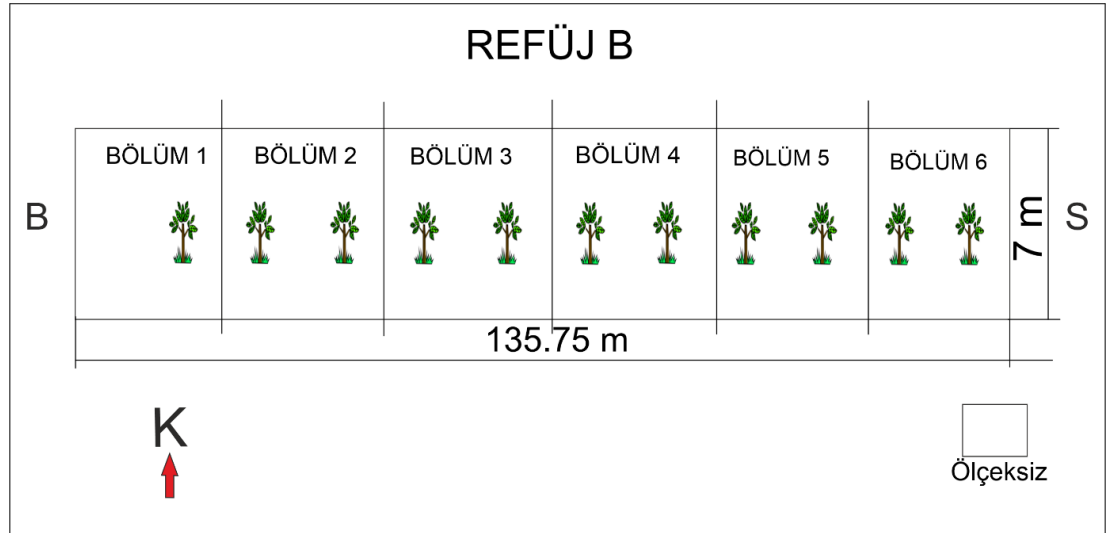


Şekil 4.4 Çalışma alanı yer bulduru haritası

Çalışma alanı olarak seçilen Refüj A ve Refüj B yapılan ön incelemeler sonucu Y profilindeki her bir ölçü 25 m olacak şekilde 6 parçaya bölünmüş ve ölçeksiz olarak krokilendirilmiştir. Refüj A'ya ait kroki Şekil 4.5'te, Refüj B'ye ait kroki Şekil 4.6'da verilmiştir.



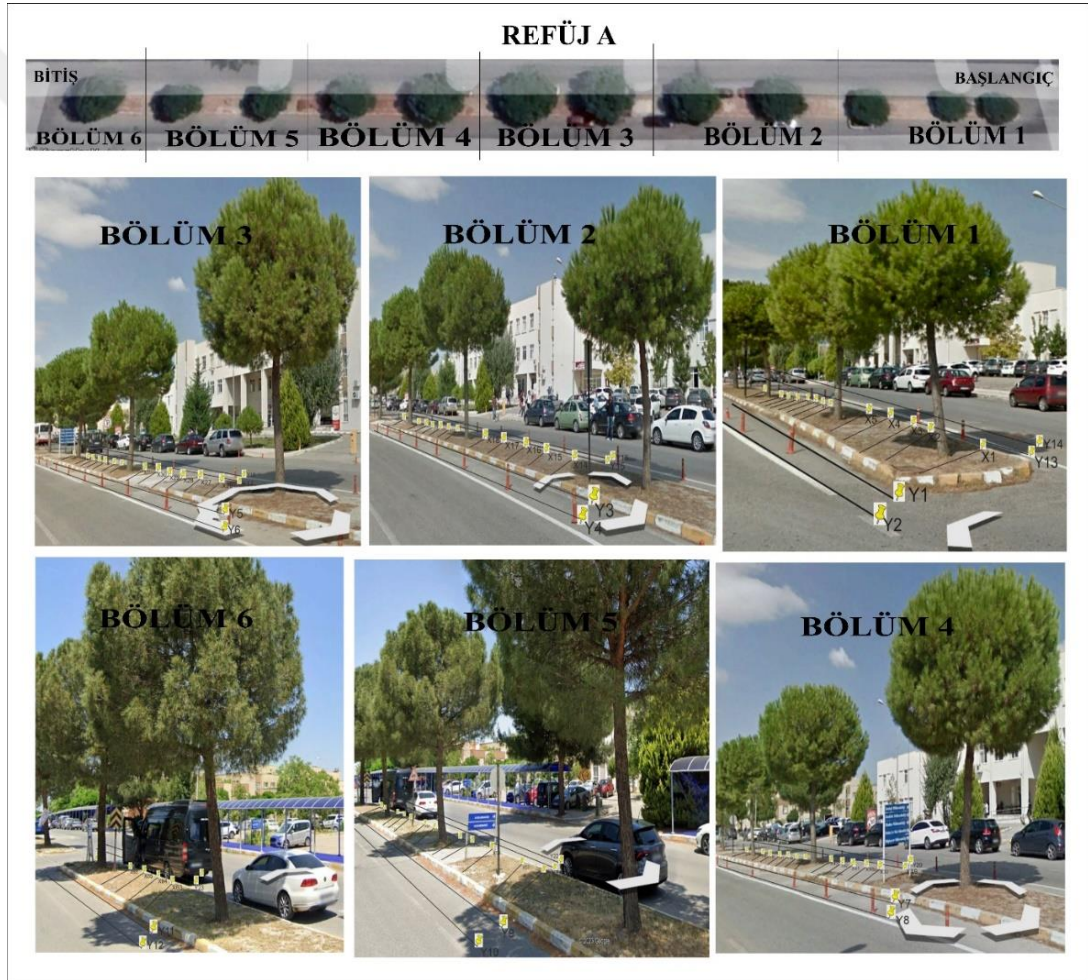
Şekil 4.5 Refüj A'ya ait kroki



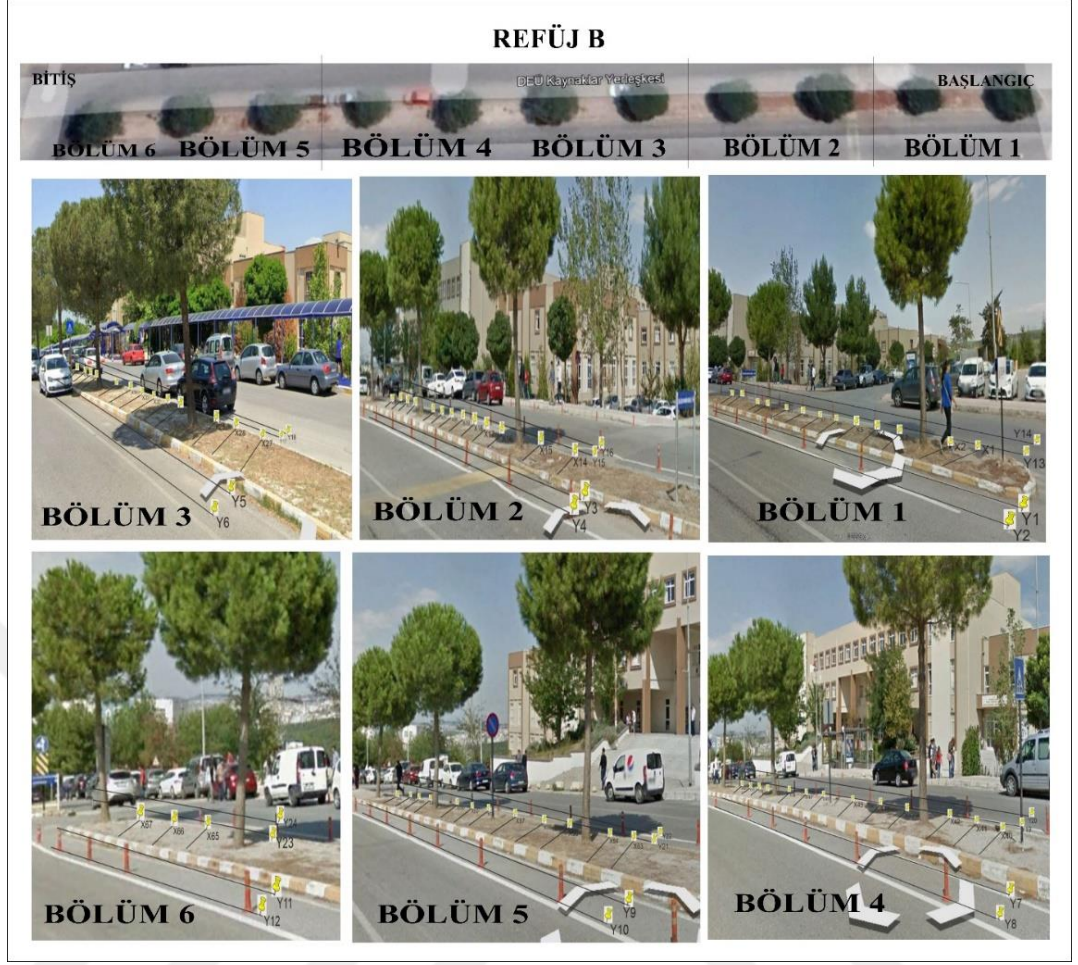
Şekil 4.6 Refüj B'ye ait kroki

4.3 Yer Radarı Yönteminin Çalışma Sahasında Uygulanması

Yapılan bu çalışmada, seçilen orta refüjlerde olası ve yüzeysel köklerin dağılım yönünün incelenmesi amacıyla krokisi Şekil 4.5 ve Şekil 4.6’da verilen Refüj A ve Refüj B için metrajlarına uygun olacak şekilde profiller oluşturulmuş ve oluşturulan profiller Google Earth üzerinde, Refüj A için Şekil 4.7’de Refüj B için Şekil 4.8’de gösterilmiştir. Refüj A 145,75 m, Refüj B 135,75 m olarak hesaplanmış ve Y profilindeki ölçümler 25 m olarak refüjü 6 parçaya bölecek şekilde planlanmış ve kayıtlar alınmıştır.



Şekil 4.7 Refüj A için oluşturulan profiller

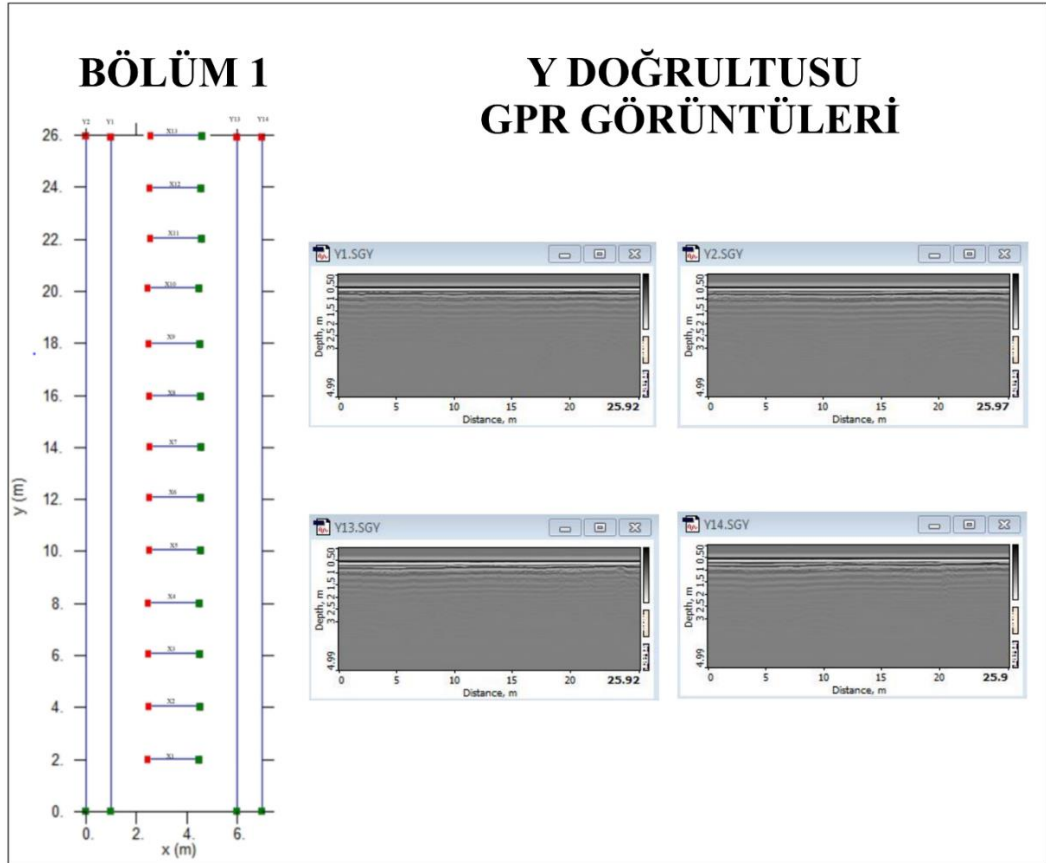


Şekil 4.8 Refüj B için oluşturulan profiller

Çalışmalar belirlenen bu alan üzerinde paralel ve birbirini kesen hatlar boyunca, GPR yöntemiyle 350 MHz merkez frekanslı koruma anteni olan GSSI marka cihaz ile elektromanyetik ölçümler alınmıştır. Refüj A ve Refüj B için toplam 48 Y profili ve toplam 134 X profili oluşturulmuştur. Toplamda 182 profil üzerindeki veriler SEG-Y formatı kullanılarak toplanmıştır. Ölçüm profilleri üzerindeki kırmızı noktalar ölçümlerin başlangıç noktalarını, yeşil noktalar da ölçümlerin bitiş noktalarını göstermektedir.

4.3.1 Refüj A Toplanan Ham Veriler

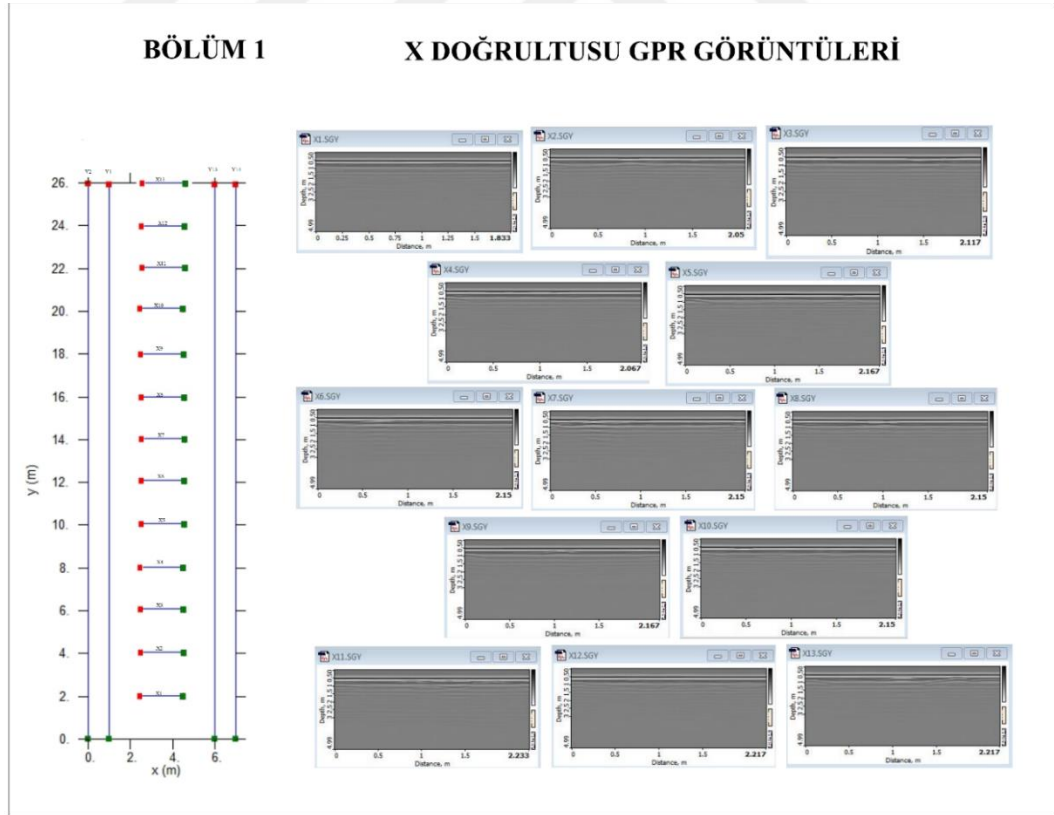
Refüj A 6 bölüme ayrılmış olup her bölüm ayrı ayrı krokilelendirilmiş ve X, Y profilleri fotoğraflanmıştır. Şekil 4.9 ve Şekil 4.11’de Bölüm 1’e ait X ve Y ham radargramları, Şekil 4.10 ve Şekil 4.12’de Bölüm 1’e ait ölçü fotoğrafları verilmiştir. Şekil 4.13 ve Şekil 4.15’te Bölüm 2’ye ait X ve Y ham radargramları, Şekil 4.14 ve Şekil 4.16’da Bölüm 2’ye ait ölçü fotoğrafları verilmiştir. Şekil 4.17 ve Şekil 4.19’da Bölüm 3’e ait X ve Y ham radargramları, Şekil 4.18 ve Şekil 4.20’de Bölüm 3’e ait ölçü fotoğrafları verilmiştir. Şekil 4.21 ve Şekil 4.23’te Bölüm 4’e ait X ve Y ham radargramları, Şekil 4.22 ve Şekil 4.24’te Bölüm 4’e ait ölçü fotoğrafları verilmiştir. Şekil 4.25 ve Şekil 4.27’de Bölüm 5’e ait X ve Y ham radargramları, Şekil 4.26 ve Şekil 4.28’te Bölüm 5’e ait ölçü fotoğrafları verilmiştir. Şekil 4.29 ve Şekil 4.31’de Bölüm 6’ya ait X ve Y ham radargramları, Şekil 4.30 ve Şekil 4.32’te Bölüm 6’ya ait ölçü fotoğrafları verilmiştir.



Şekil 4.9 Refüj A Bölüm 1 Y profiline ait ham radargramlar ve ölçü krokisi



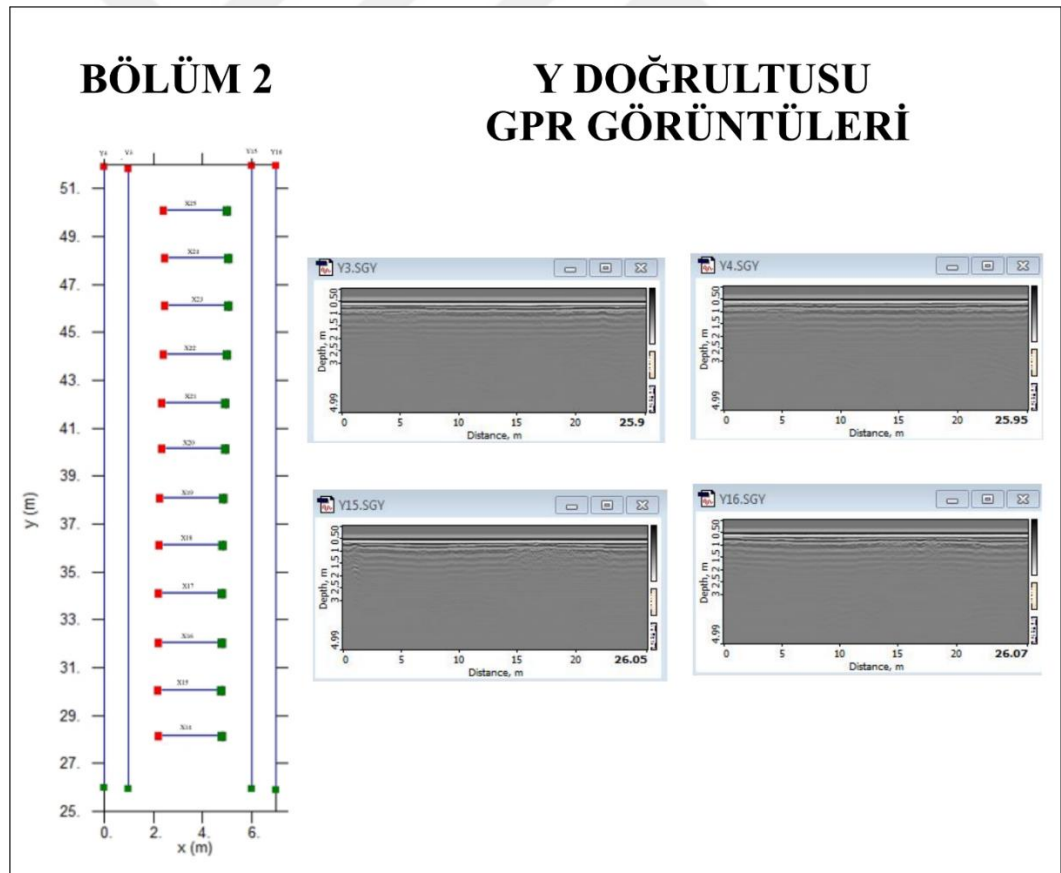
Şekil 4.10 Refüj A Bölüm 1 Y doğrultusuna ait görüntü



Şekil 4.11 Refüj A Bölüm 1 X profiline ait ham radargramlar ve ölçü krokisi



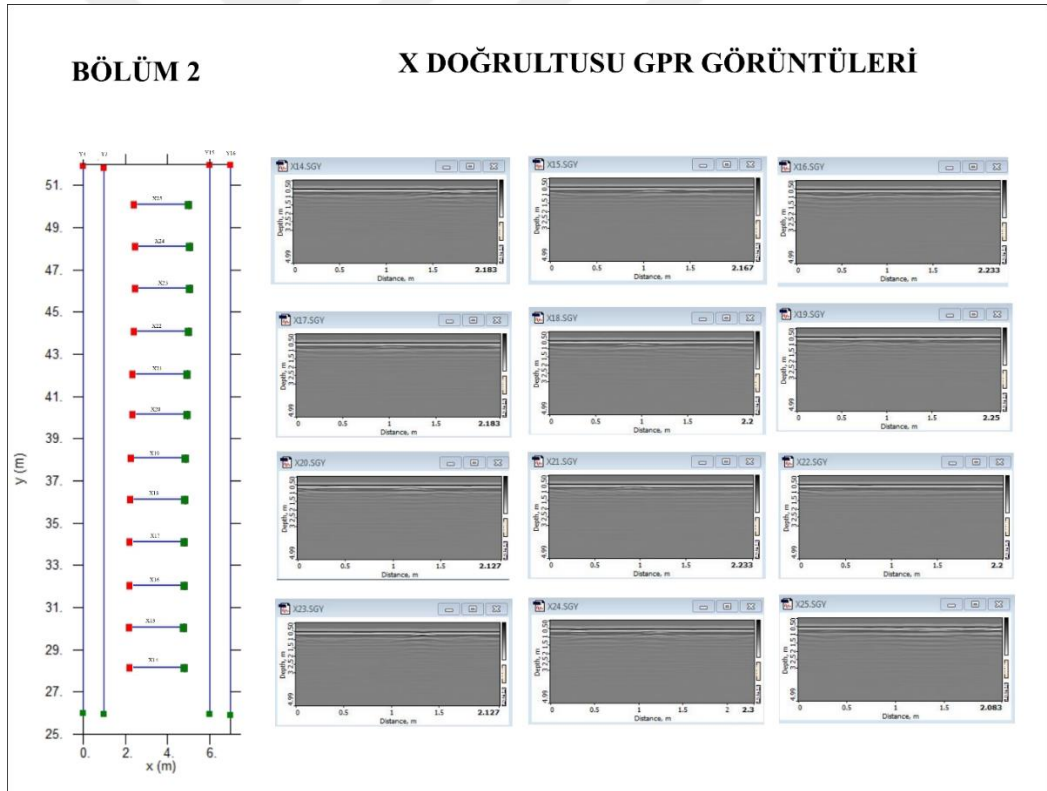
Şekil 4.12 Refüj A Bölüm 1 X doğrultusuna ait görüntü



Şekil 4.13 Refüj A Bölüm 2 Y profiline ait ham radargramlar ve ölçü krokisi



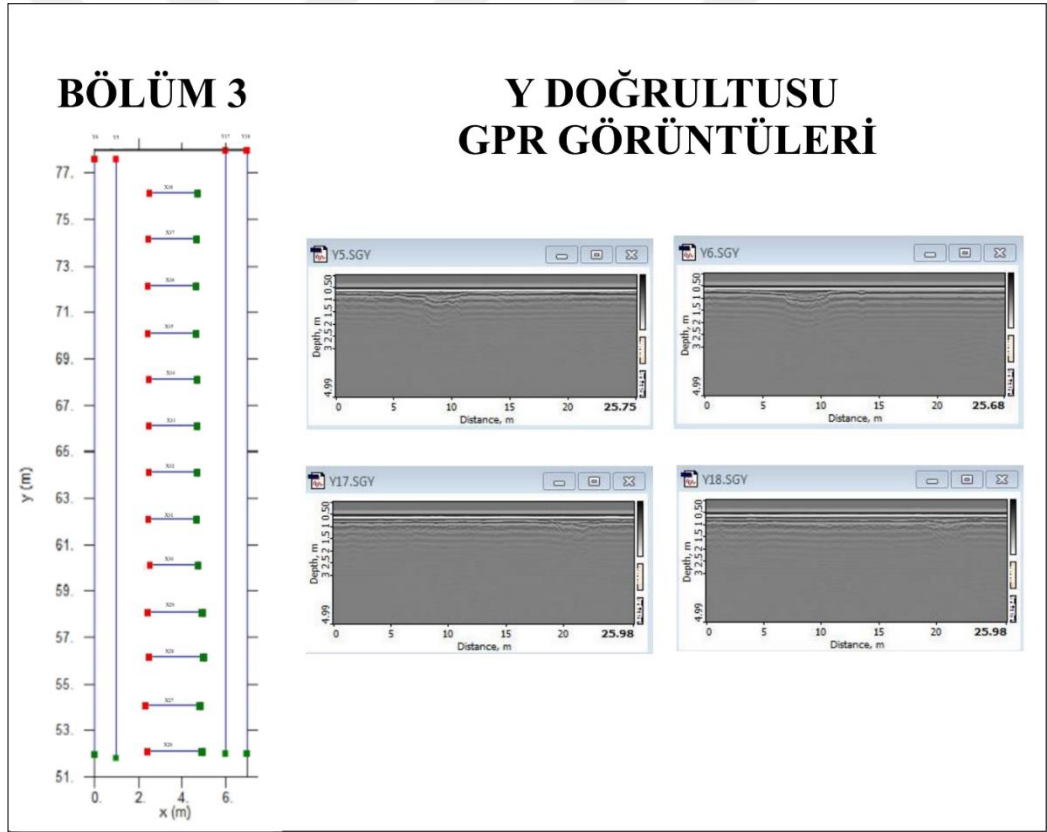
Şekil 4.14 Refüj A Bölüm 2 Y doğrultusuna ait görüntü



Şekil 4.15 Refüj A Bölüm 2 X profiline ait ham radargramlar ve ölçü krokisi



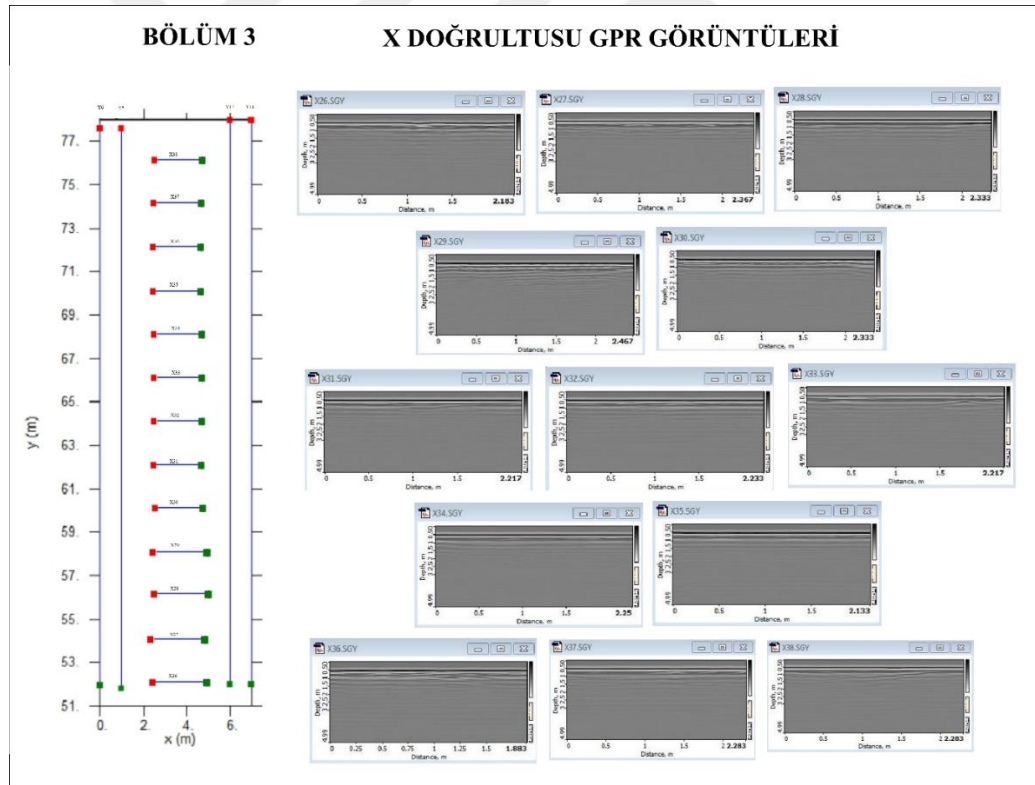
Şekil 4.16 Refüj A Bölüm 2 X doğrultusuna ait görüntü



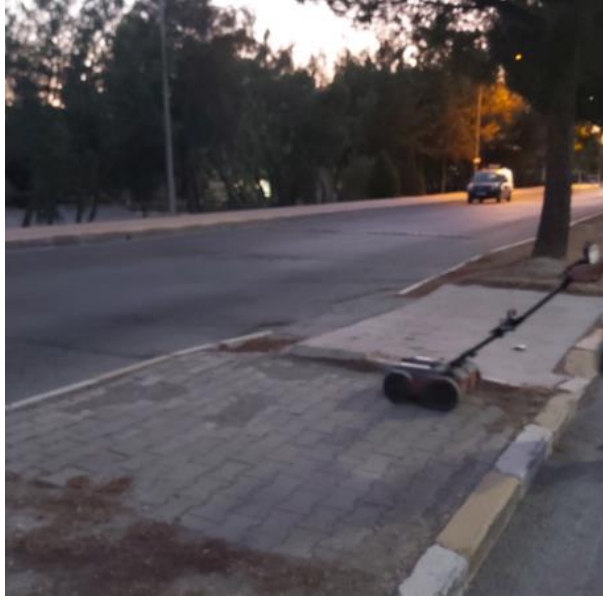
Şekil 4.17 Refüj A Bölüm 3 Y profiline ait ham radargramlar ve ölçü krokisi



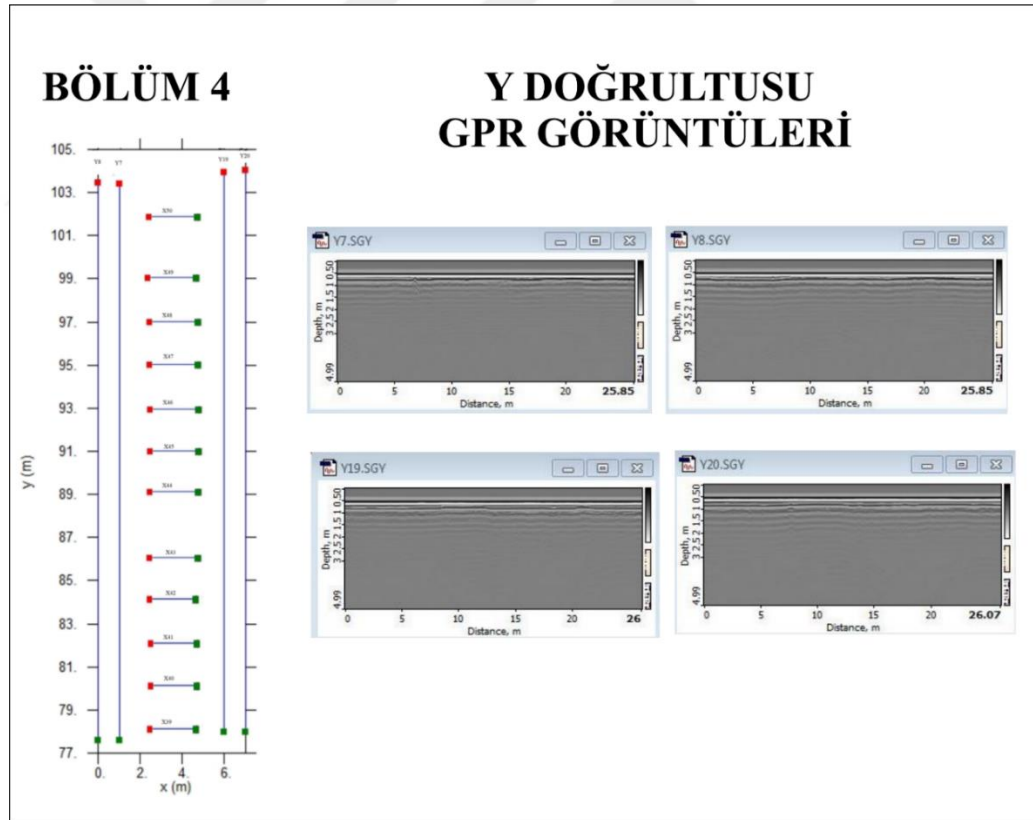
Şekil 4.18 Refüj A Bölüm 3 Y doğrultusuna ait görüntü



Şekil 4.19 Refüj A Bölüm 3 X profiline ait ham radargramlar ve ölçü krokisi



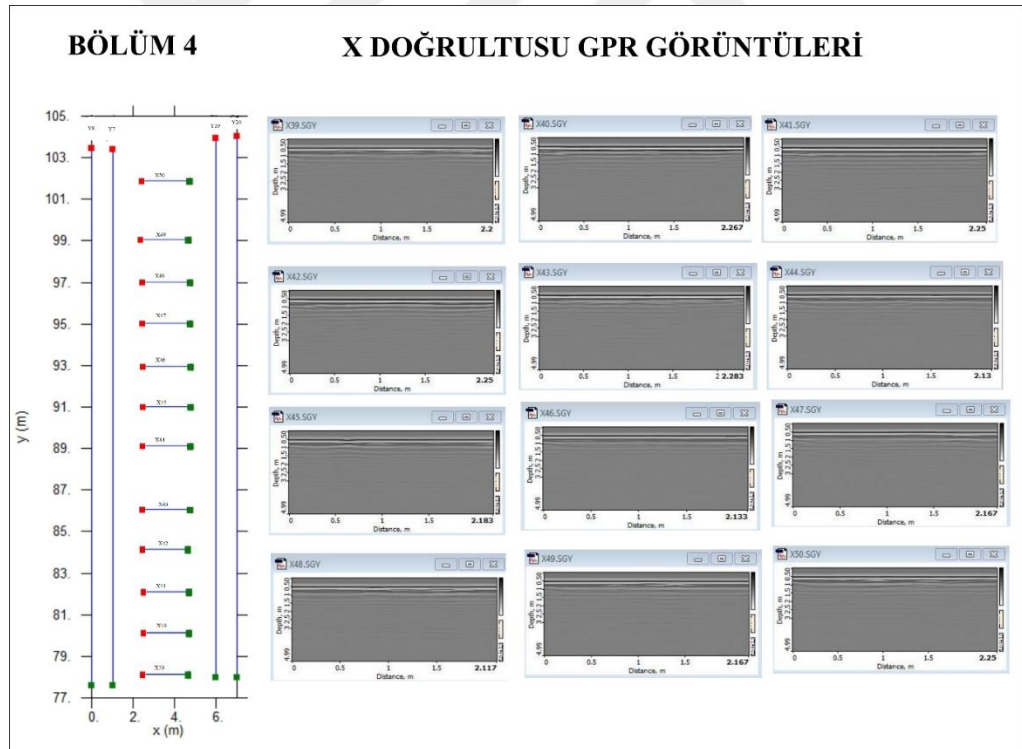
Şekil 4.20 Refüj A Bölüm 3 X doğrultusuna ait görüntü



Şekil 4.21 Refüj A Bölüm 4 Y profiline ait ham radargramlar ve ölçü krokisi



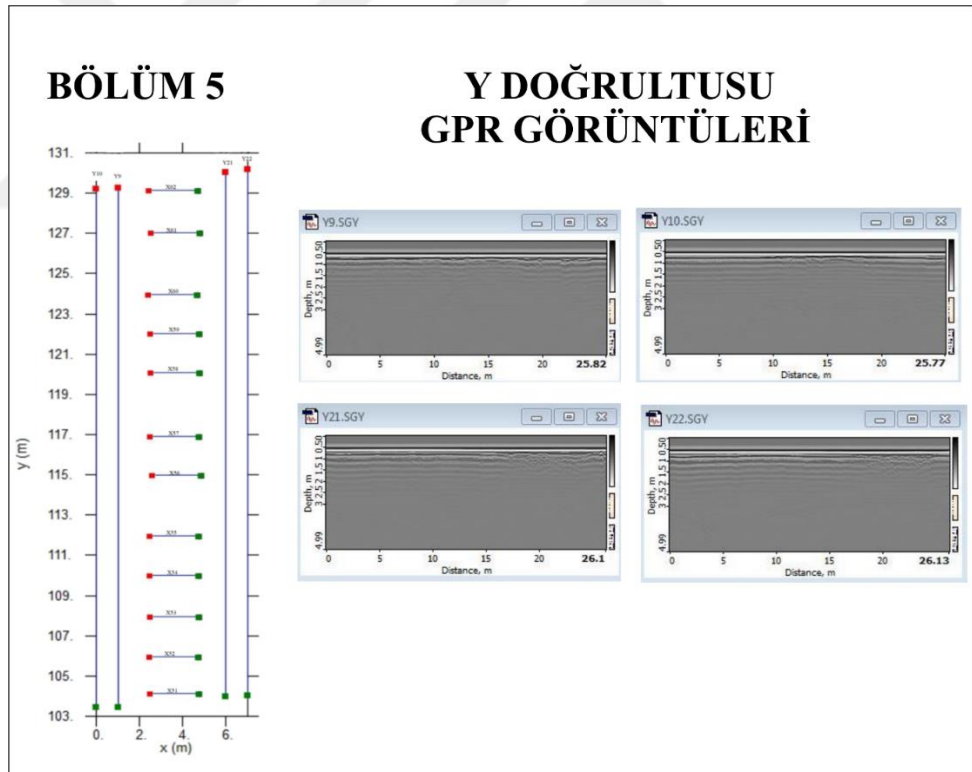
Şekil 4.22 Refüj A Bölüm 4 Y doğrultusuna ait görüntü



Şekil 4.23 Refüj A Bölüm 4 X profiline ait ham radargramlar ve ölçü krokisi



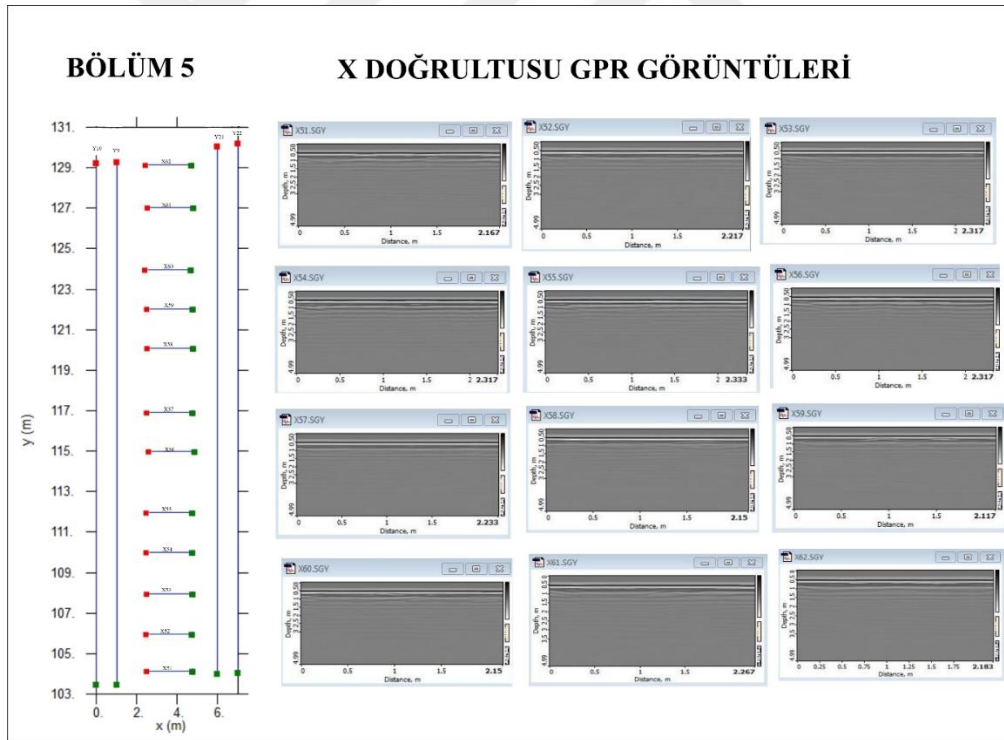
Şekil 4.24 Refüj A Bölüm 4 X doğrultusuna ait görüntü



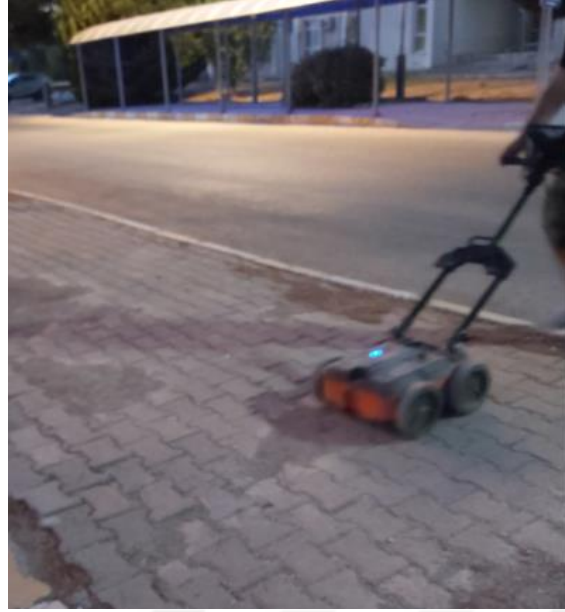
Şekil 4.25 Refüj A Bölüm 5 Y profiline ait ham radargramlar ve ölçü krokisi



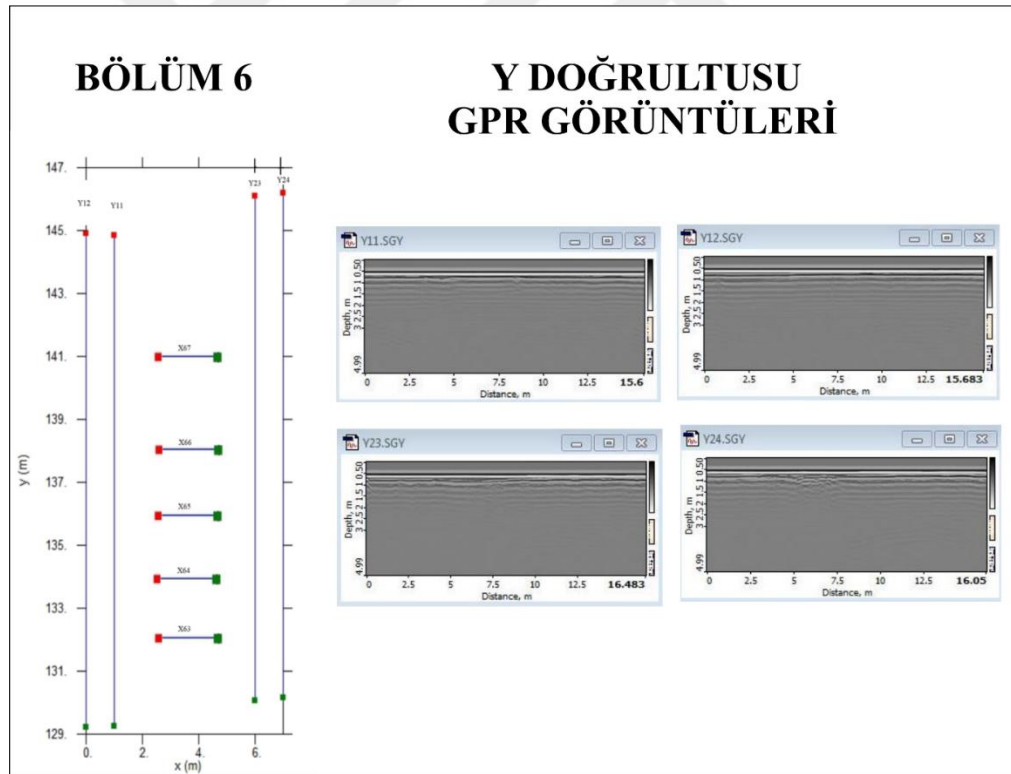
Şekil 4.26 Refüj A Bölüm 5 Y doğrultusuna ait görüntü



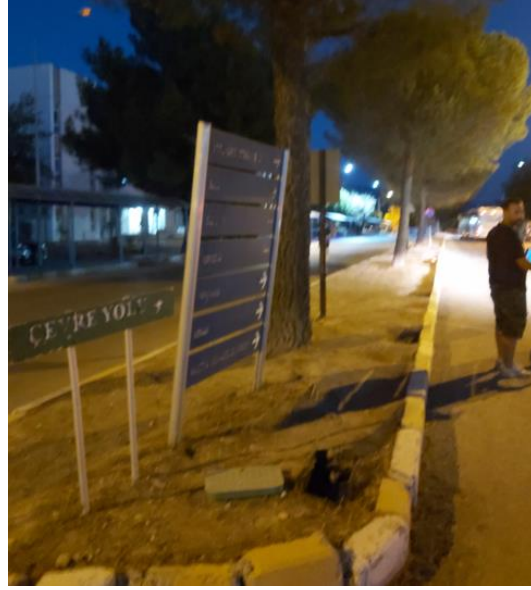
Şekil 4.27 Refüj A Bölüm 5 X profiline ait ham radargramlar ve ölçü krokisi



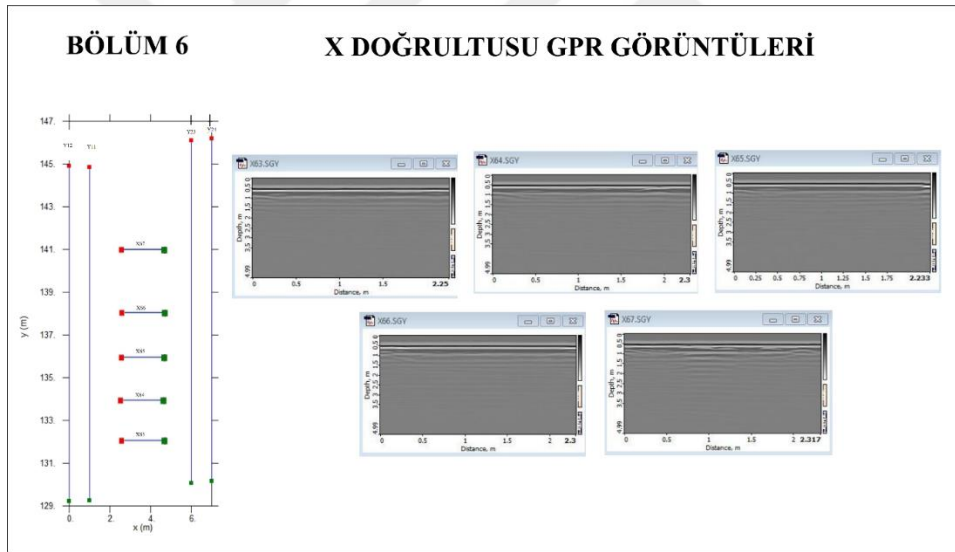
Şekil 4.28 Refüj A Bölüm 5 X doğrultusuna ait görüntü



Şekil 4.29 Refüj A Bölüm 6 Y profiline ait ham radargramlar ve ölçü krokisi



Şekil 4.30 Refüj A Bölüm 6 Y doğrultusuna ait görüntü



Şekil 4.31 Refüj A Bölüm 6 X profiline ait ham radargramlar ve ölçü krokisi



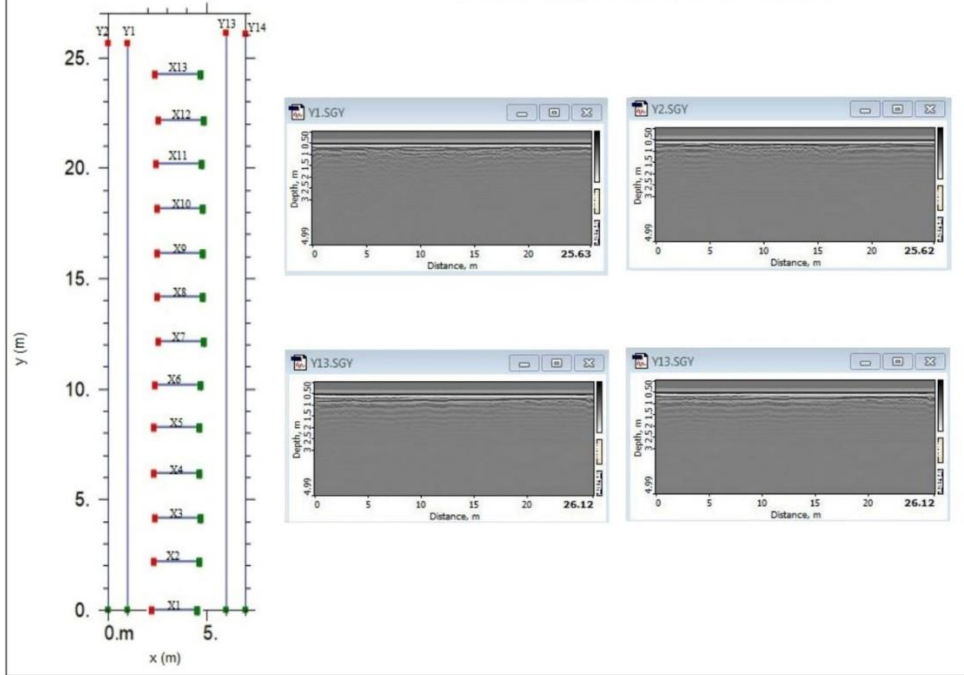
Şekil 4.32 Refüj A Bölüm 6 X doğrultusuna ait görüntü

4.3.2 Refüj B Toplanan Ham Veriler

Refüj B 6 bölüme ayrılmış olup her bölüm ayrı ayrı krokilendirilmiş ve X, Y profilleri fotoğraflanmıştır. Şekil 4.33 ve Şekil 4.35'te Bölüm 1'e ait X ve Y ham radargramları, Şekil 4.34 ve Şekil 4.36'da Bölüm 1'e ait ölçü fotoğrafları verilmiştir. Şekil 4.37 ve Şekil 4.39'da Bölüm 2'ye ait X ve Y ham radargramları, Şekil 4.38 ve Şekil 4.40'ta Bölüm 2'ye ait ölçü fotoğrafları verilmiştir. Şekil 4.41 ve Şekil 4.43'te Bölüm 3'e ait X ve Y ham radargramları, Şekil 4.42 ve Şekil 4.44'te Bölüm 3'e ait ölçü fotoğrafları verilmiştir. Şekil 4.45 ve Şekil 4.47'de Bölüm 4'e ait X ve Y ham radargramları, Şekil 4.46 ve Şekil 4.48'de Bölüm 4'e ait ölçü fotoğrafları verilmiştir. Şekil 4.49 ve Şekil 4.51'de Bölüm 5'e ait X ve Y ham radargramları, Şekil 4.50 ve Şekil 4.52'de Bölüm 5'e ait ölçü fotoğrafları verilmiştir. Şekil 4.53 ve Şekil 4.55'te Bölüm 6'ya ait X ve Y ham radargramları, Şekil 4.54 ve Şekil 4.56'da Bölüm 6'ya ait ölçü fotoğrafları verilmiştir.

BÖLÜM 1

Y DOĞRULTUSU GPR GÖRÜNTÜLERİ



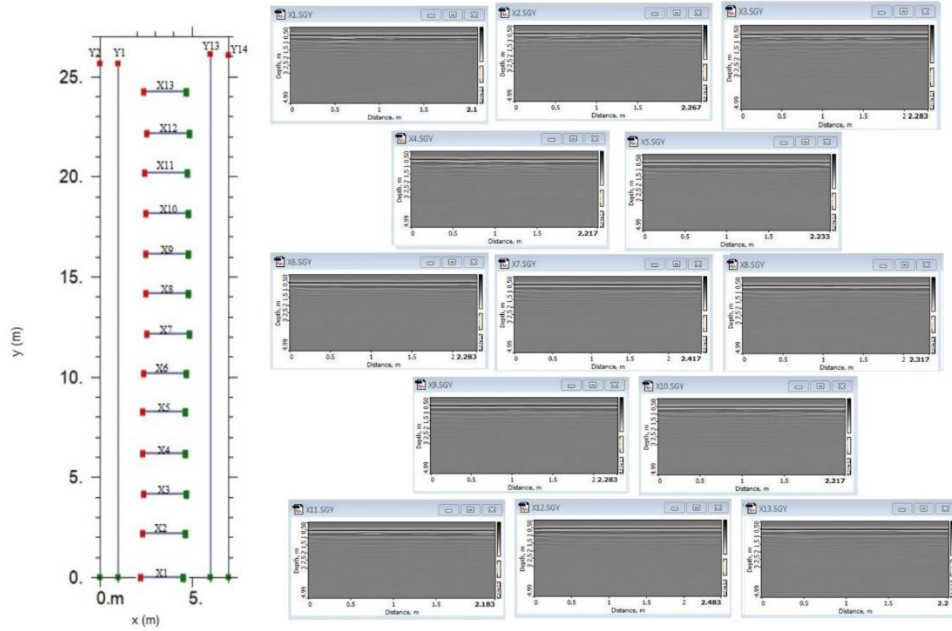
Şekil 4.33 Refüj B Bölüm 1 Y profiline ait ham radargramlar ve ölçü krokisi



Şekil 4.34 Refüj B Bölüm 1 Y doğrultusuna ait görüntü

BÖLÜM 1

X DOĞRULTUSU GPR GÖRÜNTÜLERİ



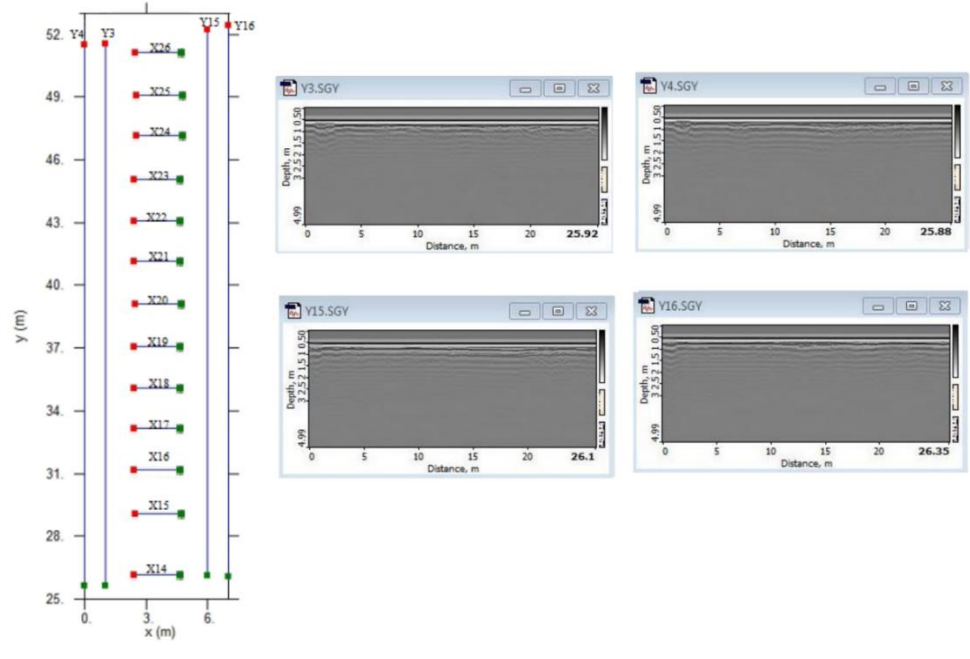
Şekil 4.35 Refüj B Bölüm 1 X profiline ait ham radargramlar ve ölçü krokisi



Şekil 4.36 Refüj B Bölüm 1 X doğrultusuna ait görüntü

BÖLÜM 2

Y DOĞRULTUSU GPR GÖRÜNTÜLERİ



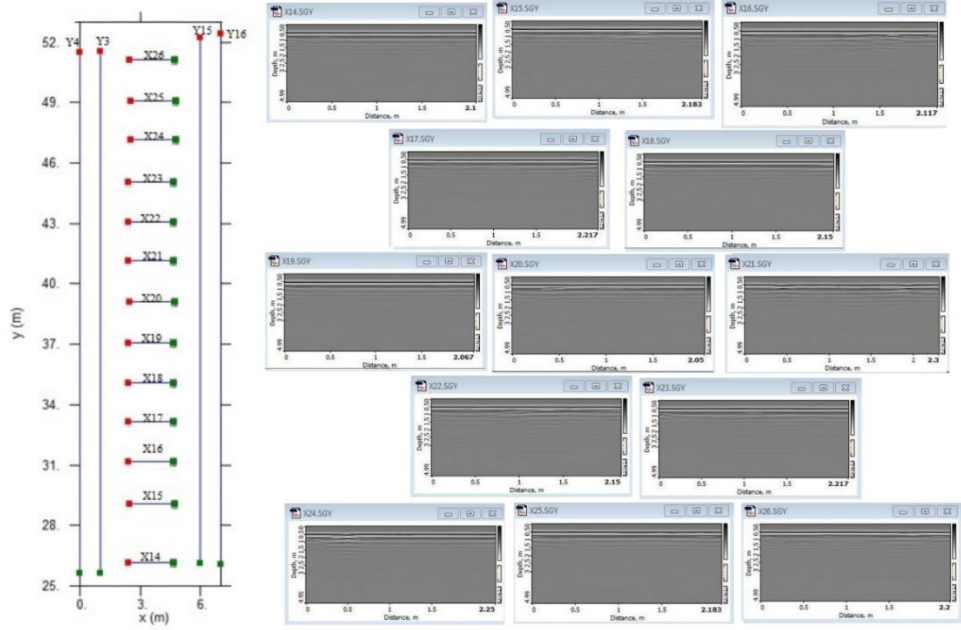
Şekil 4.37 Refüj B Bölüm 2 Y profiline ait ham radargramlar ve ölçü krokisi



Şekil 4.38 Refüj B Bölüm 2 Y doğrultusuna ait görüntü

BÖLÜM 2

X DOĞRULTUSU GPR GÖRÜNTÜLERİ



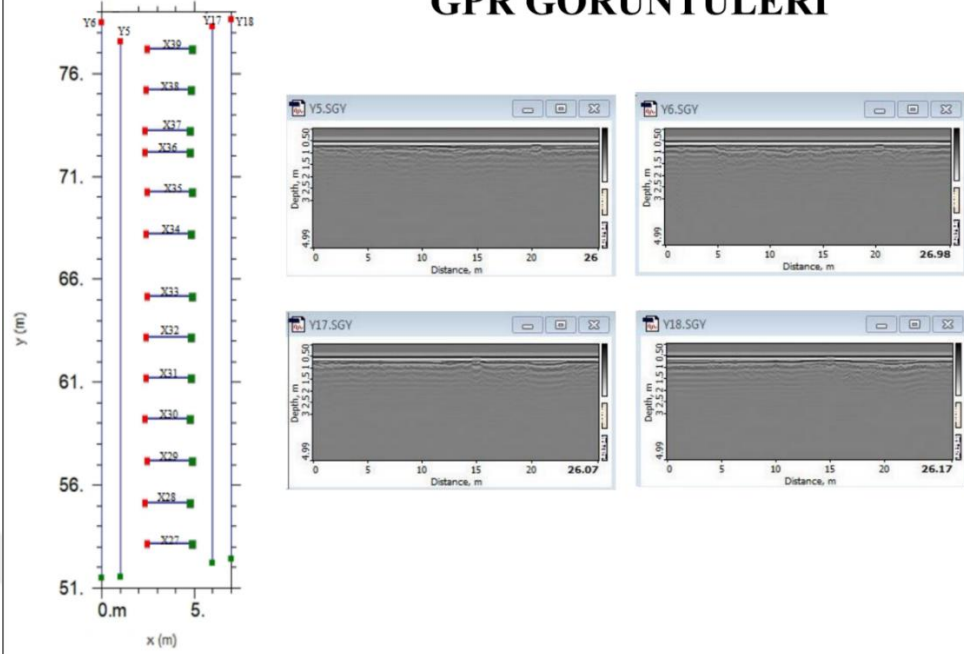
Şekil 4.39 Refüj B Bölüm 2 X profiline ait ham radargramlar ve ölçü krokisi



Şekil 4.40 Refüj B Bölüm 2 X doğrultusuna ait görüntü

BÖLÜM 3

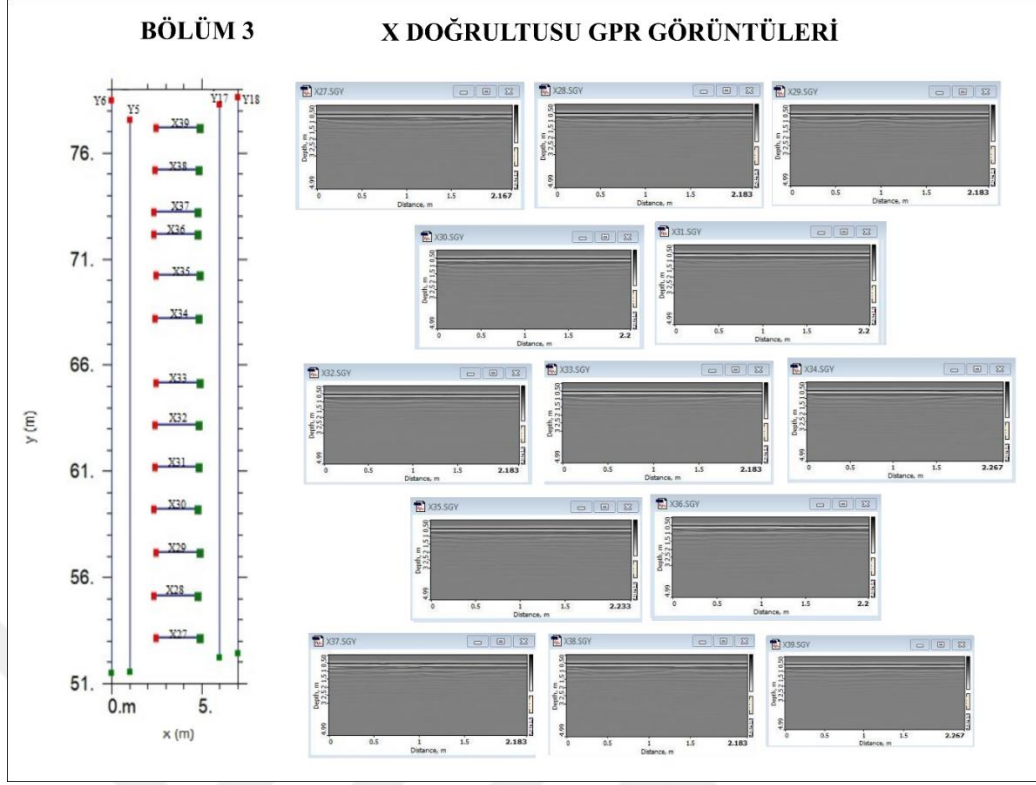
Y DOĞRULTUSU GPR GÖRÜNTÜLERİ



Şekil 4.41 Refüj B Bölüm 3 Y profiline ait ham radargramlar ve ölçü krokisi



Şekil 4.42 Refüj B Bölüm 3 Y doğrultusuna ait görüntü



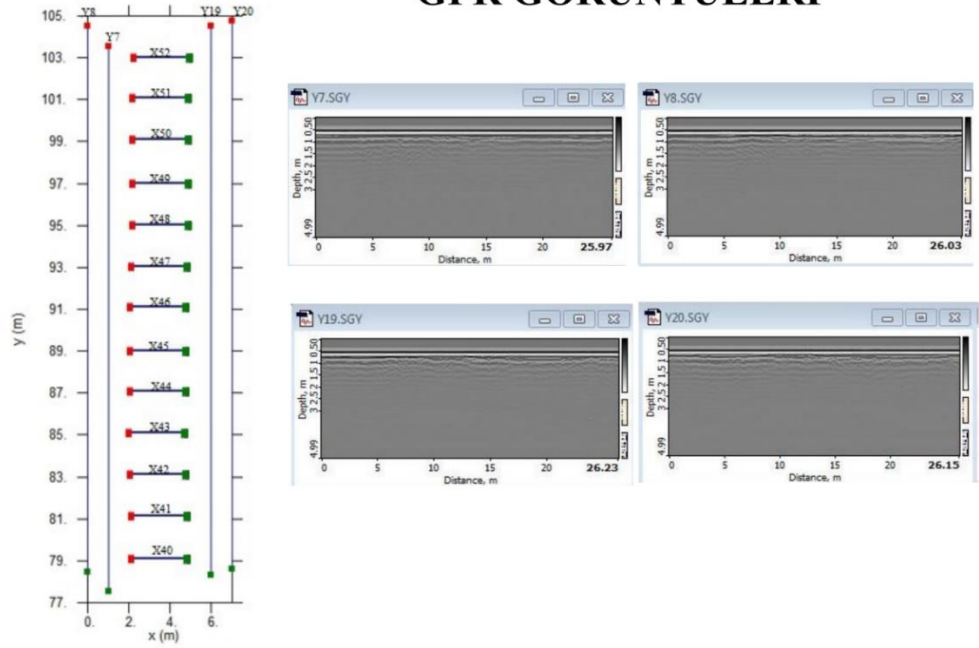
Şekil 4.43 Refüj B Bölüm 3 X profiline ait ham radargramlar ve ölçü krokisi



Şekil 4.44 Refüj B Bölüm 3 X doğrultusuna ait görüntü

BÖLÜM 4

Y DOĞRULTUSU GPR GÖRÜNTÜLERİ



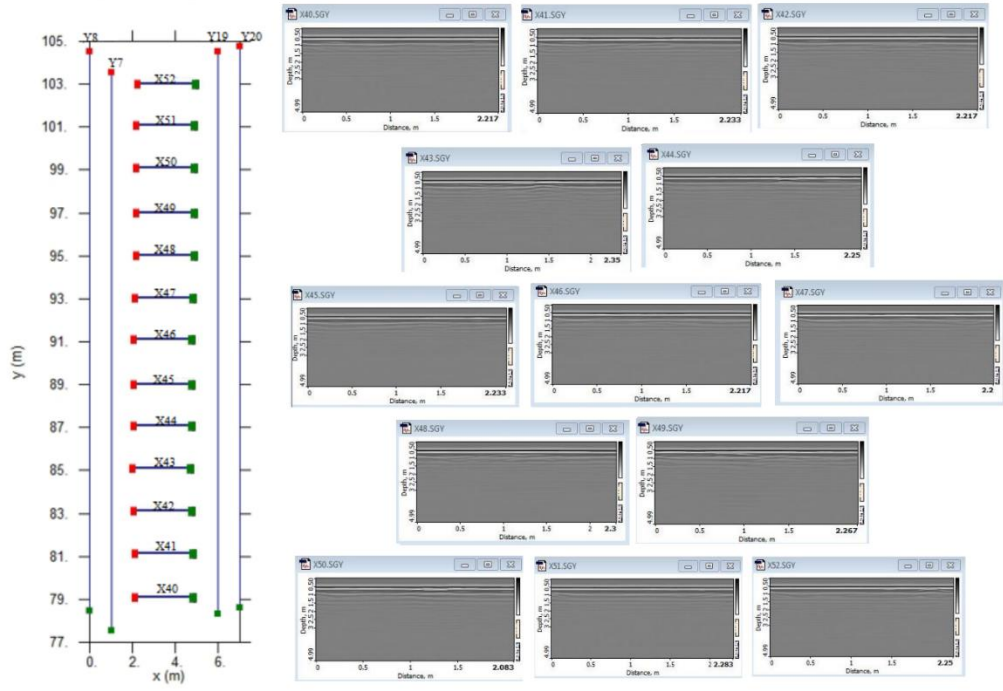
Şekil 4.45 Refüj B Bölüm 4 Y profiline ait ham radargramlar ve ölçü krokisi



Şekil 4.46 Refüj B Bölüm 4 Y doğrultusuna ait görüntü

BÖLÜM 4

X DOĞRULTUSU GPR GÖRÜNTÜLERİ



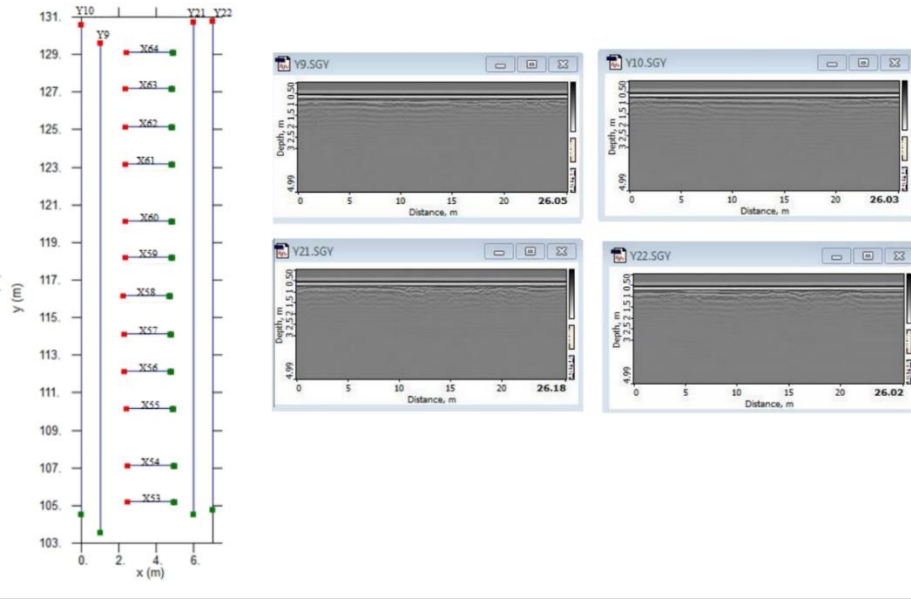
Şekil 4.47 Refüj B Bölüm 4 X profiline ait ham radargramlar ve ölçü krokisi



Şekil 4.48 Refüj B Bölüm 4 X doğrultusuna ait görüntü

BÖLÜM 5

Y DOĞRULTUSU GPR GÖRÜNTÜLERİ



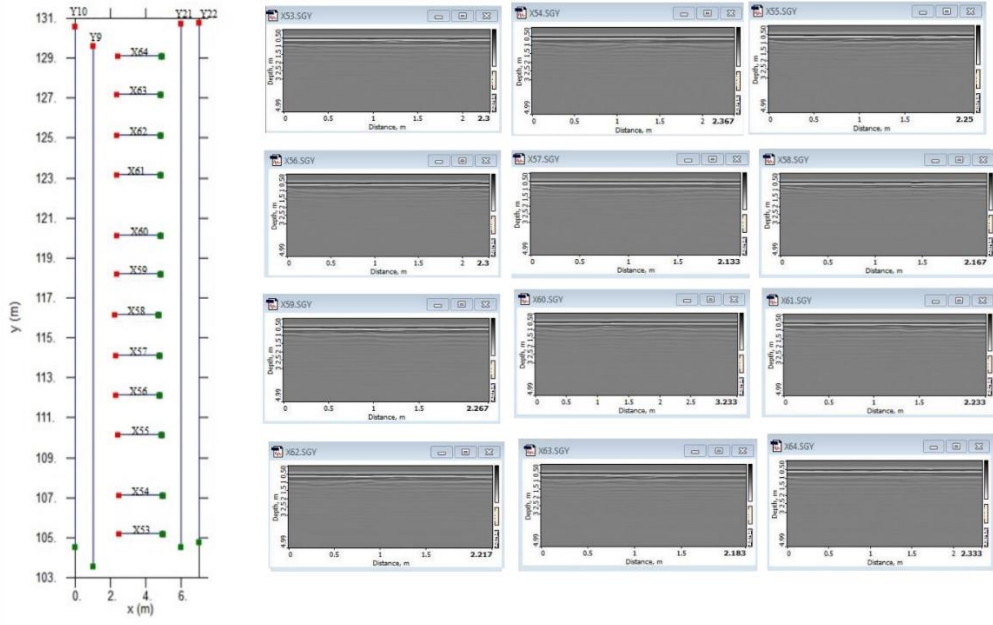
Şekil 4.49 Refüj B Bölüm 5 Y profiline ait ham radargramlar ve ölçü krokisi



Şekil 4.50 Refüj B Bölüm 5 Y doğrultusuna ait görüntü

BÖLÜM 5

X DOĞRULTUSU GPR GÖRÜNTÜLERİ



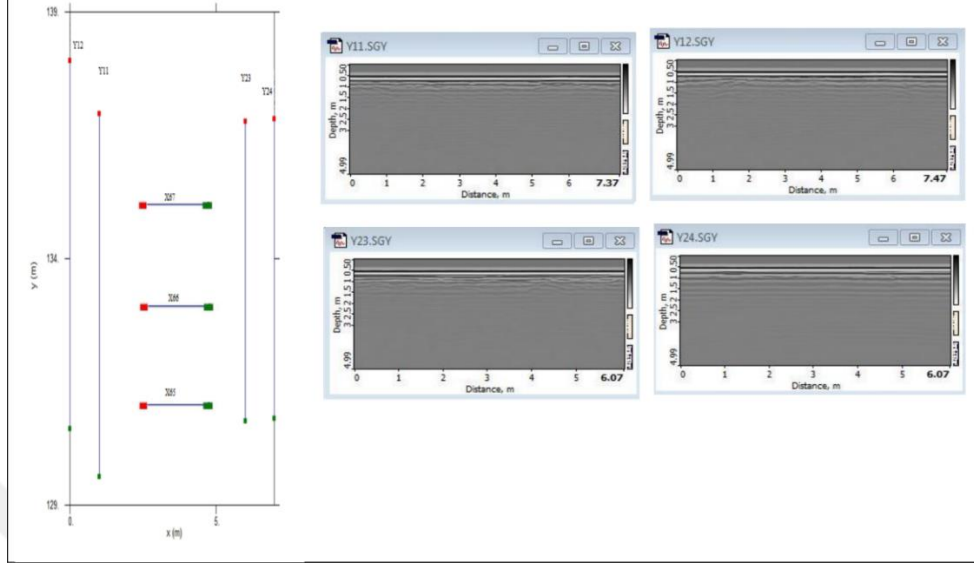
Şekil 4.51 Refüj B Bölüm 5 X profiline ait ham radargramlar ve ölçü krokisi



Şekil 4.52 Refüj B Bölüm 5 X doğrultusuna ait görüntü

BÖLÜM 6

Y DOĞRULTUSU GPR GÖRÜNTÜLERİ



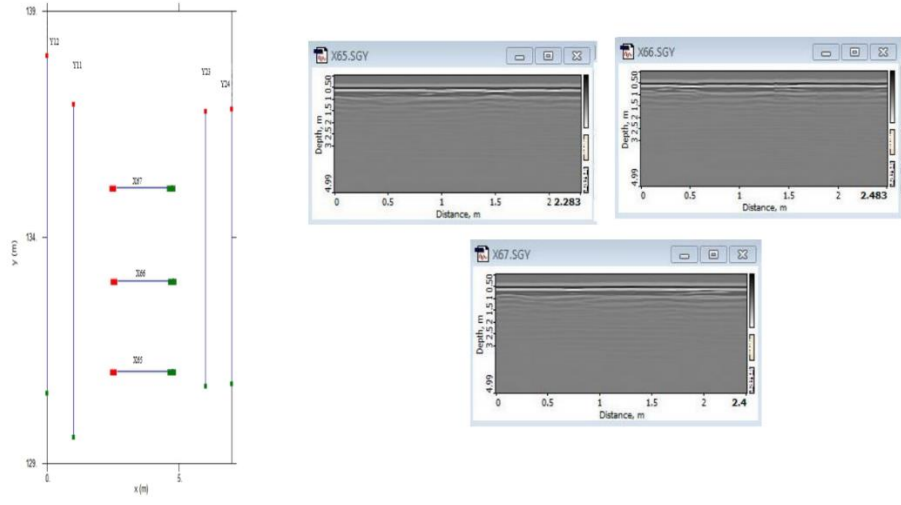
Şekil 4.53 Refüj B Bölüm 6 Y profiline ait ham radargramlar ve ölçü krokisi



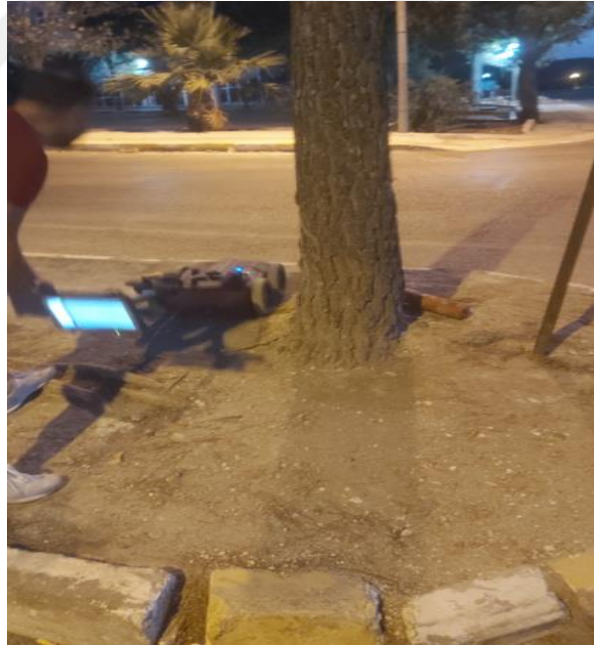
Şekil 4.54 Refüj B Bölüm 6 Y doğrultusuna ait görüntü

BÖLÜM 6

X DOĞRULTUSU GPR GÖRÜNTÜLERİ



Şekil 4.55 Refüj B Bölüm 6 X profiline ait ham radargramlar ve ölçü krokisi



Şekil 4.56 Refüj B Bölüm 6 X doğrultusuna ait görüntü

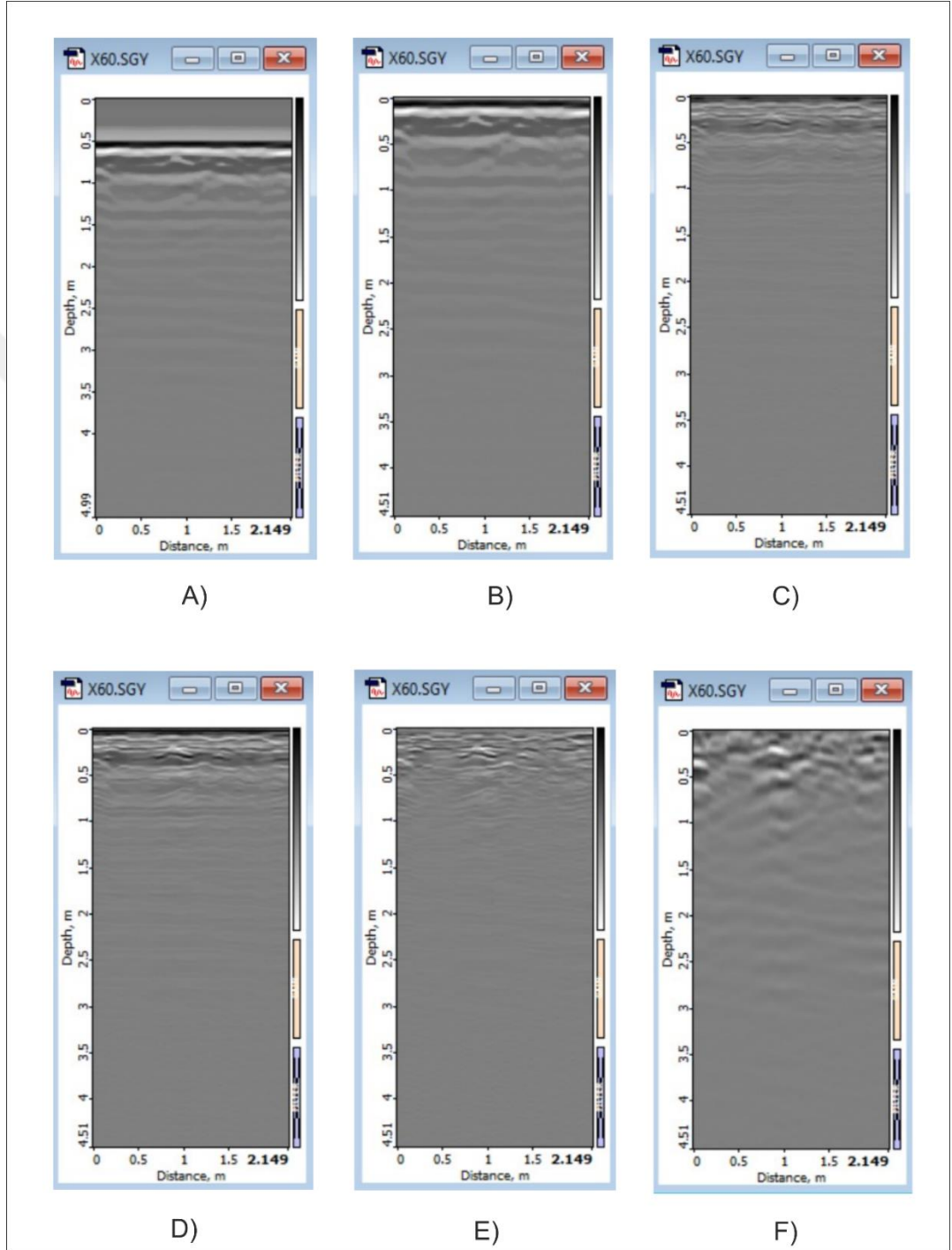
4.4 Yer Radarı Verilerinin 2B Değerlendirilmesi

Ham radargramlarda cihaz kaynaklı, zemin kaynaklı, boşluk kaynaklı yüksek genlikli gürültüler, düşük genlikli radar sinyallerini bastırıp, sönümlendiğinden aranan derinlik ve hız hesaplanamaz. Bu nedenle, GPR arazi uygulaması sonucu elde edilen ham 182 adet SGY formatlı veriler, Prism ve Geolitix yazılımları ile veri işlem aşamalarından geçirilerek gürültüden ayrıştırılıp ve genlik kazanımı sağlanmıştır. Veriler hız analizi yapmak amacıyla Prism yazılımıyla değerlendirilmiş, Geolitix yazılımında ise belirlenen hız ve dielektrik parametresi kullanılarak 6 parçaya bölünen çalışma sahasında kök olarak yorumlanan profiller tek bir hat üzerinde gösterilmiştir. Ham veriye uygulanan bütün veri işlem adımları Refüj A’da toplanan veri setlerinden seçilen X60 ve Y4 üzerinde, Refüj B’de toplanan X58 ve Y5 üzerinde ayrıntılı olarak gösterilmiş ve tüm profillere ait değerlendirmelerin sonucu ölçeklendirilerek sunulmuştur. 2B değerlendirmelere ek 6 parçaya bölünen krokiden faydalanarak, her bir parçaya denk gelen ve kök olduğu düşünülen profiller gösterilmiştir.

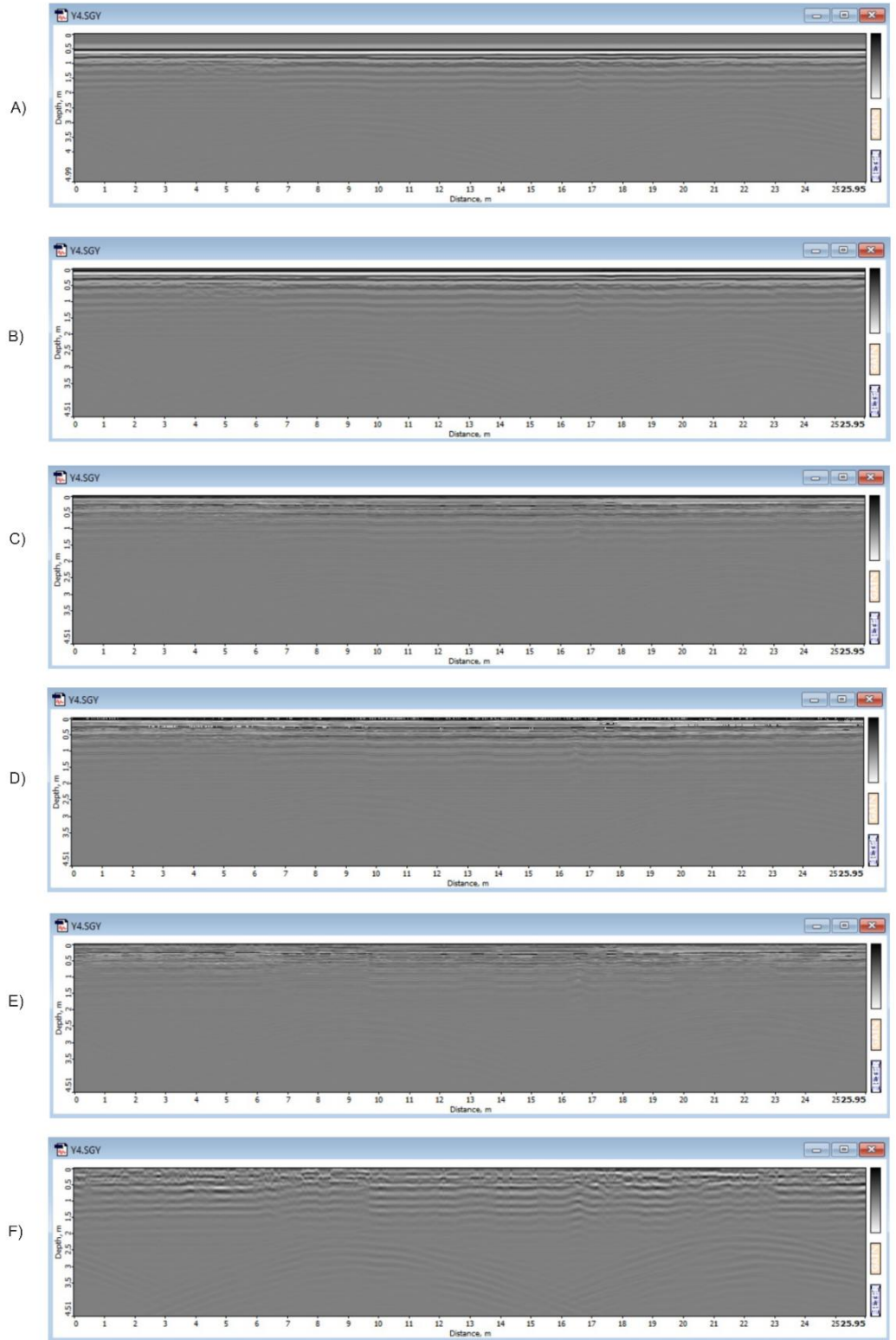
4.4.1 Refüj A Verilerinin Prism Yazılımında 2B Değerlendirilmesi ve Hız Analizi

Refüj A üzerinde alınmış olan X ve Y profillerine ait ham veriler, öncelikli olarak Prism yazılımında açılmıştır. İlk olarak veriye alıcı ve verici antenden kaynaklanan hava boşluğu gürültüsünü gidermek için “Başlangıç Zamanı Düzeltmesi” uygulanmıştır. Başlangıç zamanı düzeltmesi uygulanan veri kümesine, yer içerisinde oluşan akımdan kaynaklı oluşan düşük frekanslı gürültüleri yok etmek için “Dewow süzgeci” uygulanmıştır. Daha sonra her bir iz üzerinde sönüm etkisi ve derinlik etkisi ile sönümlenen veriyi güçlendirerek, görünürlüğü arttırmak amacıyla veriye “Kazanç İşlevi (Automatic Gain Control (AGC))” uygulanmış olup, süzgeçleme sonucu belirginleşen hem yatay hem de düşey çizgisellik gösteren izlerin giderilmesi amacıyla da “Arka Planı Giderme (Background Removal) Süzgeci” uygulanmıştır. Kazanç süzgeci uygulamak için pencere sayısı 90 seçilmiş olup, arka planı giderme süzgecinde ise pencere aralığı 0-90 arasında seçilmiştir. Verilerde cihaz kaynaklı gürültüler

haricinde çevresel ve insan kaynaklı gürültüler de mevcuttur. Bu gürültüleri veri kümesinde atmak için 50 Mhz ile 500 Mhz arasında band geçişli süzgeç (Bandpass filtre) verilere uygulanmıştır. Şekil 4.57’de X60 profiline, Şekil 4.58’de Y4 profiline uygulanan beş süzgeç ve ham hali sunulmaktadır.

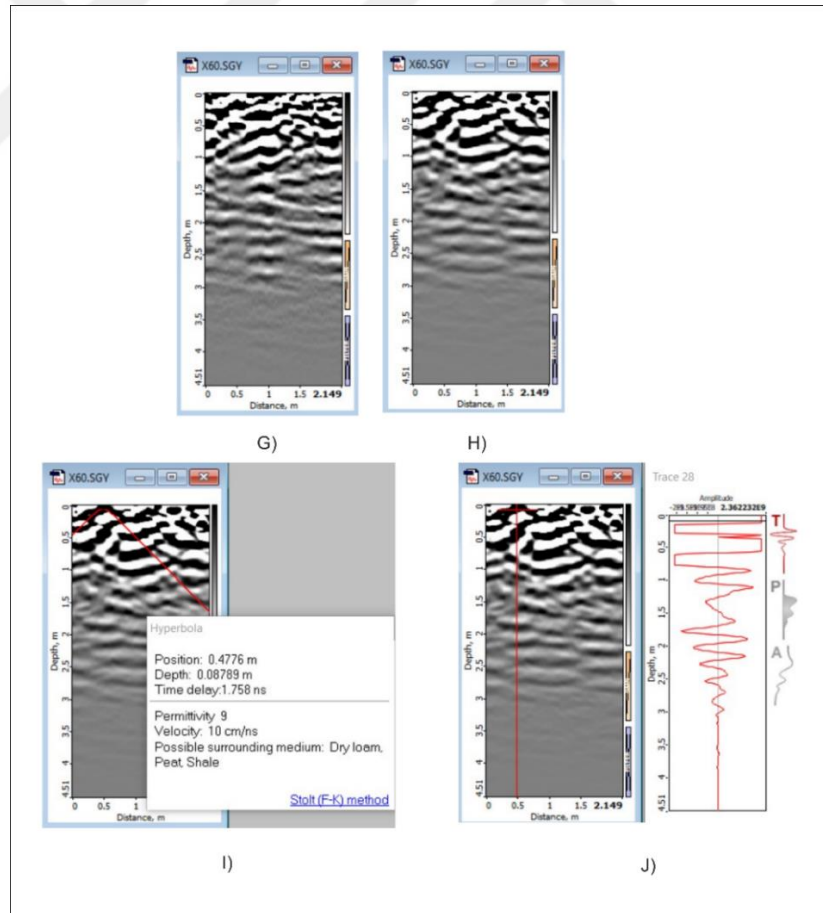


Şekil 4.57 A) X60 profiline ait ham radargram, B) Başlangıç zamanı düzeltmesi uygulanmış radargram, C) Akım Düzeltmesi uygulanmış radargram, D) Kazanç Süzgeci uygulanmış radargram, E) Arka Planı Giderme Süzgeci uygulanmış radargram ve F) Band geçişli süzgeç uygulanmış radargram

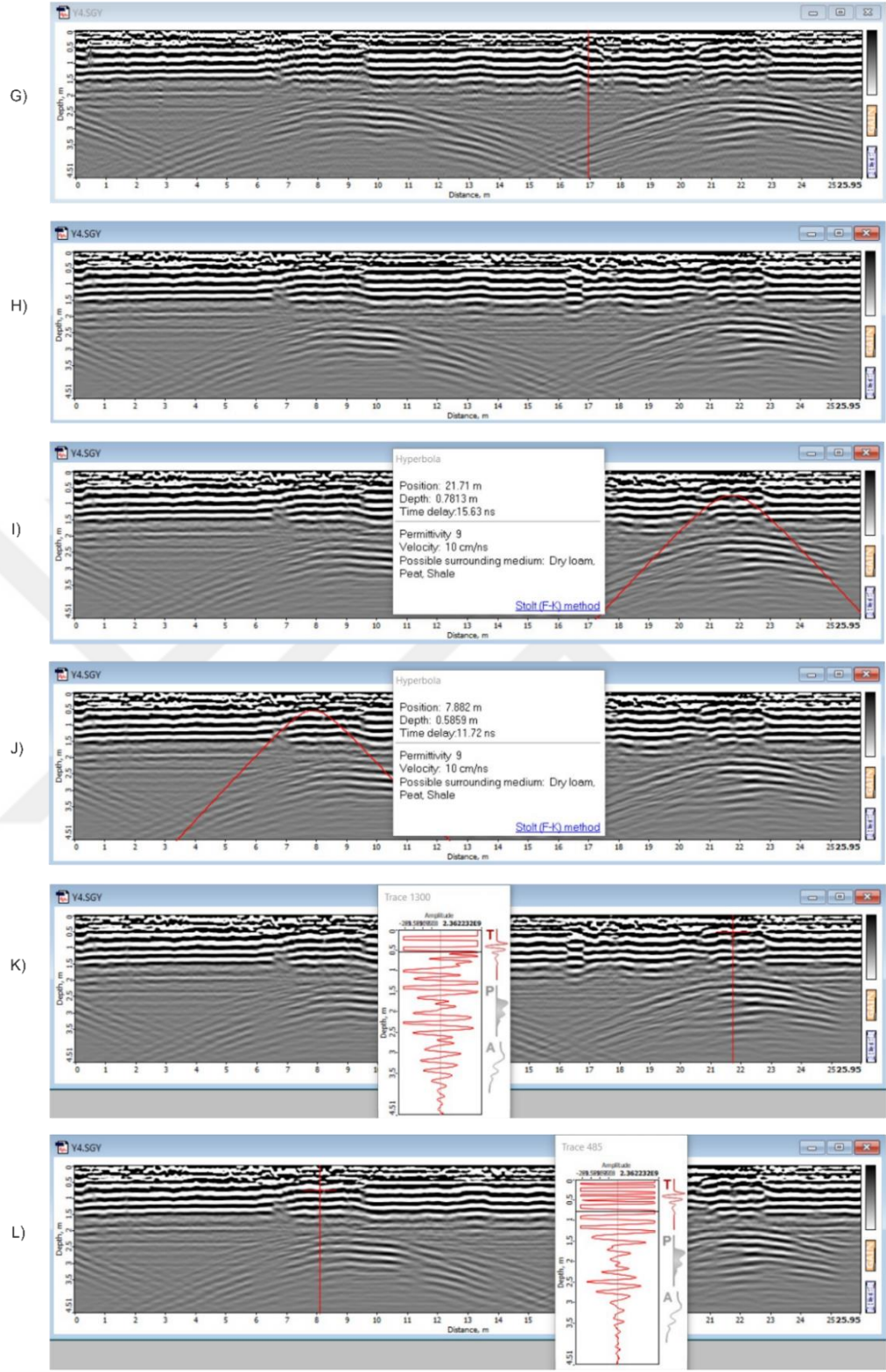


Şekil 4.58 A) Y4 profiline ait ham radargram, B) Başlangıç zamanı düzeltmesi uygulanmış radargram, C) Akım Düzeltmesi uygulanmış radargram, D) Kazanç Süzgeci uygulanmış radargram, E) Arka Planı Giderme Süzgeci uygulanmış radargram ve F) Band geçişli süzgeç uygulanmış radargram

Band geçişli sűzge uygulanan veri kűmesinde belirgin frekansları daha da yorum yapılabilir hale getirebilmek amacıyla veriye genlik kazanımı yani “kazanç (gain) işlevi” sűzgeci uygulanmıřtır. Yeraltının tekdűze olmamasından kaynaklanan gűrűltűyű gidererek, yansımının gerçek yerini saptayabilmek adına kazanç sűzgeci uygulanan veriye F-K Stolt yűntemi ile gű “migration” işlemi uygulanmıř ve yűntem uygulanırken Tablo 2.1’de verilen jeolojik birimlere ait hızlardan yararlanılmıřtır. lű asphalt ve sıkı toprak ile kűkler űzerinde alındıėından elektromanyetik hız bilgisi 10 cm/ns olarak seçilmiřtir. Deėerlendirmeler sonucunda kűkler űzerine denk gelen ve kűk olduėu dűřűnűlen yansımaların hızında da aėaç kűklerinin elektromanyetik hızının 10 cm/ns ve dielektrik sabitinin 9 olduėu gűzlemlenmiřtir. řekil 4.59’da X60 profiline, řekil 4.60’ta Y4 profiline uygulanan sűzgeler ve hız analizi gűzlemlenmektedir. řekil 4.61’de X profiline ait deėerlendirilmiř radargramların 1.kısmı, řekil 4.62’de X profiline ait deėerlendirilmiř radargramların 2. kısmı ve řekil 4.63’te Y profiline ait deėerlendirilmiř radargramların tamamı verilmiřtir.



řekil 4.59 G) Kazanç (Gain) uygulanmıř radargram, H) Gű işlemi uygulanmıř radargram, I) Hız analizi sonucu deėerlendirilen parametreler ve J) Kűk olan yansımının genlik spektrumu



Şekil 4.60 G) Kazanç (Gain) uygulanmış radargram, H) Göç işlemi uygulanmış radargram, I) Gözlemlenen ilk köke ait hız analizi sonucu değerlendirilen parametreler, J) Gözlemlenen ikinci köke ait hız analizi sonucu değerlendirilen parametreler, K) Gözlemlenen ilk kökün genlik spektrumu ve L) Gözlemlenen ikinci kökün genlik spektrumu

REFÜJ A X PROFİLİ DEĞERLENDİRİLMİŞ RADARGRAMLAR 1. KISIM



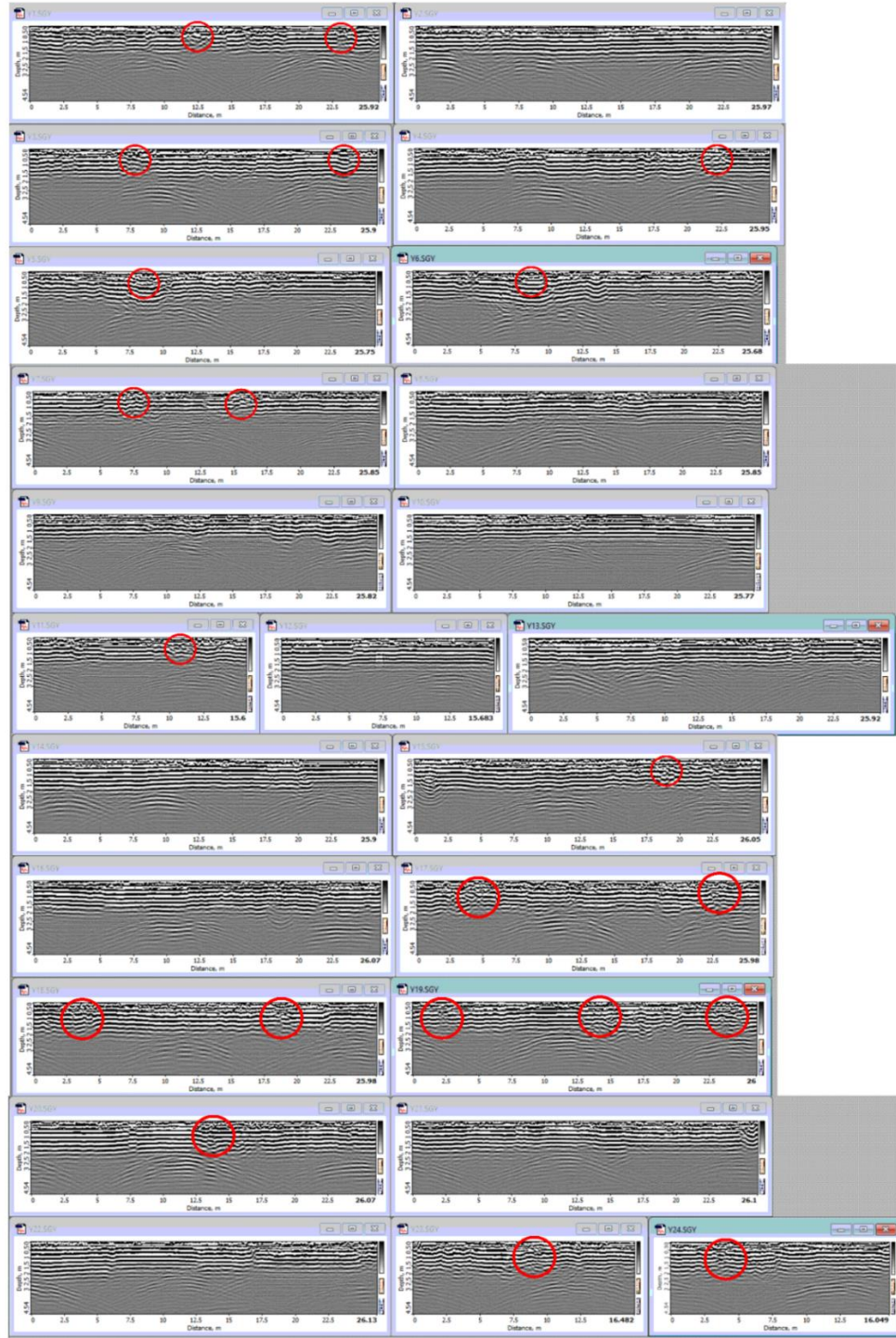
Şekil 4.61 X profiline ait değerlendirilmiş radargramlar 1. kısım

REFÜJ A X PROFİLİ DEĞERLENDİRİLMİŞ RADARGRAMLAR 2. KISIM

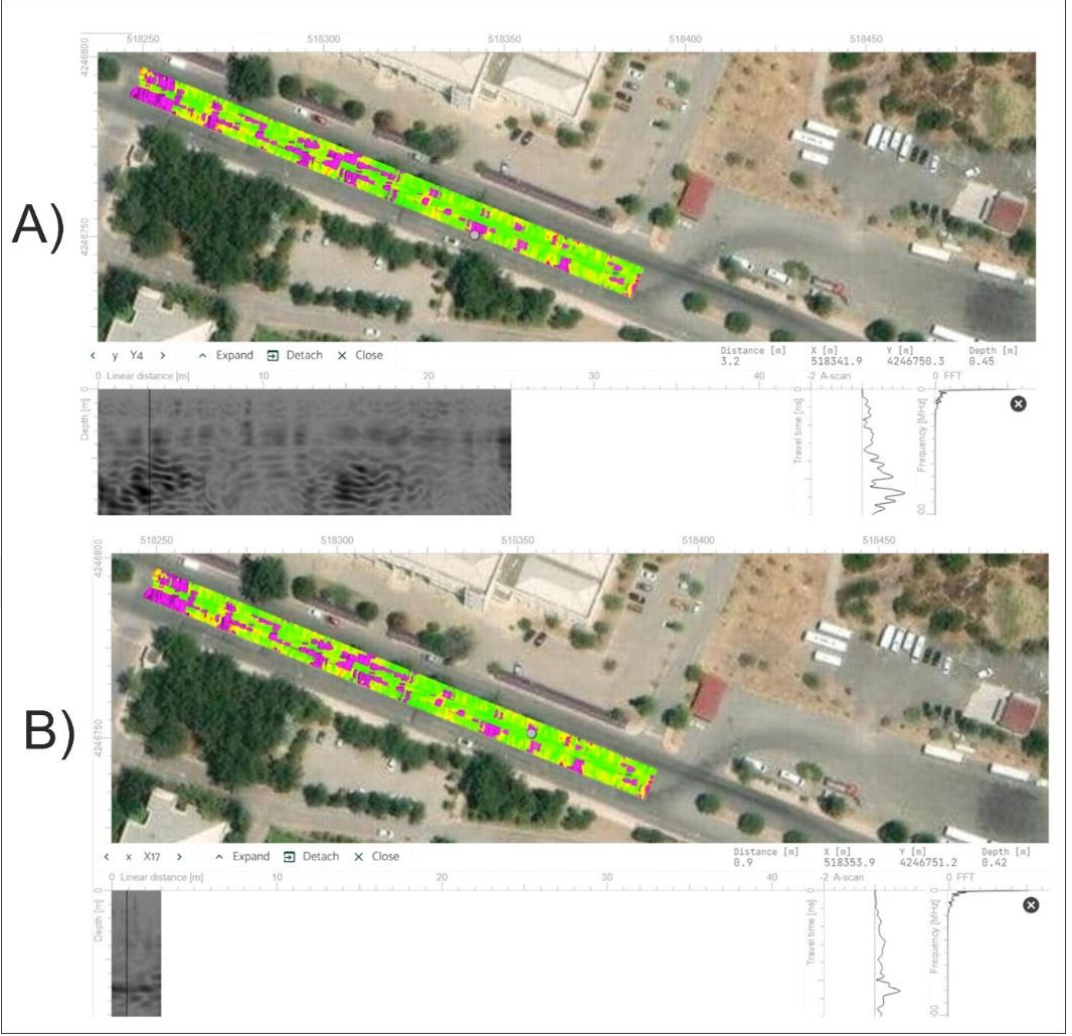


Şekil 4.62 X profiline ait değerlendirilmiş radargramlar 2. kısım

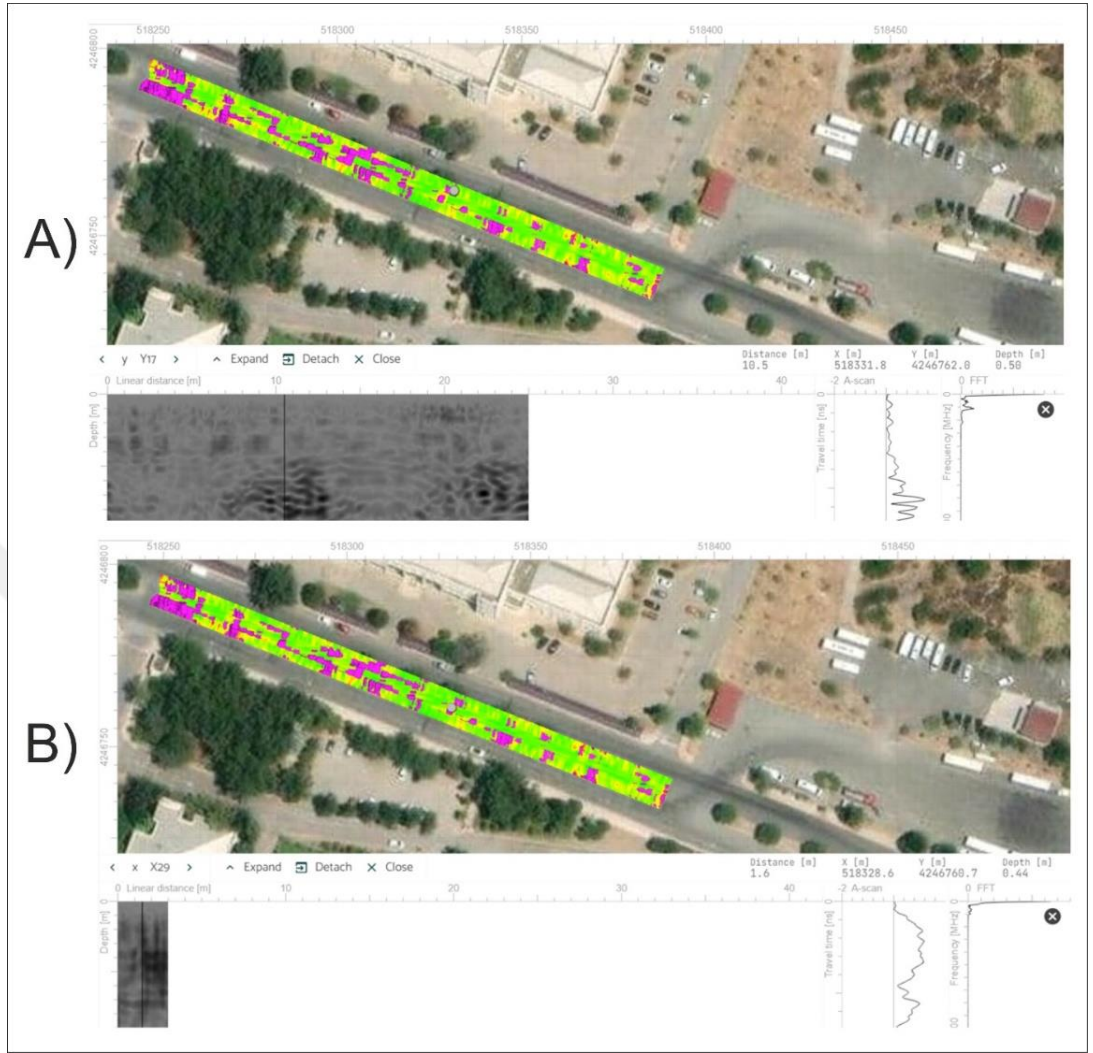
REFÜJ A Y PROFİLİ DEĞERLENDİRİLMİŞ RADRGRAMLAR



Şekil 4.63 Y profiline ait değerlendirilmiş radargramlar (Kırmızı işaretlenen daireler köke ait yansımaları ifade etmektedir.)



Şekil 4.65 A) Bölüm 2'ye ait Y4 profilinde yansıyan kök görüntüsü ve B) Bölüm 2'ye ait X17 profilinde yansıyan kök görüntüsü (Şekillerde gözlemlenen fuşya renk kökleri temsil etmektedir.)



Şekil 4.66 A) Bölüm 3'e ait Y17 profilinde yansıyan kök görüntüsü ve B) Bölüm 3'e ait X29 profilinde yansıyan kök görüntüsü (Şekillerde gözlemlenen fuşya renk kökleri temsil etmektedir.)

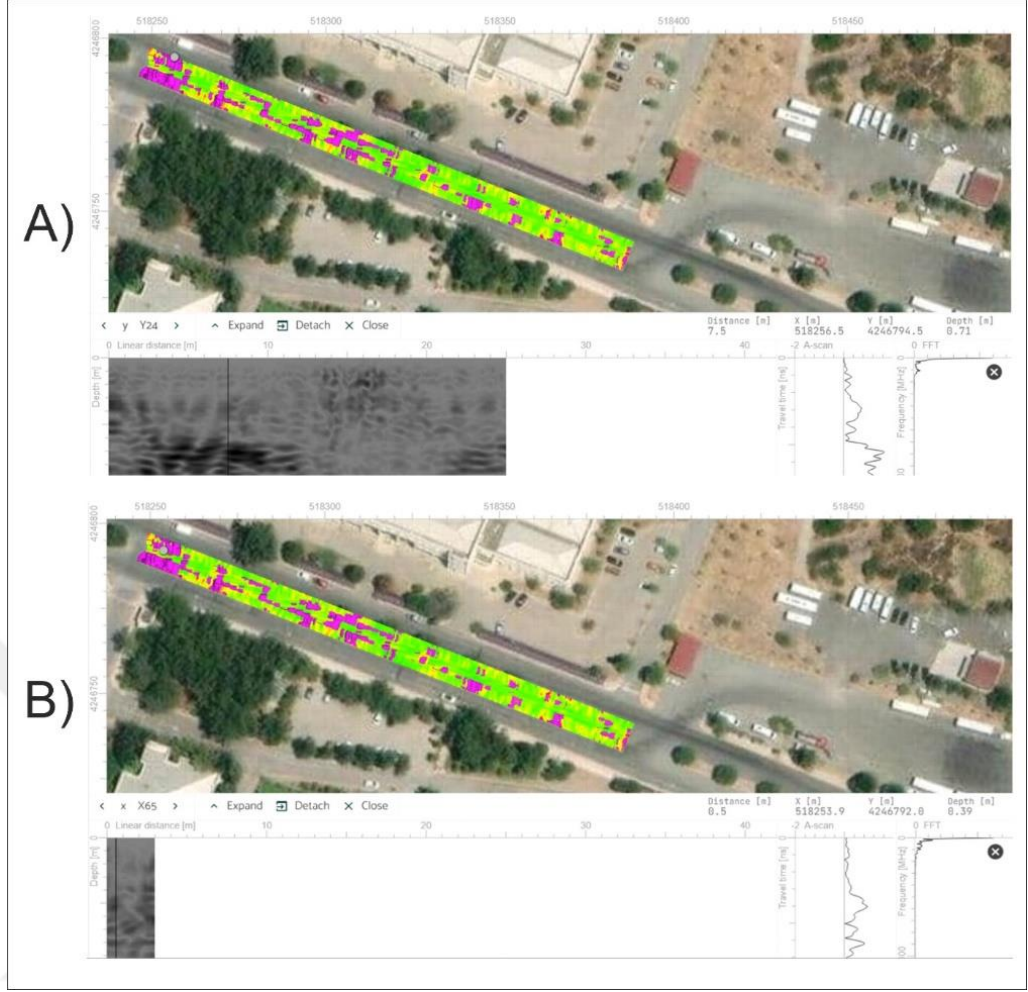
A)



B)



Şekil 4.68 A) Bölüm 5'e ait Y21 profilinde yansıyan kök görüntüsü ve B) Bölüm 5'e ait X56 profilinde yansıyan kök görüntüsü (Şekillerde gözlemlenen fuşya renk kökleri temsil etmektedir.)



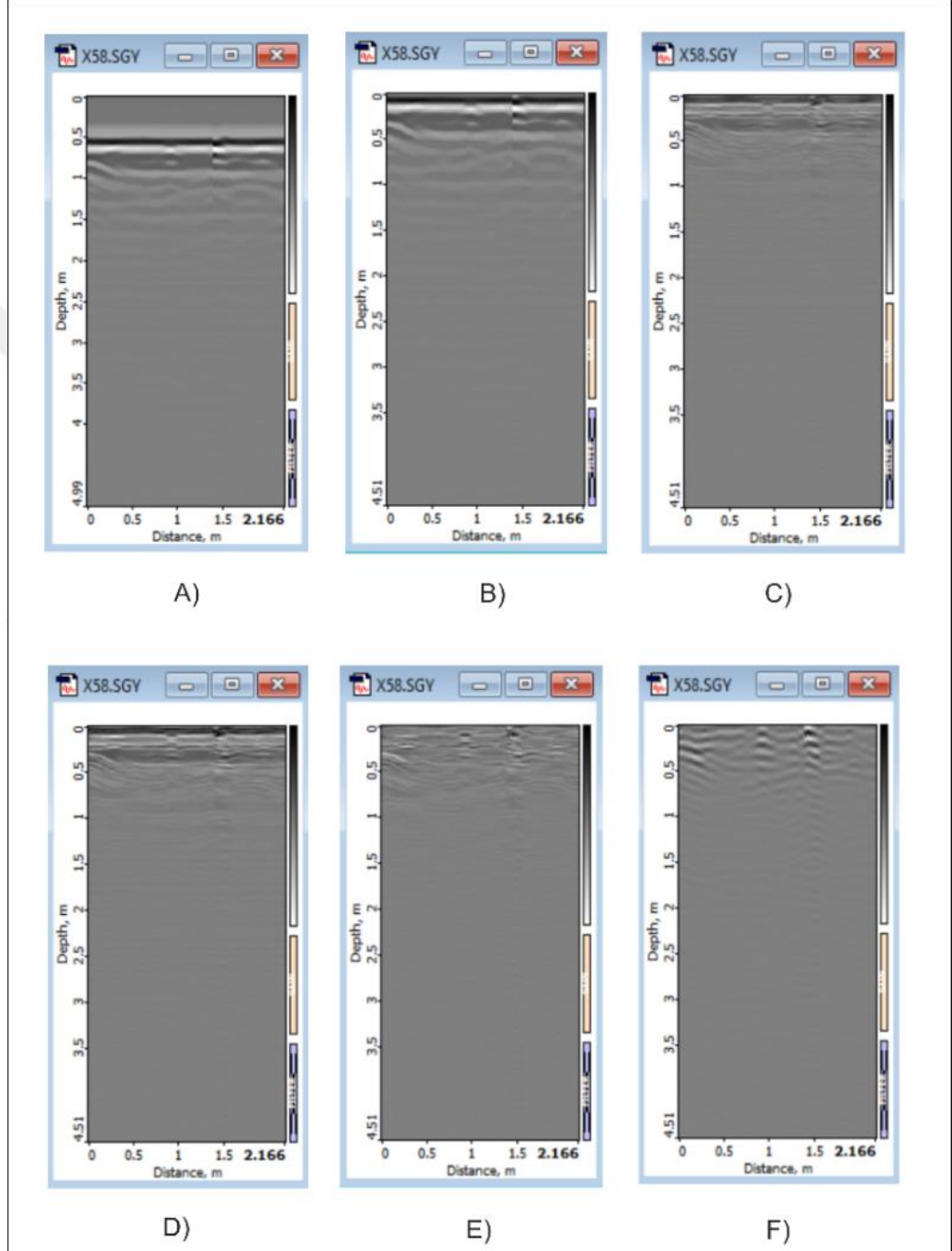
Şekil 4.69 A) Bölüm 6'ya ait Y24 profilinde yansıyan kök görüntüsü ve B) Bölüm 6'ya ait X65 profilinde yansıyan kök görüntüsü (Şekillerde gözlemlenen fuşya renk kökleri temsil etmektedir.)

4.4.2 Refüj B Verilerinin Prism Yazılımında 2B Değerlendirilmesi ve Hız Analizi

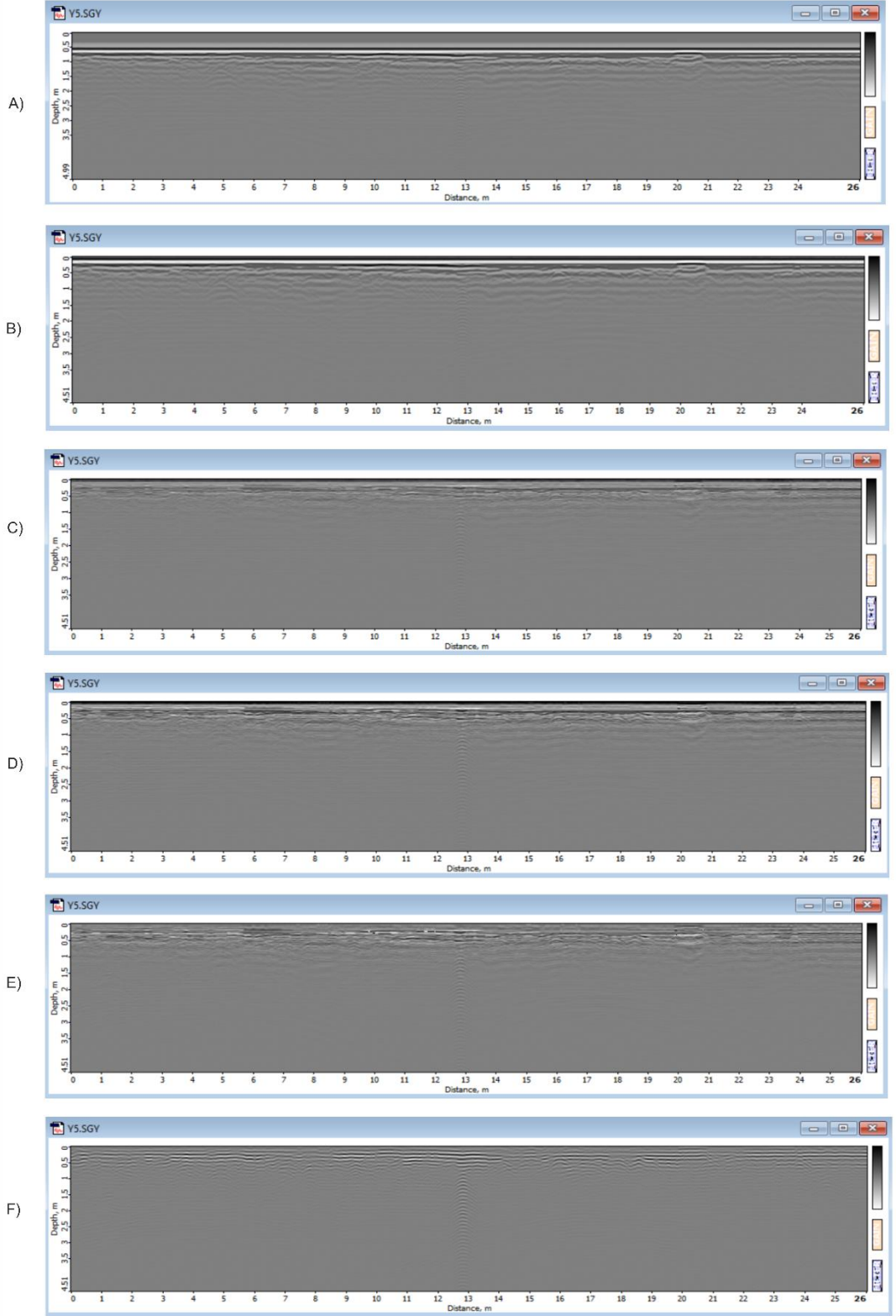
Refüj B üzerinde alınmış olan X ve Y profillerine ait ham veriler, öncelikli olarak Prism yazılımında açılmıştır. Açılan veri setine Bölüm 4.4.1'de anlatılan veri işlem adımları uygulanmıştır. Refüj B'de değerlendirme yaparken 25 Mhz ile 520 Mhz arasında band geçişli süzgeç kullanılmıştır. Şekil 4.70'te X58 profiline, Şekil 4.71'de Y5 profiline uygulanan ilk beş süzgeç ve ham hali sunulmaktadır.

Daha sonra Bölüm 4.4.1'de anlatılan diğer süzgeçler uygulanmış ve değerlendirmeler sonucunda kökler üzerine denk gelen ve kök olduğu düşünülen yansımaların hızında da ağaç köklerinin elektromanyetik hızının 10 cm/ns ve

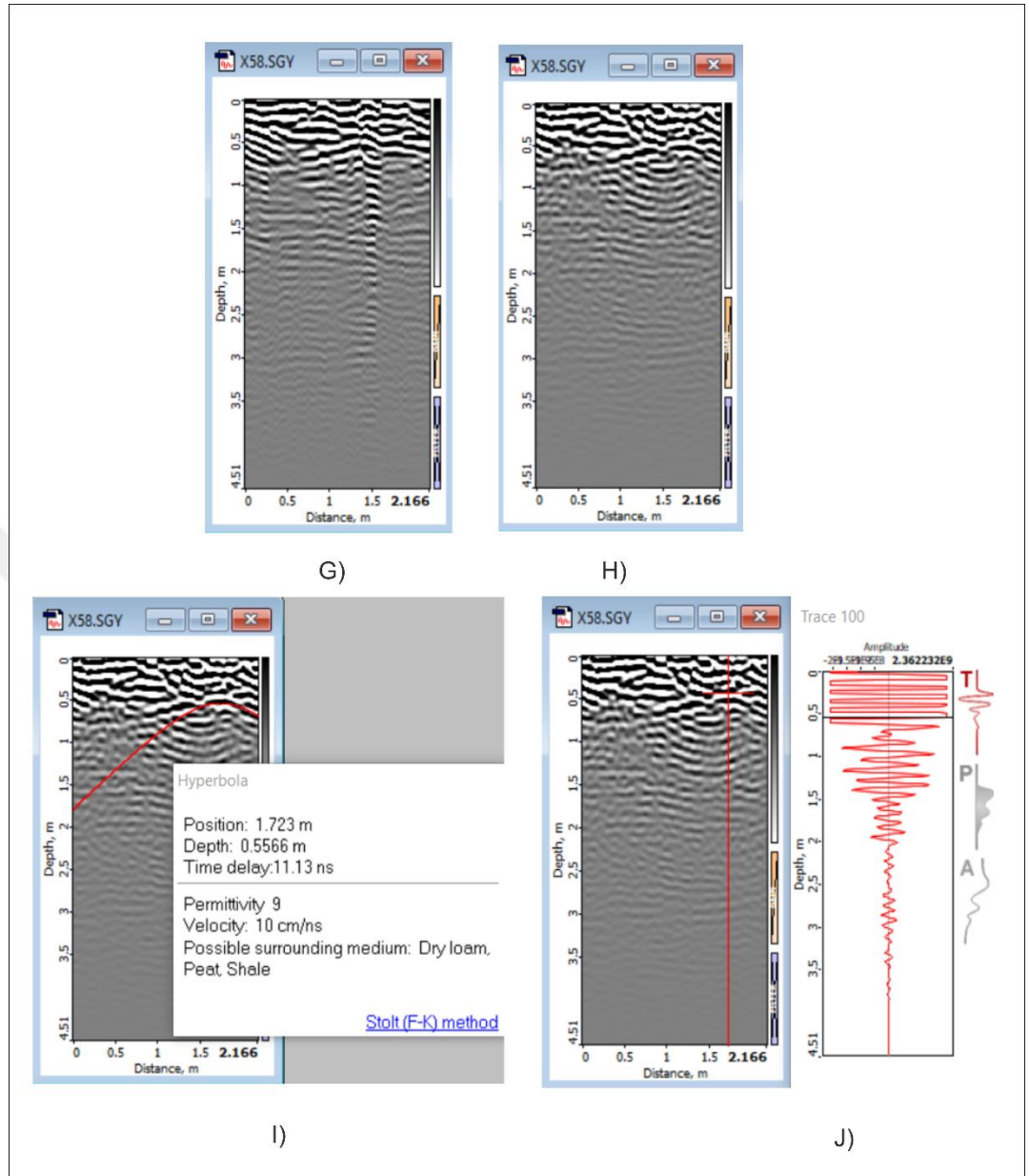
dielektrik sabitinin 9 olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 4.72’da X58 profiline, Şekil 4.73’te Y5 profiline uygulanan süzgeçler ve hız analizi gözlemlenmektedir. Şekil 4.74’te X profiline ait değerlendirilmiş radargramların 1.kısmı, Şekil 4.75’te X profiline ait değerlendirilmiş radargramların 2. kısmı ve Şekil 4.76’da Y profiline ait değerlendirilmiş radargramların tamamı verilmiştir.



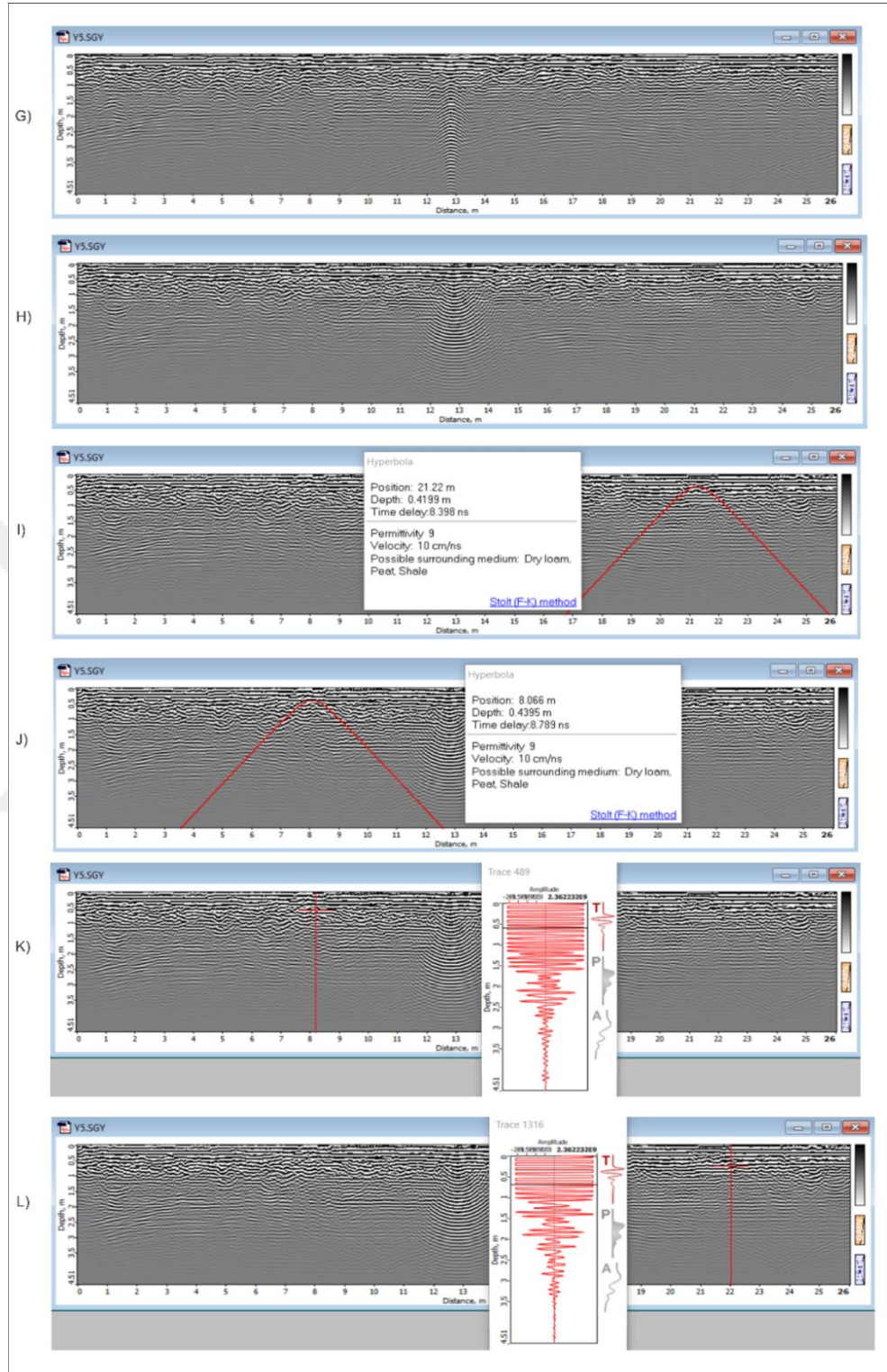
Şekil 4.70 A) X58 profiline ait ham radargram, B) Başlangıç zamanı düzeltmesi uygulanmış radargram, C) Akım Düzeltmesi uygulanmış radargram, D) Kazanç Süzgeci uygulanmış radargram, E) Arka Planı Giderme Süzgeci uygulanmış radargram ve F) Band geçişli süzgeç uygulanmış radargram



Şekil 4.71 A) Y5 profiline ait ham radargram, B) Başlangıç zamanı düzeltmesi uygulanmış radargram, C) Akım Düzeltmesi uygulanmış radargram, D) Kazanç Süzgeci uygulanmış radargram, E) Arka Planı Giderme Süzgeci uygulanmış radargram ve F) Band geçişli süzgeç uygulanmış radargram

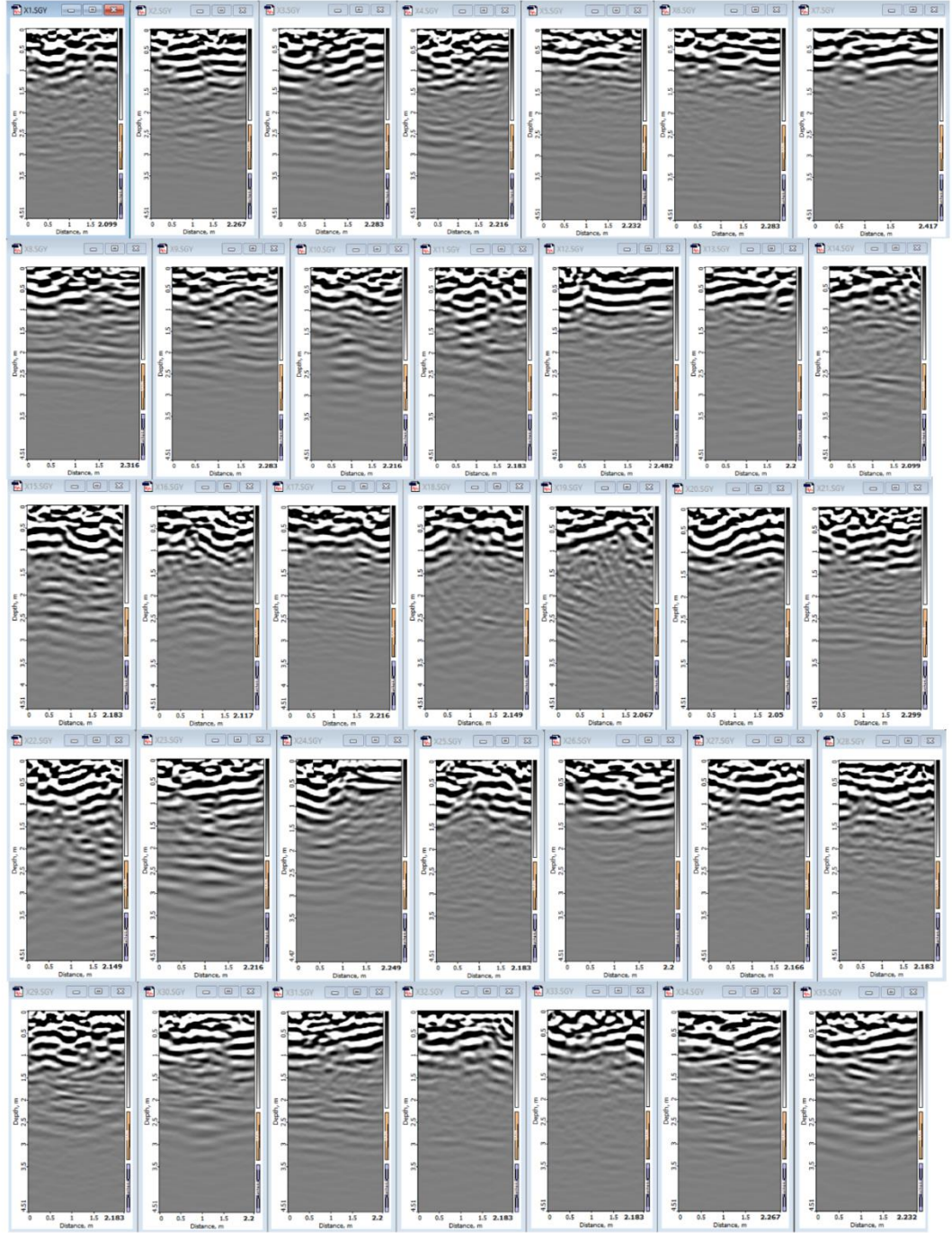


Şekil 4.72 G) Kazanç (Gain) uygulanmış radargram, H) Göç işlemi uygulanmış radargram, I) Hız analizi sonucu değerlendirilen parametreler ve J) Kök olan yansımanın genlik spektrumu



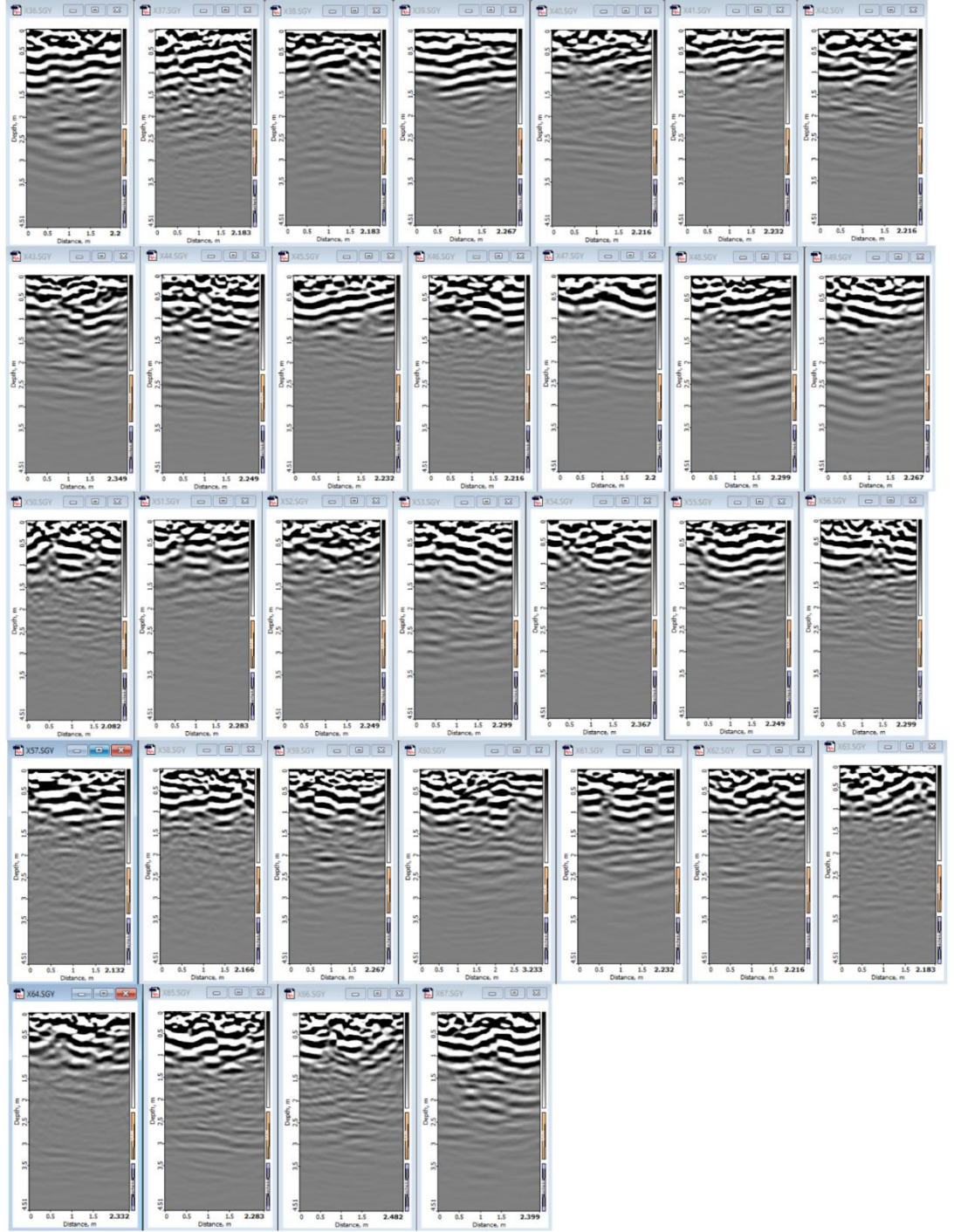
Şekil 4.73 G) Kazanç (Gain) uygulanmış radargram, H) Göç işlemi uygulanmış radargram, I) Gözlemlenen ilk köke ait hız analizi sonucu değerlendirilen parametreler, J) Gözlemlenen ikinci köke ait hız analizi sonucu değerlendirilen parametreler, K) Gözlemlenen ilk kökün genlik spektrumu ve L) Gözlemlenen ikinci kökün genlik spektrumu

REFÜJ B X PROFİLİ DEĞERLENDİRİLMİŞ RADARGRAMLAR 1. KISIM



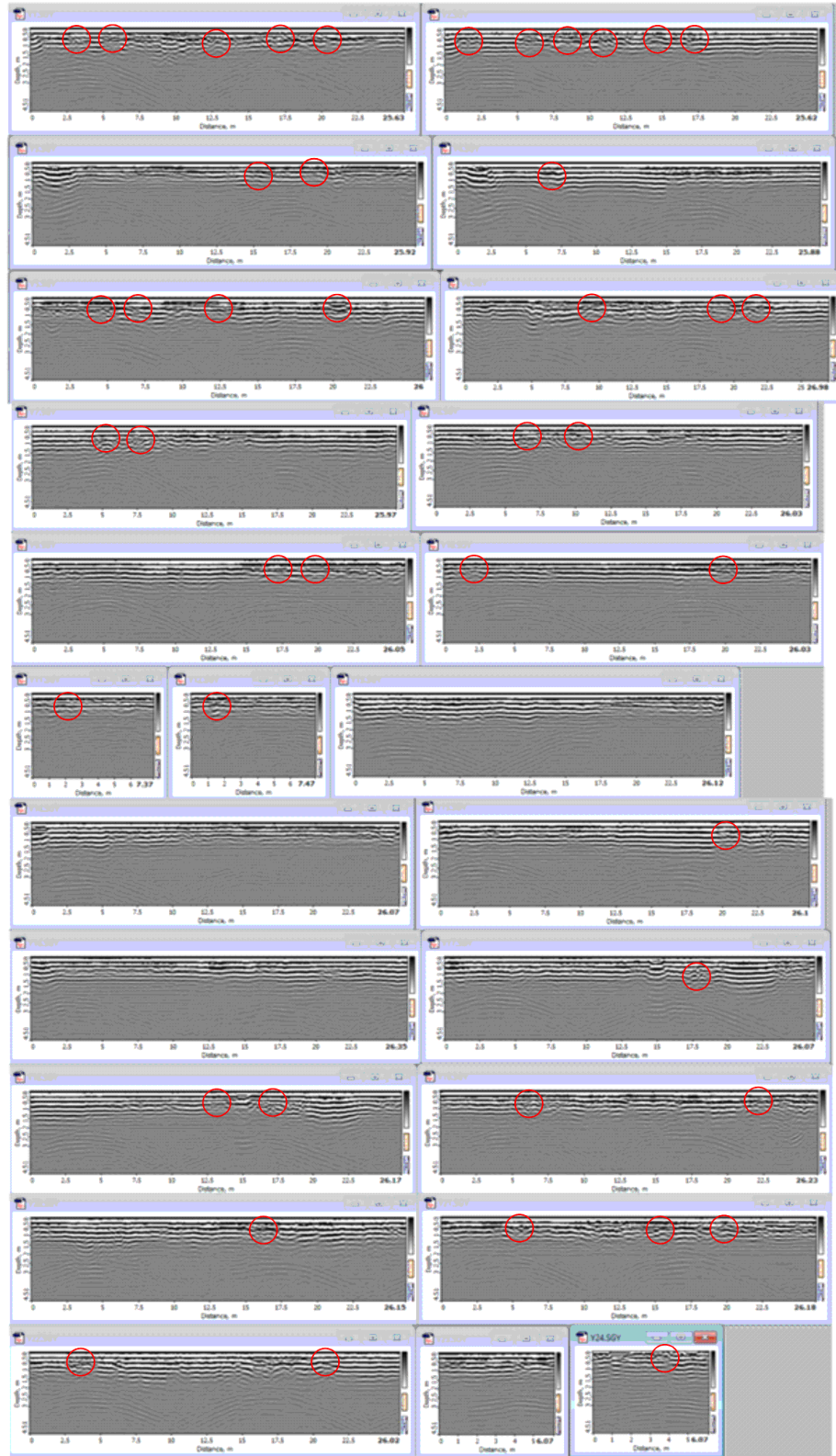
Şekil 4.74 X profiline ait değerlendirilmiş radargramlar 1. kısım

REFÜJ B X PROFİLİ DEĞERLENDİRİLMİŞ RADARGRAMLAR 2. KISIM



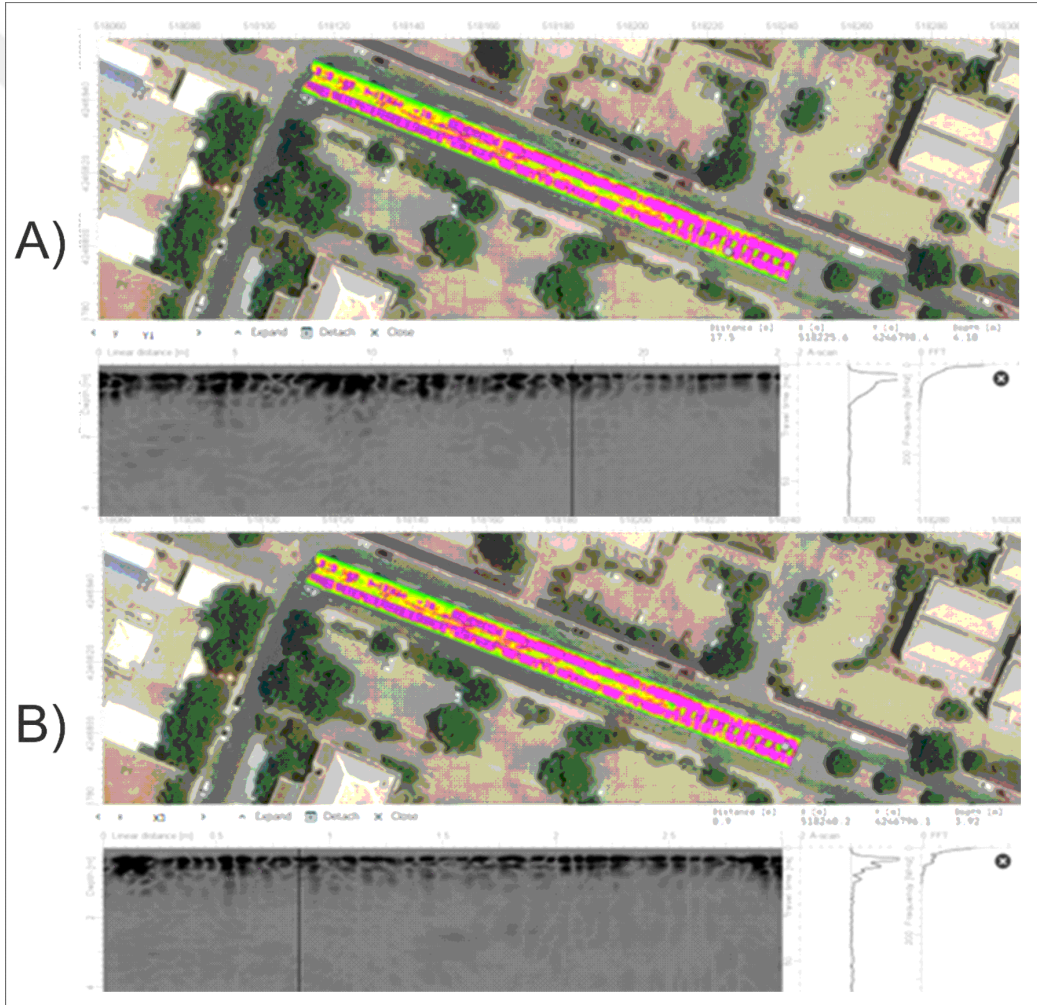
Şekil 4.75 X profiline ait değerlendirilmiş radargramlar 2. kısım

REFÜJ B Y PROFİLİ DEĞERLENDİRİLMİŞ RADRGRAMLAR

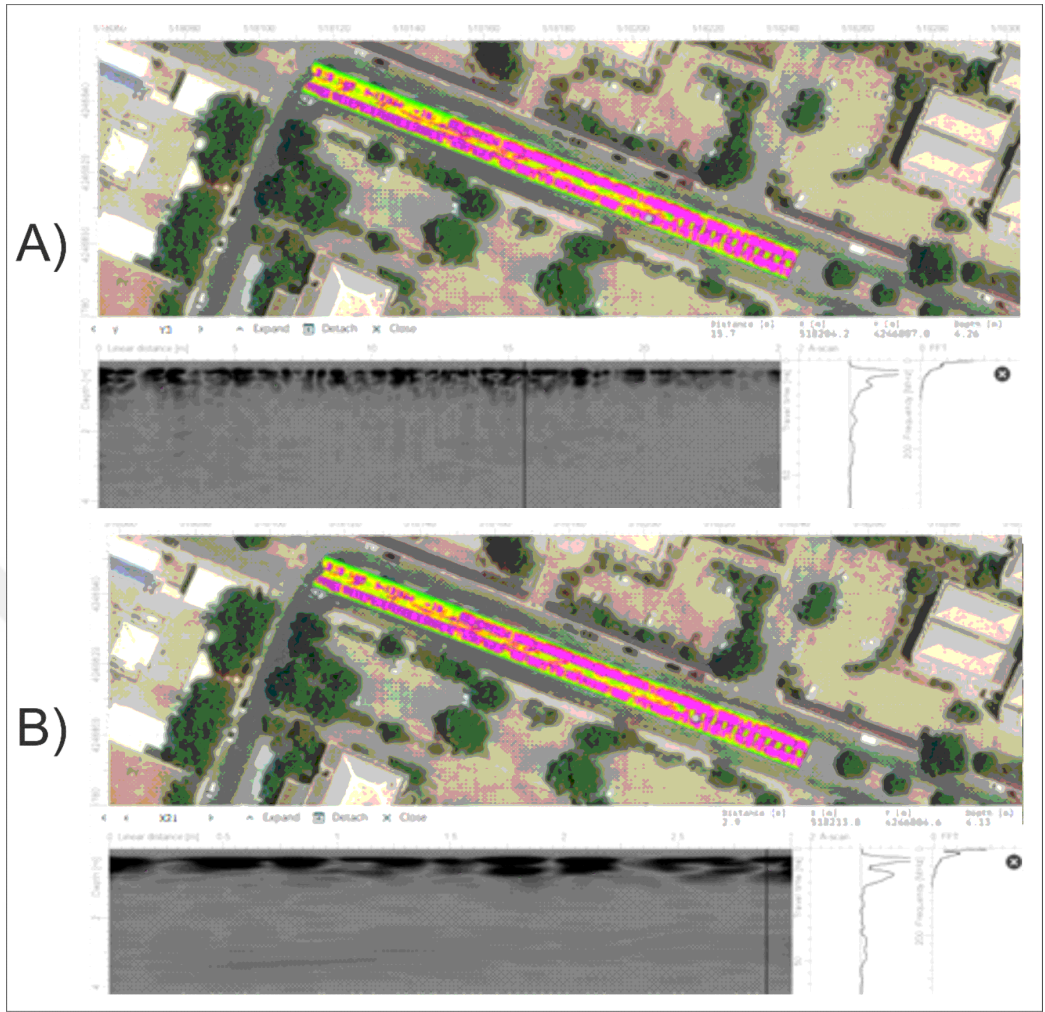


Şekil 4.76 Y profiline ait değerlendirilmiş radargramlar (Kırmızı işaretlenen daireler köke ait yansımaları ifade etmektedir.)

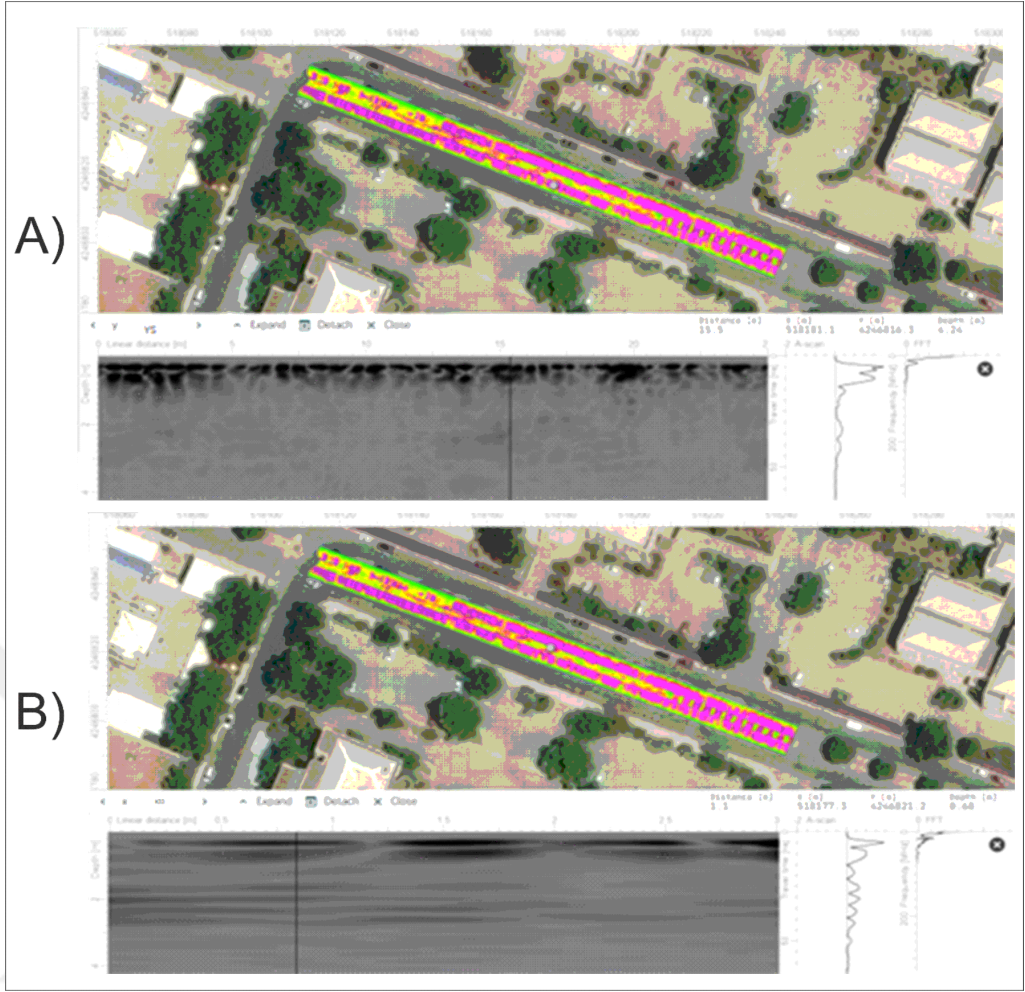
Radargramlar Refüj B için değerlendirilip, hız ve dielektrik analizleri yapıldıktan sonra uygun geometri ve coğrafi koordinat bilgisi girilerek Geolitic yazılımında orijinal olarak 2B seviye haritalarına göre radargram ve kök analizi yapılmıştır. Yapılan 2B analiz sonucunda elde edilen veriler Şekil 4.8’de gösterilen bölümlere ve konumlandırmalara göre değerlendirilmiş, her bölüm için köke denk gelen profiller sunulmuştur. Şekil 4.77’de Bölüm 1’e, Şekil 4.78’de Bölüm 2’ye, Şekil 4.79’da Bölüm 3’e, Şekil 4.80’de Bölüm 4’e, Şekil 4.81’de Bölüm 5’e ve Şekil 4.82’de Bölüm 6’ya ait X ve Y profillerinde gözlemlenen köklere ait Geolitic yazılımında yerine oturtulmuş görüntüler ve 2B radargramlar verilmiştir.



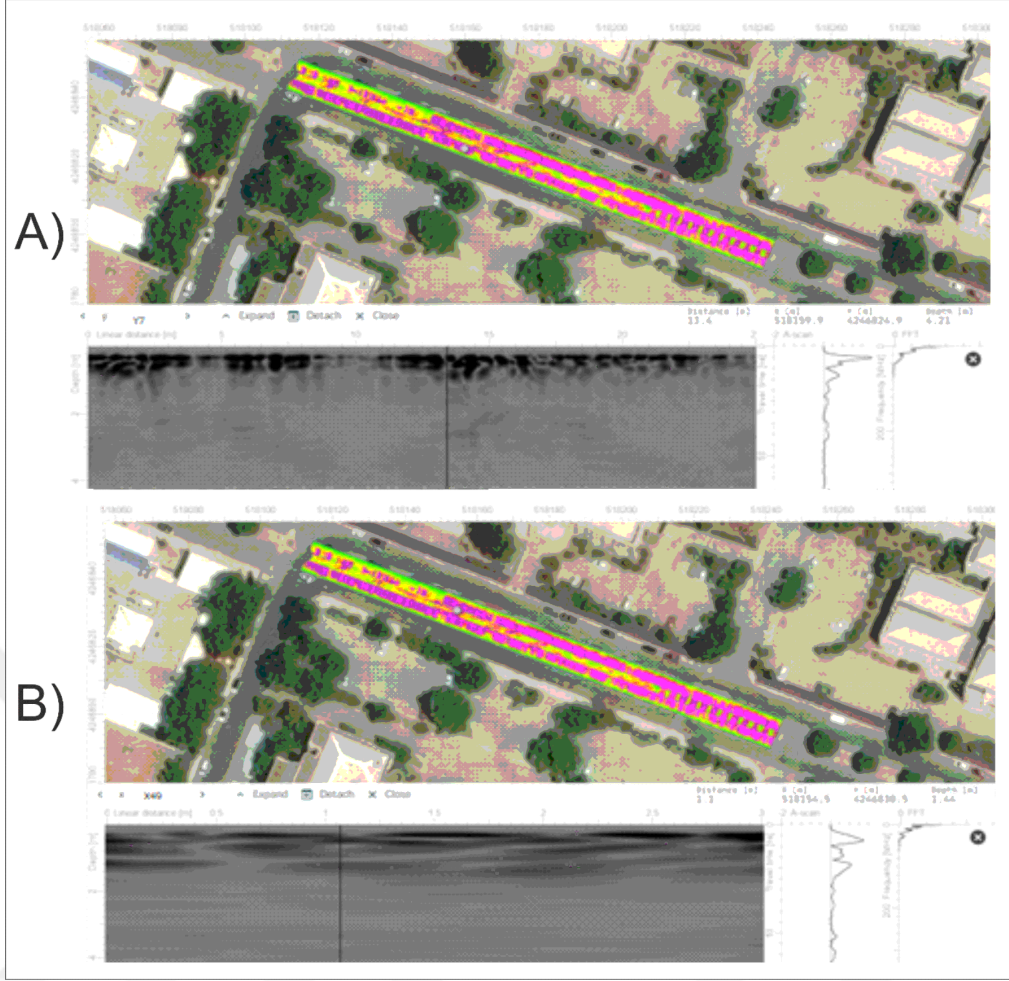
Şekil 4.77 A) Bölüm 1’e ait Y1 profilinde yansıyan kök görüntüsü ve B) Bölüm 1’e ait X3 profilinde yansıyan kök görüntüsü (Şekillerde gözlemlenen fuşya renk kökleri temsil etmektedir.)



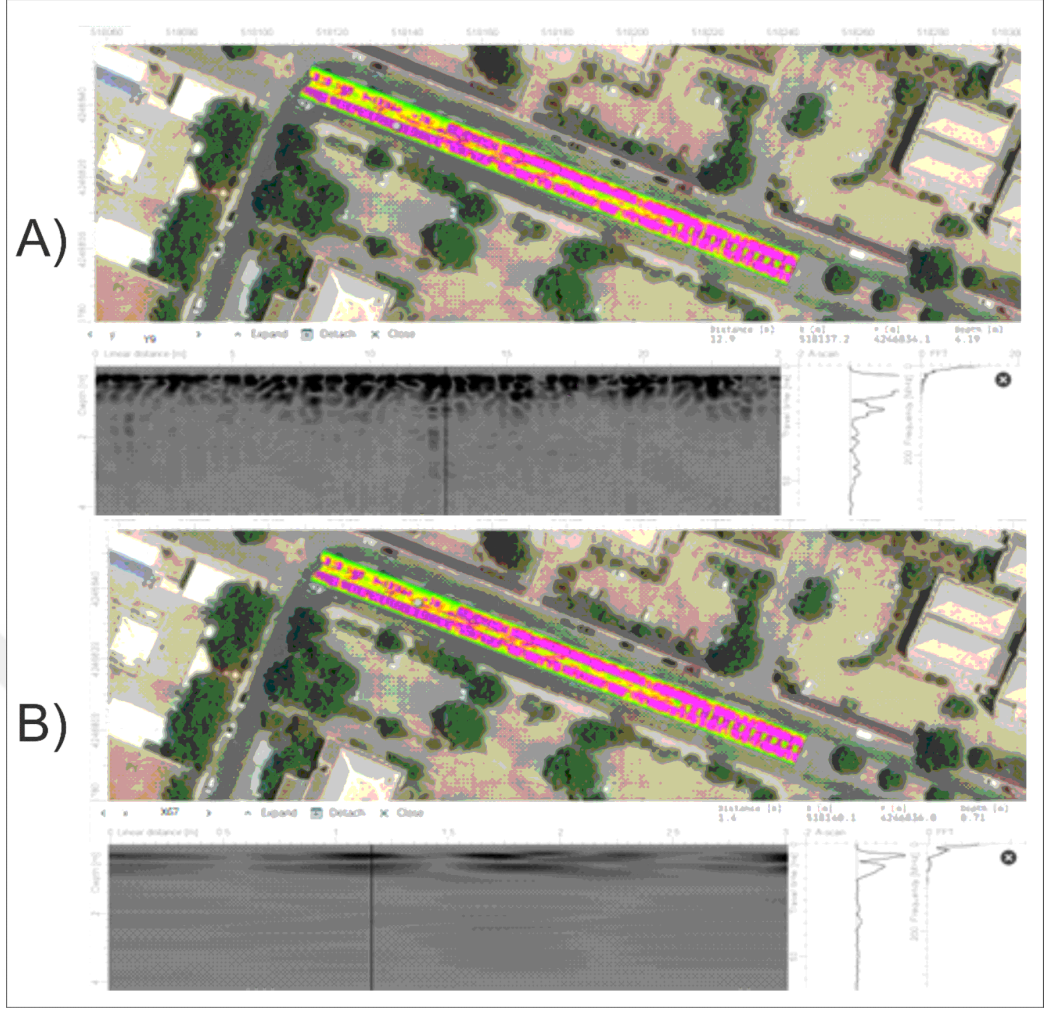
Şekil 4.78 A) Bölüm 2'ye ait Y3 profilinde yansıyan kök görüntüsü ve B) Bölüm 2'ye ait X11 profilinde yansıyan kök görüntüsü (Şekillerde gözlemlenen fuşya renk kökleri temsil etmektedir.)



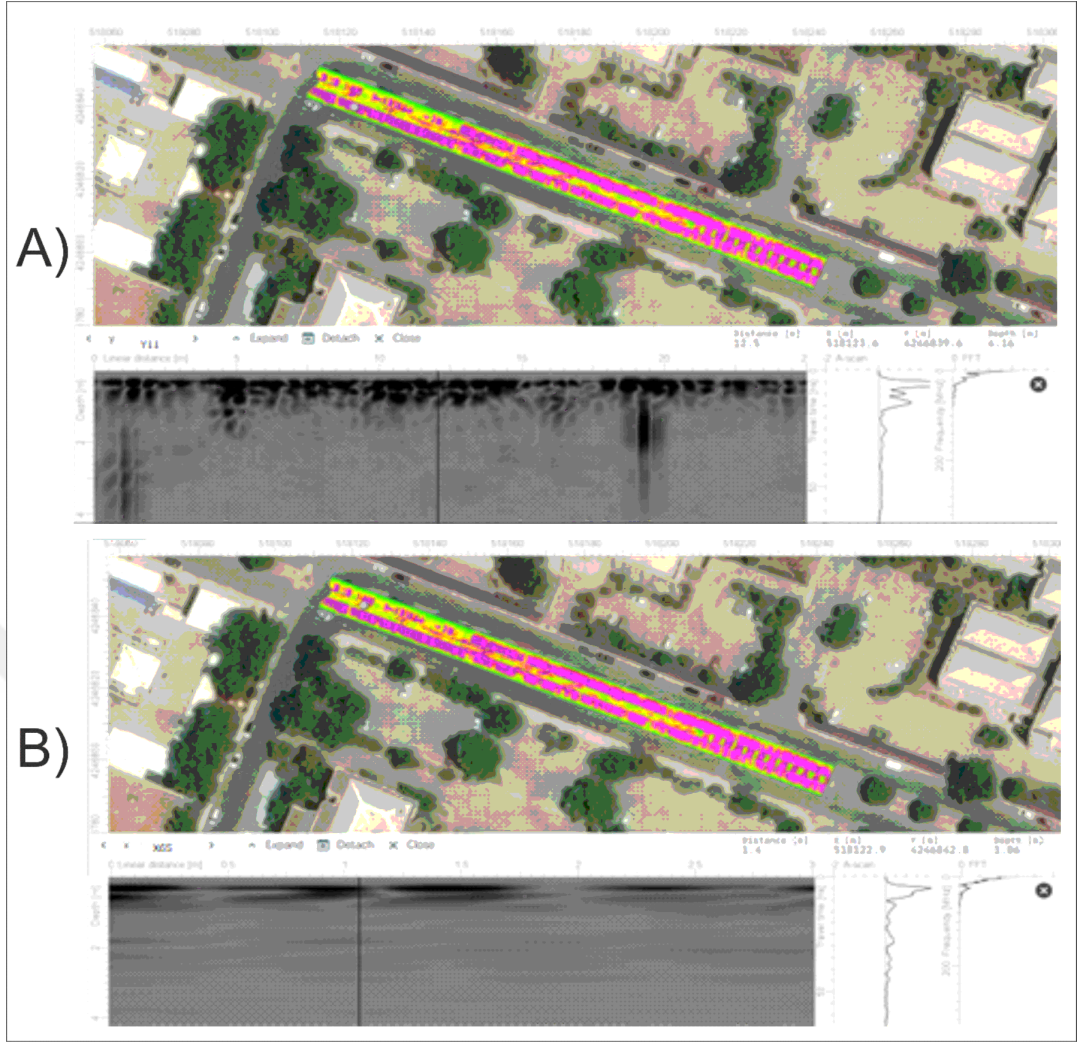
Şekil 4.79 A) Bölüm 3'e ait Y5 profilinde yansıyan kök görüntüsü ve B) Bölüm 3'e ait X30 profilinde yansıyan kök görüntüsü (Şekillerde gözlemlenen fuşya renk kökleri temsil etmektedir.)



Şekil 4.80 A) Bölüm 4'e ait Y7 profilinde yansıyan kök görüntüsü ve B) Bölüm 4'e ait X40 profilinde yansıyan kök görüntüsü (Şekillerde gözlemlenen fuşya renk kökleri temsil etmektedir.)



Şekil 4.81 A) Bölüm 5'e ait Y9 profilinde yansıyan kök görüntüsü ve B) Bölüm 5'e ait X67 profilinde yansıyan kök görüntüsü (Şekillerde gözlemlenen fuşya renk kökleri temsil etmektedir.)



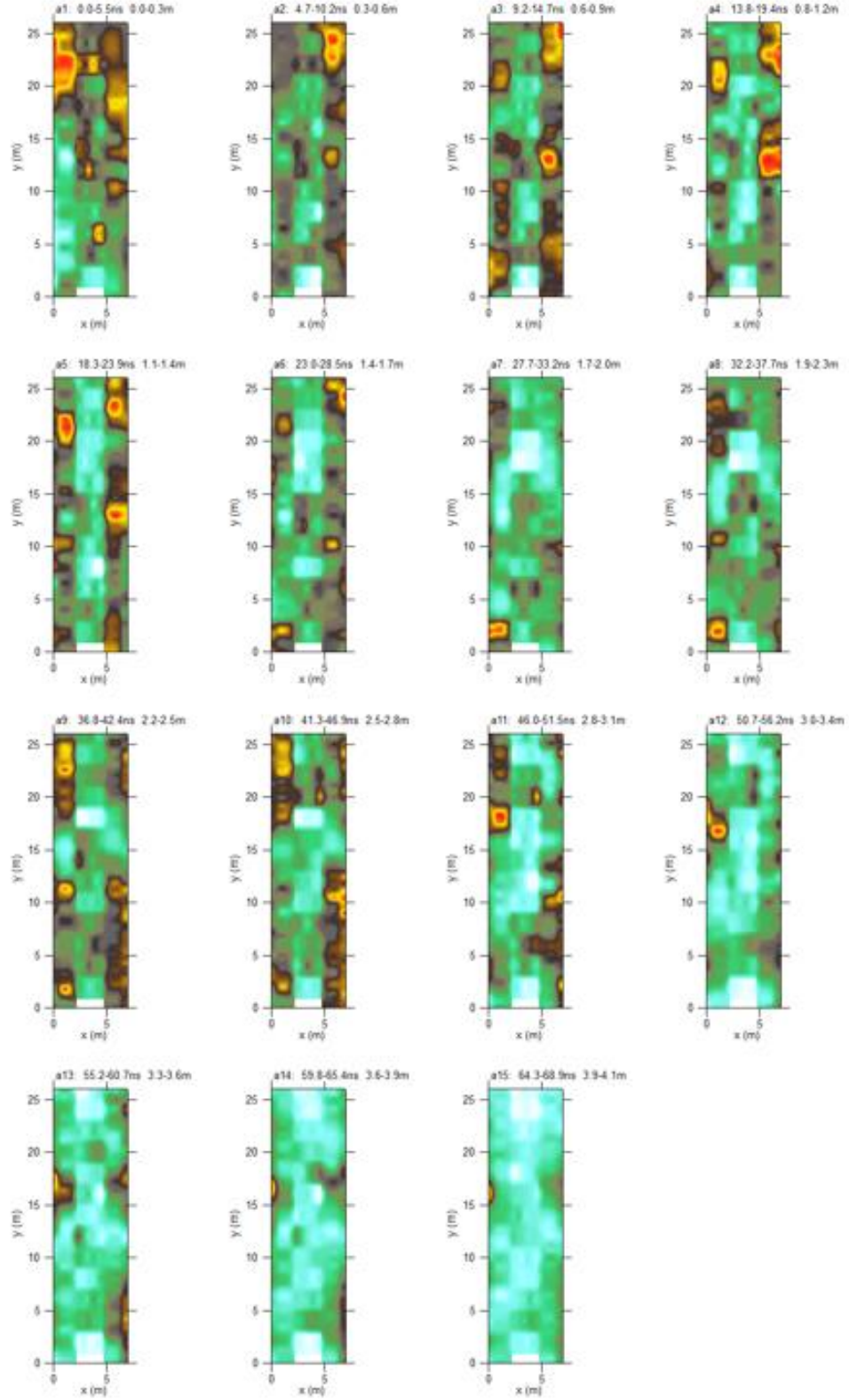
Şekil 4.82 A) Bölüm 6'ya ait Y11 profilinde yansıyan kök görüntüsü ve B) Bölüm 6'ya ait X65 profilinde yansıyan kök görüntüsü (Şekillerde gözlemlenen fuşya renk kökleri temsil etmektedir.)

4.5 Yer Radarı Verilerinin 3B Değerlendirilmesi

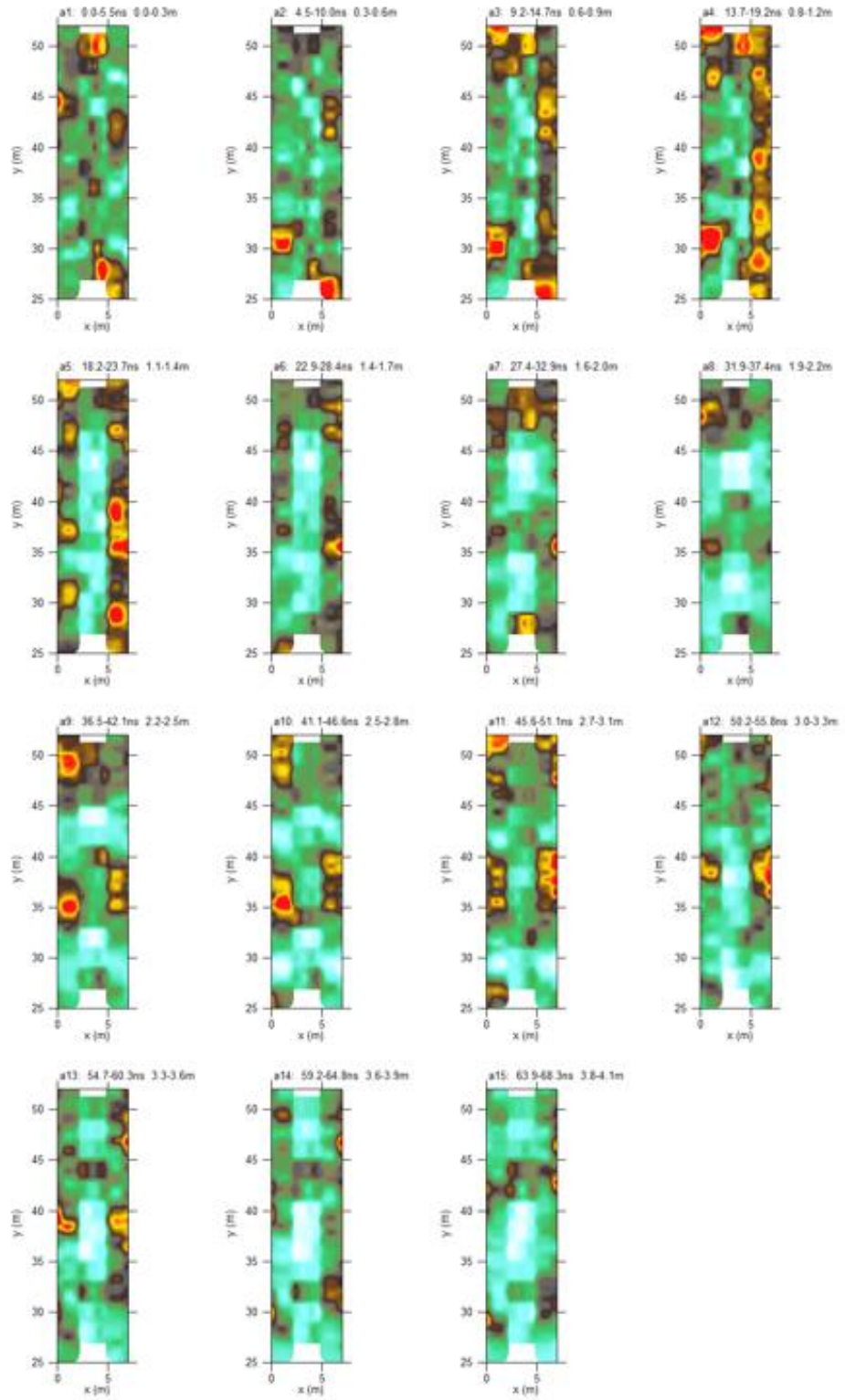
Hız analizi yapılan her veri önce bölüm bölüm sonra toplu olarak seviye haritaları oluşturulduktan sonra 3B'lu olarak modellenmiştir. Hız bilgisi 10 cm/ns olarak değerlendirildiğinden GPRSlice yazılımının “Plot Options” sekmesine 0,1 m/ns olarak hız bilgisi girilerek yeni proje oluşturulmuştur. Veriler oluşturulan proje içerisine aktararak, krokilerine uygun bir şekilde konum bilgileri düzeltilmiştir. Profil bilgileri tanımlanan verileri, güçlendirmek için öncelikle Kazanç Süzgeci (AGC) ardından, Arka Planı Giderme (Background Removal) Süzgeci ve son olarak Frekans Süzgeçleme ve Genlik Arttırımı (Spectra gain ve Bandpass Filter) uygulanmıştır.

Yer altının homojen olmamasından kaynaklanan gürültüleri gidermek için ise son olarak Göç (Migration) süzgeci verilere uygulanmıştır. Uygulanan süzgeçler sonucu oluşan işlenmiş radargramlar, oluşturulan proje içerisinde /migration/ klasörüne seviye haritası oluşturmak üzere otomatik olarak kaydedilmiştir. “Slice” bölümü kullanılarak oluşturulacak seviye haritası için seviye sayısı 15, örnekleme aralığı 20 ve bindirme oranı %50 olarak girilmiştir. Radargram üzerinde oluşturulan bindirmelerde hava boşluğu “search ons” ve “auto-detect” süzgeçleri ile veriden atılmıştır. Yapılan bindirmeler sonucu oluşan seviyeleri seviye haritası şeklinde çizdirmek için “Grid” butonu ve elde edilen görselleri kaydetmek için de “Pixel” butonu kullanılmıştır.

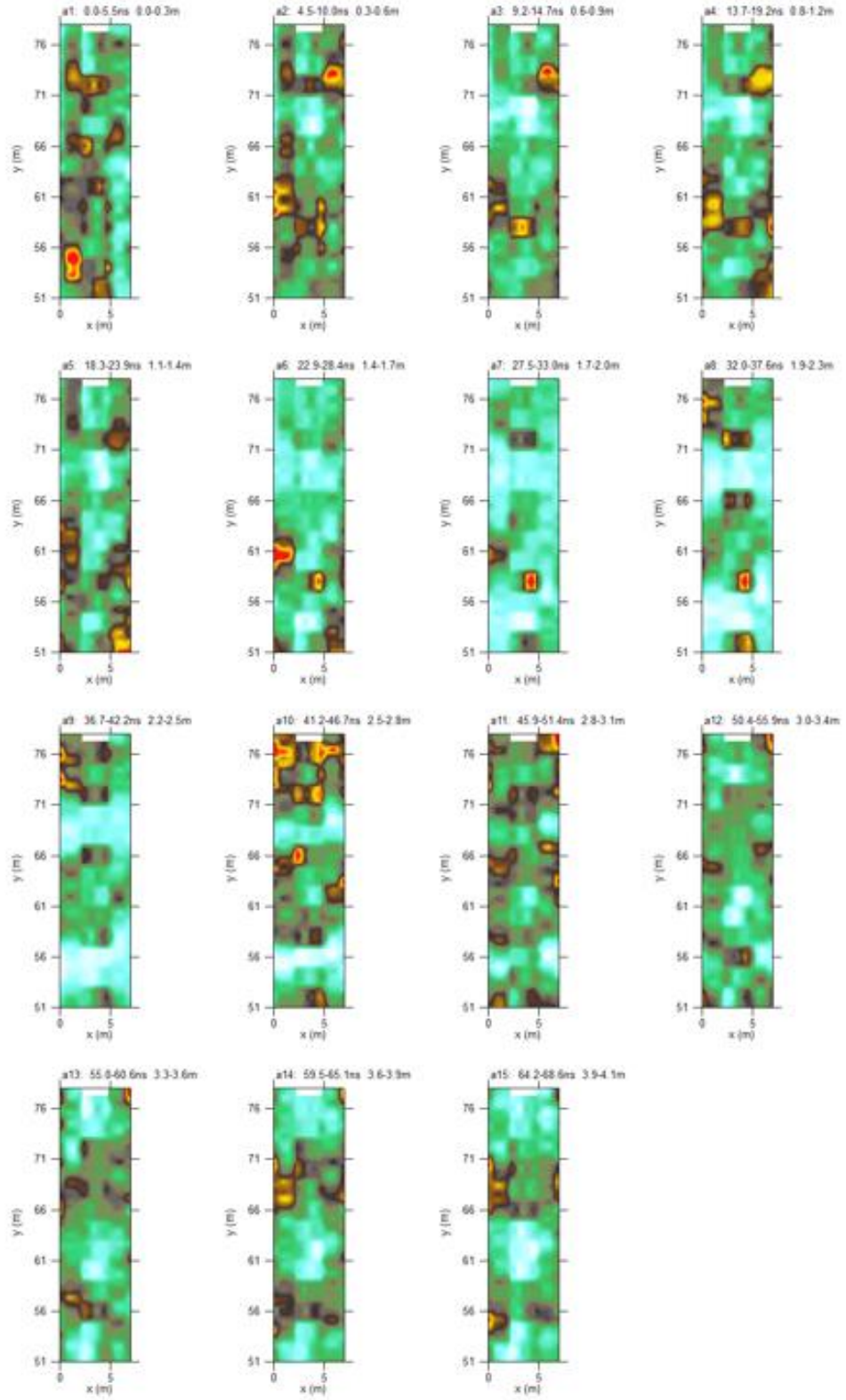
Uygulanan veri işlem adımları sonucu Refüj A Bölüm 1 için oluşturulan seviye haritaları Şekil 4.83’te, Refüj A Bölüm 2 için oluşturulan seviye haritaları Şekil 4.84’te, Refüj A Bölüm 3 için oluşturulan seviye haritaları Şekil 4.85’te, Refüj A Bölüm 4 için oluşturulan seviye haritaları Şekil 4.86’da, Refüj A Bölüm 5 için oluşturulan seviye haritaları Şekil 4.87’de ve Refüj A Bölüm 6 için oluşturulan seviye haritaları Şekil 4.88’de verilmiştir.



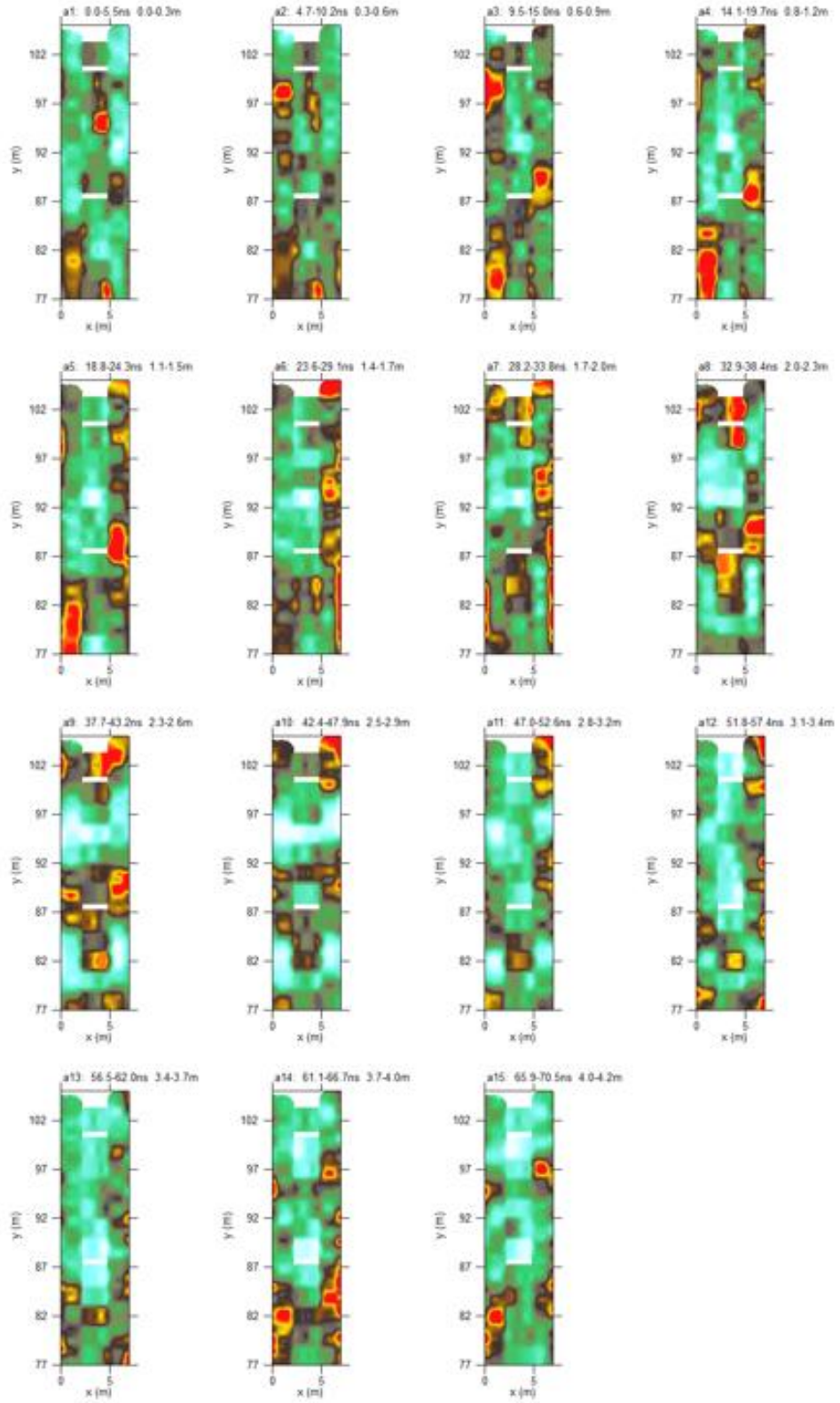
Şekil 4.83 Refüj A Bölüm 1'e ait oluşturulan seviye haritaları



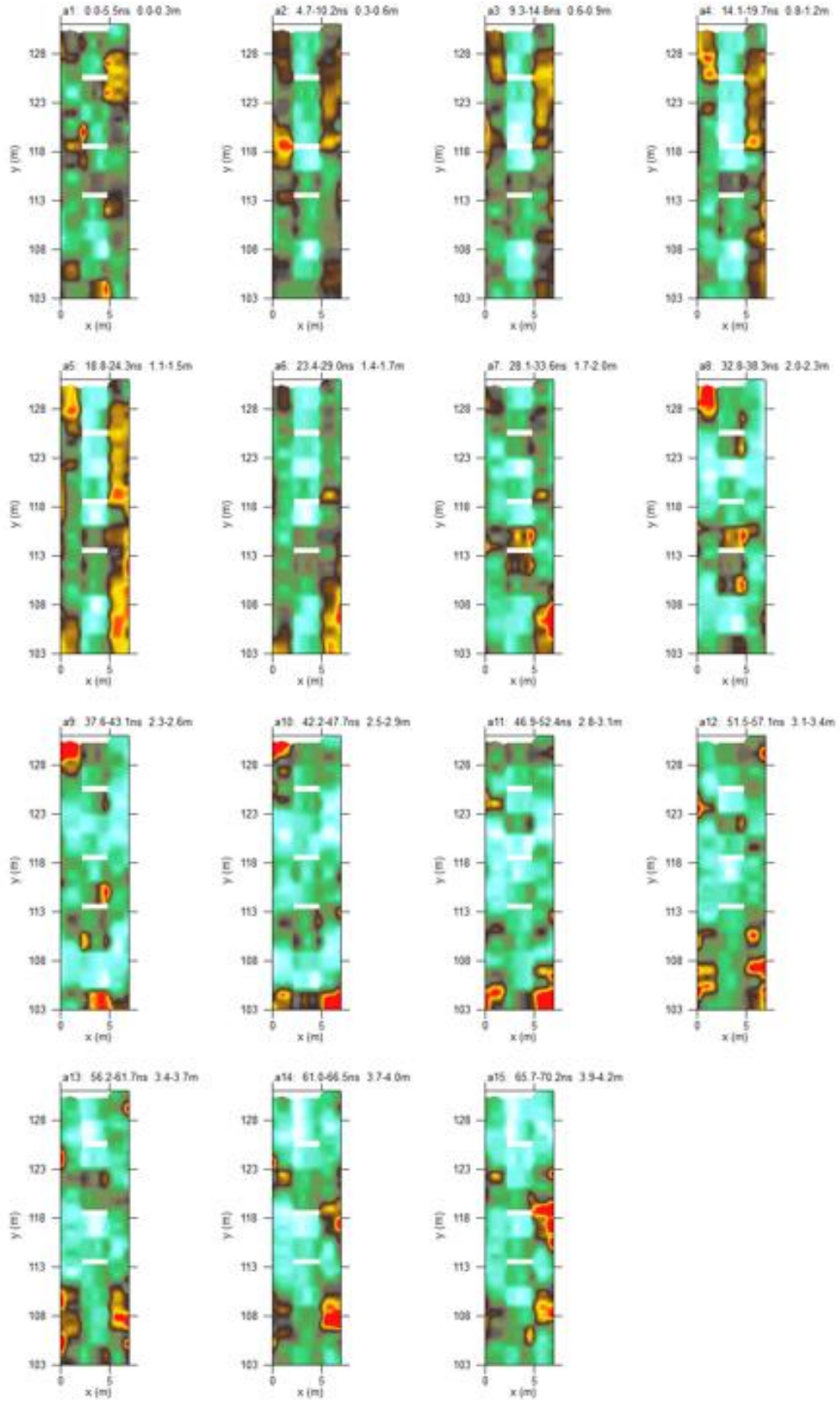
Şekil 4.84 Refüj A Bölüm 2'ye ait oluşturulan seviye haritaları



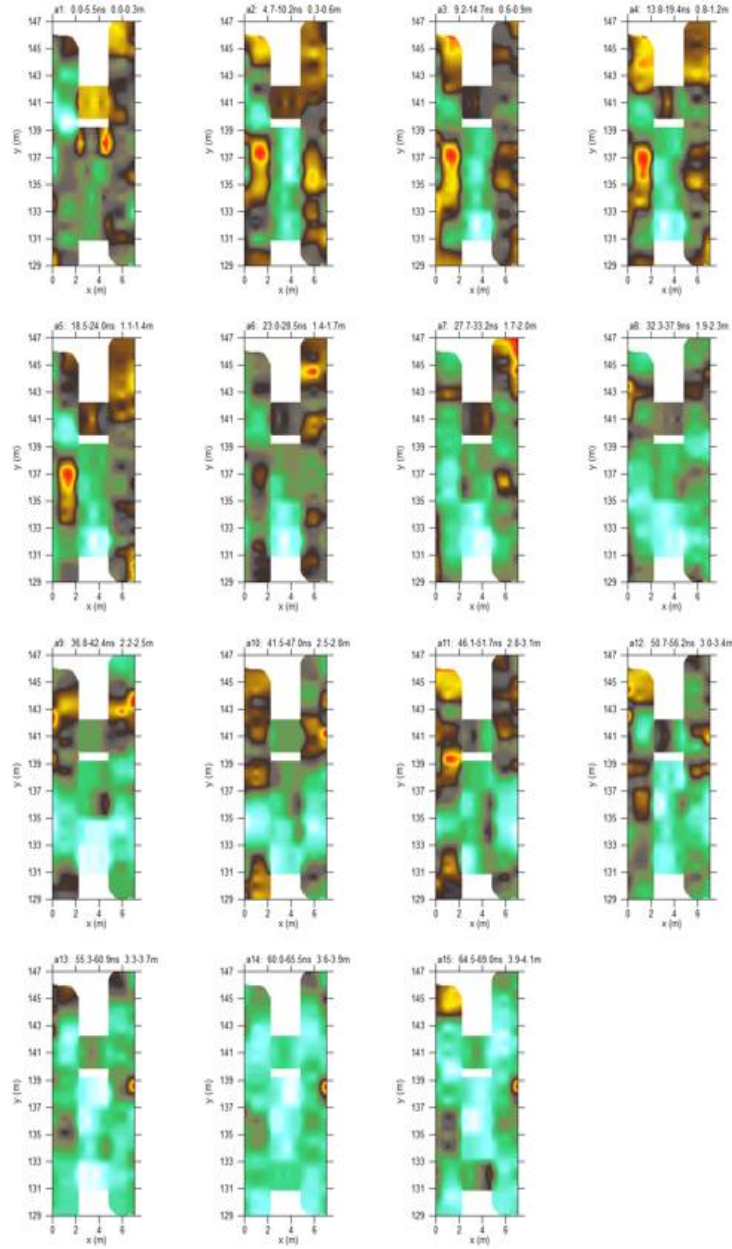
Şekil 4.85 Refüj A Bölüm 3'e ait oluşturulan seviye haritaları



Şekil 4.86 Refüj A Bölüm 4'e ait oluşturulan seviye haritaları

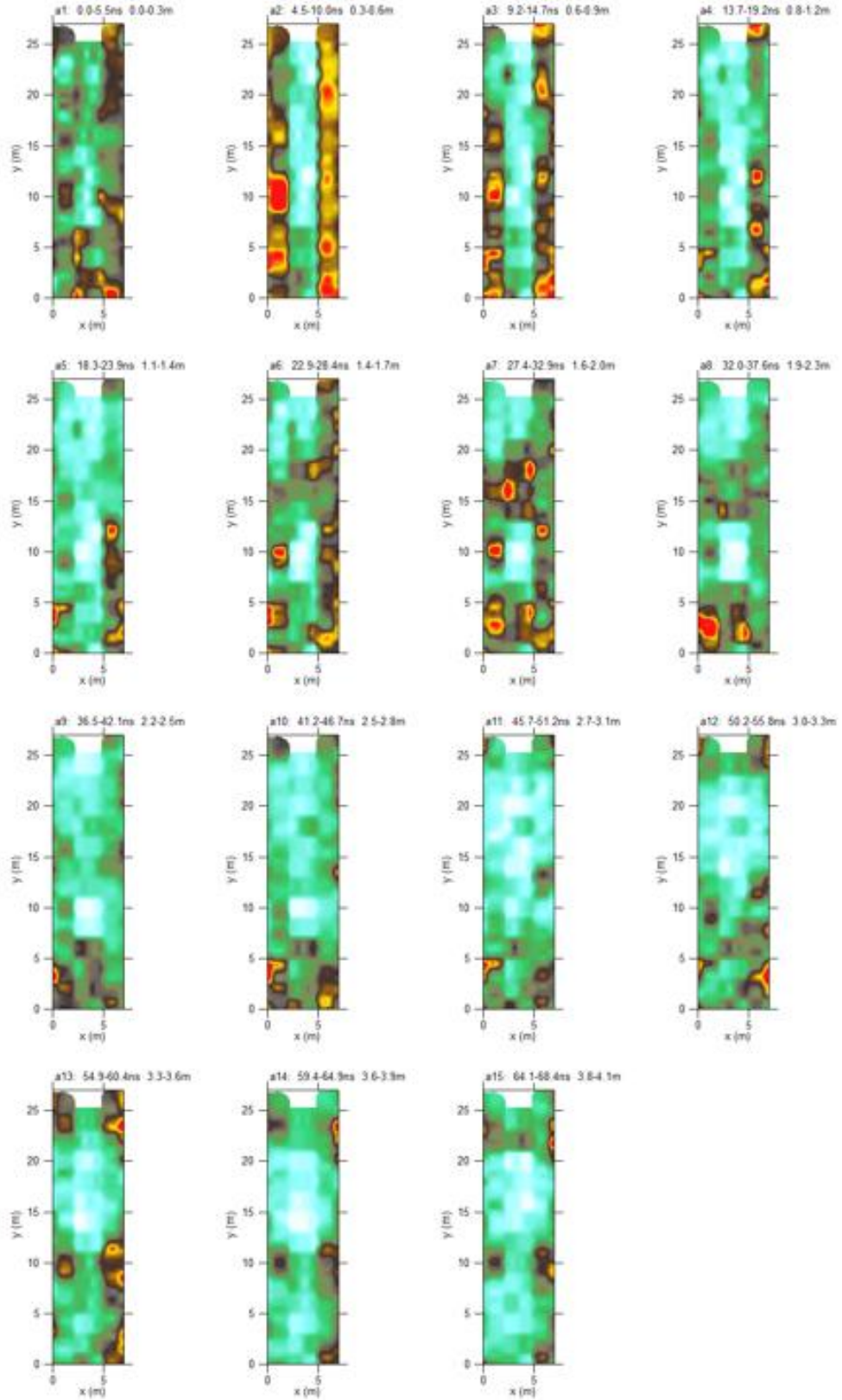


Şekil 4.87 Refüj A Bölüm 5'e ait oluşturulan seviye haritaları

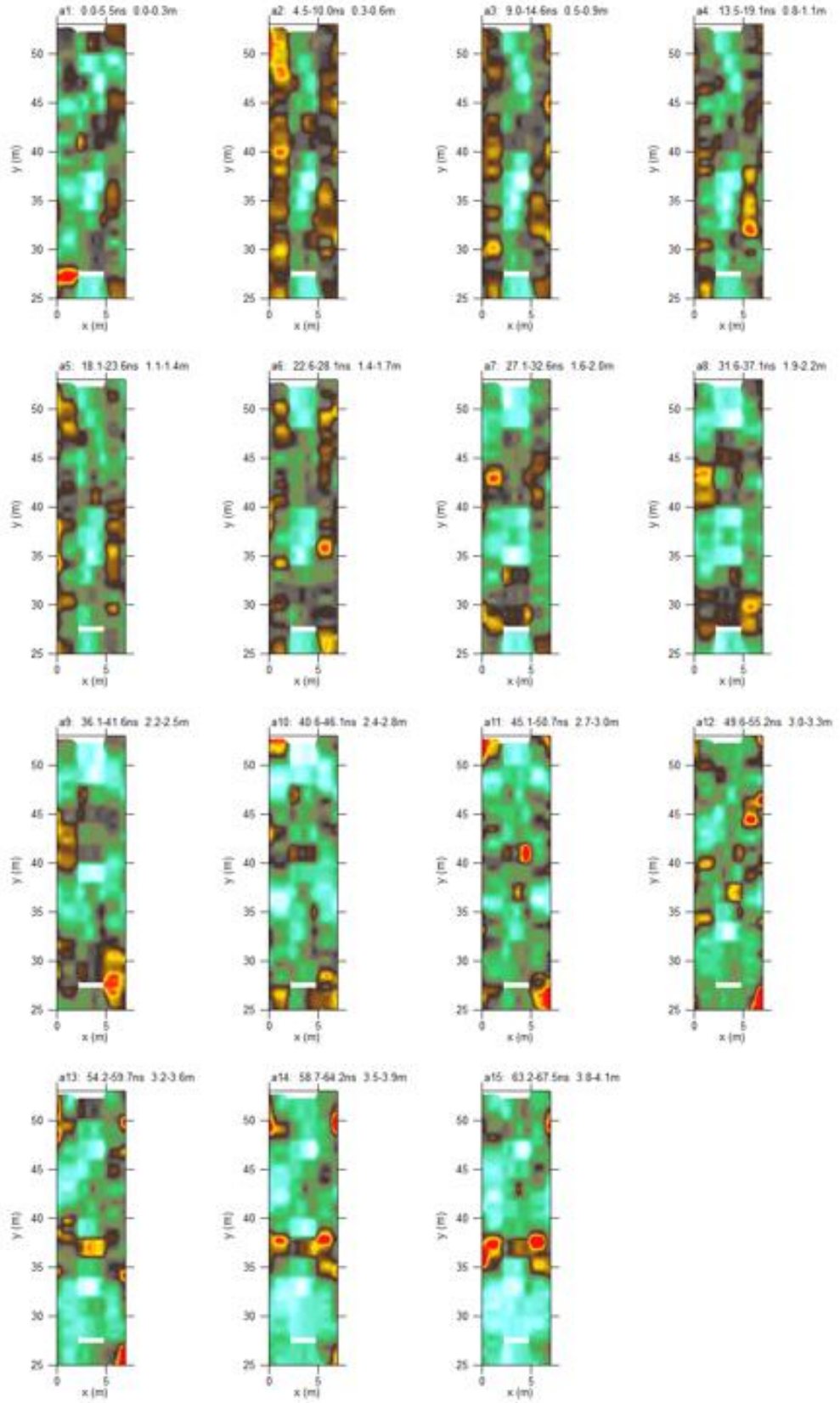


Şekil 4.88 Refüj A Bölüm 6'ya ait oluşturulan seviye haritaları

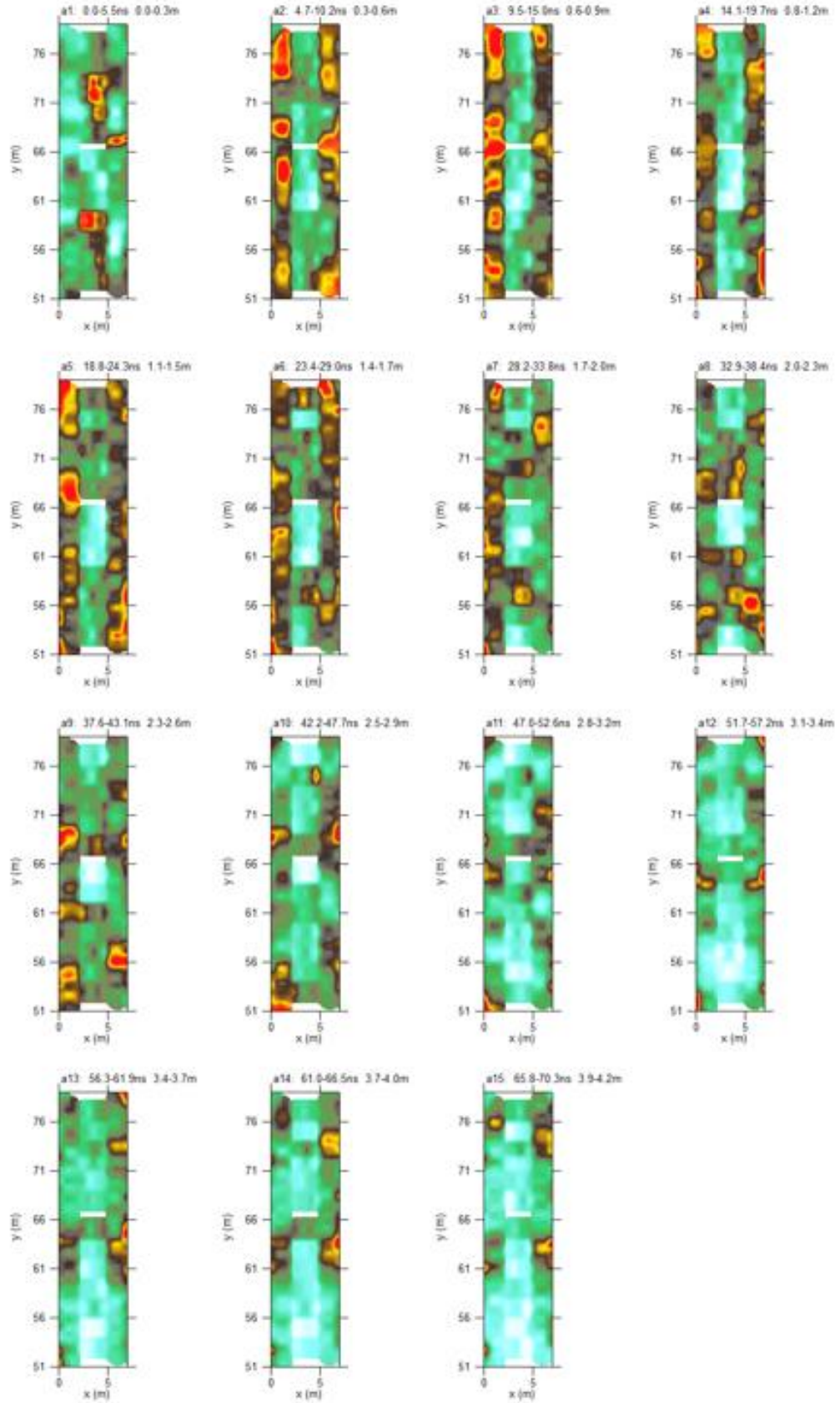
Uygulanan veri işlem adımları sonucu Refüj B Bölüm 1 için oluşturulan seviye haritaları Şekil 4.89'da Refüj B Bölüm 2 için oluşturulan seviye haritaları Şekil 4.90'da Refüj B Bölüm 3 için oluşturulan seviye haritaları Şekil 4.91'de, Refüj B Bölüm 4 için oluşturulan seviye haritaları Şekil 4.92'de, Refüj B Bölüm 5 için oluşturulan seviye haritaları Şekil 4.93'te ve Refüj B Bölüm 6 için oluşturulan seviye haritaları da Şekil 4.94'te verilmiştir.



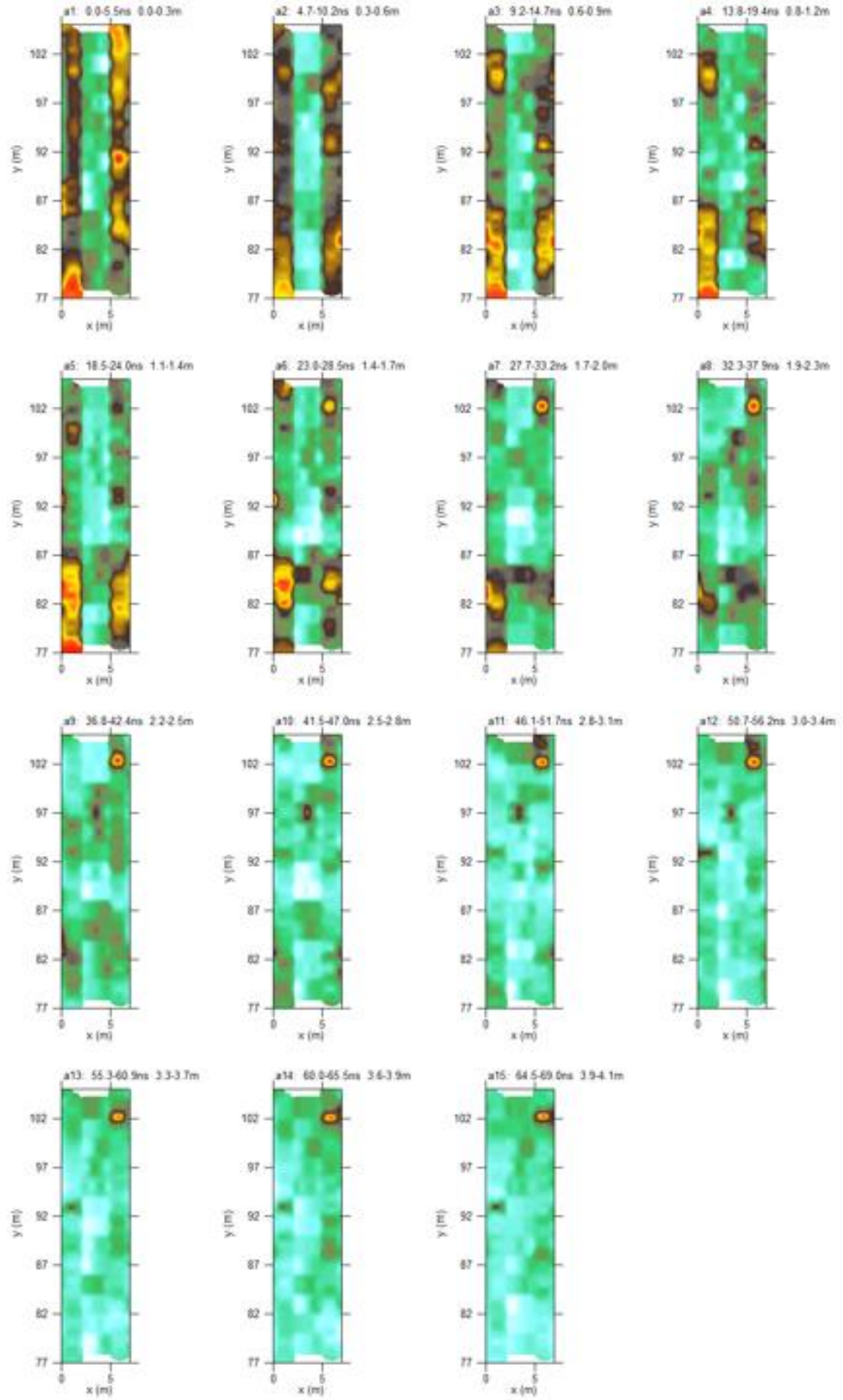
Şekil 4.89 Refüj B Bölüm 1'e ait oluşturulan seviye haritaları



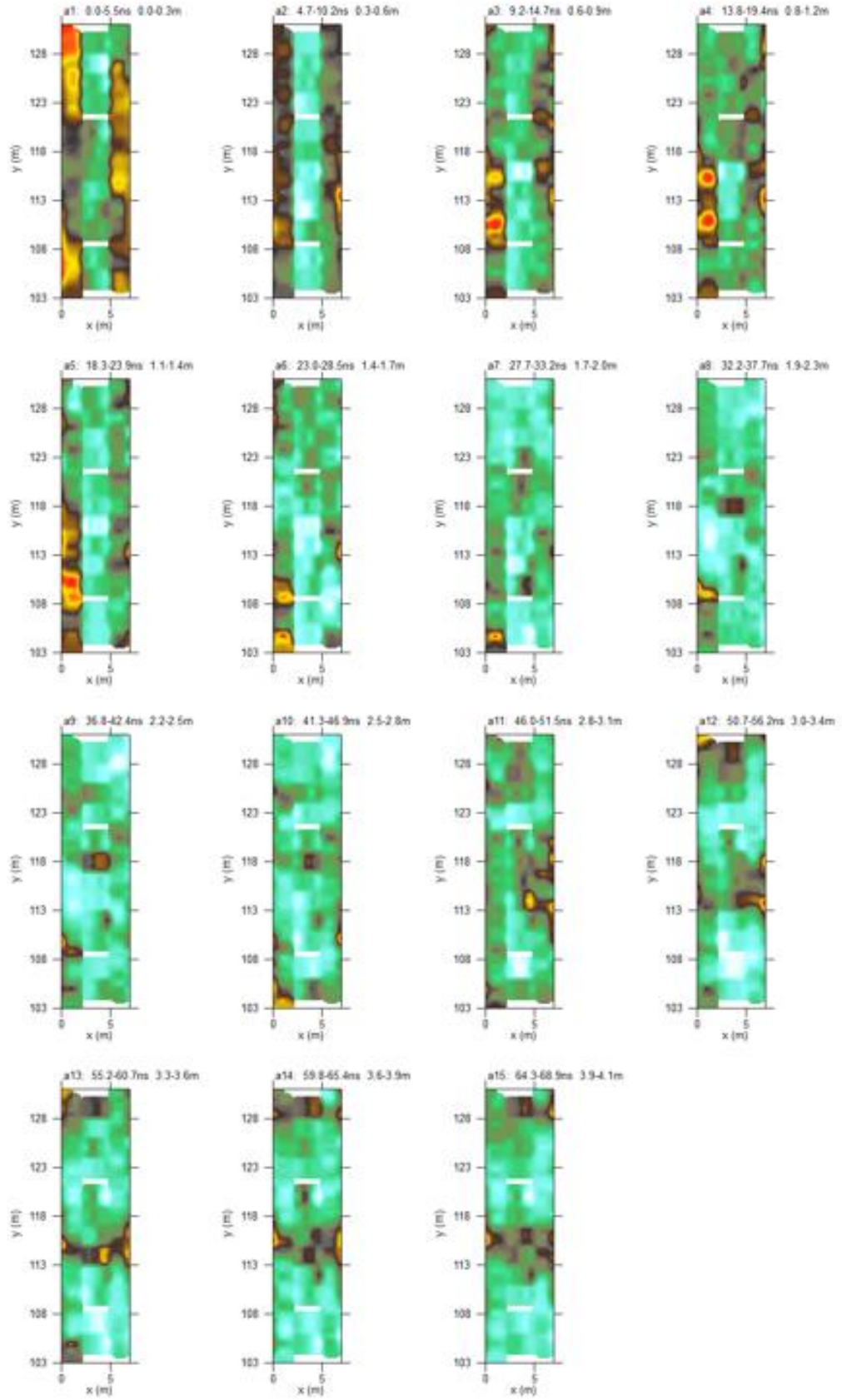
Şekil 4.90 Refüj B Bölüm 2'ye ait oluşturulan seviye haritaları



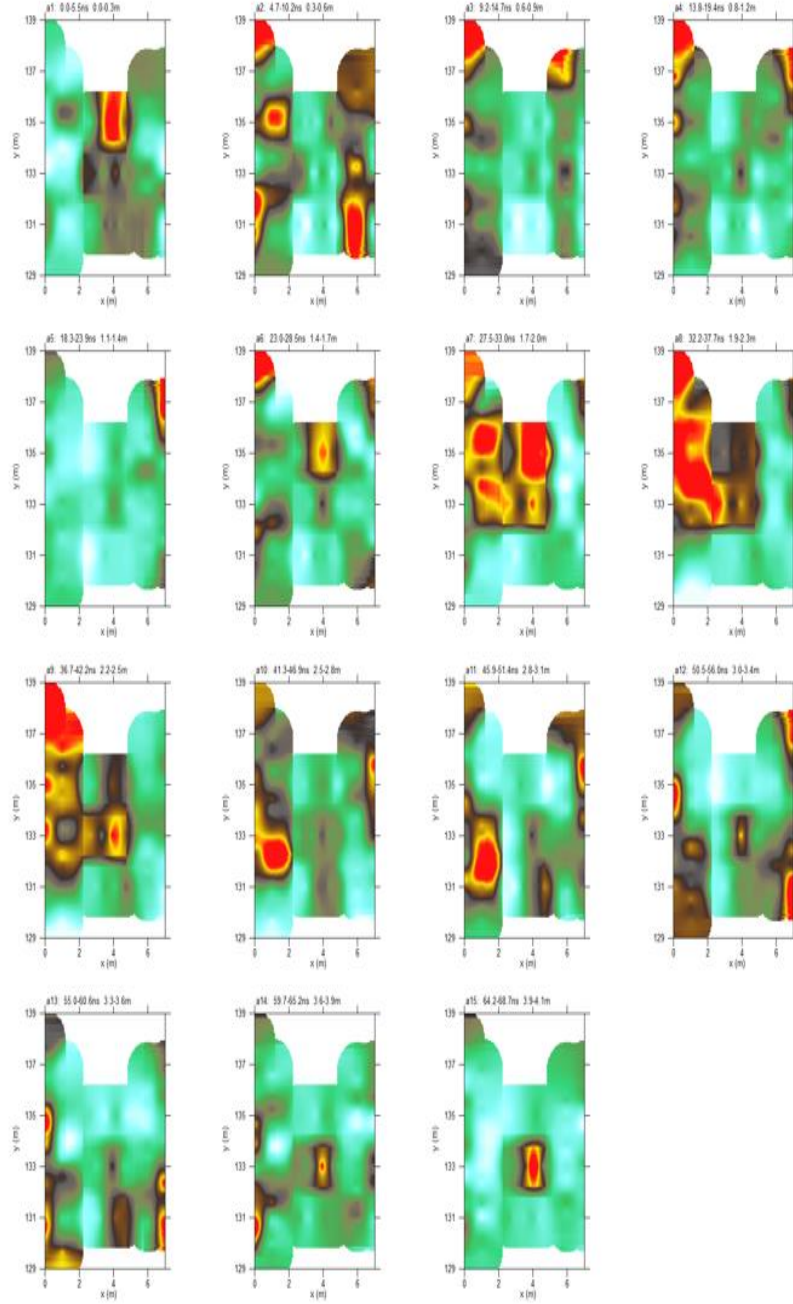
Şekil 4.91 Refüj B Bölüm 3'e ait oluşturulan seviye haritaları



Şekil 4.92 Refüj B Bölüm 4'e ait oluşturulan seviye haritaları

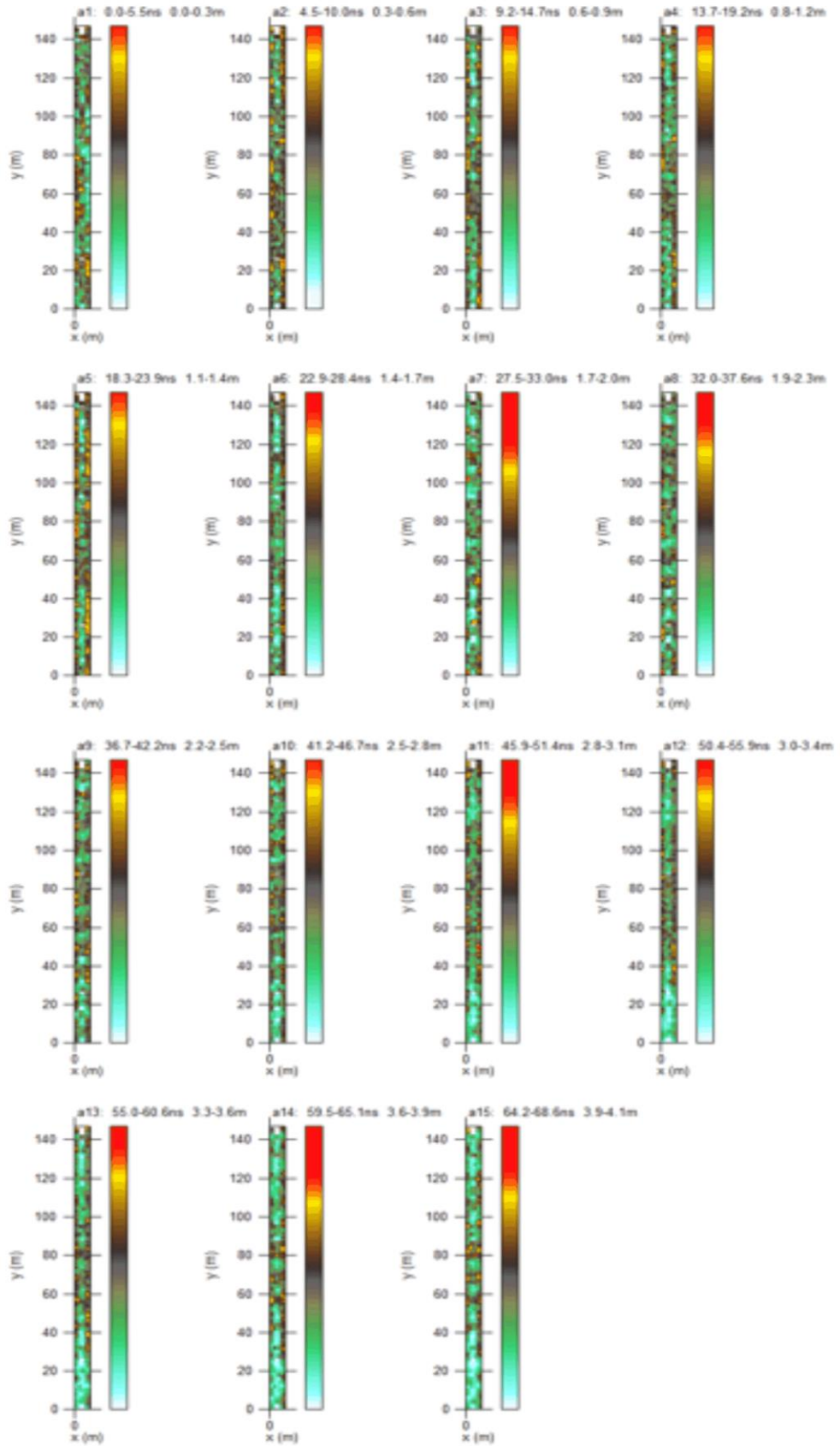


Şekil 4.93 Refüj B Bölüm 5'e ait oluşturulan seviye haritaları

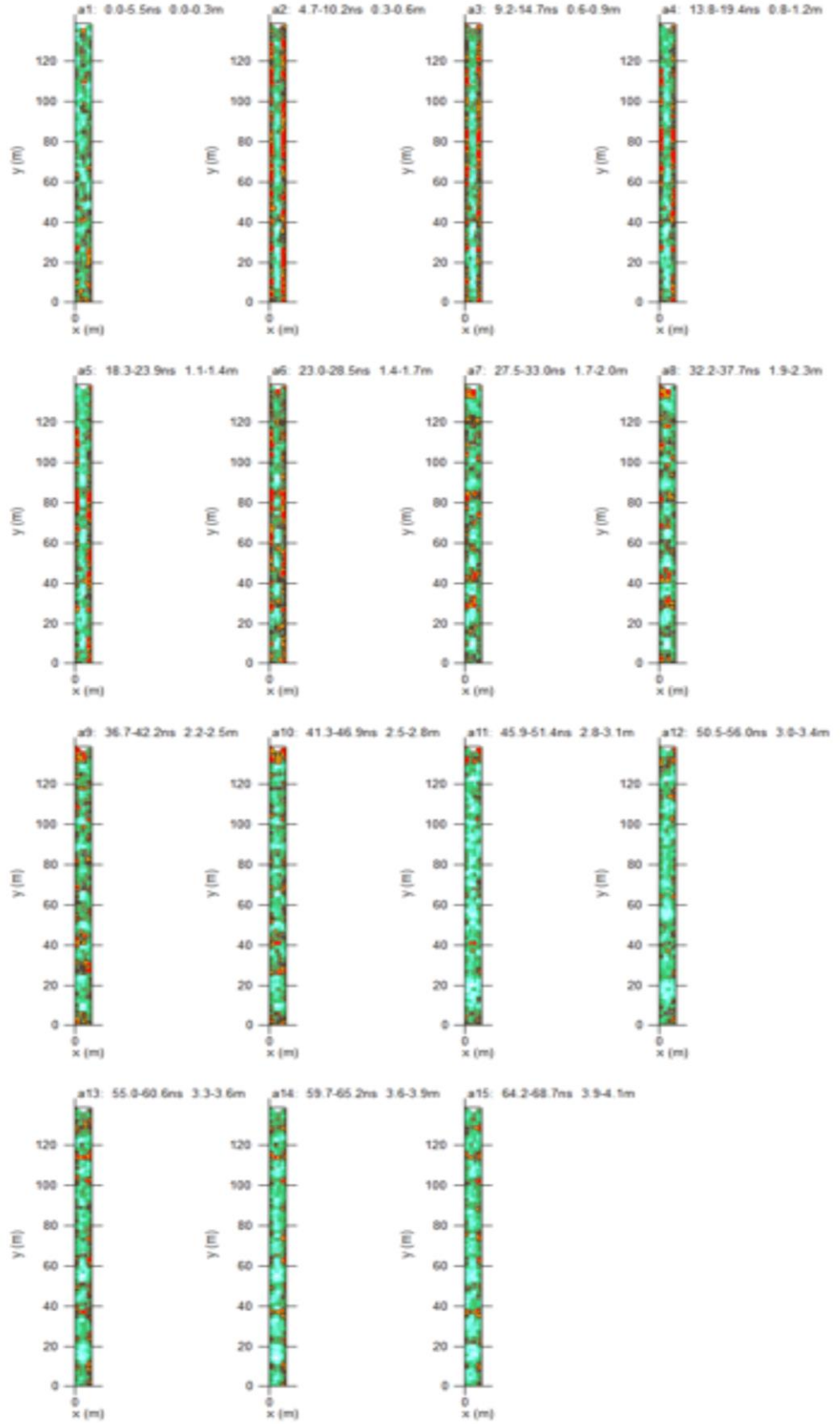


Şekil 4.94 Refüj B Bölüm 6'ya ait oluşturulan seviye haritaları

Bölüm bölüm değerlendirmeler yapıldıktan sonra her iki refüj için de toplu değerlendirmeler yapılmış olup seviye haritaları oluşturulmuştur. Refüj A'nın beraber değerlendirilmesi sonucu oluşturulan seviye haritaları Şekil 4.95'te ve Refüj B'nin beraber değerlendirilmesi sonucu oluşturulan seviye haritaları da Şekil 4.96'da verilmiştir.

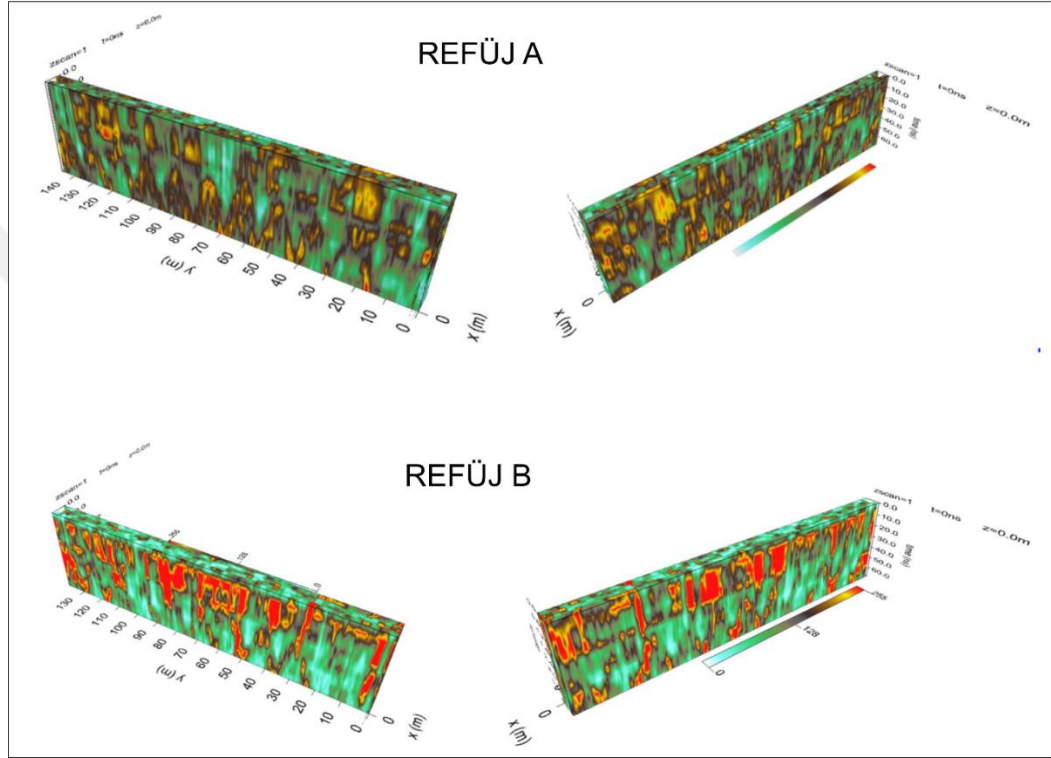


Şekil 4.95 Refüj A'ya ait oluşturulan seviye haritaları



Şekil 4.96 Refüj B'ye ait oluşturulan seviye haritaları

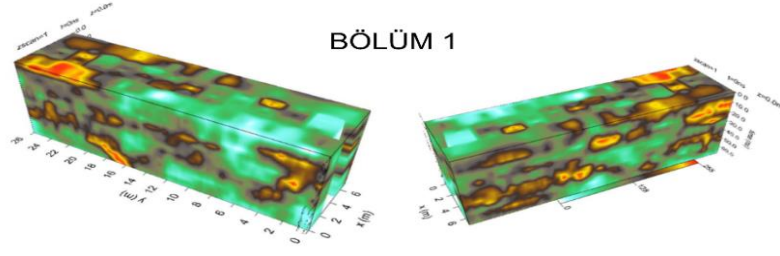
Seviye seviye çizilen ve yukarıda gösterilen seviye haritaları, “interpolate +3D file” seçeneği kullanılarak 3B’lu olarak modellenmiştir. 3B modellenen veri setleri üzerinde kökün yayılım yönü gözlemlenmiştir. Birlikte yapılan değerlendirmeler sonucu elde edilen 3B’lu modeller toplu değerlendirmeler için Şekil 4.97’de, Refüj A için Şekil 4.98’de ve Refüj B için Şekil 4.99’da verilmiştir.



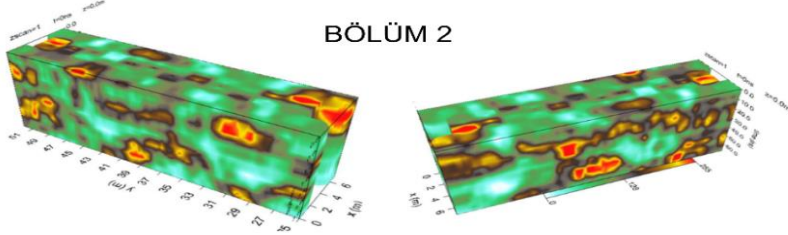
Şekil 4.97 Refüj A ve Refüj B’ye ait toplu GPRslice ile oluşturulan 3B modeli (Kahverengi renkler kökleri temsil etmektedir.)

REFÜJ A 3B MODELLER

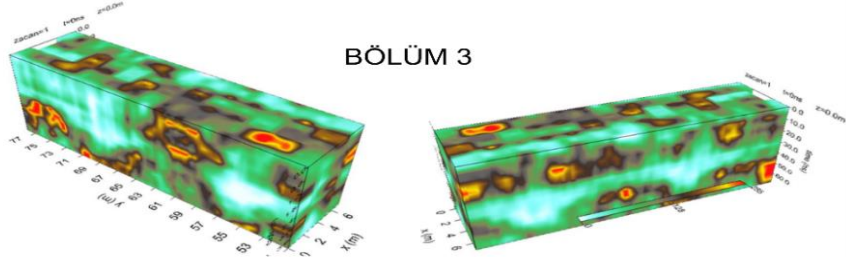
BÖLÜM 1



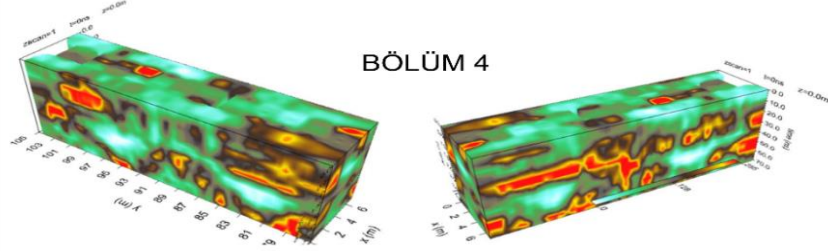
BÖLÜM 2



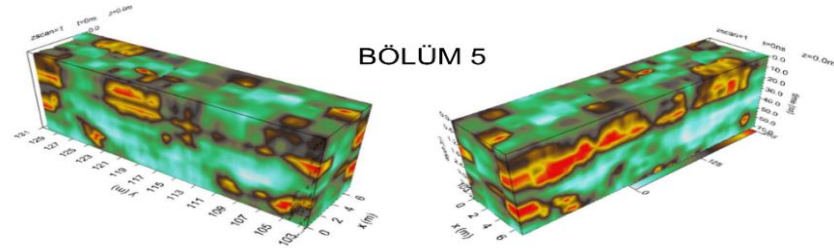
BÖLÜM 3



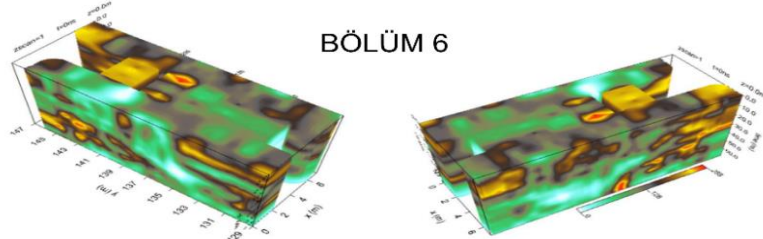
BÖLÜM 4



BÖLÜM 5

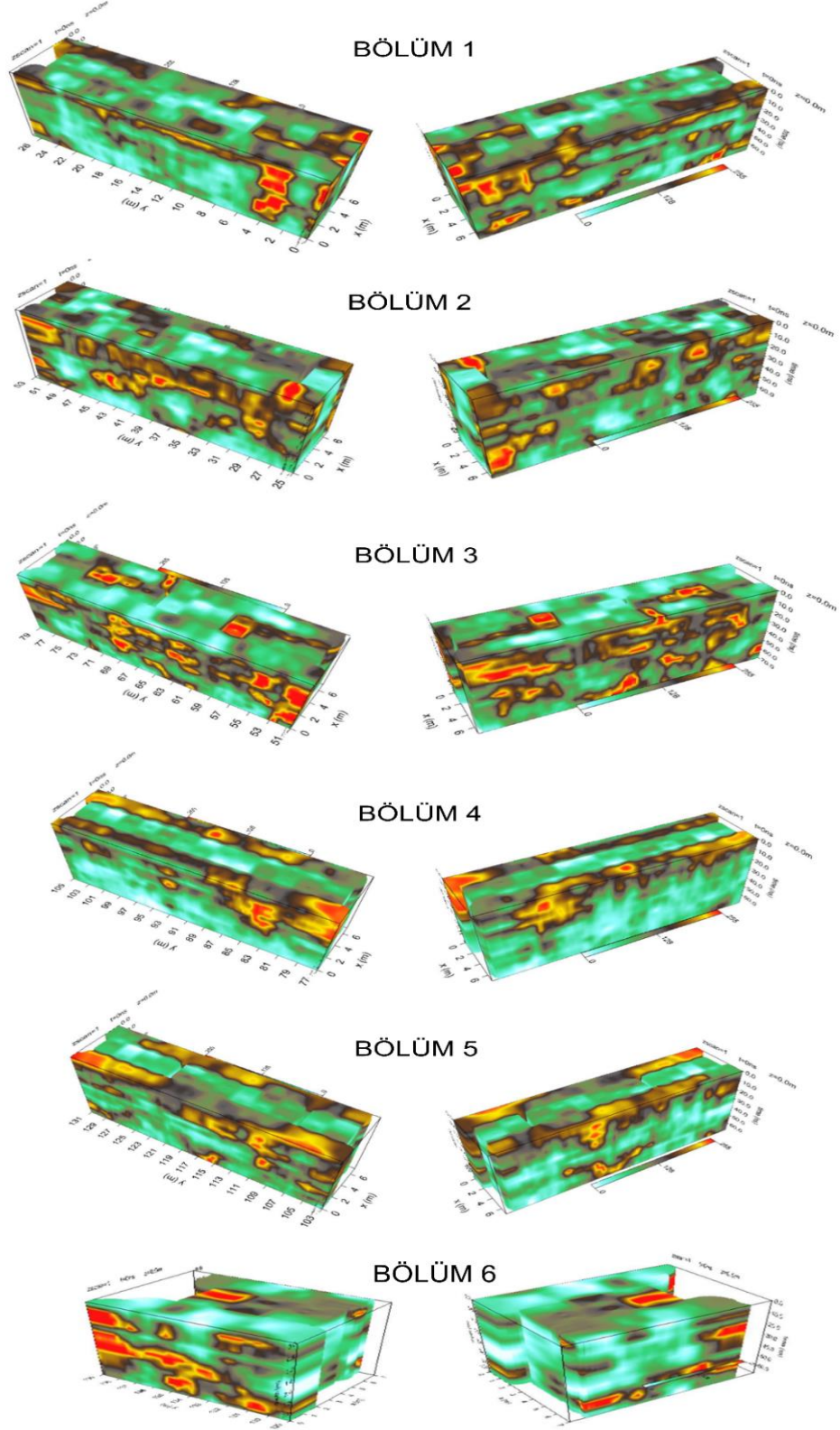


BÖLÜM 6



Şekil 4.98 Refüj A'ya ait 6 bölümün GPRslice ile oluşturulan 3B modeli (Kahverengi renkler kökleri temsil etmektedir.)

REFÜJ B 3B MODELLER



Şekil 4.99 Refüj B'ye ait 6 bölümün GPRslice ile oluşturulan 3B modeli (Kahverengi renkler kökleri temsil etmektedir.)

BÖLÜM BEŞ

SONUÇ VE ÖNERİLER

Ağaç köklerinin yayılım yönünün, yayılım derinliğinin ve elektromanyetik hızlarının tespit edilmesi, yollarda ve yaya kaldırımlarında oluşturduğu hasarların en az maaliyetle ve en doğru şekilde iyileştirme çalışmaları için çok önemlidir. Tüm bu saptanan parametreleri etkileyen ağacın kök türü ve yaşının önceden bilinmesi yapılan hesaplamalarda ve iyileştirme çalışmalarında kolaylık sağlayacaktır. Bu tez çalışması kapsamında Dokuz Eylül Üniversitesi, Tınaztepe Kampüsü içinde yer alan ana arter bulvar üzerinde yer alan iğne yapraklı ve kökleri yüzeysel yayılım göstermiş olan çam ağaçlarının bulunduğu az hasarlı iki adet orta refüjde toplam 182 adet GPR ölçüsü alınmıştır. Alınan ölçüler GPRSlice, Prism ve Geolitix yazılımları ile değerlendirilmiştir.

Yapılan ön değerlendirmelerde ağaç köklerinin elektromanyetik hızlarının 10cm/ns olduğu saptanmıştır. Oluşturulan seviye haritaları ve katı modellerde yüzeysel köklerin konumları ve yerleri belirlenip ihmal edildikten sonra yer altına inen köklerin derinliklerinin 1.7 m'ye kadar indiği gözlemlenmiştir. Yüzeysel köklerin konumları doğrudan kökler üzerinde alınan X profilleri ile belirlenmiş olup, Y profilleri ile ilişkili seviye haritalarında 1.7 m'ye kadar kökler gözlemlenmiştir. Y profillerinde 2 m'nin altında düzgün yansımalar kaydedilmiştir ancak bu yansımaların köke ait olmadığı alt yapıdan kaynaklandığı düşünülmektedir. 3B modellerde hem kahverengi hem de kırmızı renkler ön planda yer almaktadır. Kahverengi olarak karşımıza çıkan yansımalar yüzeyden itibaren kökleri yansıtmaktadır. Derine doğru inen kahverengi yansımalar kazık kökleri 2 m'ye kadar olanlar ise yanal kökleri temsil etmektedir. Özellikle B refüjünde karşımıza çıkan kırmızı olarak görülen izler ise nem içeriği yüksek canlı köklerden kaynaklanmaktadır. Bunu ayırt etmek için saha gözlemleri yapılmıştır ve sahada test ölçüsü alınmıştır. Test ölçüsü ile 3B modeller birbirini sağlamaktadır.

Geolitix adlı yazılımda GPS noktaları da girilerek birebir yerine oturtulan veriler katı modelle birlikte yorumlanmıştır. Katı modelde ve 2B radargramlarda da görüldüğü üzere yansımaların olduğu noktada Fuşya renkli bir biçimde kökler

karşımıza çıkmaktadır. Burada katı model de izleri 3B modelle birleştirmek için seviye 1,5 m de tutulmuş doğrudan yüzeyden bakılmamıştır. Derinde köklerin yanal yöndeki yayılımın boyutu ve ne derece de uzanımının olduğunu görmek ve orada köklerin elektromanyetik hızı ile uyuşan yansıma olup olmadığı araştırılmıştır. Yansımalar köklerle birebir uyum göstermiş ve hem derine doğru düşey yönde hem yanal olarak 1,5 m'den fazla yayılım gösterdiği gözlemlenmiştir.

Çalışma kapsamında Yer Radarı (GPR) yöntemi kullanılarak ağaç köklerinin saptanabilirliği gösterilmiştir. Çalışmanın kentlerin güzelleştirilmesi amaçlı peyzaj çalışmalarında bulvarların orta refüjleri, yol kenarları ve kaldırım ağaçlandırmalarında yerel yönetimlere ve Orman Mühendisliği'nin gelecek çalışmalarına ışık tutacağı düşünülmektedir. Çalışmanın farklı ağaç türleri içinde uygulanması sadece ağaç köklerinin yanal ve düşey yöndeki uzanımları için değil, aynı zamanda ağaç gövdelerinin iç yapılarının araştırılması amacıyla gerçekleştirilmesi de büyük önem taşımaktadır.

KAYNAKLAR

- Aboudourib, A., Serhir, M., & Lesselier, D. (2019, March). Impact of root diameter and water content on tree roots detection using ground penetrating radar. In *2019 13th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)* (pp. 1-5). IEEE.
- Alani, A. M., Aboutalebi, M., & Kilic, G. (2013). Applications of ground penetrating radar (GPR) in bridge deck monitoring and assessment. *Journal of applied geophysics*, 97, 45-54.
- Alani, A. M., & Lantini, L. (2020). Recent advances in tree root mapping and assessment using non-destructive testing methods: a focus on ground penetrating radar. *Surveys in Geophysics*, 41, 605-646.
- Alemdağ, H. (2018). *Bahçecik (Gümüşhane-Tekke) traverten ocağındaki kırık, çatlak, boşluk ve süreksizliklerin yer radarı (GPR) yöntemi ile araştırılması* (Yükseklisans tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Anaran, A.E. ve Şengül, F. (2020). *Batman ili Beşiri ilçesi Kanıreval mahallesi 107 Ada 9 no'lu parsel için jeofizik GPR ve Sismik MASW etüt raporu*. (Mefa Mühendislik). Yayınlanmamış.
- André, F., Jonard, M., & Lambot, S. (2014, June). Full-wave Inversion of ground-penetrating radar data for forest litter characterization. In *Proceedings of the 15th International Conference on Ground Penetrating Radar* (pp. 196-201). IEEE.
- Annan, A. P. (2005). Ground-penetrating radar. In *Near-surface geophysics* (pp. 357-438). Society of Exploration Geophysicists.
- Annan, A. P., & Davis, J. L. (1977). Radar range analysis for geological materials. *Geological Survey of Canada*, 77(1B), 117-124.
- Annan, A. P., Cosway, S. W., & DeSouza, T. (2002, April). Application of GPR to map concrete to delineate embedded structural elements and defects. In *Ninth International Conference on Ground Penetrating Radar* (Vol. 4758, pp. 359-364). SPIE.
- Annan, P. (2003). Ground penetrating radar principles, procedures and applications. *Sensors and software*, 278.
- Arslan, O. N. (2016). Yer radarı verilerine uygulanan veri işlem basamaklarının incelenmesi tezsiz yüksek lisans bitirme projesi (Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Asprion, U. (1998). *Ground-penetrating radar (GPR) analysis in aquifer-sedimentology: case studies, with an emphasis on glacial systems of SW Germany* (Doctoral dissertation, Institut und Museum für Geologie und Paläontologie der Universität Tübingen).

- Attia al Hagrey, S. (2007). Geophysical imaging of root-zone, trunk, and moisture heterogeneity. *Journal of experimental botany*, 58(4), 839-854.
- Bachiri, T., Alsharahi, G., Khamlichi, A., Bezzazi, M., & Faize, A. (2020). GPR application in Civil Engineering to search and detect underground Networks. *Int J Emerg Trends Eng Res*, 8(5).
- Barker, P. A., & Peper, P. J. (1995). Strategies to prevent damage to sidewalks by tree roots. *Arboricultural Journal*, 19(3), 295-309.
- Barton, C. V., & Montagu, K. D. (2004). Detection of tree roots and determination of root diameters by ground penetrating radar under optimal conditions. *Tree physiology*, 24(12), 1323-1331.
- Bassuk, N., Grabosky, J., Mucciardi, A., & Raffel, G. (2011). Ground-penetrating radar accurately locates tree roots in two soil media under pavement. *Arboriculture and Urban Forestry*, 37(4), 160.
- Bevan, B. W. (1991). The search for graves. *Geophysics*, 56(9), 1310-1319.
- Biddle, P. G., & Biddle, P. G. (1998). *Tree Root Damage to Buildings: Patterns of Soil Drying in Proximity to Trees on Clay Soils*. Willowmead Pub.
- Blunt, S. M. (2008). Trees and pavements—are they compatible?. *Arboricultural Journal*, 31(2), 73-80.
- Burden, D. (2006). 22 benefits of urban street trees. Retrieved from (www.michigan.gov/documents/dnr/22_benefits_208084_7.pdf).
- Butler, D. K., Llopis, J. L., Dobecki, T. L., Wilt, M. J., Corwin, R. F., & Olhoeft, G. (1990). Comprehensive geophysics investigation of an existing dam foundation: Engineering geophysics research and development, Part 2. *The Leading Edge*, 9(9), 44-53.
- Butnor JR, Doolittle JA, Johnsen KH et al (2003). Utility of ground-penetrating radar as a root biomass survey tool in forest systems. *Soil Sci Soc Am J* 67:1607–1615.
- Butnor, J. R., Doolittle, J. A., Johnsen, K. H., Samuelson, L., Stokes, T., & Kress, L. (2003). Utility of ground-penetrating radar as a root biomass survey tool in forest systems. *Soil Science Society of America Journal*, 67(5), 1607-1615.
- Butnor, J. R., Barton, C., Day, F. P., Johnsen, K. H., Mucciardi, A. N., Schroeder, R., & Stover, D. B. (2012). Using ground-penetrating radar to detect tree roots and estimate biomass. *Measuring roots: an updated approach*, 213-245.
- Butnor, J. R., Johnsen, K. H., Wikström, P., Lundmark, T., & Linder, S. (2006, June). Imaging tree roots with borehole radar. In *Proceedings of the 11th International Conference on Ground Penetrating Radar* (p. 8).
- Butnor, J. R., Doolittle, J. A., Kress, L., Cohen, S., & Johnsen, K. H. (2001). Use of ground-penetrating radar to study tree roots in the southeastern United States. *Tree physiology*, 21(17), 1269-1278.

- Butnor, J. R., Samuelson, L. J., Stokes, T. A., Johnsen, K. H., Anderson, P. H., & González-Benecke, C. A. (2016). Surface-based GPR underestimates below-stump root biomass. *Plant and Soil*, 402, 47-62.
- Canbay, M. M. Çevre Sorunları ve Jeofizik Mühendisliğindeki Yeri. *Akademik Platform Dergisi*, 814-819
- Caneva, G., Galotta, G., Cancellieri, L., & Savo, V. (2009). Tree roots and damages in the Jewish catacombs of Villa Torlonia (Roma). *Journal of Cultural Heritage*, 10(1), 53-62.
- Cermák, J., Hruška, J., Martinková, M., & Prax, A. (2000). Urban tree root systems and their survival near houses analyzed using ground penetrating radar and sap flow techniques. *Plant and soil*, 219(1-2), 103-116.
- Chang, H. Y., & Lee, Y. F. (2016). Effects of area size, heterogeneity, isolation, and disturbances on urban park avifauna in a highly populated tropical city. *Urban ecosystems*, 19, 257-274.
- Coder, K. D. (1998, March). Root growth control: Managing perceptions and realities. In *The Landscape Below Ground II: Proceedings of an International Workshop on Tree Root Development in Urban Soils*. International Society of Arboriculture, Champaign, IL (pp. 51-81).
- Conyers, L. B., & Leckebusch, J. (2010). Geophysical archaeology research agendas for the future: Some ground-penetrating radar examples. *Archaeological Prospection*, 17(2), 117-123.
- Conyers, L. B. (2013). *Ground-penetrating radar for archaeology*. Altamira Press.
- Correia, A. G. (2008). Innovations in design and construction of granular pavements and railways. In *Advances in Transportation Geotechnics* (pp. 17-28). CRC Press.
- Costello, L. R., McPherson, E. G., Burger, D., Perry, E. J., & Kelley, D. (2000). Strategies to reduce infrastructure damage by tree roots: A symposium for researchers and practitioners. In *Proceedings of a Symposium*. Western Chapter, International Society of Arboriculture, Cohasset, CA.
- Cui, X., Chen, J., Shen, J., Cao, X., Chen, X., & Zhu, X. (2011). Modeling tree root diameter and biomass by ground-penetrating radar. *Science China-Earth Sciences*, 54(5), 711.
- Daniels, D. J., Gunton, D. J., & Scott, H. F. (1988, August). Introduction to subsurface radar. In *IEE Proceedings F (Communications, Radar and Signal Processing)* (Vol. 135, No. 4, pp. 278-320). IET Digital Library.
- Dannoura, M., Hirano, Y., Igarashi, T., Ishii, M., Aono, K., Yamase, K., & Kanazawa, Y. (2008). Detection of *Cryptomeria japonica* roots with ground penetrating radar. *Plant Biosystems*, 142(2), 375-380.
- Day, R. W. (1991). Damage of structures due to tree roots. *Journal of performance of constructed facilities*, 5(3), 200-207.

- De Aguiar, G. Z., Lins, L., de Paulo, M. F., Maciel, S. T. R., & Rocha, A. A. (2021). Dielectric permittivity effects in the detection of tree roots using ground-penetrating radar. *Journal of Applied Geophysics*, 193, 104435.
- De Menezes Travassos, J., & Menezes, P. D. T. L. (2004). GPR exploration for groundwater in a crystalline rock terrain. *Journal of Applied Geophysics*, 55(3-4), 239-248.
- De Pascale, G. P., Pollard, W. H., & Williams, K. K. (2008). Geophysical mapping of ground ice using a combination of capacitive coupled resistivity and ground-penetrating radar, Northwest Territories, Canada. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 113(F2).
- Donovan, G. H., Butry, D. T., Michael, Y. L., Prestemon, J. P., Liebhold, A. M., Gatzliolis, D., & Mao, M. Y. (2013). The relationship between trees and human health: evidence from the spread of the emerald ash borer. *American journal of preventive medicine*, 44(2), 139-145.
- Driscoll, R. (1983). The influence of vegetation on the swelling and shrinking of clay soils in Britain. *Geotechnique*, 33(2), 93-105.
- Elkhetali, S. I. (2006, March). Detection of groundwater by ground penetrating radar. In *Progress in Electromagnetics Research Symposium* (Vol. 6, pp. 251-255).
- Esmaili, S., Kruse, S., Jazayeri, S., Whelley, P., Bell, E., Richardson, J., ... & Young, K. (2020). Resolution of lava tubes with ground penetrating radar: The TubeX project. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 125(5), e2019JE006138.
- Ferrara, C., Barone, P. M., Salvati, L., & Pettinelli, E. (2014). Ground Penetrating Radar as remote sensing technique to investigate the root system architecture. *Applied Ecology and Environmental Research*, 12(3), 695-702.
- Ferrara, C., Salvati, L., & Barone, P. M. (2017). Tree root system imaging using Ground Penetrating Radar. *Annals of Silvicultural Research*, 41(2), 80-83.
- Francke, J. (2012). A review of selected ground penetrating radar applications to mineral resource evaluations. *Journal of Applied Geophysics*, 81, 29-37.
- Freeland, R. S. (2015). Imaging the lateral roots of the orange tree using three-dimensional GPR. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 20(3), 235-244.
- Gelişli, K. (2018). Jeofizik Yöntemlerle Heyelan Araştırmaları. *Uygulamalı Yerbilimleri Dergisi*, 17 (2), 115-126.
- Geoscience, M. (2003). Basics Radar Theory, Fundamentals of Ground Penetrating Radar (CD).
- Grabosky, J., Haffner, E., & Bassuk, N. (2009). Plant available moisture in stone-soil media for use under pavement while allowing urban tree root growth. *Journal of Arboriculture*, 35(5), 271.

- GSSI, (2021). Geophysical Survey Systems, “UtilityScan” erişim: 20.01.2023, <https://www.geophysical.com/products/utilityscan>
- Guo L., Chen J., Cui X., Fan B., Lin H. (2013) *Application of ground penetrating radar for coarse root detection and quantification: a review*. Plant Soil 362: 1–23. DOI 10.1007/s11104-012-1455-5.
- Guo, L., Wu, Y., Chen, J., Hirano, Y., Tanikawa, T., Li, W., Cui, X., 2015. Calibrating the impact of root orientation on root quantification using ground-penetrating radar. Plant Soil 395, 289–305.
- Gündoğdu, E., Kurban, Y. C., Yalçiner, C. Ç., & Özden, S. (2017). Simav Fayındaki Düşey Yer değiştirmelerin, GPR (Yeraltı Radarı) Yöntemi ile Belirlenmesi. *Çanakkale On sekiz Mart Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 3(2), 17-33.
- Hammam, A., Gaber, A., Abdelwahed, M., & Hamed, M. (2020). Geological mapping of the Central Cairo-Suez District of Egypt, using space-borne optical and radar dataset. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 23(3), 275-285.
- Hirano, Y., Dannoura, M., Aono, K., Igarashi, T., Ishii, M., Yamase, K., ... & Kanazawa, Y. (2009). Limiting factors in the detection of tree roots using ground-penetrating radar. *Plant and Soil*, 319, 15-24.
- Hitchmough, J.D. (1994). *The management of trees in the urban landscape*, pp. 267–300. In: Urban Landscape Management. J.D. Hitchmough (Ed.). Inkata Press, UK.
- Huo, A. D., Dang, J., Song, J. X., Chen, X. H., & Mao, H. R. (2016). Simulation modeling for water governance in basins based on surface water and groundwater. *Agricultural Water Management*, 174, 22-29.
- Imai, T., Sakayama, T., & Kanemori, T. (1987). Use of ground-probing radar and resistivity surveys for archaeological investigations. *Geophysics*, 52(2), 137-150.
- Jasmani, Z., Ravn, H. P., & van den Bosch, C. C. K. (2017). The influence of small urban parks characteristics on bird diversity: A case study of Petaling Jaya, Malaysia. *Urban ecosystems*, 20, 227-243.
- Ježová, J., Mertens, L., & Lambot, S. (2016). Ground-penetrating radar for observing tree trunks and other cylindrical objects. *Construction and Building Materials*, 123, 214-225.
- Jones, B. M., Gusmeroli, A., Arp, C. D., Strozzi, T., Grosse, G., Gaglioti, B. V., & Whitman, M. S. (2013). Classification of freshwater ice conditions on the Alaskan Arctic Coastal Plain using ground penetrating radar and TerraSAR-X satellite data. *International Journal of Remote Sensing*, 34(23), 8267-8279.
- Joshaghani, A., & Shokrabadi, M. (2022). Ground penetrating radar (GPR) applications in concrete pavements. *International Journal of Pavement Engineering*, 23(13), 4504-4531.

- Kadıoğlu, S., & Kadıoğlu, Y. K. (2006). Yer Radarı (GPR) Yöntemi ile Bir Mermer Sahasındaki Kalınlık ve Süreksizliklerin Belirlenmesi. *Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 21(1), 127-136.
- Kara, E. M. (2020). *Yer radarı tomografi uygulaması ile betonarme elemanlardaki nem içeriğinin belirlenmesi*. Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, Yüksek lisans tezi, s.9.
- Keçeli, A. (2009). Uygulamalı Jeofizik, TMMOB Jeofizik Mühendisleri Odası Eğitim Yayınları No: 9.
- Kim, C., Daniels, J. J., Guy, E. D., Radzevicius, S. J., & Holt, J. (2000). Residual hydrocarbons in a water-saturated medium: A detection strategy using ground penetrating radar. *Environmental Geosciences*, 7(4), 169-176.
- Kirkpatrick, J. B., Davison, A., & Daniels, G. D. (2012). Resident attitudes towards trees influence the planting and removal of different types of trees in eastern Australian cities. *Landscape and urban planning*, 107(2), 147-158.
- Watson, G. W., & Neely, D. (1994). *The landscape below ground: Proceedings of an international workshop on tree root development in urban soils*. International Society of Arboriculture.
- Koşaroğlu, S., Kamacı, Z., & Bektaş, Ö. (2021). Sakarya Meydan Muharebesi Savaş Alanındaki Erozyona Uğramış Siper Hatlarının Yer Radarı (GPR) Yöntemi ile Belirlenmesi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 25(2), 452-458.
- Kuo, F. E., & Sullivan, W. C. (2001). Environment and crime in the inner city: Does vegetation reduce crime?. *Environment and behavior*, 33(3), 343-367.
- Kurt, B. B. (2009). *Zaman ortamında sonlu farklar yöntemi ile iki boyutlu yer radarı modellemesi* (Master's thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Kütükcüoğlu, H. (2020). *Yer radarı (GPR) yöntemi ile su boru hatlarında sızıntı konumlarının tespiti* (Yüksek lisans tezi, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Lawson, M., & O'Callaghan, D. (1995). A critical analysis of the role of trees in damage to low rise buildings. *Journal of Arboriculture*, 21, 90-90.
- Liu, X., Dong, X., & Leskova, D. I. (2016). Ground penetrating radar for underground sensing in agriculture: a review. *International Agrophysics*, 30(4).
- Lombardi, E., Ferrio, J. P., Rodríguez-Robles, U., Resco de Dios, V., & Voltas, J. (2021). Ground-Penetrating Radar as phenotyping tool for characterizing intraspecific variability in root traits of a widespread conifer. *Plant and Soil*, 468(1-2), 319-336.
- Machado Brito-da-Costa, A., Martins, D., Rodrigues, D., Fernandes, L., Moura, R., & Madureira-Carvalho, A. (2022). Ground penetrating radar for buried explosive devices detection: A case studies review. *Australian Journal of Forensic Sciences*, 54(4), 559-578.

- Martínez-Sala, R., Rodríguez-Abad, I., Barra, R. D., & Capuz-Lladro, R. (2013). Assessment of the dielectric anisotropy in timber using the nondestructive GPR technique. *Construction and Building Materials*, 38, 903-911.
- Mellet, J. S. (1992, June). Location of human remains with ground-penetrating radar. In *Fourth International Conference on Ground Penetrating Radar* (pp. Cp-303). European Association of Geoscientists & Engineers.
- Meribout, M., Khezzar, L., Azzi, A., & Ghendour, N. (2020). Leak detection systems in oil and gas fields: Present trends and future prospects. *Flow Measurement and Instrumentation*, 75, 101772.
- Mihai, A. E., Gere, A. G., Curioni, G., Atkins, P., & Hayati, F. (2019). Direct measurements of tree root relative permittivity for the aid of GPR forward models and site surveys. *Near Surface Geophysics*, 17(3), 299-310.
- Miller, T. W., Hendrickx, J. M. H., & Borchers, B. (2004). Radar detection of buried landmines in field soils. *Vadose Zone Journal*, 3(4), 1116-1127.
- Mochales, T., Casas, A. M., Pueyo, E. L., Pueyo, O., Román, M. T., Pocoví, A., ... & Ansón, D. (2008). Detection of underground cavities by combining gravity, magnetic and ground penetrating radar surveys: a case study from the Zaragoza area, NE Spain. *Environmental Geology*, 53, 1067-1077.
- Moore, G. M., & Ryder, C. M. (2015). The Use of Ground-Penetrating Radar to Locate Tree Roots. *Arboriculture & Urban Forestry*, 41(5).
- Morcous, G., & Erdogmus, E. (2009). *Use of ground penetrating radar for construction quality assurance of concrete pavement* (No. SPR-P1 (08) P307). Nebraska Transportation Center.
- Morelli, G., Zenone, T., Teobaldelli, M., Fischanger, F., Matteucci, M., & Seufert, G. (2007). Use of ground-penetrating radar (GPR) and electrical resistivity tomography (ERT) to study tree roots volume in pine forest and poplar plantation. *Napier, New Zealand*, 21, 1-4.
- Mullaney, J., Lucke, T., Trueman, S.J. (2015). A review of benefits and challenges in growing street trees in paved urban environments. *Landscape and Urban Planning*, 34, pp. 157-166.
- Navarro, V., Candel, M., Yustres, A., Sanchez, J., & Alonso, J. (2009). Trees, soil moisture and foundation movements. *Computers and Geotechnics*, 36(5), 810-818.
- Neal, A. (2004). Ground-penetrating radar and its use in sedimentology: principles, problems and progress. *Earth-science reviews*, 66(3-4), 261-330.
- Nichols, P., McCallum, A., & Lucke, T. (2017). Using ground penetrating radar to locate and categorise tree roots under urban pavements. *Urban Forestry & Urban Greening*, 27, 9-14.
- Nicolotti, G., Socco, L. V., Martinis, R., Godio, A., & Sambuelli, L. (2003). Application and comparison of three tomographic techniques for detection of decay in trees. *Journal of arboriculture*, 29(2), 66-78.

- Orbay, F. Ö. N. (2012). Yerküre ile Fiziksel İletişim: Cumhuriyetin 75. Yılında Ülkemizde Jeofizik. *İstanbul Yerbilimleri Dergisi*, 12(1).
- Özkap, K. (2008). *Arkeojeofizik çalışmalarda GPR verilerine güncel veri-işlem yöntemlerinin uygulanması* (Master's thesis, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Pajewski, L., Fontul, S., & Solla, M. (2019). Ground-penetrating radar for the evaluation and monitoring of transport infrastructures. In *Innovation in Near-Surface Geophysics* (pp. 341-398). Elsevier.
- Parsekian, A. D., Slater, L., & Schäfer, K. V. (2012). Small root biomass effect on the dielectric properties of soil. *Vadose Zone Journal*, 11(1).
- Vega Pérez-Gracia, H. L., & Diaz-Peñalver, N. Forestry applications of radar remote sensing with sensors In-situ.
- Perry, T. O. (1982). The ecology of tree roots and the practical significance thereof. *Journal of Arboriculture*, 8(8), 197-211.
- Peters, L. P., Daniels, J. J., & Young, J. D. (1994). Ground penetrating radar as a subsurface environmental sensing tool. *Proceedings of the IEEE*, 82(12), 1802-1822.
- Pirone, P. P., Hartman, J. R., Sall, M. A., & Pirone, T. P. (1988). *Tree maintenance* (No. Ed. 6). Oxford University Press.
- Qasimi, M.A. (2014). Yer Radarı ve Traverten Ocağı Uygulaması, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, Yüksek Lisans Tezi, s. 17
- Randrup, T. B., McPherson, E. G., & Costello, L. R. (2001). A review of tree root conflicts with sidewalks, curbs, and roads. *Urban Ecosystems*, 5, 209-225.
- Reppert, P. M., Morgan, F. D., & Toksöz, M. N. (2000). Dielectric constant determination using ground-penetrating radar reflection coefficients. *Journal of Applied Geophysics*, 43(2-4), 189-197.
- Rhodes, J. R., Ng, C. F., de Villiers, D. L., Preece, H. J., McAlpine, C. A., & Possingham, H. P. (2011). Using integrated population modelling to quantify the implications of multiple threatening processes for a rapidly declining population. *Biological conservation*, 144(3), 1081-1088.
- Capuz Lafarga, L., Capuz Lladró, R., García García, F., Rodríguez Abad, I., Martínez Sala, R., & Díez Barra, R. (2011). Evaluación de la madera estructural para la rehabilitación de las Naves Cros (Valencia, España) por medio de diferentes técnicas no destructivas.
- Ruffell, A., McCabe, A., Donnelly, C., & Sloan, B. (2009). Location and assessment of an historic (150–160 years old) mass grave using geographic and ground penetrating radar investigation, NW Ireland. *Journal of Forensic Sciences*, 54(2), 382-394.

- Saarenketo, T. (2006). *Electrical properties of road materials and subgrade soils and the use of ground penetrating radar in traffic infrastructure surveys* (No. 471).
- Sarıbudak, M. (2019). Amerika, Orta Teksas' ta Yer Alan Edwards Akiferi'nde Karstik Yapıların ve Fay Karakterizasyonunun Bütünleşik Jeofizik Yöntemler Kullanılarak Araştırılması. *Türkiye Jeoloji Bülteni*, 62(2), 113-140.
- Satriani, A., Loperte, A., Proto, M., & Bavusi, M. (2010). Building damage caused by tree roots: laboratory experiments of GPR and ERT surveys. *Advances in Geosciences*, 24, 133-137.
- Schnelle, M. A., Feucht, J. R., & Klett, J. E. (1989). Root systems of trees-facts and fallacies.
- Schultz, J. J. (2012). The application of ground-penetrating radar for forensic grave detection. *A companion to forensic anthropology*, 85-100.
- Stoianov, I., Nachman, L., Whittle, A., Madden, S., & Kling, R. (2008). Sensor networks for monitoring water supply and sewer systems: Lessons from Boston. In *Water Distribution Systems Analysis Symposium 2006* (pp. 1-17).
- Stokes A. Fourcaud T. Hruska J. Cermak J. Nadyezhdin N. and Praus L. (2002) An evaluation of different methods to investigate root system architecture of urban trees in situ: I. Ground penetrating radar. *Journal of Arboriculture* 28(1): page 1-9
- Stover, D. B., Day, F. P., Butnor, J. R., & Drake, B. G. (2007). Application of ground penetrating radar to quantify the effects of long-term CO₂ enrichment on coarse root biomass in a scrub-oak ecosystem at Kennedy Space Center. *Ecology*, 88(5), 1328-1334.
- Tanikawa, T., Hirano, Y., Dannoura, M., Yamase, K., Aono, K., Ishii, M., ... & Kanazawa, Y. (2013). Root orientation can affect detection accuracy of ground-penetrating radar. *Plant and Soil*, 373, 317-327.
- Tighe, S., Li, N., Falls, L. C., & Haas, R. (2000). Incorporating road safety into pavement management. *Transportation Research Record*, 1699(1), 1-10.
- Torgovnikov, G. I., & Torgovnikov, G. I. (1993). *Dielectric properties of wood-based materials* (pp. 135-159). Springer Berlin Heidelberg.
- Tosti, F., Bianchini Ciampoli, L., Brancadoro, M. G., & Alani, A. (2018). GPR applications in mapping the subsurface root system of street trees with road safety-critical implications. *Advances in transportation studies*, 44.
- Utsi, E. (2006). Ground-penetrating radar for archaeology. Lawrence B. Conyers. AltaMira Press, Walnut Creek, California, 2004. 203pp. ISBN 0-759-10773-4.
- Van Dillen, S. M., de Vries, S., Groenewegen, P. P., & Spreeuwenberg, P. (2012). Greenspace in urban neighbourhoods and residents' health: adding quality to quantity. *J Epidemiol Community Health*, 66(6), e8-e8.

- Vogt, J., Hauer, R. J., & Fischer, B. C. (2015). The costs of maintaining and not maintaining the urban forest: A review of the urban forestry and arboriculture literature. *Arboriculture & Urban Forestry*, 41(6), 293-323.
- Wang, M., Wen, J., & Li, W. (2020). Qualitative research: The impact of root orientation on coarse roots detection using ground-penetrating radar (GPR). *BioResources*, 15(2), 2237-2257. Wielopolski, L., Hendrey, G., Daniels, J. J., & McGuigan, M. (2000, April). Imaging tree root systems in situ. In *Eighth International Conference on Ground Penetrating Radar* (Vol. 4084, pp. 642-646). SPIE.
- Wielopolski, L., Hendrey, G., Daniels, J. J., & McGuigan, M. (2000, April). Imaging tree root systems in situ. In *Eighth International Conference on Ground Penetrating Radar* (Vol. 4084, pp. 642-646). SPIE.
- Wijewardana, N. S., Galagedara, L. W., & Mowjood, M. I. M. (2012, June). Assessment of groundwater contamination by landfill leachate with ground penetrating radar. In *2012 14th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR)* (pp. 728-732). IEEE.
- Yelf, R. J. (2007). Application of ground penetrating radar to civil and geotechnical engineering. *Electromagnetic Phenomena*, 7(1), 18.
- Yeşilmen, Ç. (2019). Orman zemininde elde edilen radar (GPR) verilerine çevresel etkilerin araştırılması. Mersin Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mersin, Yüksek lisans tezi, s.25
- Yilmaz, Y., & Soykan, A. (2022). The detection of the buried pipes using GPR in utility works: a case study. *International Journal of Environment and Geoinformatics*, 9(4), 124-137.
- Zhang, F., Xie, X., & Huang, H. (2010). Application of ground penetrating radar in grouting evaluation for shield tunnel construction. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 25(2), 99-107.
- Zhang, P., Li, Y., Zhao, Y., & Guo, L. (2012, June). Application and analysis on structure exploration of coal seam by mine ground penetrating radar. In *2012 14th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR)* (pp. 469-472). IEEE.
- Zhou, W., Zeng, Z., & Li, J. (2019). Mode decomposition methods and their application in ground penetrating radar data processing. *Global Geology*, 3.