

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

JEOFİZİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**ALT YAPI ELEMANLARININ YER RADARI YÖNTEMİ İLE ARAŞTIRILMASI
(KTÜ KANUNİ YERLEŞKESİ)**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Jeofizik Müh. Mehtap BEYAZ ÖZDEMİR

**TEMMUZ 2015
TRABZON**



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

JEOFİZİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ALT YAPI ELEMANLARININ YER RADARI YÖNTEMİ İLE ARAŞTIRILMASI
(KTÜ KANUNİ YERLEŞKESİ)

Mehtap BEYAZ ÖZDEMİR

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
"JEOFİZİK YÜKSEK MÜHENDİSİ"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 26 / 05 / 2015

Tezin Savunma Tarihi : 02 / 07 / 2015

Tez Danışmanı : Doç.Dr.Aysel ŞEREN

Trabzon 2015

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalı
Jeofizik Müh. Mehtap BEYAZ ÖZDEMİR**

**ALT YAPI ELEMANLARININ YER RADARI YÖNTEMİ İLE ARAŞTIRILMASI
(KTÜ KANUNİ YERLEŞKESİ)**

başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 16 / 06 / 2015 gün ve 1607 sayılı
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda
YÜKSEK LİSANS TEZİ
olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan : Doç.Dr. Aysel ŞEREN

Üye : Doç.Dr. Raif KANDEMİR

Üye : Yrd.Doç.Dr. Ali Erden BABACAN

Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ
Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

Bu çalışma Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak hazırlanmıştır. Bu çalışmada; yerleri ve derinlikleri bilinmeyen alt yapı unsurlarının (metalik ve metalik olmayan borular, telefon/elektrik/fiberoptik kablolar) yer radarı yöntemi ile belirlenmesi kapsamında, Karadeniz Teknik Üniversitesi (KTÜ) Kanuni yerleşke alanı içerisinde seçilen pilot alanlarda çok sayıda ölçümler alınarak, belirtilen alt yapı unsurlarının, KTÜ'nün hali hazır harita üzerine işlenmesi amaçlanmıştır.

Yüksek lisans çalışmam süresince benden destek ve yardımlarını esirgemeyen, değerli bilgileri ve önerileri ile beni yönlendiren, çok değerli danışman hocam Doç. Dr. Aysel ŞEREN'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Beni yüreklendirerek akademik çalışma hayatım boyunca manevi desteğini hiçbir zaman esirgemeyen sevgili aileme; bu zor ve uzun dönemde, şikâyet etmeden, her zaman yanımda olduğu ve gösterdiği içten sevgi, sabır ve desteği için eşim İlker ÖZDEMİR'e ve beni sabırla bekleyen oğlum Egemen ÖZDEMİR'e minnettarım. Ayrıca arazi verilerinin toplanmasında lisans öğrencileri Muammer YAĞAN, Mevlüt ÇATIKKAYA, Özkan EROL ve tez çalışmamda her türlü katkı aldığım Arş.Gör. Zeynep ÖĞRETMEN'e, Arş.Gör. Sevda GÖREN'e, Arş.Gör. Recep GÜNEY ve Arş.Gör. Şeyda YILMAZ'a çok teşekkür ederim.

Mehtap BEYAZ ÖZDEMİR
Trabzon 2015

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Alt Yapı Elemanlarının Yer Radarı Yöntemi İle Araştırılması (KTÜ Kanuni Yerleşkesi)” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Doç. Dr. Aysel ŞEREN’in sorumluluğunda tamamladığımı, toplanmış verileri kendim değerlendirdiğimi ve yorumladığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 02/07/2015

Mehtap BEYAZ ÖZDEMİR

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET.....	VIII
SUMMARY.....	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	X
TABLolar DİZİNİ.....	XV
SEMBOLLER DİZİNİ.....	XVI
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Amaç ve Kapsam.....	2
1.3. Yer Radarı Yöntemi.....	3
1.4. Yer Radarı Yönteminin Tarihçesi.....	8
1.5. Yer radarı Yönteminin Avantaj ve Dezavantajları.....	11
1.6. Yer Radarının Yönteminin Kullanıldığı Alanlar.....	12
1.6.1. Jeoteknik ve Jeolojik Araştırmalar.....	12
1.6.2. Maden Araştırmaları, Maden Ocağı Sınırlarının Belirlenmesi.....	14
1.6.3. Kablo ve Boru Güzergâhı Belirleme Çalışmaları.....	14
1.6.4. Otoyol Asfalt ve Dolgularındaki Deformasyonların İzlenmesi.....	15
1.6.5. Arkeolojik Arama Çalışmaları.....	15
1.6.6. Güvenlik ve Kriminal Amaçlı Kullanım.....	15
1.6.7. Fay Kırık ve Çatlaklarının Haritalanmasında.....	16
1.6.8. Diğer Uygulamalar.....	16
1.7. Yer Radarının Dayandığı Temel Elektromanyetik Alan Yayılım Teorisi.....	17
1.7.1. Elektromanyetik Dalga'nın Oluşumu.....	17
1.7.2. Elektromanyetik Dalga Özellikleri.....	19
1.7.3. Elektromanyetik Alanların Dalga Yapısı.....	21
1.7.4. Elektromanyetik Dalga'nın Yayılımı.....	22
1.7.5. Elektromanyetik Dalgaların Yayılımını Etkileyen Fiziksel Özellikleri.....	24
1.7.5.1. Dielektrik Geçirgenlik (ϵ).....	25

1.7.5.2.	Elektrik İletkenlik	26
1.7.5.3.	Bağıl Manyetik Geçirgenlik	31
1.7.6.	Elektromanyetik Empedans	33
1.7.7.	Kutuplanma	34
1.8.	Yer Radarının Temel İlkeleri.....	37
1.8.1.	Maxwell Denklemleri	37
1.8.2.	Katkı Eşitlikleri.....	41
1.8.3.	Zaman Ortamında EM Dalga Denklemleri	41
1.9.	Yer Radarı Sinyallerinin Oluşturulması ve Yayınımı	46
1.10.	Yer Radarı Sinyallerinin Ara Yüzeylerde Yansıması, Kırılması ve İletimi	48
1.11.	Yer Radarı Sinyal Ölçümü	53
1.12.	Sinyal Hızı ve Derinlik Belirlenmesi.....	54
1.13.	Sinyalin Sönümlenmesi	55
1.14.	Nüfuz Derinliği.....	58
1.15.	Yapı Belirlenebilirliği ve Çözünürlük	60
1.16.	Düşey ve Yanal Ayrımlılık.....	60
1.17.	Odaklanma ve Saçılma Etkileri	62
1.18.	Yakın-alan Etkisi	64
1.19.	Radar Anten Frekansının Seçimi.....	64
1.20.	Yer Radarı Veri Toplama Yöntemleri.....	68
1.20.1.	Örnekleme Kriteri.....	68
1.20.2.	Yansıma Profili (Ortak Ofset)	69
1.20.3.	Çoklu Ofset Sistemleri	70
1.20.3.1.	Geniş Açılı Yansıma ve Kırılma Ölçümleri (GAYK).....	71
1.20.3.2.	Ortak Derinlik Noktası (ODN) Ölçümleri.....	71
1.20.4.	Tomografi Ölçümleri.....	72
1.21.	Yer Radarı Verilerine Uygulanan Veri İşlem Adımları	73
1.21.1.	Temel Veri İşlem Adımları.....	75
1.21.1.1.	Düşük Frekanslı İzlerin Giderilmesi (Dewow)	75
1.21.1.2.	Kazanç Fonksiyonları	76
1.21.1.3.	Background Removal	77
1.21.1.4.	Migrasyon (Göç)	78
1.22.	Yer Radarı Yönteminde Modelleme	79

1.22.1.	Zaman Ortamında Sonlu Farklar Yöntemi (FDTD).....	82
1.22.2.	Yee Algoritması.....	83
1.22.3.	Sonlu Farklar Yöntemi	84
1.22.4.	Maxwell Denklemlerinin Sonlu Farklar Yöntemine Göre Yazılması.....	85
1.22.5.	Bir Boyutta Maxwell Denklemleri	86
1.22.6.	İki Boyutta Maxwell Denklemleri	88
1.22.6.1.	TM-Modu Bileşenlerinin Sonlu Farklar ile Hesaplanması	88
1.22.6.2.	TE-Modu Bileşenlerinin Sonlu Farklar ile Hesaplanması.....	90
1.22.7.	Sınır Koşulları	92
1.22.8.	Sayısal Modellemede Courant Kararlılık Ölçütü	92
1.23.	Alt Yapı Elemanlarının Döşenme Şekilleri.....	93
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	99
2.1.	Modelleme Çalışmaları.....	101
2.2.	Arazi Çalışmaları	108
3.	BULGULAR VE TARTIŞMA.....	114
4.	SONUÇ VE ÖNERİLER.....	138
5.	KAYNAKLAR.....	144
6.	EKLER.....	154

ÖZGEÇMİŞ

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

ALT YAPI ELEMANLARININ YER RADARI YÖNTEMİ İLE ARAŞTIRILMASI
(KTÜ KANUNİ YERLEŞKESİ)

Mehtap BEYAZ ÖZDEMİR

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Doç. Dr. Aysel ŞEREN
2015, 153 Sayfa, 3 Sayfa Ek

Bu tez çalışmasında; yerleri ve derinlikleri bilinmeyen alt yapı unsurlarının (metalik ve metalik olmayan borular, telefon/elektrik/fiberoptik kablolar) yer radarı yöntemi ile belirlenmesi kapsamında, Karadeniz Teknik Üniversitesi (KTÜ) Kanuni yerleşke alanı içerisinde seçilen pilot alanlarda çok sayıda ölçümler alınarak, belirtilen alt yapı unsurlarının, KTÜ' nün hali hazır harita üzerine işlenmesi amaçlanmıştır. Buna yönelik olarak; modelleme ve arazi çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Öncelikle gömülü boru ve kabloların model ile test çalışması yapılmıştır. Daha sonra arazi çalışması kapsamında konumları ve büyüklükleri bilinmeyen kablo ve gömülü boruların yerlerini belirlemek için yer radarı ölçümler alınmıştır. Ölçüler, toplam 21 inceleme alanında birbirine paralel hatlarda 250, 500 ve 800 MHz merkez frekanslı korumalı antenler kullanılarak toplanmıştır. Toplanan verilere gerekli veri işlem aşamaları uygulandıktan sonra 2 ve 3 boyutlu görüntüler elde edilmiştir. Bu görüntülerle ve modelleme çalışmalarındaki görüntüler kıyaslanarak, inceleme alanlarında nerelerden hangi alt yapı elemanlarının geçtiği tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yer Radarı, KTÜ Kanuni Yerleşkesi, Alt yapı elemanları

Master Thesis

SUMMARY

INVESTIGATION OF INFRASTRUCTURE ELEMENTS WITH GROUND
PENETRATING RADAR METHOD (KTU KANUNI CAMPUS)

Mehtap BEYAZ ÖZDEMİR

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Geophysics Engineering Graduate Program
Supervisor: Assoc. Doç.Dr. Aysel ŞEREN
2015, 153 Pages, 3 Pages Appendix

The aim of this thesis was to determine the unknown locations and depths of infrastructural elements with a method involving Ground Penetrating Radar (GPR). To this end, pilot areas were selected on the campus of Karadeniz Technical University, measurements were taken, and infrastructural elements were identified and marked on an updated map of the campus. Modelling and field studies were performed, including test studies of the model with buried pipes and cables. GPR data concerning parallel lines were then acquired in a field study intended to determine the unknown positions and sizes of buried pipes and cables at 21 sites with shielded antennas of 250, 500, and 800 MHz. Once basic process steps were taken to the data, 2D and 3D images were obtained. By comparing these images to those depicted in modelling studies, places were determined according to which infrastructural elements emerged in the investigation areas.

Key Words: GPR, KTÜ Kanuni Campus, Infrastructural elements,

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1. a) Yer radarı yönteminin genel çalışma sistemi b) Radargram.....	4
Şekil 1.2. Elektrik ve manyetik alanın gösterimi.....	18
Şekil 1.3. (a) Hız ve (b) sönümlenme değerlerinin frekansa bağlı olarak değişimi.....	20
Şekil 1.4. Elektromanyetik dalga yayılımının gösterimi.....	21
Şekil 1.5. Elektrik ve manyetik alanın gösterimi.....	22
Şekil 1.6. Dalga cepheleri bir kaynaktan dışa doğru seyahat eden dalgalar için eş seyahat süreli ya da fazlı yüzeylerdir. Işınlara (rays) dalga cephelerine diktir ve yörüngeden dışa doğru çizilir.....	23
Şekil 1.7. Elektrik alan uygulandığında serbest elektrik yüklerinin hareketi....	27
Şekil 1.8. Uygulanan elektrik alan doğrultusunda bağlı elektrik yüklerinin yer değiştirme hareketi.....	28
Şekil 1.9. Uygulanan elektrik alan sonucu oluşan elektrik dipol moment dağılımı.....	29
Şekil 1.10. Toplam elektrik akımının frekansla değişimi.....	30
Şekil 1.11. Yayınım doğrultusuna göre a ve b olarak verilen iki farklı elektromanyetik alan oluşabilir.....	35
Şekil 1.12. Toplam gözlenen \vec{E} alanı, \vec{E}_a , ve \vec{E}_b ile gösterilen iki bağımsız alanın vektör toplamıdır. Kutuplanma yönü \vec{E} yönündedir.....	35
Şekil 1.13. Elektrik alanlar zamanla sinüzoidal olarak değiştiğinde, sabit bir yönlü toplam elektrik alan olarak doğrusal kutuplanma kendi kendine oluşmaktadır.....	36
Şekil 1.14. Sinüzoidal dalgalar için alanlar doğrusal (a), dögüsel (b) ve eliptik (c) biçimde kutuplanmalar (URL-5, 2014).....	37
Şekil 1.15. Bir manyetik alan bir elektrik alanı meydana getirir.....	38

Şekil 1.16.	Bir elektrik akımı bir manyetik alan meydana getirir.....	39
Şekil 1.17.	Kapalı bir yüzeydeki elektrik alan akışının, bu yüzey etrafından çevrelenmiş olan hacimde bulunan net yük ile orantılıdır	40
Şekil 1.18.	Kapalı bir yüzeydeki manyetik alan akışının sıfır olduğu ve dolayısıyla manyetik yüklerin var olmadığını belirtir	40
Şekil 1.19	a) TM modu ve b) TE modu için EM alan bileşenleri.....	45
Şekil 1.20.	Derinlikle bağlı dielektrik geçirgenlik katsayıları (a) artan ve (b) azalan yer altı modeli için dalga kırılma etkileri	48
Şekil 1.21.	Ara yüzeye gelen dalganın sınıra çarptıktan sonra enerjinin yansıyan ve iletilen Dalgalara aktarılması.....	49
Şekil 1.22.	(a) TM-modu ve (b) alan bileşenleri (c) TE-modu ve (d) alan bileşenleri	51
Şekil 1.23.	Anten durumlarına göre TE ve TM modları	52
Şekil 1.24.	Sinyalin sönümlenmesi	56
Şekil 1.25.	Elektromanyetik enerjinin yayıldığı ortamın elektrik iletkenliği ile enerjinin nüfuz derinliği ilişkisi	58
Şekil 1.26.	a) Arayüzeyden yansıma. Hedef kesit alanı ilk Fresnel zon alanına eşdeğerdir.b) Fresnel zonu , A ve B sırasıyla Fresnel zonunun çapını, z ise derinliği göstermektedir.....	61
Şekil 1.27.	Bağıl dielektrik geçirgenlik ve derinlik ile Fresnel zonunun yarıçapının değişimi	62
Şekil 1.28.	Farklı anten konumlarında saçılma ve odaklanmayı ortaya koyan gömülü yüzeyin şematik görüntüsü	63
Şekil 1.29.	Yansıma profili (ortak ofset) yönteminin şematik gösterimi.....	70
Şekil 1.30.	Yansıtıcı yüzeyin haritalanması için olması gereken ölçü profilleri dizilimi.....	70
Şekil 1.31.	GAYK yönteminin şematik gösterimi.....	71
Şekil 1.32.	ODN yönteminin şematik gösterimi.....	72

Şekil 1.33.	Karşılıklı kuyular arası radar tomografi ölçümlerinin şematik gösterimi a) sıfır ofset profil ve b) çoklu ofset profil	73
Şekil 1.34.	Ham yer radarı veri örneği.....	74
Şekil 1.35.	Yer radarı veri değerlendirme akış şeması	74
Şekil 1.36.	Dewow işlemi uygulanmış yer radarı kesiti.....	75
Şekil 1.37.	Dewow yapılmış kesite genlik kazancı uygulandıktan sonra elde edilen radargram.....	77
Şekil 1.38.	Genlik kazancı uygulanmış kesite background removal uygulandıktan sonra elde edilen radargram.....	78
Şekil 1.39.	Background removal uygulanmış kesite migrasyon uygulandıktan sonra elde edilen radargram.....	79
Şekil 1.40.	Elektrik ve manyetik alan vektör bileşenlerinin Yee'nin hesaplama ağı üzerindeki konumları	83
Şekil 1.41.	TM-modunda elektrik ve manyetik alanların i,j koordinatlarında gösterimi	89
Şekil 1.42.	TE-modunda elektrik ve manyetik alanların i,j koordinatlarında gösterimi.....	91
Şekil 1.43.	Yerleşim yerlerinde yeraltı kablolarının alt yapı tesislerine uzaklığı	93
Şekil 1.44.	Elektrik kablolarının çeşitli yerleşim şekilleri.....	95
Şekil 1.45.	Telefon/Fiberoptik kablolarının muhafaza kanallarına döşeme dizaynı	96
Şekil 1.46.	Şehir şebeke su kanalı döşeme şekli.....	98
Şekil 2.1.	KTÜ alt yapı elemanlarının geçtiği ana kanal ve tali kanal güzergah şekili.....	101
Şekil 2.2.	a) Model 1a'ya b) Model 1b'ye ait yeraltı geometrisi (üste) yapay radargram (ortada) migrasyon sonra elde edilen radargram (altta).....	105
Şekil 2.3.	Model 2'ye ait yeraltı geometrisi (solda), elde edilen yapay radargram (ortada), migrasyon sonrası elde edilen radargram (sağda)	105

Şekil 2.4.	a) Model 3a'ya b) Model 3b'ye c) Model 3c'ye ait yeraltı geometrisi (üste) yapay radargram (ortada) migrasyon sonra elde edilen radargram (altta).....	106
Şekil 2.5.	Model 4'e ait yeraltı geometrisi (solda), elde edilen yapay radargram (ortada), migrasyon sonrası elde edilen radargram (sağda)	107
Şekil 2.6.	Moddel 5'e ait model yapı (solda), elde edilen yapay radargram ortada, migrasyon sonrası elde edilen radargram (sağda)	107
Şekil 2.7.	Model 6'a ait yeraltı geometrisi (altta), elde edilen yapay radargram (ortada), migrasyon sonrası elde edilen radargram (üstte)	108
Şekil 2.8.	Ölçümler sırasında kullanılan antenler.....	109
Şekil 2.9.	KTÜ Kanuni Yerleşkesinde ölçü yapılan alanların krokisi (A1,A2,.....,A21).....	110
Şekil 2.10.	A21 alanının krokisi.....	111
Şekil 3.1.	A1 alanındaki ölçü profillerinin konumları ve elde edilen radargramlar.....	114
Şekil 3.2.	A2 alanındaki ölçü profillerinin konumları ve elde edilen radargramlar.....	116
Şekil 3.3.	A3 alanındaki ölçü profillerinin konumları ve elde edilen radargramlar.....	117
Şekil 3.4.	A4 alanındaki ölçü profillerinin konumları ve elde edilen radargramlar.....	118
Şekil 3.5.	A5 alanındaki ölçü profillerinin konumları ve elde edilen radargramlar.....	119
Şekil 3.6.	A6 alanındaki ölçü profillerinin konumları ve elde edilen radargramlar.....	120
Şekil 3.7.	A7 alanındaki ölçü profillerinin konumları ve elde edilen radargramlar.....	121
Şekil 3.8.	A8 alanındaki ölçü profillerinin konumları ve elde edilen radargramlar.....	122

Şekil 3.9.	A9 alanındaki ölçü profillerinin konumları ve elde edilen radargramlar.....	123
Şekil 3.10.	A10 alanındaki ölçü profillerinin konumları ve elde edilen radargramlar.....	124
Şekil 3.11.	A11 alanındaki ölçü profillerinin konumları ve elde edilen radargramlar.....	125
Şekil 3.12.	A12 alanındaki ölçü profillerinin konumları ve elde edilen radargramlar.....	126
Şekil 3.13.	A13 alanındaki ölçü profillerinin konumları ve elde edilen radargramlar.....	127
Şekil 3.14.	A14 alanındaki ölçü profillerinin konumları ve elde edilen radargramlar.....	128
Şekil 3.15.	A15 alanındaki ölçü profillerinin konumları ve elde edilen radargramlar.....	129
Şekil 3.16.	A16 alanındaki ölçü profillerinin konumları ve elde edilen radargramlar.....	130
Şekil 3.17.	A17 alanındaki ölçü profillerinin konumları ve elde edilen radargramlar.....	131
Şekil 3.18.	A18 alanındaki ölçü profillerinin konumları ve elde edilen radargramlar.....	132
Şekil 3.19.	A19 alanındaki ölçü profillerinin konumları ve elde edilen radargramlar.....	133
Şekil 3.20.	A20 alanındaki ölçü profillerinin konumları ve elde edilen radargramlar.....	134
Şekil 3.21.	A21 alanının kuzey kısmındaki ölçü profillerinin konumları ve elde edilen radargramlar.....	135
Şekil 3.22.	A21 alanının güney kısmındaki ölçü profilinin konumu ve elde edilen radargramlar.....	136
Şekil 3.23.	A21 alanının güney kısmında Jeofizik Mühendisliği amfisi önündeki ölçü profilinin konumu ve elde edilen radargramlar.....	137

TABLULAR DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1.1. Frekansa göre penetrasyon derinliği.....	6
Tablo 1.2. Çeşitli ortamlar ve birimler için dielektrik sabit, iletkenlik, hız ve soğrulma değerleri n/a bu malzemeler için bir değer olmadığını ifade etmektedir.....	7
Tablo 1.3. GPR uygulanarak gerçekleştirilen çeşitli çalışmalar.....	10
Tablo 1.4. Anakaya ($v = 0.11$ m/ns) ve toprak ($v = 0,075$ m/ns) için üç farklı frekans değerinde hesaplanan düşey ayrımlılık değerleri.....	61
Tablo 1.5. Farklı bağıl dielektrik geçirgenlik değerlerine sahip ortamlarda seçilen anten frekanslarına göre radar dalga boylarının değişimi.....	65
Tablo 1.6. Zemin çeşitlerine göre kazı üst derinlik değerleri	96
Tablo 2.1. Modern yaşam alanlarında kullanılan alt yapı elemanları	99
Tablo 2.2. Modelleme çalışmasında kullanılan alt yapı elemanlarının dielektrik özellikleri	102
Tablo 2.3. Yapılan modelleme çalışmalarının model parametreleri.....	104

SEMBOLLER DİZİNİ

A	Fresnel bölgesinin uzun ekseninin yarıçapı
A	Akımın geçtiği telin kuşattığı kapalı döngü alanı
B	Manyetik akı yoğunluğu
c	Işık hızı
\vec{D}	Elektrik yer değiştirme
D	Derinlik
E	Elektrik alan şiddeti
E_a	Elektrik alan bileşenlerinin genliği
E_b	Elektrik alan bileşenlerinin genliği
f_t	Geçiş frekansı
H	Manyetik alan şiddeti
I	Dalganın genliği
I	Elektrik akımı
i_c	Kırılma açısı
J	Akım yoğunluğu
J_D	Yer değiştirme akımı
J_C	İletim akımları
K_m	Bağıl manyetik geçirgenlik
k	Manyetik duyarlılık
K'	Ortalama bağıl dielektrik katsayısı
K	Yeraltındaki EM dalganın yayılım faktörü
\vec{m}	İndüklenen manyetik moment miktarı
\vec{M}	Manyetik dipol momentini
\hat{n}	Normal vektörü
ODN	Ortak derinlik noktası
R	Yansıma katsayıları
RI	Yansıyan dalga
T	İletim katsayıları
TI	İletilen dalga

TE	Enine elektrik alan
TM	Enine manyetik alan
t_0	Ofsetdeki tek yönlü seyahat süresi
$\tan\delta$	Kayıp tanjantı
V	Hız
ω	Açısal frekans
w_t	Geçiş frekansı
WARR	Geniş açılı yansıma ve kırılma
x	Hız çalışmasındaki antenler arasındaki mesafe
Z	Elektromanyetik empedans
Z_0	Boşluğun empedansı
q	Yük yoğunluğu
ε	Dielektrik geçirgenlik
ε_r	Bağıl dielektrik geçirgenlik katsayısı
σ	Elektrik iletkenlik
μ	Manyetik geçirgenlik
μ_0	Boşluğun manyetik geçirgenliği
μ_r	Maddenin bağıl manyetik geçirgenliği
θ	Mineralin hacimsel miktarı
\varnothing_a	Faz açısı
\varnothing_b	Faz açısı
ε_0	Boşluğun dielektrik sabiti
α	Sönümlenme
λ	Dalga boyu
ε_{r1}	Birinci tabakadaki dielektrik permittivite
ε_{r2}	İkinci tabakadaki dielektrik permittivite

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Yer radarı (Ground Penetrating Radar, Ground Probing Radar, Subsurface Radar, Georadar, GPR) yöntemi, jeofizikte yüzeye yakın araştırmalar için kullanılan yüksek frekanslı bir elektromanyetik (EM) yöntemdir. Bir yer radarı sistemi; verici anten, alıcı anten, kontrol birimi ve kayıtcıdan oluşmaktadır. Verici anten, araştırma alanına gönderilmek üzere istenilen merkez frekanslı EM dalga üretir. Araştırma alanı içerisinde ilerleyen bu EM dalgalar herhangi bir cisim veya süreksizlik ile karşılaştıklarında, yansıma ve/veya saçılmaya uğrarlar. Aynı veya farklı zamanlarda yüzeye geri dönen yansımış/saçılmış dalgalar yüzeydeki alıcı anten, kontrol birimi ve kayıtcı yardımı ile nanosaniye (ns) cinsinden zamanın fonksiyonu olarak kayıt edilirler. Veri toplama işlemi, bir profil üzerinde veya amaca göre belirli aralıklarla paralel olarak seçilen profiller üzerinde belirli ölçüm aralıkları ile gerçekleştirilir. Bu yöntemle toplanan verilere gerekli veri işlem adımları uygulandıktan sonra incelenen ortam, 2 ve 3 boyutlu olarak görüntülenebilmektedir (Annan, 2001). Araştırılan yüzeyin sığ derinliklerini yüksek çözünürlükte görüntüleyebilen bu yöntem çok çeşitli problemlerin çözümünde kullanılmaktadır (Davis ve Annan, 1989; Harrari, 1996; Powers ve Olhoeft, 1996; Zeng ve McMechan, 1997; Dannowski ve Yaramancı, 1999; Aspiron ve Aigner, 1999, Grandjean ve Gaury, 1999; Changryol vd., 2000; Hammon III vd., 2000; Green vd., 2003; Cardelli vd., 2003; Kadioğlu vd., 2006; Kadioğlu ve Daniels, 2008; Kadioğlu, 2008; Şeren vd. 2008; Öğretmen ve Şeren 2014). Jeoteknik ve jeolojik araştırmalar, maden araştırmaları, otoyol asfalt ve dolgularındaki deformasyonların izlenmesi, arkeolojik arama çalışmaları, güvenlik ve kriminal amaçlı kullanım, fay/kırık ve çatlaklarının haritalanmasında, kablo ve boru güzergâhı belirleme gibi çalışmalar bunlardan bazılarıdır.

Modern kent ve büyük ölçekli çeşitli yerleşim alanlarının alt yapılarında; metalik ve metalik olmayan borular, telefon/elektrik/fiber optik kablolar gibi farklı elemanlar yer almaktadır. Yeri ve derinliği bilinmeyen bu elemanların yüzeyden herhangi bir delgi veya sondaj yapmaksızın belirlenmesinde, son yıllarda kullanım alanı gittikçe artan yüksek çözünürlükte görüntü üretebilen GPR yöntemi etkin bir şekilde kullanılmaktadır. Günümüzde, alt yapı çalışmalarında yapı elemanlarının belirlenmesindeki temel amaç;

yeraltından geçen su, kanalizasyon, elektrik, internet, telefon vb. hatların yerlerini ve derinliklerini belirleyip, yapılacak olan kazı çalışmalarında mevcut kablo ve borulara zarar verilmesini önlemektir. Bu durum ekonomik olarak da büyük önem taşımaktadır. Yukarıda belirtilen altyapı elemanlarından yeraltında gömülü olan demir ve plastik boruların araştırılması konusunda literatürde farklı amaçlarla yapılmış birçok çalışma bulunmaktadır. Hunaidi ve Giamou 1998 yılında yapmış oldukları çalışmada gömülü su borularındaki sızıntıları belirlemek için 100 MHz merkez frekanslı anten kullanarak bir yer radarı çalışması yürütmüşlerdir. Hong Kong'da yer altında gömülü boru ve kabloların GPR yöntem ile belirlenmesine yönelik olarak yapılacak gridleme işleminin nasıl yapıldığı ve elde edilecek verilerin doğruluğu için seçilecek anten kullanımının önemi üzerine bir çalışma gerçekleştirilmiştir (Cheng vd, 2013). Seyfried vd. (2014), geliştirilmiş GPR ile boru belirlemek için asfalt yapıların varlığını özel bir anten tipi kullanarak araştırmışlardır. Bu amaçla farklı tipteki boru ve kabloların olduğu bir test sahası oluşturulmuş ve onun üzerinde ölçüm almış ve değerlendirilmişlerdir. Bahsedilen bu çalışmalar mevcut literatür çalışmalarından bazılarıdır.

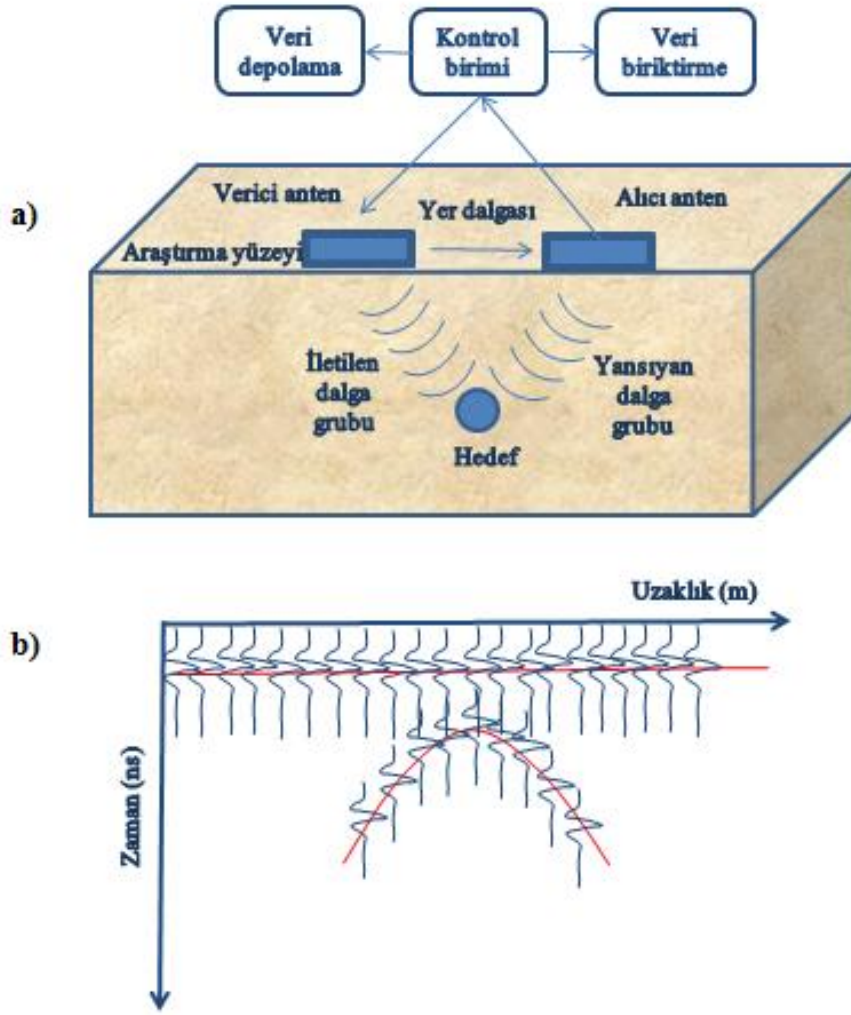
1.2. Amaç ve Kapsam

Bu tez çalışmasında alt yapı elemanlarının (metalik ve metalik olmayan borular, telefon/elektrik/ fiber optik kablolar) GPR yöntemi ile belirlenmesi kapsamında, Karadeniz Teknik Üniversitesi (KTÜ) Kanuni yerleşke alanı içerisinde seçilen pilot alanlarda çok sayıda ölçümler alınarak, belirtilen alt yapı elemanlarının, KTÜ' nün hali hazır harita üzerine işlenmesi amaçlanmıştır.

Bu amaca yönelik olarak, yeraltında bulunan metalik ve metalik olmayan borular, telefon/ elektrik/fiber optik kablolar gibi farklı alt yapı elemanları 250, 500 ve 800 MHz merkez frekanslı anten kullanılarak GPR yöntemi ile belirlenmesi hedeflenmiştir. Bunun için modelleme ve arazi çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Öncelikle gömülü boru ve kabloların model ile test çalışması gerçekleştirilmiştir. İkinci aşamada ise, arazi çalışması kapsamında konumları ve büyüklükleri bilinmeyen kablo ve gömülü boruların radargramlar ve GPR dilim haritaları üzerinde konumlarının, büyüklüklerinin belirlenebilirliği araştırılmıştır. Sonuçta oluşturulan 2 ve 3 boyutlu görüntülerden aranılan elemanların yeri, derinliği ve uzanımları tespit edilmiştir.

1.3. Yer Radarı Yöntemi

Yer radarı yöntemi, kaynak olarak yüksek frekanslı EM dalgaları (radyo dalgaları) kullanarak, araştırılan yüzeyin sığ derinliklerini yüksek çözünürlükte görüntüleyebilen, jeofiziğin veri kazanımı hızlı ve kolay uygulanabilir yöntemlerinden biridir. Bu yöntemin çalışması, kavram olarak sismik yansıma çalışması ile benzerdir. Sismik yansıma çalışmasında kullanılan kaynak yerine yer radarı yönteminde verici anten, jeofonlar yerine ise alıcı anten kullanılmaktadır. Genel olarak bu iki yöntem yayılan enerjinin türü bakımından birbirinden ayrılır. Yer radarı yönteminde bir kaynak tarafından araştırılan ortama gönderilen ve zaman içinde değişen yüksek frekanslı elektromanyetik alanlar kullanılarak incelemeler yapılmaktadır. Değişken zamanlı elektromanyetik alanlar, elektrik ve manyetik alanların bileşeninden oluşmaktadır. Bu iki alan, yeraltında bulunan malzemelerin etkisi altında değişmekte ve yer altındaki yapıların elektriksel özelliklerinin değişiminin gözlenmesine izin vermektedir (Daniels, 1996; Annan, 2004). Yöntemde bir verici birde alıcı olmak üzere iki anten kullanılmaktadır. Verici antenle araştırılan ortama gönderilen yüksek frekanslı elektromanyetik dalgaların bir kısmı, araştırılan ortamda farklı dielektrik özelliklere (ϵ ; permitivite, σ ; iletkenlik, μ ; manyetik geçirgenlik) sahip yüzeylerden yansırken, diğer kısmı da daha derin ortamlara ilerleyebilmektedir (Davis ve Annan, 1989). Alıcı anten ise yansiyarak ve saçılarak şekil değiştiren sinyalleri kontrol biriminde biriktirip, çift yol seyahat zamanını (two way travel time) nanosaniye cinsinden varış zamanının fonksiyonu olarak kayıt eder (Şekil 1.1). Böylece, radar dalgalarının gidiş-geliş zamanlarından yararlanılarak, elektrik özelliklerin değiştiği yerin derinliği ve geometrisi belirlenir (Milsom, 2003). Varış zamanının fonksiyonu olarak kaydedilen sinyallere “radar izi” veya yer radarında “EM dalga alanı” adı verilir. Her ölçüm noktasındaki izler yan yana getirilerek “radargram” adı verilen iki boyutlu (2B) radar kesitler elde edilir (Şekil 1.1b) (Annan, 2001; Daniels, 1989). Araştırılan ortama gönderilen EM dalga, harmonik yapıda olup bir merkez frekans içermektedir. Bu frekansın değeri, nüfuz derinliğini, soğrulma miktarını ve saçılma derecesini belirler (Annan, 2001). Kaynak dalgası için belirlenen merkez frekans, bu değer %50 altı ve %50 üstünü kapsayan bir frekans aralığında kullanılabilir (Milsom, 2003). Yöntemde kullanılan verici antenin merkez frekansı oldukça geniş bir aralığa sahip olup, 10 MHz ile birkaç GHz arasında değişmektedir.



Şekil 1.1. a) Yer radarı yönteminin genel çalışma sistemi b) Radargram

Yer Radarı araştırmalarında en önemli iki faktör olan zemin iletkenliği ve dielektrik sabit, yüzeysel özelliklerin bulunmasını etkilemektedir (Ulriksen,1982). Bu iki parametre sudan önemli bir şekilde etkilenmektedir, bundan dolayı su GPR'ın çalışma performansı üzerinde büyük etkiye sahiptir (Griffin ve Pippet, 2002). Araştırılan ortamın kuru olması istenir. Ayrıca zemin dokusu, zemin yoğunluğu, zemin hacimsel su içeriği ve zemin tuz miktarı içindeki değişiklikler de GPR sinyallerini etkilemektedir (Bristow ve Jol, 2003).

Daha öncede belirtildiği gibi yüksek iletkenlik, radar çalışmalarını sınırlayan en önemli faktörlerden biridir. Genellikle çalışılan ortamın düşük iletkenlikli ortam olması istenir. Bu tip bir ortamın matematiksel ifadesi $\sigma/\omega\epsilon \ll 1$ olarak verilir. Yüksek iletkenli zemin (Islak kil, şeyl vb.) düşük iletkenli zeminden (kuru kum, granit, mermer) daha fazla enerji soğurur. GPR sinyalleri iletkenliği düşük ortamlarda yaklaşık 50-60 m derinliklere kadar ulaşabilirken, yüksek iletkenlikli ortamlarda GPR sinyalleri soğurmakta ve nüfuz

derinliği 1 m ya da daha az olarak sınırlandırmaktadır. Ayrıca nüfuz derinliği, kullanılan antenin frekansına da bağlıdır. 25-200 MHz'lik düşük frekanslı antenler yeraltında daha derinden yansımalar alırken elde edilen radargramların çözünürlüğü düşük olmaktadır. Yüksek frekanslı antenlerde çözünürlük artarken araştırma derinliği azalmaktadır (Davis ve Annan, 1989; Annan, 2004). Bu nedenle yöntemde kullanılan merkez frekansa bağlı olarak yer altındaki yapıların derinlikleri ve geometrileri de santimetre düzeyinde hassas bir şekilde belirlenebilir. Bu avantajı yer radarı yöntemini son yıllarda sığ çalışmalarda en çok tercih edilen yöntemlerden birisi yapmıştır. Aynı zamanda araştırılan yüzeye zarar vermeden ve hızlı bir şekilde ölçüm yapılabilmesi de yöntemi çekici kılmıştır (Tablo 1.1).

GPR sinyallerini etkileyen diğer bir elemanda ortamın dielektrik sabiti olup, elektromanyetik dalganın yayılma hızını belirlemektedir. Yayılma hızı ile dielektrik sabit arasında ters orantı vardır. Yeraltına gönderilen elektromanyetik dalgaların hızı, ani bir dielektrik sabit düşmesi sonucunda artmaktadır. Bu ortam değişikliği bir yansıma yüzeyi oluşturduğundan ilerleyen dalganın bir kısmı geri dönmekte ve alıcı antene ulaşmaktadır. Dielektrik sabitin arttığı ortamlarda (Kil gibi su içeriğinin yüksek olduğu ortamlar), dalga hızı azalmakta ve enerji kaybına uğramaktadır. Bu nedenle dielektrik sabitin arttığı ortamlarda GPR ile çalışmak oldukça zordur (Weeds, 1994). Tablo 1.2' de bazı malzemelere ait dielektrik sabit, iletkenlik, yayılma hızı ve soğrulma değerleri verilmiştir.

Tablo1.1. Frekansa göre penetrasyon derinliği (URL-1, 2014).

Frekans	özünürlük	Toprak (m)	Kaya ortamı (m)
25	1.000	35-40 arası	50-60 arası
50	0.500	20-25 arası	30-40 arası
75	0.375	12-20 arası	25-30 arası
100	0.250	10-12 arası	20-25 arası
150	0.200	6-10 arası	15-20 arası
250	0.100	4-6 arası	12-15 arası
500	0.050	3.5-4 arası	5-7 arası
750	0.040	1.5-3 arası	3-4 arası
800	0.030	1-2 arası	3
1200	0.020	1	2

* Düşük rezistiviteli materyallerin olmadığı normal jeolojik çevresel koşullarda

Tablo 1.2. Çeşitli ortamlar ve birimler için dielektrik sabit, iletkenlik, hız ve soğrulma değerleri n/a bu malzemeler için bir değer olmadığını ifade etmektedir. (Wilchek, 2000; Conyers ve Goodman, 1997; Leckebush, 2003'den düzenlenmiştir).

Malzeme	Bağıl dielektrik sabit $\epsilon_r (\epsilon/\epsilon_0)$	Yayılm hızı V (m/nsn)	İletkenlik σ (mS/m)	Soğrulma, Soğrulma sabiti α	Malzeme	Bağıl dielektrik sabit $\epsilon_r (\epsilon/\epsilon_0)$	Yayılm hızı V (m/nsn)	İletkenlik σ (mS/m)	Soğrulma, Soğrulma sabiti α
Arjilit	n/a	n/a	1-100	n/a	Kireçtaşı	4-8	0.12	0.5-2	0.4-1.0
Asfalt	5	n/a	n/a	n/a	Kömür	4,5	n/a	n/a	n/a
Bazalt	12	0.09	$8*10^{-6}$ -0.025	$4*10^{-6}$ -0.01	Kum (kuru)	5	0.13	0.01	0.01
Beton	5,5	n/a	n/a	n/a	Kumlu toprak (ıslak)	25	0,06	69	23
Buz	4	0.16	0.01	0.01	Kumlu toprak (kuru)	2,6	0,19	1,4	1
Dasit	6.8-8,2	0.12	0.05	0.03	Kumtaşı	4.7-12	0.09-0.14	$1*10^{-5}$ -0.7	$5*10^{-8}$ -0.6
Diorit	6	0.12	0.0002-0.002	0.0001-0.001	Kuru granit	5	n/a	n/a	n/a
Diyabaz	10.5-34.5	0.05-0.09	$2*10^{-5}$ -50	$1*10^{-2}$ -26	Kuru kil	4	n/a	n/a	n/a
Donmuş kum ve çakıl	5,5	n/a	n/a	n/a	Kuru kireçtaşı	5,5	n/a	n/a	n/a
Donmuş kum ve granit	5,5	n/a	n/a	n/a	Kuru kum	4-6	n/a	n/a	n/a
Donmuş toprak	6	n/a	n/a	n/a	Kuru kumlu toprak	6	n/a	n/a	n/a
Doygun kum	25	n/a	n/a	n/a	Kuru toprak	2,5	n/a	n/a	n/a
Gabro	8.5-40	0.05-0.10	0.001-1	$3*10^{-4}$ -0.6	Kuvars	4.2-5	0.13-0.15	$3*10^{-4}$ - $5*10^{-12}$	$2*10^{-8}$ - $4*10^{-12}$
Gnays	8.5	0.10	0.0003-0.02	n/a	Kuvarsit	n/a	n/a	$5*10^{-6}$ -100	n/a
Gösel Çökel	50	0.04	n/a	n/a	Norit	61	0.04	0.02-1	0.004-0.2
Granit	4.6	0.13	0.01-1	0.01-1	Obsidiyen	5.8-10.4	0.11	n/a	n/a
Granit (kuru)	5	0.13	0.01	0.01	Organik toprak	64	n/a	n/a	n/a
Hava	1	0.3	0	0	Peridotit	8.6	0.10	0.15-0.33	n/a
Islak bazalt	8,5	n/a	n/a	n/a	Silt	5-30	0.07	1-100	1-100
Islak granit	6,5	n/a	n/a	n/a	Su (taze)	80	0.033	0.5	0.1
Islak kil	27	n/a	n/a	n/a	Su (tuzlu)	80	0.01	3000	1000
Islak kireçtaşı	8	n/a	n/a	n/a	Sualtında bul. kültürel tab.	70	0,04	-	-
Islak kum	15-25	n/a	n/a	n/a	Şeyl	5-15	0.09	1-100	1-100
Islak kumlu toprak	23,5	n/a	n/a	n/a	Tatlı su	80	0,033	0,5	0,1
Islak toprak	6	n/a	n/a	n/a	Toprak (doygun)	20-30	0.06	0.1-1.0	0.03-0.3
Kalsit	7.8-8.5	0.11	$5*10^{-10}$	$3*10^{-10}$	Toprak (kuru)	3-5	0.15	0.01	0.01
Kar	1,5	n/a	n/a	n/a	Turba	61,5	n/a	n/a	n/a
Kil	5-40	0.06	2-1000	1-300	Tuz (kuru)	5-6	0.13	0.01-1	0.01-1
Kil (ıslak)	10	0.095	500	300	Tuzlu su	81-88	0,033	3000	600
Killi toprak (ıslak)	19	0.07	500	200	Volkanik kül	13	n/a	n/a	n/a
Killi toprak (kuru)	2,5	0,19	2,7	3					

1.4. Yer Radarı Yönteminin Tarihçesi

Yer radarı, yeraltının sığ tabakalarının (ilk 0-40 metre) araştırılmasında kullanılan yöntemdir. Son otuz yıl içerisinde elektronik endüstrisinde yaşanan olağanüstü gelişmeler, bir zamanlar zahmetli ve pahalı bir iş olan ışık hızı ölçümlerini son derece ucuz, kolay ve duyarlı bir şekilde dönüştürmüştür. 1970'li yıllarda milisaniye (10^{-3} s) duyarlılıkla yapılan zaman ölçümleri, 1980'li yıllarda mikro saniye (10^{-6} s), 1990'lı yıllarda ise nanosaniyeye (10^{-9} s) duyarlılığa kadar inmiştir. Elektronikteki bu gelişmelere paralel olarak, yeraltında ışık hızına yakın bir süratle hareket eden elektromanyetik dalgaların yolculuk sürelerinin nanosaniye mertebesinde ölçülebilmesi, sığ jeofizik görüntüleme yöntemlerine önemli katkılarda bulunmuştur.

1865 yılında İskoç fizikçi James Clerk Maxwell elektromanyetik dalgaları ve bunların yayılmasını açıklayan elektromanyetik ışık kuramını ortaya attı. Bundan 21 yıl sonra 1886'da Alman fizikçi Heinrich Rudolf Hertz elektromanyetik dalgaları keşfederek Maxwell'in kuramını kanıtlamıştır. EM dalgaların ilk kullanılmaya başlaması ise; metal nesnelerin yerinin belirlenmesi amacıyla 1904'de Alman yüksek frekans teknisyeni Christian Hülsmeyer tarafından gerçekleştirilmiştir. Yine aynı yıl içerisinde Hülsmeyer su üzerindeki trafiği denetlemek için telemobiloskopu icat etti ve bu ilk pratik radar denemesi için patent başvurusunda bulundu. Bu alet, metal bir nesneden çarparak dönen elektromanyetik dalgaların süresini ölçüyor ve böylece menzil hesaplanabiliyordu. Hülsmeyer, EM dalgalar ile gemilerin yerini belirlemede kullanılabilen bu icadını, Ren nehrinde bulunan buharlı bir geminin yerinin tespiti için denemiştir. Denemeler sonunda geminin resmi ortaya çıkmıştır, böylece geliştirdiği cihazın kullanılabilirliğini kanıtlamıştır. Ancak, bu kullanım için yapılan ilk tanımlama, bundan altı yıl sonra 1910 yılında Leimbach ve Löwy tarafından yapılmıştır. Bu araştırmalarda kullanılan sistemler, sürekli dalga (continuous wave, CW) iletimini uygulamaktadır. Bir yıl sonra 1911 de Löwy, kendisinin geliştirdiği bir teknikle, yeraltı ara yüzeylerinin derinliğinin saptanabileceğini göstermiştir. Daha sonra ilerleyen yıllara bakıldığında; 1921'de Albert Wallace Hull tarafından güçlü gönderici tüp magnetron icat edildi. 1922'de ABD Donanma Araştırma Laboratuvarından A. H. Taylor ve L.C.Young ilk kez bir tahtadan gemiyi algılamayı başardılar. 1925 yılında, Merle A. Tuve, Amerika'da darbeler halinde EM dalga oluşturunca, bugünkü anlamda radara geçiş sağlandı. Hülsenbeck 1926 yılında gömülü nesnelerin araştırılmasında, ilk olarak darbeleri radarı (pulsed radar) kullandı. 1930

yılında yine ABD Donanma Laboratuvarından L. A. Hyland bir uçağı algıladı. Stern (1930) ise jeolojik materyallerin haritalanmasında, yöntemi uygulayan ilk kişi olmuştur. 1931'de bir gemiye radar takıldı, alıcı ve verici anteni olarak boynuz ışın yayıcı bulunan parabolik anten kullanıldı. 1936 yılında Metcalf ve Hahn tarafından yükselteç veya osilatör olarak kullanılan klistron bulundu.

1939 yılında başlayan İkinci Dünya Savaşı esnasında Alman, Fransız, İngiliz ve Amerikan fizikçilerin radar konusu ile ilgili çalışmaları artmıştır. 1939 yılında İngiltere Birmingham Üniversitesinden John Randall ve Henry Boot adlı iki fizikçi hafif fakat güçlü mikrodalga radarını geliştirdiler ve bu radar B-17 bombardıman uçaklarına takıldı. Geliştirilen bu radarın Almanların savaşı kaybetmelerinde büyük rolü olup, denizaltı savaşlarında bir dönüm noktası olmuştur. 1940 yılında ABD, Rusya, Almanya ve Japonya'da muhtelif radar tesisleri geliştirildi. Yine 1940 yılında 180 km mesafedeki hedefi hassas bir şekilde tespit edebilecek radarlar yapılmıştır. Ayrıca bu dönemde kutuplardaki buz tabakası kalınlığını belirlemede ve gezegen araştırmalarında kullanılmıştır (Davis ve Annan, 1989). İkinci Dünya Savaşı sırasında silah sistemlerinin gelişmesi radar teknolojisinde olağanüstü gelişmelere yol açtı ve özellikle buna bağlı olarak hava savunma sistemleri kurulmaya başlandı. Savaş sonrasında NATO ve Varşova Paktı üyesi ülkelerin ortak sınırlarında birçok radar sistemi yerleştirildi. İkinci Dünya Savaşından sonra radar yöntemi “barışçıl kullanım” olarak adlandırılan bir yönde kullanılmaya başlandı. Sonraki izleyen otuz yıl içerisinde, yöntemin uygulama alanlarının tam olarak ortaya konamaması nedeniyle çok az bir çalışma gerçekleştirilmiştir.

1970'lerde, uygulama alanlarının artması ile yöntemin kullanımı çarpıcı bir şekilde artmıştır. Lerner 1974 'de ilk ticari, analog yer radarı sistemini geliştirdi. Ancak, ilk ticari sistemlerin kullanımı, gerek performanslarının düşüklüğü gerek lojistik problemlere neden olan büyüklük ve ağırlıkları ve de sayısal veri işlemedeki yetersizlikleri nedeni ile sınırlı olmuştur.

Yer radarının popülerliği 1980'li yılların ortalarına gelindiğinde, ilk dijital yer radarı sisteminin (Sensors & Software) ortaya çıkması ile artmıştır. 1989'lı yıllara gelindiğinde uygulama alanlarının Annan ve Davis tarafından genişletilmesi ile yöntemin zayıf noktaları ve güçlü yanları anlaşılmıştır (Annan, 2001). Bu sistemin en belirgin özellikleri; yüksek performansının yanında, penetrasyon derinliği, veri işlemeye uygun sayısal veri üretebilmesi ve hareket kabiliyetidir (Moorman, 2001). Yöntem son yıllarda; boşluk araştırmaları (Zhou ve Sato, 2004), arkeolojik uygulamalar (Conyers ve Cameron,

1998; Neubauer vd., 2002; Vafidis vd., 2005; Negri ve Leucci, 2006), sedimantoloji (Neal, 2004), zeminin su içeriğinin belirlenmesi (Huisman, vd., 2003, Turesson, 2006), jeomorfolojik araştırmalar (Sass ve Wollny, 2001), buzul araştırmaları (Degenhardt ve Giardino, 2003), çevre problemleri (Porsani, 2004) ve alt yapı çalışmaları (Hunaidi ve Giamou, 1998; Cheng vd., 2013; Seyfried vd.,2014) gibi jeofiziğın sığ araştırmalarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Tablo 1.3.).

Alet ve yazılım teknolojisindeki hızlı gelişimi takip eden son yıllarda yer radarı yöntemini uygulayanlar; veri toplama, veri işleme ve veri analizinde çok daha başarılı sonuçlar ortaya koymuşlardır. Ayrıca yer radarı verileri gelişen bu teknoloji sayesinde 3 boyutlu olarak da görüntülenebilmektedir.

Tablo 1.3. GPR uygulanarak gerçekleştirilen çeşitli çalışmalar (Annan, 2004 ve Moorman 2001'den derlenmiştir).

Amaç	Çalışmacılar
Buz kalınlığının ölçülmesi	Steenson (1951)
	Evans (1963)
	Bryan (1974)
	Annan ve Davis (1976)
	Behrendt vd. (1979)
	Bentley vd. (1979)
Yeraltı madenlerindeki ana kaya yapılarının haritalanması, maden ve kömür aramaları	Cook (1973, 1975, 1977)
	Dellwig ve Bare (1978)
	Coon vd. (1981)
	Annan vd. (1988)
Yeraltındaki tuz çökellerinin belirlenmesi	Holser vd. (1972)
	Thierbach (1973)
	Unterberger (1978)
Gömülü boruların ve kamu hizmetinde kullanılan yapıların yerinin tespiti	Morey (1974, 1976)
	Caldecott vd. (1988)
	Osumi ve Ueno (1988)
Sığ suların derinliğinin araştırılması	Austin ve Austin (1974)
	Ulriksen (1982)
Arkeolojik uygulamalar	Dolphin vd. (1978)

1.5. Yer Radarı Yönteminin Avantaj ve Dezavantajları

Yer radarı yönteminin günümüzde çeşitli problemlere karşı tercih edilen bir yöntem haline gelmesinde etkili olan birçok özelliği vardır. Jeofizik mühendisliğinde araştırma yapılan alanın sığ derinliklerinden bilgi almak için kullanılan yer radarı yönteminin, diğer yöntemlere göre avantajlı ve dezavantajlı olduğu durumlar vardır. Bunlar;

Yer radarı yönteminin avantajları;

- ✓ Yüksek frekanslı kaynak kullanılması ve yığma yapılabilmesi sebebi ile elde edilen çözünürlük yüksektir.
- ✓ Uygulamadaki frekans aralığının geniş olması, farklı frekansa sahip antenlerle aynı profilde çalışma imkanı verdiğinden daha sağlıklı yorum yapılabilir.
- ✓ Elde edilen verilerdeki insan kaynaklı gürültüler genelde veri işlem yöntemleri ile veriden atılabilir.
- ✓ Diğer yöntemlerin aksine araştırma sahasına hasar vermeden uygulama imkanı vermektedir. Bu özelliği ile arkeometri çalışmalarında özellikle tercih edilen bir yöntem haline gelmiştir.
- ✓ Hedef yapı veya objenin yeri ve derinliği hassas bir şekilde belirlenebilmektedir.
- ✓ Arazide uygulanma bakımından kullanılan aygıtta ve çalışma ortamına bağlı olarak genelde kolaydır.
- ✓ Yer radarı yönteminde diğer elektromanyetik yöntemlerden farklı olarak araştırılan alanın tek bir fiziksel özelliğine bağlı olmayıp, araştırılan alanın dielektrik geçirgenlik (ϵ),bağlı manyetik geçirgenlik (μ) ve elektrik iletkenlik (σ) gibi fiziksel özelliklerindeki değişime duyarlıdır.
- ✓ Duyarlı olduğu fiziksel parametreler nedeniyle (ϵ , μ , σ) kullanıldığı alan oldukça geniştir. Örneğin; Arkeolojik araştırmalarda, yeraltının haritalanmasında, köprü, tünel, yol araştırmalarında çevresel uygulamalar bunlardan bazılarıdır.

Yer radarı yönteminin dezavantajları;

- ✓ Çalışma alanındaki jeolojik elemanların etkisi sinyallerin yeraltına nüfuz etmesini engelleyebilir.
- ✓ Çevredeki radyo vericileri, önemli bir gürültü kaynağıdır ve ölçülen sinyaller kayıt aygıtının dışına taşabilirler.

- ✓ Kayıtlara çevredeki yapılardan gelen yansımalar karışabilir. Yansımalar sismik yöntemde olduğu gibi yanlardan gelebilir ve yansıtıcı metalik nesne ise çok keskin olabilir.
- ✓ Eğer yer iletkenliği çok yüksek ise yer-hava ara yüzeylerinde enerji yayılımında keskin yansıma sinyali yaratabilir ve iletken birimler üzerinde bilgi alınması zor olmaktadır.

1.6. Yer Radarının Yönteminin Kullanıldığı Alanlar

Yer radarı ilk uygulaması 1929 yılında Avusturya'da buz kalınlığının ölçülmesi amacıyla gerçekleştirilmiş (Stern, 1930) ve sonraki yıllarda çok çeşitli sığ araştırmalarda geniş kullanım alanları kazanmıştır. Veri kazanımı hızlı ve kolay uygulanabilir yöntem olması, ekonomik ve kesin olarak sonuç vermesi nedeniyle mühendislik çalışmalarında oldukça yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Başlıca uygulama alanlarına aşağıda kısaca değinilmektedir.

1.6.1. Jeoteknik ve Jeolojik Araştırmalar

Jeoteknik araştırmalar genelde yüzeyden itibaren 1 – 20 metre derinliklere kadar olan bölüm ile ilgilenmekte, nadiren büyük yapılar için bu derinlik 20 – 60 metreye kadar ulaşmaktadır. Yer radarı ile jeoteknik araştırmalar da bazı alt başlıklarda değerlendirilmektedir (Daniels, 2004).

a) Yüzeydeki Gevşek Zonun Tespiti

Zeminin en üst tabakası olarak adlandırılan ve her türlü yapılaşma için mutlaka alttaki sert zemin bulununcaya kadar kazılması gereken bu tabakanın kalınlığı her yerde farklıdır. Malzemenin cinsine de bağlı olarak bazen onlarca metreyi bulmaktadır. Yapılaşmanın programlandığı sahalarda bu birimin saptanması amacı ile elektrik ya da sismik yöntemlerle jeofizik etütler yapılmakta veya sondajlarla saha test edilmektedir. Yer radarı uygulamaları, aynı çalışmaların bu yöntem ile çok daha kısa sürede, daha az maliyet ve insan gücü ile yapılabileceğini kanıtlamıştır. Genelde yüzeydeki gevşek zon alttaki nispeten pekişmiş zon ile iyi bir dielektrik sabit farkı oluşturmaktadır. Yer radarı

uygulamalarında kullanılan elektromanyetik dalgalar için iyi bir zıtlık oluşturan bu sınır; kayıtlarda kolaylıkla gözlenebilmektedir (Daniels, 1989).

b) Ana Kaya (Temel Kaya) Derinliğinin Saptanması

Anakaya yüzeyi elektromanyetik dalgalar için iyi bir yansıma yüzeyi olup derinliği 40 –50 metreyi geçmeyen toprak, ayrıışmış kayaç gibi yapıların anakaya derinlikleri yer radarı yöntemi ile kolaylıkla bulunabilmektedir. Köprü ayakları, viyadükler ve bazı yapıların temeline yerleştirilen fore kazıkları gibi bazı mühendislik uygulamaları için anakaya derinliğinin saptanması gerekli olmaktadır (Romero, 1992).

c) Zemindeki Yanal ve Düşey Süreksizliklerin Saptanması

Zemin içerisinde bulunan gevşek birimler, yanal ve düşey formasyon değişimleri homojen zemin özelliğini bozmaktadır. Bu zeminlerin araştırılması yapılmadan üzerine inşa edilecek her türlü yapıda bir süre sonra deformasyon başlayacaktır. Bunun önüne geçmek için, sahada önceden yapılacak olan bir yer radarı etüdü ile, deformasyona neden olacak gevşek birimler bütün detayları ile ortaya çıkarılabilir (Koçaslan, 2008).

d) Otoyol, Tünel ve Demiryolu Güzergâh Çalışmaları

Yapılması planlanan otoyol, demiryolu ve tünel açma güzergah çalışmalarında yer radarı başarılı bir şekilde kullanılmaktadır. Demiryolu, karayolu çalışmalarında zemin koşullarının araştırılmasında ve tünel açılması planlanan kaya içerisindeki mevcut süreksizlik veya çatlakların araştırılmasında GPR yöntemi uygulanmaktadır. Aynı zamanda yer radarı mevcut tünellerde duvar cephelerinin sağlamlığı ve sızıntı araştırmalarında da başarıyla kullanılmaktadır.

e) Boşlukların Saptanması

Özellikle karstik sahalarda büyük çaplı hava boşlukları zeminde ciddi tehlikeler oluşturmaktadır. Bu boşlukların belirlenmesinde elektrik ve sismik yöntemler bazen yetersiz kalabilmektedir. Yer radarı yöntemi ise bu konuda büyük avantaja sahiptir. Hava, elektromanyetik dalganın yayılması için ideal bir ortamdır. Kayaçlar ise fiziksel özelliklerine (σ, μ, ϵ) bağlı olarak elektromanyetik dalga yayılımına direnç göstermektedir. Ancak bir hava boşluğu ile karşılaşan elektromanyetik dalga aniden hızlanmakta ve bu yeni ortamın ara yüzeyinden kuvvetli yansımalar göndermektedir. Bu nedenle hava boşluklarının yer radarı yöntemi ile saptanması mümkündür (Şeren, vd., 2008).

f) Su Tablasının Belirlenmesi

Zeminde bulunan su tablasının seviyesi ve mevsimsel hareketleri, üzerine inşa edilecek yapılar için çok önemlidir. Elektromanyetik dalgaların, su içeren formasyon içerisinde, yüksek elektrik iletkenliği nedeniyle yayılımı güçtür. Dolayısıyla su tablası sınırı elektromanyetik dalgalar için çok kuvvetli bir yansıma yüzeyidir. Bu yöntem kullanılarak zemindeki su tablası seviyesinin dağılımı büyük bir duyarlılıkla çıkarılabilmektedir (Koçaslan, 2008; Harrari,1996; Dannowski ve Yaramancı, 1999; Aspiro ve Aigner, 1999).

1.6.2. Maden Araştırmaları, Maden Ocağı Sınırlarının Belirlenmesi

Yüzeğe yakın (ilk 40 m'e kadar) maden ocaklarında madenlerin saptanması, rezerv geliştirme, galeri ile çalışılan madenlerde galeri ilerleme yönünün belirlenmesinde ve işletmeye açılacak madenlerin ocak sınırlarının tespitinde de bu yöntem kullanılabilir. Yüzeğe sokulum yapan volkanik ve metamorfik kayalardaki elektromanyetik dalga yayılımı, civarındaki ayrılmış yüzey çökelmelerinden farklı olduğundan bu iki yüzey arasında iyi yansıma yüzeyleri oluşmaktadır.

Mermer işletmeciliğinde kalınlık ve süreksizliklerin değişiminin ortaya konulmasında en yaygın olarak kullanılan yöntemdir. Yine taş ocaklarında süreksizliklerin belirlenmesiyle patlatma tasarımının iyileştirilmesine yardımcı olmak için yer radarı kullanılmaktadır (Öğretmen ve Şeren, 2014).

1.6.3. Kablo ve Boru Güzergâhı Belirleme Çalışmaları

Su, kanalizasyon, akaryakıt ve doğal gaz boru profilleri ile elektrik ve haberleşme kabloları bir lokasyondan diğerine ulaştırılırken yeraltına gömülmektedir. Gömme operasyonu öncesi ise uygun zeminin belirlenmesi amacıyla araştırma yapılmaktadır. Yer radarı yöntemi ile yapılan zemin incelemeleri boru profili ve kablo döşenmesine en uygun zemini süratli bir şekilde belirlemektedir (Koçaslan, 2008).

Ayrıca eski veya kaydı bulunmayan şehir altyapı çalışmalarında, yeraltında gömülü bulunan su, kanalizasyon, akaryakıt-doğalgaz boruları ve elektrik, telefon, fiberoptik kablolarının yerlerinin haritalanmasında yer radarı başarılı sonuçlar vermektedir.

1.6.4. Otoyol Asfalt ve Dolgularındaki Deformasyonların İzlenmesi

Otoyollar yapıldıktan sonra bazı kesimlerde gözle görülen deformasyonlar ortaya çıkabilmektedir. Gerek doğal afetler gerekse beklenenin üzerindeki yükler otoyollarda kısmi bozukluklara neden olmakta, önlemi alınmazsa daha büyük deformasyonları beraberinde getirmektedir. Deformasyon belirtilerinin ortaya çıkmasından sonra bölgede yapılan yer radarı ölçümleri bu sahada deformasyona neden olan kaynağı ortaya çıkarmakta büyük yarar sağlamaktadır. Asfalt üzerinde yapılan yer radarı çalışmaları uygun zemin nedeniyle son derece hızlıdır. Elde edilen kayıtlardan deformasyonun asfalt kaplama veya altındaki dolgu malzemesindeki miktarı da belirlenmektedir (Daniels, 1989).

1.6.5. Arkeolojik Arama Çalışmaları

Günümüzde birçok eski medeniyete ait tarihi kalıntılar yerin altında keşfedilmeyi beklemektedir. Toprak altında bulunan eski yapıların jeofizik yöntemlerle saptanarak tahrip edilmeden kazılması için arkeologlar ile jeofizikçiler arasında uzun yıllardır ortak çalışmalar yürütülmektedir. Yer radarı tekniğinin uygulanmaya başlamasından sonra jeofizikçiler arkeologlara en kesin ve en tahribatsız sonuçları vermeye başlamışlar, arkeologlar da yer radarı sonuçlarını kullanarak kazılarını tahribatsız yapmaya başlamışlardır. Yer radarı ile özellikle toprak altında kalan antik şehir, tapınak, mezar, duvar, temel, dehliz ve benzeri tarihi kalıntılar başarılı bir şekilde görüntülenebilmektedir (Şeren vd., 2008).

1.6.6. Güvenlik ve Kriminal Amaçlı Kullanım

Güvenlik açısından, cezaevi çevresinde periyodik yer radarı ölçümleri ile cezaevi dışına doğru kazılacak tüneller tespit edilebilmektedir. Ayrıca hücre evi olarak ele geçirilen

yasadışı örgüt barınaklarında ve çevresindeki gizli bölmelerde gizlenen silah, cephane ve erzak tespitinde de yer radarı uygulamalarından yararlanılmaktadır.

Kriminal olarak, göçük ve maden kazalarında ilk yardım amaçlı çalışmalarda, arazide gömülü olan ceset veya toplu mezarların aranmasında yer radarı kesin sonuçlar vermektedir.

1.6.7. Fay Kırık ve Çatlaklarının Haritalanmasında

GPR yöntemi son yıllarda aktif tektonik çalışmalarda da kullanılmaktadır. Genç çökeller ve eski yerleşim yerlerinin depremle olan ilişkisinin araştırılmasında arkeolojik, jeolojik ve jeofizik araştırmalar birlikte kullanılmaktadır. Kuzey Anadolu Fay Zonu üzerinde meydana gelmiş olan 1912 Saros, 1999 İzmit depremleri ve Ölü Deniz Fay Zonu ile ilgili olarak sürdürülmekte olan çalışmalarda GPR yöntemi kullanılmıştır. Bu çalışmalarda hem örtülü aktif fay izi, hem de bölgelerde bulunan höyüklerde ve antik yapılarda (yol, duvar vb.) meydana gelen ötelenmeler araştırılmış ve çalışılan bölgelerde fayın lokasyonu ve ötelenme miktarları hakkında önemli bilgiler elde edilmiştir.

1.6.8. Diğer Uygulamalar

- Yapısal araştırmalarda toprak stratigrafisinin ortaya çıkarılmasında,
- Yüzeğe yakın jeolojik birimlerin belirlenmesinde,
- Dolgu alanlarının ortaya çıkarılmasında,
- Donmuş göl ve nehirlerin don kırıklarının araştırılmasında,
- Volkanik hareketlerin araştırılmasında,
- Yol, hava alanı, baraj, su kanalı, santral, yerleşim alanı yer araştırmalarında,
- Mühendislik yapıları tavan, taban ve duvarların incelenmesi, restorasyon amaçlı araştırmalarda,
- Yapılarda kolon ve bağlantı yerlerinin araştırılmasında,
- Eski veya kaydı bulunmayan endüstriyel atık alanlarının bulunmasında,
- Fabrika, akaryakıt istasyonu, su yolu vb. kaçak ve sızıntılarının belirlenmesinde,
- Çöp boşaltım alanlarının yer araştırmalarında,

- Baraj çalışmalarında,
 - Köprü çözümlerinin belirlenmesinde,
 - Kara mayınları araştırılmasında,
 - Biyoloji ve biyofizik alanlarda,
 - Tarım alanında
- kullanılmaktadır.

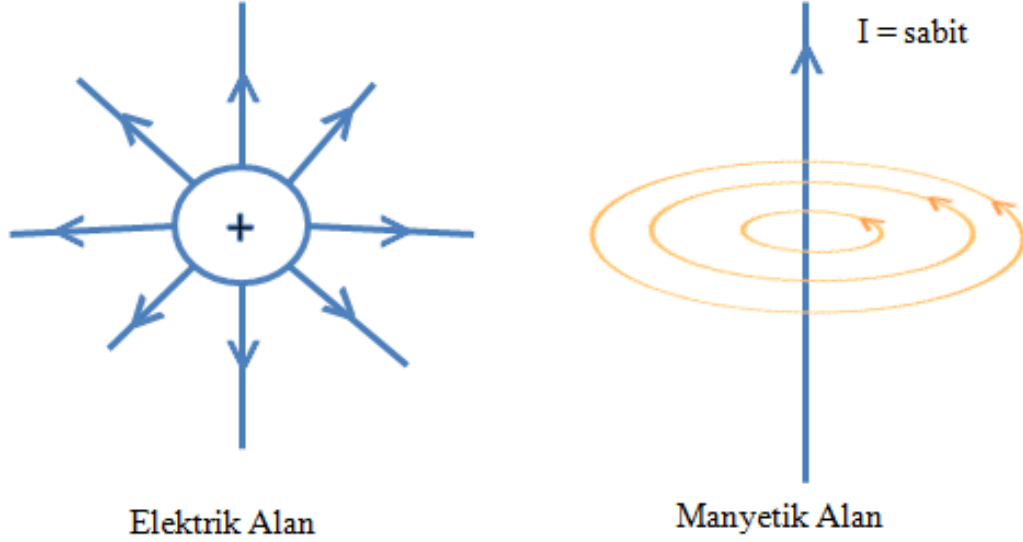
1.7. Yer Radarının Dayandığı Temel Elektromanyetik Alan Yayılım Teorisi

1.7.1. Elektromanyetik Dalganın Oluşumu

Elektrik ve manyetik alan etkisiyle, enerjinin dalgalar halinde taşınmasına elektromanyetik dalgalar denir. Işık, ısı dalgaları, X ışınları, radyo dalgaları, gamma ışınları, ultraviyole ışınların hepsi birer elektromanyetik dalgadan ibarettir. Elektromanyetik dalgaların karakteristikleri normal harmonik dalgalarda olduğu gibidir. Bu dalgalar; frekans, periyot ve dalga boyu ile tanımlanmaktadır. Frekans, bir saniyedeki titreşim sayısıdır. Birimi Hertz (Hz) dir. Periyot, tam bir titreşim süresi, dalga boyu ise iki dalga tepe noktası arasındaki mesafedir. Dalga boyu ile frekansın çarpımı dalganın yayılma hızını verir.

Elektromanyetik dalga oluşması için yükün ivmelenmesi gerekir. Hareketsiz elektrik yükü, eğer hareket ederse etrafında manyetik alan meydana gelir ki, bu alan civardaki bir miktarda veya manyetik metal parçasına manyetik itme veya çekme kuvveti uygulamaktadır. Zamanla değişim gösteren durumlarda, elektrik alan ve manyetik alan birbirine tamamen bağlıdır. Yani elektrik alan değişimi, manyetik alan oluşturur; manyetik alan değişimi de elektrik alan oluşturur. Şöyle ki; durgun bir yük sadece elektrik alanı oluştururken, hareketli bir yük elektrik alanına ek olarak bir de manyetik alan oluşturur. Bu alan, civarındaki başka herhangi bir elektrik yüküne itme veya çekme şeklinde bir kuvvet uygulamaktadır. Eğer zamanla değişim yoksa elektrik alan ve manyetik alan birbirlerinden bağımsız olarak bulunabilirler. Yani durgun bir yük veya düzgün doğrusal hareket yapan bir yük, elektromanyetik dalga yayamaz.

Değişken bir manyetik alan oluşturmak için, iletkenin alternatif akım geçmesi yeterlidir. Yani alternatif akım geçen bir iletkenin çevresinde hem elektrik alan hem de manyetik alan oluşur (Şekil 1.2). Bu da çevreye elektromanyetik dalga yayıldığını gösterir.



Şekil 1. 2. Elektrik ve manyetik alanın gösterimi

Elektromanyetik dalgalar, elektromanyetik alanın uzayda yayılmasından ibarettir. Elektromanyetik alanın kaynağı, elektrik alan ve manyetik alan olduğundan, elektromanyetik dalgaların yönü bunlar yardımıyla bulunabilir. Elektrik alan (E) ve manyetik alan (H) birbirine diktir. Elektromanyetik alan (P) ise, bu ikisinin meydana getirdiği düzleme diktir. Neticede üç alan birbirine dik üç vektörle gösterilebilir. Elektromanyetik dalgaların uzaydaki hızı 3×10^8 m/s'ye çok yakındır. Işık da bir elektromanyetik dalga olduğundan ışık hızı bu değere eşittir. Işık hızı (1.1) bağıntısında ifade edildi gibidir.

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \quad (1.1)$$

Burada c ışık hızı, ϵ_0 boşluğun dielektrik sabiti, μ_0 boşluğun manyetik geçirgenliği olarak tanımlanır.

1.7.2. Elektromanyetik Dalga Özellikleri

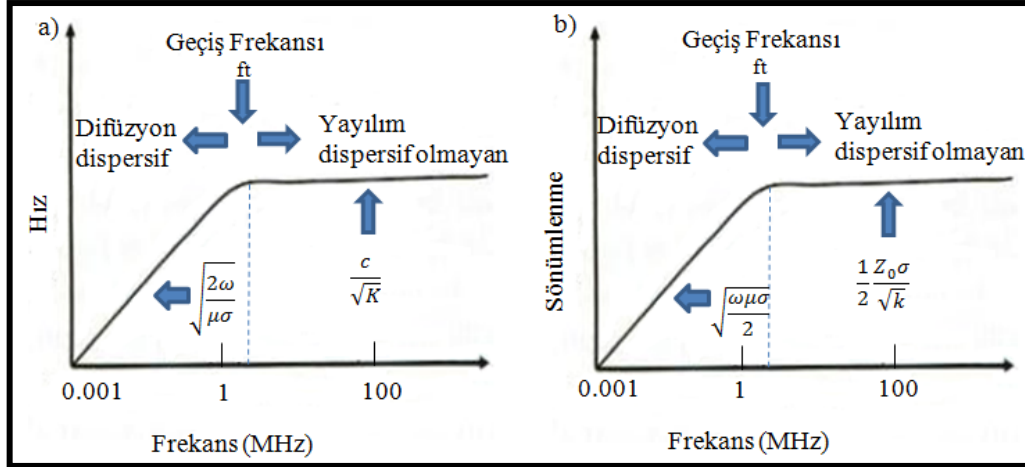
Elektromanyetik dalgaların yer içerisindeki hareketlerini açıklayabilmek için en önemli parametreler faz hızı (v), sönümlenme (α) ve elektromanyetik empedans (Z)'dir. Elektromanyetik teoride basit ortamlar olarak ifade edilen, sabit dielektrik geçirgenlik, elektrik iletkenlik ve manyetik geçirgenliğe sahip ortamlarda dalga özelliklerinin hepsi; benzer davranışlar sergilemekte ve frekans değerlerine bağlı olarak değişimler göstermektedir. Düşük frekanslarda, tüm dalga özellikleri açısal frekansa ($\sqrt{\omega}$) bağlı olup, elektromanyetik dalga düşük frekanslarda dispersif yayılım göstererek difüzyon hareketi ile ilerlemektedir. Yüksek frekanslarda, eğer ϵ , μ , σ sabit ise, dalga özellikleri frekanstan bağımsız olup, dispersif olmayan yayılım göstermektedir. Yüksek frekanslarda elektromanyetik dalgaların bu davranışı yer radarının en karakteristik özelliğidir (Şekil 1.3).

Düşük frekanslarda, elektromanyetik alanlar ortam içine yayılır ve elektromanyetik enerji kendini ortama ısı enerjisi şeklinde dağıtır. Bu ortamdaki bir dürtü sinyali, bu sinyalin frekans bileşenlerinin bu ortam içerisinde farklı oranlarda sönümlenmesi ve farklılaşan faz hızlarında seyahat etmesi nedeniyle saçılmaya başlar. Bu durumdaki faz hızı, sönümlenme ve elektromanyetik empedans için matematiksel gösterim (1.2 - 1.4) bağıntılarıyla tanımlanmıştır.

$$v = \sqrt{\frac{2\omega}{\mu\sigma}} \quad (1.2)$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}} \quad (1.3)$$

$$Z = (1 + i) \sqrt{\frac{\omega\mu}{2\sigma}} \quad (1.4)$$



Şekil 1.3. (a) Hız ve (b) sönümlenme değerlerinin frekansa bağlı olarak değişimi (Annan, 2009).

Yüksek frekanslarda, elektromanyetik alanlar ortam içerisinde dalgalar şeklinde yayınırlar. Tüm frekans bileşenleri aynı hızda seyahat eder ve aynı sönümlenmeden etkilenir. Bir dürtü sinyali bozulmamış şekliyle seyahat edecektir. Bu yayılım, saçılmasız yayılım olarak adlandırılır (Annan, 1996). Yüksek frekanslı elektromanyetik dalgaların ortam içerisindeki hız, sönümlenme ve elektromanyetik empedans değerleri (1.5 - 1.7) bağıntıları ile bulunabilir. Burada ortamın manyetik özellikleri ihmal edilmektedir ve (1.8) bağıntısıyla verilen Z_0 boşluğun empedansını göstermektedir.

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}} = \frac{c}{\sqrt{K}} \quad (1.5)$$

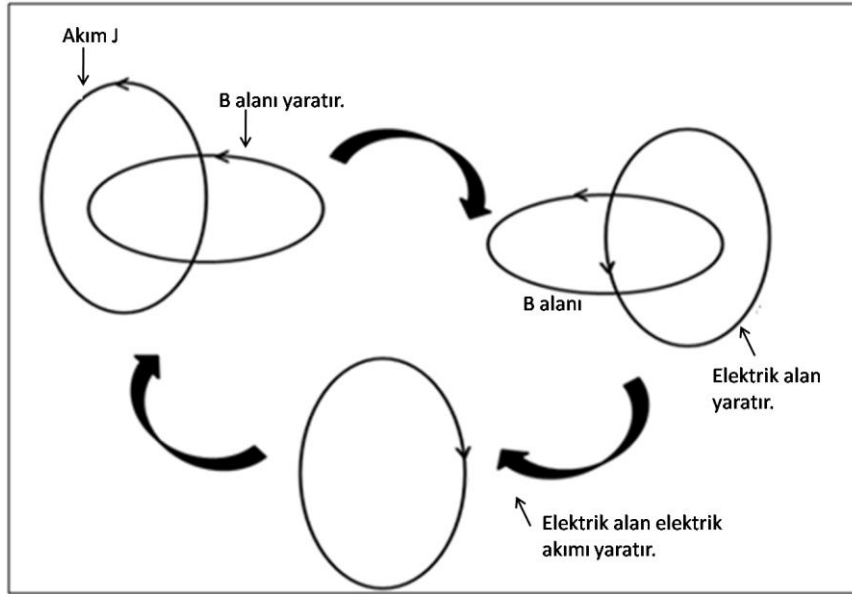
$$a = \sqrt{\frac{\mu\sigma}{\epsilon}} = Z_0 \frac{\sigma}{2\sqrt{K}} \quad (1.6)$$

$$Z = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} = \frac{Z_0}{\sqrt{K}} \quad (1.7)$$

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 377 \text{ ohms} \quad (1.8)$$

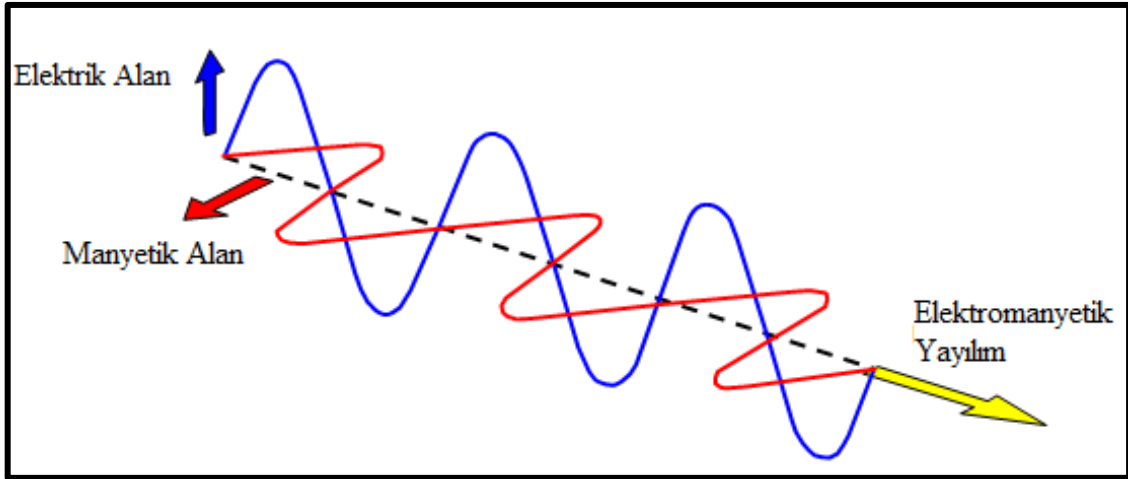
1.7.3. Elektromanyetik Alanların Dalga Yapısı

EM alanların dalga yapısı burada basit homojen ortam için dikkate alınmıştır. Malzeme özellikleri izotropik, frekans bağımsız ve lineer ifade edilmiştir. Elektrik alan indüklenerek, Şekil 1.4' deki gibi elektrik alanın değişimiyle manyetik alan oluşturur. Bu devamlılık bir alanın diğer alanı indüklemesiyle ortamda hareket ederek devam etmektedir. Kayıplara bağlı olarak, alanlar dalga şeklinde yayılabilir.



Şekil 1.4. Elektromanyetik dalga yayılımının gösterimi (Annan, 2001).

Elektromanyetik dalga, daha öncede belirtildiği gibi elektrik ve manyetik alanların bileşkesinden oluşur. Elektrik alan (E) ve manyetik alan (H) birbirlerine dik sinüs dalgaları şeklindedir ve dışarıdan gelen herhangi bir etki olmadığı müddetçe aynı fazdadırlar. Bu nedenle birisi maksimum olduğunda diğeri de maksimum, biri minimum olduğunda diğeri de minimumdur. Elektromanyetik dalgalar boşlukta ışık hızında hareket ederler. İlerleme yönü $E \times H$ vektörü yönünde ve z eksenine doğrudur (Şekil 1.5).

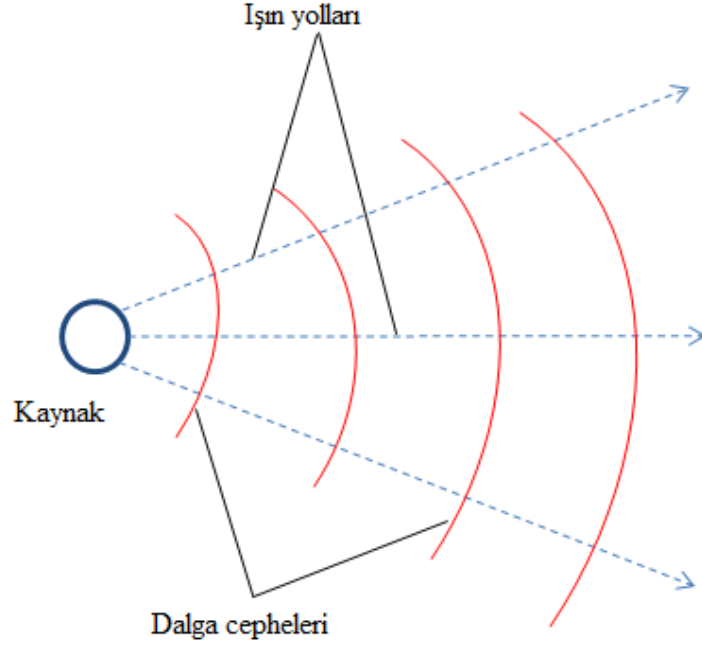


Şekil 1.5. Elektrik, manyetik ve elektromanyetik alan gösterimi

1.7.4. Elektromanyetik Dalganın Yayılımı

Elektromanyetik bir dalganın yayılımını temel olarak, dalga cepheleri ve ışın yolları ile karakterize edilebilir. Her iki kavram da Şekil 1.6'da gösterilmektedir. Dalga cephesi, sinyallerin tümünün aynı fazda olduğu uzamsal bir yüzeyi gösterirken, ışın yolu dalga boyu ya da geçici sinyal süresinin bir ifadesidir. Herhangi bir kaynaktan gönderilen geçici bir sinyal için uzamsal yüzeyin eş seyahat süresi, dalga cephesini belirler.

Işın yolları, dalga cephesine ve ortamdaki elektrik ve manyetik alanlara dik bir konumda bulunmaktadır. Işın yolları için en ideal durum, dalga boyu ya da geçici sinyal süresinin çok kısa olmasıdır. Elektromanyetik bir dalganın yayılımında ortam koşulları çok önemli olmakla birlikte, dalganın özellikleri de önem taşır. Bu nedenle, elektromanyetik dalga yayılımının doğasının iyi bilinmesi çözümü olası kılar. Elektromanyetik alanlar ışınlar olarak davrandığında, kavramsal olarak, ışın tarafından tanımlanan yol boyunca seyahat eder (Şekil 1.6.).



Şekil 1.6. Dalga cepheleri bir kaynaktan dışa doğru seyahat eden dalgalar için eş seyahat süreli ya da fazlı yüzeylerdir. Işımlar (rays) dalga cephelerine diktir ve yörüngeden dışa doğru çizilir (Annan, 2001).

Yeraltındaki elektromanyetik enerjinin hareketi, içinden geçtiği maddenin/ortamın yayınım sabiti tarafından yönlendirilir. Boşlukta elektromanyetik dalgaların genel yayınım sabiti (K_0), (1.9) bağıntısıyla verilir. Denklemden ω radyan cinsinden frekansı, yayınım sabiti boşluğun manyetik geçirgenliğini μ_0 ve boşluğun elektrik geçirgenliğini ϵ_0 ifade etmektedir.

$$K_0 = (\omega^2 \mu_0 \epsilon_0)^{(0.5)} \quad (1.9)$$

Yer içinde, elektromanyetik dalganın ilerleyişi, seyahat ettiği ortamın elektrik iletkenliğine bağlıdır ve yüksek elektrik iletkenlikli ortamlarda elektromanyetik dalgalar çok çabuk sönümlenir. Bu nedenle yayınım katsayısının hesabı (1.10) denklemi ile verilir. Burada μ ortamın manyetik geçirgenliği, ϵ ortamın elektrik geçirgenliği ve σ_{DC} doğru akım elektrik iletkenliği ve $i = (-1)^{0.5}$ dir.

$$K_0 = (\omega^2 \mu \epsilon + i \omega \sigma_{DC})^{(0.5)} \quad (1.10)$$

Elektrik geçirgenlik radar uygulamalarında çok büyük önem taşımaktadır ve genellikle bağıl geçirgenlik ya da bağıl dielektrik geçirgenlik katsayısı şeklinde açıklanır ve (1.11) bağıntısında gösterildiği gibi verilir. Denklemdaki K^* karmaşık dielektrik katsayısı, K' dielektrik katsayısı ve K'' kayıp faktörü olarak adlandırılır. Buradan yeraltındaki elektromanyetik dalganın yayılım faktörü, (1.12) bağıntısıyla verilen şekilde tanımlanabilir. $\omega K'$ dielektrik katsayısı faktörünü, $i\omega K''$ dielektrik kayıp faktörünü ve $i\sigma_{DC}$ DC iletkenlik kayıp faktörünü ifade etmektedir.

$$\epsilon/\epsilon_0 = K^* = K' \epsilon_0 + i K'' \epsilon_0 \quad (1.11)$$

$$K = [\omega\mu_0\epsilon_0 (\omega K' + i\omega K'' + i\omega\sigma_{DC})]^{0.5} \quad (1.12)$$

(1.12) bağıntısı, söz konusu madde içerisinde yayılan enerji miktarını, hem doğru akım iletkenlik değerinin hem de karmaşık dielektrik geçirgenlik katsayılarının belirlediğini göstermektedir.

1.7.5. Elektromanyetik Dalgaların Yayınımını Etkileyen Fiziksel Özellikleri

Zamanla değişen elektrik (E) ve manyetik (H) alan bileşenlerinden oluşan elektromanyetik alanlar, içinden geçtikleri ortamların farklı fiziksel özelliklerinden etkilenirler. Manyetik ve elektrik alanlarda meydana gelen bu değişim, EM alanların ortamda yayılım ve sönümlenmelerini etkilemenin yanında, farklı karakterlerde yansımalar elde edilmesine de neden olur.

Birçok yer radarı uygulamasında, yerin fiziksel özellikleri (ϵ , μ , σ), kayıt edilen radar verilerini etkileyen faktörlerdendir. Manyetik özelliklerdeki değişimle elektrik özelliklerdeki değişimler kıyaslandığında, manyetik değişim, diğerlerine oranla daha zayıf kalmaktadır. Ancak yer radarı yanıtlarını etkileyebilecek manyetik özelliklere sahip ortamların bulunduğu da göz ardı edilmemelidir. Elektromanyetik alanları etkileyen fiziksel özellikleri dielektrik geçirgenlik, elektrik iletkenlik ve bağıl manyetik geçirgenlik olarak sıralayabiliriz.

1.7.5.1. Dielektrik Geçirgenlik (ϵ)

Dielektrik (ϵ) ifadesi elektriksel yalıtkanlıkla eş anlamlıdır ve dielektrik bir madde, elektrik akımına yüksek derecede direnç gösteren madde olarak tanımlanmaktadır. Dielektrik ortamlar, elektromanyetik enerjinin büyük bir kısmının saçılmadan geçişine izin verir. Dielektrik bir ortamda bir elektromanyetik alan söz konusu olduğunda, elektrik alan tarafından zorlanan yükler bu zorlamaya bir yer değiştirme hareketiyle yanıt verirler. Birim elektrik alan başına düşen elektriksel yer değiştirme miktarının ölçüsü dielektrik geçirgenlik olarak tanımlanır. Birimi Farad/metre ya da Coulomb/voltmetredir.

Dielektrik geçirgenlik matematiksel ifadesi (1.13) bağıntısında verildiği gibidir.

$$\epsilon = \frac{\bar{D}}{\bar{E}} \quad (1.13)$$

Dielektrik bir ortamda elektrik alan şiddeti arttığında, elektrik yer değiştirme hareketi bu ortamda depolanır. Daha sonra elektrik alan azaldığında, ortam depoladığı enerjiyi bırakır ve yer değiştirme akımlarını oluşturur. Bir maddenin bağıl dielektrik geçirgenliği (ϵ_r), o madde elektromanyetik enerjiyle yüklendiğinde, enerjiyi depolama ve daha sonra elektromanyetik enerjinin geçişine izin verme kapasitesi olarak tanımlanır (von Hippel, 1954).

Bağıl dielektrik geçirgenlik katsayısı (ϵ_r), bir maddenin elektrik geçirgenliğinin boşluğun elektrik geçirgenliğine oranı ile hesaplanabilir. Ortamların dielektrik geçirgenlikleri; onların bileşimleri, nem içeriği, hacim yoğunluğu, gözeneklilik, sıcaklık ve fiziksel yapılarına bağlıdır (Olhoeft, 1981).

Bir ortam içerisinde belirli bir v hızında ilerleyen elektromanyetik dalgalar için o ortamın bağıl dielektrik geçirgenlik değeri izleyen bağıntıyla hesaplanabilir (c ışık hızını göstermektedir ve yaklaşık değeri 0.3 m/ns'dir).

$$\sqrt{\epsilon_r} = \frac{c}{v} \quad (1.14)$$

Bağıl dielektrik geçirgenlik katsayısını arazide hesaplamak oldukça zordur. Bunun kestirimi arazide kullanılan bazı hız analizi teknikleri yardımıyla yapılabilir. Bunun yanı sıra, toprak ve çökel örnekleri üzerinde laboratuvar ölçümleri yapılarak da dielektrik

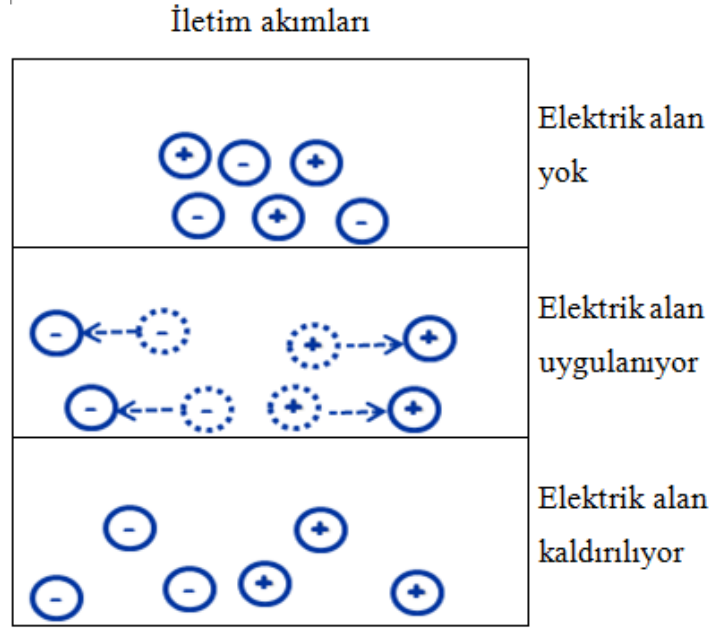
geçirgenlik ölçülebilir. Bazı materyaller için verilen dielektrik geçirgenlik katsayıları Tablo 1.2’de verilmektedir.

1.7.5.2. Elektrik İletkenlik

Bir ortamda bulunan elektrik yükleri o ortamda bir elektrik alan (E) ortaya çıkmasına neden olur. Elektrik alan vektörel bir büyüklüktür ve ortamın doğasına bağlı olarak iki farklı şekilde oluşabilir. Yükler, bir maddede bağlı ve serbest olmak üzere iki türde bulunabilir. Bunlar sırasıyla yer değiştirme akımları ve iletim akımları olarak adlandırılan akım dolaşımına neden olurlar.

a) İletim Akımları

Bilindiği gibi elektrik iletkenliğe sahip ortamlarda, serbest (bağımsız) elektrik yükler bulunmaktadır. Bu yüklerin bulunduğu ortamlara bir elektrik alan uygulandığında, bu alanın etkisiyle yükler ani bir şekilde hızlanmaya başlar ve bir uç hıza ulaşırlar ve yüklerin doğası gereği ortamda bir elektrik akımı oluşur. Bu elektrik alan uygulanmaya devam ettiği sürece yüklerin hareketi devam eder ve bu esnada yükler buldukları ortama, elektrik alan etkisiyle aldıkları enerjiyi ısı enerjisi olarak transfer ederler. Bu hareketli yükler, ortamda bulunan hareketsiz nesnelere karşılaştıklarında, ısı enerjisi olarak ortaya çıkan enerji, hareketsiz yükleri hareketlendirecek biçimde mekanik enerjiye dönüşür. Elektrik alan uygulandığı sürece bu yükler hareketlerine ve dolayısıyla, elektrik enerjisi önce ısı ve daha sonra da mekanik enerjiye dönüşmeye devam eder. Elektrik alan kalktığında, bu hareketlenen yükler yavaşlar ve anlık bir sürede dururlar. Burada unutulmaması gereken, bu enerji dönüşümünün tek taraflı olduğu yani elektrik enerjisinin önce ısıya ardından mekanik enerjiye bir daha geri dönülmez şekilde dönüştüğüdür. Metal bir telde dolaşan elektronlar iletim akımlarına örnek olarak verilebilir. Metallerde, elektronlar yüklerini bir noktadan diğerine aktarmak için yapının metalik bağları içinde hareket ederler. Sulu çözeltilerde oluşan iyon hareketleri de yaygın bir iletim mekanizmasıdır ve birçok yer radarı uygulamasında en önemli iletim şeklidir (Annan, 2001). Şekil 1.7 iletim akımları için elektrik yüklerinin hareketini göstermektedir.



Şekil 1.7. Elektrik alan uygulandığında serbest elektrik yüklerinin hareketi (Annan, 2001).

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (1.15)$$

İletim akımı ile uygulanan elektrik alan arasındaki ilişki (1.15) bağıntısı ile ifade edilmektedir ve bir elektrik alan var olduğunda, serbest yüklerin elektrik akımı oluşturabilmeleri için hareketlerini tanımlar. Burada σ elektrik iletkenliktir.

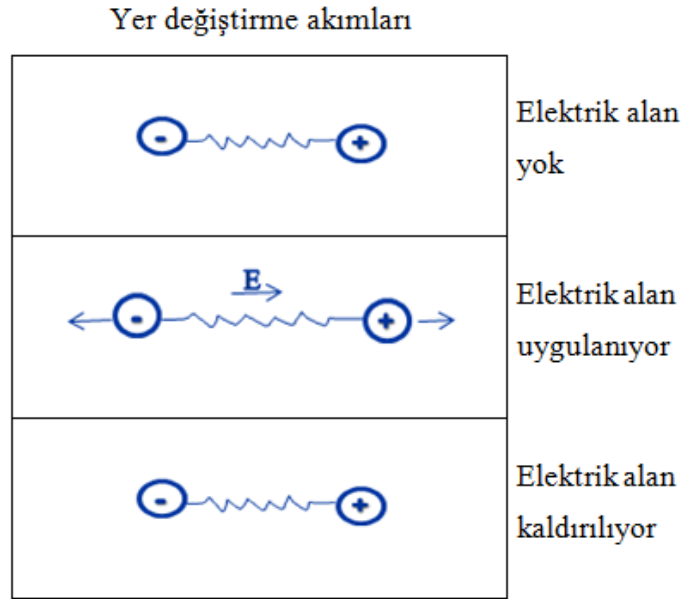
Matematiksel olarak çözümü basite indirgemek için, ortamın elektrik iletkenlik açısından homojen, izotrop (yönden bağımsız) ve frekanstan bağımsız olduğu düşünülür. Bu durumda, ortamdaki elektrik akımı ile elektrik alan arasındaki ilişki doğrusaldır ve aralarındaki oransallık katsayısı elektrik iletkenlik değerini verir. Gerçekte iletkenlik, elektrik alandaki değişim oranı kadar sıcaklık, basınç ve diğer faktörlerin de bir fonksiyonu olabilir. Ancak bunlar yer radarından elde edilen yanıtlarda çoğunlukla ikinci derecede önem taşır.

Elektrik iletkenliğe sahip ortamların içerisine giren elektromanyetik enerji, elektromanyetik alanın elektrik alan bileşeninin bu ortam içerisinde manyetik alan bileşeninden ayrılarak enerji dönüşümüne uğraması nedeniyle, saçılıp çok çabuk şekilde sönmülmektedir. Yani diğer bir ifadeyle, bir enerji yitimi söz konusudur ve bu ortamlarda radar dalgalarının ilerleyemeyeceği anlamına gelmektedir. Bu yüzden, maksimum elektromanyetik enerji iletimi (nüfuzu) için ortam düşük elektrik iletkenliğe ve yüksek

derecede dielektrik özelliklere sahip olmalıdır. Bu durumun matematiksel ifadesi $\sigma/w\epsilon \ll 1$ şeklindedir.

b) Yer değiştirme (Kutuplanma) Akımları

Yer değiştirme akımları, maddenin yapısında bulunan bağlı yüklerin dışarıdan uygulanan elektrik alan etkisiyle harekete zorlanması sonucu oluşur. Bağlı yüklere atomun çekirdeği çevresindeki elektron bulutu örnek verilebilir. Başlangıçta durağan olan bağlı yükler elektrik alan uygulandığında, bağlarının izin verdiği miktarda diğer bir durağan konuma hareket ederler. Yer değiştirme hareketinin tamamlanmasının hemen ardından, elektromanyetik enerji elektrik alandan ortama aktarılır ve ortamda depolanır. Uygulanan elektrik alan kaldırıldığında, yük başlangıçtaki denge konumuna geri döner ve bu sırada depolanan enerji geri bırakılır (şekil 1.8). Bu davranışa en temel örnek, kapalı bir elektrik devresindeki kondansatör verilebilir. Devrede enerji, yüklerin kondansatörde toplanması ile biriktirilir ve sonrasında yüklerin boşalmasıyla tekrar devreye aktarılır.

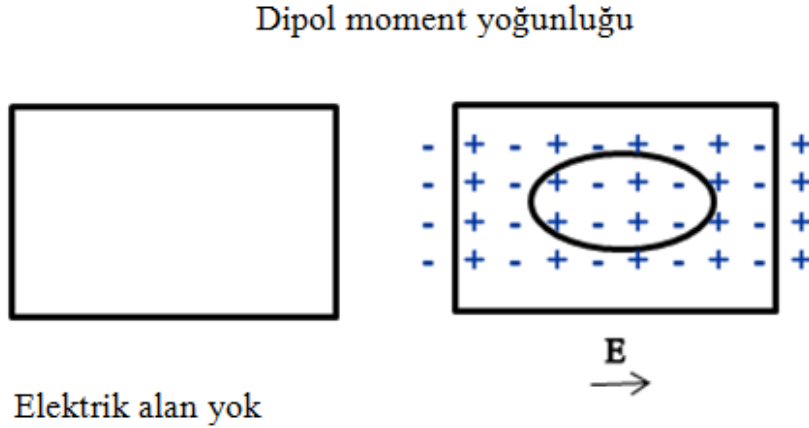


şekil 1.8. Uygulanan elektrik alan doğrultusunda bağlı elektrik yüklerinin yer değiştirme hareketi (Annan, 2001).

Bir elektrik alan uygulandığında, hacimsel bir maddede yük hareketi o maddede dipol moment dağılımı şeklinde bir yük dağılımına neden olur (şekil 1.9). Dipol moment dağılımının oluşumu, bağlı yük hareketleri (diğer bir deyişle yer değiştirme akımları) ile ilgilidir. Bu yük dağılımını dipol moment yoğunluğu (\vec{D}) ile tanımlanır. Dipol moment

dağılımı literatürde elektrik yer değiştirme olarak da adlandırılır. Dipol moment yoğunluğunun zamanla değişimi yer değiştirme akımını (J_D) matematiksel olarak tanımlar (1.16).

$$J_D = \frac{\partial D}{\partial t} = \epsilon \frac{\partial E}{\partial t} \quad (1.16)$$



Şekil 1.9. Uygulanan elektrik alan sonucu oluşan elektrik dipol moment dağılımı (Annan,2001).

Yer değiştirme akımının bağıntısı, yer değiştirme akımı ile uygulanan elektrik alan arasındaki ilişkiyi tanımlar. İletim akımlarında olduğu gibi, çözümü basite indirmek için, ortamın yer değiştirme akımları açısından homojen, izotrop (yönden bağımsız) ve frekanstan bağımsız olduğu düşünülmektedir. Bu durumda ortamdaki indüklenmiş dipol moment yoğunluğu, uygulanan elektrik alan ve oransallık sabiti olarak adlandırılan dielektrik geçirgenlik ile doğru orantılıdır.

c) Toplam Akım Dolaşımı

Herhangi bir maddede, bir elektrik alan uygulanması sonucu ortaya çıkan elektrik akımı, iletim ve yer değiştirme akımlarının toplamından oluşur. Elektrik alandaki değişime bağlı olarak, bu iki farklı türdeki akımdan biri diğerine baskın olabilir. Toplam akım, ortamın elektriksel özellikleriyle birlikte, elektrik alanın kendisinden ve elektrik alanın zamanla değişiminden oluşur. Bu kavram, sinüzoidal şekilde zamanla değişen alanlar için matematiksel olarak (1.17) ve (1.18) bağıntılarında gösterildiği şekilde ifade edilebilir.

$$J = J_C + J_D \quad (1.17)$$

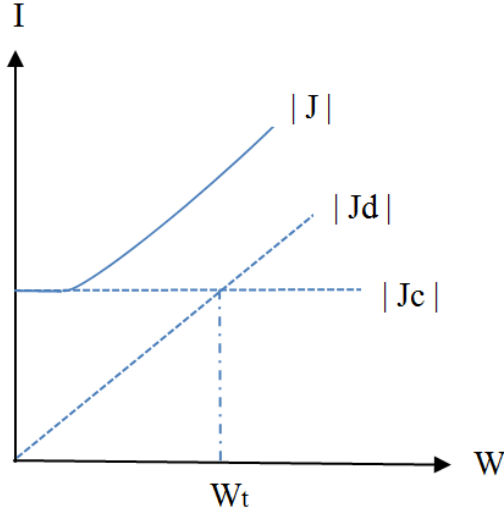
$$J = \sigma E + \epsilon \frac{\partial E}{\partial t} \quad (1.18)$$

Bu bağıntılardan ω açısal frekansı ile yer değiştirme akımlarının açısal frekansının orantılı olduğu anlaşılmaktadır:

$$J = (\sigma + i\omega\epsilon)E \quad (1.19)$$

Yer değiştirme akımları ile iletim akımları arasında 90° faz farkı vardır ve yer değiştirme akımı sanal bileşeni oluşturur. Akımlar arasındaki bu faz farkı, yer değiştirme akımının elektromanyetik alanlar için enerji toplayıcı bir mekanizma olduğunu gösterirken, iletim akımının ise enerji dağıtıcı bir mekanizma olduğunu göstermektedir (Annan, 2001).

Şekil 1.10'da toplam elektrik akımının (J) frekansa göre değişimi görülmektedir. Yer radarı için tanımlanan basit ortamlarda, elektrik iletkenlik ve dielektrik geçirgenliğinin sabit, yer değiştirme ve iletim akımlarının eşit olduğu bir geçiş frekansı (W_t) vardır. Genelde ortamlarda, yer değiştirme akımları iletim akımlarının bir miktar üzerinde olma eğilimindedir. Geçiş frekansı değerinin üzerinde yer değiştirme akımları baskın iken, bu frekans değerinin altında iletim akımları baskındır (Annan, 2001).



Şekil 1.10. Toplam elektrik akımının frekansla değişimi (Annan, 2001).

Geçiş frekansı açısal frekans olarak ifade edilip (1.20) bağıntısında verilmektedir.

$$W_t = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (1.20)$$

Geçiş frekansı yer radarında düşük-kayıplı ortamların tanımlanmasında önem taşır. (1.21) bağıntısı, kayıp tanjantı olarak adlandırılır ve bir maddedeki iletim akımlarının yer değiştirme akımlarına oranını verir.

$$\tan\delta = \frac{|J_c|}{|J_D|} = \frac{\sigma}{\omega\epsilon} \quad (1.21)$$

1.7.5.3. Bağlı Manyetik Geçirgenlik

Manyetik özellikler esasen kapalı bir yol etrafında hareketli olan bir elektrik yükten kaynaklanır (von Hippel, 1954). Atomların yapı taşları spin denen yörüngesel bir dönüşe sahiptir ve bu hareket, maddenin atomlarında ve moleküllerinde oluştuğunda, yükün dönüşü sonucunda dairesel bir akım döngüsü ortaya çıkar ve bu manyetik dipol momentine neden olur. Örneğin bir elektron atomik bir çekirdek etrafında hareket ettiğinde, bu yük hareketi bir manyetik moment yaratabilir (Annan, 2001).

Maddelerin manyetik özellikleri manyetik dipol moment yoğunluğu ile ölçülür. Atom ve moleküllerin manyetik dipol momentlerinin dizilebilme ya da dışarıdan uygulanan bir manyetik alanın yönleniminden farklı şekilde hareket etme seviyesinin ölçüsü manyetik geçirgenlik (μ) olarak tanımlanmaktadır. Dizilim içerisine girebilecek ilgili momentlerin artışı, maddenin manyetik olarak daha fazla kutuplanması anlamına gelir. Ortamda bulunan bir manyetik alan, manyetik dipol momentini; dizilimi değiştirmek ve uygulanan manyetik alanın yönünde sıralamak için indükler.

Genelde manyetik alana verilen bu yanıtlar zayıftır ve manyetik geçirgenlikte çok önemli değişikliklere yol açmazlar. Bu yüzden radar uygulamalarında elektriksel özelliklere göre daha az etkiye sahiptirler.

Bir elektrik akım kapalı bir döngüde dolaştığında manyetik moment;

$$\vec{M} = IA\hat{n} \quad (1.22)$$

bağıntısıyla verilmektedir. Burada \vec{M} manyetik dipol momentini, I elektrik akımını, A akımın geçtiği telin kuşattığı kapalı döngü alanı ve \hat{n} normal vektörünü göstermektedir.

Hacimsel ortamlar için, ortamın moment yoğunluğu (1.23) bağıntısıyla tanımlanır ve birimi A/m'dir.

$$\vec{m} = \frac{\vec{M}}{V} \quad (1.23)$$

k, boyutsuz bir nicelik olan manyetik duyarlılığı gösterirken, (H) manyetik alanı tarafından indüklenen manyetik moment miktarı ise (1.24) bağıntısı ile ele alınmıştır.

$$\vec{m} = k\vec{H} \quad (1.24)$$

Yer değiştirme akımı indüklenmiş elektrik dipol momentini ile indüklenmiş manyetik moment arasında önemli bir benzerlik vardır. Maddedeki manyetik akı (1.25) olarak tanımlanır.

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M}) \quad (1.25)$$

Manyetik geçirgenlik ise;

$$\mu = \mu_0(1 + k) \quad (1.26)$$

bağıntısıyla ifade edilmektedir. Burada μ_0 boşluğun manyetik geçirgenliğini gösterir ve $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$ 'dir.

Maddenin manyetik geçirgenliğinin boşluğun manyetik geçirgenliğine oranı bağıl manyetik geçirgenlik (K_m) kavramını vermektedir. Manyetik geçirgenlik kavramı (1.27) bağıntısı ile ifade edilir. Burada k; suseptibilitiyi temsil etmektedir.

$$K_m = \frac{\mu}{\mu_0} = (1 + k) \quad (1.27)$$

Ortamda bulunan bir manyetik alan manyetik dipol momentini, dizilimi değiştirmek ve uygulanan manyetik alanın yönünde sıralamak için indükler. Bazı maddelerde dizilim uygulanan alanla aynı yönde olmasına rağmen, diğer maddelerde dizilim uygulanan manyetik alana paralel olmayan şekilde gerçekleşebilir. Bu iki davranışa sırasıyla,

paramanyetizma ve diamanyetizma denir. Genelde manyetik alana verilen bu cevaplar zayıftır ve manyetik geçirgenlikte çok önemli değişikliklere yol açmazlar. Manyetik duyarlılığın ortalama değerleri 10^{-5} 'den küçüktür (Annan, 2001).

Yine de bazı durumlarda, manyetik momentler domen olarak adlandırılan maddenin kristal yapısının büyük kısımlarında sıralanabilir. Domenlerin momenti, uygulanan alanla aynı yönde bulunan kristal yapıdaki moleküller ile değişebilir ve bir domenden diğerine hareket edebilir. Bu tür maddelere ferromanyetik maddeler adı verilir. Ferromanyetik maddelerde, kutuplanma çok büyük olabilir ve bağlı manyetik geçirgenlik değerleri çok yüksek olabilir. Demir, kobalt ve nikel gibi maddelerde bağlı manyetik geçirgenlik değeri yüzler mertebesinde olabilir. Ferromanyetik maddelerde manyetik dipol momentleri kalıcı olarak sıralanabilir ve bu tür mıknatıslanma kalıcı mıknatıslanma olarak bilinir. Bu tür ortamlarda manyetik geçirgenlik oldukça yüksektir ve maddenin dinamik davranışı karışıktır. Bu tür maddeler nadiren toprakta ya da kayaçların içerisinde büyük miktarlarda bulunabilmesine rağmen, bunların ortamdaki az miktardaki varlıkları bile geçirgenlik üzerinde çok büyük etkiye sahiptir (Annan, 2001).

Dipol moment yoğunluğunun davranışı çok karmaşık olabilir. Domenlerin nasıl hareket ettiği, geliştiği ve alan, frekans ile sıcaklığa bağımlı olabilen yönelim değişimi ile kontrol edilir. Çeşitli toprak ve kayaç gruplarında, manyetik davranış magnetit ve ilmenit gibi yüksek manyetik özelliklere sahip mineral miktarı ile belirlenir. Ortamların manyetik minerallerindeki hacimsel artış manyetik duyarlılığı artırır. Bunun yaklaşık olarak hesaplanabilmesi için (1.28) ampirik bağıntı geliştirilmiştir. Burada θ madde içerisindeki manyetik özelliklere sahip mineralin hacimsel miktarını vermektedir.

$$k = 3.8\theta \quad (1.28)$$

1.7.6. Elektromanyetik Empedans

Elektromanyetik alanların bileşenleri olan elektrik ve manyetik alanlar birbirine dik yönlere oluşur ve her iki alana dik yöndeki doğrultu boyunca hareket ederler. Oluşacak manyetik alanın genliği, uygulanan elektrik alanın genliğine bağlıdır. Bu durumun tam tersi, alan bağlaşımı yani bir alanın diğer alan üzerindeki etkisi nedeniyle ortaya çıkabilir. Bu

olgu elektromanyetik empedans kavramı ile açıklanabilir. Elektromanyetik empedans (Z) (1.29) bağıntısı ile ifade edilir.

$$Z = \frac{E}{H} \quad (1.29)$$

Elektromanyetik dalgaların hareket ettikleri ortamların iletkenlik özelliklerinin önemli olduğu durumlarda çözümü kolaylaştırmak amacıyla, ortamdaki yayının sinüzoidal biçimli bir dalga olduğu düşünülebilir. Düşük kayıplı ortamlarda ise elektromanyetik empedans kavramı,

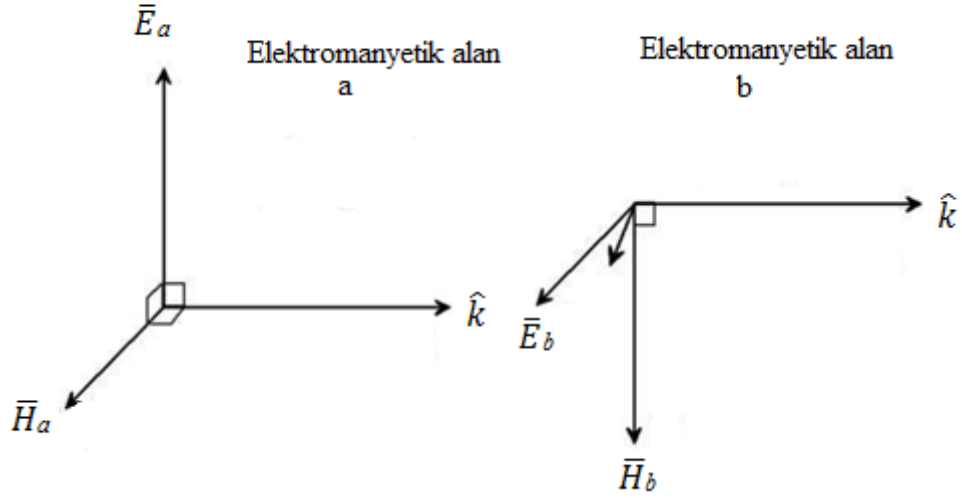
$$Z = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon + i\frac{\sigma}{\omega}}} \quad (1.30)$$

$$Z = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \left(1 - i\frac{\sigma}{2\omega\varepsilon}\right) \quad (1.31)$$

bağıntılarıyla hesaplanır.

1.7.7. Kutuplanma

Elektromanyetik alanlar üzerine yapılan çalışmalardan ortaya çıkan, bu alanların yapısal vektör doğasından, elektrik ve manyetik alan vektörlerinin hem birbirine hem de yer değiştirme yönüne dik olduğu bilinmektedir. Bundan dolayı, verilen bir yayının yönü için iki tane bağımsız elektromanyetik alan oluşabilir. Şekil 1.11, bu kavramı açıklamaktadır.

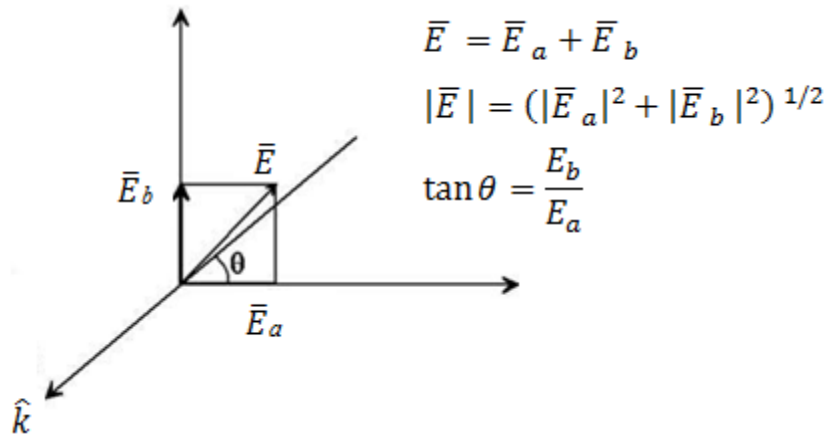


Şekil 1.11. Yayılım doğrultusuna göre a ve b olarak verilen iki farklı elektromanyetik alan oluşabilir (Annan, 2001).

Bundan hareketle, elektromanyetik alan çözümleri elektrik alan vektörünün yönüne göre tanımlanmaktadır. Bu durum, \hat{k} 'ya dik bir düzlem içinde elektrik alan vektörü çizilerek Şekil 1.12 gibi gösterilebilir. Alanların zamanla değişimi sinüzoidal olduğunda, doğrusal, dairesel ve eliptik kutuplanma kavramları ortaya çıkmaktadır.

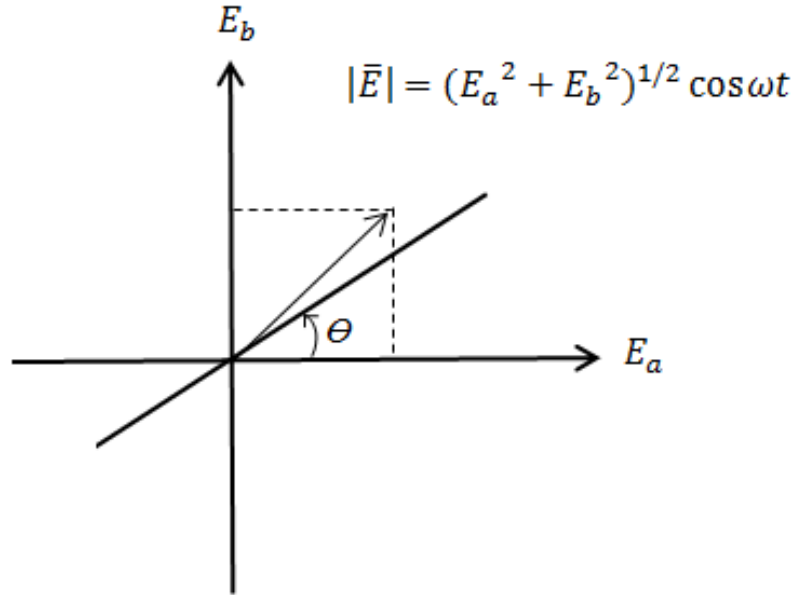
Elektrik alan vektörü (1.32) bağıntısı ile açıklanmaktadır.

$$\vec{E} = E_a e^{i\theta_a} e^{i\omega t} \hat{a} + E_b e^{i\theta_b} e^{i\omega t} \hat{b} \quad (1.32)$$



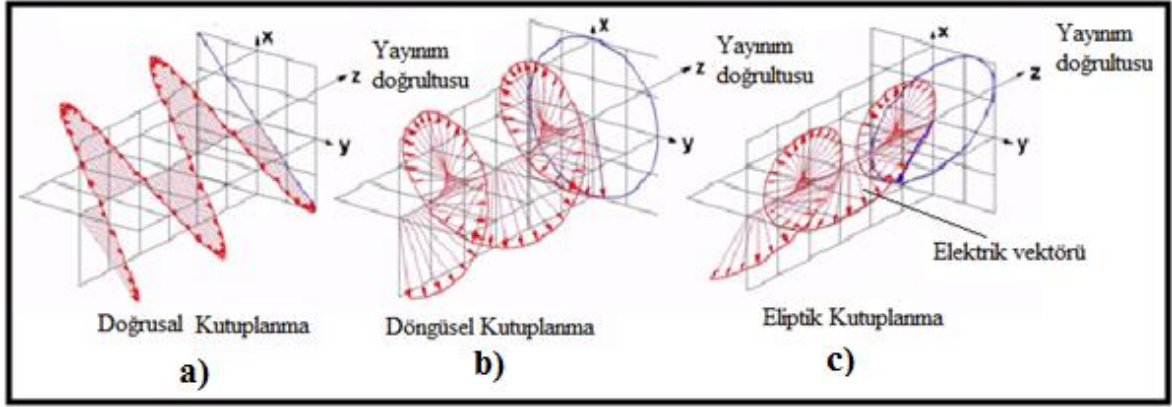
Şekil 1.12. Toplam gözlenen \vec{E} alanı, \vec{E}_a , ve \vec{E}_b ile gösterilen iki bağımsız alanın vektör toplamıdır. Kutuplanma yönü \vec{E} yönündedir (Annan, 2001).

Burada E_a ve E_b elektrik alan bileşenlerinin genlikleridir ve skalar büyüklüklerdir. ϕ_a ve ϕ_b birbirine dik \hat{a} ve \hat{b} birim vektörlerine göre elektrik alan bileşenlerinin faz açılarını göstermektedir. Eğer $\phi_a = \phi_b$ ise elektrik alan doğrusal biçimde kutuplandığı söylenir. Elektrik alan vektörü sabit yönlüdür ($\Theta = \text{sabit}$) ve genliği Şekil 1.13'de gösterildiği gibi sinüzoidal olarak değişir.



Şekil 1.13. Elektrik alanlar zamanla sinüzoidal olarak değiştiğinde, sabit bir yönlü toplam elektrik alan olarak doğrusal kutuplanma kendi kendine oluşmaktadır. (Annan, 2001).

Eliptik biçimdeki kutuplanma durumunda genlik ve alan yönü, alan düzleminde bir elips ve boşlukta ise spiral bir yay çizerek zamanla değişmektedir (Şekil 1.14c). Genelde doğada alan vektörü sinüzoidal şekilde kısa sürelerde ilerleyebilir. Hareket daha çok düzensiz bir şekilde gerçekleşmektedir. Bu yüzden doğrusal, dögüsel ve eliptik kutuplanma geçici (transient) alanlar için geçerlidir (Şekil 1.14a-c).



Şekil 1.14. Sinüzoidal dalgalar için alanlar doğrusal (a), dögüsel (b) ve eliptik (c) biçimde kutuplanmalar (URL-2, 2014).

1.8. Yer Radarının Temel İlkeleri

Yer radarı yönteminin esası elektromanyetik (EM) teoriye dayanmaktadır. Elektromanyetik alanlar, ortamın fiziksel özelliklerine bağlı olarak yayılmaktadırlar. Bu alanın geçmişi iki yüzyıldan daha uzun bir zamandan gelmekte ve Jackson (1962) ve Smythe (1989) gibi birçok fizikçinin konusudur.

GPR sinyallerinin tanımlanması için EM alanlar ve malzemenin fiziksel özelliklerinin ilişkilendirilmesi büyük önem taşımakta olup, temeli Maxwell eşitliklerine dayandırılır. Maxwell eşitlikleri; malzemenin fiziksel özellikleriyle EM alanları ilişkilendirir ve bu alanların fiziğini matematiksel olarak tanımlar.

1.8.1. Maxwell Denklemleri

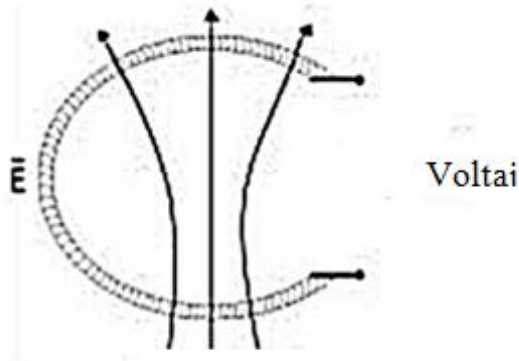
İskoç Fizikçi James Clerk Maxwell (1831 – 1879); Andre Marie Ampere (1775-1836), Michael Faraday (1791-1867) ve Karl Friedrich Gauss (1777-1885)'un yapmış olduğu çalışmalar ışığında 1865 ve 1868 yıllarında 4 denklem içinde tüm elektromanyetik olayları sentezleyen iki makale yayınlamıştır. Maxwell denklemleri elektrik yüklerinin ve elektrik akımlarının elektrik alan ve manyetik alan için kaynak olarak nasıl hareket ettiklerini tanımlamaktadır. Dahası, zamanla değişen bir elektrik alanın zamanla değişen bir manyetik alanı nasıl ürettiği veya tam tersi durumda zamanla değişen bir manyetik alanın zamanla değişen bir elektrik alanı nasıl ürettiğini açıklamaktadır. Dört denklemden

ikisi alanların kendi kaynaklarının çevresinde nasıl dolaştığını açıklar. Manyetik alan elektrik akımları ve Maxwell düzeltmesi ile Ampere yasasına göre zamanla değişen elektrik alanın çevresinde dolaşırken, elektrik alan Faraday yasasına göre zamanla değişen manyetik alanlar çevresinde dolaştığını açıklar. Diğer iki denklem ise elektrik için Gauss yasası ve manyetizma için Gauss yasası olup, alanların yüklerden nasıl oluştuğunu açıklar (manyetik alan için manyetik yük yoktur ve böylelikle manyetik alan çizgileri herhangi bir yerde ya başlar ya da biter). Aynı zamanda Maxwell, ışığında bir elektromanyetik dalga olduğunu belirleyerek elektrik, manyetizma ve optiği tek bir temele oturtmuştur.

Bu dört 4 yalın denklem elektromanyetik dalgaların tüm özelliklerini eksiksiz olarak açıklamaktadır.

Faraday kanunu; zamanla değişen bir manyetik alan ortamdaki elektrik yüklerin hareket etmesine ve bu yük hareketiyle, kapalı döngüsel bir elektrik alan oluşmasına neden olur. Elektrik alan, indüklenen elektromanyetik alanın manyetik akı değişiminin negatif işaretlisidir ve vektörel bir büyüklüktür (Şekil 1.15).

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\left(\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}\right) \quad (1.33)$$



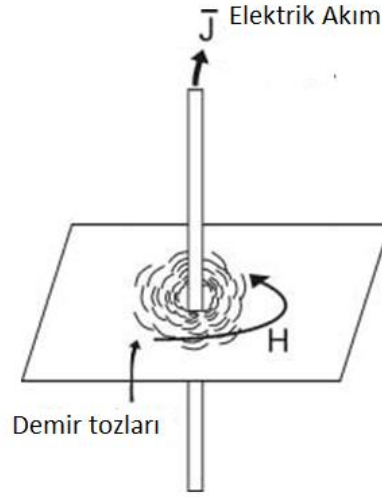
Zamanla değişen manyetik akı yoğunluğu

Şekil 1. 15. Bir manyetik alan bir elektrik alanı meydana getirir (Annan, 1992).

Amper yasası; bir elektrik akımının uzayda bir manyetik alanın vektörel kaynağını oluşturduğunu ve oluşan bu manyetik alanın bölgedeki iletkenlik (yük akışı) ve elektrik yüklerinin zamanla yer değiştirmesinden kaynaklanan toplam akıma orantılı olduğu ifadesini açıklar. Bunun fiziksel olarak en basit örneği, iletken bir çubuktan geçen elektrik akımının etrafında oluşan manyetik alan ve bu manyetik alanın varlığını ispat eden telin

etrafındaki kağıt düzleminde manyetik alanın şeklini alan demir tozlarıdır (Şekil 1.16). Kısaca Amper kanunu; bir ortamdan akım geçerse mutlaka manyetik alan oluşur ifadesini açıklar.

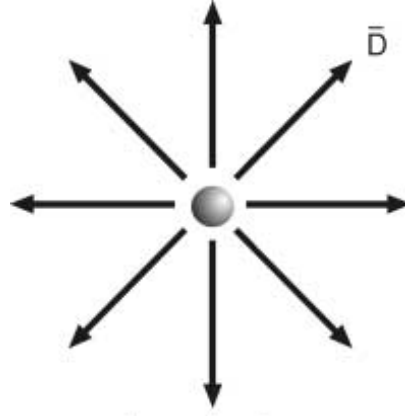
$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J} + \left(\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}\right) \quad (1.34)$$



Şekil 1.16. Bir elektrik akımı bir manyetik alan meydana getirir (Annan,1992).

Gauss Yasası; doğada elektrik alanın iki kaynağı bulunmaktadır. Elektrik alanın skaler kaynağı, ya maddeler içerisindeki serbest elektrik yük yoğunluğu ya da elektrik alanın noktasal yüklerde sonlanması ile oluşur ki, bu Gauss Yasası olarak bilinir. Bir diğer elektrik alan kaynağı olan indükleme olgusu meydana geldiğinde, elektrik yükleri salınım yaparak zamanla değişim gösteren elektrik alanları (yani yüklerin hareketlenmesi) ile kapalı döngü şeklinde oluşturur. Genelde zamanla değişen sinyaller bu iki farklı kaynaktan ortaya çıkan elektrik alanın toplamından oluşur (Şekil, 1.17). Kısaca Gauss kanunu; elektrik alanın skaler kaynağının yük yoğunluğu olduğudur veya elektrik alanın noktasal olarak yüklerde sonlandığını belirtmekte ve (1.35) bağıntısı ile ifade edilmektedir.

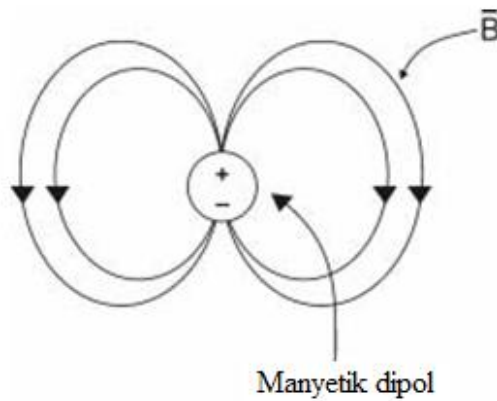
$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \vec{q} \quad (1.35)$$



Şekil 1.17. Kapalı bir yüzeydeki elektrik alan akışının, bu yüzey etrafından çevrelenmiş olan hacimde bulunan net yük ile orantılıdır (Annan,1992).

Manyetik alan için Gauss yasası; doğada manyetik alan, elektrik yüklerinin hareketlenmesiyle oluşan akım akışı sayesinde oluşur. Bu nedenle, manyetik alanlar sadece bu eşitlikte ifade edilen kapalı döngüde oluşacaktır ve manyetik alanın skaler kaynağı yoktur. Bu durumda herhangi bir kapalı yüzeyde oluşan manyetik alanın akışı sıfırdır (1.36) (Şekil, 1.18).

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (1.36)$$



Şekil 1. 18. Kapalı bir yüzeydeki manyetik alan akışının sıfır olduğu ve dolayısıyla manyetik yüklerin var olmadığını belirtir (Annan,1992).

(1.33) – (1.36) eşitlikleri Maxwell denklemleri olarak adlandırılır.

1.8.2. Katkı Eşitlikleri

Katkı eşitlikleri homojen, izotropik bir ortamdaki alan miktarları arasındaki ilişkileri tanımlamaktadır. Bu eşitlikler (1.37, 1.38, 1.39) EM alanındaki uygulamalarda elektronun, atomun ve moleküler tepkinin nasıl tanımlandığını gözle görülebilir şekilde sağlamaktadır.

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (1.37)$$

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (1.38)$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (1.39)$$

\vec{H} Manyetik alan (A/m)

\vec{E} Elektrik alan (mv/m)

\vec{B} Manyetik akı yoğunluğu (Weber/m² =Tesla)

\vec{J} Elektrik akımın yoğunluğu (A/m²)

\vec{D} Yer değiştirme akımları (Coulomb/m²)

\vec{q} Hacim başına düşen birim yük yoğunluğu (A/ m²)

μ Manyetik geçirgenlik (Henry/m)

ϵ Dielektrik sabiti (Farad/m)

σ Elektriksel iletkenlik (simens/m)

Serbest uzayda manyetik geçirgenlik ve dielektrik sabiti değerleri; $\mu_0; 4\pi 710\text{--Henry/m}$, $\epsilon_0; 8,854 \times 1210\text{-- Farad/m}$ 'dir.

σ , ϵ , μ tensör nicelikleridir ve doğrusal olmayabilir. Aslında bütün uygulanabilir GPR konuları için, bu nicelikler bağımsız alan skaler nicelikleri gibi davranmaktadır.

1.8.3. Zaman Ortamında EM Dalga Denklemleri

Zaman ortamında elektrik alan ve manyetik alan dalga denklemlerini bulmak için Maxwell eşitlikleri ve katkı eşitliklerini beraber kullanmak gerekmektedir.

a) Elektrik alan dalga denklemi

(1.33) denkleminde sırasıyla aşağıda verildiği gibi (1.37)-(1.39) denklemleri yerleştirilerek elektrik alan dalga denklemi elde edilir.

$$\nabla \times \vec{E} = -\left(\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}\right) \xrightarrow{\vec{B} = \mu \vec{H}} \nabla \times \vec{E} = -\left(\frac{\partial \mu \vec{H}}{\partial t}\right) \xrightarrow{\mu \rightarrow s\mu t} \nabla \times \vec{E} = -\mu \left(\frac{\partial \vec{H}}{\partial t}\right) \quad (1.40)$$

Bu denklemde her iki tarafın rotasyoneli (döneli) alınır;

$$\begin{aligned} \nabla \times \nabla \times \vec{E} &= -\mu \left(\frac{\partial (\nabla \times \vec{H})}{\partial t} \right) \xrightarrow{\nabla \times \vec{H} = \vec{j} + \left(\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}\right)} \nabla \times \nabla \times \vec{E} = \\ & -\mu \left(\frac{\partial \left(\vec{j} + \left(\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}\right) \right)}{\partial t} \right) \xrightarrow{\substack{\vec{j} = \sigma \vec{E} \\ \vec{D} = \epsilon \vec{E}}} \end{aligned} \quad (1.41)$$

$$\begin{aligned} \nabla \times \nabla \times \vec{E} &= -\mu \left(\frac{\partial \left(\sigma \vec{E} + \left(\frac{\partial \epsilon \vec{E}}{\partial t}\right) \right)}{\partial t} \right) \xrightarrow{\sigma \text{ ve } \epsilon \text{ s\text{b}t}} \nabla \times \nabla \times \vec{E} = \\ & -\mu \sigma \left(\frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right) - \mu \epsilon \left(\frac{\partial \left(\frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right)}{\partial t} \right) \end{aligned} \quad (1.42)$$

ve

$$\nabla \times \nabla \times A = \nabla(\nabla A) - \nabla^2 A \quad (1.43)$$

(1.43) özelliği kullanılarak, zaman ortamında elektrik alan dalga denklemi aşağıdaki gibi elde edilir (Sadiku, 1992).

$$\nabla^2 \vec{E} = \mu\sigma \left(\frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right) + \mu\varepsilon \left(\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \right) \quad (1.44)$$

b) Manyetik alan dalga denklemi

(1.33) eşitliği için yapılanlar (1.34) manyetik alan eşitliği içinde yapılır. Buna göre;

$$\begin{aligned} \nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \left(\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) \xrightarrow{\substack{\vec{J} = \sigma \vec{E} \\ \vec{D} = \varepsilon \vec{E}}} \nabla \times \vec{H} = \sigma \vec{E} + \left(\frac{\partial \varepsilon \vec{E}}{\partial t} \right) \xrightarrow{\varepsilon s b t} \nabla \times \vec{H} = \\ \sigma \vec{E} + \varepsilon \left(\frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right) \end{aligned} \quad (1.45)$$

Bu denklemde her iki tarafın rotasyoneli (döneli) alınırsa;

$$\begin{aligned} \nabla \times \nabla \times \vec{H} = \sigma \left(\frac{-\partial(\mu \vec{H})}{\partial t} \right) + \varepsilon \left(\frac{\partial \left(\frac{-\partial(\mu \vec{H})}{\partial t} \right)}{\partial t} \right) \xrightarrow{\mu s b t} \nabla \times \nabla \times \vec{H} = \\ \sigma \mu \left(\frac{-\partial \vec{H}}{\partial t} \right) + \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \left(-\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \right) \end{aligned} \quad (1.46)$$

$$\nabla \times \nabla \times \vec{H} = \sigma \mu \left(\frac{-\partial \vec{H}}{\partial t} \right) + \frac{\varepsilon \mu \partial}{\partial t} \left(-\frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \right) \quad (1.47)$$

(1.43) özelliği kullanılarak, zaman ortamında manyetik alan dalga denklemi aşağıdaki gibi elde edilir (Kurt, 2009).

$$\nabla^2 \vec{H} = \mu\sigma \left(\frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \right) + \mu\varepsilon \left(\frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} \right) \quad (1.48)$$

Elde edilen manyetik ve elektrik alan dalga denklemleri için yüksek frekanslarda, elektrik alan dalga denklemi

$$\nabla^2 \vec{E} = \mu\epsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \quad (1.49)$$

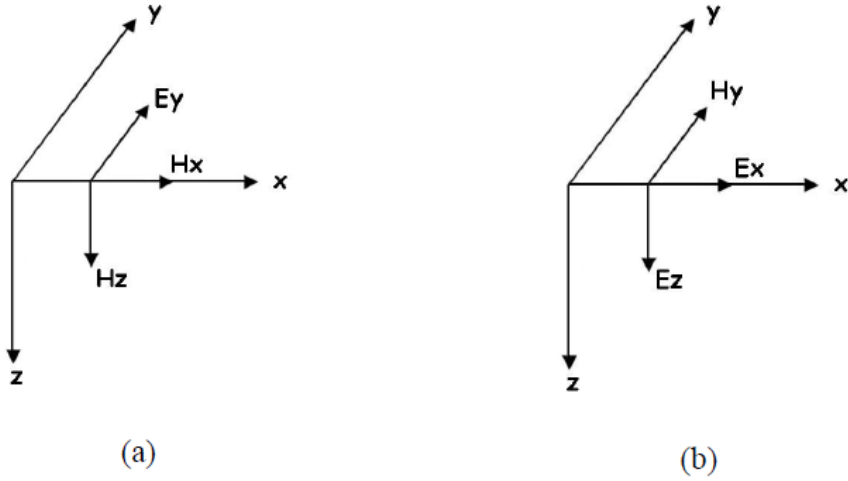
ve manyetik alan dalga denklemi

$$\nabla^2 \vec{H} = \mu\epsilon \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} \quad (1.50)$$

olarak yazılır. Bu denklemler yüksek frekanslarda, yaklaşık olarak 100 kHz' ten büyük değerler için kullanılan denklemlerdir. Yer radarı yönteminde kullanılan denklemler de bu denklemlerdir (Kaplanvural, 2011).

c) TE (Enine Elektrik Alan) ve TM (Enine Manyetik Alan) Modları İçin Elektrik ve Manyetik Alan Denklemleri

TE ve TM modları ile ilgili bilgiler ilerleyen bölümlerde ayrıntılı olarak verilecektir. Elektromanyetik dalga yayılım doğrultusuna göre TE ve TM modlarına ayrılarak incelenmelidir. Düzlemsel tabaka sınırlarında birbirinden bağımsız iki farklı elektromanyetik alan vardır. Elektrik alan vektörü tabaka düzleminde olduğu zaman TE modu, manyetik alan vektörü tabaka düzleminde olduğu zaman ise TM modu söz konusudur (Balkaya, 2010). TE modunda birbirine dik iki manyetik alan bileşeni ve bu manyetik alan bileşenlerine dik bir elektrik alan bileşeni, TM modunda ise birbirine dik iki elektrik alan bileşeni ve bu elektrik alan bileşenlerine dik bir manyetik alan bileşeni söz konusudur.



Şekil 1.19. a) TM modu ve b) TE modu için EM alan bileşenleri

❖ TM modu için alan denklemleri

TM modunda x ve z yönünde zamanla değişen manyetik alan ve manyetik alana bağımlı olarak oluşan elektrik alan vardır (Şekil 1.19). x ve z yönündeki elektrik alan ve y yönündeki manyetik alan bileşenleri sıfır kabul edilir. Bu duruma göre;

$$H_z \neq H_x \neq E_y \neq 0 \quad \text{ve} \quad H_y = E_x = E_z = 0 \quad (1.51)$$

olarak ifade edilir (Irving ve Knight, 2006). Bu durumda TM modu için elektrik alan denklemleri ;

$$\frac{\partial E_y}{\partial x} = \mu \frac{\partial H_z}{\partial t} \quad (1.52)$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial z} = -\mu \frac{\partial H_x}{\partial t} \quad (1.53)$$

ve manyetik alan denklemleri (1.54) de görüldüğü gibi yazılır;

$$\sigma E_y + \varepsilon \frac{\partial E_y}{\partial t} = \frac{\partial H_z}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial z} \quad (1.54)$$

❖ TE modu için alan denklemleri

TE modunda x ve z yönünde zamanla değişen elektrik alan ve elektrik alana bağlı olarak değişen bir manyetik alan vardır (Şekil 1.19). x ve z yönündeki manyetik alan ve y yönündeki elektrik alan bileşenleri sıfır kabul edilir. Bu duruma göre;

$$H_y \neq E_x \neq E_z \neq 0 \quad \text{ve} \quad H_x = H_z = E_y = 0 \quad (1.55)$$

olarak ifade edilir (Irving ve Knight, 2006). Bu durumda TE modu için manyetik ve elektrik alan denklemleri;

$$\frac{\partial H_y}{\partial x} = -\varepsilon \frac{\partial E_z}{\partial t} - \sigma E_z \quad (1.56)$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial z} = \varepsilon \frac{\partial E_x}{\partial t} + \sigma E_x \quad (1.57)$$

$$\mu \frac{\partial H_y}{\partial t} = \frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x} \quad (1.58)$$

olarak yazılır.

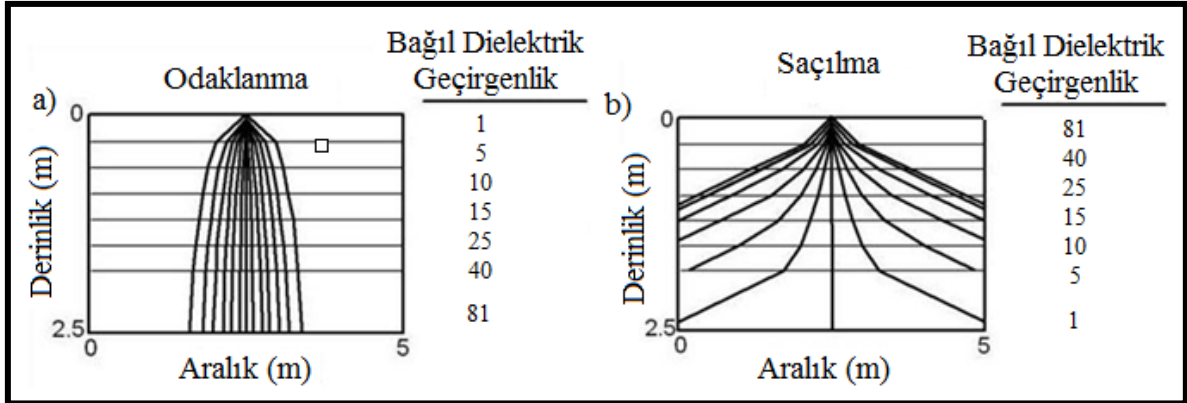
1.9. Yer Radarı Sinyallerinin Oluşturulması ve Yayınımı

Mevcut yer radarı sistemlerinde çoğunlukla iki oktav bant genişliğine sahip dipol antenler kullanılır. Bunun anlamı, antenden üretilen frekansların merkez frekansın yarısı ile iki katı arasında çeşitlilik göstermesidir. Örneğin 300 MHz merkez-frekansına sahip bir anten, frekansı 150 ile 600 MHz arasında değişen dalga boylu sinyaller üretir (Conyers ve Goodman, 1997). Dipol antenler genellikle nikelle kaplı alüminyum metal çubuk şeklindedir ve çapları birkaç milimetreden 20 mm'ye kadar değişir. Anten uzunluğu, antenden çıkan darbenin genişliğine bağlıdır. 8 ile 12 ns arasında değişen darbe genişliği için gereken anten boyu 0.9 ile 1.2 m arasında iken, 1-2 ns'lik daha ince darbeler için dipol antenin boyu 0.15 ile 0.4 m arasında değişmektedir. Bu yüzden, darbe genişliğini arttırmak için daha uzun anten gereklidir (Parasnis, 1997). Yer radarı antenleri sadece tek bir darbe

değil, her biri aynı şekle ve süreye sahip, genellikle 2 den 50 μ s'ye kadar değişen belirli aralıklarda ilerleyen darbeler dizisi oluşturur. Bu darbeler dizisinde arka arkaya gelen iki darbe arasındaki aralığın tersi tekrarlanma frekansı (f_r) olarak adlandırılır. Tipik tekrarlanma frekansı 20-500 kHz aralığındadır. Tek bir darbenin süresi genelde 1 ile 100 ns arasında değişir (Parasnis, 1997).

Yer radarı sistemleri yeraltına elips şeklinde bir koni biçiminde yayınan radar ışınları göndermektedirler ve bu yayının doğrusal bir hat değildir (Annan ve Cosway, 1992, 1994; Arcone, 1995; Davis ve Annan, 1989). Elips şeklindeki iletim konisi genellikle ilerleme doğrultusuna ya da antenin uzun eksenine paralel doğrultuda uzanmaktadır. Fresnel bölgesi olarak adlandırılan bu koni yer radarı çalışmalarında, radar dalgasının yansıdığı alanı tanımlar ve yatay çözünürlük olarak da ifade edilir. Yatay çözünürlük, Fresnel bölgesinin bir fonksiyonu olarak verilmektedir. Fresnel bölgesinin boyutu, dalga boyu, ışınım örüntüsü ve derinlik tarafından belirlenir. Işınım örüntüsü, bir antenin ışınım gücünün konum ve açığa göre dağılımının bir ölçüsüdür ve korumalı ya da korumasız yatay elektrik dipol anteni tarafından üretilir. Korumalı antenler, ışınım örüntüsünün yukarı yönde yayılımını azaltır. Bu tür bir mekanizmaya sahip antenden yayınım enerjisi, anten üzerinde konumlandırılan düzenekler ile (metal plakalar ve benzeri) yüzeyden geri yansıtılır.

Yeraltının dielektrik özelliğindeki değişimler, radar dalgalarının ara yüzeylerde farklı açılarda kırılmasına neden olmaktadır ve bu durum yansıyan radar dalgalarını etkilemektedir. Yeryüzünden yeraltına doğru bağıl dielektrik geçirgenlik katsayısının artışı, radar dalgalarının ara yüzeylerde daha dar bir açıyla kırılmasına (Şekil 1.20a) ve konik radar dalgalarının yer içine daha fazla odaklanmasına yol açar (Goodman, 1994). Eğer radar dalgaları daha yüksek bağıl dielektrik geçirgenlikli ortamlara doğru hareket ediyorsa, bu odaklanma etkisi artan bir biçimde oluşmaya devam eder.



Şekil 1.20. Derinlikle bağıl dielektrik geçirgenlik katsayıları (a) artan ve (b) azalan yeraltı modeli için dalga kırılma etkileri (Conyers ve Goodman, 1997).

Derinlikle oluşan kırılma ve bunun sonucu olarak odaklanma miktarı Snell Yasası ile açıklanabilir (Sheriff, 1984). İki ortam arasındaki sınırdaki kırılmaya ya da yansıma miktarı, radar dalgasının bu ara yüzeye geliş açısına ve hızına bağlıdır. Artan derinlikle bağıl dielektrik geçirgenlik katsayılarındaki artış, radar dalgalarının ortamda ilerleme hızının azalmasına ve geliş açısının küçülmesine, iletim konisinin daha fazla odaklanmasına neden olur. Radar dalgaları yeraltına artan derinlikle ilerlerken, yeraltının bağıl dielektrik geçirgenlik değeri yavaş yavaş azalıyor, iletim konisi her ara yüzeyde daha geniş açıda kırılarak, genişler ve saçılır (Şekil 1.20b).

Yeraltının bağıl dielektrik geçirgenlik değeri artma eğilimi gösteriyorsa, radar ışınları odaklanma eğilimi gösterir. Bu nedenle, yüksek bağıl dielektrik geçirgenlik değerine sahip alanlarda çalışma yapılırken, arandığı tüm yer altı yapılarının belirlenebilmesi için radar profillerinin aralığı sıklaştırılmalıdır.

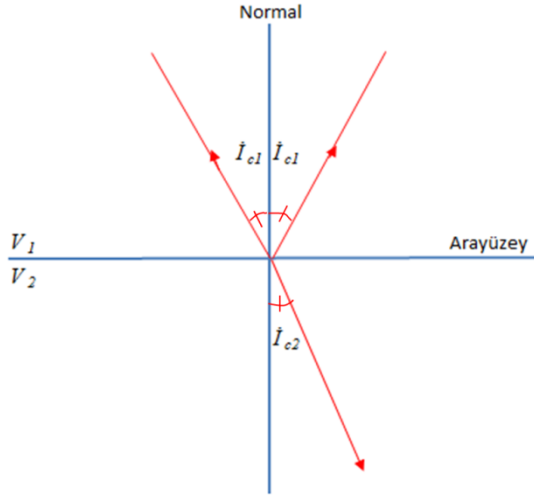
1.10. Yer Radarı Sinyallerinin Ara Yüzeylerde Yansıması, Kırılması ve İletimi

Yer radarı yönteminin temelleri, tıpkı sismikte olduğu gibi, yeraltına gönderilen darbe biçimli enerjinin bir kısmının yeraltında bulunan farklı arayüzeylerden geriye yansıması ve kırılmasına dayanır. Radar enerjisi akustik değil elektromanyetik enerjidir ve arayüzeyler ortamların dielektrik özelliklerindeki farklılıklara göre oluşur.

Elektromanyetik dalgaların herhangi bir ara yüzdeki davranışı "Snell Kanunu" ile açıklanır. Snell kanununa göre eğer bir dalga iki ortamı ayıran bir sınırdan geçerse yansıyan ve kırılan dalgalar ortaya çıkar. Bu kanun yansıyan ve kırılan ışınların genliği

konusunda bilgi vermez fakat yansıyan ve kırılan ışınların normale olan doğrultularını gösterir ve genellikle (1.59) bağıntısı ile verilir.

$$\frac{\sin i_{c1}}{V_1} = \frac{\sin i_{c2}}{V_2} \quad (1.59)$$



Şekil 1.21. Ara yüzeye gelen dalganın sınıra çarptıktan sonra enerjinin yansıyan ve iletilen dalgalara aktarılması (Annan, 2005).

Yer radarı verilerinde, yeryüzünde bulunan alıcıya ilk ulaşan doğrudan gelen hava dalgasıdır. Bu dalgaların kayıtçılara en önce ulaşmalarının nedeni, radar dalgalarının hava içinde ışık hızına yakın hızlarda seyahat etmesidir. Doğrudan gelen hava dalgasının seyahat süresi kolayca hesaplanabilir ve nispeten sabit bir değerdedir. Bu dalgaların varış zamanları genellikle veri işlem tekniklerinden olan statik düzeltmede kullanılır (varış süresi bir işaretleyici olarak kullanılır). Bir sonraki geri dönüş; doğrudan gelen yer dalgasıdır. Bu tür radar dalgaları yeraltının üst yüzeyi boyunca seyahat ederler. Daha sonraki geri dönüşler; dielektrik ara yüzeylerden geriye dönen yansımalarıdır. Bu yansımalar yüzeydeki alıcıya yansydıkları arayüzeylerin yeraltında buldukları derinlik sırasına göre ulaşırlar. Bu, yüzeye yakın olanın derinde olandan daha kısa sürede alıcılar tarafından kaydedilmesi anlamına gelir.

Radar dalgaları arayüzeylerden yansıyabileceği gibi kırılabilir. Ancak bunlar iki boyutlu radargramlarda genellikle elde edilememektedir. Kırılan radar dalgaları radargramlarda oldukça karmaşık görüntüler oluşturmaktadır ve bunlar henüz ayrıntılı bir biçimde analiz edilememektedirler.

Radar kesitlerinde geri dönüşlerin şiddeti ve varış zamanları, radar dalgalarının yayılım hızları ve sinyalin sönümlenme oranından etkilenmektedir. Yansıma ve iletim katsayıları ile elektromanyetik dalganın genliğinin herhangi bir ara yüzeyde nasıl değiştiği açıklanabilir. Tabakalı bir ortamda, radar enerjisi zemin içine verici bir anten ile gönderilmektedir. Gönderilen bu sinyal yer altında farklı dielektrik özelliğe ya da farklı yayılım hızlarına sahip ortama ulaşana kadar devam eder. Sinyal bu sınıra ulaştığında, sinyalin bir kısmı geliş açısına eşit bir açıyla geriye yansırken, geri kalan enerji diğer ortama iletilir. Sınır ötesinde iletilen enerjinin genliği ise azalır. Ancak, bu iletilen enerji daha derinlerdeki uygun ara yüzeylerde de yansıma olasılığına sahiptir. Yansıyan enerji miktarı, farklı iki ortamın bağıl dielektrik geçirgenlik katsayılarının farkı ile orantılıdır. Yeraltındaki ortamların bağıl dielektrik geçirgenlik değerleri azar azar değiştiğinde, yansıtılabilirlik özelliğinde küçük farklar oluşacaktır ve bu durumda sadece zayıf yansımalar oluşacaktır. Tam tersi durumda ortamlar arasındaki bağıl dielektrik zıtlığın artması, oluşacak yansımaların genliğinin büyümesine sebep olacaktır.

Daha öncede söylenildiği gibi yansıma ve iletim katsayıları, elektromanyetik dalganın genliğinin herhangi bir ara yüzeyde nasıl değiştiğini açıklar ve bu katsayılar ortamın dielektrik özelliklerine bağlı olarak değişmektedir. Yansıma katsayısı, yansıyan dalga genliğinin gelen dalga genliğine oranıdır. İletim katsayısı da, iletilen dalga genliğinin gelen dalga genliğine oranı olarak tanımlanır. Bu iki katsayı, ara yüzeyin üstünde ve altındaki zeminin dielektrik sabiti kullanılarak hesaplanmaktadır (Wilchek, 2000). Bu noktada elektromanyetik dalganın doğası hakkında daha ayrıntılı düşünüldüğünde yayılma doğrultusunda birbirinden bağımsız iki ayrı bileşen vardır (Annan, 2005).

Eğer, ϵ_{r1} birinci ortamın permittivitesi, ϵ_{r2} ise ikinci ortamın dielektrik permittivitesini gösterirse, iletim ve yansıma katsayıları (R: Yansıma katsayısı, T: İletim katsayısı);

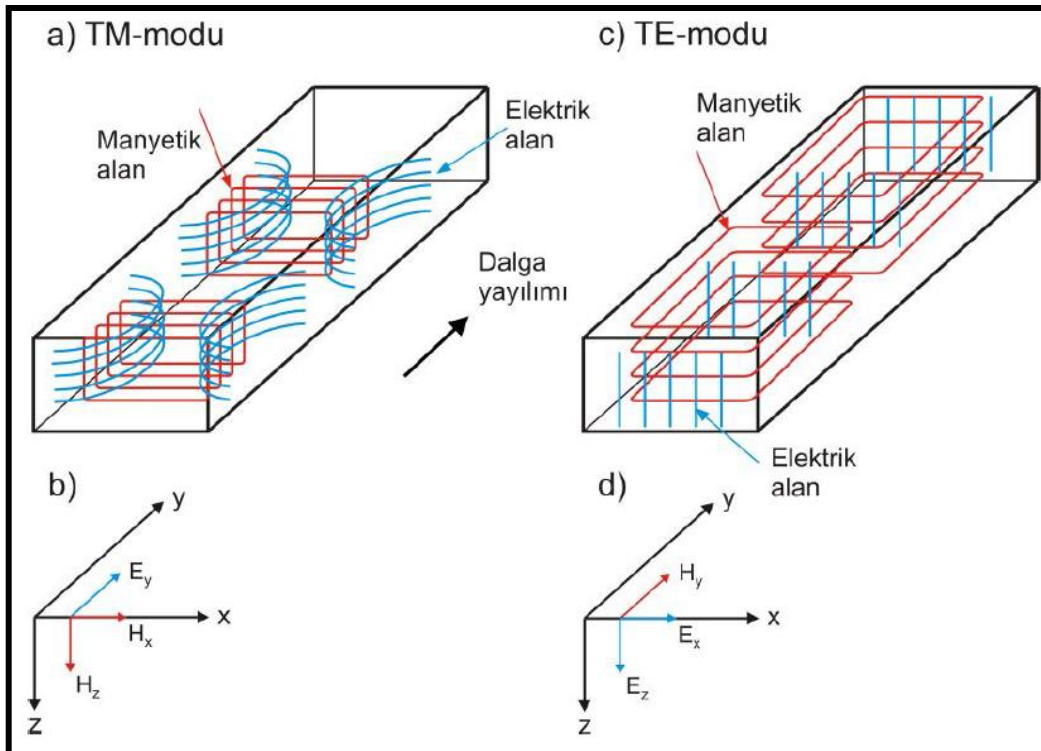
$$R = \frac{\sqrt{\epsilon_{r1}} - \sqrt{\epsilon_{r2}}}{\sqrt{\epsilon_{r1}} + \sqrt{\epsilon_{r2}}} \quad (1.60)$$

$$T = \frac{2\sqrt{\epsilon_{r2}}}{\sqrt{\epsilon_{r1}} + \sqrt{\epsilon_{r2}}} \quad (1.61)$$

bağıntılarıyla ifade edilir.

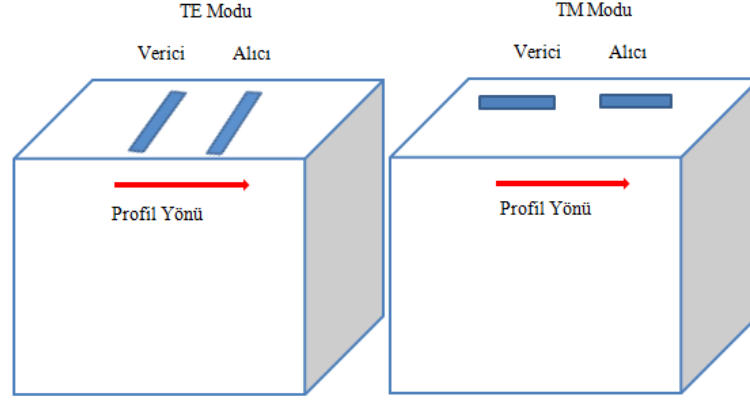
EM dalgalar, enine dalga alanlarıdır. Gelen dalga, düzlemsel bir sınırla karşılaştığı zaman, bu sınıra uygun yönelimlere sahip olan iki bileşene ayrılır. Bu dalga modları TE (Enine elektrik alan) ve TM (Enine manyetik alan) olarak adlandırılır (Şekil 1.22). TE modunun elektrik alan bileşeni ara yüzeye paralel iken ve TM modunun manyetik alan bileşeni ara yüzeye paraleldir.

TM-modunda, manyetik alan yayılım doğrultusuna diktir ve bu doğrultuda herhangi bir bileşeni yoktur (Şekil 1.22a). Elektrik alan bileşenleri ise, her yönde olabilmektedir, çünkü bu alanın boyuna bileşeni, ortamın tüm sınırlarına teğettir (Guru ve Hızıroğlu, 2004). TM-modunun tersine, TE modunda elektrik alan, yayılım doğrultusuna diktir ve manyetik alan bileşenleri her yöndedir (Guru ve Hızıroğlu, 2004) (Şekil 1.22c).



Şekil 1.22. (a) TM-modu ve (b) alan bileşenleri (c) TE-modu ve (d) alan bileşenleri (Balkaya, 2010).

Elektromanyetik dalga alanının TE ve TM olarak iki moda ayrılarak incelenmesi tamamen anten geometrisinden kaynaklanmaktadır. Eğer alıcı ve verici antenlerin yönü profil doğrultusu ile aynı ise TM modu, profil yönüne dik ise TE modu söz konusudur (Şekil 1.23).



Şekil 1.23. Anten durumlarına göre TE ve TM modları (van der Kruk vd., 2006'dan düzenlenmiştir).

Elektromanyetik alan TE ve TM bileşenlerine ayrıldığında yansıma ve kırılma katsayıları TE modu için;

$$T = \frac{E_r}{E_i} = \frac{Z_2 \cos \vartheta_i - Z_1 \cos \vartheta_t}{Z_2 \cos \vartheta_i + Z_1 \cos \vartheta_t} \quad (1.62)$$

$$R = \frac{E_t}{E_i} = \frac{2Z_2 \cos \vartheta_i}{Z_2 \cos \vartheta_i + Z_1 \cos \vartheta_t} \quad (1.63)$$

$$1 + T = R$$

TM modu için;

$$T = \frac{E_r}{E_i} = \frac{Z_2 \cos \vartheta_t - Z_1 \cos \vartheta_i}{Z_2 \cos \vartheta_t + Z_1 \cos \vartheta_i} \quad (1.64)$$

$$R = \frac{E_t}{E_i} = \frac{2Z_2 \cos \vartheta_i}{Z_2 \cos \vartheta_i + Z_1 \cos \vartheta_i} \quad (1.65)$$

$$1 + T = R \frac{\cos\vartheta_t}{\cos\vartheta_i} \quad (1.66)$$

olarak verilir (Balanis, 1989). Burada Z_i i'inci tabaka için elektromanyetik empedansları ifade etmektedir. Bu duruma göre yansıma katsayılarının değeri negatif veya pozitif olabilir. Burada enerjinin korunumu sağlanmıyormuş gibi görünse de aslında enerji korunur (Sadiku, 1995).

1.11. Yer Radarı Sinyal Ölçümü

Yer radarı sistemleri kavramsal olarak basittir. Verici anten ve elektroniği, alıcı anten ve elektroniği, kontrol ünitesi (sistem), kayıt ünitesi ve gösterim ünitesinden oluşur. Kontrol ünitesi, radar sinyal üretimini ve daha sonra zamanın bir fonksiyonu olarak gelen sinyalleri kontrol eder. Verici elektroniği ve verici anten çifti, yayılan sinyalin frekansını ve şeklini belirler. Alıcı elektroniği ve alıcı anten, verici elektroniği ve anteni özelliklerine göre tanımlıdır. Yer içinden yansımış veya saçılmış sinyal alıcı anten aracılığı ile alıcı elektroniğine ulaştırılır. Amaç zamanın bir fonksiyonu olarak gelen sinyalin genlik değişimini ölçmektir. Kayıt ünitesi, alıcı ünitesinden gelen sinyali kaydeder. Gösterim ünitesi, her bir kayıt noktasında elde edilen sinyalin kayıt ekranında görüntülenmesini sağlar.

Yer radarı sistemleri kavramsal olarak basit olmasına karşın, sisteminin kullanımı oldukça önemli ve dikkat gerektirir. Sistem yanlış ve dikkatsiz kullanıldığı takdirde elde edilen radargramlar karmaşık bir hal almaktadır. Örneğin; sistem açıldığında belirli bir süre beklenmesi gerekir, beklenmediği takdirde elde edilen radargramlarda hava dalgaları oluşmaktadır. Antenlerin düzgün taşınması, antenin yeryüzünden olan yükseklik etkisi de önemlidir. Gerçek arazi durumlarında, yüzey pürüzlülüğü ve antenlerin yüzey üstünde taşınması gerekliliği yakın yer bağlantısını sınırlandırabilir. Anten yüksekliği anten yönelimini değiştirmektedir. Yüksek taşındığında sinyal daha çok havaya doğru verilir ve anten etkinliği azalır. Ayrıca yerden olan yakın yansımalar anten üzerinde zaman gecikmeli tekrarlılar oluşturur. Yer radar sinyalleri üzerinde anten yönelimi de oldukça önemlidir. Teorik ve pratik çalışmalar, radar enerjisinin en yüksek değerinin anten dipolüne dik şekilde yayındığını göstermiştir. Bunun anlamı, yapılacak herhangi bir yer

radarı çalışması mümkün olduğunca uzanımı bilinen ya da kestirilen yapılara dik yönde yapılmalıdır (Leckebush, 2003).

1.12. Sinyal Hızı ve Derinlik Belirlenmesi

Yeraltında seyahat eden radar dalgalarının hızlarının belirlenmesi, araştırılan yapıların derinliklerinin hesaplanabilmesi açısından en önemli parametredir. Eğer hız belirlenebilirse, elde edilen radargrama ait bir derinlik eksenini oluşturulabilir. Genelde radar yazılımları otomatikman bir radargram için tek bir derinlik skalası oluşturmaktadır. Derinlikle ya da hat boyunca çabuk hız değişimlerinin olduğu yerlerde, hat içerisindeki farklı birimler için derinlik skalası elle oluşturulabilir.

Boşlukta ya da hava içinde elektromanyetik enerji ışık hızında (yaklaşık 0.3 m/ns) hareket eder. Hava içinde ışık hızında yayılan enerjinin bir kısmı kırılarak yer içinde genelde 0.01-0.16 m/ns arasında değişen hızlarda hareket etmektedir. Hem dielektrik katsayı hem de elektrik iletkenlik bu ortamlarda yayılan radar dalgalarının hızlarını büyük oranda etkiler (Moorman, 2001). Radar dalgalarının yayılım hızlarının tahmini,

$$v = \frac{c}{(K'(\sqrt{1+\tan^2\delta}+1))/2} \quad (1.67)$$

$$v = \frac{0.3}{\sqrt{\epsilon_r}} \text{ (m/ns)} \quad (1.68)$$

denklemleriyle verilir. Burada c ; ışık hızı, K' ; ortalama bağıl dielektrik katsayısı, ϵ_r bağıl dielektrik geçirgenlik, $\tan \delta$ ise (1.21) eşitliği ile verilen kayıp tanjantını ifade etmektedir.

Çeşitli ortamlardaki radar enerjisinin tipik yayılım hızları Tablo 1.2' de verilmiştir. Su içerisindeki elektromanyetik dalgaların yayılım hızı çoğunlukla sabit olarak kabul edilmektedir ve tabloda görülen fiziksel parametreler kullanılarak, özellikle gölsel alanlardaki çalışmalarda suyun derinliği hesaplanabilir. Ancak özellikle yeraltında tortul tabakalar gibi farklı gözeneklilik ve su içeriğine sahip ortamların yayılım hızları çok çeşitlilik gösterir ve bu tür ortamların kalınlığının ölçülmesinde hızın belirlenmesi büyük önem taşır. Eğer sondaj açma olanağı varsa, yayılım hızı doğrudan arazide yapılan derinlik ölçümleri ile belirlenebilir. Eğer böyle bir imkân yoksa hız değeri gelen varışlar ve yatay

ara yüzeylerden oluşan yansımaların kullanıldığı ODN (ortak derinlik noktası) ölçüm tekniği kullanılarak ya da sabit ofsetli ölçümler yapılarak elde edilmiş radargramlardan nokta kaynakların yansımalarının analiz edilmesiyle belirlenebilir. İkinci ve üçüncü yöntemler nispeten güçlü ve basit yansımali ortamlardaki üst tabakaların hızlarının belirlenmesi için daha uygundur (Moorman, 2001).

Sabit ofsetli radargramlardan yapılan hız hesaplama çalışmalarında, radargramdaki nokta-kaynak yansıtıcı veya yatay ara yüzey için aynı bağıntı uygulanır. Bu durumda seyahat zamanı için

$$t^2 = \frac{x^2}{v^2} + t_0^2 \quad (1.69)$$

bağıntısı yazılabilir.

Burada x hız çalışmasındaki antenler arasındaki mesafe ya da bir profildeki nokta kaynak yansıtıcıya olan yanal ofset uzaklığını, v yayılım hızını ve t_0 ofsetdeki tek yönlü seyahat süresini göstermektedir (Telford vd., 1976). Hızı hesaplamak için (1.69) bağıntısı tekrar düzenlenecek olursa,

$$v = \frac{x}{\sqrt{t^2 - t_0^2}} \quad (1.70)$$

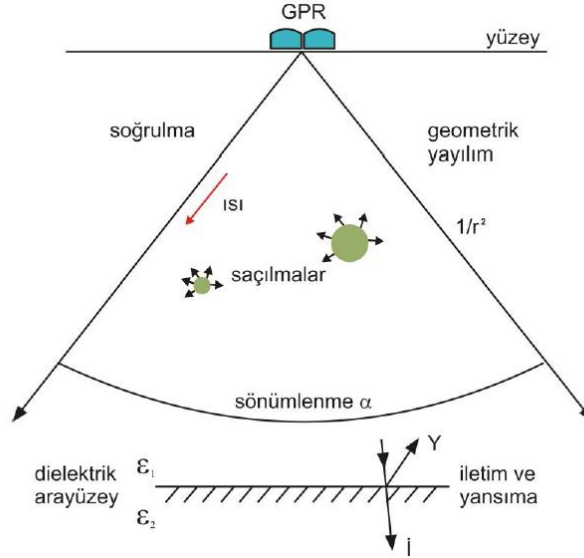
bağıntısı elde edilir.

Hız hesaplamalarında unutulmaması gereken husus, radar dalgasının seyahat zamanı ve kesin derinlik değerleri, o derinliğe kadar olan tabakaların hepsinin hızına bağlıdır. Bu yüzden radargramlardaki yansımaların şekli yorumlanırken bu etki mutlaka göz önünde bulundurulmalıdır.

1.13. Sinyalin Sönümlenmesi

EM radar sinyali, tabakalı bir ortamda, bir ara yüzey ile karşılaştığı zaman, sinyalin bir kısmı bu ara yüzeyden yansırken, kalan kısmı diğer ortama iletilir. Bu olay esnasında ve artan derinliğin de etkisiyle, iletilen radar enerjisinin genliğinde kayıplar meydana gelir. Ortamda, sinyalin dalga boyuna eşit büyüklükte nesnelere olması durumunda ise bu

nesnelere rastgele enerji saçılmaları olmaktadır (Reynolds, 1997). Ayrıca, EM enerji, bir miktar ısı enerjisine dönüşerek kaybolur ve radar sinyali, 90°'lik bir açı ile konik olarak seyahat ederken enerjisi birim alanda $1/r^2$ oranında azalır (Şekil 1.24).



Şekil 1.24. Sinyalin sönümlenmesi (Reynolds, 1997'den düzenlenmiştir).

Enerji kaybının temel nedeni sönümlenme olayıdır. Sönümlenme, sinyalin seyahat ettiği ortamın elektrik özelliklerinin ve dielektriğinin karmaşık bir fonksiyonu olarak tanımlanabilir (Reynolds, 1997). Dolayısıyla, sönümlenme veya soğrulma faktörü (α); ortamın, elektrik, manyetik ve dielektrik özelliklerine bağlıdır. Leckebush (2003), radar sinyallerinin yer içinde artan derinlikle hızlı bir biçimde sönümlendiğini ve genliklerinin de çok çabuk biçimde azaldığını ifade etmiş ve bunu dalgaların küresel yayılımının uzaklığı ile ters orantılı olarak azalmasıyla açıklamıştır. Leckebush (2003)'a göre, sönümlenme esasen yerin iletkenliğinin bir etkisidir. Eğer ortamın bağıl dielektriklik katsayısı ve iletkenlik değeri biliniyorsa, herhangi bir x mesafesindeki sönümlenme (α) aşağıdaki bağıntı yardımıyla hesaplanabilir.

$$e^{-\alpha x}, \quad \alpha = 1.69 \frac{\sigma}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (1.71)$$

Sönümlenme katsayısı (α) için benzer bir ifadeyi Moorman (2001), (1.72) bağıntısıyla vermiştir.

$$\tan^2 \delta = \sigma_{DC}(\omega K' \varepsilon_0)^{-1} \quad \text{ve} \quad c = 2.998 * 10^8 \text{ms}^{-1}$$

ise

$$\alpha = \omega c^{-1} \{ [K'((1 + \tan^2 \delta)^{0.5} + 1)] / 2 \}^{0.5} \quad (1.72)$$

Moorman (2001)'a göre, elektrik iletkenlik ve dielektrik etkisi baskın olan bir ortamdaki sönümlenme katsayısı (α) ise, (1.73) ya da (1.74) bağıntısıyla elde edilebilir. Çeşitli yeraltı ortamlarının sönümlenme oranı Tablo 1.2'de verilmektedir.

$$\alpha \approx (60\pi\sigma_{DC}) / (K')^{0.5} (\text{m}^{-1}) \quad (1.73)$$

$$\alpha \approx 1.64\delta / (K')^{0.5} (\text{dBm}^{-1}) \quad (1.74)$$

Elektromanyetik enerjinin soğurulma kayıpları, toprağın su içeriğinin artmasının yanı sıra, ortamdaki tuz türleri ve miktarı ile farklılık göstermektedir. Aynı zamanda, yüzeydeki toprak tabakası içerisindeki yüksek miktarda çözünmemiş karbonat konsantrasyonu da yüksek oranda sinyalin sönümlenmesine yol açabilir (Batey, 1987).

Genelde düşük elektrik iletkenlik değerine sahip ortamlar, daha fazla elektromanyetik enerjinin yeraltında yayınımına izin verir ve bu ortamlar düşük bağıl dielektrik geçirgenlik değerine sahiptir. Özellikle suya doymuş ve yüksek kil içeriğine sahip ortamlar yüksek elektrik iletkenliğe sahip oldukları için, elektromanyetik dalgaların yayınımına büyük ölçüde engel olurlar. Bu tür ortamlarda radar enerjisi derinlikle çok hızlı bir biçimde sönümlenir ve radar dalgalarının maksimum penetrasyon derinliği kullanılan anten frekansı ne olursa olsun, bir metreden daha azdır.

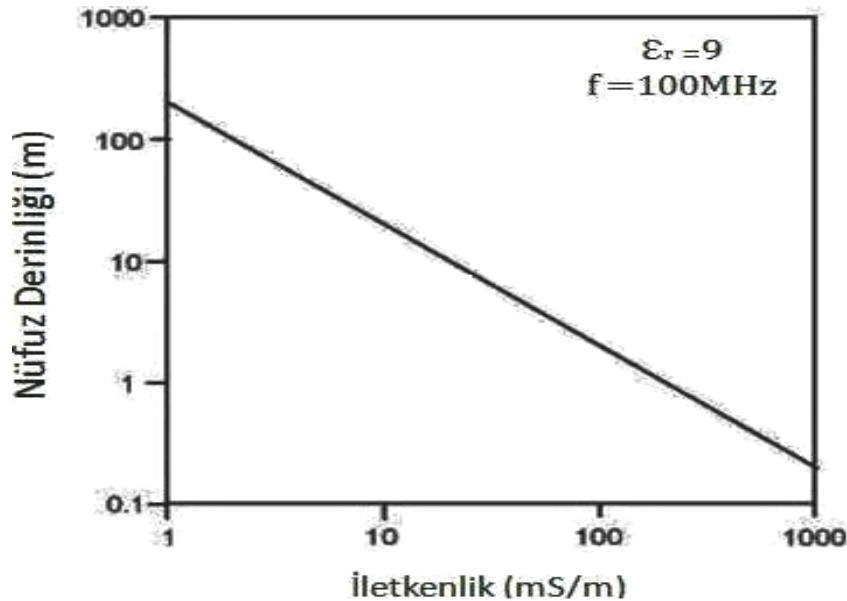
Gerçek radar sinyalinin aralığının saptanabilmesi için; aletsel özellikler, EM dalgalarının yayıldığı ortamın özellikleri (elektriksel iletkenlik, dielektrik katsayısı) ve araştırılması istenen hedefin yüksekliği, uzunluğu, derinliği, eğimi, dalımı gibi parametrelerin de hesaplamaya dahil edilmesi gerekir. Belirli bir uzaklık için toplam kayıp; verici ve alıcı antenlerinin yönlenmesinden kaynaklanan anten kayıpları, hava ve yer arasındaki iletim kayıpları, geometrik yayılımın neden olduğu kayıplar, sönümlenme ve hedeften radar sinyalinin saçılmaları olarak beş bileşenden oluşmaktadır (Reynolds, 1997).

1.14. Nüfuz Derinliği

Araştırma yapılan ortamdaki ara yüzeylerin sayısı ve bu ara yüzeyler arasındaki dielektrik zıtlık; sinyalin sönümlenme oranını, kullanılan antenin merkez frekansını ve yer radarının yeraltını görüntüleyebilme yeteneğini etkiler. Aynı zamanda yer içinde ilerleyen radar dalgalarının nüfuz derinliği üzerinde de etkiye sahiptir.

Radar dalgaları her bir ara yüzeye ulaştığında, dalgaların bir kısmı yüzeye geri dönerken, geri kalan kısım daha derindeki katman ya da katmanların içlerine doğru ilerlemeye devam edebilir. Ara yüzeylerin sayısı arttıkça, derinlere doğru yayılım gösteren enerji miktarında azalma meydana gelir. Özellikle çökel tabakalardaki bölgesel dielektrik farklılıklar, karmaşık yansımalar oluşturulabilir. İlgilenilen yansımalar bu karmaşık yapı nedeniyle maskelenebilir ve bunun sonucunda araştırma derinliği azalabilir (Moorman, 2001).

Elektromanyetik enerjinin yayıldığı ortamın elektrik iletkenliği arttığında, enerji çok hızlı şekilde sönümlenir ve bu nedenle elektromanyetik enerjinin nüfuz derinliği azalır. Bu nedenle, yer radarı sinyalinin içerisinden geçtiği maddenin iletkenliği sinyalin nüfuz edeceği derinlik üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Enerji nüfuz ile elektrik iletkenlik arasındaki ilişki Şekil 1.25’de verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi, ortamın iletkenliğinin artması radar dalgalarının nüfuz derinliğini çok hızlı bir biçimde azaltmaktadır.



Şekil 1.25. Elektromanyetik enerjinin yayıldığı ortamın elektrik iletkenliği ile enerjinin nüfuz derinliği ilişkisi (Moorman, 2001).

Ayrıca kullanılan antenin frekansı da, nüfuz derinliğini etkileyen bir diğer önemli faktördür. Düşük merkez-frekanslı antenler daha uzun dalga boylu sinyaller üretir. Bunun sonucu olarak iletkenlik kayıpları ve ortamda bulunan küçük boyutlu yapılardan kaynaklanan saçılmanın azalması nedeniyle, daha az sönümlenme gerçekleşir. Bundan dolayı, radar dalgaları yerin daha derin kısımlarına ulaşabilir (Tablo 1.1). Ancak düşük frekanslı dalga boyları kullanmanın en büyük dezavantajları, yeraltındaki küçük nesnelere belirlenememesi ve ince tabaka kalınlıklarının ölçülememesidir. Bu durum, yeraltının çözünürlüğünü azaltır (Conyers ve Goodman, 1997).

Eğer d derinlik çözünürlüğü alınırsa uygun frekans;

$$f = 150/d\sqrt{\varepsilon} \text{ MHz} \quad (1.75)$$

ile bulunur. Burada derinlik çözünürlüğü hedeflenen derinliğin %25 i olarak alınır. Çözünürlük ölçütü ve nüfuz derinliği koşulları genelde karmaşa yaratır. Uygulamada buna dikkat edilmelidir. Çözünürlük iz aralığından da etkilenir. Eğer sabit aralıklı profillerde iki iz arası uzaklık (D_x), dalga boyunun $1/4$ ünden daha büyük ise kuramsal olarak tanımlanabilir hedefler belirlenemez. Bu koşul yaklaşık olarak;

$$D_x = 75/f\sqrt{\varepsilon} \text{ (m)} \quad (1.76)$$

ile verilebilir. Diğer bir yaklaşımla her iki işlemde D_x in en fazla araştırma derinliğinin $1/8$ i kadar veya daha az olması gerektiği görülebilir. Anten dizilimleri genelde yan yana olarak yapılmasına rağmen uygulamada uç uca konularak da kullanılmaktadır. Jeolojik uzanımın bilinmesi durumlarında antenler yapıya paralel olarak tutulmalıdır. Uygulamalarda anten aralığı (D_{anten}) araştırma derinliğinin $1/5$ veya daha azı alındığında iyi sonuç verdiği görülmüştür. Derinliğe bağlı olarak amprik bağıntı ise aşağıdaki gibidir.

$$D_{\text{anten}} = (2d)/\sqrt{(\varepsilon - 1)} \text{ (m)} \quad (1.77)$$

Örnekleme frekansının seçiminde örnekleme kuramı göz önünde tutulmalıdır. GPR da kullanılan en yüksek frekans merkezi frekansın 1.5 katı olduğuna göre örnekleme aralığı merkezi frekansın en az 3 katı olmalıdır. Sağlıklı ölçüm için 2 katsayısının da kullanımı önerilir.

1.15. Yapı Belirlenebilirliği ve Çözünürlük

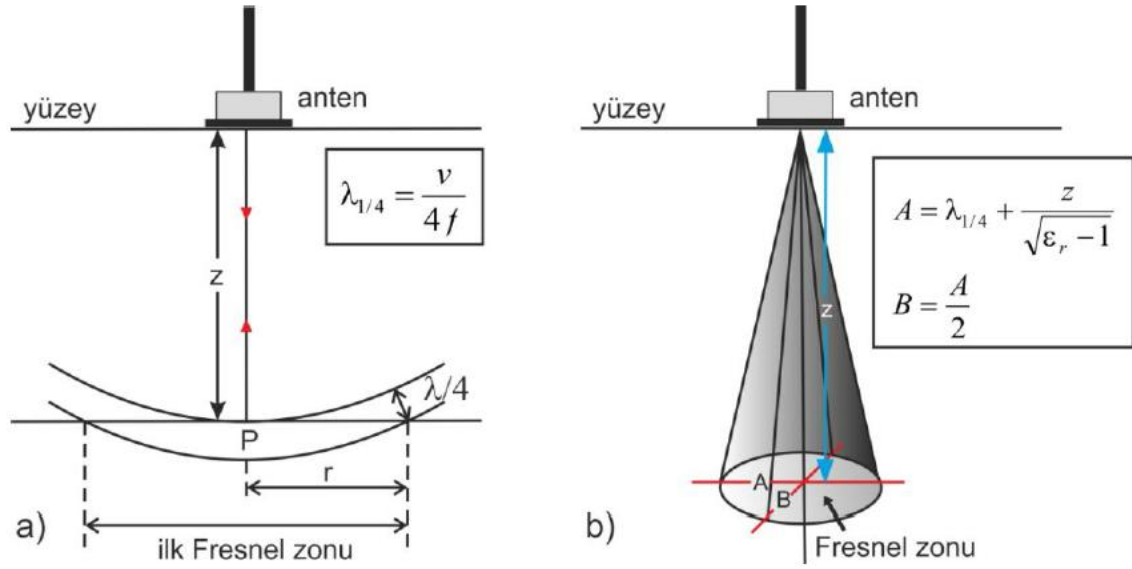
Araştırılacak nesnenin boyutu ya da tabakanın kalınlığının doğru biçimde belirlenebilmesi için, yer radarı sisteminin frekansı ve ortamın yayılım hızı önem taşır. Daha yüksek frekanslı antenler daha kısa dalga boylu radar dalgaları üretir ve bu nedenle bu antenler kullanılarak, daha yüksek çözünürlük elde edilir. Bu durum daha küçük nesnelerin belirlenebilmesini olanaklı kılar. Yine radar darbelerinin yayındığı ortamların farklı fiziksel karakterleri darbelerin bu ortamlar içerisindeki hızlarını etkiler. Eğer bir darbe daha düşük yayılım hızına sahip bir ortamda (örneğin suya doygun bir ortam) ilerliyorsa, bu darbe ortam tarafından daha düşük hızı barındırmaya zorlanır. Bu yüzden söz konusu ortamın hız bilgisinin elde edilmesi, yeraltı yapılarının boyut ve derinliklerinin doğru biçimde tanımlanabilmesini sağlar.

1.16. Düşey ve Yanal Ayrımlılık

Düşey ayrımlılık, zaman ortamında, birbirine komşu iki sinyal arasındaki farklılıkların bir ölçümüdür (Reynolds, 1997). Daha basit bir tanımlama ile düşey ayrımlılık, frekansın bir fonksiyonudur ve dalga boyu (λ) ile kontrol edilir.

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (1.78)$$

Frekans değeri büyüdükçe, düşey ayrımlılık da artar (Neal, 2004). Yer radarı sistemlerinde, her bir anten belirli bir frekans aralığında (bandwidth) çalışmaktadır. 100 MHz'lik bir anten için merkez frekansta 100 MHz'dir. Merkez frekans, sinyal periyodu (ns) ile ters orantılıdır. Sinyal periyodu 10 ns olan ıslak toprak için ($v = 0.06$ m/ns) dalga uzunluğu, eşitlik (1.78)'den 0.6 m olarak hesaplanabilir. Düşey ayrımlılık teorik olarak dalga boyunun $\frac{1}{4}$ 'üne ($\lambda/4$) karşılık gelir (Şekil 1.26) ve 0.15 m olarak bulunur. Dolayısı ile tabaka kalınlığının veya araştırılan nesnelerin, dalga boyunun $\frac{1}{4}$ 'ünden küçük olması durumunda, bu tabakanın ve nesnenin radargramlarda izlenebilmesi zordur. Anakaya ve toprak için, üç farklı frekans değerinde teorik olarak hesaplanmış düşey ayrımlılık değerleri Tablo 1.4'de verilmiştir.



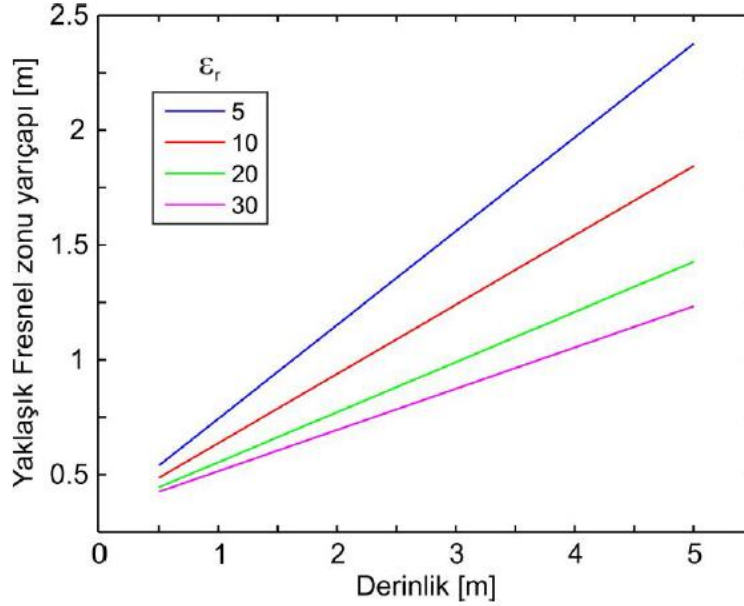
Şekil 1.26. a) Arayüzeyden yansımaya ilişkin bir diagram. Üstte 'anten' ve 'yüzey' etiketleri var. Anten yüzeyden z yüksekliğindedir. Bir dikdörtgen kutu içindeki denklem: $\lambda_{1/4} = \frac{v}{4f}$. Aşağıda, yüzeyden yansıyan dalgaların bir kısmının ilk Fresnel zonu olarak tanımlanan bir bölgeyi oluşturduğunu gösteren bir kesit çizimi. Bu bölgenin genişliği r , derinliği z ve yansıma açısı $\lambda/4$ olarak belirtilmiştir. b) Fresnel zonu (Conyers ve Goodman 1997'den düzenlenmiştir). Üstte 'anten' ve 'yüzey' etiketleri var. Anten yüzeyden z yüksekliğindedir. Bir dikdörtgen kutu içindeki denklemler: $A = \lambda_{1/4} + \frac{z}{\sqrt{\epsilon_r - 1}}$ ve $B = \frac{A}{2}$. Aşağıda, Fresnel zonu olarak tanımlanan bir bölgeyi gösteren bir kesit çizimi. Bu bölgenin genişliği A ve B olarak belirtilmiştir. z ise derinliği göstermektedir.

Tablo 1.4. Anakaya ($v = 0.11$ m/ns) ve toprak ($v = 0,075$ m/ns) için üç farklı frekans değerinde hesaplanan düşey ayrımlılık değerleri (Reynolds, 1997).

Malzeme		Anten frekansı (MHz)		
		120	500	900
Anakaya	Dalga boyu (cm)	92	22	12
	Düşey ayrımlılık (cm)	23	5,5	3
Toprak	Dalga boyu (cm)	62,5	15	8
	Düşey ayrımlılık (cm)	15,6	3,75	2

Yanal ayrımlılık ise Fresnel zonunun (Şekil 1.26a) genişliği ile ilişkilidir. Bu ise, dalga boyu ve yansıtıcının derinliğine bağlıdır (Neal, 2004). Genel olarak, şekil 1.26'dan da görüldüğü gibi, derinlik arttıkça, yayılan enerji dolayısıyla ilk Fresnel zonu yanal yönde genişlemektedir. Bunun neticesinde, yanal yönde ayrımlılık azalmakta ve birbirine yakın hedeflerin ayrımı güçleşmektedir (Reynolds, 1997). Şekil 1.27 ise 100 MHz merkez frekansına sahip bir antenin, sırasıyla bağlı dielektrik geçirgenlik katsayıları 5, 10, 20 ve 30

olan bir ortam için hesaplanan yaklaşık Fresnel zonu değerlerinin derinlik ile değişimini göstermektedir.



Şekil 1.27. Bağlı dielektrik geçirgenlik ve derinlik ile Fresnel zonu yarıçapının değişimi (Conyers ve Goodman, 1997'den düzenlenmiştir)

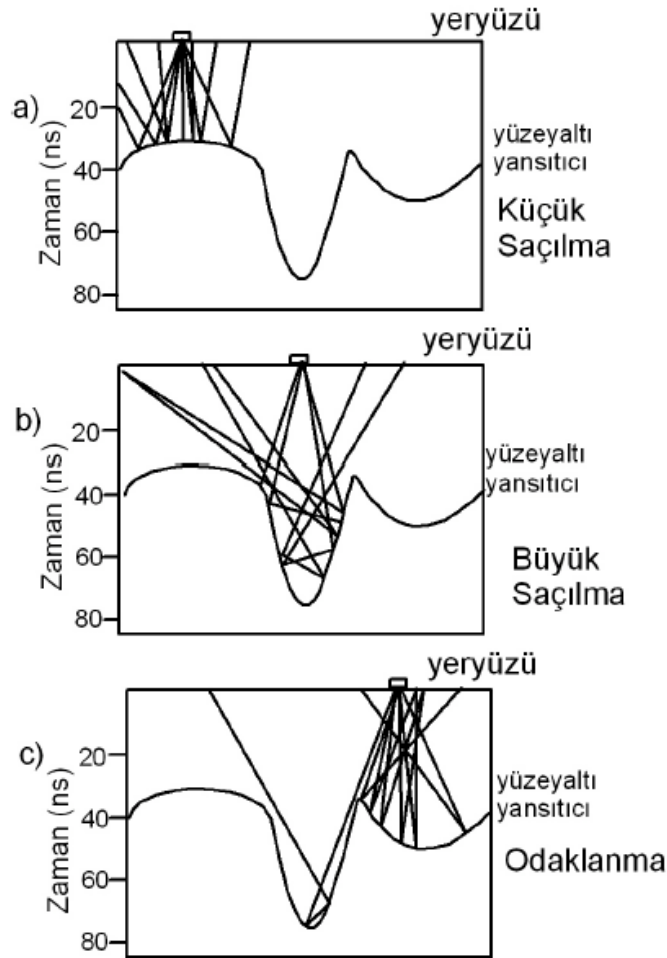
Buna göre, derinliğin artması bu zonun büyümesine, bağlı dielektrik katsayısındaki artış ise tersine bu zonun küçülmesine neden olmaktadır.

1.17. Odaklanma ve Saçılma Etkileri

Derinlikle artan bağlı dielektrik geçirgenlik değerine sahip ortamlarda iletim demetinin yer içinde odaklanma eğilimi göstermesinin yanında, yansıtıcıların sahip olduğu geometri de sinyalin odaklanmasını sağlayabilir. Sırt ve çukur benzeri gömülü yüzeylerden ortaya çıkan radar yansıması, yeryüzünde bulunan antenin konumu ve bu antenin o gömülü yüzeye göre yönlenmesine bağlı olarak odaklanabilir ya da saçılabilir (Conyers ve Goodman, 1997).

Radar enerjisinin saçılması, yeraltı düzleminin yüzeydeki antenden uzaklaşan şekilde eğimli ya da yukarı doğru bombeli yapıda olması durumunda, radar enerjisinin çoğunun yüzeydeki antenden dışa doğru yansıtılarak çok düşük genlikli yansıma kesitleri elde

edilmesinden oluşur (Şekil 1.28). Bunun tersi bir durum söz konusu iken, yani gömülü yüzey antenlere doğru eğimli ve yukarı bakan çukur şeklinde ise, bu yüzeyden yansıyan enerji odaklanacak ve gömülü yüzeyden kaynaklanan yüksek genlikli yansımalar elde edilecektir.



Şekil 1.28. Farklı anten konumlarında saçılma ve odaklanmayı ortaya koyan gömülü yüzeyin sematik görüntüsü (Conyers ve Goodman, 1997).

Conyers ve Goodman (1997), odaklama ve saçılma etkisini ortaya koymak amacıyla, bir tarafında gömülü bir hendeğin diğer tarafında ise bir taş yığını ya da buna benzer bir yapının bulunduğu, bir ortamı Şekil 1.28 ile göstermiştir. Antenler yeryüzü boyunca çekildiğinde hem iç bükey hem de dış bükey yapılar radar hüzmeleri tarafından aydınlanacaktır. İlk olarak sistemin hendeğin solunda olduğu düşünülmüştür. Söz konusu yüzeyden oluşan yansımaların bir bölümü yüzeydeki alıcı antene doğru yönelmesine rağmen, enerjinin bir kısmı saçılmaktadır ve bu durumda elde edilecek radargramda zayıf

bir yansıma kaydedilecektir. Daha sonra antenlerin tam hendeğin üzerinde yerleştirildiği düşünülmüştür. Bu durumda, radar enerjisinde yüksek derecede bir saçılma oluşacak ve yansıyan enerjinin büyük bir kısmı, özellikle de hendeğin kenarlarından yansıyan kısım, yeryüzünde bulunan alıcı antenden uzaklaşacak ve kaybolacaktır. Bu durumda elde edilen radargramda bu hendek yapısı görünmez olacaktır. Son olarak, sistem hendeğin sağında bulunan genişçe çukurun üzerine yerleştirildiğinde ise, yansıyan radar enerjisi odaklanacak ve daha yüksek genlikte radar kesitleri elde edilecektir.

1.18. Yakın-alan Etkisi

Yeryüzünde bulunan verici antenden yayılan elektromanyetik enerji anten civarında sahip olduğu merkez frekansının yaklaşık 1.5 katı dalga boyu kadar yarıçapa sahip bir elektromanyetik alan üretir (Balanis, 1989; Engheta vd., 1982; Sheriff, 1984). 10, 100 ve 1000 MHz merkez frekansı değerine sahip antenler için, bu etki yaklaşık olarak sırasıyla 30 m, 3 m ve 30 cm'dir. Bu alan içerisinde kalan yeraltı bölgesinin sanki antenin bir parçasıymış gibi davranması nedeniyle bu alan içerisinde hiç ısınım gerçekleşmez ve teknik olarak radar yayılımı yoktur. Bu yakın-alan etki bölgesi genellikle yer radarı kesitlerinde herhangi bir yansımanın olmadığı bölge olarak ortaya çıkar. Fisher vd. (1992) bu bölgeyi girişimin yakın-yüzey bölgesi olarak adlandırmıştır.

1.19. Radar Anten Frekansının Seçimi

Yer radarı çalışmalarında doğru anten frekansının seçimi, ilgilenilen yapıların çözünürlüğü ve araştırma derinliğinin belirlenebilmesi için verilmesi gereken en önemli karardır (Huggenberger vd., 1994; Smith ve Jol, 1995). Dalga boyu, sistemin çözünürlüğünü etkileyen önemli bir parametredir. Dalga boyundaki artış, diğer bir ifadeyle anten frekansı değerinin düşmesi, yeraltı çözünürlüğünü azaltırken, gerekli araştırma derinliğinin artmasını sağlar.

Kullanılan antenin merkez frekansı (f), yeraltında yayılan sinyalin baskın dalga boyunu (λ) belirler. Ancak bu kavram, yerin etkisiyle geriye dönen sinyalin merkez frekansı ile karıştırılmamalıdır. Yeraltındaki yayılım frekansı, yayılım hızı ve yere yayılan enerji miktarının yanı sıra çökel ve toprak özelliklerine bağlı olarak değişim

gösterir. Bu frekans değerinin yeraltında ne olacağını tahmin etmek oldukça güçtür (Leckebush, 2003).

Nüfuz derinliği ile yeraltı çözünürlüğü arasında karşılıklı bir değişim söz konusudur. Farklı-merkez frekans değerine sahip antenler için baskın dalga boyu ve bu antenlerin farklı bağıl dielektrik geçirgenlik değerine sahip ortamlar içerisindeki dalga boylarındaki değişimler Tablo 1.5’de görülmektedir. Nüfuz derinliği ve yeraltı çözünürlüğü aslında yeraltında sıkça değişim gösterir ve ortamın nem içeriği, gözeneklilik ve farklı gömülü yapı bileşimleri bu değişimi etkiler. Bu yüzden Tablo 1.5 ile verilen değerler sadece genel bir değerlendirmeyi kapsar (Conyers ve Goodman, 1997).

Seçilecek anten frekansının, derinliği ve boyutları bilinen veya tahmin edilen yapıları belirleyip belirleyemedikleri ampirik bağıntıları kullanılarak incelenebilir. Temel olarak, aranılacak yapının kesit alanı hedef derinliğindeki Fresnel bölgesine yaklaşmalıdır. Ortamın bağıl dielektrik geçirgenlik değeri biliniyorsa, bu eşitlik kullanılarak hedeflenen derinlikteki Fresnel bölgesi hesaplanabilir.

Tablo 1.5. Farklı bağıl dielektrik geçirgenlik değerlerine sahip ortamlarda seçilen anten frekanslarına göre radar dalga boylarının değişimi (Conyers ve Goodman, 1997).

Anten Merkez Frekansı (MHz)	Merkez frekansın dalga boyu (Hava içinde)			
	$\epsilon_r = 1$	$\epsilon_r = 5$	$\epsilon_r = 15$	$\epsilon_r = 25$
	Metre			
1000	0.30	0.13	0.08	0.06
900	0.33	0.15	0.09	0.07
500	0.60	0.27	0.15	0.12
300	1.00	0.45	0.26	0.20
120	2.50	1.12	0.65	0.50
100	3.00	1.34	0.77	0.60
80	3.75	1.68	0.97	0.75
40	7.50	3.35	1.94	1.50
32	9.38	4.19	2.42	1.88
20	15.0	6.71	3.87	3.00
10	30.0	13.42	7.75	6.00

Eğer aranılan yapı, Fresnel bölgesinden çok küçük ise gömülü yapıdan yüzeyde bulunan alıcıya sadece yansıyan enerjinin küçük bir kısmı iletilecektir. Bu durumda gömülü yapıdan oluşan yansımalar ortamda bulunan diğer istenmeyen yansımaların maskeleyesi nedeniyle fark edilemeyip yansıma kayıtlarında görünemeyebilir. Bu tür küçük yapılar, ancak elde edilen radargramlara genlik kuvvetlendirme gibi veri-işlem aşamalarının uygulanıp, genlik dilim haritalarının kullanılmasıyla ortaya çıkartılabilir.

Yeraltında aranan yapılar genelde stratigrafik tabakalar veya maden ocaklarının tabanları gibi büyük arkeolojik yapılardan oluşan düzlemsel yüzeyler olabileceği gibi tüneller, yeraltı boşlukları, yeraltına gömülmüş kablolar, su ve kanalizasyon boruları, insan eliyle yapılmış depolama alanları gibi noktasal hedefler de olabilir (Conyers ve Goodman, 1997). Düzlemsel yapılar ortam koşullarından kaynaklanan sınırlamaların dışında, düzlemsel yapının kalınlığı, yönelimi ve gömülü bulunduğu derinliğe bağlı olarak seçilecek herhangi frekans değerine sahip bir antenle görüntülendirilebilir. Düzlem yansıtıcıların tersine, nokta kaynakların daha küçük yüzeylere sahip olmaları nedeniyle bu yüzeylerden yansıyan radar enerjisi daha azdır ve bu tür yapıları düşük frekanslı antenlerle belirleyebilmek daha zordur. Bu yüzden düşük çözünürlüğe sahip sistemlerle bu yapılar kendilerini çevreleyen ortamlardan ayırt edilemezler. Bu tür yapılar çok derinde gömülü olmadıkları sürece, ancak yüksek frekanslı antenler kullanılarak belirlenebilir (Conyers ve Goodman, 1997).

Gömülü bir yapının iki farklı paralel düzlemden oluşan yansımaların ayırt edilebilmesi için bu ara yüzeyler arasındaki uzaklık, ara yüzeylerin arasından geçen radar enerjisinin en az bir dalga boyu kadar olmalıdır (Davis ve Annan, 1989). Eğer bu iki ara yüzey birbirine radar dalga boyundan daha yakın mesafede ise, üst ve alt yüzeylerden oluşan yansımaların girişimi nedeniyle ya yok olacaklar ya da fark edilemeyeceklerdir. Tam tersi durumunda, bu iki ara yüzeyden iki ayrı yansıma elde edilir ve aranılan yapı belirlenebilir. Eğer sadece bir gömülü yüzey haritalanıyorsa ve bu yüzey ortamda bulunan diğer yapılarla karıştırılmayacak şekilde bir yansıma üretiyorsa, o yüzeyden oluşan yansıma dalgaları, ortam içerisine giren radar dalga boyu ne olursa olsun görülebilir. Ancak, bu yüzey, düzensiz ya da dalgalı bir yüzey ise, doğru biçimde görüntülenebilmesi için daha yüksek yeraltı çözünürlüğü gerekmektedir.

Standart bir radar profili söz konusu olduğunda aynı gömülü ara yüzeyden daha düşük frekanslı antenler kullanılarak elde edilen yansımaların görüntüsü daha yüksek frekanslı antenlerin görüntüsüne göre daha yuvarlak diğer bir ifadeyle, keskin olmama

eğilimindedir. Bu durum, düşük frekanslı antenin Fresnel bölgesinin, daha yüksek frekanslı antenin Frensel bölgesinden daha geniş olmasından kaynaklanır ve gömülü ara yüzeydeki küçük düzensizliklerden daha az etkilenir (Annan ve Cosway, 1992).

Düşük frekanslı antenler (10-120 MHz) belirli koşullar altında 50 metreye kadar ulaşabilen uzun dalga boyuna sahip radar enerjisi üretebilir. Ancak bu antenler sadece çok büyük yeraltı özelliklerini çözebilme yeteneğine sahiptirler. Buzun kristal yapısının elektromanyetik enerjinin geçişine izin vermesi nedeniyle, saf buzda düşük frekanslı antenlerin radar enerjisini kilometrelerce derine iletebildikleri bilinmektedir (Olhoeft, 1998). Yüksek frekanslı antenler söz konusu olduğunda ise maksimum nüfuz derinliği, topraktan buza kadar çeşitlilik gösteren ortamlarda, birkaç metreyi geçemez ve ürettikleri yansımalar ancak birkaç cm derinlikte bulunan yapılardan elde edilebilir.

Radar dalgaları yer içine hareket ettikleri zaman, özellikle yüksek frekanslı sinyaller daha fazla sönümlenir. Bu nedenle, spektrum daima daha düşük frekansa doğru kayar ve sinyalin bant genişliği azalır (Engheta vd., 1982). Bunun yanında, özellikle 1.5 GHz'den daha yüksek frekanslarda, su içeren bazı jeolojik ortamlar moleküler gevşemeden oluşan enerji kayıpları nedeniyle yüksek oranda sinyal sönümlenmesi gösterirler (Annan ve Consway, 1994; Olhoeft, 1994).

Çalışılan alanın elektrik ve manyetik özellikleri, gerekli araştırma derinliği, seçilen antenin çalışma alanında kullanılabilirliği ve çalışılacak alandaki olası gürültü içeriği anten frekansını seçerken göz önünde bulundurulması gereken önemli bazı faktörlerdir ve çalışma öncesinde planlanmalıdır. Araştırma derinliği ve yukarıda anlatılan zorluklar göz önünde tutularak frekans değerinin önceden belirlenmesi araştırmanın başarısını arttıracaktır. Genellikle, gerekli araştırma derinliğinin artması, kullanılacak anten frekansı değerinin düşmesi anlamına gelir. Düşük frekanslı antenler daha büyük boyutlarda ve ağırdır. Bu nedenle bu antenlerin çalışma alanı içerisinde taşınmaları yüksek frekanslı antenlere göre çok daha zordur. Aynı zamanda arkeolojik alanlar gibi karelaşmış alanlarda hatlar boyunca çalışılırken, sistemleri hareket ettirebilmek için tekerlekli ya da kızaklı aksamaların kullanılması gerektiğinden, düşük frekanslı antenleri kullanmak oldukça zorlaşmaktadır. Oysa tam tersine, yüksek frekanslı antenler oldukça küçük boyutlardadır ve kolaylıkla taşınabilir (Conyers ve Goodman, 1997).

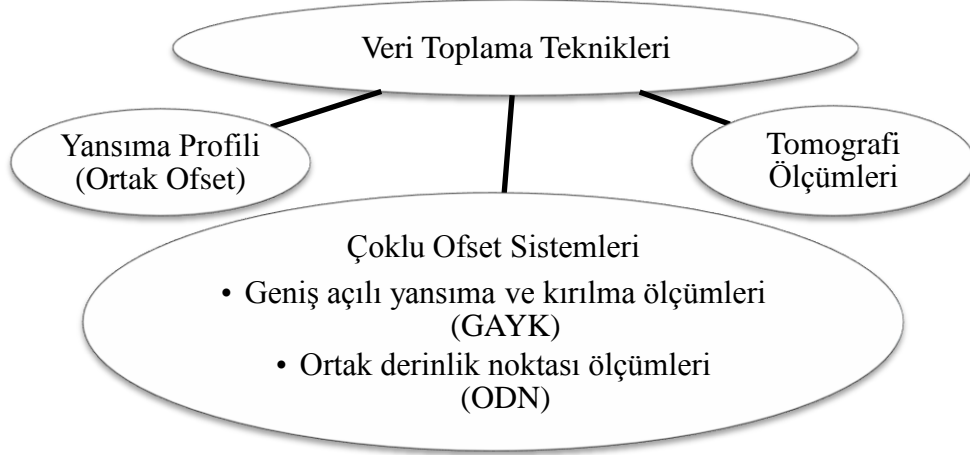
Kullanılacak antenin frekansı, çözümlenecek yapıların boyutları ve yapıları çevreleyen ortamın fiziksel ve kimyasal bileşimi tarafından belirlenir. Çoğu zaman, eğer hedef yapı büyük, geniş düzlemsel bir yüzeye sahip değilse ve ortamda mevcut bir bozucu

etki varsa, aranılan yapının belirlenebilmesi için iletilen radar enerjisinin dalga boyu bozucu etkiye sahip yapının maksimum boyutundan daha büyük olmalıdır. Aynı zamanda, aranılan noktasal kaynak ya da düzlemsel yapılar eğer çok küçük boyutlara sahip ve derine gömülmüşlerse belirlenmesi imkansızdır.

Radar ölçümlerini yapmadan önce, araştırma yapılacak olan çalışma alanının fiziksel koşulları, tahmini hedef derinliği ve geometrisi gibi parametreler kullanılarak yapılacak olan bir modelleme çalışması ile ölçüm için en uygun anten frekansı belirlenebilir.

1.20. Yer Radarı Veri Toplama Yöntemleri

Yer radarı çalışmalarında veri toplama teknikleri aşağıda şematik olarak gösterildiği gibi 3 şekilde gerçekleştirilir.



İlk iki yöntem ile veri toplama aşamasında, verici ve alıcı antenler, birbirlerine ve ilerleme yönüne göre farklı konumlarda olabilirler.

1.20.1. Örnekleme Kriteri

GPR araştırmalarının amacı, radyo dalgalarını kullanarak, dolaylı olarak yeraltı yapılarına ilişkin bilgiler edinmektir. Uzaklığın ve zamanın bir fonksiyonu olarak EM alan örneklenmeli, kayıt edilmeli ve araştırma dizaynı temel örnekleme prensipleriyle bağlantılı

olmalıdır. Zaman ve uzaklık örnekleme aralıkları Δt ve Δx ve V hızıyla yayılan belirli bir sinüzoidal frekans için f , aşağıda gösterildiği gibi olmalıdır (1.79):

$$\Delta t \leq \frac{1}{2f} \quad (1.79)$$

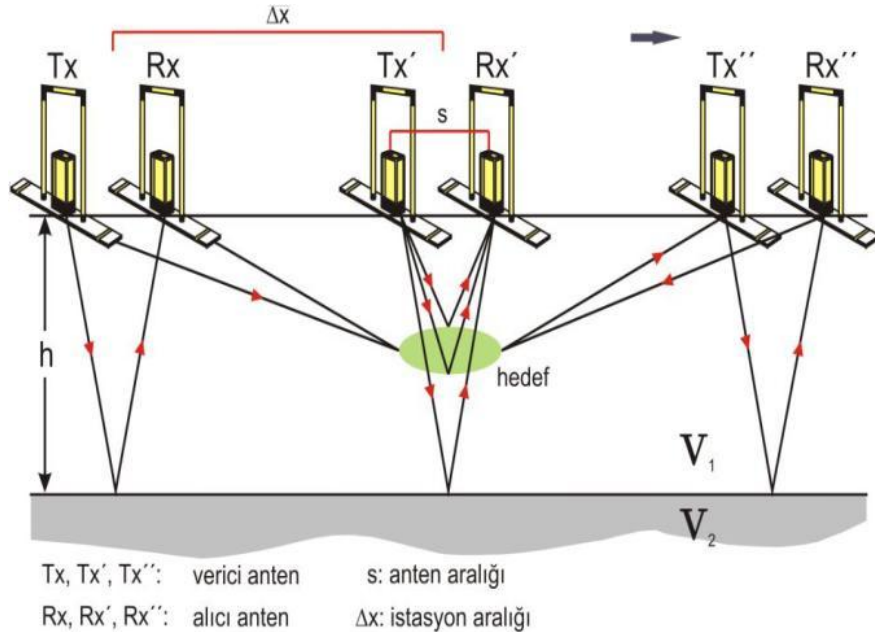
$$\Delta x \leq \frac{V}{2f} \quad (1.80)$$

1.20.2. Yansıma Profili (Ortak Ofset)

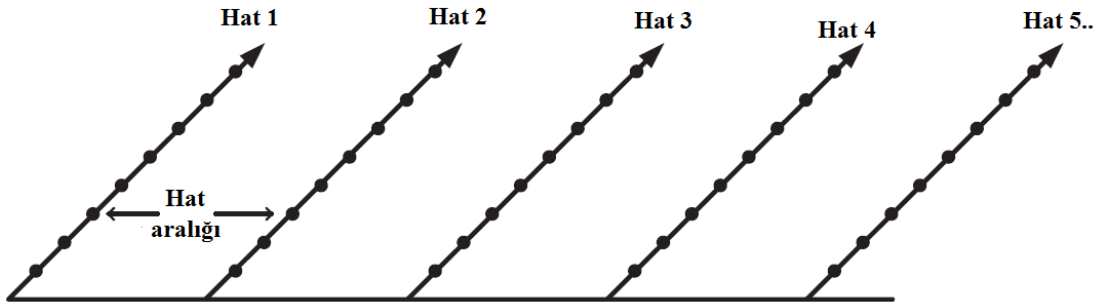
Bu ölçüm düzeneğinde verici ve alıcı antenler, EM alan oluşturmada ve saptamada özel polarizasyon özelliklerine sahiptirler. Tek bir anten kullanılarak sıfır ofsetli veri elde edilir. İki anten kullanılması durumunda, antenler arasındaki mesafe, korumasız antenler için bir dalga boyu, korumalı antenler için ise dalga boyunun yarısı kadar olmalıdır (Blindow, 2006). Antenler sabit bir geometride yerleştirilirler ve ölçümler, düzenli iz aralıklarında (Δx) toplanmaktadır. GPR yansıma ölçümleri geleneksel olarak düz bir profil boyunca sıralanır ve sistemler bu yönde yerleştirilir (Şekil 1.29).

Bu yöntemde, bir veya daha fazla radar anteni, eş zamanlı olarak yer yüzeyi boyunca ilerlerken yeraltı yansıtıcılığının derinliğe bağlı olarak haritalanması amaçlanmaktadır. Buna yönelik olarak, Şekil 1.30 'de gösterildiği gibi; çoğunlukla düz bir profilde grid çizgileri şeklinde araziye kapsayacak biçimde veri toplaması gerekmektedir.

Genel ofset ölçümünü tanımlayan parametreler; GPR merkez frekansı, kayıt zaman penceresi, zaman örnekleme aralığı, iz aralığı, anten aralığı, profil aralığı ve anten yönelimidir.



Şekil 1.29. Yansıtma profili (ortak ofset) yönteminin şematik gösterimi (Annan 2005).



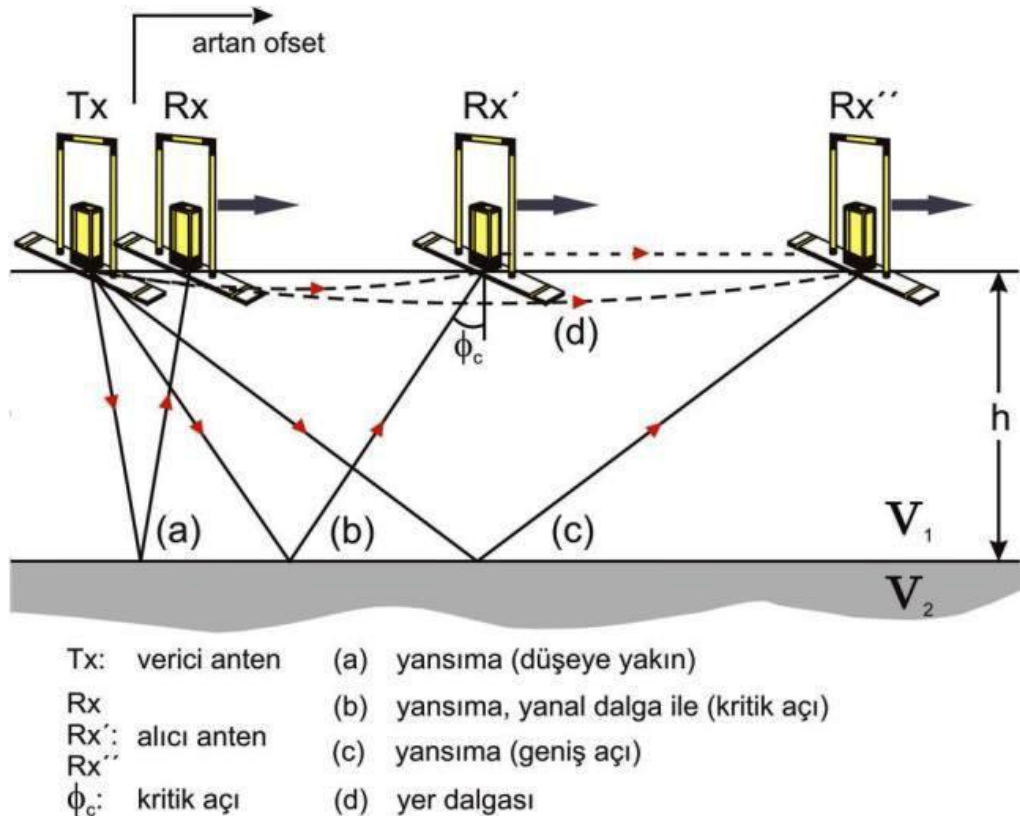
Şekil 1.30. Yansıtıcı yüzeyin haritalanması için olması gereken ölçü profilleri dizilimi

1.20.3. Çoklu Ofset Sistemleri

Çoklu ofset sistemleri ile veri toplama iki şekilde gerçekleşmektedir. Bunlar sırasıyla, geniş açılı yansıtma ve kırılma (GAYK), ortak derinlik noktası (ODN) yöntemleridir. Bu yöntemler, ortak ofset yöntemi ile karşılaştırıldığında zaman alması ve değerlendirmesinin basit olmaması nedeni ile çok sık kullanılmamaktadır (Annan, 2005).

1.20.3.1. Geniş Açılı Yansıma ve Kırılma Ölçümleri (GAYK)

GAYK ölçümlerinde verici anten, başlangıç noktasında sabit kalırken, alıcı anten, ofsetin artırılmasıyla doğrultu boyunca ilerler (Şekil 1.31). Bu yöntemin uygulanabilmesi için, araştırma alanındaki temel yansıtıcı yüzeyin yatay veya eğiminin çok az olması gerekmektedir (Reynolds, 1997).

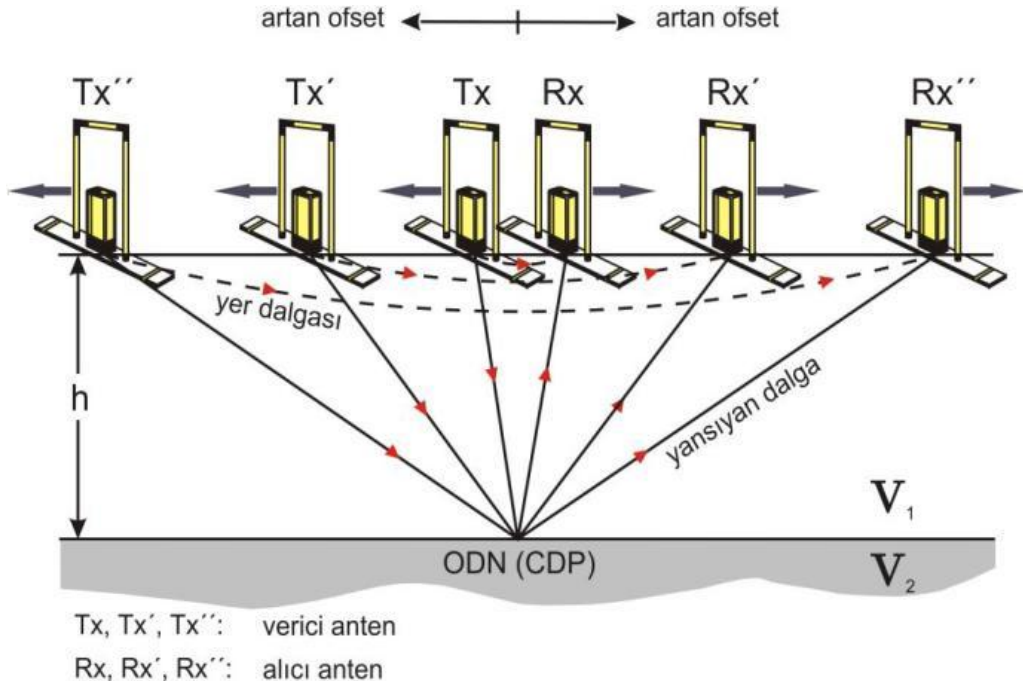


Şekil 1.31. GAYK yönteminin şematik gösterimi (Reynolds, 1997).

1.20.3.2. Ortak Derinlik Noktası (ODN) Ölçümleri

GAYK yöntemindeki söz konusu sıkıntı nedeni ile çoklu ofset ölçümleri için tercih edilen yöntem ODN ölçümleridir. Burada, verici ve alıcı antenler, bir doğrultu boyunca, ortak bir ortak noktadan, eş zamanlı ve eş adım aralıklarında zıt yönlerde hareket ederler (Şekil 1.32) (Blindow, 2006). Radar hızlarının, anten aralığını değiştirerek, yansıma zamanındaki değişikliklerden hesaplanabilmesi bu yöntem için önemli bir üstünlüktür

(Annan, 2005; Milsom, 2003). Çünkü ortak ofset ölçümleri, yansıtıcının derinliğinin bilinmediği durumlarda, özellikle derinliğe karşı sinyalin hızını elde etmek amacıyla kullanılmaktadır.

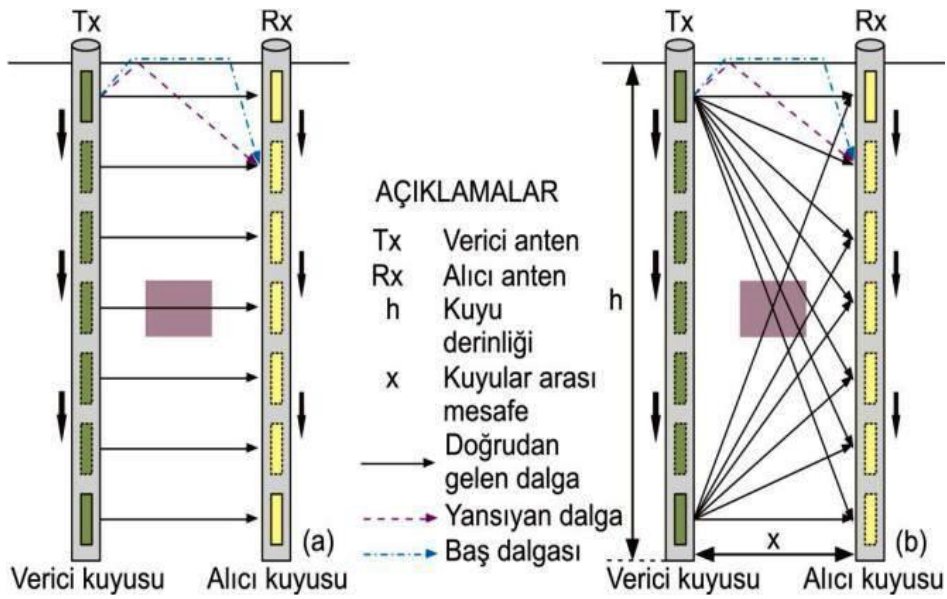


Şekil 1.32. ODN yönteminin şematik gösterimi (Reynolds, 1997).

1.20.4. Tomografi Ölçümleri

Yer radarı tomografi ölçümleri, karşılıklı kuyular arasında gerçekleştirilmektedir. Karşılıklı kuyular arasındaki veri toplama, sıfır ofset profil (SOP) ve çoklu ofset profil (ÇOP) gibi değişik düzenler ile gerçekleştirilebilir (Binley vd., 2002, Rucker ve Ferré, 2004). Bunlardan ilkinde, alıcı ve verici bir istasyondan diğerine eşzamanlı olarak hareket eder (Şekil 1.33a). İkinci düzende ise verici anten, verici kuyusunda bir istasyonda sabit kalırken alıcı kuyusundaki alıcı anten sabit istasyon aralıkları ile kuyu içinde ilerler. Daha sonra, verici anten kuyu boyunca bir sonraki istasyona ilerlerken, alıcı anten ilk istasyondan itibaren aynı adımları tekrarlar (Şekil 1.33b). Her iki teknik avantaj ve dezavantajlara sahiptir (Binley vd., 2002; Rucker ve Ferré, 2004; Cassiani vd., 2006). SOP ile veri toplamak ve yorumlamak hızlı ve kolay iken bu ÇOP ile göreceli olarak biraz daha zordur ve dolayısıyla fazla zaman gerektirir. Radar hızları, SOP ile ilk varış enerjisinin varış zamanlarından saptanır ve ancak bir boyutlu (1B) olarak görüntülenebilir. Bu hızlar,

ilk varışlar doğrudan gelen değil kırılan dalga olduğu durumlarda yanlış olarak belirlenebilir (Rucker ve Ferré, 2004). Bununla birlikte, kuyular arasındaki ortamın dielektrik özelliklerinin iki boyutlu (2B) görüntüsü, her bir verici-alıcı yönelimi için, ışın yolları farklı açılar sunacağından ÇOP ile elde edilebilir. Dolayısı ile bu düzen, tomografik görüntüleme için daha uygundur. Veri toplama esnasında yer-hava arayüzünde kırılan dalganın, doğrudan varışları maskeleyen için kuyu derinliğinin verici ve alıcı kuyular arasındaki mesafenin 2 katından büyük ($h \geq 2x$) olmasına (Şekil 1.33b) dikkat edilmelidir (Annan, 2005, 2009).

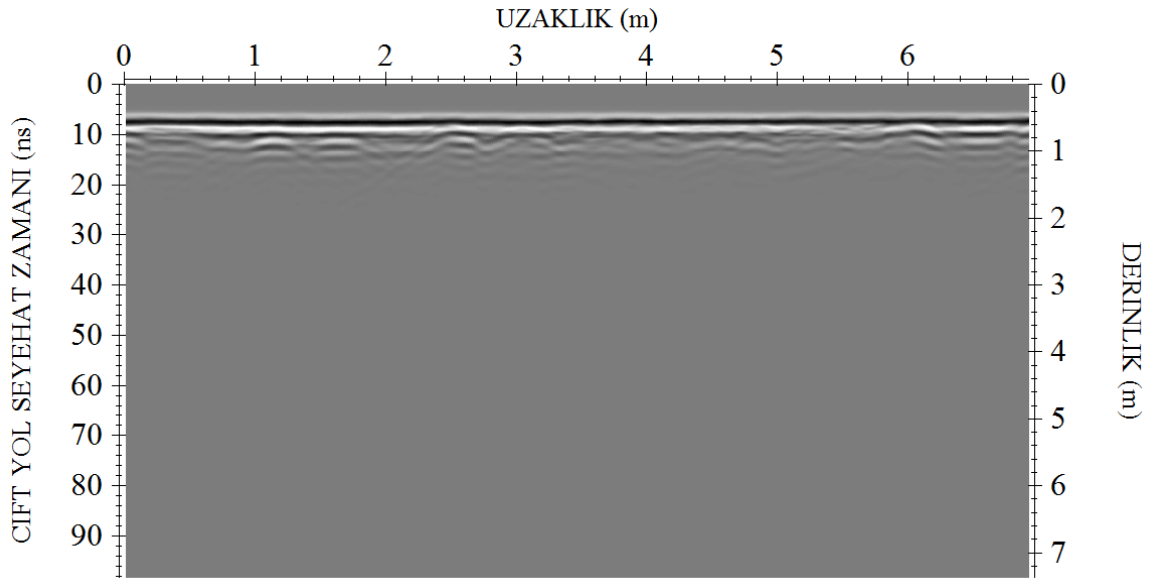


Şekil 1.33. Karşılıklı kuyular arası radar tomografi ölçümlerinin şematik gösterimi a) sıfır ofset profil ve b) çoklu ofset profil (Annan, 2009; Kayen vd., 2002).

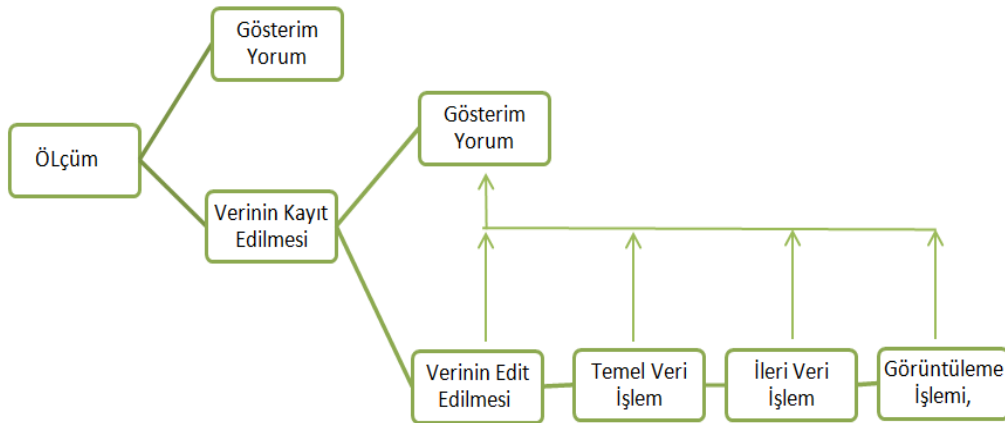
1.21. Yer Radarı Verilerine Uygulanan Veri İşlem Adımları

Yer radarı yöntem gereği; ölçülen ham verilerinden araştırılan ortamın yapısal durumunu incelemek ve yorumlamak zordur. Bundan dolayı, elde edilen bu verileri yorumlayabilmek için bazı veri işlem aşamalarının uygulanması gereklidir. Bir ham yer radarı kesiti, Şekil 1.34'de görülmektedir. Bu kesite bakıldığında herhangi bir değerlendirme yapılamamaktadır. Bunun nedenleri; yöntem gereği oluşan hava ve yer dalgası genliklerinin erken zamanda yüksek genlikli kayıt edilmesi, daha geç zamanlarda ulaşan ortam içerisinden yansıyan sinyallerin genliklerinin zayıf olması ve veri toplarken

çeşitli nedenlerle oluşan yatay bantlaşmaların baskın olmasıdır. Bunlardan dolayı, elde edilen verilere temel/ileri veri işlem adımlarının uygulanması gerekmektedir (Şekil 1.35). Bu çalışmada, ölçülen ham yer radarı verilerine temel veri işlem adımları ve ileri veri işlem adımlarından migrasyon uygulanmıştır. Çünkü inceleme alanının boyutları küçük ve yapısal iç şartları karmaşık değildir. Ayrıca korumalı anten kullanıldığı için çevredeki yüzey yansıtıcılarından herhangi bir yansıma alınmayacaktır.



Şekil 1.34. Ham yer radarı veri örneği.



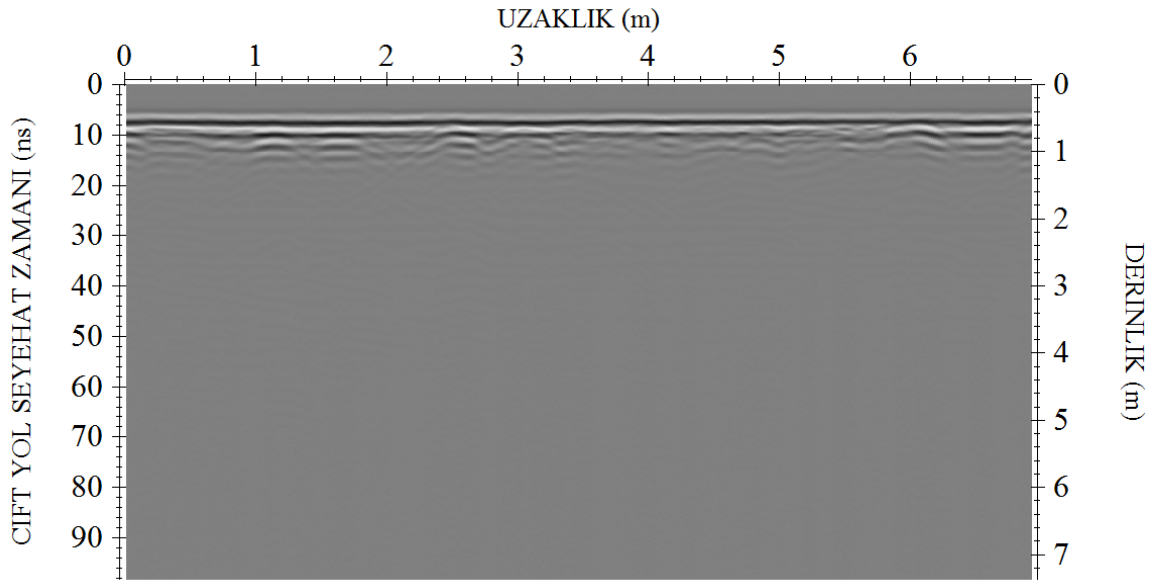
Şekil 1.35. Yer radarı veri değerlendirme akış şeması (Annan, 2001'dan düzenlenmiştir).

1.21.1. Temel Veri İşlem Adımları

1.21.1.1. Düşük Frekanslı İzlerin Giderilmesi (Dewow)

Düşük frekanslı izleri giderilmesini (Dewow) amaçlayan süzgeçleme yöntemi veriden gürültüyü uzaklaştırmak ve doğru Yer Radarı yansımalarını korumak amacıyla uygulanmaktadır. Bu süzgeçleme yöntemi ile veriden düşük frekanslı olaylar uzaklaştırılmaktadır. Yer radarı verilerinde çok düşük frekanslı gürültüler verinin görüntülenmesini engellemektedir. Verilerin çok düşük frekanslar tarafından zarflanmasına “wow” etkisi denir. Bu etkinin giderme işlemine “dewow” denir. Bu süzgeçleme tekniğinde her bir izin her bir değeri için hareketli ortalama değer hesaplanmaktadır. Hesaplanan bu hareketli ortalama değer, merkez noktasından çıkarılmaktadır. Süzgeç parametresi olarak, hareketli ortalama değer için zaman penceresi için bir zaman değeri girilmelidir.

İlk aşama olarak ham veriye dewow uygulanması; Şekil 1.38’de bakıldığında, dewow işlemi uygulandıktan sonra izdeki değişim görülmektedir. Bu işlem ile ilgili daha geniş açıklama Gerlitz vd., (1993)’de bulunabilir (Annan, 2001).

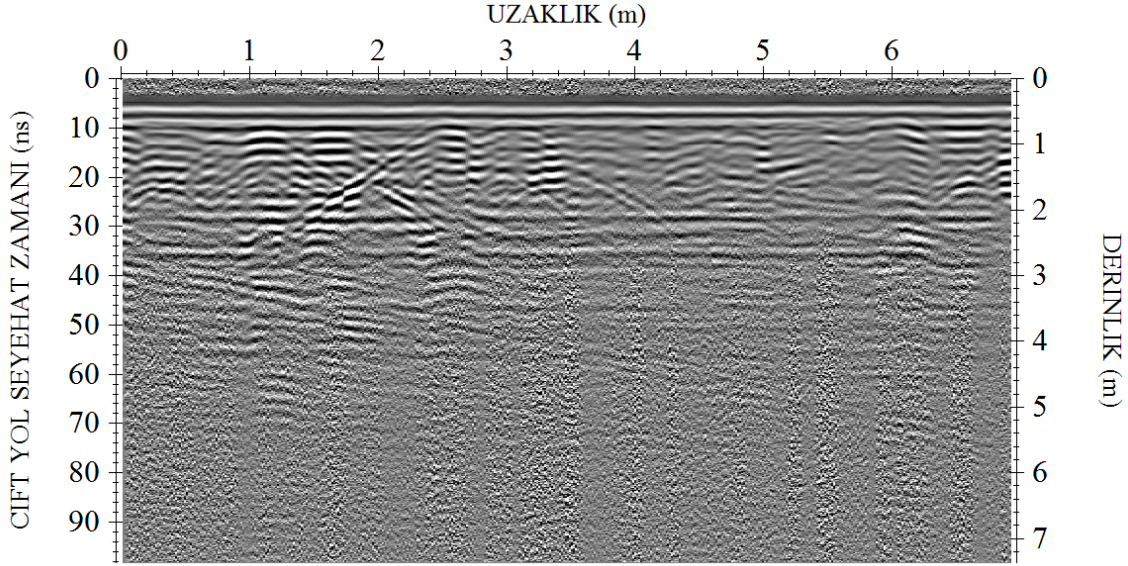


Şekil 1.36. Dewow işlemi uygulanmış yer radarı kesiti

1.21.1.2. Kazanç Fonksiyonları

Dewow uygulanmış veri, analiz ve yorum için kazanç fonksiyonları uygulamalarına uygundur. Derinlikle beraber sinyalin soğurulması sinyalin varış zamanının artmasına ve sinyalin genliğinin önemli derecede azalmasına neden olmaktadır. Bu nedenden dolayı derinlerdeki sinyal genliklerini daha güçlü hale getirmek, tüm sinyal genliklerini eşit duruma getirmek amacıyla veriye kazanç uygulanmaktadır (Mertzianides vd., 2003). Kazanç, GPR kesitlerinin görünürülüğünü geliştirmektedir ve çoğu teknik, veri yapısını bir şekilde değiştirmektedir (örneğin, bağıl genlikler ve/veya faz ilişkileri değişir). Bu yüzden, kazanç fonksiyonlarının etkilerinin önemi uygulanmasından önce anlaşılmalı ve veri yorumlanırken dikkat edilmelidir (Annan, 2001). Geometrik açılım ve sinyal soğurulmasının etkisine bağlı olarak sonraki varışların görünümünü kuvvetlendirmede geçici kazançlar gereklidir. Farklı tipleri vardır örneğin, sabit kazanç, üstel kazanç SEC ve AGC hepsi farklı özelliklere sahiptir. Bütün kazanç fonksiyonları, benzer tarzda, zaman ortamında izin ardı sıra izleyen bölümlerine bazı çarpım faktörleri uygulanarak yapılır. SEC veya 'Energy decay' otomatik olarak sinyal genliğini, yayılan dalga cephesinin geometrik açılımın etkisine ($1/r^2$) bağlı olarak düzeltir. Daha gelişmiş modlarda, malzeme soğurulma kayıpları fonksiyonda artı bir faktör olarak içerebilir (db/m) fakat bunların etkili olabilmeleri için düzgün soğurulma bilgisi gerektirir. Bu durum ODN ve GAYK yöntemleriyle elde edilmede bile zor olabilir ve uygun bir öncü bilgi veya 'en iyi tahmin' kullanılır.

Şekil 1.36 'daki dewow yapılmış kesite kazanç fonksiyonlarından energy decay uygulandıktan sonra elde edilen radargrama bakıldığında kazanç işlemlerinin önemi anlaşılmaktadır.



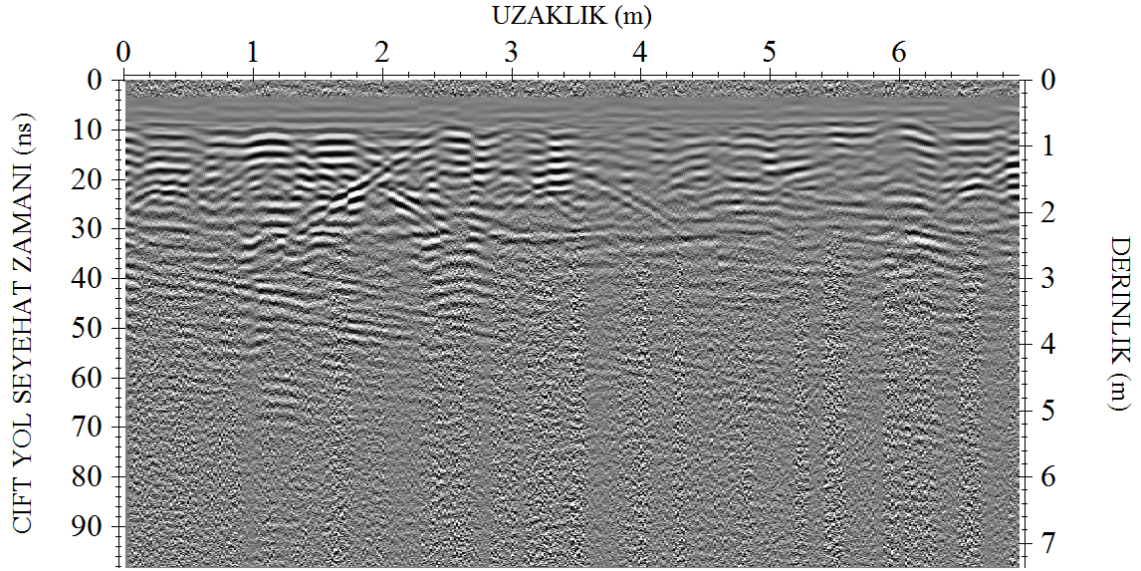
Şekil 1.37. Dewow yapılmış kesite kazanç fonksiyonlarından energy decay uygulandıktan sonra elde edilen radargram.

1.21.1.3. Background Removal

Genellikle Yer Radarı verisi toplanırken, kayıta ilk varış zamanlarında birbirine paralel, yatay bantlar şeklinde olaylar söz konusudur. Bu etkiler Yer Radarı aletlerindeki sistem etkilerinden kaynaklandığı gibi, FM radyo, TV ve cep telefonlarından gelen sinyallerden de kaynaklanmaktadır. Bu veri işlem yüksek geçişli süzgeçler kullanılarak yapılmaktadır (Wilchek, 2000).

GPR verileri için veri-işlem tekniklerinin önemli bir adımıdır. GPR verilerinde genellikle uyumlu gürültünün genel bir türü olan “ringing etkisi” görülmekte ve radargramlardaki sinyaller olumsuz olarak etkilenmektedir. Ayrıca, uyumsuz gürültünün bu türü izlerde kuvvetli olduğu zaman giderilememekte ve daha derin yapıları tamamen maskeleyemektirler. Bundan dolayı kesitlerde yatay ve periyodik olaylar olarak görülen ringing; veri işleme kaldırılması gereken en önemli olaylardan birisidir. Yansıma olayları; daha rastgele olduğunda, ringing etkisinin tüm GPR kesiti boyunca hemen hemen uyumlu olduğu kabul edilerek, sadece ringing gürültüsünü içeren bir iz için tüm kesitin ortalama bir izi dikkate alınmaktadır. Yapılan kabul ışığında, bu ortalama izin basit bir şekilde çıkarılmasıyla radargramda ringing’in yatay görünümü giderilmiş olur (Şekil 1.38) (Kim

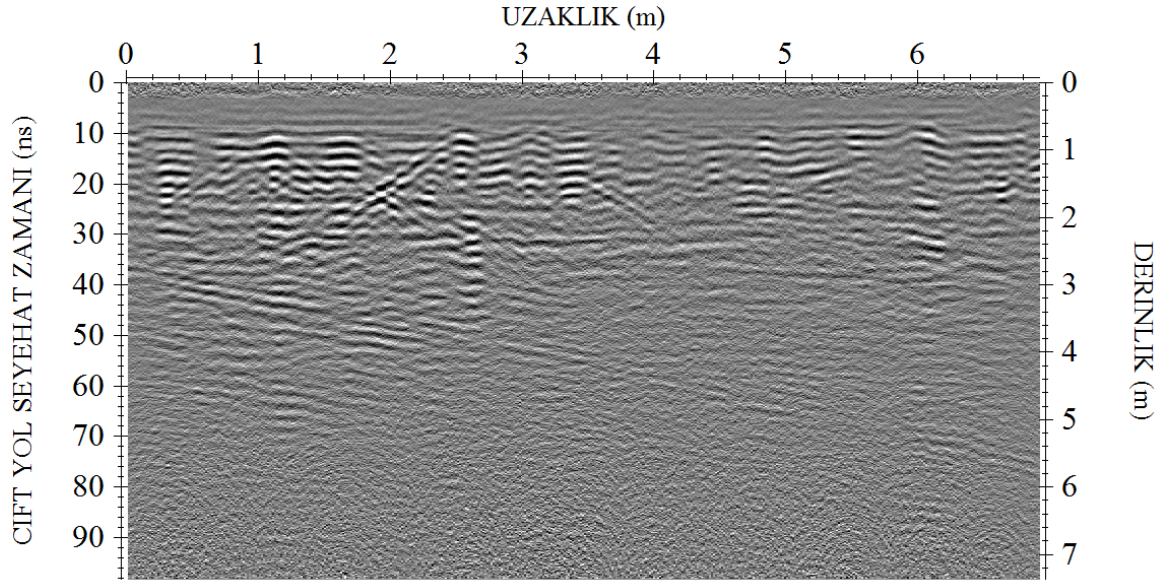
vd., 2007). Ringng etkisini gidermek için birçok yaklaşım kullanılmaktadır. bunlardan birisi background removaldır.



Şekil 1.38. Genlik kazancı uygulanmış kesite background removal uygulandıktan sonra elde edilen radargram

1.21.1.4. Migrasyon (Göç)

Temel veri işlem adımlarına ilaveten saçılmış yansımaların gerçek yerlerine toplanması için göç işlemi uygulanmaktadır. Bu işlem üzerinde değişik araştırmacılar farklı yaklaşımlar geliştirmişlerdir. Bu çalışmada Reflex-Win programının göç işlemleri menüsünde yer alan "fk migration (Stolt)" yaklaşımı kullanılmıştır. Bu yaklaşımda frekans-dalga sayısı ortamında uygulanıp, girilen sabit hıza bağlı olarak F-K dönüşümü yapılmaktadır (Frekans düşey dalga sayısına dönüştürülür). Sadece zaman ortamında küçük veri hacmi olduğunda yöntem bu tür durumlar için uygun değildir. F-K aralığındaki veri hacmi yeterince büyük olmalıdır.



Şekil 1.39. Background removal uygulanmış kesite migrasyon uygulandıktan sonra elde edilen radargram

Elektromanyetik dalgaların oluşumu ve inceleme ortamı içerisinde yayılışının oldukça karmaşık oluşundan dolayı elde edilen radargramları yorumlamak zordur. Ayrıca bu radargramların karmaşık oluşunun nedeni, elektromanyetik dalga yayılırken ortamdaki tüm yapı farklılıklarından yansıma almaktadır. Örneğin; ortam içerisindeki kesiti çember olan metalik, plastik, beton gibi alt yapı elemanlarının yer radarı kesitlerindeki görünümü hiperbol şeklindedir. Gerçek arazi yer radarı kesitlerinde saptanan hiperbolik yansımaların hangi tür elemandan kaynaklandığı konusunda deneyim kazanmak için modelleme çalışmaları yararlı olmaktadır.

1.22. Yer Radarı Yönteminde Modelleme

Yer radarı modellemesi ve diğer jeofizik yöntemlerin modellemesinin yapılmasının genel amacı; araştırma yapılan ortamda anomaliye neden olan kaynağın şeklini, büyüklüğünü, cinsini ve uzunluğunu doğru yorumlayabilmektir.

Gerçek arazi ölçümlerinden elde edilen radargramlar birçok tekrarlı yansıma ve gürültü içerir. Aynı zamanda araştırma yapılan alanda olası bir kaynak, yanlış ölçüm dizaynı, yanlış anten seçimi ve yetersiz ölçü aralığı nedeniyle elde edilen radargramlarda görünmeyebilir. Bu problemleri çözmenin bir yolu da modelleme yapmaktır. Bu nedenle

bilgisayar yardımıyla geometrisini ve ortam şartlarını kendimizin belirlediği modeller oluşturup, bu modellerin nasıl belirti verdiğini belirleriz. Elde edilen modellerle araziden alınan veriler karşılaştırılır. Radargramın yorumlanmasında da karşılaştırma sonuçlarından yararlanılır. Böylelikle yorumlamada hem kolaylık, hem de doğruluk oranı artırılmaya çalışılır. Yorumlama yaparken karşılaşılan en önemli sorunlardan biri, elde edilen radargramların karmaşıklığı ve yapı-ortam özelliklerini her zaman doğru biçimde yansıtmamasıdır.

Radar modellemesiyle, gerçek yeraltı koşullarına yakın özellikte oluşturulan yapay modellerle radargramlarda ne tür belirtiler elde edileceğini öğrenmenin yanı sıra, aranan yapı ya da yapılarla onları çevreleyen ortam hakkında araziye çıkmadan önce gerekli olan ön bilgilerin elde edilmesine olanak sağlanır. Ayrıca farklı frekans değerleri için oluşturulan yapay modeller yardımıyla da, araştırmaya uygun anten frekansı seçilir. (Annan ve Chua, 1992; Cai ve McMehan, 1994; Conyers ve Goodman, 1997; Goodman, 1994; Goodman ve Nishimura, 1993).

Bilinen alan koşullarını daha iyi ortaya koyabilmenin bir diğer yolu olan modellemede; elde edilen arazi verileri ile oluşturulan yapay radargramlar kıyaslanarak, gerçek veriler ile yapay veriler arasında uygun bir eşleşme sağlanıncaya kadar modele ait parametreler değiştirilerek yinelemeli işlemler sonucunda en doğru model üretilir. Gerçek arazi verileriyle olan farkın en aza indirildiği bu çözüm tekniği jeofizikte ters çözüm olarak bilinir. Bilindiği gibi düz-çözüm, ters-çözüm içerisinde kullanılan bir modellemedir ve ters-çözümün ilk çözüm aşamasıdır. Bu şekilde bir yaklaşım yeraltının daha güçlü bir şekilde yorumlanmasına imkan tanımaktadır (Conyers ve Goodman, 1997).

Yer radarında kullanılan modelleme tekniklerinden bazıları;

- Işın izleme algoritması,
- Fourier yöntemi,
- Zaman ortamı sonlu farklar yöntemidir.

Bunlardan en çok kullanılan zaman ortamı sonlu farklar yöntemidir. Kullanılan sonlu farklar ağının hücre yapısı nedeniyle, yöntemde sadece basit yeraltı şekilleri değil daha karmaşık olan yeraltı yapıları da fazladan hesaplama süresi gerekmeden modellenebilir. Ayrıca, yöntemin bir radar anteninin yakın-alan etkisinin içine giren varil, kablo, boru, patlamamış askeri malzemeler gibi gömülü hedeflerden oluşan saçılmaları modellemesi de diğer yöntemlere göre en önemli üstünlüğüdür. Zaman ortamı sonlu farklar yönteminin uygulanması radar antenin şekli (bu şekil yeraltına yayılan elektromanyetik dalgaların şekli

ile ilgilidir) anten yüksekliği, yerin elektriksel özellikleri, yeraltında gömülü bulunan hedeflerin geometrisi gibi birçok önemli radar parametresinin doğrudan modelin içine dahil edilmesiyle gerçekleştirilir (Roberts ve Daniels, 1997). Bilgisayara model ortamında bulunan yapıların fiziksel özellik ve geometrileri girilerek, çeşitli arayüzeylerde karşılaşılan yansıma katsayıları, derinlikle ortaya çıkan sinyal sönümlenmesi, farklı birimlerdeki radar enerji hızları ve oluşacak yansımaların genlikleri hesaplanır (Goodman, 1994). Hesaplanan yansımalar yeraltının basitleştirilmiş gösterimi olan dilimlerle ya da hacimsel olarak çizdirilebilir. Bu şekilde gösterilen yansımaların genliklerini vurgulamak için farklı renk paletleri kullanılabilir (Conyers ve Goodman, 1997).

Yer radarı yöntemiyle modelleme yaparken dikkat edilmesi gereken unsurlar:

➤ Yapılacak model çalışmasında seçilen anten frekansı ile Δx (iz aralığı), Δt (zaman aralığı), T_{max} (en yüksek zaman değeri) ve model geometrisinin derinliği arasında uyum olmasına dikkat edilmelidir. Eğer dikkat edilmez ise programda hata oluşur veya çıkan yapay radargramda model geometrisi tam olarak belli olmaz.

Örneğin;

- Anten frekansını 500 MHz seçip, model geometrisini de 50 m derinliğe koyarsak elde edilen yapay radargramda istenilen anomali görüntülenemez.

- Eğer Δx aralığını modelin büyüklüğünden fazla veya yeteri kadar küçük seçmezsek model geometrisi net bir şekilde görüntülenemez.

- Derinde bir model oluşturup yüksek frekans seçildiğinde de yine aynı sonuçlarla karşılaşılır.

➤ Yer radar modellemede dikkat edilmesi gereken diğer bir husus ise soğurucu sınır koşullarıdır (ABC). Gerçekte sınırsız bir ortamda ölçüm alınırken, modelleme yaparken belirli sınırlar içerisinde modelleme yapılmaktadır. Bu durumda da sınırlar bir yansıtıcı kaynak gibi davranıp bu sınırlardan yansımalara neden olmaktadır. Dikkat edilmediği takdirde yanlış yorumlamaya neden olur. Bu durumu düzeltmek için ABC' nin rolü sınıra çarpan herhangi bir dalgayı ortadan kaldırmak ve ortamı sınırsız bir model haline getirmektir.

➤ Dikkat edilmesi gereken diğer bir husus ise σ, μ, ϵ değerlerinin doğru seçimidir. İletken bir ortamda EM dalga sönümünden dolayı modelin içerisinde bulunduğu ortamın iletkenliği düşük seçilmelidir. Aksi takdirde EM dalga sönümlenir ve model geometrisi

elde edilen radargramlarda görüntülenemez. Aynı zamanda yapı - ortam arasındaki empedans farkı ne kadar fazla ise model yapı radargramlarda daha net görüntülenir.

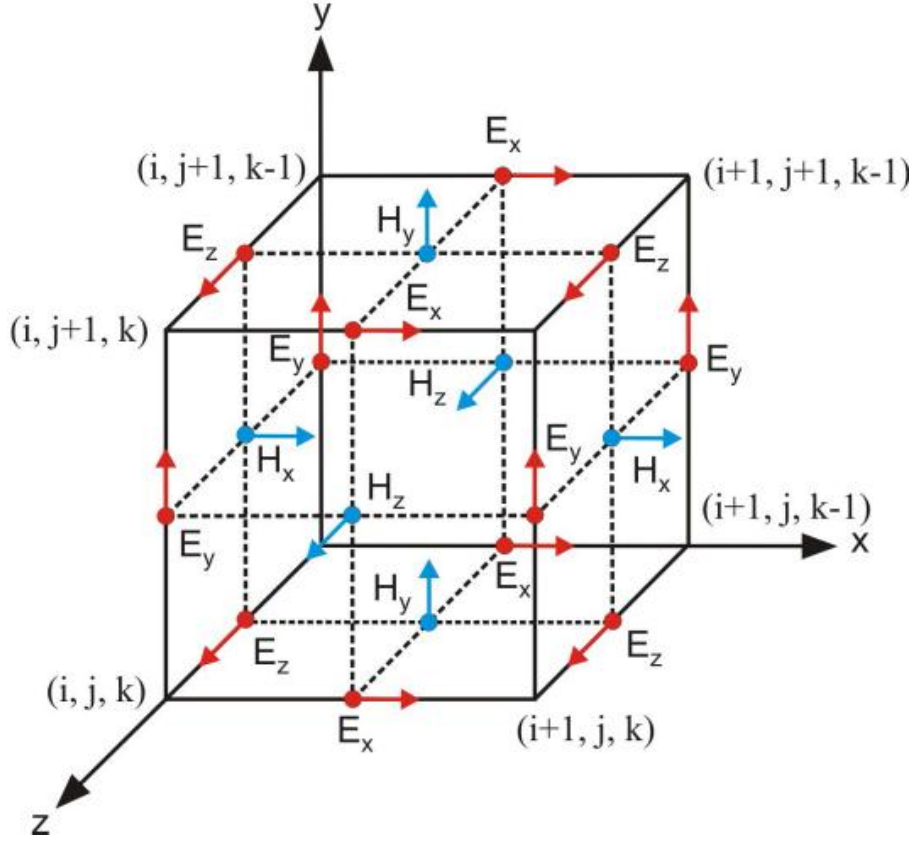
1.22.1. Zaman Ortamında Sonlu Farklar Yöntemi (FDTD)

Son yıllarda bilgisayar teknolojisinin ilerlemesiyle yer radarı yönteminde modelleme çalışmaları da hızlanmıştır. Zaman ortamında sonlu farklar yöntemi (FDTD) ile yer radarında iki boyutlu (2B) modelleme birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir (Yee 1966; Lee ve Teixeira, 2006; Wang ve Tripp 1996; Bourgeois ve Smith, 1996; Bergmann vd., 1999; Teixeira vd. 1998; Holliger ve Bergmann 2002; Carcione 1998; Irving 2006). Yöntem, uzun yıllardır bilinmesine rağmen zaman ortamında Maxwell denklemleri için kullanımı ilk kez Kano Yee (1966) tarafından ortaya atılmıştır. Kısaca FDTD olarak bilinen zaman ortamında sonlu farklar yöntemi İngilizce Finite Difference Time Domain kelimelerinin kısaltılmışıdır. FDTD yöntemi Maxwell denklemlerindeki diferansiyel yaklaşımlarının zamanda ve konumda ayrıklaştırılmasına dayanır. FDTD yöntemi, sonlu farklar yönteminin geliştirilmesi, denklemlerin EM dalga denklemlerinin zaman ortamı için yazılmasıyla ortaya çıkarılmıştır (Yee 1966). Modelin içerdiği 2B geometri, dalga boyundan çok daha küçük boydaki hücrelere bölünerek sonlu farklar ağı oluşturulur. Sonlu farklar ağı geometrinin ve anten merkez frekansının büyüklüğüne bağlı olarak, binlerce küçük hücreden oluşabilir (Şekil 1.40). Manyetik ve elektrik alanların bileşenleri bu hücrelerin farklı noktalarında, ardışık zaman adımlarında hesaplanır (Gürel ve Oğuz, 2000; Sevgi 1999). Yöntemde, üç boyutlu (3B) modellemede manyetik ve elektrik alanın üç yöndeki bileşenleri (x,y,z) hesaplanırken, 2B modellemede sadece iki yönde bileşenler hesaplanır. 2B modellemede, hangi bileşenlerin hesaplanacağı seçilen EM moda göre farklılık gösterir. Kullanılan mod enine elektrik alan (Transverse Electric, TE) veya enine manyetik alan (Transverse Manyetic, TM) olabilir. TE-modu genelde kuyu yer radarı için, TM-modu ise yüzeyde yapılan yer radarı için kullanılır (Irving ve Knight 2006, Irving 2006).

Genel olarak, üç boyutlu FDTD yönteminde her bir Yee hücresinde, hesap uzayındaki konumları (i, j, k) ile belirlenen üç elektrik (E) ve üç manyetik (H) alan bileşeni yer almaktadır. Şekil 1.40'deki, hesaplama ağı üzerindeki bir alan noktası,

$$(i, j, k) = (i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z) \quad (1.81)$$

ile ifade edilebilir. Burada Δx , Δy ve Δz sırasıyla x-, y- ve z-yönündeki ağ alan artışları ve i, j, k ise tamsayılardır (Taflove ve Hagness, 2005).



Şekil 1.40. Elektrik ve manyetik alan vektör bileşenlerinin Yee'nin hesaplama ağı üzerindeki konumları (Giannopoulos 2005'den düzenlenmiştir)

1.22.2. Yee Algoritması

Yee (1966), Maxwell'in zamana bağlı rotasyonel denklem sistemleri için enerji kaybının olmadığı materyallerin varlığı durumunda ($\sigma^* = 0$ ve $\sigma = 0$) bir sonlu farklar denklem dizisi oluşturmuştur. Maxwell denklemleri için çok sayıda sonlu farklar izlencesi olmasına rağmen, daha önce de belirtildiği gibi Yee'nin izlencesi çok kararlı ve çok yönlülüğü nedeni ile günümüze kadar diğerlerine göre etkinliğini korumayı başarmıştır (Taflove ve Hagness, 2005).

Öncelikle Yee algoritması, bir dalga denklemiyle, sadece elektrik alan veya sadece manyetik alanı çözmekten ziyade, birleştirilmiş Maxwell denklemlerini kullanarak, alan ve zamanda, elektrik ve manyetik alanlarını birlikte çözmektedir. Her iki alan bilgisini

kullanmakla elde edilen çözüm yalnız birini kullanarak elde edilenden daha kararlı olmaktadır. Her bir elektrik alan bileşeni, dört manyetik alan bileşeni ile çevrilmiştir. Benzer olarak, her manyetik alan bileşeninin etrafında da dört elektrik alan bileşeni bulunmaktadır. Yee algoritmasında, model öncelikle çok sayıda küplere bölünmektedir. İşlemlerde kolaylık sağlması açısından küpler eşit büyüklüklerde düzenlenmektedir. Elektrik ve manyetik alan bileşenlerinin konumları Şekil 1.40'da görüldüğü gibi olmaktadır.

1.22.3. Sonlu Farklar Yöntemi

Matematiksel bir ifade olan “sonlu fark” türev işlemini ifade etmektedir. Sonlu farklar yöntemi sayısal türev alma işlemidir. Sonlu fark denklemlerini elde etmek için Taylor serisinden faydalanılır. Taylor serisi;

$$f(a) = f(x) + f'(x)(a - x) + f''(x)(a - x)^2 \frac{1}{2!} + f'''(x)(a - x)^3 \frac{1}{3!} + 0(\delta^4) \quad (1.82)$$

olarak tanımlanır. Denklemden de görüldüğü üzere türevin derecesi arttıkça değer düşmekte ve ihmal edilmektedir. (1.82) bağıntısında x yerine x_i ve a yerine x_{i+1} yazılırsa;

$$f(x_{i+1}) = f(x_i) + f'(x_i)(x_{i+1} - x_i) + f''(x_i)(x_{i+1} - x_i)^2 \frac{1}{2!} + f'''(x_i)(x_{i+1} - x_i)^3 \frac{1}{3!} + 0(\delta^4) \quad (1.83)$$

elde edilir. Denklem birinci türeve göre düzenlenip yeniden yazılırsa;

$$f'(x_i) = \frac{f(x_{i+1}) - f(x_i)}{x_{i+1} - x_i} - \frac{1}{2}(x_{i+1} - x_i)f''(x_i) - \frac{1}{6}(x_{i+1} - x_i)^2 f'''(x_i) - 0(\delta^3) \quad (1.84)$$

ileri fark denklemi yazılmış olur. Burada üçüncü türevden sonraki değerler ihmal edildiğinden dolayı bu denklem üçüncü dereceden ileri fark denklemi olarak tanımlanır. $0(\delta^3)$ hatanın derecesini ifade etmektedir. δ değeri fark aralığını yani $x_{i+1} - x_i$ i

tanımlamaktadır. Benzer şekilde (1.82) bağıntısında bağıntısında x yerine x_i ve a yerine x_{i-1} yazılıp denklem birinci türeve göre yeniden düzenlenirse;

$$f'(x_i) = \frac{f(x_i) - f(x_{i-1})}{x_i - x_{i-1}} - \frac{1}{2}(x_i - x_{i-1})f''(x_i) - \frac{1}{6}(x_i - x_{i-1})^2 f'''(x_i) - O(\delta^3) \quad (1.85)$$

geri fark denklemi yazılmış olur. İkinci dereceden ileri fark denklemi;

$$f'(x_i) = \frac{f(x_{i+1}) - f(x_i)}{x_{i+1} - x_i} - O(\delta^2) \quad (1.86)$$

ve ikinci dereceden geri fark denklemi;

$$f'(x_i) = \frac{f(x_i) - f(x_{i-1})}{x_i - x_{i-1}} - O(\delta^2) \quad (1.87)$$

olarak verilir. Burada (1.87) denklemi (-) ile çapılıp ileri ve geri fark denklemleri alt alta toplanarak merkezi fark denklemi elde edilir. Buna göre ikinci dereceden merkezi fark denklemi;

$$f'(x_i) = \frac{f(x_{i+1}) - f(x_{i-1})}{x_{i+1} - x_{i-1}} \quad (1.88)$$

olarak hesaplanır (Forsythe, 1960).

1.22.4. Maxwell Denklemlerinin Sonlu Farklar Yöntemine Göre Yazılması

Bu çalışmada elektrik ve manyetik alanların türevleri hem zaman hem de konum aralıkları için hesaplanmıştır. Zaman türevleri ikinci dereceden, konum türevleri ise dördüncü dereceden hata ile hesaplanmıştır. Buna göre zaman türevi için ikinci dereceden merkezi fark denklemi;

$$f'(t_i) = \frac{f(t_{i+1}) - f(t_{i-1})}{\Delta t} \quad (1.89)$$

ve dördüncü dereceden merkezi fark denklemi;

$$f'(x_i) = \frac{-f(x_{i+2}) + 27f(x_{i+1}) - 27f(x_{i-1}) + f(x_{i-2})}{24\Delta x} \quad (1.90)$$

olarak yazılır.

Bu bölümde ilk olarak konunun açıklanması amacıyla bir boyutta ve daha sonra da bu çalışmanın yapıldığı iki boyutta Maxwell denklemleri sonlu farklar yöntemine göre hesaplanacaktır.

1.22.5. Bir Boyutta Maxwell Denklemleri

Bir boyutta elektromanyetik dalga yayılımı söz konusu ise bir yönde elektrik alan vektörü ve bu alana dik yönde manyetik alan vektörü vardır. Dalganın ilerleme doğrultusu ise her iki alanın yönüne dik yöndedir. x yönünde elektrik alan, y yönünde manyetik alan söz konusu ise E_x bileşeni ve H_y bileşeni vardır. E_y ve H_x bileşenleri ise o yönlerde değişim olmadığından dolayı sıfır kabul edilir. Buna göre Maxwell denklemleri sonlu farklarda aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$\frac{\partial H_y}{\partial z} = -\varepsilon \frac{\partial E_x}{\partial t} - \sigma E_x \quad (1.91)$$

denklemi zaman ve konum değerleri eklenerek ifade edilirse;

$$\frac{\partial H_y^{n+\frac{1}{2}}(k)}{\partial z} = -\varepsilon(k) \frac{\partial E_x^{n+\frac{1}{2}}(k)}{\partial t} - \sigma(k) E_x^{n+\frac{1}{2}}(k) \quad (1.92)$$

olur. Burada n zaman, k ise konumdur. Bu denklemdeki elektrik alan ve manyetik alan bileşenlerine ikinci dereceden merkezi fark yaklaşımı uygulanırsa;

$$\frac{\partial H_y^{n+\frac{1}{2}}}{\partial z} = \frac{1}{\Delta z} \left(H_y^{n+\frac{1}{2}} \left(k + \frac{1}{2} \right) - H_y^{n+\frac{1}{2}} \left(k - \frac{1}{2} \right) \right) \quad (1.93)$$

$$\frac{\partial E_x^{n+\frac{1}{2}}}{\partial t} = \frac{1}{\Delta t} (E_x^{n+1}(k) - E_x^n(k)) \quad (1.94)$$

$$E_x^{n+\frac{1}{2}}(k) = \left(\frac{E_x^{n+1}(k) - E_x^n(k)}{2} \right) \quad (1.95)$$

denklemleri elde edilir. Bu denklemler (1.92) bağıntısında yerlerine yazıldığında;

$$E_x^{n+1}(k) = \frac{2\varepsilon(k) - \sigma(k)\Delta t}{2\varepsilon(k) + \sigma(k)\Delta t} E_x^n(k) - \frac{2\Delta t}{(2\varepsilon(k) + \sigma(k)\Delta t)\Delta z} \left(H_y^{n+\frac{1}{2}}\left(k + \frac{1}{2}\right) - H_y^{n+\frac{1}{2}}\left(k - \frac{1}{2}\right) \right) \quad (1.96)$$

hesaplanması gereken elektrik alan bileşeni elde edilmiş olur (Kurt, 2009). (1.96) eşitliğinden de görüldüğü üzere elektrik alanın n+1' inci zamandaki değerini ($E_x^{n+1}(k)$) hesaplayabilmek için kendinden bir önceki zamandaki elektrik alan değerine ve (k+1/2) ve (k-1/2) konumlarındaki manyetik alan değerlerine ihtiyaç vardır. Benzer şekilde bir sonraki zamandaki manyetik alan değerini elde etmek için

$$\frac{\partial E_x}{\partial z} = -\mu \frac{\partial H_y}{\partial t} \quad (1.97)$$

Maxwell denklemi zaman ve konum değerleri eklenerek düzenlenirse;

$$\frac{\partial E_x^{n(k+1/2)}}{\partial z} = -\mu \left(k + \frac{1}{2}\right) \frac{H_y^{n(k+\frac{1}{2})}}{\partial t} \quad (1.98)$$

Bu denklemdeki elektrik alan ve manyetik alan bileşenlerine ikinci dereceden merkezi fark yaklaşımı uygulanırsa;

$$\frac{\partial E_x^n(k + 1/2)}{\partial z} = \frac{1}{\Delta z} (E_x^n(k + 1) - E_x^n(k)) \quad (1.99)$$

$$\frac{H_y^n(k + \frac{1}{2})}{\partial t} = \frac{1}{\Delta t} (H_y^{n+1/2}(k + 1/2) - H_y^{n-1/2}(k + 1/2)) \quad (1.100)$$

denklemleri elde edilir. Bu denklemler (1.98) eşitliğinde yerine yazıldığında;

$$H_y^{n+\frac{1}{2}}\left(k + \frac{1}{2}\right) = H_y^{n-\frac{1}{2}}\left(k + \frac{1}{2}\right) - \frac{\Delta t}{\mu(k)\Delta z} (E_x^n(k+1) - E_x^n(k)) \quad (1.101)$$

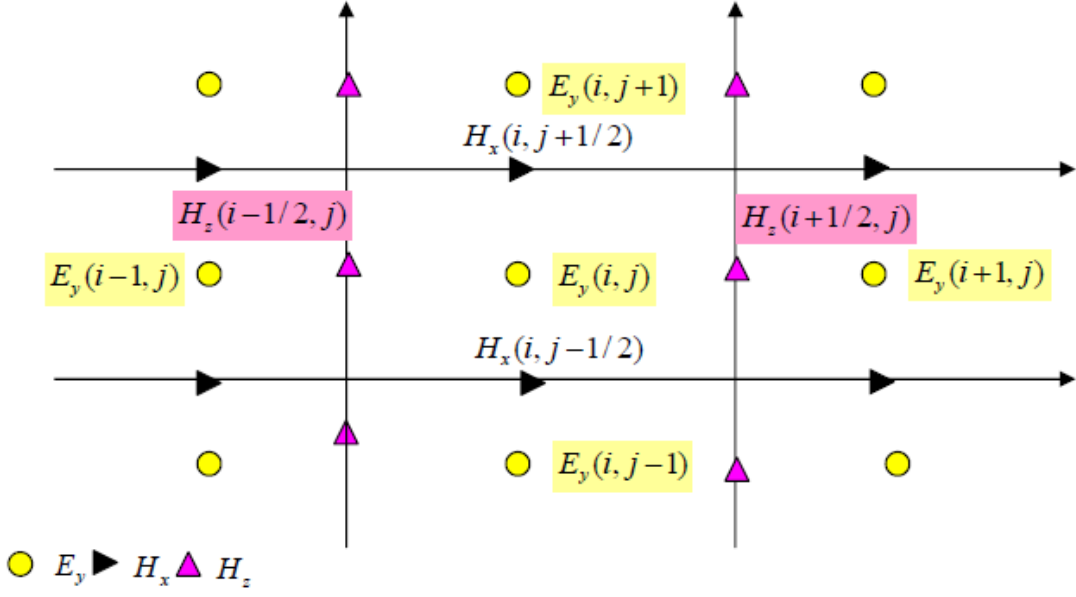
hesaplanması gereken manyetik alan bileşeni elde edilir (Kurt, 2009). (1.101) eşitliğinde de görüldüğü gibi manyetik alanın $n+1/2$ ' nci zamandaki değerini $(H_y^{n+1/2}(k + 1/2))$ hesaplayabilmek için kendinden bir önceki zamandaki manyetik alan değerine, $k+1$ ve k konumundaki elektrik alan değerine ihtiyaç vardır.

1.22.6. İki Boyutta Maxwell Denklemleri

Daha önceki bölümlerde Yer radarı yönteminde ortamın 2B olması durumunda Maxwell denklemlerinden ve TE, TM-modlarından bahsedilmişti. Bu bölümde TE ve TM modları için Maxwell denklemleri sonlu farklar ile ifade edilecektir.

1.22.6.1. TM-Modu Bileşenlerinin Sonlu Farklar ile Hesaplanması

2B model için y yönünde bir değişim olmadığı kabul edilerek manyetik alanın H_x ve H_z bileşeni, elektrik alanın E_y bileşeni sonlu farklar ağı içinde bulunan her bir hücre içine yerleştirilecektir. Yani bir hücrede H_x , H_z ve E_y hesaplanır (Şekil 1.41).



Şekil 1.41. TM-modunda elektrik ve manyetik alanların i, j koordinatlarında gösterimi (Lee ve Teixeira, 2006).

Elektrik alanının (E_y) x yönündeki değişimi için sonlu farklar denklemini elde etmek için; (1.52) denklemi zamana ve koordinatlara bağlı yazılıp, denklemde elektrik alan ve manyetik alan içeren terimler, zamana ve konuma göre türevleri 2. dereceden merkezi farklara göre açılır daha sonra bu denklemlerde manyetik alan yalnız bırakıldığında (1.102) ve (1.103) denklemleri elde edilir (Kurt, 2009).

$$\frac{(E_y^n(i+1,j) - E_y^n(i,j))}{\Delta x} = \frac{\mu(i+\frac{1}{2},j)}{\Delta t} \left(H_z^{n+\frac{1}{2}}(i+\frac{1}{2},j) - H_z^{n-\frac{1}{2}}(i+\frac{1}{2},j) \right) \quad (1.102)$$

$$H_z^{n+\frac{1}{2}}(i+\frac{1}{2},j) = H_z^{n-\frac{1}{2}}(i+\frac{1}{2},j) + \frac{\Delta t}{\mu(i+\frac{1}{2},j)\Delta x} (E_y^n(i+1,j) - E_y^n(i,j)) \quad (1.103)$$

Elektrik alanının z yönündeki değişimi için sonlu farklar denklemini elde etmek için; (1.53) denklemi zamana ve koordinatlara bağlı yazılıp, denklemde elektrik alan ve manyetik alan içeren terimler, zamana ve konuma göre türevleri 2. dereceden merkezi farklara göre açılır daha sonra bu denklemlerde manyetik alan yalnız bırakıldığında (1.104) ve (1.105) denklemleri elde edilir (Kurt, 2009).

$$\frac{(E_y^n(i,j+1) - E_y^n(i,j))}{\Delta z} = \frac{-\mu(i,j+\frac{1}{2})}{\Delta t} \left(H_x^{n+\frac{1}{2}}(i,j+\frac{1}{2}) - H_x^{n-\frac{1}{2}}(i,j+\frac{1}{2}) \right) \quad (1.104)$$

$$H_x^{n+\frac{1}{2}}(i,j+\frac{1}{2}) = H_x^{n-\frac{1}{2}}(i,j+\frac{1}{2}) + \frac{\Delta t}{\mu(i,j+\frac{1}{2})\Delta z} (E_y^n(i,j+1) - E_y^n(i,j)) \quad (1.105)$$

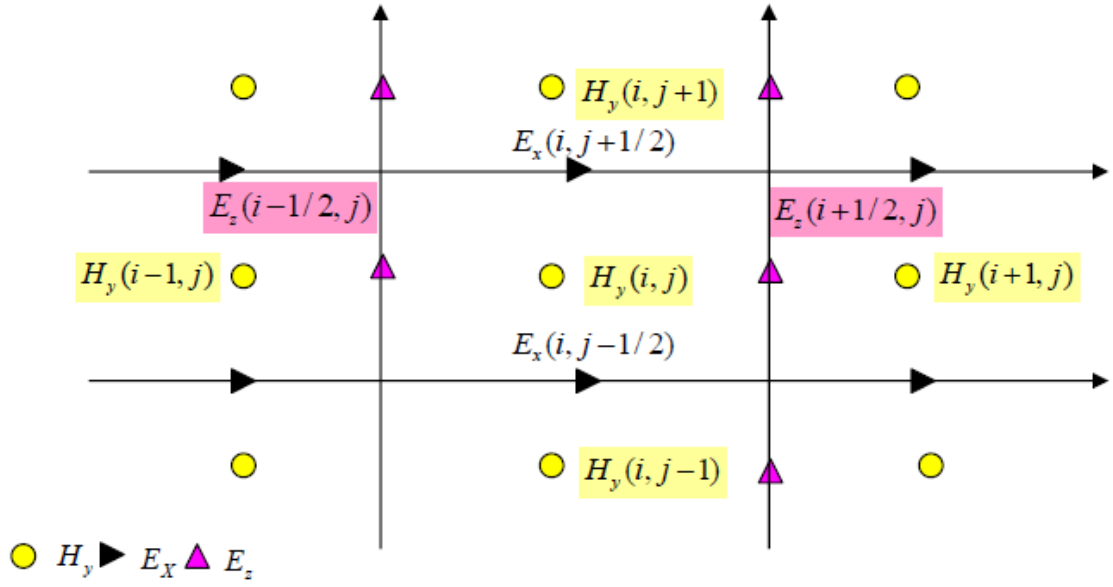
Manyetik alanın x ve z yönündeki değişimi için sonlu farklar denklemini elde etmek için; (1.54) denklemi zamana ve koordinatlara bağlı yazılıp, denklemdaki terimler açılır daha sonra bu denklemlerde elektrik alan yalnız bırakıldığında (1.106) ve (1.107) denklemleri elde edilir (Kurt, 2009).

$$\begin{aligned} \frac{\sigma(i,j)}{2} (E_y^{n+1}(i,j) + E_y^n(i,j)) + \frac{\varepsilon(i,j)}{\Delta t} (E_y^{n+1}(i,j) + E_y^n(i,j)) = \\ \frac{\left(H_z^{n+\frac{1}{2}}(i+\frac{1}{2},j) - H_z^{n+\frac{1}{2}}(i-\frac{1}{2},j) \right)}{\Delta x} - \frac{\left(H_x^{n+\frac{1}{2}}(i,j+\frac{1}{2}) - H_x^{n+\frac{1}{2}}(i,j-\frac{1}{2}) \right)}{\Delta z} \end{aligned} \quad (1.106)$$

$$\begin{aligned} E_y^{n+1}(i,j) = \left(\frac{\sigma(i,j)\Delta t - 2\varepsilon(i,j)}{\sigma(i,j)\Delta t + 2\varepsilon(i,j)} \right) E_y^n(i,j) + \frac{2\Delta t}{\sigma(i,j)\Delta t + 2\varepsilon(i,j)} \\ \frac{\left(H_z^{n+\frac{1}{2}}(i+\frac{1}{2},j) - H_z^{n+\frac{1}{2}}(i-\frac{1}{2},j) \right)}{\Delta x} - \frac{\left(H_x^{n+\frac{1}{2}}(i,j+\frac{1}{2}) - H_x^{n+\frac{1}{2}}(i,j-\frac{1}{2}) \right)}{\Delta z} \end{aligned} \quad (1.107)$$

1.22.6.2. TE-Modu Bileşenlerinin Sonlu Farklar ile Hesaplanması

Elektrik alanın x ve z bileşeni, manyetik alanın y bileşeni hücre içerisinde yerleştirilecektir. Yani bir hücrede H_y ve E_x E_z hesaplanır (Şekil 1.42).



Şekil 1.42. TE-modunda elektrik ve manyetik alanların i, j koordinatlarında gösterimi (Lee ve Teixeira, 2006)

Benzer şekilde eşitlikler çıkarılır (Lee ve Teixeira, 2006; Kurt, 2009).

$$H_y^{n+1}(i, j) = H_y^n(i, j) - \frac{\Delta t}{\mu(i, j)} \left\{ \frac{\left(E_z^{n+\frac{1}{2}}(i+\frac{1}{2}, j) - E_z^{n+\frac{1}{2}}(i-\frac{1}{2}, j) \right)}{\Delta x} + \frac{\left(E_x^{n+\frac{1}{2}}(i, j+\frac{1}{2}) - E_x^{n+\frac{1}{2}}(i, j-\frac{1}{2}) \right)}{\Delta z} \right\} \quad (1.108)$$

$$E_x^{n+1/2}(i, j + 1/2) = \left(\frac{\sigma(i, j+1/2)\Delta t - 2\varepsilon(i, j+1/2)}{\sigma(i, j+1/2)\Delta t + 2\varepsilon(i, j+1/2)} \right) E_x^{n-1/2}(i, j + 1/2) - \left(\frac{2\Delta t}{\sigma(i, j+1/2)\Delta t + 2\varepsilon(i, j+1/2)\Delta z} \right) \left(H_y^n(i, j + 1) - H_y^n(i, j) \right) \quad (1.109)$$

$$E_z^{n+1/2}(i + 1/2, j) = \left(\frac{\sigma(i+1/2, j)\Delta t - 2\varepsilon(i+1/2, j)}{\sigma(i+1/2, j)\Delta t + 2\varepsilon(i+1/2, j)} \right) E_z^{n-1/2}(i + 1/2, j) - \left(\frac{2\Delta t}{\sigma(i+1/2, j)\Delta t - 2\varepsilon(i+1/2, j)\Delta x} \right) \left(H_y^n(i + 1, j) - H_y^n(i, j) \right) \quad (1.110)$$

Bu denklemler, 2. dereceden merkezi fark yaklaşımı kabulü ve herhangi bir sınır koşulu uygulanmaması halinde çıkarılmış denklemlerdir.

1.22.7. Sınır Koşulları

Uzay bölgesi, EM saçılma ve ışınma problemlerinde genel olarak sınırsızdır. Ancak, FDTD yöntemi ile sayısal modellerin oluşturabilmesi için, bu sınırsız bölgenin, yapay olarak sınırlandırılması gerekmektedir. Ayrıca, sınırsız sayıda verinin bir PC'de depolanması mümkün değildir. FDTD yönteminde sınır koşulları tanımlanmazsa, gerçekte olmayan ancak, bu yapay sınırlardan kaynaklanan yansımalar meydana gelir ve grid sınırlarında istenmeyen, yanıtıcı dalgalar oluşur. Modellemede, sınır koşulları, bu dalgaları absorbe edebilmek için uygulanmaktadır. Sınır koşulları için, günümüze kadar birçok araştırmacı tarafından farklı algoritmalar sunulmuştur. Bunlardan bazıları; ABC (Absorbing Boundary Condition; Mur, 1981), PML (Perfectly Matched Layer absorbing boundaries; Berenger, 1994; Fang ve Wu, 1996) ve CPML (Convolutional PML; Roden ve Gedney, 2000) olarak verilebilir.

1.22.8. Sayısal Modellemede Courant Kararlılık Ölçütü

FDTD algoritması, önceki bölümlerde ifade edildiği gibi, ayrıklaştırılmış ve kısmi türevleri, sonlu-farklar eşdeğerleri ile değiştirilmiş Maxwell denklemlerinin yinelemeli çözümüne dayanmaktadır. Yinelemeli denklemler şeklinde ortaya çıkan açık çözümler, kapalı çözümlerdeki gibi bir matris tersi hesaplaması gerektirmediği için daha kolay ve hızlı olarak hesaplanabilmektedir. Ancak, burada, çözümün kararlı olması bazı koşullara bağlıdır (Sevgi, 1999). Buna göre, zaman adımı Δt , konum adımları Δx , Δy ve Δz 'den bağımsız olamazlar. Zaman ve konum örnekleme adımları, yeterince küçük olmalı ve izleyen Courant kararlılık ölçütünü de sağlamalıdır.

$$\Delta t \leq \frac{1}{c * \sqrt{\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} + \frac{1}{\Delta z^2}}} \quad (1.111)$$

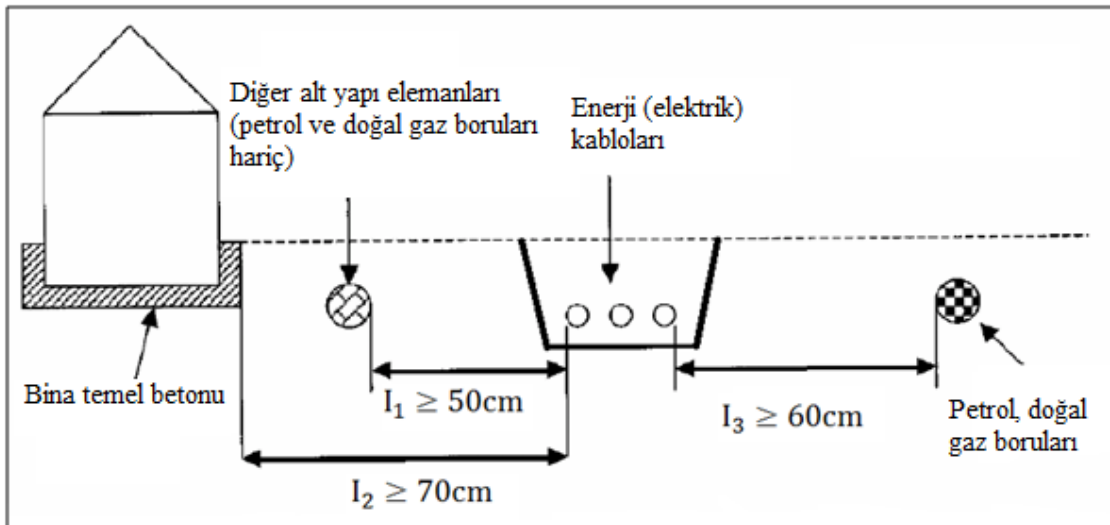
Burada c ışık hızıdır ($\cong 0.3$ m/ns). Eşitlik, kararlılığı sağlayabilmek için, seçilen zaman adımında, EM dalganın maksimum ilerlemesinin, hücre boyutunu aşmaması gerekir şeklinde açıklanabilir. Zaman örnekleme aralığının büyük seçilmesi durumunda, EM dalga, FDTD hücre boyutlarını aşacağından yanlış sonuçlar üretilmesine neden olacaktır. Bu

nedenle, Courant ölçütü, EM dalgayı zamanda ve konumda modelleyebilmek ve dalga iletimini izleyebilmek açısından önemlidir (Sevgi, 1999). Yer radarı verilerinin sayısal olarak modellenmesinde birçok araştırmacı farklı yaklaşımlar uygulamışlardır. Son yıllarda ise FDTD yöntemi, karmaşık modellerde bile çok iyi sonuçlar üretmesi ve farklı anten düzenlemelerinin uygulanabilmesi nedeniyle daha çok tercih edilmektedir (Irving ve Knight, 2006).

1.23. Alt Yapı Elemanlarının Döşeme Şekilleri

Günümüzde şehir ve yerleşkelerde alt yapı elemanlarının döşenmesi belirli bir standartta değildir. Döşeme işlemi birçok değişik metotla gerçekleştirilmektedir. Bu nedenle alt yapı elemanlarının yeraltına genel olarak nasıl yerleştirildiği araştırılmıştır. Elde edilen bilgiler, bu tezin amacına yönelik yapılan modelleme çalışmalarındaki modellerin boyutu ve içeriğini belirlemek için kullanılmıştır.

Şehir alt yapıları oluşturulurken yeraltına döşenecek olan kablo ve boruların birbirlerine ve çevresindeki binalara belirli uzaklıklarda döşenmeleri gerekmektedir. Şekil 1.43'de genel olarak; enerji kabloları, telefon/fiberoptik kabloları ve petrol, gaz boruları arasındaki uzaklığın nasıl olması gerektiği gösterilmektedir. Bu şekil; aynı zamanda, döşenen alt yapı tesislerinin bina temel betonuna olan uzaklıklarını da içermektedir.

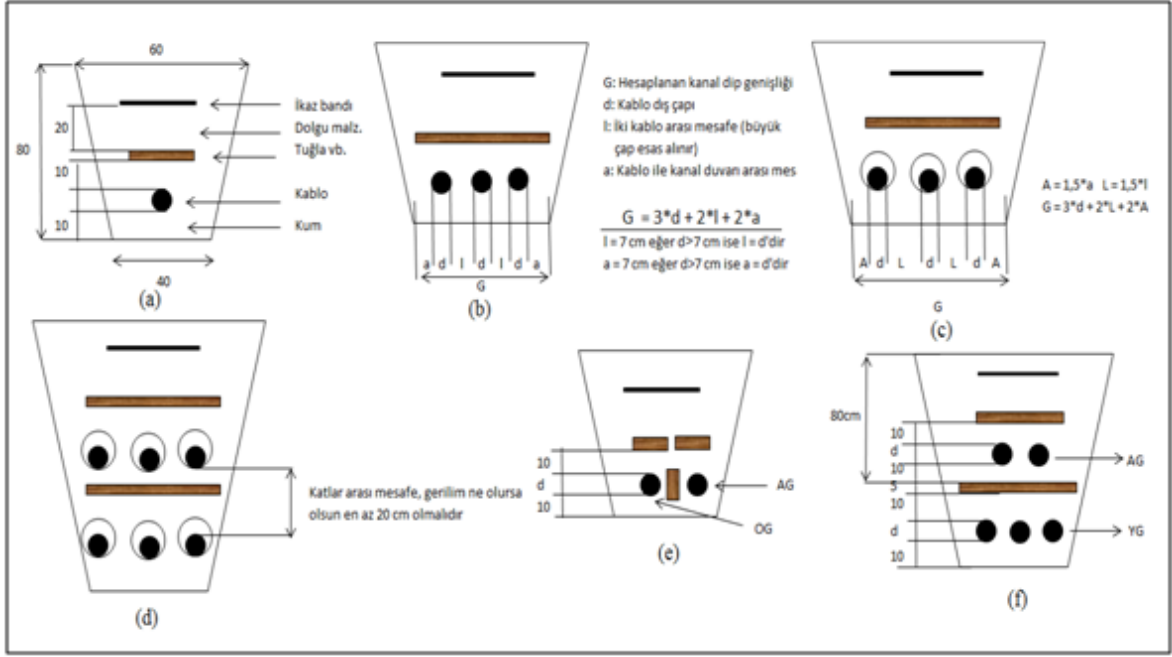


Şekil 1.43. Yerleşim yerlerinde yeraltı kablolarının alt yapı tesislerine uzaklığı (URL_3, 2015)

Elektrik, telefon/fiberoptik kablolarına güzergâh olarak, olabildiğince kabloyu sıkıntıya sokmayacak; yapı, kanalizasyon, su, gaz ve petrol borularının bulunmadığı yerlerden, öncelikle yaya kaldırımları olmak üzere; arsalarda üzerinde yürünen yerler, sokak ve caddeler seçilmelidir. Kabloların dönecekleri yerler; kimyasal, mekanik ve ısı etkilerden olabildiğince uzak ya da bunlara karşı korunmuş olmalı ve şehir içinde genelde cadde ve sokakların her iki yanından cadde boyunca veya kaldırım altından açılan bina duvarlarından en az 60-70 cm uzaklıktaki kanallardan geçmelidir.

Elektrik kabloları için kanal boyutu; işletme gerilimlerine, kablo sayısına, kablo çaplarına ve bunların korunması için kullanılan (tuğla vb.) malzemelerin boyutuna göre değişmektedir. Standart kablo kanalının derinliği şehir ve yerleşim yerlerinde en az 80 cm,

yerleşim yerleri dışında en az 60 cm olmalıdır. Ancak zorunlu durumlarda özel koruyucu önlemler alınarak 20 cm daha azaltılabilir. Eğer kanal kâfi derinlikte açılmıyorsa, kablo kanalının üstü betonla takviye edilir (çok sert kayalık arazide). Kanalın dip genişliği 40-50 cm, üst genişliği ise 60 cm olmalıdır. Açılan kanalların tabanı sağlam zeminli ve taşsız olmalıdır. Kabloların dış etkenlerden zarar görmemesi için kablo, kanal içerisinde Şekil 1.44'de gösterildiği gibi konumlandırılmalıdır. Eğer kanal içerisinde alçak gerilim (AG) ve yüksek gerilim (YG) kablolar birlikte konumlandırılacak ise iki kablo arasına hat boyunca harman tuğla, 6 cm kalınlığında beton plakalar veya sert plastik malzemeler döşenmelidir. Birden çok kablo geçirilmesi durumunda kanal genişliği, kanalla kablo arası uzaklık ve kablolar arasındaki uzaklık hesapları Şekil 1.44 b-d'de gösterildiği gibidir.



Şekil 1.44. Elektrik kablolarının çeşitli yerleşim şekilleri a) AG veya YG kabloların döşendiği standart kablo kanalı, b) Birden fazla AG veya YG kabloların döşenme şekli ve kanal boyutunun hesabı, c) Birden fazla AG veya YG kabloların boru içerisinde döşenme şekli ve kanal boyutunun hesabı, d) Elektrik kablolarının boru içerisinde döşenme şekli, e) AG ve YG kabloların aynı kanalda yan yana olması durumu, f) AG ve YG kabloların aynı kanalda üst üste olması durumu (URL_3, 2015 'den düzenlenmiştir).

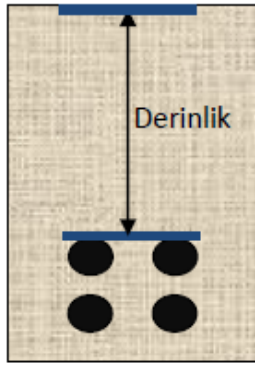
Elektronik haberleşme (telefon/fiberoptik) kabloları altyapısı oluşturulurken genelde kablolar, kanallara direk serilerek veya kanal içerisindeki muhafazalı borular içerisinde geçirilir.

Kabloların serilmesi için yapılan kanal kazıları “Altyapı Kanal Kazısı” ve “Altyapı Mini Kanal Kazısı” olmak üzere iki sınıfta değerlendirilmektedir.

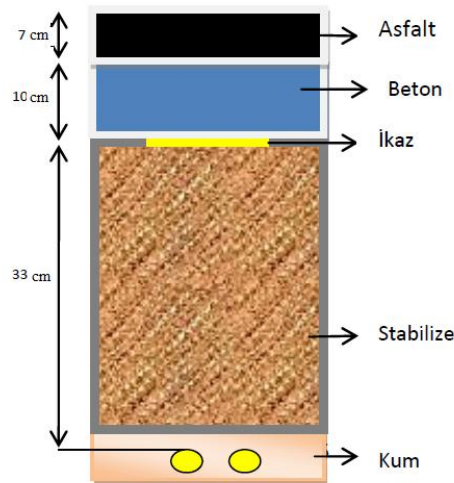
Altyapı Kanal Kazısı; derinliği en az 60 cm, genişliği en az 30 cm ve yer zemininden dikey olarak alta doğru özel makineler yardımıyla yapılan kazı çalışmalarıdır. Altyapı kanal kazısı geçilecek zemin çeşitlerine göre Tablo 1.6’da gösterildiği gibi sekiz kategoriye ayrılmıştır. Buna istinaden altyapı tesisi için yapılacak kazıların derinliği, kablo muhafaza kanallarının en üst kısmından itibaren zemin seviyesine kadar olan kısımdan oluşmaktadır. Asgari derinlik değerleri Tablo 1.6’da verilmektedir.

Tablo 1.6. Zemin çeşitlerine göre kazı üst derinlik değerleri (URL_4, 2015).

Geçiş Tipi	Derinlik
Kaplamalı Ana/Tali Yollar	50 cm
Kaldırım-Tretuvar	50 cm
Dikey Yol Geçişleri	120 cm
Orman, Köy vb. Diğer Yollar	90 cm
Normal Arazi	90 cm
Sulu Zeminler	90 cm
Eğimli ve Erozyonlu Araziler	90 cm
Braşman Kazısı	40 cm



Açılan kanal Şekil 1.45' de gösterildiği gibi dizayn edilmektedir. Kanal tabanına ince kum sıkıştırılarak serilir ve kanallar kum üzerine tesis edilir. Eğer sıkıştırma işlemi sırasında zeminin gevşek olduğu tespit edilmişse belirlenen beton sınıfına göre beton atılır ve üzerine yine ince kum sıkıştırılarak kanallar tesis edilir. Serilen her sıra ana muhafaza kanalı, ince kumla görünmeyecek şekilde kaplanır. Kanal kazısının en üst kısmında 7 cm kalınlığında asfalt payı bırakılır. Asfalt payının altında en az 10 cm lik uygun beton sınıfına göre beton yer almalıdır. Kanalların üst seviyesinden beton kısma kadar olan alan, stabilize dolgu sıkıştırma ile doldurulur ve dolgunun üzerine ikaz bandı yerleştirilir (Şekil 1.45).



Şekil 1.45. Telefon/Fiberoptik kablolarının muhafaza kanallarına döşeme dizaynı (URL_4, 2015).

Altyapı Mini Kanal Kazısı; derinliği en fazla 60 cm, genişliği en fazla 30 cm ve yer zemininden dikey olarak alta doğru özel makineler yardımıyla yapılan kazı çalışmalarıdır. Kanal güzergahı olarak alt yapı kazısında olduğu gibi, öncelikli olarak yaya kaldırım altları seçilmektedir. Mini kanal kazısı uygulamalarında geleneksel kum dolgu ve sıkıştırma yapılmaz. Çabuk donan, kendinden sıkışan hazır karışım dolgu malzemeleri kullanılır. Dolgunun kısa sürede trafik yükünü kaldıracak hale gelmesi için malzeme hızlı donmalı ve yeterli mukavemete ulaşmalıdır. Boruların ve zeminin daha sonra deforme olmaması için kullanılan dolgu malzemesi kendinden yerleşen akıcı özellikte olmalı ve doldurmak için uygulanan işlem (huni, baca vb.) boruların etrafında boşluk kalmayacak şekilde kazı kanalını tamamen kaplamalıdır. İhtiyaç duyulması halinde beton dolgunun borulara temasını engelleyecek şekilde en fazla 10 cm kum dolgu yapılır.

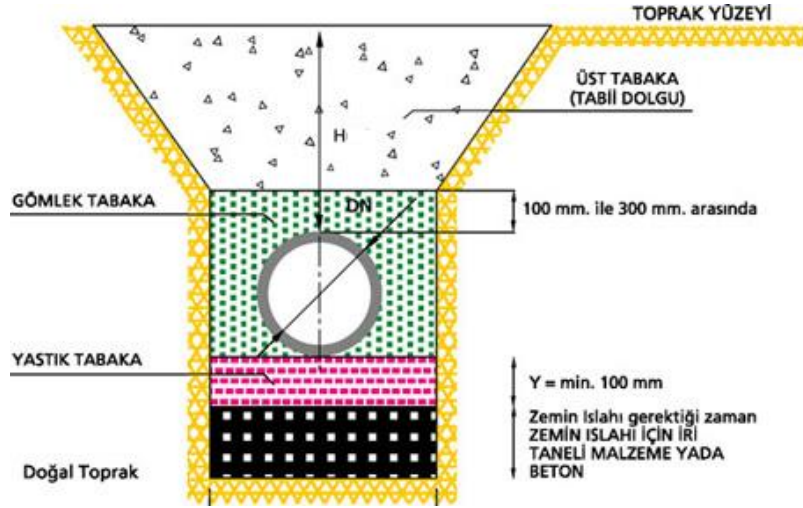
Elektronik haberleşme kabloları, kanal içerisine yerleştirilen HDPE adı verilen muhafaza boruları içerisinden de geçirilerek döşenmektedir. HDPE kablo muhafaza borusu; sert malzemeden yapılmış, kalın cidarlı, dış yüzeyleri pürüzsüz, iç yüzeyleri içlerinden kablo veya diğer küçük çaplı HDPE kablo muhafaza borularının geçmesini sağlayacak özellikteki yüksek yoğunluklu polietilen borularıdır. Kablo muhafaza boruları ile döşeme yapılıyorsa, bu borular büzüşmeden ve eğilmeden ek odasının içine en az 10 cm girecek şekilde yerleştirilmesi gerekir.

Sıcak/soğuk su borularının yer altına döşenme güzergahı, daha önce döşenen alt yapı elemanları dikkate alınarak (örneğin kanalizasyon borularının üzerinde olası sızıntılardan etkilenmeyecek uzaklıkta, enerji hatları ve elektronik haberleşme hatları da dikkate alınarak) seçilmelidir. Toprak altına döşenecek borularda donmaya karşı önlem almak için bulunduğu bölgeye göre 60 – 80 – 100 cm derinlikte gömülerek izolasyon yapılmalıdır. Ayrıca ağır vasıta geçecek yerlerde gerekli önlem alınmalıdır.

Sıcak su boruları genelde ısıtma sistemlerine ait borulardır. Diğer alt yapı elemanlarında olduğu gibi sıcak su boruları da kanal içerisine döşenir. Bu borular döşenirken boru çevresi ve boruların yerleştirildiği yatak ısı kaybını en aza indirebilecek şekilde yapılmalıdır ve buna uygun dolgu malzemesi kullanılmalıdır. Kanal derinliği en az 30 cm, en çok 80 cm olacak şekilde yapılmalıdır. Kullanılan borular genelde çelik borulardır ve çapları (22.5 - 6 cm arasında) basınca göre değişmektedir.

Soğuk su boruları, şehir şebeke sularının dağıtımını amacına yönelik olarak döşenmektedir. Bu boruların döşenmesi için Şekil 1.46' da gösterildiği gibi kanallar açılmaktadır. Borular, yerleştirmeden önce borunun yerleştirileceği bir yastık tabaka

oluşturulur. Bu tabaka üzerine yerleştirilen boru etrafına gömlek tabaka olarak genelde kum kullanılır. Kumla çevrelendirilmesinin nedeni, suyun serin kalmasını sağlamaktır. Boru üzerine en az 10 cm kum dolgusu yapılmaktadır. En üstte de yol seviyesine kadar toprak dolgu yapılır. Kullanılan borular PVC veya çelik borulardır. Çapları basınca göre değişiklik göstermektedir.



Şekil 1.46. Şehir şebeke su kanalı döşeme şekli (URL_5, 2015).

Son olarak, bu tez kapsamında incelenecek olan alt yapı elemanlarından biri olan atık su tahliyesi için döşenmiş kanalizasyon borularıdır. Bu borular; malzeme olarak pişmiş kil, asbestli çimento, beton, sert plastikten oluşmaktadır. Borular diğer alt yapı elemanlarında olduğu gibi kanallar içerisine yerleştirilmektedir. Bu kanallar; daire, yumurta tipli ve elips şekillerinde olabilir. Kanalizasyonda kullanılan boru çapları 15 cm'den 3 m'ye kadar değişebilir. Kanalizasyon boruları minimum 1.8 m, maksimum 6 m derinliğe kadar döşenmektedir. Bu borularından oluşabilecek sızmalar veya kırılmalardan dolayı boru dışına çıkabilecek atık sular düşünerek kanalizasyon borularının içme suyu şebekesinin belirli oranda altına döşenmesi gerekir. Kanalizasyon kanallarına güzergâh olarak, sokağın ortasıyla kaldırım arası veya yaya kaldırımının altı seçilmektedir. Boruları döşemek için hendekler açılıp içerisine borular konularak üzerleri kapatılmaktadır.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Modern yaşamda teknolojinin kullanımı oldukça önemlidir. Ev, iş yeri, okul, vb. birçok alanda teknolojik gelişmelere paralel olarak kullanılan alt yapı elemanları, yaşam kalitesini önemli oranda etkilemektedir. Şehir veya herhangi bir kurumun yerleşke alt yapısında bulunan elemanlarda (elektrik/telefon/fiberoptik kablolar, sıcak/soğuk su boruları ve atık su tahliyesi için döşenmiş kanalizasyon borular) (Tablo 2.1) yaşanan aksaklıklar veya herhangi bir nedenle yapılan kazı çalışmaları esnasında yeri ve derinliği kayıt altında olmayan elemanlara verilen zararlar, düzenli yaşam akışını bozmaktadır. Yaşanan bu aksaklıkların en kısa zamanda, en az maliyetle ve en hassas bir şekilde giderilmesi ekonomik ve sosyal kazanımlarla sonuçlanacaktır. Buna yönelik olarak öncelikle sorun yaşanan alt yapı elemanın yeri ve derinliğinin bilinmesi gerekir. Ancak ülkemizde çoğu ilgili kurumlarda bu bilgilere ulaşmak oldukça zor olmaktadır. Yeri ve derinliği bilinmeyen alt yapı elemanlarını yüzeyden hiçbir hasar/delgi yapmaksızın yer radarı yöntemiyle belirlemek mümkündür. Bu tez çalışmasında, Karadeniz Teknik Üniversitesi (KTÜ) Kanuni yerleşkesinde seçilen pilot alanlarda mevcut alt yapı elemanlarının (metalik ve metalik olmayan borular, telefon/elektrik/ fiberoptik kablolar) yerleri ve derinlikleri yer radarı yöntemi ile belirlenmiştir.

Tablo 2.1. Modern yaşam alanlarında kullanılan alt yapı elemanları.

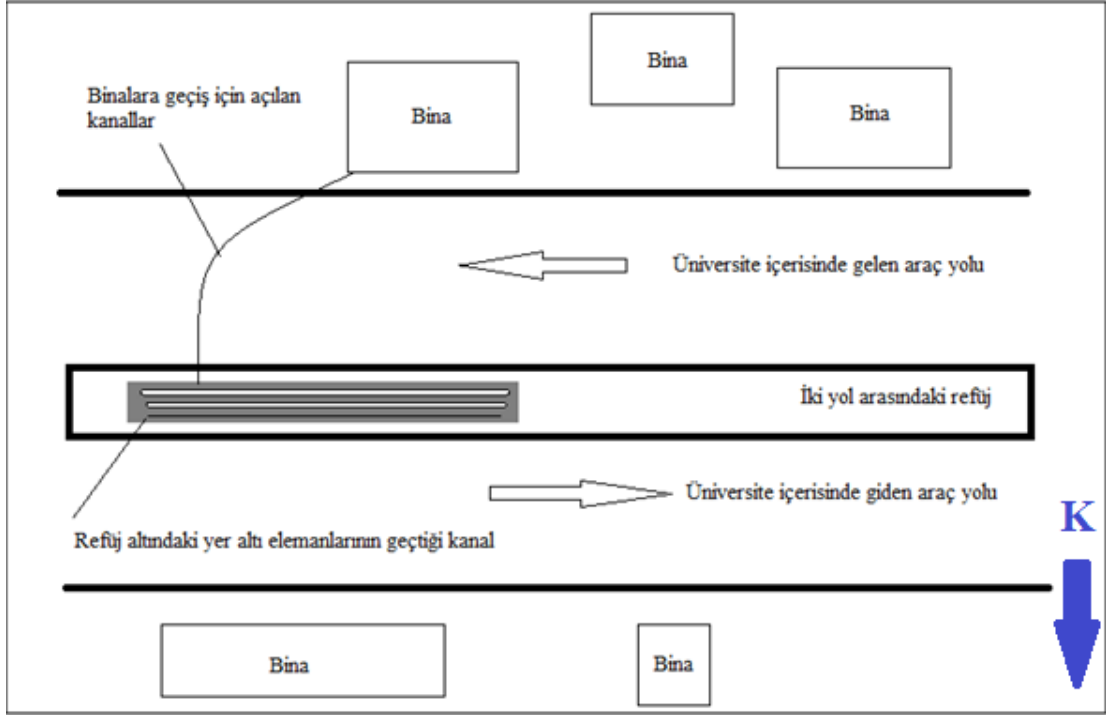
Alt Yapı Elemanları	Kullanım Alanı
Enerji (Elektrik) Kabloları	Enerji kaynağı olarak
Elektronik Haberleşme (Telefon/Fiberoptik) Kabloları	Telefon/ Fiberoptik kabloları haberleşme ve internet için iletişim amacıyla
Sıcak Su Boruları	Modern yaşamda genellikle ısınma amacıyla yönelik olarak
Soğuk Su Boruları	Yaşam alanlarında çeşitli ihtiyaçlar için
Atık Su Boruları	Kanalizasyon ve yüzey sularının kontrollü bir şekilde drenajı için

İnceleme alanında bulunan alt yapı elemanları; Mala Ramac GPR Proex kontrol birimi ile 250, 500 ve 800 MHz merkez frekanslı antenler kullanılarak araştırılmıştır. Zemin altındaki metalik ve metalik olmayan borular; telefon, elektrik ve fiberoptik kablolardan biri veya birkaçı olması durumunda, bunlara dik seçilen bir ölçü hattı boyunca toplanan yer radarı kesitinde, bunlara ait hiperbolik yansımalar elde edilecektir. Bu

yansımaların hangisinin hangi alt yapı elemanına ait olduğunu anlayabilmek için modelleme çalışmalarından yararlanılmaktadır. Bundan dolayı, arazi çalışmalarına paralel olarak yer radarı verilerinin modellenmesi çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

Bu tezin amacına yönelik olarak öncelikle, KTÜ Kanuni Yerleşkesi'nde inceleme alanı olarak seçilen pilot bölgelerdeki mevcut alt yapı elemanlarının yer altına döşenme şekilleri araştırılmıştır. KTÜ Yapı İşleri Daire Başkanlığı elemanları ile yapılan sözlü görüşmelerden elde edilen bilgilere göre, Kanuni Yerleşkesi alt yapısının ana hatları; trafik akışının sağlandığı ana güzergah ortasındaki refüj altından 2 m genişliğinde 3 m yüksekliğindeki kanal içerisinden geçmektedir. Bu hatlardan bölümlere ve diğer binalara tali kanallar içerisinden dağıtım yapıldığı (Şekil 2.1) bilinmektedir. Araştırılan alt yapı elemanlarından;

- ❖ elektrik kablolarının 30-200 cm,
- ❖ üniversite iç hat telefon kabloları ise eski ve yeni sistem olmak üzere iki şekilde görülmekte; eski sistemde 15 cm çapında çimentodan döküm yapılmış borularla, yeni sistemde 10-15 cm çapındaki PVC borularla, 50-60 cm,
- ❖ fiberoptik kablolar 10-15 cm çapındaki PVC borularla veya direk olarak, 50-60 cm,
- ❖ soğuk su boruları 5.08 cm çaptaki plastik/metal borular kullanılarak, 40-50 cm,
- ❖ sıcak su boruları 8 cm çaptaki dikişsiz çelik çekme borular kullanılarak, 30-50 cm,
- ❖ atık su boruları 50 cm çapındaki koruger veya beton borular kullanılarak, 200-250 cm, arasındaki derinliklerde açılan kanallarla yeraltına döşendiği tespit edilmiştir. Ancak çeşitli nedenlerle bu dağıtımların bazıları iptal edilmiş, hasar görmüş ve/veya ilk inşasından sonra yerleri değiştirilmiş ve bu değişiklikler kayıt altına alınmamıştır. Bundan dolayı kullanımda olan hatlar tam olarak bilinmemektedir. Bu tez çalışmasında yerleri ve derinlikleri bilinmeyen bu hatların araştırması yer radarı yöntemi kullanılarak yapılmıştır.



Şekil 2.1. KTÜ alt yapı elemanlarının geçtiği ana kanal ve tali kanal güzergah şekili

Araştırmalar sonucunda; inceleme alanında bulunan alt yapı elemanlarının yaklaşık olarak gömüldüğü derinlikler ve madde özellikleri belirlenmiştir. Bu bilgiler ışığında, arazi koşullarına paralel olarak modelleme yapıp yapay radargramlar elde edilmiştir. Elde edilen bu radargramlar gerçek arazi verilerini yorumlamaya yardımcı olmuştur.

2.1. Modelleme Çalışmaları

Tez kapsamında yapılan modelleme çalışmalarında; alt yapı elemanlarının (metalik ve metalik olmayan borular, telefon, elektrik ve fiberoptik kablolar) yer radarı yöntemiyle araştırılması sonucunda elde edilen radar kesitlerinde görünen hiperbolik yansımaların, hangisinin hangi alt yapı elemanına ait olduğunu anlayabilmek ve altyapı elemanlarının birinin veya birkaçının beraber olduğu durumlarda, bunlara dik seçilen bir ölçü hattı boyunca toplanan yer radarı kesitinde, nasıl yansımalar elde edileceğini görmek amaçlanmıştır. Bundan dolayı, arazi çalışmalarına paralel olarak oluşturulmuş 6 model geometri için yer radarı modellenmesi gerçekleştirilmiştir.

Modelleme çalışmalarında Reflex-Win (7.5) yazılımının modelleme modülü kullanılarak sayısal modeller oluşturulmuştur. Bu modeller oluşturulurken gerçek arazi

koşulları baz alınmıştır. Oluşturulan modellerde KTÜ Kanuni Yerleşkesi'ndeki alt yapı elemanlarının yeraltına döşenmesinde kullanılan malzeme türleri seçilmiştir. Bu malzemelerin neler olduğu ve bunlara ait dielektrik özellikler tablo 2.2'de verilmiştir. Tablodaki değerler yaklaşık değerlerdir. Alt yapı elemanlarının dielektrik özellikleri, içeriğindeki hammaddelerin özelliklerine bakılarak yaklaşık değerler olarak alınmıştır. Bütün modellerde alt yapı elemanlarının yerleştirildiği ortam, tekdüze özellikli toprak birim olarak seçilmiştir.

Tablo 2.2. Modelleme çalışmasında kullanılan alt yapı elemanlarının dielektrik özellikleri

Malzeme	Dielektrik sabiti ϵ (F/m)	Elektriksel iletkenlik σ (S/m)	Manyetik geçirgenlik μ (H/m)
Kum	8	0.00002	0
Toprak(kuru)	3-5	0.00001	0
Toprak(doygun)	20-30	0.0001	0
Asfalt	5	0	0
Hava	1	0	0
PVC Boru	3	0.006	0
Beton Boru	4.5-5.5	0	0
Koruger Boru	3.23	0	0
Çelik Boru	5.15	10(*)	0
Fiberoptik Kab.	3.75	0	0
Telefon Kablo	1.88	0	0
Elektrik Kablo	3.38	0	0

(*)Çeliğin elektriksel iletkenliği 10^7 S/m olarak bulunmasına rağmen, kullanılan değer programın hata vermesinden dolayı 10 S/m'dir.

Elde edilen yapay radargramlar; Stolt (1978) tarafından önerilen göç işlemine tabi tutularak, başlangıçta seçilen model geometrilerindeki alt yapı elemanlarının gerçek yerleri belirlenmiştir. Yapay radargramlar hesaplanırken modellere ait alınan bağıl dielektrik geçirgenlik değerleri (1.14) bağıntısında kullanılıp hesaplanan hız değerleri, göç işlemi esnasında kullanılmıştır.

Modellemeler sırasında, model sınırlarının da yansıtıcı özellikleri dikkate alınmalıdır. Bu durum göz ardı edilirse model sınırlarından da istenmeyen yansımalar hesaplanacak radargramda yer alır. Bu durumun oluşmaması için mükemmel soğurucu

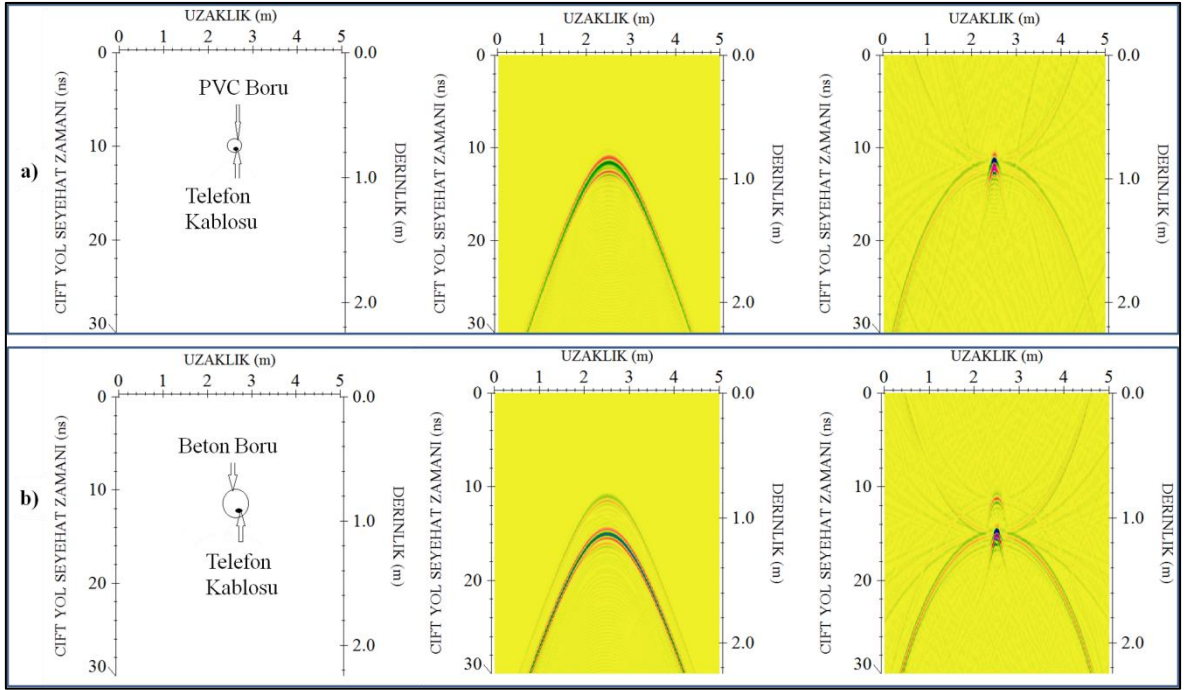
sınır tanımlaması yapılmalıdır. Yani sınırlara çarpan elektromanyetik dalga geriye yansımamalıdır. Bu tez çalışmasında kullanılan Reflex-Win programının modelleme modülündeki "boundary conditions" seçeneğinde yer alan "lin.absorbing-range" yaklaşım tercih edilmiştir.

KTÜ Kanuni Yerleşkesi' nde yer radarı verileri toplanırken 250, 500 ve 800 MHz'lik korumalı antenler kullanılmıştır. Bu veriler analiz edildiğinde yerleşkedeki mevcut alt yapı elemanları genellikle 500 MHz'lik antenle toplanan verilerde gözlenmiştir. Bundan dolayı modelleme çalışmalarında 500 MHz merkez frekans değeri alınarak hesaplamalar yapılmıştır. Yapılan modelleme çalışmalarının model parametreleri tablo 2.3' de verilmiştir.

Tablo 2.3. Yapılan modelleme çalışmalarının model parametreleri

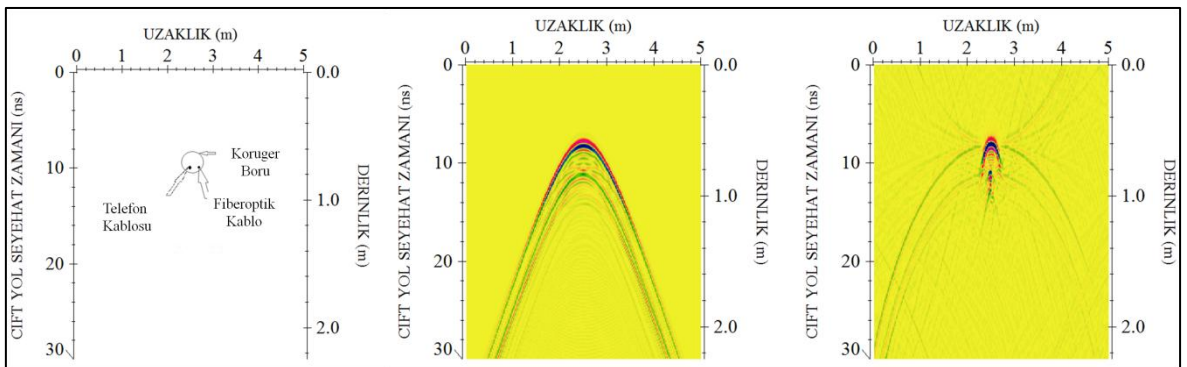
Model No	Malzeme	ϵ (F/m)	σ (S/m)	μ (H/m)	Çap (m)	x merkez (m)	z merkez (m)	Δt	Δx	Tmax	Frekans	
Model 1	(a)	Toprak	5	0.00001	0	-	-	0.02	0.01	30	500	
		PVC boru	3	0.006	0	0.05	2.5					0.775
		Telefon kab.	1.88	0	0	0.02	2.5					0.770
	(b)	Toprak	5	0.00001	0	-	-					
		Beton boru	5	0	0	0.15	2.5					0.92
		Telefon kab.	1.88	0	0	0.02	2.5					0.97
Model 2	Toprak	5	0.00001	0	-	-	0.02	0.01	30	500		
	Koruger boru	3.23	0	0	0.2	2.5					0.7	
	Telefon kab.	1.88	0	0	0.02	2.53					0.77	
	Fiberoptik kab.	3.75	0	0	0.01	2.48					0.78	
Model 3	(a)	Toprak	5	0.00001	0	-	-	0.03	0.01	30	500	
		Elektrik Kab.1	3.38	0	0	0.02	2					0.98
		Elektrik Kab.2	3.38	0	0	0.02	2.1					0.98
	(b)	Toprak	5	0.00001	0	-	-					
		Elektrik Kab.1	3.38	0	0	0.02	2.5					0.8
		Elektrik Kab.2	3.38	0	0	0.02	2.5					1
	(c)	Toprak	5	0.00001	0	-	-					
		Elektrik Kab.1	3.38	0	0	0.02	2.3					0.8
		Elektrik Kab.2	3.38	0	0	0.02	2.5					1
Model 4	Toprak	5	0.00001	0	-	-	0.02	0.01	30	500		
	PVC boru	3	0.006	0	0.05	2					0.5	
	Çelik boru	5.15	10	0	0.08	2.2					0.5	
Model 5	Toprak	5	0.00001	0	-	-	0.02	0.01	60	500		
	Koruger boru	3.23	0	0	0.5	2.5					2	
	PVC boru	3	0.006	0	0.05	2					0.5	
	Çelik boru	5.15	10	0	0.08	2.2					0.5	
Model 6	Toprak	5	0.00001	0	-	-	0.01	0.01	60	500		
	Kum (dikdörtgen)	8	0.00002	0	**	1.6					0.6	
	Elektrik Kab.1	3.38	0	0	0.02	1.24					0.76	
	Elektrik Kab.2	3.38	0	0	0.02	1.44					0.76	
	Elektrik Kab.3	3.38	0	0	0.02	1.64					0.76	
	PVC boru	3	0.006	0	0.05	3.4					0.5	
	Çelik boru	5.15	10	0	0.08	4					0.6	
	Koruger boru 1	3.23	0	0	0.2	8					0.8	
	Koruger boru 2	3.23	0	0	0.5	6					2.5	
	Fiberoptik kab.	3.75	0	0	0.01	8.1					0.84	
Telefon kab.	1.88	0	0	0.02	7.9	0.84						

** Dikdörtgen şeklinde kanal açıldığı varsayılp kanal genişliği 80 cm derinliği 60cm alınmıştır.



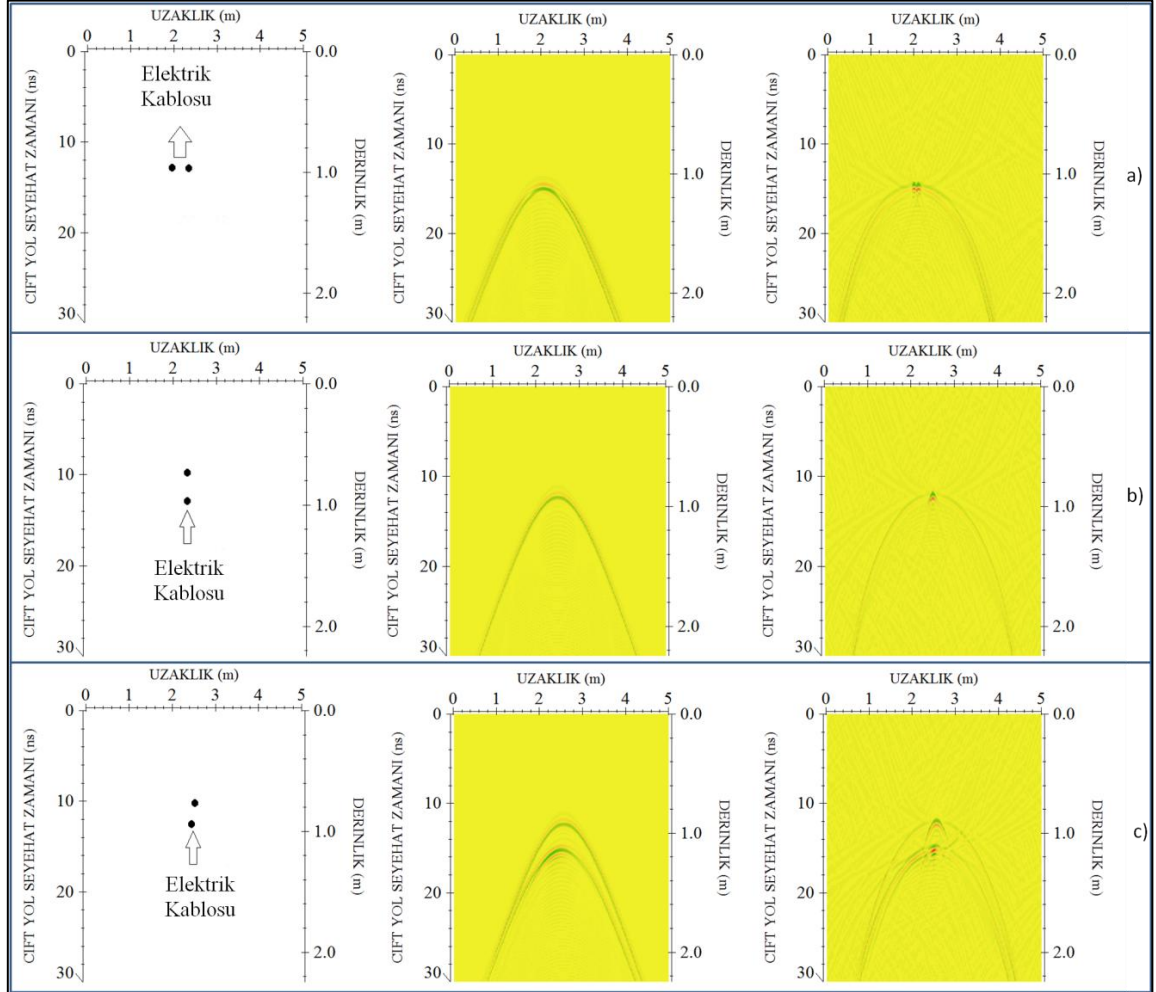
Şekil 2.2. a) Model 1a' ya b) Model 1b'ye ait yeraltı geometrisi (solda) yapay radargram (ortada) migrasyon sonra elde edilen radargram (sağda)

Model 1; telefon kablosunun pvc (Model 1a) ve beton (Model 1b) boruları içerisine yerleştirilerek oluşturulmuş yer altı geometrilerinden elde edilen yapay radargramlar Şekil 2.2 a,b 'nin orta kısımlarında verilmiştir. Bu radargramlardaki saçılmış yansımaların gerçek yerlerine toplanması amacıyla uygulanan migrasyon sonrası elde edilen görünüm ise aynı şeklin alt kısmında görülmektedir.



Şekil 2.3. Model 2'ye ait yeraltı geometrisi (solda), elde edilen yapay radargram (ortada), migrasyon sonrası elde edilen radargram (sağda)

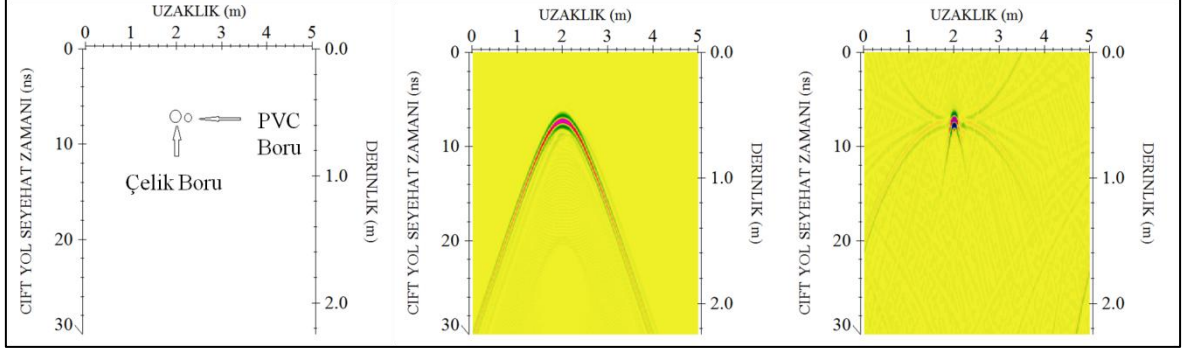
Model 2; telefon ve fiberoptik kabloların koruger boru içerisinde yerleştirilerek oluşturulan yeraltı geometrisi (solda), elde edilen yapay radargram (ortada) ve migrasyon sonrası elde edilen yapay radargram (sağda) Şekil 2.3' de verilmektedir. Modele ait diğer parametreler Tablo 2.3' de verilmiştir.



Şekil 2.4. a) Model 3a'ya b) Model 3b'ye c) Model 3c'ye ait yeraltı geometrisi (solda) yapay radargram (ortada) migrasyon sonra elde edilen radargram (sağda)

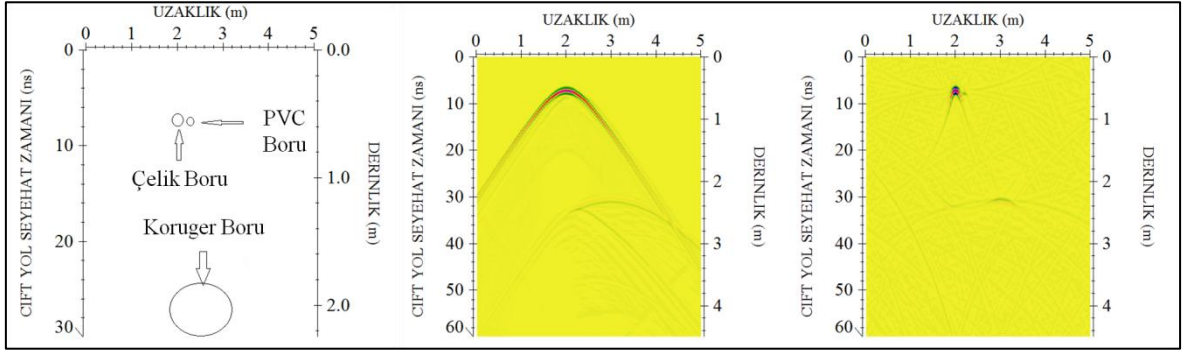
Model 3; yeraltına döşenmiş elektrik kablolarının yan yana (model 3a) olması ve üst üste (model 3b-c) olması durumundaki modelleme çalışmalarıdır. Model 3a; derinlikleri aynı olan iki elektrik kablosunun yan yana olması durumuna ait modeli, Model 3b; üst üste döşenmiş aralarında 20 cm bulunan iki elektrik kablosunun x mesafelerinin aynı olması durumuna ait modeli, Model 3c ise üst üste döşenmiş aralarında 20 cm bulunan iki elektrik kablosunun x mesafelerinin 20 cm aralıklı olması durumuna ait modeli

göstermektedir. Modellere ait yeraltı geometrileri (solda), elde edilen yapay radargramlar (ortada) ve migrasyon sonrası elde edilen yapay radargramlar (sağda) Şekil 2.4' de verilmektedir. Modele ait diğer parametreler Tablo 2.3' de verilmiştir



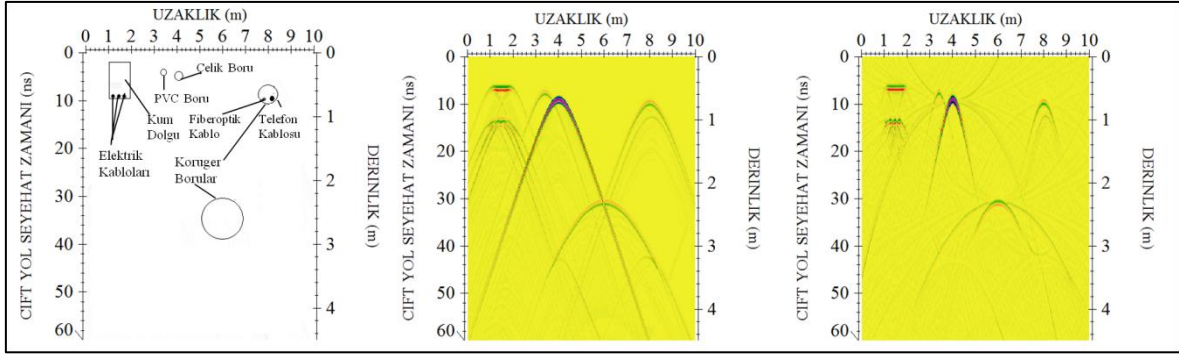
Şekil 2.5. Model 4'e ait yeraltı geometrisi (solda), elde edilen yapay radargram (ortada), migrasyon sonrası elde edilen radargram (sağda)

Model 4; sıcak (çelik)/soğuk (pvc) su borularının yeraltına döşenirken yan yana olmasını gösteren yeraltı geometrisi (solda), elde edilen yapay radargram (ortada) ve migrasyon sonrası elde edilen yapay radargram (sağda) Şekil 2.5' da verilmektedir.



Şekil 2.6. Model 5'e ait model yapı (solda), elde edilen yapay radargram ortada, migrasyon sonrası elde edilen radargram (sağda)

Model 5; sıcak (çelik) / soğuk (pvc) su borularına ve atık su tahliyesi için döşenmiş kanalizasyon (koruger) borularını aynı kesitte gösteren yeraltı geometrisi (solda), elde edilen yapay radargram (ortada) ve migrasyon sonrası elde edilen yapay radargram (sağda) Şekil 2.6' da sunulmuştur.



Şekil 2.7. Model 6'a ait yeraltı geometrisi (solda), elde edilen yapay radargram (ortada), migrasyon sonrası elde edilen radargram (sağda)

Model 6; bu tez kapsamında yer alan bütün alt yapı elemanlarının (telefon/fiberoptik/elektrik kabloları ve atık/sıcak/soğuk su boruları) aynı ortamda bulunması durumu için tasarlanmış yeraltı geometrisini (Şekil 2.7 solda) içermektedir. Bu geometriden elde edilen yapay radargram (ortada) ve migrasyon sonrası elde edilen radargram (sağda) şekil 2.7' de verilmiştir. Radargram incelendiğinde en yüksek genlikli hiperbol, 4 m uzaklık 0.6 m derinlikte yer alan çelik boru aittir.

Model 6 ya ait radargramın 2.5 m derinlik ve 6 m uzaklıktaki geniş görümlü hiperbolü atık su borusu olarak kullanılan koruger boruya aittir. Bu model geometriden de görüldüğü üzere, kanal içerisine döşenmiş 3 adet elektrik kablosunun verdiği birbirine bitişik küçük boyutlu anomaliler; çelik borunun anomalisinin genliğine göre daha zayıf bir görünümde olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca bu kanalın üstündeki örtü kum tabakası yatay bir yansıtıcı sınır görünümünü radargramda oluşturmuştur. Aynı modelde yer alan pvc su borusu ilgili radargramda en zayıf genlikli hiperbol oluşturabilmiştir. 8 m uzaklık ve 0.8 m derinlikte yer alan koruger boru içerisindeki telefon ve fiber optik kabloların vermiş olduğu yer radarı anomalilerinin radargramdaki görünümleri; üstteki yüksek alttaki daha zayıf genlikli iç içe geçmiş iki hiperbol şeklindedir.

2.3. Arazi Çalışmaları

Bu tezin araştırma konusu için Karadeniz Teknik Üniversitesi (KTÜ) Kanuni yerleşke alanı içerisinde pilot alanlar seçilmiştir. Bu alanlardaki yeri bilinmeyen metalik ve metalik olmayan borular, telefon/elektrik/fiberoptik kablolar vb alt yapı elemanlarının GPR yöntemi ile belirlenmesi kapsamında çok sayıda ölçümler toplanmıştır. Belirlenen alt yapı

elemanları, KTÜ'nün hali hazır harita üzerine işlenmiştir. 21 alanın ayrı ayrı tanıtıldığı şekillerdeki (Şekil 3.1- 3.23) alan krokileri ölçeksiz olup, bu krokiler profillerin konumlarını göstermek amacıyla çizilmiştir. Profillerin ve elde edilen anomalilerin yerleri ölçekli olarak Ek 1 ve Ek 2 de verilen haritalarda gösterilmiştir.

Araştırma alanlarının altındaki alt yapı elemanlarını belirlemek için KTÜ Mühendislik Fakültesi Jeofizik Mühendisliği Uygulamalı Jeofizik Laboratuvarındaki Mala/Ramac GPR sistemleri (CU II ve Proex) ve 250, 500 ve 800 MHz merkez frekanslı korumalı antenler kullanılarak GPR verileri toplanmıştır (Şekil 2.8). Elde edilen veriler Reflexw 7.5 (Sandmeier, 2015) programında temel veri işlem adımları uygulanarak işlenmiştir.



Şekil 2.8. Ölçümler sırasında kullanılan antenler

İnceleme alanında toplam 21 farklı alan seçilmiştir (Şekil 2.9). Bu alanlar A1, A2, A3,....., A21 olarak Şekil 2.9 da gösterilmiştir.

Alan 1 olarak tanımlanan ilk kısım; KTÜ Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği ve Mimarlık arasında kalan alanıdır. Bu alanda 500 MHz anten ile yaklaşık 38 m uzunlukta 4 m aralıkla birbirine paralel 4 profilde ölçü alınmıştır. Alan 2; KTÜ Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü kantinin ön kısmında kalan alandır. Bu alanda 500 MHz anten ile 4.2-8.5 m arasında değişiklik gösteren uzunluklarda toplam 8 profilde ölçü alınmıştır. Arazi şartlarının uygun olmamasından dolayı bir profil boyunca tek ölçü alınamamış alan ikiye bölünmüştür. İlk dört profil 4 m aralıklı birbirine paralel son dört profil ise ilk alınan ölçülerin bittiği yerden başlayıp yine 4 m aralıklı ve birbirine paraleldir. Alan 3; KTÜ Akademisyen yemekhanesi önündeki alandır. Bu alanda 500 MHz anten ile 10-14 m arasında değişiklik gösteren uzunluklarda 2 m aralıklı birbirine paralel 4 profilde ölçü alınmıştır. Alan 4; KTÜ Akademisyen yemekhanesine giden yol üzerindeki alandır. Bu alanda 500 MHz anten ile 2.6-15.5 m arasında değişiklik gösteren uzunluklarda birbirlerine paralel 10 profilde ölçü alınmıştır. Profiller arasındaki uzaklık eşit alınmamıştır. Alan 5; KTÜ Makine Mühendisliği otopark giriş yolu üzerindeki alandır. Bu alanda 500 MHz anten ile 2.5 m aralıklı yaklaşık 26 m uzunlukta birbirlerine paralel 3 profilde ölçü alınmıştır. Alan 6; KTÜ Makine Mühendisliği otoparkı alanıdır. Bu alanda 500 MHz anten ile kuzey-güney uzanımlı 2 m aralıklı yaklaşık 7.4 m uzunlukta birbirlerine paralel 16 profilde ölçü alınmıştır. Ayrıca aynı yerde doğu-batı uzanımlı yaklaşık 7 m uzunlukta 2 m aralıklı birbirine paralel 4 profilde ölçü alınmıştır. Alan 7; KTÜ Makine Mühendisliği Bölümü yan bahçesi üst bölümünde kalan alandır. Bu alanda 500 MHz anten ile yaklaşık 7 m uzunlukta 2 m aralıklı birbirine paralel 3 profilde ölçü alınmıştır. Alan 8; KTÜ Makine Mühendisliği Bölümü yan bahçesi alanıdır. Bu alanda 500 MHz anten ile yaklaşık 2 m uzunlukta 5 m aralıklı birbirine paralel 7 profilde ölçü alınmıştır. Alan 9; KTÜ Harita Mühendisliği Bölümü ve Makina Mühendisliği Bölümü arasında kalan araç yolu üzerinde arada kalan kavşak alanıdır. Bu alanda 500 MHz anten ile yaklaşık 2 m uzunlukta 5 m aralıklı birbirine paralel 7 profilde ölçü alınmıştır. Alan 10; KTÜ Jeoloji Mühendisliği Bölümü araç otoparkı sağ yan kısmında kalan alandır. Bu alanda 500 MHz anten ile yaklaşık 26 m uzunlukta 1 m aralıklı birbirine paralel 3 profilde ölçü alınmıştır. Alan 11; KTÜ Jeoloji Mühendisliği Bölümü araç otoparkı alanıdır. Bu alanda 500 MHz anten ile yaklaşık 28 m uzunlukta 2 m aralıklı birbirine paralel 3 profilde ölçü alınmıştır. Alan 12; KTÜ Jeoloji Mühendisliği Bölümü araç otoparkı sol yan kısmında kalan alandır. Bu alanda 500 MHz anten ile 6.4-7.2 m arasında değişiklik gösteren uzunluklarda birbirine paralel 3 profilde ölçü alınmıştır. Alan 13; KTÜ Jeoloji Mühendisliği Bölümü ile

Orman Mühendisliği Bölümü arasında kalan alandır. Bu alanda 500 MHz anten ile yaklaşık 5.6 m arasında uzunlukta birbirine paralel 3 profilde ölçü alınmıştır. Alan 14; KTÜ Jeoloji Mühendisliği Bölümü üst kısmındaki otobüs durağının doğusunda (kroki üzerinde 2. - 4. profil) 2 ve batısında (kroki üzerinde 1. - 3. profil) da 2 olmak üzere toplam 4 profil içermektedir. Bu alanda 500 MHz anten ile yaklaşık 5.6-8.2 m arasında değişiklik gösteren uzunluklar da kendi aralarında birbirine paralel toplam 4 profilde ölçü alınmıştır. Alan 15; KTÜ Orman Mühendisliği Bölümü ile Jeoloji Mühendisliği Bölümü arasında kalan alandır. Bu alanda 500 MHz anten ile yaklaşık 9-12.2 m arasında değişiklik gösteren uzunluklarda birbirine paralel 4 profilde ölçü alınmıştır. Alan 16; KTÜ Orman Mühendisliği Bölümü önünde kalan yaya kaldırımı olarak kullanılan alandır. Bu alanda 500 MHz anten ile yaklaşık 4-9 m arasında değişiklik gösteren uzunluklarda birbirine paralel 10 profilde ölçü alınmıştır. Alan 17; KTÜ Orman Mühendisliği Bölümü önünde araç yolu üzerinde kalan alandır. Bu alanda 500 MHz anten ile yaklaşık 5.6 m uzunlukta birbirine paralel 4 profilde ölçü alınmıştır. Alan 18; KTÜ Orman Mühendisliği Bölümü ile Orman Endüstri Bölümü arasında kalan araç otoparkının olduğu alandır. Bu alanda 500 MHz anten ile yaklaşık 9-14 m arasında değişiklik gösteren uzunluklarda birbirine paralel 3 profilde ölçü alınmıştır. Alan 19; KTÜ Jeoloji Mühendisliği Bölümü üstten giriş yolu üzerinde birinci merdivenin önünde kalan alandır. Bu alanda 500 MHz anten ile yaklaşık 14 m uzunlukta 2 m aralıklı birbirine paralel 4 profilde ölçü alınmıştır. Alan 20; KTÜ Jeoloji Mühendisliği Bölümü üstten giriş yolu üzerinde ikinci merdivenin önünde kalan alandır. Bu alanda 500 MHz anten ile yaklaşık 11.2-12.6 m arasında değişiklik gösteren uzunluklarda birbirine paralel 3 profilde ölçü alınmıştır.

Bu tez çalışmasındaki inceleme alanları genellikle KTÜ Kanuni yerleşkesinin Orman Mühendisliği, Makina Mühendisliği ve Mimarlık bölüm binaları civarında seçilmiştir (A1-20). 21. inceleme alanı olan A21 ise yerleşkenin kuzey kısmında KTÜ Jeofizik Mühendisliği bölümü çevresidir (Şekil 2.10). Bu alanda 250, 500 ve 800 MHz antenlerle toplam 5 profilde ölçü alınmıştır.

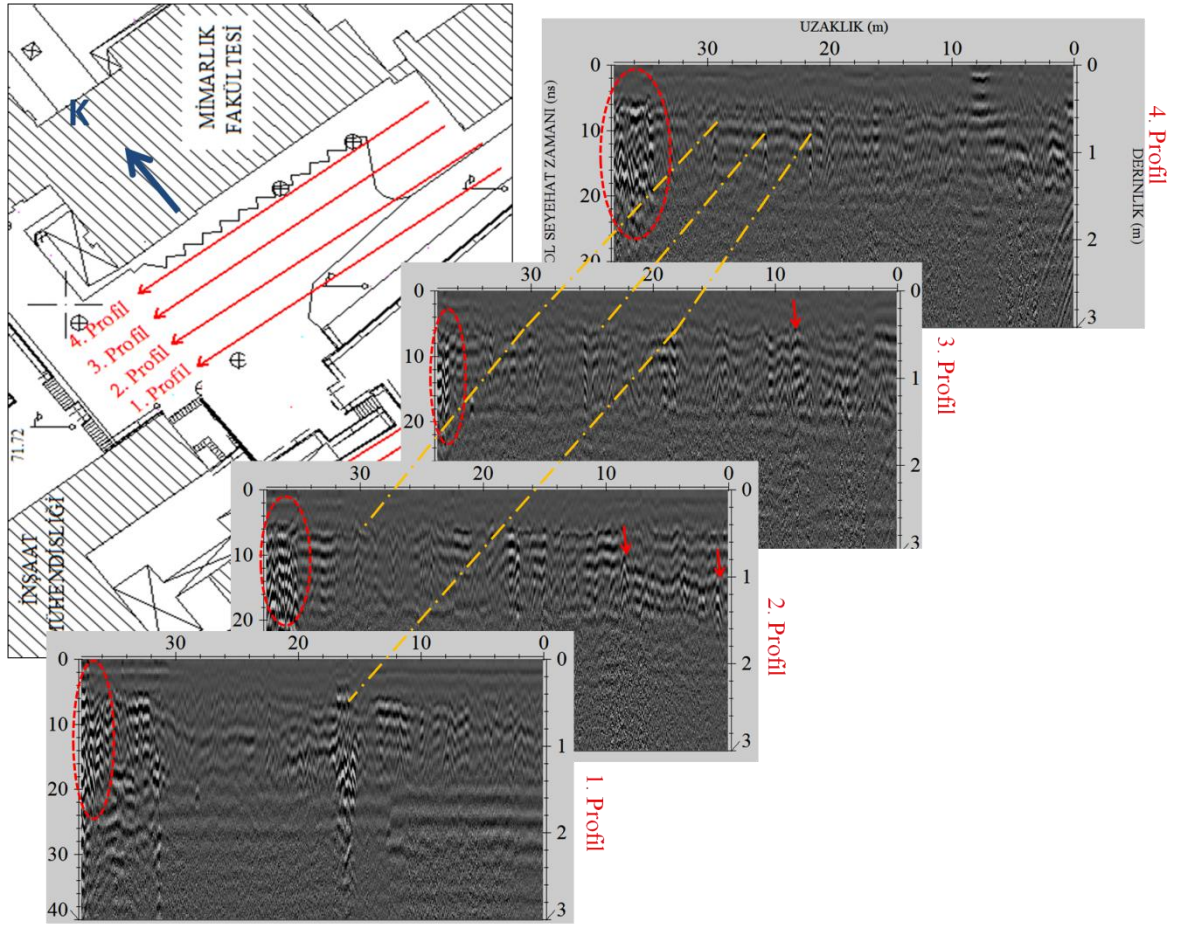


Şekil 2.10. A21 alanının krokisi

Seçilen 21 alandaki, birbirine paralel hatlarla alınan yer radarı ölçümlerinin hat başlangıçlarında arazi koşullarına bağlı olarak (antenlerin aynı noktalardan başlayıp bitirilemeyişinden kaynaklı) kaymalar oluşmuştur. Bu durum radargramlarda gözlenen benzer hiperbolik yansımaların uzaklık bilgilerinde farklılıklara neden olmuştur. Bundan dolayı alt yapı elemanlarının güzergahları belirlenirken yaklaşık uzaklık bilgileri verilmektedir.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu tez çalışmasında, seçilen inceleme alanlarında toplanan tüm yer radarı ölçülerine temel veri işlem adımları ve ileri veri işlemden migrasyon uygulanmıştır. Birbirine paralel hatlarda yaklaşık aynı uzaklık ve derinliklerde gözlenen benzer hiperbolik yansımalar belirlenerek olası alt yapı elemanları için güzergah tespit edilmeye çalışılmıştır.

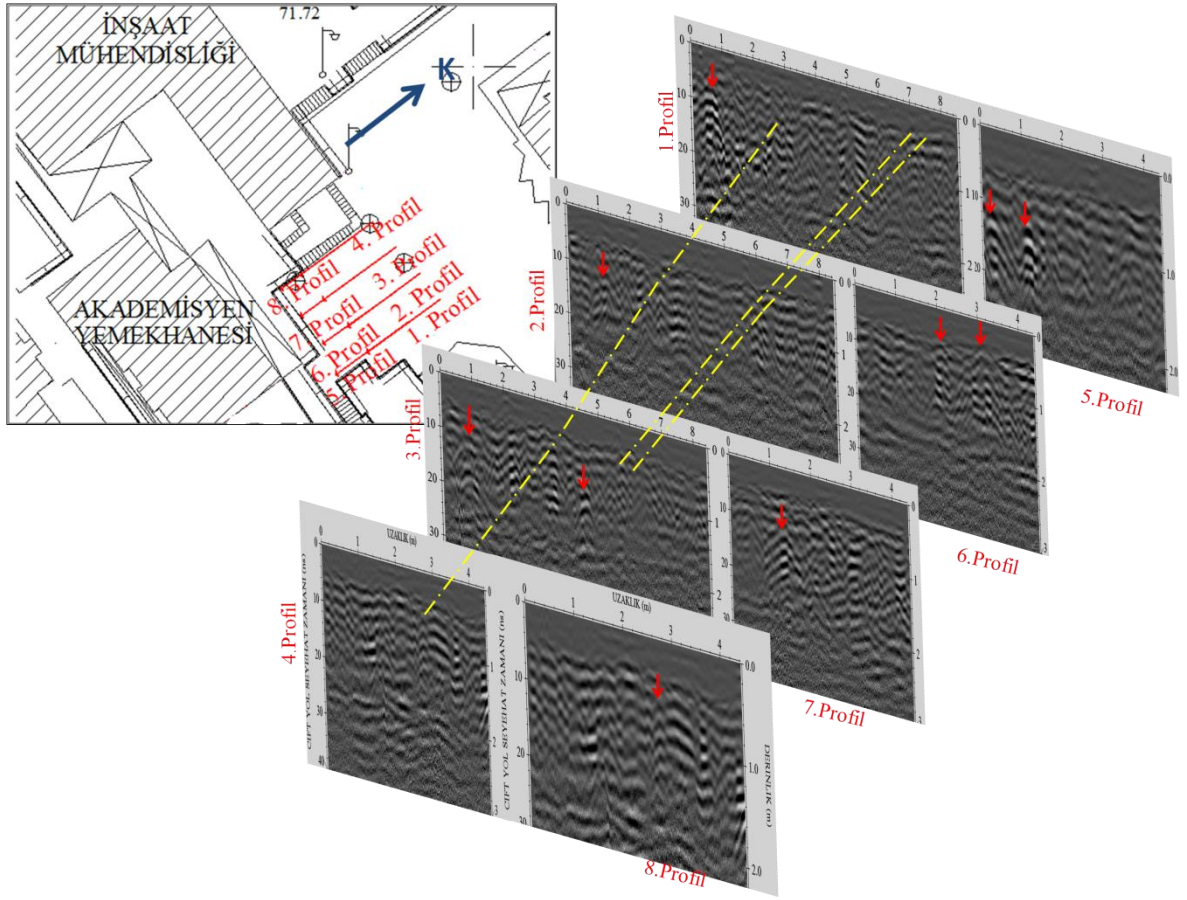


Şekil 3.1. A1 alanındaki ölçü profillerinin konumları ve elde edilen radargramlar

KTÜ Mimarlık Fakültesi'nin güney kısmında seçilen inceleme alanından (A1) elde edilen radargramlarda gözlenen hiperbolik yansımalar oklarla gösterilmiştir (Şekil 3.1). Ayrıca tüm profillerin son kısımlarında gözlenen yüksek genlikli anomaliler elipslerle gösterilerek bunlarında birleştirilmesiyle herhangi bir alt yapı elemanı olabileceği düşünülmektedir. Radargramlar tek tek incelendiğinde; 16-17 m uzaklıklarında 0.35-1.4 m derinlikleri arasında gözlenen sarı kesikli çizgi ile gösterilmiş hiperbolik yansımalar 4

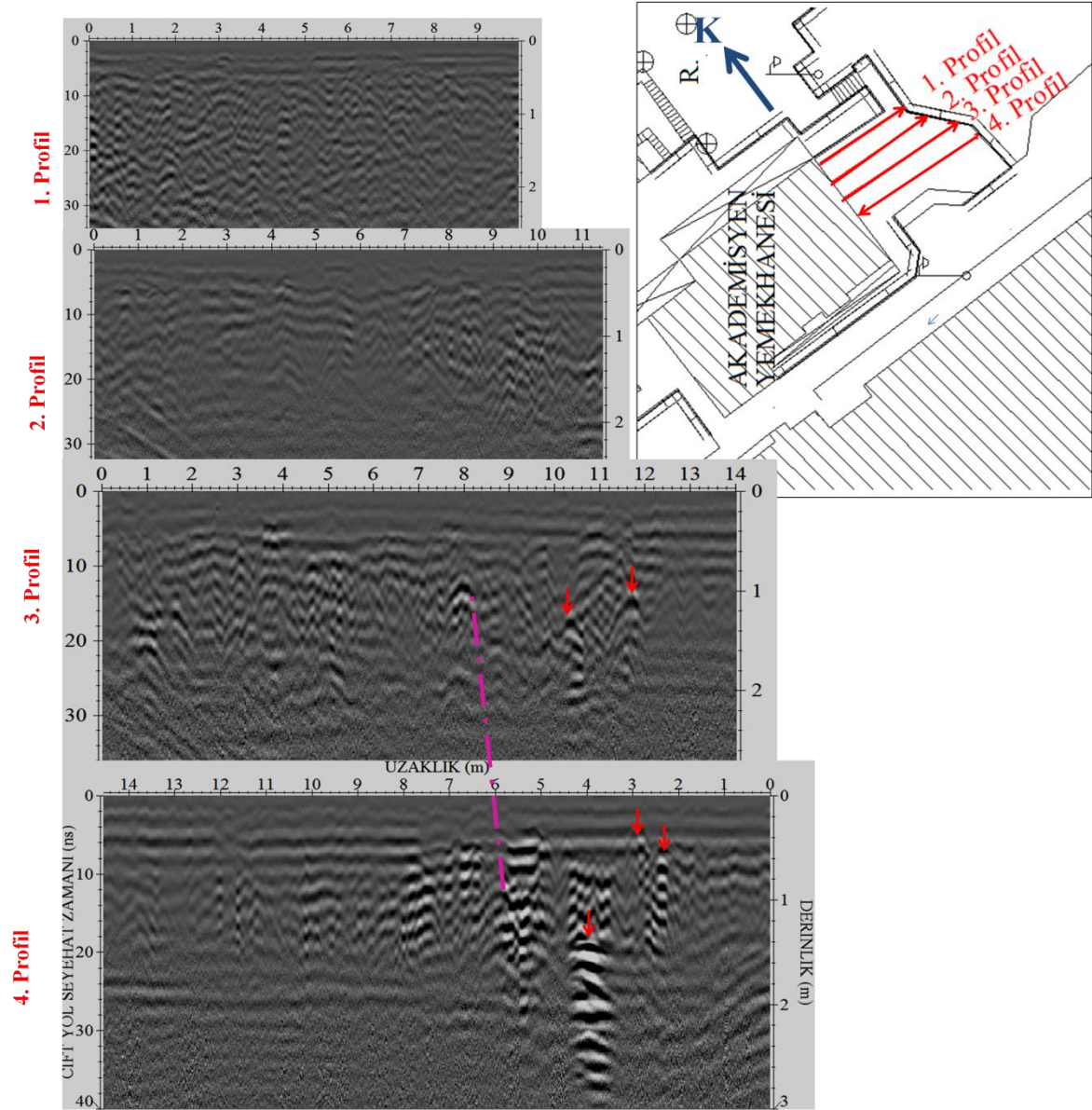
profilde de yaklaşık olarak yer almaktadır. Bunların yanı sıra 2., 3. ve 4. profillerde 30 m uzaklık ve 0.55 m derinlikte yine sarı kesikli çizgi ile gösterilmiş düşük genlikli hiperbolik yansımalarda alt yapı elemanına güzergah oluşturabilecek niteliktedir. 2.profildeki radargramda, yaklaşık olarak 1 m uzaklık 1.2 m derinlik ve 8.2 m uzaklık 0.8 m derinlikte kırmızı oklarla gösterilmiş olan yüksek genlikli yansıma hiperbolleri tespit edilmiştir. 3. profile ait radargramda, 8-9 m uzaklıkları 0.5 m derinliğinde yüksek genlikli yansımalar oklarla ve 26 m uzaklık 0.4 m derinliğinde belirgin genlikte hiperbolik yansıma kesikli çizgi ile gösterilmiştir. Bu çalışma alanındaki son profil olan 4. profilde; yaklaşık olarak 22, 24 ve 29 m uzaklıklarında 0.5 m derinliğinde net olarak izlenen sarı kesikli çizgi ile gösterilmiş hiperbolik yansımalar belirlenmiştir (Şekil 3.1).

Bu tez çalışmasında ele alınan diğer inceleme alanlarında elde edilen radargramlar üzerinde belirlenen alt yapı eleman göstergesi olan farklı genlikli hiperbolik yansımaların uzaklık ve derinlik bilgileri verilmeyerek genel olarak elips, çizgi ve kırmızı oklarla gösterilmiştir.



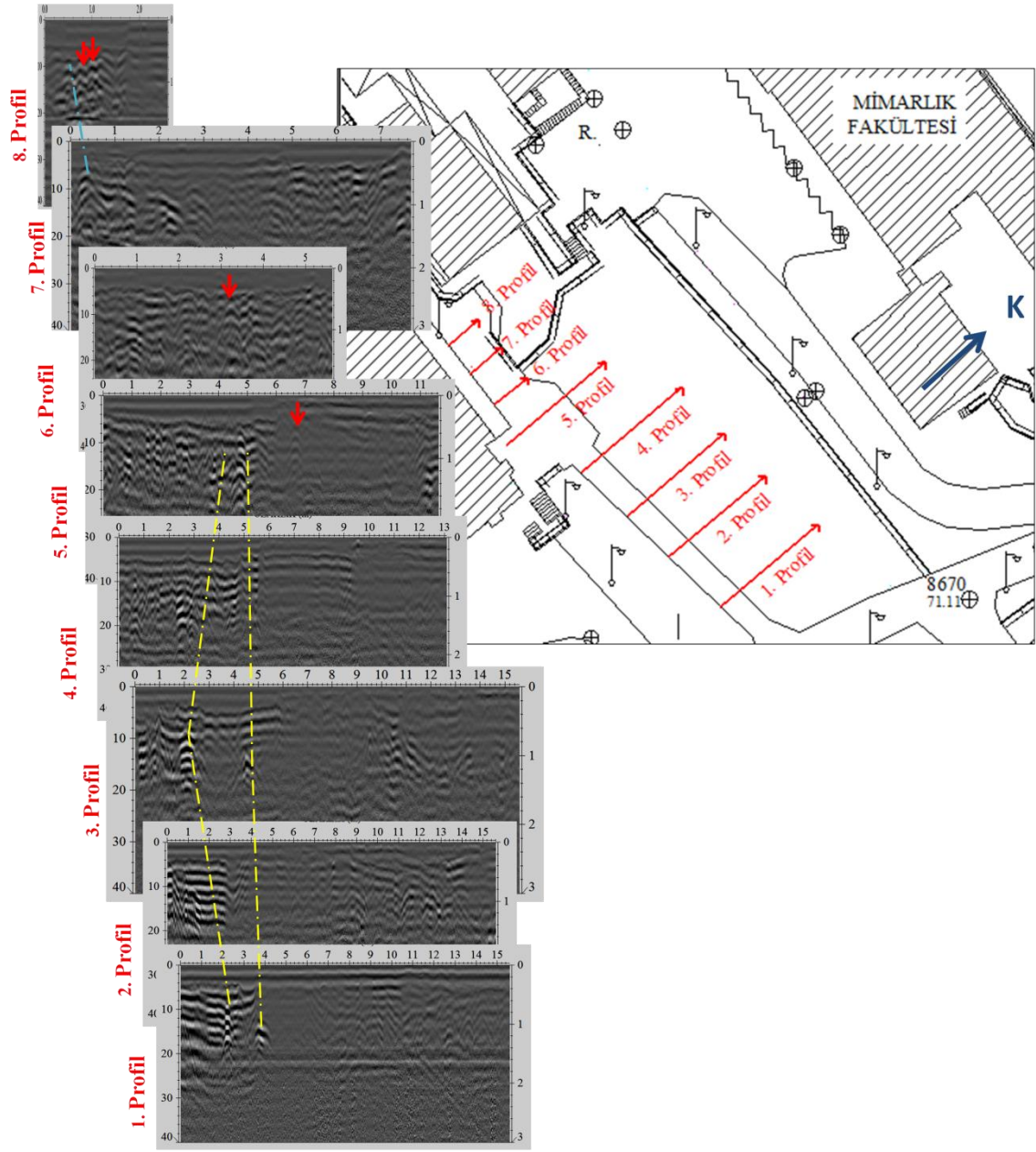
Şekil 3.2. A2 alanındaki ölçü profillerinin konumları ve elde edilen radargramlar

KTÜ İnşaat Mühendisliği Bölümü kantininin önü seçilmiş A2 olarak adlandırılan ikinci inceleme alanında toplam 8 profilde yer radarı ölçümleri toplanmış ve işlenmiştir. Buradan elde edilen radargramlara bakıldığında, yaklaşık birbirine paralel hatlarda gözlenen sarı kesikli çizgi ile gösterilen benzer nitelikli hiperbolik yansımalar birleştirilip güzergah belirlenmeye çalışılmıştır. Bunların dışında tespit edilen farklı derinlik, genişlik ve genlikli hiperbolik yansımalar kırmızı oklarla işaret edilmiştir (Şekil 3.2).



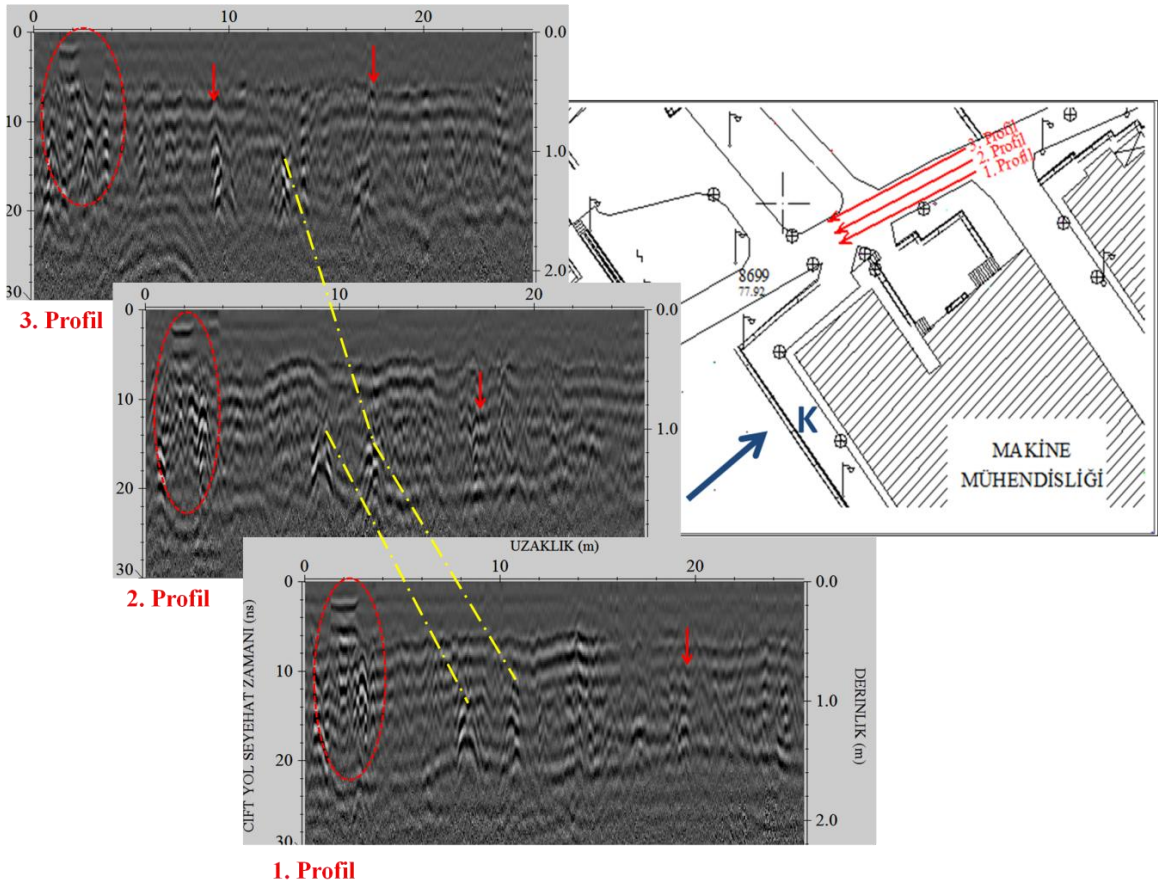
Şekil 3.3. A3 alanındaki ölçü profillerinin konumları ve elde edilen radargramlar

A3 olarak adlandırılan üçüncü inceleme alanı akademisyen yemekhanesinin önünde seçilmiştir. Buradan elde edilen radargramlara bakıldığında, 1. ve 2. profillerde bir alt yapı elemanına ait güzergah olabileceği düşünülen bir belirti görünmemektedir. Ancak profil 3 de 7.9 m uzaklıkta ve profil 4 te ise 6 m uzaklıkta derinlikleri 0.8 m olan pembe kesikli çizgi ile gösterilmiş hiperbolik yansımaların aynı alt yapı elemanına ait olduğu düşünülmektedir. Bunların dışındaki belirgin hiperbolik yansımalar kırmızı oklarla gösterilmiştir (Şekil 3.3).



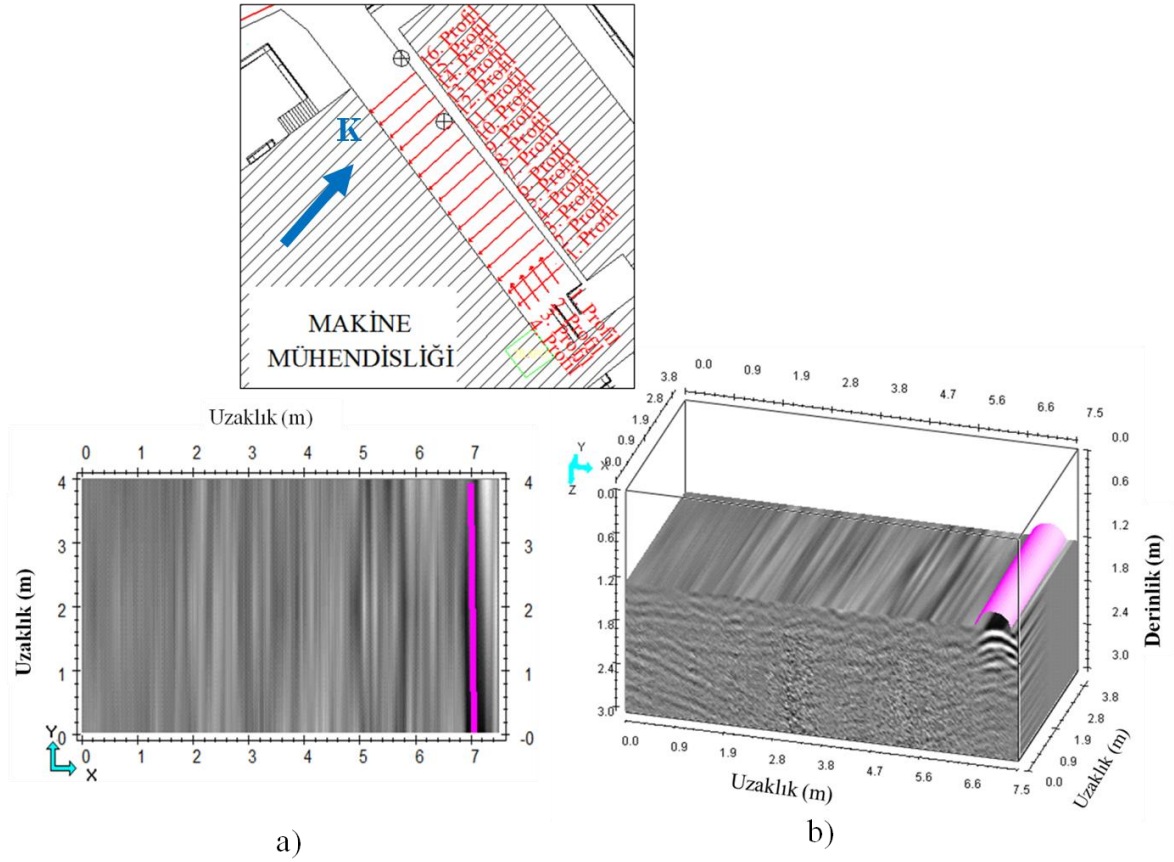
Şekil 3.4. A4 alanındaki ölçü profillerinin konumları ve elde edilen radargramlar

Şekil 3.4 de gösterilen ölçü alanı ve farklı uzunluklarda yaklaşık birbirine paralel profillerde toplanan yer radarı verilerinden elde edilen radargramlar alt yapı eleman içeriğine göre birlikte değerlendirildiğinde; belirgin hiperbolik yansımalar oklarla gösterilmiştir. Bu tespitlerde birbirine bitişik radargramlardaki benzer hiperboller sarı kesikli çizgi ile birleştirilerek alt yapı eleman hattı belirlenmeye çalışılmıştır.



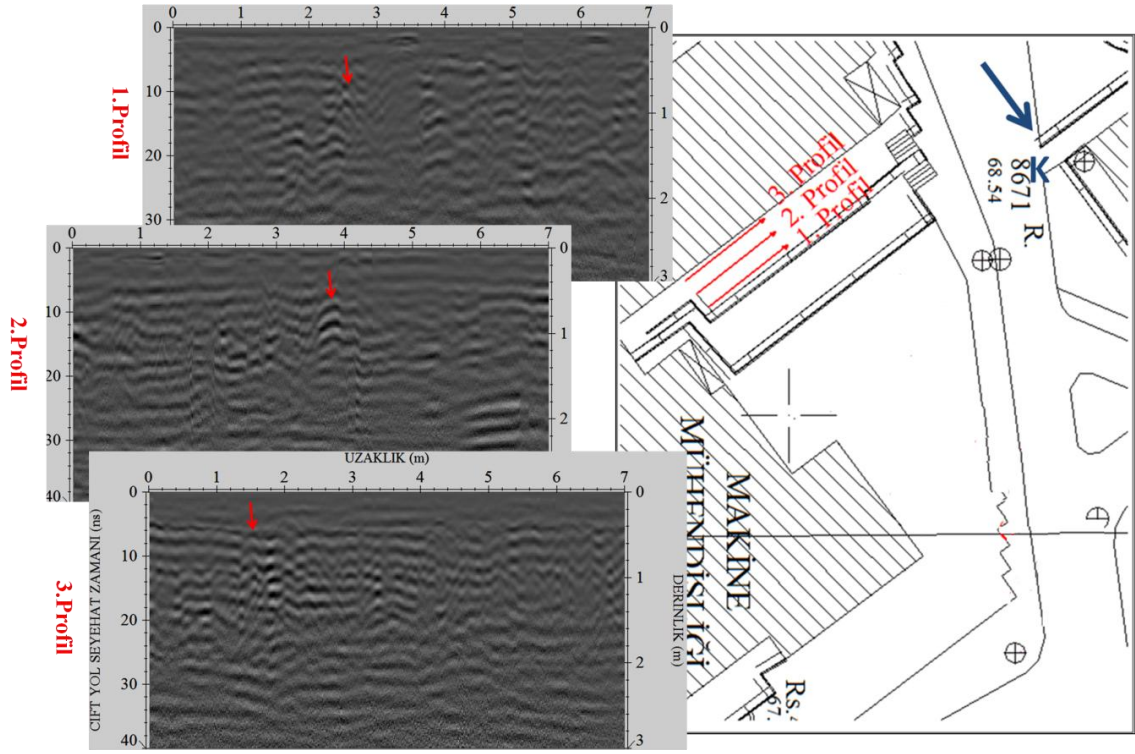
Şekil 3.5. A5 alanındaki ölçü profillerinin konumları ve elde edilen radargramlar

KTÜ Mühendislik Fakültesi Makina Mühendislik Bölümü ile Mimarlık Bölümü arasındaki yol boyunca seçilen ölçü alanında (A5) yine birbirine paralel hatlarda 3 profil boyunca yer radarı ölçüleri sonucu elde edilen radargramların alt yapı eleman içeriği bakımından incelenmesi sonucunda tespit edilen belirgin hiperbolik yansımalar kesikli çizgi, kırmızı ok ve elipsle gösterilmiştir (Şekil 3.5).



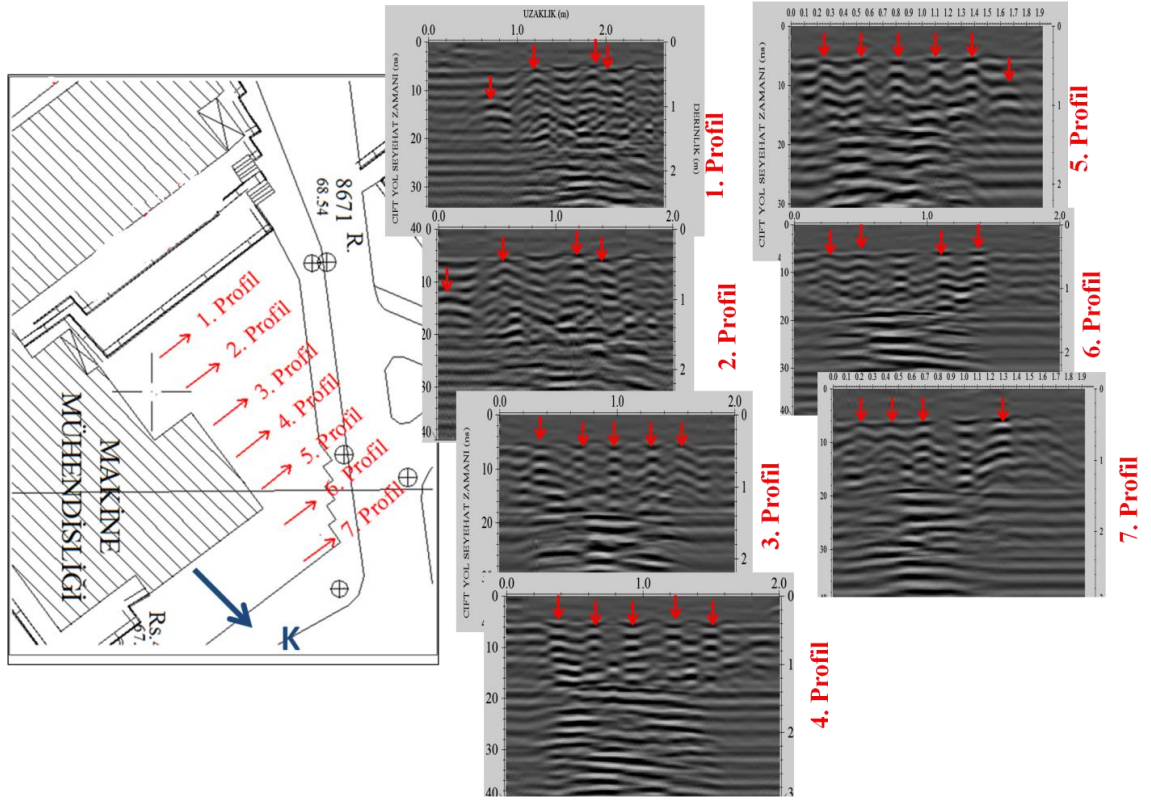
Şekil 3.6. A6 alanındaki ölçü profillerinin konumları ve elde edilen 3B görünüm (a), genlik-derinlik haritası (b)

Bu tez çalışmasında seçilen 20 farklı alan içerisinde en fazla ölçü profili içeren ve A6 ile isimlendirilmiş inceleme alanındaki 16 profilden elde edilmiş radargramlar yan yana konularak araştırma alanının üç boyutlu görüntüsü elde edilmiştir (Şekil 3.6a). Bunun için Mala Geoscience firmasının Easy 3D yazılımından yararlanılmıştır. Elde edilen 3 boyutlu görünümün farklı derinliklerine ait genlik-derinlik haritalarından 1.2 m deki (Şekil 3.6b) incelendiğinde tüm profillerin sonunda yaklaşık 7 m uzaklıklarda oldukça geniş ve belirgin yüksek genlikli hiperbol hattı tespit edilmiştir (Şekil 3.6a-b).



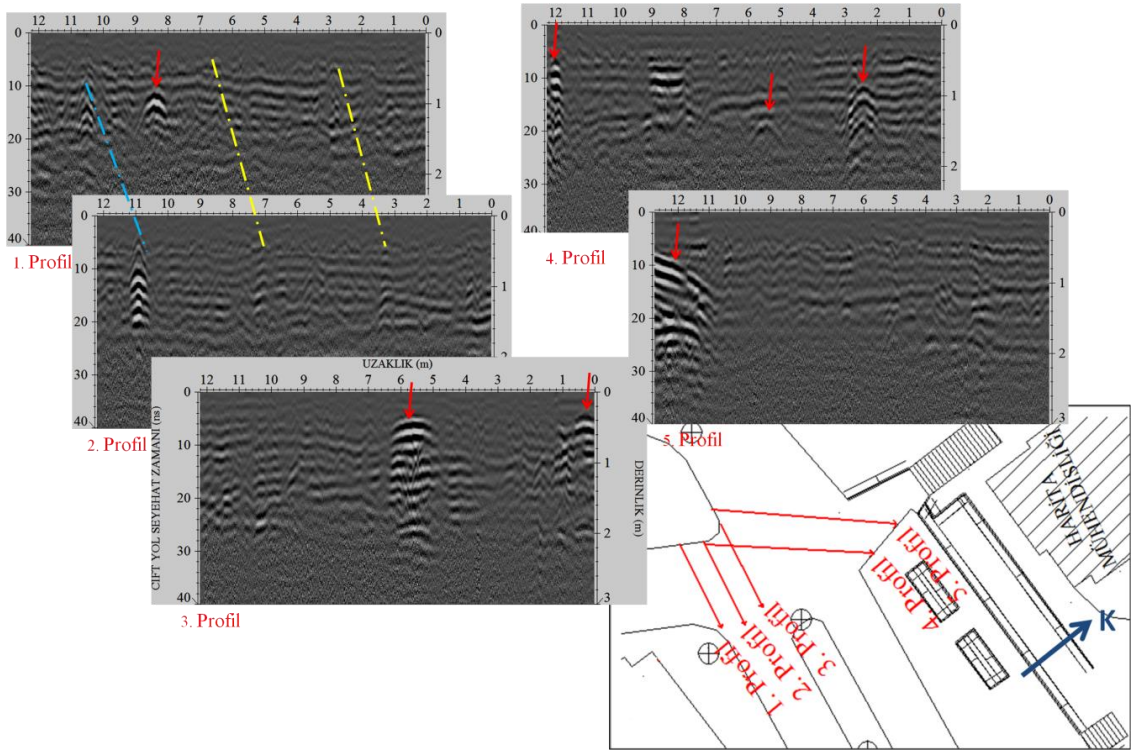
Şekil 3.7. A7 alanındaki ölçü profillerinin konumları ve elde edilen radargramlar

A7 alanında alınan az sayıda yer radarı ölçümlerinden elde edilen radargramlar şekil 3.7 de ölçü profil konumlarına göre gösterilmiştir. Bu radargramlarda çok belirgin alt yapı elemanına rastlanamamıştır. Gözlenen yansımaların zemindeki doğal koşullar ve rastgele dolgu malzemesinden kaynaklanmış olabileceği düşünülmektedir. Yinede çok belirgin olmasa da farklı çaplı ve genlikli hiperbolik yansımalar kırmızı oklarla gösterilmiştir.



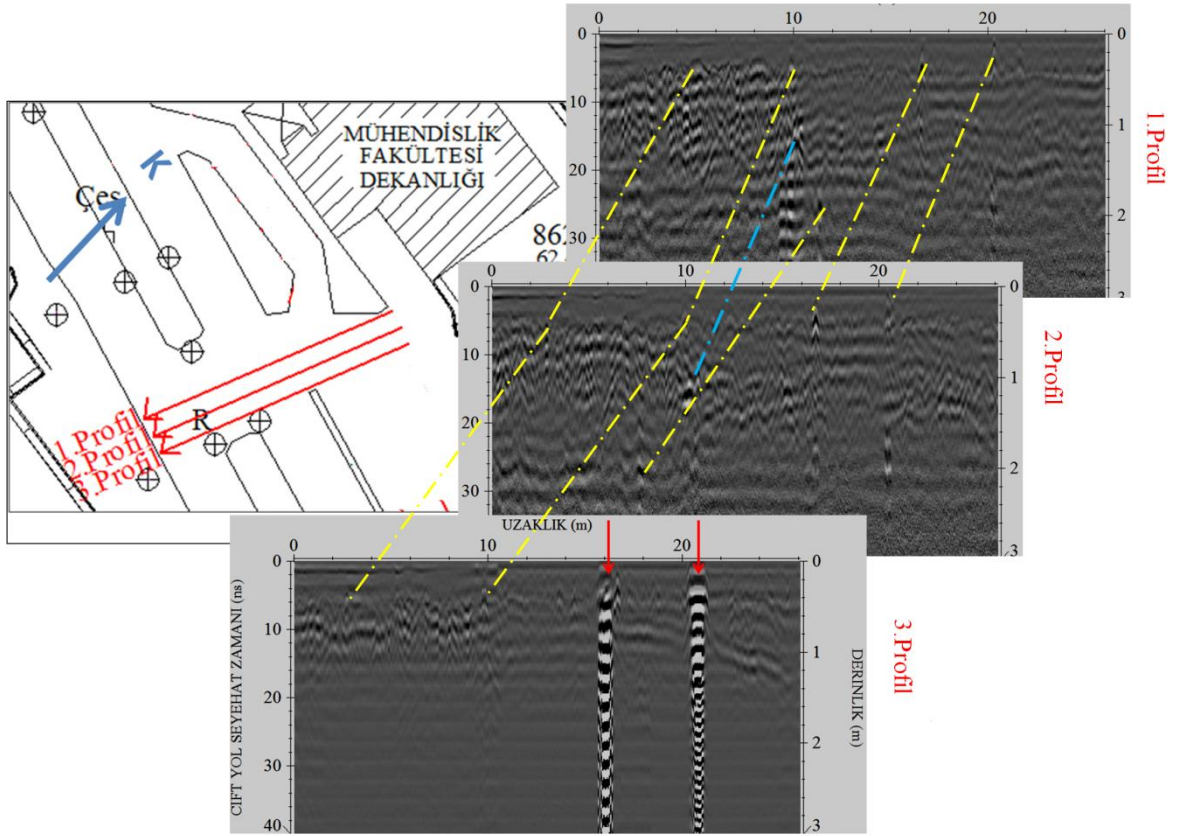
Şekil 3.8. A8 alanındaki ölçü profillerinin konumları ve elde edilen radargramlar

KTÜ Kanuni yerleşkesindeki Makina Mühendisliği Bölümü arka bahçesinde seçilen A8 inceleme alanına ait radargramlarda birbirine bitişik küçük hiperboller oldukça dikkat çekicidir. Bu hiperbollerden belirgin olanlar radargramlar üzerinde kırmızı oklarla gösterilmektedir (Şekil 3.8). Bunların kaynağının ne olabileceği, hem yer radarı modelleme çalışmaları ile hem de KTÜ Yapı İşleri Daire Başkanlığı arşiv bilgilerinin incelenmesi ile araştırılmıştır. Edinilen bilgilerden bu alanda telefon kablo ve sıcak/soğuk boru hatları yer almaktadır.



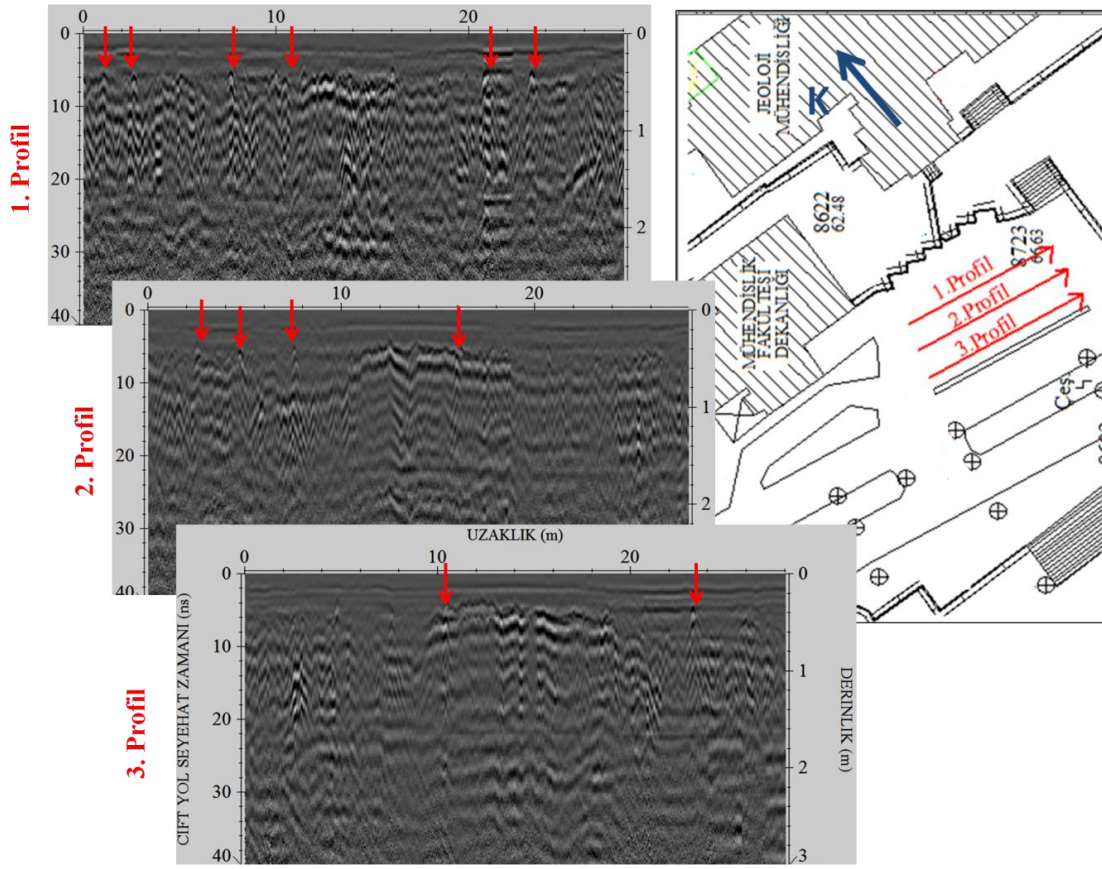
Şekil 3.9. A9 alanındaki ölçü profillerinin konumları ve elde edilen radargramlar

Şekil 3.9 da ölçü hatlarının olduğu kroki ve bu alana (A9) ait radargramlarda farklı nitelikli birçok hiperbolik yansımalar tespit edilmiştir. Bunlar radargramlar üzerinde kırmızı oklarla gösterilip birbirine yaklaşık paralel olan radargramlardaki benzer hiperboller kesikli çizgilerle birleştirilerek alt yapı güzergahları belirlenmiştir.



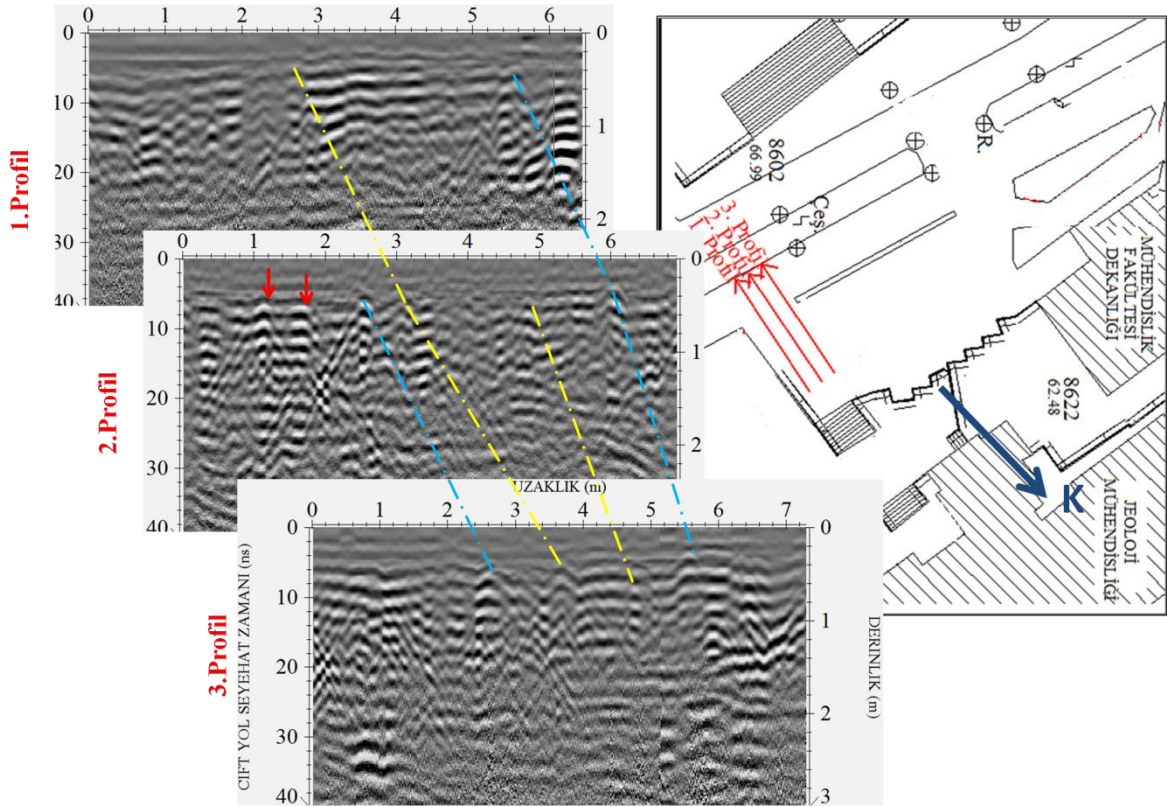
Şekil 3.10. A10 alanındaki ölçü profillerinin konumları ve elde edilen radargramlar

10. inceleme alanı olan A10, Jeoloji Mühendisliği otoparkının batı kısmındadır. Burada 3 profilde yer radarı ölçüleri toplanabilmıştır. Bu alana ait radargramlarda oldukça küçük ve belirgin yansıma hiperbolleri izlenmektedir. Bunları işaret etmek için kesikli çizgiler ve kırmızı oklar kullanılmıştır.



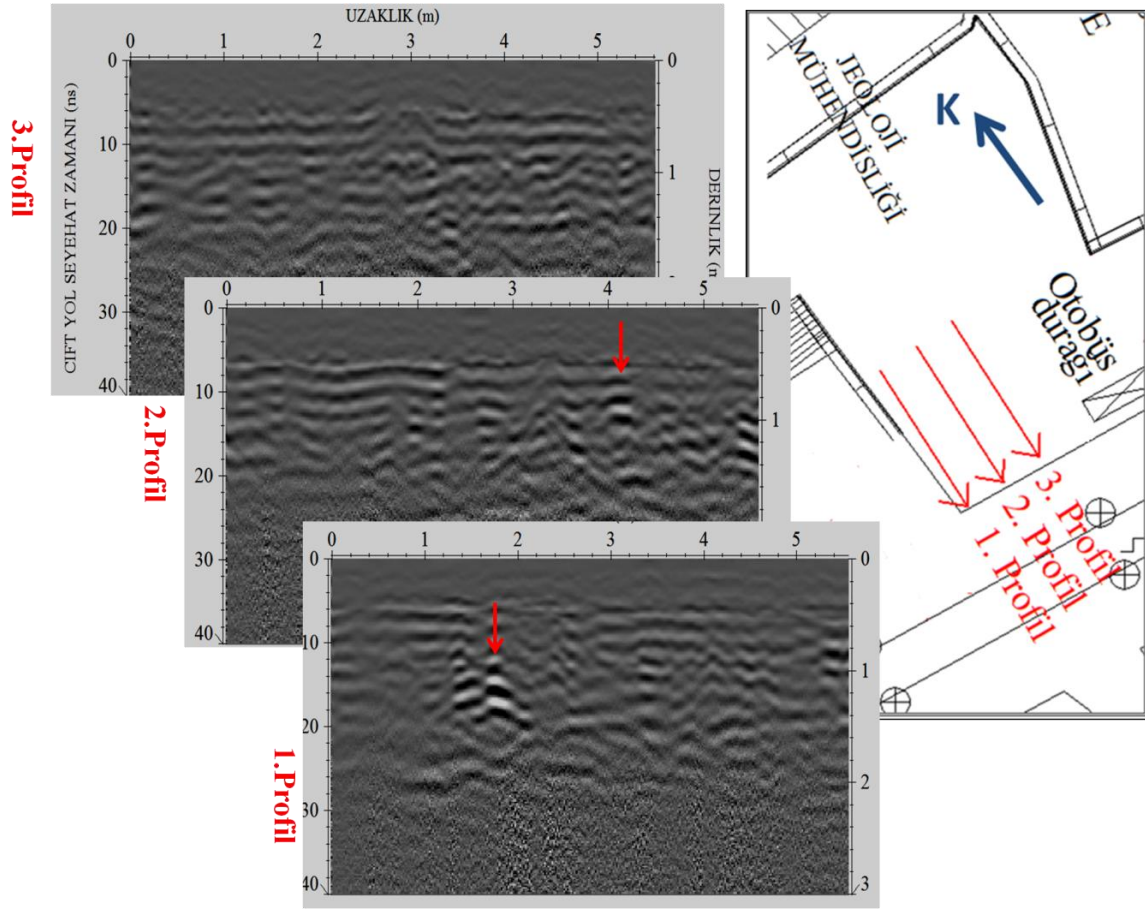
Şekil 3.11. A11 alanındaki ölçü profillerinin konumları ve elde edilen radargramlar

KTÜ Mühendislik Fakültesi personel otoparkında doğu-batı yönlü seçilen 3 profilde elde edilen radargramların ölçü hatlarına göre konumlandırılmış hali, şekil 3.11 de yer almaktadır. Bu alan A11 olarak adlandırılmıştır. Bu alana ait radargramlar üzerinde oldukça küçük boyutlu birçok hiperbolik yansıma görüntüsü izlenmektedir. Bunlar şekil üzerinde oklarla gösterilmiştir.



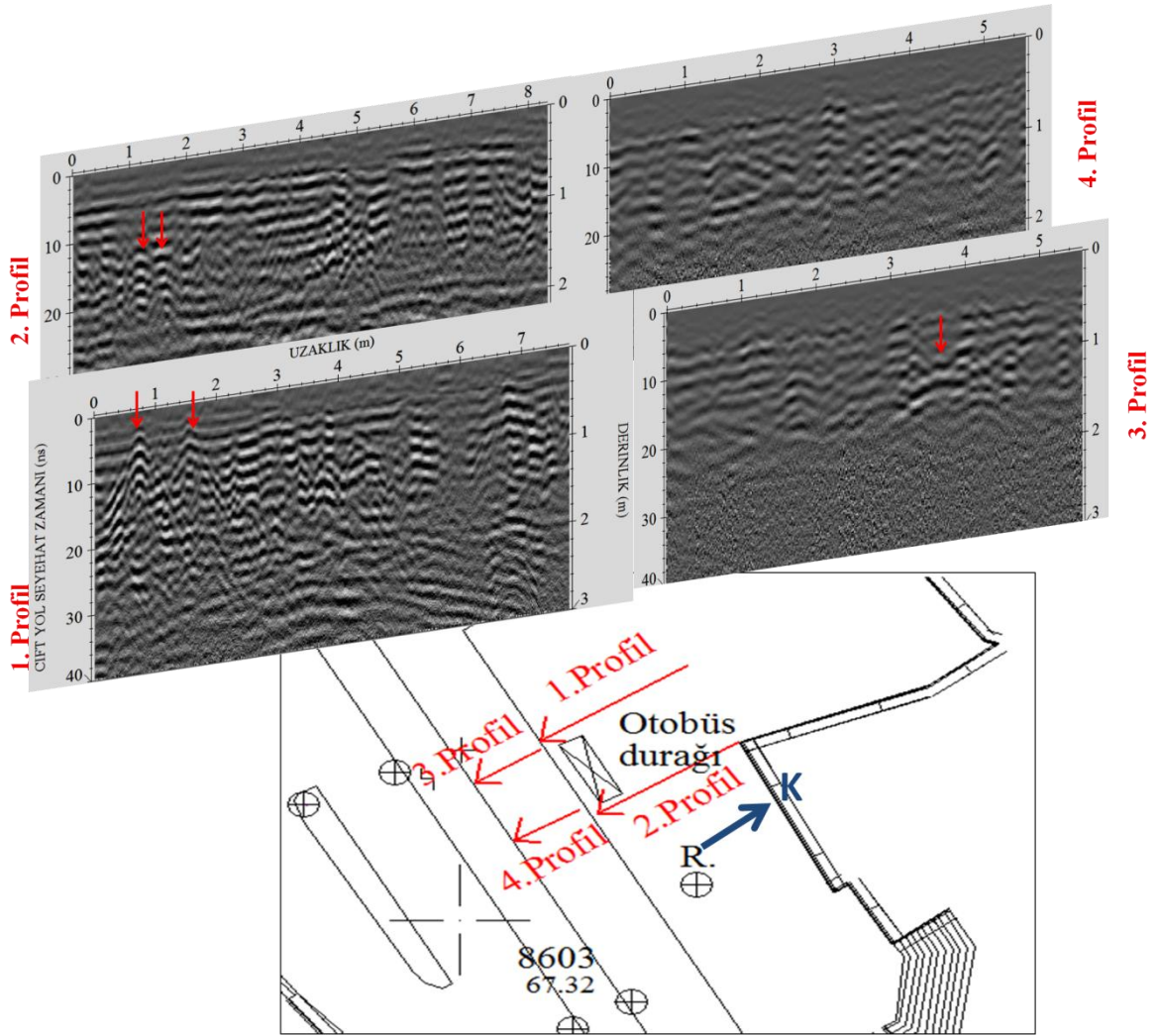
Şekil 3.12. A12 alanındaki ölçü profillerinin konumları ve elde edilen radargramlar

A11 inceleme alanı profillerinin bitiş kısmında kuzey-güney yönelimli 3 profilin yer aldığı inceleme alanı (A12) krokisi ve elde edilen radargramlar şekil 3.12 de görülmektedir. Yaklaşık 7 m ölçü hat uzunluğu olan radargramlar oldukça karmaşık görünümündedir. Bu görüntülerden alt yapı elemanlarını belirlemek oldukça zordur. Radargramlar büyütülerek ayrıntılı incelendiğinde su borusu ve telefon kablosu niteliğinde yansıma hiperbolleri kırmızı oklarla işaret edilmiştir.



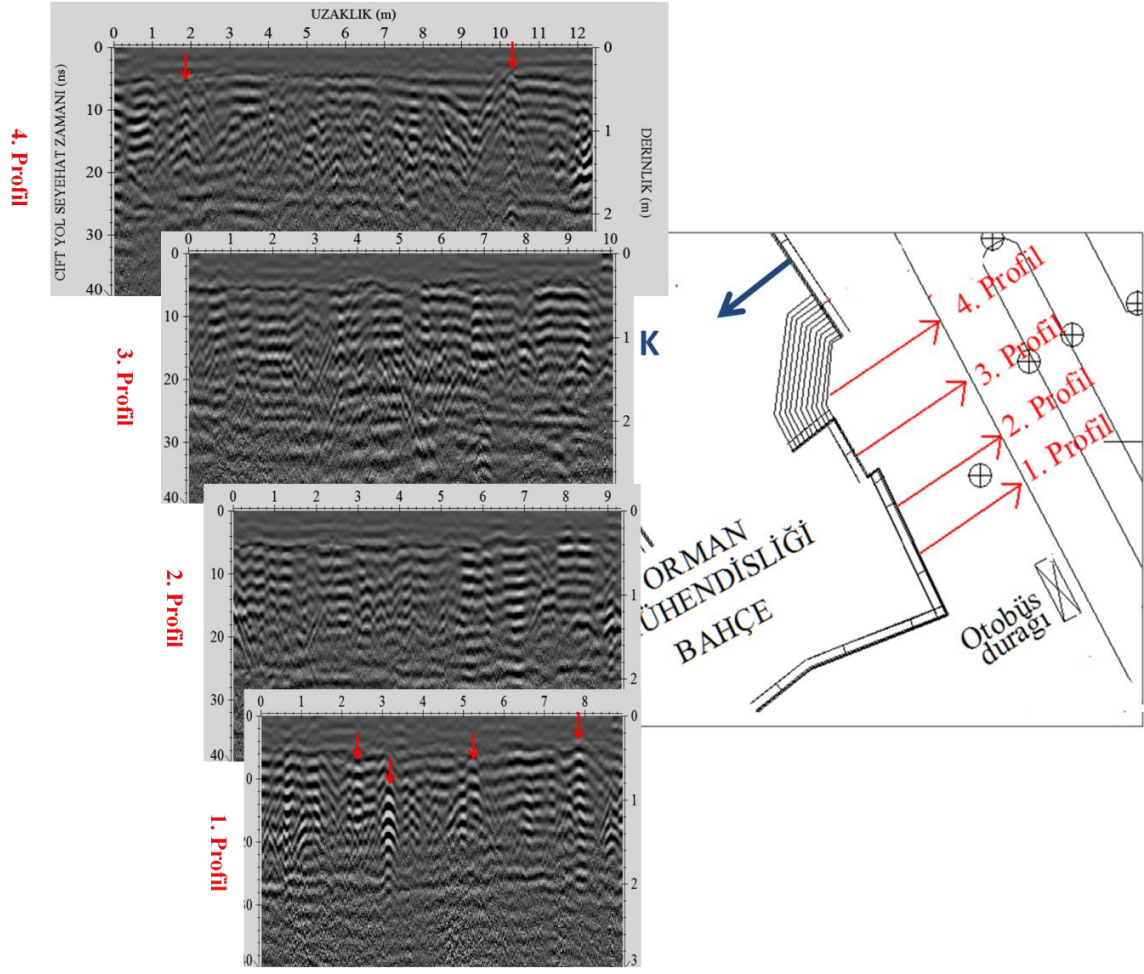
Şekil 3.13. A13 alanındaki ölçü profillerinin konumları ve elde edilen radargramlar

KTÜ Mühendislik Fakültesi Elektrik -Elektronik ve Bilgisayar Mühendislikleri bölüm binasının kuzey kısmındaki araç yol kenarında bulunan otobüs durağının batı kısmında (A13) alınan 3 profile ait radargramlar ölçü hatlarına göre birleştirilmiştir. Radargramlardaki alt yapı elemanlarının yansımaları yer yer izlenmiş ve oklarla gösterilmiştir (Şekil 3.13).



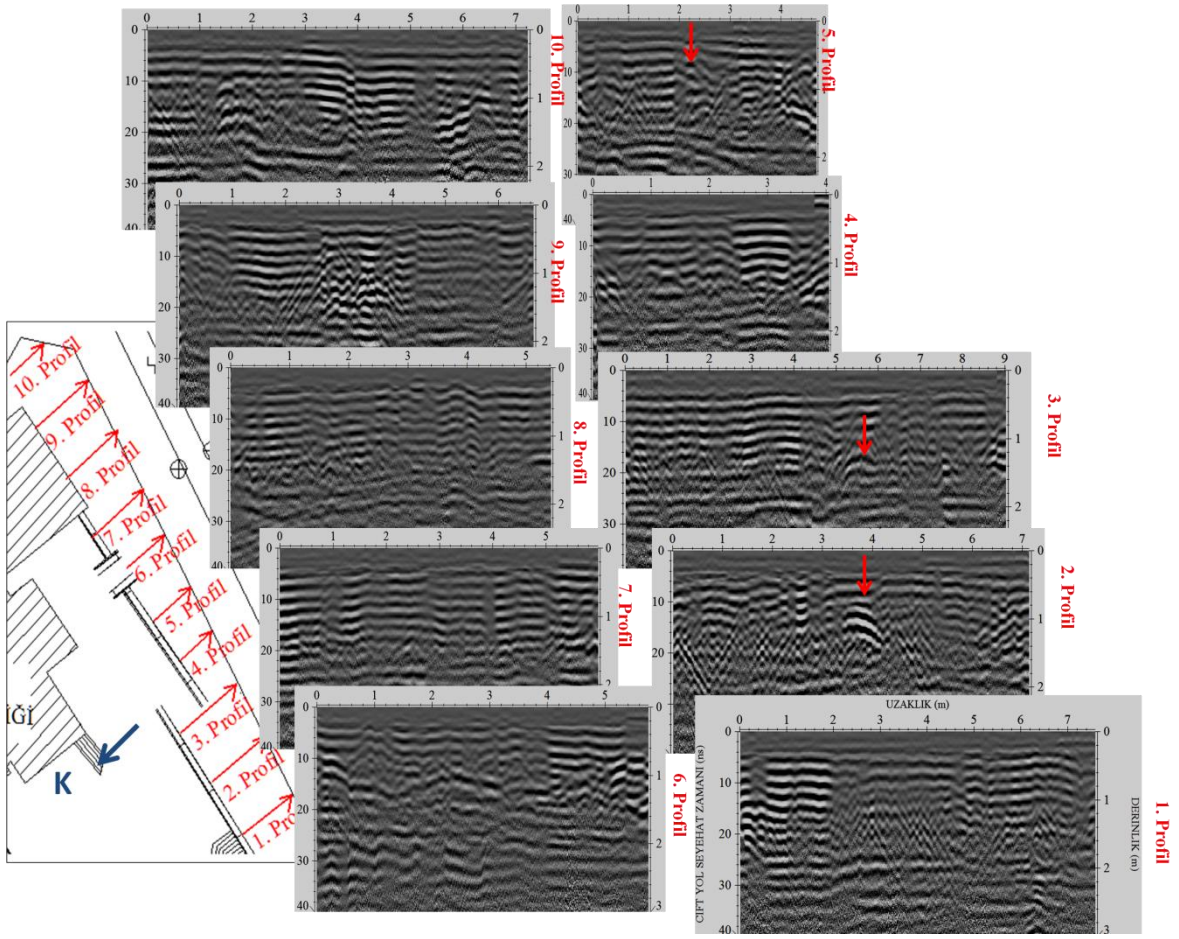
Şekil 3.14. A14 alanındaki ölçü profillerinin konumları ve elde edilen radargramlar.

KTÜ Kanuni yerleşkesindeki A14 inceleme alanı, A13 alanında tanımlanan otobüs durağının doğusunda (kroki üzeride sol profil) 2 ve batısında (kroki üzeride sağ profil) da 2 olmak üzere toplam 4 profil içermektedir. Bu profillerdeki radargramlar incelendiğinde, yüksek genlikli belirgin izlenebilen hiperbolik yansımalar Şekil 3.14 de kırmızı oklarla gösterilmektedir.



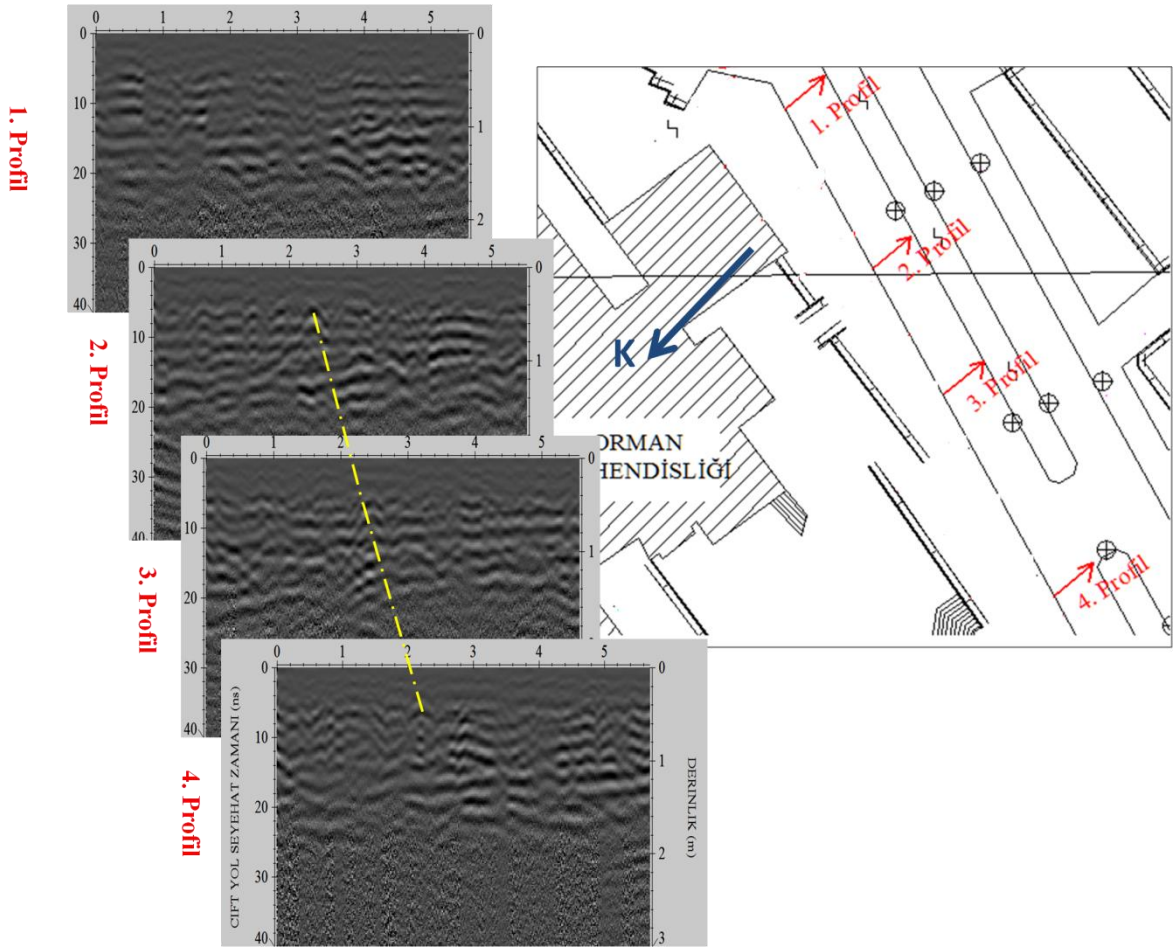
Şekil 3.15. A15 alanındaki ölçü profillerinin konumları ve elde edilen radargramlar

A15 olarak adlandırılan inceleme alanı 4 profil içermektedir. Şekil 3.15 deki krokide görüldüğü üzere KTÜ Orman Mühendisliği bahçesi güneyinde otobüs durağının doğu kısmında yer alan karo taş döşenmiş geniş kaldırım alanıdır. Buradan elde edilen radargramlar ölçü hatlarının konumuna göre birlikte görüntülendiğinde, alt yapı elemanı güzergahı niteliğinde olabilecek özellikle 1. ve 4. profilde yüksek genlikli hiperbolik birçok yansıma tespit edilmiştir.



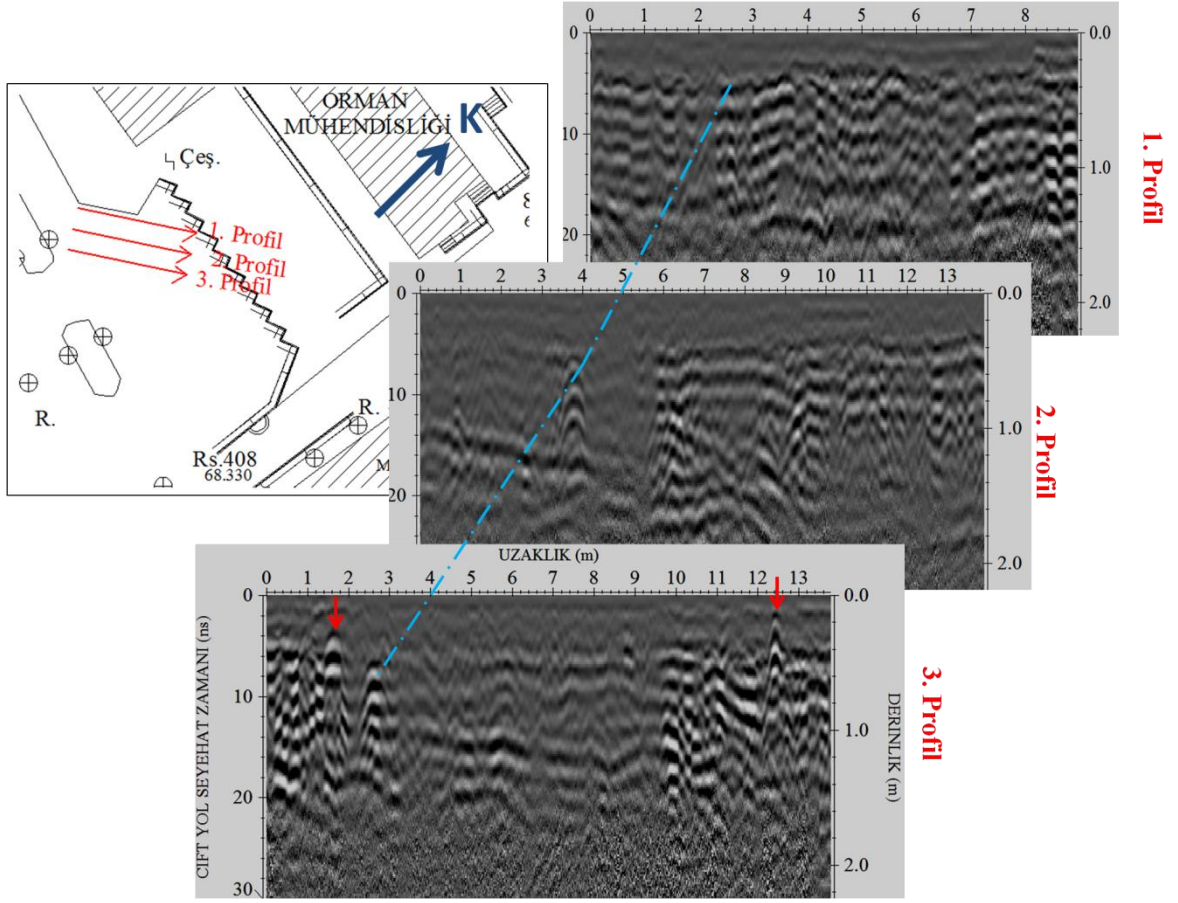
Şekil 3.16. A16 alanındaki ölçü profillerinin konumları ve elde edilen radargramlar

KTÜ Orman Mühendisliği bölüm binası ile araç yolu arasında kalan alan A16 olarak adlandırılıp, yer radarı ölçüleri toplanmış 10 profilinin birbirine göre konumları şekil 3.16 da verilmektedir. Bu alana ait radargramlar aynı şekil üzerinde gösterilmiştir. Karmaşık görünümlü radargramlarda, alt yapı elemanı niteliğinde olabilecek yansımalar tespit edilmeye çalışılmıştır. Sadece 2., 3. ve 5. profilde kırmızı oklarla gösterilen hiperbollerin olası alt yapı elemanı yansıması olabileceği şeklinde değerlendirilmiştir. Radargramlardaki diğer yansımaların; doğal zemin koşulları ve dolgu malzemesine ait farklılıklardan kaynaklandığı düşünülmektedir.



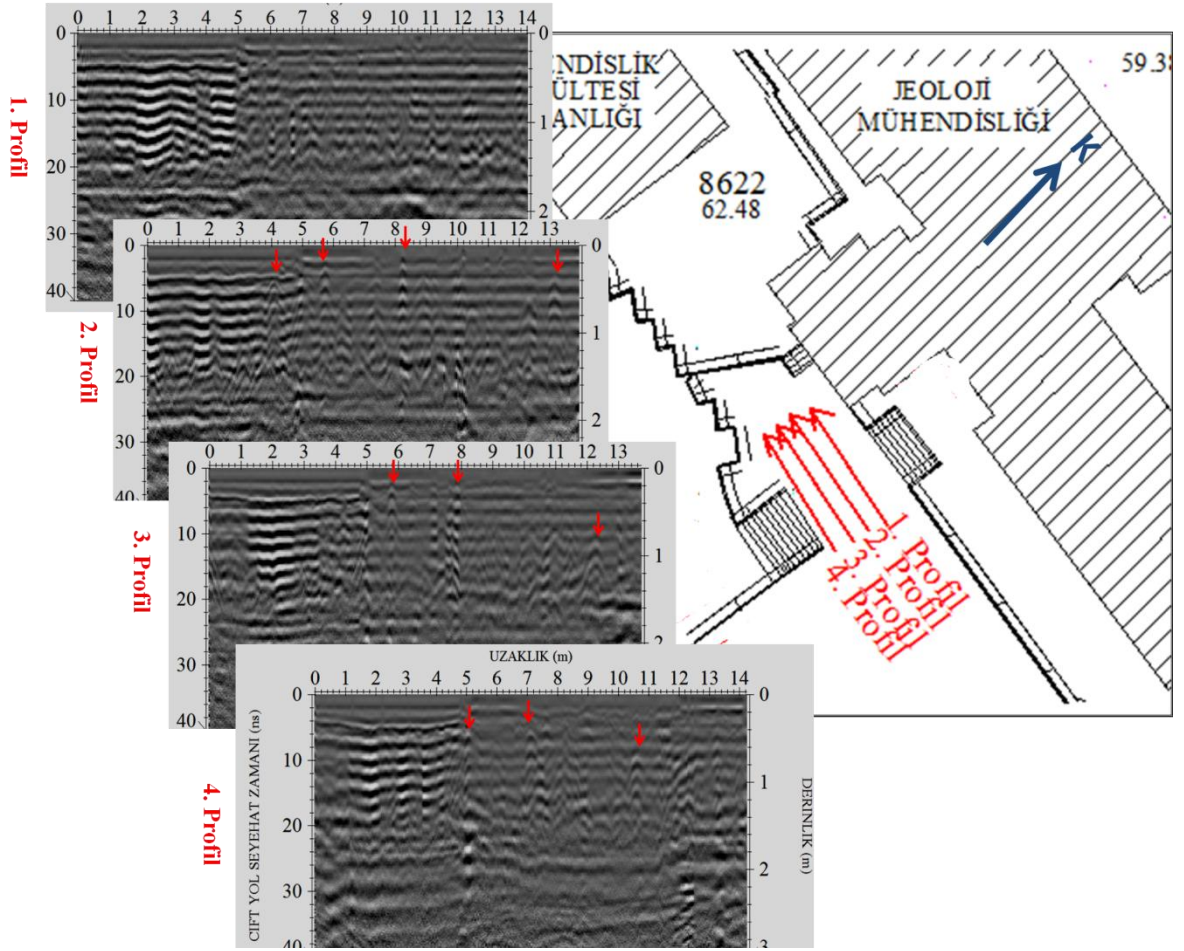
Şekil 3.17. A17 alanındaki ölçü profillerinin konumları ve elde edilen radargramlar

KTÜ Kanuni yerleşkesi araç trafiği ana hattının orman fakültesi önünde kaldırma bitişik yaklaşık kuzey-güney doğrultulu 4 profilden elde edilen radargramlar ve ölçü hatlarının konumu şekil 3.17 de verilmektedir. A17 olarak tanımlanan bu inceleme alanında elde edilen radargramlar birlikte alt yapı elemanları açısından incelendiğinde tüm profillerde zayıf genlikli farklı boyutlarda birçok yansıma hiperbollerini izlenmiş, kesikli çizgi ve kırmızı oklarla işaretlenmişlerdir.



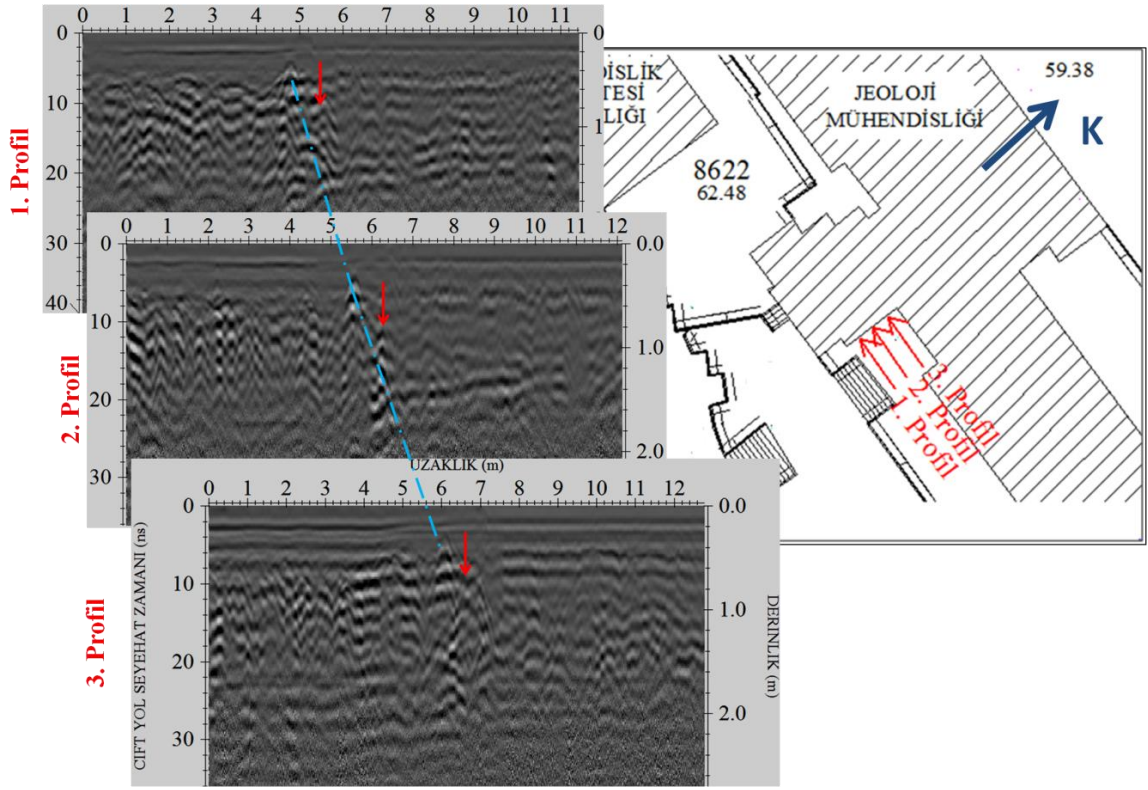
Şekil 3.18. A18 alanındaki ölçü profillerinin konumları ve elde edilen radargramlar

A18 inceleme alanındaki radargramlar ve ölçü profillerinin yer aldığı kroki, şekil 3.18 de yer almaktadır. Bu alandaki radargramlar incelendiğinde, oldukça belirgin görünümünden dolayı net izlenebilen hiperbolik yansımalar tespit edilerek şekil üzerinde kesikli çizgi ve kırmızı oklarla vurgulanmaya çalışılmıştır.



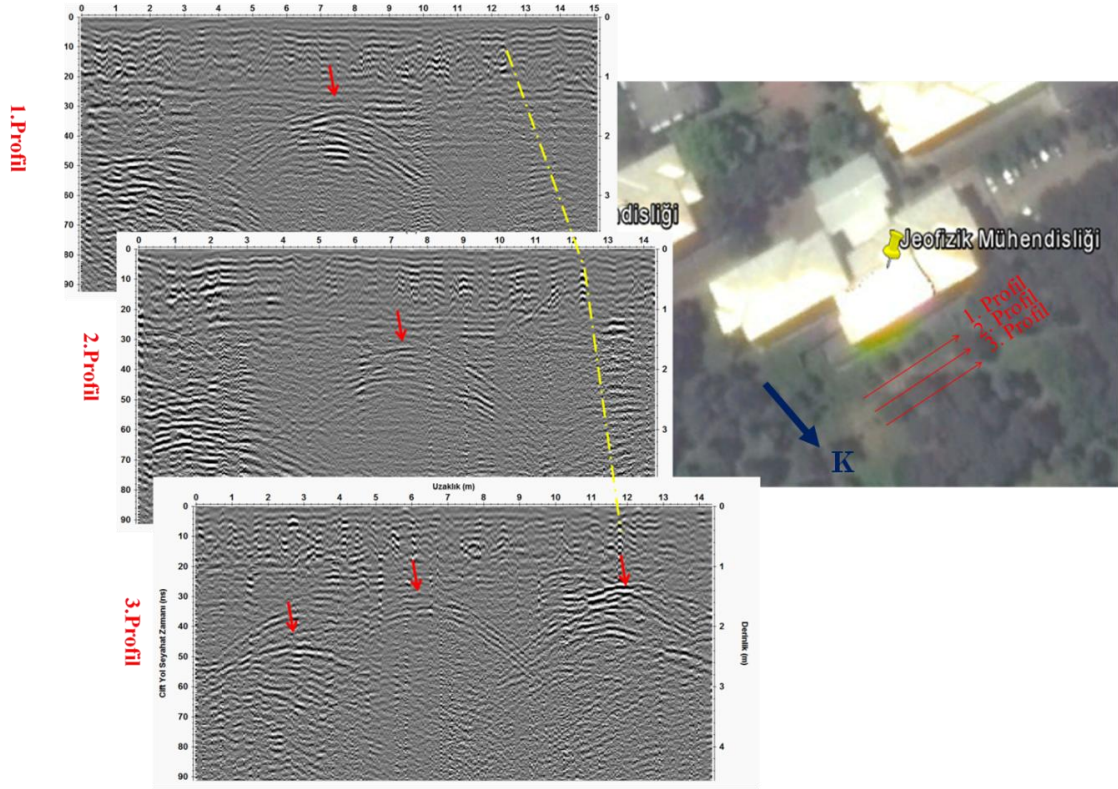
Şekil 3.19. A19 alanındaki ölçü profillerinin konumları ve elde edilen radargramlar

KTÜ Mühendislik Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölüm binasının personel giriş kısmında yer alan A19 olarak adlandırılan çalışma alanı krokisi ve 4 tane ölçü profilinin konumları şekil 3.19 da verilmiştir. Bu alana ait radargramlarda; ilk 4 metreye kadar doğal zemin koşullarının görünümü izlenmekte, bu kısımdan sonra profil sonuna kadar oldukça küçük boyutlu ve zayıf genlikli kırmızı oklarla gösterilmiş yansıma hiperbollerini yer almaktadır.



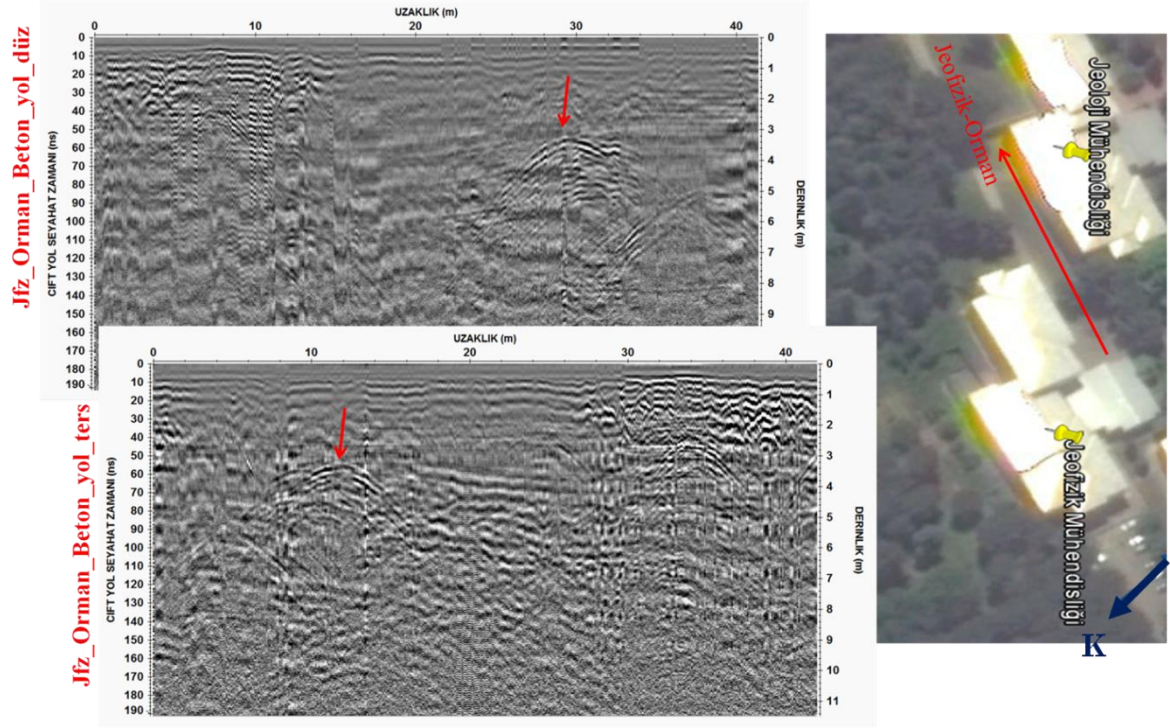
Şekil 3.20. A20 alanındaki ölçü profillerinin konumları ve elde edilen radargramlar

KTÜ Kanuni yerleşkesinde ele alınan 20. inceleme alanında (A20) 3 profil mevcuttur (Şekil 3.20). Bu alan, A19 alanı ile Jeoloji Mühendisliği bölüm binası arasındadır. Yaklaşık 12 m uzunluğundaki radargramlar konumlarına göre yerleştirilerek elde edilen görüntüdeki alt yapı eleman belirtileri tespit edilerek şekil üzerinde kırmızı oklarla ve kesikli çizgi ile gösterilmiştir.



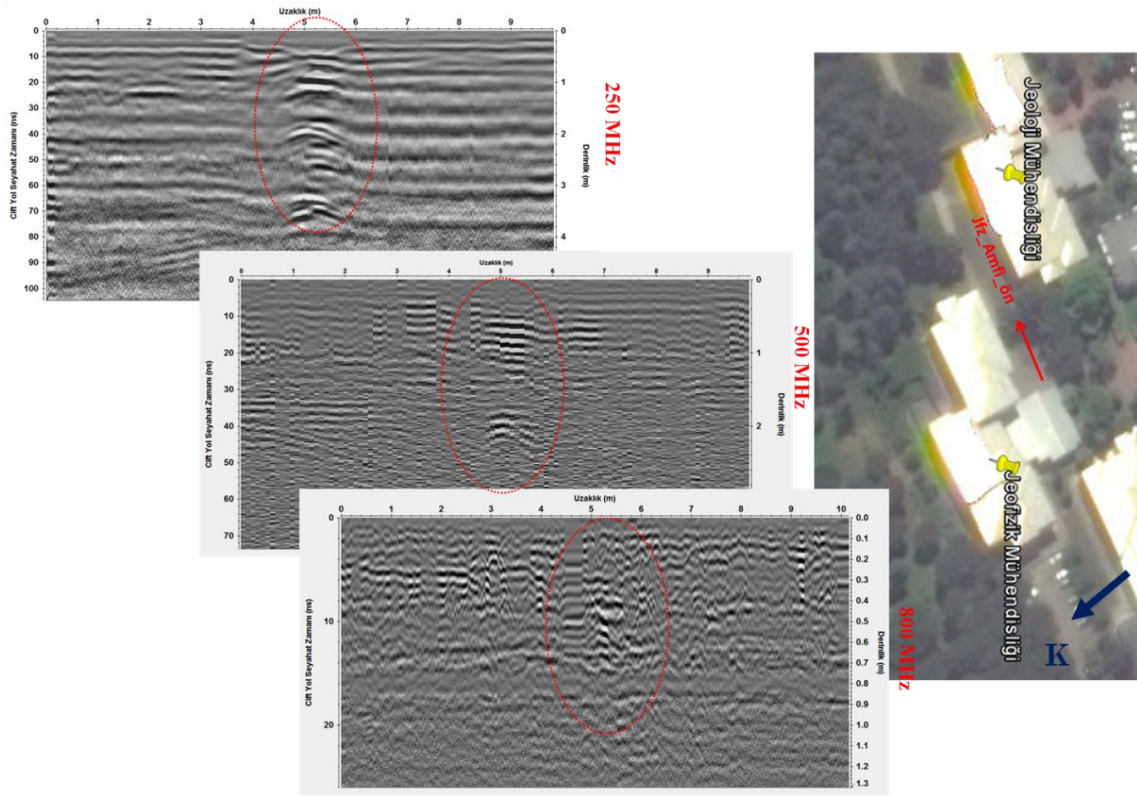
Şekil 3.21. A21 alanının kuzey kısmındaki ölçü profillerinin konumları ve elde edilen radargramlar

Bu tez çalışmasında son inceleme alanı olarak seçilmiş olan A21 de; KTÜ Jeofizik Mühendisliği bölümünün kuzey kısmında 3 profil, güney kısmında 2 profil olmak üzere toplam 5 profil mevcuttur (Şekil 2.14). Jeofizik Mühendisliğinin kuzeyinde kalan yaklaşık 15 m uzunluğundaki 3 profile bakıldığında, bütün profillerde yaklaşık 1.8 m derinlikte zayıf genlikli ve geniş çaplı hiperboller dikkat çekicidir. Ayrıca yine tüm profillerde 0.5 m derinlikte yüksek genlikli küçük çaplı belirgin hiperboller sarı kesikli çizgilerle işaretlenmiştir (Şekil 3.21).



Şekil 3.22. A21 alanının güney kısmındaki ölçü profilinin konumu ve elde edilen radargramlar

A21 alanın güneyinde alınan yaklaşık 42 m uzunluğundaki profil, Jeoloji Mühendisliği ile Jeofizik Mühendisliği bölüm binası arasındadır. Aynı profil hattında gidiş dönüş olmak üzere iki ölçü alınıp karşılaştırmaları yapılmıştır. Elde edilen radargramlara bakıldığında, net olarak gözlenebilen şekil üzerinde kırmızı oklarla işaretlenmiş geniş çaplı yaklaşık 3 m derinlikte hiperboller görünmektedir (Şekil 3.22).



Şekil 3.23. A21 alanının güney kısmında Jeofizik Mühendisliği amfisi önündeki ölçü profilinin konumu ve elde edilen radargramlar

KTÜ Jeoloji Mühendisliği güney girişi önünde alınan son ölçü profili, A21 alanın güneyinde yer almaktadır. Yaklaşık 10 m uzunluğundaki aynı profil hattı üzerinde 250, 500 ve 800 MHz korumalı antenlerle toplam 3 yer radarı ölçüsü alınmıştır. Elde edilen radargramlara bakıldığında yaklaşık 5 m uzaklıkta elips içerisine alınmış hiperbol tespit edilmiştir (Şekil 3.23).

KTÜ Kanuni yerleşkesinin inşasından günümüze kadar çeşitli amaçlar için yeraltına döşenmiş alt yapı elemanlarının, herhangi bir kazı yada delgi yapılmaksızın yer yüzünden yer radarı yöntemi ile tespitine yönelik hazırlanan bu tez çalışması verileri; değerlendirildikten sonra, farklı genlikli yansıma hiperbollerinin hangi alt yapı elemanına ait olabileceğine yönelik yapılan sayısal modelleme çalışmaları ile irdelenmişlerdir. Bu çalışmadan edinilen deneyim ve kazanımlar doğrultusunda elde edilen sonuçlar ve öneriler izleyen bölümde verilmektedir.

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Arazi çalışmalarını yorumlamada yardımcı olması için yapılan modelleme çalışmalarıyla genel olarak aşağıdaki sonuç ve önerilere ulaşılmıştır.

- Bilindiği üzere sığ derinliklerde telefon, fiberoptik ve elektrik kablolarının konumlarını ve derinliklerini belirleyebilmek için yüksek frekanslı antenler kullanılmaktadır. Ancak kabloların yan yana döşenmesi durumunda elde edilen yansımalar; radargramlarda iç içe geçmiş küçük çaplı hiperboller şeklinde, alt alta döşenmesi durumunda ise tek bir hiperbol olarak görüldüğüne dikkat edilmektedir.

- Hiperbollerini gerçek yerlerine taşımak için migrasyon uygulanması yararlı olmaktadır

- Fiberoptik ve telefon kablolarının pvc veya koruger borular içerisinden geçirilerek döşenmesi durumunda, radargramda elde edilen yansıma alt alta görünen iki hiperbol şeklinde olmaktadır.

- Metalik ve metalik olmayan su borularının vermiş olduğu yansımalarda beklendiği üzere büyük farklılık gözlenmektedir. Metalik borular yüksek genlikli hiperbolik yansımalar verirken, metalik olmayan borular zayıf genlikli hiperbolik yansımalar vermektedir. Bunların yan yana döşenmesi durumunda ise metalik boruların çok yüksek genlikli olmasından dolayı bazen düşük genlikli olan diğer hiperbolik yansımaları bastırabilir.

- Radargramlarda elde edilen hiperbollerin çaplarına ve genliklerine bakılarak, bunların hangi alt yapı elemanına ait olduğu belirlenebilir.

Sayısal modelleme çalışmaları sonucu elde edilen yapay radargramlardaki farklı alt yapı elemanlarının görünüşleri, araziden ölçülen radargramlardaki benzer görünüşlerle karşılaştırılarak, KTÜ Kanuni yerleşkesinde hangi alt yapı elemanının yaklaşık olarak nerelerden ve hangi derinliklerden geçtiği tespit edilmiştir. Ayrıca elde edilen bu bulgular KTÜ Yapı İşleri Daire Başkanlığından edinilen yerleşke hali hazır haritası üzerine tahmini olarak çizilmiş alt yapı elemanlarının güzergahları (Ek 1) ile karşılaştırılmıştır.

A1 alanında elde edilen tüm profillerin son kısımlarında elips içerisine alınmış yüksek genlikli anomaliler; yeraltındaki metalik sıcak ve soğuk su borularından kaynaklanmaktadır. Çünkü şekil 2.11 de yer alan model 6 ya ait metal su borusunun yapay radargramdaki görünümü bu anomalilerle oldukça benzerdir. Bu durum KTÜ hali hazır

harita üzerindeki tahmini gösterilen su borusu hattıyla da uyuşmaktadır. Ancak bu haritada belirtilmemiş bazı alt yapı elemanları bu çalışma alanında tespit edilmiştir. Radargramlar üzerinde güzergahı çizgi ile belirtilen bu alt yapı elemanlarının, fiperoptik, telefon ve elektrik kabloları olduğu sonucuna varılmıştır.

A2 alanında 8 profilde elde edilen radargramlarda, 1., 2. ve 3. profillerin başlangıçlarında kırmızı oklarla gösterilmiş geniş boyutlu beton atık su borusunun görünüşleri, belirgin yansıma hiperbollerinde yer almaktadır. Aynı profillerin ilerleyen uzaklıklarındaki sarı kesikli çizgi ile gösterilmiş küçük boyutlu hiperboller, bu alandan geçtiği tahmin edilen elektrik kablolarını yansıtmaktadır. 5. profildeki kırmızı oklarla gösterilmiş en yüksek genlikli yansımalar yaklaşık 0.2 m ve 1.4 m uzaklıklarındaki hiperboller metalik sıcak/soğuk su borusuna aittir. Bu alandaki 5., 6., 7. ve 8. profillerde küçük çaplı zayıf genlikli hiperbolik yansımalar alt yapı elemanlarına ait kablolarla karşılık gelmektedir.

A3 inceleme alanının 1. ve 2. profilinde belirgin herhangi bir alt yapı elemanı belirtisine rastlanmamıştır. Diğer profillerde ise yaklaşık 1-1.5 m derinliklerdeki yüksek genlikli geniş hiperbolik yansımaların atık su borularından kaynaklandığı düşünülmektedir.

A4 alanında var olduğu tespit edilen iki ayrı elektrik kablosu güzergahı 1., 2., 3. ve 4. profillerde sarı kesikli çizgi ile gösterilmiştir. Bunların dışında lokal olarak tespit edilen zayıf genlikli birçok hiperbol kırmızı oklarla gösterilmiştir. Ayrıca 8. profilde yan yana görülen yüksek genlikli hiperbolik yansımalarında metalik su borusundan kaynaklandığı ve 7. profilin başında görülen yüksek genlikli yansıma ile 8. profildeki mavi kesikli çizgilerle gösterilen yüksek genlikli yansımaların aynı alt yapı elemanından kaynaklandığı düşünülmektedir.

KTÜ hali hazır haritası üzerine yaklaşık tahmini olarak çizilmiş elektrik kablolarının tam yerleri ve derinlikleri A5 inceleme alanına ait radargramlarda elips, kırmızı ok ve sarı kesikli çizgilerle gösterilmiştir.

A6 ile isimlendirilmiş inceleme alanındaki 16 profilden elde edilmiş radargramlar yan yana konularak araştırma alanının elde edilen 3 boyutlu görünümünün farklı derinliklerine ait genlik-derinlik haritalarında 1.2 m deki incelendiğinde tüm profillerin sonunda yaklaşık 7 m uzaklıklarda oldukça geniş ve belirgin yüksek genlikli hiperbollün atık su boru hattına ait olduğu sonucuna varılmıştır.

A7 alanında yapılabilen az sayıda yer radarı ölçümlerinden elde edilen radargramlarda çok belirgin alt yapı elemanına rastlanamamıştır. Gözlenen yansımaların

zemindeki doğal koşullar ve rastgele dolgu malzemesinden kaynaklandığı şeklinde yorumlanmıştır.

KTÜ Kanuni yerleşkesindeki Makina Mühendisliği Bölümü arka bahçesinde seçilen A8 inceleme alanına ait radargramlarda birbirine bitişik küçük oldukça dikkat çekici hiperbollerden yüksek genlikli olanların, metalik su borusuna, zayıf genlikli olanların ise pvc ile koruma altına alınmış telefon, fiberoptik kablolar, ayrıca 1. ve 2. profillerin başlarında yaklaşık 1 m derinlikte geniş çaplı olarak görünen hiperbolün atık su borusuna karşılık geldiği şeklinde yorumlanmıştır.

A9 alanına ait radargramlarda tespit edilen farklı nitelikli birçok hiperbolik yansımalar belirlenmiştir. 1. ve 2. profilin başlangıçlarındaki belirgin hiperboller metalik su borusu, 3. profilin ortasında, 4. profilin 8-9 m uzaklıkları arasında ve 5. profilin sonundaki yüksek genlikli geniş yansımaları bir kanal belirtisi, 1. ve 2. profilin 3 m uzaklıklarında yaklaşık 0.4 m derinliklerinde ve 7 m uzaklık 0.4 m derinlikteki sarı kesikli çizgilerle gösterilen zayıf genlikli küçük boyutlu hiperboller telefon kablosu belirtisi görünümündedir. Bu alanda en belirgin görünümde olan iki hiperbol 1. profilin 8.5 m uzaklığında ve 4. profilin 2.5 m uzaklığında yer almaktadır. Bunların taşıdıkları su kapasitesine göre daha geniş çaplı metalik su borularına karşılık geldiği sonucuna varılmıştır.

A10 alanına ait radargramlarda oldukça küçük ve belirgin çok sayıda yansıma hiperbollerinin bu alanda birçok alt yapı elemanı mevcut olduğunu göstermektedir. Öyle ki bu elemanlar hem yan yana bitişik hem alt alta döşenmiş şekilde oldukları durumda ancak böyle radargramlar elde edilmektedir. Bu alandaki en belirgin ve dikkat çekici kırmızı oklarla belirtilen yansımalar 3. profilde yer almaktadır. Bunların çok yüksek elektriksel iletkenliğe sahip elemanlara ait olduğu sonucuna varılmıştır. Radargramlar üzerinde sarı kesikli çizgilerle güzergahları belirtilmeye çalışılan elemanlar ise, telefon, fiberoptik ve elektrik kablolarıdır. Ayrıca 2. ve 3. profilde yaklaşık 1 m derinlikte yüksek genlikli mavi kesikli çizgiyle işaret edilen yansıma hiperbollerini bu noktalarda geçen metalik su borusunun göstergesidir.

A11 alanına ait radargramlar üzerinde oldukça küçük boyutlu birçok hiperbolik yansıma bu alanda sayıda kablo döşenmiş olduğunun göstergesi olarak yorumlanmıştır. Ancak sadece bu üç radargramla böyle küçük boyutlu alt yapı elemanlarının güzergahını belirlemek mümkün olamamaktadır. Bu tür çalışmalarda daha sık aralıklı profiller seçilip yüksek merkez frekanslı antenler kullanılmalıdır.

İnceleme alanı A12 de elde edilen radargramlar yaklaşık 7 m ölçü hat uzunluğunda olup oldukça karmaşık görünümündedirler. Bu görüntülerden alt yapı elemanlarını belirlemek oldukça zor olmuştur. A11 alanı için yapılan öneriler bu alan içinde geçerlidir. Ancak radargramlar büyütülerek ayrıntılı incelenmeye çalışıldığında, su borusu olabilecek yüksek genlikli yansımalar kırmızı oklarla ve mavi kesikli çizgi ile, kablo niteliğinde zayıf genlikli yansıma hiperbollerini sarı kesikli çizgilerle işaret edilmiştir.

A13 inceleme alanına ait 3 profilin radargramlarında alt yapı elemanlarının yansımaları yer yer izlenmiş ve en belirgin olanı 1. profilin 1.5 m uzaklığında yaklaşık 1.2 m derinliğinde gözlenen okla işaret edilmiş yüksek genlikli geniş hiperbolik yansımanın bir atık su borusu (rogar) olabileceği sonucuna varılmıştır.

A14 inceleme alanına ait kroki üzerinde otobüs durağının doğusunda 2 ve batısında 2 olmak üzere toplam 4 profildeki radargramlar incelendiğinde, yüksek genlikli belirgin izlenebilen hiperbolik yansımaların metalik su borularına karşılık geldiği tahmin edilmektedir.

KTÜ hali hazır haritasında herhangi bir alt yapı elemanı hattı işlenmemiş olan A15 alanından elde edilen radargramlarda, alt yapı elemanı güzergahı niteliğinde olabilecek özellikle 1. ve 4. profildeki yüksek genlikli hiperbolik birçok yansımanın sıcak/soğuk boru hattına karşılık geldiği düşünülmektedir. Buralarda herhangi bir nedenle yapılacak olan mekanik açmalar esnasında bu tez çalışmasında tespit edilen alt yapı elemanlarının dikkate alınması gerekmektedir. Aksi durumda birçok maddi ve iş gücü kaybı oluşabilir.

A16 alanına ait radargramlarda alt yapı elemanı niteliğinde olabilecek yansılardan 2. profilde 3.5 m uzaklık ve 0.8 m derinlikte gözlenen geniş boyutlu yüksek genlikli hiperbolün, birbirine bitişik iki metalik borudan kaynaklı olduğu sonucuna varılmıştır.

A17 olarak tanımlanan inceleme alanında elde edilen radargramlar birlikte yorumlandığında, tüm profillerde zayıf genlikli farklı boyutlarda birçok yansıma hiperbollerinden dikkat çekici olan 2., 3. ve 4. profillerin yaklaşık olarak 2.5 m uzaklık ve 0.5 m derinlikli kesikli sarı çizgi ile gösterilmiş, koruma amaçlı pvc boru içerisinden geçirilen telefon ve fiber optik kablo hattının olduğu sonucuna varılmıştır.

Bir diğer inceleme alanı olan A18 deki 3 radargramda da tespit edilen oldukça belirgin görünümlü net izlenebilen hiperbolik yansımaların; metalik su borusuna ait bir güzergah olduğu düşünülmektedir. Ayrıca vurgulanması gereken, özellikle 3. profilin 1.6 m ve 12.5 m uzaklıklarında oldukça sığ derinlikte (0.2-0.3 m aralıklarında) ve yüksek genlikli net yansıma hiperbollerinin yine metalik boru görünümünde olduğu ortadadır. Tüm

profillerde 2-5 m uzaklıklarda 0.4 m derinlikte net olarak görünen hiperbolik yansımalar bu noktalardan geçen metalik su borusunun belirtisi olduğu şeklinde yorumlanmıştır.

A19 olarak adlandırılan çalışma alanındaki 4 ölçü profiline ait radargramlarda; ilk 5 metreye kadar doğal zemin koşullarının görünümü izlenmekte olup, bu kısımdan profillerin sonuna kadar oldukça küçük boyutlu ve zayıf genlikli yansıma hiperboller; telefon, fiber optik ve elektrik kablolarının hatlarını kestiği şeklinde yorumlanmıştır. Ayrıca 3. ve 4. profillerde yaklaşık 10-12 m uzaklıkları civarında 0.8 m derinlikte gözlenen hiperbollerin su borularına karşılık geldiği kararına varılmıştır.

KTÜ Kanuni yerleşkesinde ele alınan A20 araştırma alanındaki yaklaşık 12 m uzunluğunda 3 profile ait radargramlar, konumlarına göre yerleştirilerek elde edilen görüntüdeki alt yapı eleman belirtilerinden, metalik borunun bütün profillerin yaklaşık 5.5 m uzaklık ve 0.4 m derinlikte yer aldığı belirgin gözlenmiştir. Bütün profillerde bu belirtilerin gözlendiği noktaların birleştirilmesi ile oluşturulan güzergah şekil üzerinde mavi kesikli çizgiyle gösterilmektedir. Ayrıca 2. profilde 6 m uzaklık 0.8 m derinlikte net olarak gözlenen fakat diğer profillerde aynı derinlikte daha zayıf genlikli (muhtemel ortam koşullarına bağlı olarak) benzer hiperbolik yansımalar da yine metalik su borusuna karşılık geldiği sonucuna varılmıştır.

Son inceleme alanı olarak seçilen A21 alanın güney kısmından elde edilen radargramlarda izlenen geniş çaplı yansıma hiperbollerinin kanalizasyon borularından kaynaklandığı sonucuna varılmıştır. Ayrıca aynı alanda yaklaşık 12 m uzaklıkta gözlenen sarı kesikli çizgi ile gösterilmiş yüksek genlikli hiperboller kablolardan kaynaklandığı şeklinde yorumlanmıştır. A21 alanın güneyinde 40 m uzunluktaki gidiş dönüş olarak alınan ölçü profiline ait radargramlardaki geniş çaplı hiperboller kanalizasyon borusuna aittir. Yine A21 alanın güneyinde aynı hat boyunca 250, 500 ve 800 MHz antenle alınan ölçülerden elde edilen radargramlarda net gözlenen hiperbollerin, metalik su borusu kaynaklı olduğu sonucuna varılmıştır.

Bu tez kapsamında tespit edilen alt yapı elemanlarının güzergah bilgileri ve ne tür eleman oldukları, 21 inceleme alanında görüntüsel ve sayısal olarak ortaya konulmuş ve KTÜ Kanuni yerleşkesi hali hazır haritası (Ek 2) üzerine işlenmiştir. Bu haritada ayrıca bu tez kapsamında ele alınan araştırma alanlarının dışında daha önceden gerçekleştirilmiş yer radarı ölçüm sonuçları da yer almaktadır.

İnceleme alanlarının bazılarında (A3, A7, A13, A14, A16 ve A17) elde edilen radargramlarda net alt yapı elemanı belirtisi olmayışının nedeni; ya GPR ölçü profillerinin

alt yapı elemanlarının uzanım eksenine paralel olması, ya alt yapı elemanlarının ölçü hatları arasına düşmesi, ya da bu alanlarda herhangi bir alt yapı elemanın bulunmamasından kaynaklanmaktadır. Var olan herhangi bir alt yapı elemanının ölçü profillerinin seçimi nedeniyle belirlenememesini ortadan kaldırmak için, her iki yönde de (gridleme) GPR ölçülerinin toplanması gerekmektedir.

Bu tez çalışması, KTÜ Kanuni yerleşke alanının tamamını içermemektedir. İhtiyaç duyulduğunda yerleşkenin herhangi bir yerinde benzer çalışmalar; bu çalışmanın sonuç ve önerileri dikkate alınarak yürütülmesi yararlı olacaktır.

5. KAYNAKLAR

- Annan, A. P., 1992. Ground penetrating radar workshop notes. Mississauga, Ontario: Sensors and Software Inc.
- Annan, A. P., 1996. Transmission dispersion and GPR. The Journal of Environmental and Engineering Geophysics, 2, 125-136.
- Annan, A. P., 2001. Ground Penetrating Radar Workshop Notes. Mississauga, Ontario Sensors and Software Inc.
- Annan, A. P., 2004. Ground Penetrating Radar Principles, Procedures & Applications. Mississauga, On, Canada: Sensors & Software Inc,
- Annan, A. P., 2005. GPR Methods for Hydrogeological Studies. In Y. Rubin, & S. S. Hubbard (Eds.). Hydrogeophysics, 185-213.
- Annan, A. P., 2009. Electromagnetic principles of ground penetrating radar. In M. H. Jol, (Ed). Ground penetrating radar theory and applications, Amsterdam, The Netherlands: Elsevier Science, 3-40
- Annan, A. P., and Chua, L. T., 1992. Ground penetrating radar performance predictions. The Geological Survey of Canada, 90,4 , 5-13.
- Annan, A. P. ve Cosway, S. W., 1992. Simplified GPR Beam Model for Survey Design. 62nd Annual International Meeting of the Society of Exploration Geophysicists, Extended Abstract.
- Annan, A. P. ve Cosway, S. W., 1994. GPR Frequency Selection. Fifth International Conference on Ground-Penetrating Radar, Proceedings, 747-760.
- Annan, A.P. and Davis, J.L., 1976. Impulse radar sounding in permafrost, Radio Science, 11, 357- 438
- Annan, A. P., Davis, J. L. and Gendzwill, D., 1988. Radar Sounding in Potash Mines: Saskatchewan, Canada. Geophysics, 53, 1556-1564.
- Arcone, S. A., 1995. Numerical Studies of the Radiation Patterns of Resistively Loaded Dipoles, Journal of Applied Geophysics, 33, 39-52.
- Aspiron, U. ve Aigner, T., 1999. Towards Realistic Aquifer Models: Three Dimensional Georadar Surveys of Quaternary Gravel Deltas (Singen Basin, SW Germany). Sedimentary Geology, 129, 281-297.
- Austin, G. L. ve Austin, L. B., 1974. The use of radar in urban hydrology. Journal of Hydrology, 22, 131-142.

- Balanis, C. A., 1989. Advanced engineering electromagnetics. NY: John Wiley and Sons.
- Balkaya Ç., 2010. Karşılıklı Kuyu Yer Radarı Verisinin İki Boyutlu Seyahat Zamanı Tomografisi, Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 177.
- Batey, R. A., 1987. Subsurface interface radar at Sepphoris, Israel, Journal of Field Archaeology, 14, 1-8.
- Behrendt, J. C., Drewry, D., Jankowski, E. ve England, A. W., 1979. Aeromagnetic and radar ice sounding indicate substantially greater area for dufek intrusion in Antarctica, American Geophysical Union Transactions, 60, 245.
- Berenger, J. P., 1994. A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic wave, Journal of Computational Physics, 114, 185-200.
- Bergmann, T. Blanch, J.O. ve Robertsson, J.O.A., 1999. A Simplified Lax-Wendroff Correction for Staggered-grid FDTD Modeling of Electromagnetic Wave Propagation in Frequency-dependent Media. Geophysics, 64, 5, 1369-1377.
- Bentley, C. R., Clough, J. W., Jezek, K. C. ve Shabtaie, S., 1979. Ice thickness patterns and the dynamics of the Ross Ice Shelf, Antarctica. Journal of Glaciology, 24, 287-294.
- Binley, A., Cassiani, G., Middleton, R., ve Winship, P., 2002. Vadose zone flow model parameterisation using cross-borehole radar and resistivity imaging. Journal of Hydrology, 267, 147-159.
- Blindow, N., 2006. Ground penetrating radar. In R. Kirsch (Ed). Groundwater Geophysics: A Tool for Hydrogeology ,227-252, Berlin: Springer.
- Bourgeois, J.M. ve Smith G.S. 1996. A Fully Three-Dimensional Simulation of a Ground-Penetrating Radar: FDTD Theory Compared with Experiment. IEEE Transactions on Geosciences And Remote Sensing, 34, 1.
- Bristow, C.S ve Jol, H.M. (Ed.), 2003. Ground Penetrating Radar in Sediments. Geological Society Special Publications, London, 211, 191-198.
- Bryan, M. L. , 1974. Ice thickness variability on Silver Lake, Genesee County, Michigan: A radar approach, advanced concepts in the study of snow and iceresources. United States Contribution to the International Hydrological Decade, 213-223.
- Cai, J. and McMechan, G. A., 1994. Ray-based synthesis of bistatic groundpenetrating radar profiles. Geophysics, 60, 87-96.
- Caldecott, R., Poirier, M., Scofea, D., Svoboda, D. E. ve Terzuoli, A. J., 1988. Underground mapping of utility lines using impulse radar. IEE Proceedings-F, Communications, Radar & Signal Processing, 135, 343-361.

- Carcione, J. M., 1998. Radiation Patterns for 2-D GPR Forward Modelling. Geophysics, 63, 2, 424-430.
- Cardelli, E. Marrone, C., ve Orlando, L. 2003. Evaluation of Tunnel Stability using integrated Geophysical Methods. Journal of Applied Geophysics, 52, 93-102.
- Cassiani, G., Binley, A., ve Ferré, T. P. A. 2006. Unsaturated Zone Processes. In H. Vereecken, A. Binley, G. Cassiani, A. Revil and K. Titov (Eds). Applied Geophysics, 75-116, New York: Springer-Verlag.
- Changryol, K. Daniels, J. J. Guy, E. Radzevicius, S. J. and Holt, J., 2000. Residual Hydrocarbons in a Water-Saturated Medium: A Detection Strategy using Ground Penetrating Radar. Environmental Geosciences, 7, 4, 169-176.
- Cheng N., Tang C.H. ve Chan C., 2013. Identification and positioning of underground utilities using ground penetrating radar, Sustain. Environ. Res., 23, 2, 141-152.
- Cook, J. C., 1973. Radar exploration through rock in advance of mining, Transactions of the Society of Mineral Engineering AIME, 254, 140-146.
- Cook, J. C., 1975. Radar transparencies of mines and tunnel rocks, Geophysics, 40, 865-85.
- Cook, J. C., 1977. Borehole-radar exploration in a coal seam. Geophysics, 42, 1254-1257.
- Coon, J. B., Fowler, J. C. ve Schafers, C. J., 1981. Experimental Uses of Short Pulse Radar in Coal Seams. Geophysics, 46, 1163-1168.
- Conyers, L. B., ve Goodman, D., 1997. Ground-penetrating radar: An Introduction for Archaeologists. California: Altamira Press.
- Conyers, L. B., ve Cameron, C. M., 1998. Ground-penetrating Radar Technique and Three-Dimensional Computer Mapping in the American Southwest. Journal of Field Archaeology, 25, 417-430.
- Daniels, D. J., 1989. Fundamental of Ground Penetrating Radar, in Proceedings of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems SSGEEP'89, Golden, 62-142.
- Daniels, D.J., 1996. Surface-Penetrating Radar. Electronics & Communication Engineering Journal, 8, 165-182.
- Daniels, D. J. (Ed.), 2004. Ground Penetrating Radar. The Institution of Electrical Engineers. The Institution of Electrical Engineers, London, United Kingdom, 97-107.
- Davis J.L. ve Annan A.P., 1989. Ground Penetrating Radar for High Resolution Mapping of Soil and Rock Stratigraphy, Geophysical Prospecting, 37, 531-551.

- Dannowski, G. ve Yaramancı, U., 1999. Estimation of Water Content and Porosity using Combined Radar and Geoelectric Measurements. European Journal of Environmental and Engineering Geophysics, 4, 71-85.
- Degenhardt, J. J., ve Giardino, J. R., 2003. Subsurface Investigation of a Rock Glacier using Ground-Penetrating Radar: Implications for Locating Stored Water on Mars. Journal of Geophysical Research, 108, 8036-8053.
- Dellwig, L. F. ve Bare, J. E. , 1978. A radar investigation of North Louisiana salt domes. Photogrametric Engineering and Remote Sensing, 44, 1411-1419.
- Dolphin, L. T., Beatty, W. B. ve Tanzi, J. D., 1978. Radar Probing of Victorio Peak, New Mexico. Geophysics, 43, 1441-1448.
- Engheta, N., Papas, C. H. ve Elachi, C., 1982. Radiation patterns of interfacial dipole antenna, Radio Science, 17, 1557-1566.
- Evans, S., 1963. Radio techniques for the measurement of ice thickness, PolarRecord, 11, 406-410.
- Fang, J. ve Wu, Z., 1996. Generalized perfectly matched layer for the absorption of propagating and evanescent waves in lossless and lossy media. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 44, 2216-2222.
- Fisher, E., McMechan, G. A. ve Annan, A. P., 1992. Acquisition and processing of Wide-Aperture Ground-Penetrating Radar Data. Geophysics, 57, 495-504.
- Gerlitz, K., Knoll, M.D., Cross, G.M., Luzitano, R.D. and Knight, R., 1993. Processing Ground Penetrating Radar Data to Improve Resolution of Near-Surface Targets. Proceedings of The Symposium on The Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems, San Diego, USA, 561-575.
- Giannopoulos, A., 2005. Modelling ground penetrating radar by GprMax, Construction and Building Materials, 19, 755-762.
- Goodman, D., ve Nishimura, Y., 1993. A Ground Radar View of Japanese Burial Mounds. Antiquity, 67, 349-354.
- Goodman, D., 1994. Ground-penetrating Radar Simulation in Engineering and Archaeology. Geophysics, 59, 224-232.
- Grandjean, G. ve Gourry, J.C., 1999. GPR Data Processing for 3D Fracture Mapping in a Marble Quarry (Thassos, Greece), Journal of Applied Geophysics, 36, 19-30.
- Green, A. Gross, R. Holliger, K. Horstmeyer, H. ve Baldwin, J., 2003. Results of 3D georadar surveying and Trenching the San Andreas Fault Near its Northernland Ward Limit, Tectonophysics, 368, 7-23.

- Griffin, S. ve Pipet, T., 2002. Ground Penetrating Radar. *Geophysical and Remote Sensing Methods for Regolith Exploration*, 144, 80-89.
- Guru, B., ve Hızıroğlu, H., 2004. *Electromagnetic Field Theory Fundamentals* (2nd ed.). Cambridge University Press.
- Gürel, L. ve Oğuz, U. 2000 Three- dimensional FDTD modelling of a Ground-Penetrating Radar. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38, 4.
- Hammon III, W. S. McMechan, G. A. ve Zeng, X., 2000. Forensic GPR: Finite-Difference Simulations of Responses from Buried Human Remains. *Journal of Applied Geophysics*, 45, 171-186.
- Harrari, Z., 1996. Ground Penetrating Radar (GPR) for Imaging Stratigraphic Features and Groundwater in Sand Dunes, *Journal of Applied Geophysics*, 36, 43-52.
- Holliger, K., ve Bergmann, T., 2002. Numerical modeling of borehole georadar data. *Geophysics*, 67, 4, 1249-1257.
- Holser, W. T., Brown, R. J. S., Roberts, F. A., Fredriksson, O. A. ve Unterberger, R.R., 1972. Radar logging of a salt dome. *Geophysics*, 37, 889-906.
- Huisman, J. A., Hubbard, S. S., Redman, J. D., ve Annan, A. P., 2003. Measuring Soil Water Content with Ground Penetrating Radar: A review. *Vadose Zone Journal*, 2, 476-491.
- Hunaidi, O. ve Giamou P., 1998. Ground-penetrating Radar for Detection of Leaks in Buried Plastic Water Distribution Pipes, Seventh International Conference on Ground-Penetrating Radar, May, Lawrence, Kansas, USA, 27-30.
- Huggenberger, P., Meier, E., ve Beres, M., 1994. Three-DIMENSIONAL Geometry of Fluvial Gravel Deposits from GPR Reflection Patterns: A Comparison of Results of Three Different Antenna Frequencies. 5th International Conference on Ground Penetrating Radar (Proceedings), *Waterloo Centre for Groundwater Research*, 3, 805-815.
- Irving, J., 2006. Improving Tomographic Estimates of Subsurface Electromagnetic Wave Velocity Obtained from Ground-Penetrating Radar Data. Doctor of Philosophy, Stanford University.
- Irving, J. ve Knight, R., 2006. Numerical Modelling of Ground-Penetrating Radar in 2D using MATLAB, *Computer and Geosciences*, 35, 1247-1258.
- Jackson, J.D., 1962. *Classical Electrodynamics*, John Wiley and Sons, New York
- Kadioğlu, S. Ulugergerli, E.U. ve Daniels, J.J., 2006. 3D Visualization to Map Cavities by GPR Method: Dalaman Akkoprü Dam Reservoir Area, Muğla, Southwest Turkey. Proceedings of the 11 th International Conference on Ground Penetrating Radar, Columbus- Ohio, USA, CD paper No.156_dnj.

- Kadioğlu, S. ve Daniels, J. J., 2008. 3D Visualization of Integrated Ground Penetrating Radar Data and EM-61 Data to Determine Buried Objects and Their Characteristics, Journal of Geophysics and Engineering, 5, 448-456.
- Kadioğlu, S., 2008. Photographing layer thicknesses and discontinuities in a marble quarry with 3D GPR visualization. Journal of Applied Geophysics, 64,3, 109-114.
- Kaplanvural, İ. 2011. “Yer Radarı Verilerinin Modellenmesi Ve Yorumlanması”, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,
- Kayen, R. E., Barnhardt, W. A., Ashford, S., Rollins, K., Minasian, D. L., and Carkin, B. A. 2002. In T. Parsons (Ed.). High-resolution crosshole radar tomography: Application to liquefaction-induced changes in soil on Treasure Island. Crustal Structure of the Coastal and Marine San Francisco Bay Region, California (3-10). Washington: USGS Professional Paper 1658, U.S. Geological Survey.
- Kim J.-H., Cho S.-J ve Yi M.-J. 2007. Removal of Ringing Noise in GPR Data by Signal Processing, Geosciences Journal, 11, 1, 75 – 81.
- Koçaslan, A., 2008. Sonlu Farklar Yöntemi ile Çok Yüksek Frekanslı Elektromanyetik Dalga Alanı Hesabı, Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Kurt, B.B., Kadioğlu, S., ve Ekincioğlu, E.E., 2009. Yer Radarı Yöntemi ile Gömülü Boruların Konum, Büyüklük ve Fiziksel Özellikleri ile Belirlenmesi. Yerbilimleri, 30,1
- Kurtulmuş, T.Ö., 2007. Sığ Jeofizik Aramacılıkta Yer Radarı Modellemesi, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 115.
- Leckebusch, J., 2003. Ground-Penetrating Radar: A Modern Three-Dimensional Prospection Method, Archaeological Prospection, 10, 213-240.
- Lee, R. ve Teixeira, F. L. 2006. Finite Difference Time Domain Modelling For GPR Applications. GPR 2006 Conference Short Course Notes.
- Mertzaniğes, I.C., Soupios, P. M., Tsokas, G. N., Vargemezis, G. ve Paliadelis-Saatsoglou, C. . GPR Exploration for Concealed Antiquities in the Archeological Site of the Vergina, Second Balkan Geophysical Congress ve Exhibition, 130, 131. http://www.balkangeophysoc.gr/menu/congresses/oral/130-131-O13-5-Ioannis_Mertzaniğes_1.PDF, 12.06.2014
- Milsom, J., 2003. Field Geophysics (3rd ed.). John Wiley&Sons Ltd.,England.
- Moorman, B. J., 2001. Ground-Penetrating Radar Applications in Paleolimnology. In. M. Last& J. P. Smol, (Eds.). Tracking Environmental Change using Lake Sediments (23-47). Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers.

- Morey, R. M., 1974. Continuous sub-surface profiling by impulse radar. Conference on Subsurface Exploration for Underground Excavation and Heavy Construction, American Society of Civil Engineers, 213-232.
- Morey, R. M., 1976. Detection of subsurface cavities by ground penetrating radar, Highway Geological Symposium, 27, 28-30.
- Mur, G., 1981. Absorbing boundary conditions for the finite-difference approximation of the time-domain electromagnetic-field equations, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 23, 377-382.
- Neal, A., 2004. Ground-Penetrating Radar and its use in Sedimentology: Principles, Problems and Progress. Earth-Science Reviews, 66, 261-330.
- Negri, S., ve Leucci, G., 2006. Geophysical Investigation of the Temple of Apollo (Hierapolis, Turkey), Journal of Archaeological Science, 33, 1505-1513.
- Neubauer, W., Eder-Hinterleitner, A., Seren, S., ve Melichar, P., 2002. Georadar in the Roman Civil Town Carnuntum, Austria: An Approach for Archaeological Interpretation of GPR Data, Archaeological Prospection, 9, 135-156.
- Öğretmen, Z. ve Şeren A., 2014. Investigation Fracture-Crack Systems with Geophysical Methods in Bayburt Kıratlı Travertine, Journal of Geophysics and Engineering, 11-6.
- Olhoeft, G. R., 1981. Electrical Properties of Rocks. in Y. S. Touloukian, W. R. Judd, and R. F. Roy, (Ed.). Physical Properties of Rock Sand Minerals, 257-330.
- Olhoeft, G. R., 1994. Geophysical observations of geological, hydrological and geochemical heterogeneity, Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems, EEGS, 129-141.
- Olhoeft, G. R., 1998. Electrical, magnetic and geometric properties that determine ground penetrating radar performance. 7th International Conference on Ground Penetrating Radar (Proceedings), 177-182.
- Osumi, N. ve Ueno, K., 1988. Detection of buried plant. IEE Proceedings-F, Communications, Radar & Signal Processing, 135, 330-342.
- Parasnis, D. S. 1997. Principles of Applied Geophysics (5th ed.). Chapman and Hall Powers, M.H., ve Olhoeft, G.R., 1994. Modeling dispersive Ground Penetrating Radar Data. Proceedings of the 5th International Conference on Ground-Penetrating Radar, Waterloo, Ontario, 173-183.
- Porsani, J. L., Filho, W. M., Elis, V. R., Shimeles, F., Dourado, J. C. ve Moura, H. P., 2004. The use of GPR and VES in delineating a contamination plume in a landfill site: a case study in SE Brazil. Journal of Applied Geophysics, 55, 199- 209.

- Powers, M. H. ve Olhoeft, G. R., 1996. Modeling the GPR response of leaking, buried pipes. 9th Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems (SAGEEP'96), (Proceedings), 525-534.
- Reynolds, J. M., 1997. An Introduction to Applied and Environmental Geophysics. Chichester: John Wiley&Sons Ltd.
- Roberts R. L. ve Daniels J. J., 1997. Modeling near-field GPR in three dimensions using the FDTD method, Geophysics, 62, 1114-1126.
- Roberts R. L. ve Daniels J. J., 1997. Modeling near-field GPR in three dimensions using the FDTD method. Geophysics, 62, 1114-1126.
- Roden, J. A. ve Gedney, S. 2000. An efficient FDTD implementation of the PML with CFS in general media, IEEE.
- Romero, F.A. ve Roberts, R.L., 2002. Mapping concrete deterioration: High speed Ground penetrating radar surveys on bridge decks using new analysis method based on dual polarization deployment of horn antennae. Proceedings of International Bridge Conference, June, Pittsburgh, PA, USA, Paper IBC-02-12.
- Rucker, D. F., ve Ferré, T. P. A., 2004. Correcting Water Content Measurement Errors Associated with Critically Refracted First Arrivals on Zero Offset Profiling Borehole Ground Penetrating Radar Profiles. Vadose Zone Journal, 3, 278-287.
- Sadiku, M.N.O. 1992. Numerical techniques in electromagnetics, second edition, London.
- Sass, O., ve Wollny, K., 2001. Investigations regarding Alp Inetalus Slopes using Ground-Penetrating Radar (GPR) in the Bavarian Alps, Germany. Earth Surface Processes and Landforms, 26, 1071-1086.
- Sensors and Software, 1996. Pulse EKKO100 User's Guide, V1.2, technical manual 25, Canada.
- Sevgi, L. 1999. Elektromagnetik problemler ve sayısal yöntemler, Canada
- Seyfried D., Jansen R., ve Schoebel J., 2014. Shielded Loaded Bowtie Antenna in Incorporating The Presence of Paving Structure for Improved GPR Pipe Detection, Journal of Applied Geophysics, 111, 289–298.
- Sheriff, R. E., 1984. Encyclopedic dictionary of exploration geophysics (2nd ed.). Tulsa, Oklahoma: Society of Exploration Geophysics.
- Smythe, W.R., 1989. Static & Dynamic Electricity, Taylor & Francis, A SUMMA book.
- Smith, D. G. ve Jol, H. M., 1995. Ground Penetrating Radar: Antenna Frequencies and Maximum Probable Depths of Penetration in Quaternary Sediments. Journal of Applied Geophysics, 33, 93-100.

- Stenson, B. O., 1951. Radar methods for the exploration of glaciers, Pasadena, California. Pasadena, California: California Institute of Technology.
- Stern, W., 1930. Principles, Methods and Results of Electrodynamic Thickness Measurement of Glacier Ice. Zeitschrift für Gletscherkunde, 18-24.
- Şeren, A., Gelişli, K. and Çatakli, A., 2008. A Geophysical Investigation of The Late Roman Underground Settlement at Aydintepe, Northeast Turkey, Geoarchaeology: An International Journal, 23, 6, 842–860.
- Taflove, A., ve Hagness, S. C., 2005. Computational Electrodynamics: the Finite Difference Time-Domain Method (3rd Ed.). London: Artech House Publishers.
- Teixeira, F.L. Chew, W.C. Straka, M. Oristaglio, M.L. ve Wang, T. 1998. Finite-Difference Time Domain Simulation of Ground Penetrating Radar on Dispersive, Inhomogeneous, and Conductive Soils, IEEE transactions on geosciences and remote sensing, 36, 6.
- Telford, W. M., Geldart, L. P., Sheriff, R. E., ve Keys, D. A., 1976. Applied Geophysics. NY: Cambridge University Press.
- Theirbach, R., 1973 . Electromagnetic Reflections in Salt Deposits, Journal of Geophysics, 40, 633-637.
- Turesson, A., 2006. Water Content and Porosity Estimated from Ground-Penetrating Radar and Resistivity. Journal of Applied Geophysics, 58, 99-111.
- Van der Kruk, J., Streich, R. ve Green, A.G., 2006. Properties of Surface Wave Guides Derived from Separate and Joint Inversion of Dispersive TE and TM GPR Data, Geophysics.
- Vafidis, A., Economou, N., Ganiatsos, Y., Manakou, M., Poulioudis, G., Sourlas, G., Vrontaki, E., Sarris, A., Guy, M., ve Kalpaxis, T. 2005. Integrated Geophysical Studies at Ancient Itanos (Greece). Journal of Archaeological Science, 32, 1023-1036.
- Von Hippel, A. R., 1954 . Dielectric Material Sand Applications. NY: John Wiley and Sons.
- Wang, T. ve Tripp, A.C., 1996 FDTD Simulation of EM Wave Propagation in 3-D Media. Geophysics, 61,1,110-120.
- Weeds, R. D. (Ed.), 1994. Geophysical Characterization of Sites. Rotterdam: AA. Balkema, 69-79.
- Wilchek, L., 2000. Ground Penetrating Radar for Detection of Rock Structure. M.S. Thesis, Alberta University, Canada.

- Ulriksen, C. P., 1982. Application of Impulse Radar to Civil Engineering. Ph.D. thesis (published), Lund University of Technology, Lund, New Hampshire: Geophysical Survey Systems, Inc.
- Unterberger, R. R., 1978. Radar propagation in rock salt. Geophysical Prospecting, 26, 312-328.
- Yee, K. S., 1966. Numerical Solution of Initial Boundary Problems Involving Maxwell's Equations in Isotropic media, IEEE Trans. Ant. Prop., 14, 302-309.
- Zeng, X., Mc Mechan, G. A., Cai, J., ve Chen, H. W., 1995. Comparison of Ray and Fourier Methods for Modeling Monostatic Ground-Penetrating Radar Profiles. Geophysics, 60, 1727-1734.
- Zeng, X., and McMechan, G.A., 1997. GPR characterization of buried tanks and pipes. Geophysics, 62, 797-806.
- Zhou, H., ve Sato, M. 2004. Subsurface Cavity Imaging by Crosshole Borehole Radar Measurements. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 42, 335-341.
- URL-1 http://www.tespitmuhendislik.com/YERALTI_RADARI_-_GPR.html, 26.10.2014.
- URL_2 <http://i.ytimg.com/vi/Q0qrU4nprB0/maxresdefault.jpg> , 05.11.2014
- URL_3 http://www.yamanenerji.net/FileUpload/bs333894/File/dag_seb_enj_kab_mont_uyg_usl_ess_eylul_2008.pdf , 20.03.2015
- URL_4 http://www.tk.gov.tr/elektronik_haberlesme_sektoru/teknik_duzenlemeler_ve_standardizasyon/dosyalar/yeralti.pdf, 20.03.2015
- URL_5 http://www.pakplast.com.tr/index.asp?action=korige_boru_hendekkesiti (kanalizasyon) , 20.03.2015

6. EKLER

EK.1 GPR ölçü profillerinin konumları ve olası tüm altyapı elemanların geçiş güzergahlarının bulunduğu KTÜ Kanuni yerleşkesi hali hazır haritası.

EK.2 Bu tez çalışması sonucu elde edilmiş radargramlarda gözlenen alt yapı elemanlarının belirtilerinin işaretlenmiş olduğu KTÜ Kanuni yerleşkesi hali hazır haritası.

ÖZGEÇMİŞ

07.10.1985'de Artvin'de doğdu. İlköğretimini Mehmetçik İlkokulu, Mehmet Akif İlkokulu ve Damar İlköğretim Okulunda, liseyi Artvin Anadolu Lisesinde bitirdi. 2004 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü'ne girmeye hak kazandı. 2008 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Jeofizik Mühendisliği Bölümü'nü bitirdikten sonra aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans eğitimine başladı.2008-2013 yılları arasında Anadolu Üniversitesi İşletme Bölümünü bitirdi. 2009-2013 yılları arasında Artvin Deriner Barajında, ERG İnşaat'ta çalıştı. Evli olup, bir çocuk sahibidir.