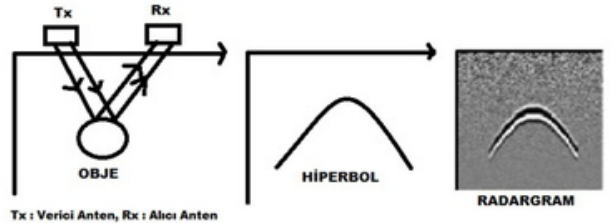
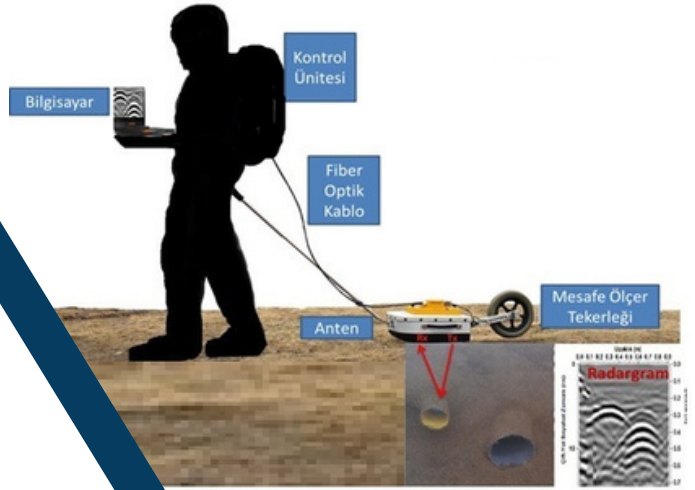


Öğr. Gör. Şeref UYAR

ALTYAPI SİSTEMLERİNDE GPR UYGULAMALARI

Editör: Prof. Dr. Aysel ŞEREN



ALTYAPI SİSTEMLERİNDE GPR UYGULAMALARI

Öğr. Gör. Şeref UYAR

Editör: Prof. Dr. Aysel ŞEREN



Altyapı Sistemlerinde GPR Uygulamaları
Öğr. Gör. Şeref UYAR

Genel Yayın Yönetmeni: Berkan Balpetek
Editör: Prof. Dr. Aysel ŞEREN
Kapak ve Sayfa Tasarımı: Duvar Design
Baskı: Aralık 2024
Yayıncı Sertifika No: 49837
ISBN: 978-625-5530-60-8

© Duvar Yayınları
853 Sokak No:13 P.10 Kemeraltı-Konak/İzmir
Tel: 0 232 484 88 68

www.duvar yayinlari.com
duvarkitabevi@gmail.com

ÖNSÖZ

Bu çalışmada; şehir veya çeşitli yerleşim alanlarındaki altyapı elemanlarından temiz ve kirlı su iletimi için kullanılan farklı tür ve çaptaki borularda yaşanan problemlerin (delinmeler, su sızdırmaları, tıkanma vb.) yer radarı yöntemiyle incelenmesi ve tespit edilmesi amaçlanmıştır.

Arazi ve laboratuvar çalışmalarım süresince ve her daim benden destek ve yardımlarını esirgemeyen, değerli bilgileri, önerileri ve tecrübeleri ile beni yönlendiren, çok değerli danışman hocam Prof. Dr. Aysel ŞEREN'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Beni teşvik ederek ve 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 Tuba UYAR'a ve beni sabırla bekleyen kızlarım Hümeyra Neva UYAR ve Fatma Zehra UYAR'a teşekkürü borç bilirim.

Laboratuvar ve arazi verilerinin toplanmasında bana her türlü desteği veren Zeynep ÖĞRETMEN AYDIN'a ve bu çalışmamda katkı aldığım Dr. Öğr. Üyesi Mahmut SARI'ya çok teşekkür ederim.

Şeref UYAR

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	I
İÇİNDEKİLER.....	II
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	VI
TABLolar DİZİNİ.....	XII
SEMBOLLER DİZİNİ	XIII
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Amaç ve Kapsam.....	3
1.3. Yer Radarı Yöntemi.....	4
1.4. Yer Radarı Yönteminin Tarihçesi.....	10
1.5. Yer Radarı Yönteminin Üstünlükleri ve Zayıflıkları.....	11
1.6. Yer Radarı Yönteminin Kullanım Alanları.....	13
1.7. Yer Radarında Kullanılan Temel Elektromanyetik Dalgaların Yayılım Teorisi.....	14
1.7.1. Elektromanyetik Dalganın Oluşumu.....	14
1.7.2. Elektromanyetik (EM) Dalga Özellikleri.....	16
1.7.3. Elektromanyetik (EM) Alanların Dalga Yapısı.....	17
1.7.4. Elektromanyetik (EM) Dalganın Yayılımı.....	19
1.7.5. Elektromanyetik Dalgaların Yayınımını Etkileyen Fiziksel Özellikler.....	21
1.7.5.1. Dielektrik Geçirgenlik (ϵ)	22
1.7.5.2. Elektrik İletkenlik (σ)	23
1.7.5.3. Manyetik Geçirgenlik (μ)	27
1.7.6. Elektromanyetik (EM) Empedans.....	29
1.8. Yer Radarının (GPR) Yönteminin Temel İlkeleri.....	30
1.8.1. Maxwell Denklemleri.....	30
1.8.2. Katkı Eşitlikleri.....	34

1.8.3.	Zaman Ortamında Elektromanyetik (EM) Dalga Denklemleri.....	34
1.9.	Yer Radarı (GPR) Sinyallerinin Oluşturulması ve Yayılımı.....	38
1.10.	Yer Radarı (GPR) Sinyallerinin Ara Yüzeylerde Yansıması, Kırılması ve İletimi.....	40
1.11.	Yer Radarı (GPR) Sinyal Ölçümü.....	44
1.12.	Sinyal Hızı ve Derinlik Belirlenmesi.....	45
1.13.	Sinyalin Sönümlenmesi.....	47
1.14.	Nüfuz Derinliği.....	49
1.15.	Düşey ve Yanal Ayrımlılık.....	51
1.16.	Radar Anten Frekansının Seçimi.....	52
1.17.	Yer Radarı (GPR) Veri Toplama Yöntemleri.....	56
1.17.1.	Örnekleme Kriteri.....	57
1.17.2.	Ortak Ofset (Yansıma Profili)	57
1.17.3.	Çoklu Ofset Sistemleri.....	58
1.17.3.1.	Geniş Açılı Yansıma ve Kırılma Ölçümleri (GAYK)	58
1.17.3.2.	Ortak Derinlik Noktası (ODN) Ölçümleri.....	59
1.18.	GPR (Yer Radarı) Yönteminde Modelleme.....	60
1.18.1.	Zaman Ortamında Sonlu Farklar Yöntemi (FDTD).....	63
1.18.2.	Yee Algoritması.....	64
1.18.3.	Sonlu Farklar Yöntemi.....	65
1.18.4.	Maxwell Denklemlerinin Sonlu Farklar Yöntemine Göre Yazılması.....	66
1.18.5.	Bir Boyutta Maxwell Denklemleri.....	66
1.18.6.	İki Boyutta Maxwell Denklemleri.....	67
1.18.6.1.	TM Modu Bileşenlerinin Sonlu Farklar ile Hesaplanması.....	67
1.18.6.2.	TE Modu Bileşenlerinin Sonlu Farklar ile Hesaplanması.....	69
1.18.7.	Sınır Koşulları.....	69
1.19.	GPR (Yer Radarı) Verilerine Uygulanan Veri İşlem Adımları.....	70

1.19.1	Temel Veri İşlem Adımları.....	71
1.19.1.1.	Dewow (Düşük Frekanslı İzlerin Giderilmesi).....	71
1.19.1.2.	Kazanç Fonksiyonları.....	72
1.19.1.3.	Background Removal.....	74
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	76
2.1.	Modelleme Çalışmaları.....	77
2.1.1.	Modelleme Çalışması-1.....	80
2.1.2.	Modelleme Çalışması-2.....	81
2.1.3.	Modelleme Çalışması-3.....	83
2.2.	Laboratuvar Çalışmaları.....	84
2.3.	Arazi Çalışmaları.....	87
2.3.1.	Çalışma Alanı-1	87
2.3.2.	Çalışma Alanı-2	88
2.3.3.	Çalışma Alanı-3	90
3.	BULGULAR VE TARTIŞMA.....	92
3.1.	Laboratuvar Çalışmaları.....	92
3.1.1	Laboratuvar Model-1.....	94
3.1.2	Laboratuvar Model-2.....	97
3.1.3	Laboratuvar Model-3.....	100
3.1.4	Laboratuvar Model-4.....	103
3.1.5	Laboratuvar Model-5.....	106
3.1.6	Laboratuvar Model-6.....	109
3.1.7	Laboratuvar Model-7.....	111
3.1.8	Laboratuvar Model-8.....	114
3.1.9	Laboratuvar Model-9.....	116
3.2.	Arazi Çalışmaları.....	118

3.2.1.	Çalışma Alanı-1	118
3.2.2.	Çalışma Alanı-2	124
3.2.3.	Çalışma Alanı-3	127
4.	SONUÇ VE ÖNERİLER.....	138
5.	KAYNAKLAR.....	143

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1. Yer radarı yönteminin basit gösterimi.....	5
Şekil 1.2. Yer radarı yönteminin çalışma prensibi.....	6
Şekil 1.3. Elektrik alan (E) ve manyetik alanın (B) gösterimi.....	15
Şekil 1.4. Elektromanyetik dalga yayılımının gösterimi (Annan, 2001).....	18
Şekil 1.5. Elektrik, manyetik ve elektromanyetik alan gösterimi (URL-5).....	19
Şekil 1.6. Kaynaktan çıkan ışınlar dalga cephelerine diktir ve yörüngeden dışı doğrudur. Dalga cepheleri bir kaynaktan dışı doğru seyahat eden dalgalar için eş seyahat süreli ya da fazlı yüzeylerdir. (Annan, 2001).....	20
Şekil 1.7. Elektrik alan uygulandığında serbest elektrik yüklerinin hareketi (Annan, 2001).....	24
Şekil 1.8. Uygulanan elektrik alan doğrultusunda bağlı elektrik yüklerinin yer değiştirme hareketi (Annan, 2001).....	25
Şekil 1.9. Uygulanan elektrik alan sonucu oluşan elektrik dipol dağılımı (Annan, 2001).....	26
Şekil 1.10. Bir manyetik alanın bir elektrik alan meydana getirmesi (Annan, 1992).....	31
Şekil 1.11. Bir elektrik akımının bir manyetik alan meydana getirmesi (Annan, 1992).....	32
Şekil 1.12. Kapalı bir yüzeydeki elektrik alan akışının, bu yüzey etrafından çevrelenmiş olan hacimde bulunan net yük ile orantılıdır (Annan,1992).....	33
Şekil 1.13. Kapalı bir yüzeydeki manyetik alan akışının sıfır olduğu ve dolayısıyla manyetik yüklerin var olmadığını belirtir (Annan, 1992)...	33
Şekil 1.14. a) TM modu ve b) TE modu için EM alan bileşenleri.....	37
Şekil 1.15. Derinlikle bağlı dielektrik geçirgenlik katsayıları (a) artan ve (b) azalan yeraltı modeli için dalga kırılma etkileri (Conyers ve Goodman, 1997).....	40
Şekil 1.16. Ara yüzeye gelen dalganın sınıra çarptıktan sonra enerjinin yansıyan ve iletilen dalgalara aktarılması (Annan, 2005).....	41

Şekil 1.17.	TE ve TM modlarında anten durumları. Tx: Verici anten, Rx: Alıcı anten, E: Elektrik alan, H: Manyetik alan (Liu, Arcone 2003'ten düzenlenmiştir).....	43
Şekil 1.18.	Sinyalin sönümlenmesi (Reynolds, 1997).....	47
Şekil 1.19.	Elektromanyetik enerjinin yayıldığı ortamın elektrik iletkenliği ile enerjinin nüfuz derinliği ilişkisi (Moorman, 2001).....	50
Şekil 1.20.	Yansıma profili (ortak ofset) yönteminin şematik gösterimi.....	58
Şekil 1.21.	Geniş Açılı Yansıma ve Kırılma Ölçümleri (GAYK) yönteminin şematik gösterimi.....	59
Şekil 1.22.	Ortak Derinlik Noktası (ODN) yönteminin şematik gösterimi.....	60
Şekil 1.23.	Elektrik ve manyetik alan vektör bileşenlerinin Yee'nin hesaplama ağı üzerindeki konumları (Giannopoulos, 2005).....	64
Şekil 1.24.	TM modunda elektrik ve manyetik alanların i, j koordinatlarında gösterimi (Lee ve Teixeira, 2006).....	68
Şekil 1.25.	TE modunda elektrik ve manyetik alanların i, j koordinatlarında gösterimi (Lee ve Teixeira, 2006).....	69
Şekil 1.26.	Ham yer radarı verisi.....	71
Şekil 1.27.	Şekil 1.26'daki ham yer radarı verisine Dewow işlemi uygulanmış yer radarı kesiti.....	72
Şekil 1.28.	Dewow yapılmış şekil 1.27'deki yer radarı kesitine kazanç fonksiyonlarından energy decay uygulandıktan sonra elde edilen radargram.....	73
Şekil 1.29.	Genlik kazancı (energy decay) uygulanmış şekil 1.28'deki kesite background removal uygulandıktan sonra elde edilen radargram.....	75
Şekil 2.1.	a) "Model 1" in yeraltı geometrisi, b) "Model 1" nin 500 MHz anten kullanılarak elde edilen yapay radargramı, c) b' deki radargramın f-k migrasyonu uygulanması sonucu elde edilen radargram.....	80
Şekil 2.2.	a) "Model 1" in yeraltı geometrisi b) 800 MHz anten kullanılarak elde edilen yapay radargramı, c) b' deki radargramın f-k migrasyonu uygulanması sonucu elde edilen radargram.....	82
Şekil 2.3.	"Model 1" için 500 MHz (a) ve 800 MHz (b) anten frekansları kullanılarak elde edilen radargramlar.....	83

Şekil 2.4.	Model 3'e ait yeraltı geometrisi ve edilen yapay radargram.....	84
Şekil 2.5.	GPR verilerinin toplanmasında kullanılan antenler ve sistemleri.....	85
Şekil 2.6.	a) Laboratuvar çalışmalarının yapıldığı metal deney sandığının ölçüleri ve b) 500 MHz ve 800 MHz antenler ile GPR ölçümlerinin alındığı profiller.....	86
Şekil 2.7.	Laboratuvar çalışmalarının yapıldığı plastik deney sandığının ölçüleri (a) ve 800 MHz anten ile GPR ölçümlerinin alındığı profiller (b).....	87
Şekil 2.8.	Gümüşhane Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi'nde bulunan kantindeki çalışma alanı (a) ve alınan ölçüm hatlarının krokisi (b).....	88
Şekil 2.9.	Araştırma yapılan çalışma alanı-2'den görünüm.....	89
Şekil 2.10.	Ölçüler alındıktan sonra kazılan alanın görüntüsü.....	90
Şekil 2.11.	Çalışma alanı-1'in yer bulduru haritası.....	91
Şekil 3.1.	Laboratuvar çalışmalarının yapıldığı metal deney sandığında, 500 MHz ile 800 MHz antenler ile GPR ölçümlerinin alındığı profiller.....	92
Şekil 3.2.	Laboratuvar çalışmalarının yapıldığı plastik deney sandığında, 800 MHz anten ile GPR ölçümlerinin alındığı profiller.....	93
Şekil 3.3.	Oluşturulan laboratuvar model-1'e ait parametreler.....	94
Şekil 3.4.	Soldan sağa sırasıyla 150'lik, 300'lük ve 200'lük koruge borularla oluşturulan laboratuvar model-1.....	95
Şekil 3.5.	Model-1'de 500 MHz antenle elde edilen radargramlar.....	95
Şekil 3.6.	Model-1'de 800 MHz antenle elde edilen radargramlar.....	96
Şekil 3.7.	Oluşturulan laboratuvar model-2'ye ait parametreler.....	97
Şekil 3.8.	Soldan sağa sırasıyla 150'lik, 300'lük ve 200'lük koruge borularla oluşturulan fayans kaplı laboratuvar model-2.....	98
Şekil 3.9.	Model-2'de 500 MHz antenle elde edilen radargramlar.....	98
Şekil 3.10.	Model-2'de 800 MHz antenle elde edilen radargramlar.....	99
Şekil 3.11.	Oluşturulan laboratuvar model-3'e ait parametreler.....	100
Şekil 3.12.	Soldan sağa sırasıyla 50'lik, 100'lük ve 150'lik PVC borularla oluşturulan laboratuvar model-3.....	101

Şekil 3.13.	Model-3'te 500 MHz antenle elde edilen radargramlar.....	101
Şekil 3.14.	Model-3'te 800 MHz antenle elde edilen radargramlar.....	102
Şekil 3.15.	Oluşturulan laboratuvar model-4'e ait parametreler.....	103
Şekil 3.16.	Soldan sağa sırasıyla 150'lik, 100'lük ve 80'lik sert PVC borularla oluşturulan laboratuvar model-4.....	104
Şekil 3.17.	Model-4'te 500 MHz antenle elde edilen radargramlar.....	104
Şekil 3.18.	Model-4'te 800 MHz antenle elde edilen radargramlar.....	105
Şekil 3.19.	Oluşturulan laboratuvar model-5'e ait parametreler.....	106
Şekil 3.20.	Soldan sağa sırasıyla 100'lük PVC boru, 20'lik, 40'lık ve 63'lük kangal borularla oluşturulan laboratuvar model-5.....	107
Şekil 3.21.	Model-5'te 500 MHz antenle elde edilen radargramlar.....	107
Şekil 3.22.	Model-5'te 800 MHz antenle elde edilen radargramlar.....	108
Şekil 3.23.	Oluşturulan laboratuvar model-6'ya ait parametreler.....	109
Şekil 3.24.	Soldan sağa sırasıyla 100'lük PVC, 120'lik çelik ve 63'lük kangal borularla oluşturulan laboratuvar model-6.....	110
Şekil 3.25.	Model-6'da 800 MHz antenle elde edilen radargramlar.....	110
Şekil 3.26.	Oluşturulan laboratuvar model-7'ye ait parametreler.....	111
Şekil 3.27.	İçi boş 125'lik PVC boru ile oluşturulan laboratuvar model-7.....	112
Şekil 3.28.	Model-7'de 800 MHz antenle elde edilen radargramlar.....	113
Şekil 3.29.	Oluşturulan laboratuvar model-8'e ait parametreler.....	114
Şekil 3.30.	İçi boş 125'lik PVC boru ile oluşturulan parke taşı kaplı laboratuvar model-8.....	115
Şekil 3.31.	Model-8'de 800 MHz antenle elde edilen radargramlar.....	115
Şekil 3.32.	Oluşturulan laboratuvar model-9'a ait parametreler.....	116
Şekil 3.33.	Tıklı ve delik 125'lik PVC boru ile oluşturulan laboratuvar model-9.....	117
Şekil 3.34.	Model-9'da 800 MHz antenle elde edilen radargramlar.....	117

Şekil 3.35.	(a) Gümüşhane Üniversitesi'ndeki çalışma alanı ve (b) GPR ölçüm hatları.....	119
Şekil 3.36.	1. 4. ve 14. hatlardan elde edilen radargramlar.....	121
Şekil 3.37.	22. 23. ve 29. hat radargram kesitleri.....	122
Şekil 3.38.	Akar borusu eğim krokisi.....	122
Şekil 3.39.	GPR derinlik-düzlem haritası.....	123
Şekil 3.40.	GPR derinlik-düzlem haritası ve X yönündeki yer radarı kesiti.....	124
Şekil 3.41.	Araştırma yapılan çalışma alanı-2'den görünüm ve GPR profil yönü.....	125
Şekil 3.42.	Çalışma alanında 500 MHz antenle yaklaşık doğu-batı (D-B) yönünde alınan ölçümlerden elde edilen radargramlar.....	126
Şekil 3.43.	Çalışma alanı-2'de yaklaşık D-B yönlü, 500 MHz antenle toplanan yer radarı verilerinden tüm hatlar için elde edilen zaman-düzlem-genlik haritalarından 1.2 m derinlik seviyesindeki kat haritası. Kesikli çizgi ile belirtilen boru hattını göstermektedir.....	127
Şekil 3.44.	Çalışma alanı-1'de bulunan, ölçülerin alındığı 100'lük PVC akar borusu.....	128
Şekil 3.45.	Akar borusu boş iken 500 MHz antenle elde edilen radargramlar.....	128
Şekil 3.46.	Akar borusu boş iken 500 MHz antenle elde edilen radargramların alt alta gösterimi.....	130
Şekil 3.47.	Akar borusu boş iken 800 MHz antenle elde edilen radargramlar.....	131
Şekil 3.48.	Akar borusu tıkalı olduğu durumda 500 MHz (a) ve 800 MHz (b) antenlerle elde edilen radargramlar.....	132
Şekil 3.49.	Akar borusu boş (a) ve tıkalı (b) olduğu durumlarda 500 MHz antenle elde edilen radargramların karşılaştırılması.....	132
Şekil 3.50.	Akar borusu tıkalı ve tamamen su dolu iken 500 MHz antenle elde edilen radargram.....	133
Şekil 3.51.	Akar borusu tıkalı ve tamamen su dolu iken 800 MHz antenle elde edilen radargram.....	134
Şekil 3.52.	500 MHz ve 800 MHz antenlerle ölçü alınan, çeşmenin yakınında bulunan betondan yapılmış merdivenlerden ve meydana gelen su sızıntısından görünüm.....	135

Şekil 3.53.	500 MHz antenle merdivenlerde yapılan ölçülerde elde edilen radargramlar.....	136
Şekil 3.54.	800 MHz antenle merdivenlerde yapılan ölçülerde elde edilen radargramlar.....	137

TABLULAR DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1.1. Kullanılan anten frekansına göre nüfuz derinliği (URL-4).....	7
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).....	9
Tablo 1.3. Anakaya ($v = 0.11$ m/ns) ve toprak ($v = 0,075$ m/ns) için üç farklı frekans değerinde hesaplanan düşey ayrımlılık değerleri (Reynolds, 1997).....	52
Tablo 1.4. Farklı bağıl dielektrik geçirgenlik değerlerine sahip ortamlarda seçilen anten frekanslarına göre radar dalga boylarının değişimi (Conyers ve Goodman, 1997).....	53
Tablo 2.1. Modelleme çalışmalarında borular tanımlanırken uygulanan yöntem.....	77
Tablo 2.2. Modelleme çalışmalarında oluşturulan modellerin parametreleri.....	78

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	Bağlı manyetik geçirgenlik
k	Manyetik duyarlılık
K'	Ortalama bağlı 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
ϕ_a	Faz açısı
ϕ_b	Faz açısı
ϵ_0	Boşluğun dielektrik sabiti
α	Sönümlenme
λ	Dalga boyu
ϵ_{r1}	Birinci tabakadaki dielektrik permitivite
ϵ_{r2}	İkinci tabakadaki dielektrik permitivite

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Ülkemizin bütün şehirlerinde özellikle büyükşehirlerdeki nüfusun hızla artışı, yoğun ve düzensiz yapılaşma, altyapı hizmetlerine ve sistemlerine talebi artırmış; dolayısıyla, altyapı sistemlerinin kurulması, bakım ve problemlerin onarımı için harcanan zamanda ve kullanılan mali kaynaklarda sürekli artışa yol açmıştır. Bunun yanı sıra, özellikle nüfus yoğunluğu fazla olan şehirlerde, altyapı sistemlerinin kurulması, bakım ve problemlerin onarımı sırasında yol ve kaldırımlarda oluşan tahribat; günlük yaşamda sorunlar yaratmakta, mali yük oluşturmakta ve etkin çözümler üretilmesini gerektirmektedir. Vatandaşın günlük yaşamını aksatmayacak şekilde, kaynakları verimli ve ekonomik kullanarak, altyapı hizmetlerinin gerçekleştirilmesi, etkin bir planlama ve koordinasyon gerektirmektedir. Şehirlerdeki altyapı sistemlerinin (su, kanalizasyon, gaz, elektrik, telefon, internet vb.) yapım, onarım ve yenileme çalışmalarının koordineli bir şekilde planlanması ve gerçekleştirilmesi; iş tekrarlarının, zaman ve kaynak israfının, araç ve yaya trafiğinde aksamaların önlenmesi ve altyapı çalışmaları sırasında günlük yaşamın rahat bir şekilde sürdürülmesi açısından büyük önem taşımaktadır (URL-1).

Büyükşehir belediyelerinin olduğu illerde yaşayan vatandaşların, en büyük beklentilerinin başında teknik altyapı hizmetleri gelmektedir. Ancak teknik altyapı hizmetlerin yapımında; sık sık farklı kurum ve kuruluşlar tarafından bazen de aynı cadde ve sokakların belirli aralıklarla kazıldığını görmekteyiz. Bu temel sorun; teknik altyapı kurum ve kuruluşları arasında koordinasyonun yeterince sağlanamamasından kaynaklanmaktadır. Koordinasyonun sağlanamamasının en önemli nedenlerinden bir tanesi de; teknik altyapı kurum ve kuruluşlarının, sahip olduğu tesislerinin konum bilgilerinin yeterince sağlıklı ve güncel olmamasıdır (Karataş, vd. 2014).

Artan nüfusla birlikte su kullanımının sürekli arttığı günümüzde su kaçaklarının en kısa sürede önüne geçmek çok önemlidir. Türkiye'de yılda 5 milyar metreküp su şebekeye veriliyor. Bunun 2 milyar metreküpü daha kullanılmadan toprağa karışıyor. Sebebi; tahrip olan tesisatlar. Bu kayıp kaçak sular, ülkemizde yılda 6 milyar TL zarara neden oluyor (URL-2).

Karadeniz Teknik Üniversitesi Jeofizik Mühendisliği Bölümü olarak altyapı sistemlerinde meydana gelen problemleri; vatandaşın günlük yaşamını aksatmadan beklentilerini yerine getirmek, araç ve yaya trafiğinde meydana gelecek aksamaları önlemek, ülkemiz kaynaklarını verimli ve ekonomik kullanmak, maliyetleri en aza indirmek amacıyla ifade edilen etkin bir

planlama ve koordinasyonun ve büyükşehir belediyelerin bünyelerinde kurulması yasal olarak zorunlu olan “AYKOME’nin (Altyapı Koordinasyon Merkezi)” içerisinde Jeofizik Mühendisliği yöntemlerinden olan Yer Radarı (GPR) yönteminin de kullanılması alt yapı sistemlerinin belirlenmesinde yararlı bilgiler sağlaması için araştırmalar yapılmıştır.

Yerleşim alanlarındaki altyapı elemanlarından temiz ve kirli su iletimi için kullanılan farklı tür ve çaptaki borularda yaşanan problemlerden; çürümeler, paslanmalar, su sızdırmaları, tıkanmalar gibi konularda literatürde yapılmış çalışmalar bulunmaktadır.

Demirci, vd. 2011 yılında yaptıkları çalışmada gömülü borudaki su sızıntısını Yer radarı yöntemiyle laboratuvar ortamında ve açık hava arazi deney ortamında oluşturulan alanda tespit etmeye çalışmışlardır. Uyguladıkları dalga tabanlı analiz tekniğiyle yüzeyde ve homojen ortamlarda bu tespitin kolay olduğu ancak boruların derinlerde olduğu ve ortamın homojen olmadığı durumlarda bunun tespitinin diğerine nazaran daha karmaşık hale geldiği, daha çok analiz ve veri işleme aşamalarının gerekli olduğunu ortaya çıkarmışlardır.

Hong Kong’da Wallace, vd. 2014 yılında laboratuvar şartlarında beton altına gömülmüş bir borudaki su sızıntısını yüksek frekanslı GPR yöntemiyle tespit etmek için çalışmalar yapmışlardır. Farklı zaman evrelerindeki su sızıntıları GPR yöntemiyle başarılı bir şekilde belirlenmiştir. Boruların beton tabakasının altında olması ve çevresinde başka yapıların, nesnelere olmasın çalışmanın sonucu ve yorumlanması aşınsından biraz karmaşık hale geldiğini ifade etmişlerdir.

Eyuboğlu, vd. 2003 yılında hazırladıkları deney tankı sandığı sayesinde iki farklı boru tipi olan PVC ve metal borulardaki su sızıntılarını ve konumlarını tespit etmişlerdir. Bu PVC ve metal boruların radargramlarda nasıl farklılıklar meydana getirdiklerini de belirlemeye çalışmışlardır. Ayrıca araştırma ile birlikte yer radarında kullanılan antenlerin yöneliminin etkisini de araştırmışlardır. Elde ettikleri ham verilerin genelde sorunu anlamak için yeterli olduğunu ancak verileri işlemenin yorumlamayı daha etkin hale getirdiğini belirlemişlerdir. Bu çalışmayı gerçeğe daha çok yaklaştırmak için Central Arkansas Su ile birlikte yeni bir deney yeri inşa etmektedirler ve bu deney yerinde kullanılacak toprak malzeme türü de yaygın olarak bölgede var olan toprak türü olacağını belirtmişlerdir.

USA’dan Allred, vd. 2010 yılında yaptıkları araştırmada, 250 MHz anten kullanarak yaptıkları çalışmada tarımsal drenaj borularının yerlerinin tespit edilmesi ve farklı oranlarda yapay bir şekilde değişik malzemeler (hava, toprak, su) ile dolmuş tarımsal drenaj borularının durumlarını ve düzgün çalışıp çalışmadıklarını belirlemek için çalışmalar yapmışlardır. Çalışmanın

sonuçlarının yorumlanmasına yardımcı olması için bilgisayar ortamında modelleme çalışmaları da yapmışlardır. Modelleme çalışmalarında farklı oranlarda ve farklı malzemelerle doldurulmuş borular kullanılmış ve bunlardan elde edilen radargramların da birbirinden farklı genlikte ve yansımalarda hiperboller ortaya çıkardığını gözlemlenmiştir. Bununla birlikte drenaj boşaltma hattından su akışını tamamen engellemeyen izole edilmiş kısmi bir tıkanıklığın GPR ile bulunmasının zor olacağı kanısına varmışlardır. Kısmen toprak ile tıkalı bir borunun verdiği yansıma ile tıkalı olmayan bir borunun verdiği yansımanın birbirine benzer olduğu ve bunu birbirinden ayırt etmenin zor olduğunu söylemişlerdir. Netice olarak GPR'ın sadece tarımsal drenaj borularının yerlerinin bulunması için değil bunların çalışabilirliğini belirlemek içinde iyi sonuçlar vereceğini belirtmişlerdir. Gelecekte yapılacak araştırmalar sayesinde, yer altı drenaj borusu sisteminin düzgün çalışmadığı bir tarım alanının bölümlerini belirlemek için potansiyel bir yöntem olan GPR'e odaklanacağını ifade etmişlerdir.

Birmingham Üniversitesinden Wahab 2013 yılında laboratuvar ortamında, tek bir ünitenin içerisinde yer alan çift frekanslı (250 MHz ve 700 MHz) antenleri kullanarak; sağlam borular ile çatlamış, çökme meydana gelmiş, delinmiş, kırılmış ve korozyona uğramış borular üzerine çalışmalar yapmıştır. Bu farklı borulardan elde ettiği verileri radargramlarda karşılaştırmış ve sağlam olmayan borunun radargramlarda farklı hiperboller ortaya çıkardığını tespit etmiştir. Farklı anten sinyallerinin farklı çözünürlükte veriler ürettiğini ve problemli yerlerin tespitinde farklı sonuçlar gösterdiklerini ortaya koymuştur. Borulardaki hasar gören bölgenin boyutu, hasar türü ve borunun bulunduğu toprak ortamı problemin tespit edilmesinde farklı sonuçlar ortaya çıkardığını tespit etmiştir.

1.2. Amaç ve Kapsam

Ülkemizde altyapı sistemleri genellikle belirli bir plan, harita ve güzergâh dikkate alınmadan döşenmektedir. Döşenen bu altyapı sistemlerinde herhangi bir problem, deformasyon söz konusu olduğunda rastgele kazılar yapılmaktadır. Bu kazılar neticesinde tahribat ve konum tespiti maliyet artışlarını ortaya çıkarmaktadır. Bu maliyetlerin yanı sıra; içme suyu kesintileri, telekomünikasyon hizmetlerinde aksamalar, enerji hatlarında kesintiler, gaz borularında sızma/patlama vb. sorunlar meydana gelmektedir.

Bu çalışmanın amacı; şehir veya çeşitli yerleşim alanlarındaki altyapı elemanlarından temiz ve kirli su iletimi için kullanılan farklı tür ve çaptaki

borularda yaşanan problemlerin (çürümeler, paslanmalar, su sızdırmaları, tıkanma vb.) çalışma alanına herhangi bir hasar vermeyen (kazma, delme vb.) ve bu hasar vermeme özelliğiyle günlük yaşamı da aksatmayan bir yöntem olan yer radarı yöntemiyle incelenmesi ve tespit edilmesidir.

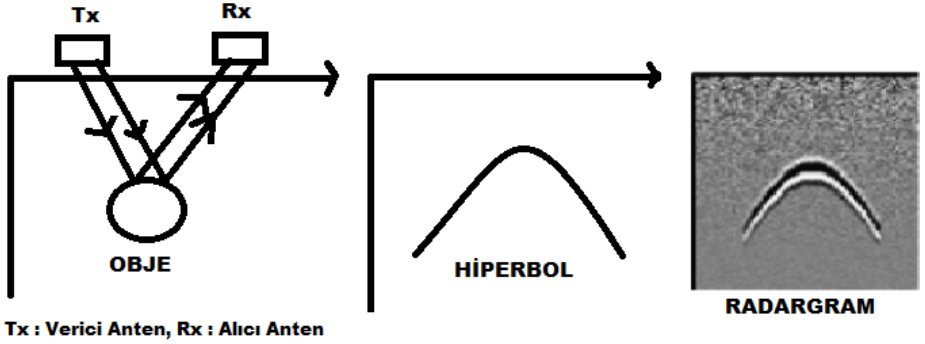
Bu problemleri; maliyetleri en aza indirmek amacıyla Jeofizik Mühendisliği yöntemlerinden olan Yer Radarı (GPR) yöntemini kullanarak incelemeler yapılması hedeflenmektedir.

Bu amaç ve hedeflere yönelik; ilk olarak Reflex-Win (URL-3) programı kullanılarak boş ve su dolu boru modelleri ile PVC, çelik ve koruge boru modeli oluşturularak modelleme yapılmıştır. İkinci olarak laboratuvarındaki metal ve plastik deney sandıklarında çeşitli çap ve türdeki borularla model geometrileri oluşturulmuş (dokuz adet model) ve ölçüler alınmıştır. Son olarak üç ayrı çalışma alanında (Gümüşhane Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Kantini, Karşıyaka Mah. Ortahisar/Trabzon ve 100. Yıl Parkı Ortahisar/Trabzon) arazi şartlarındaki yeraltı sistemleri incelenmiştir ve çalışmalar yapılmıştır. Tüm çalışmalarda 500 ve 800 MHz merkez frekanslı antenler kullanılmıştır.

1.3. Yer Radarı Yöntemi

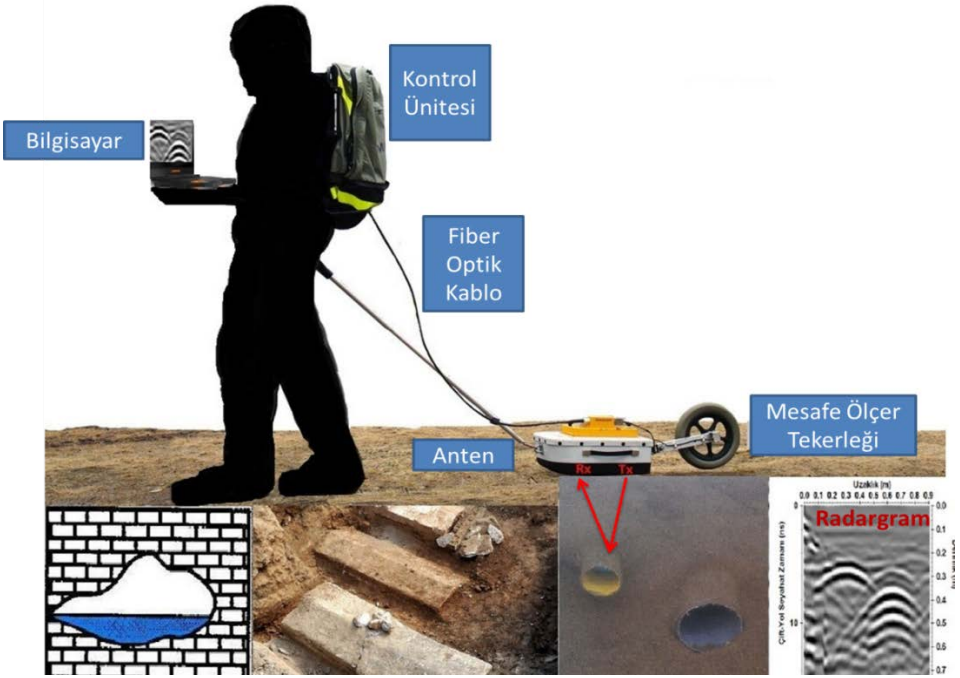
Yer radarı yöntemi; yeraltı radarı ya da genel adıyla GPR (Ground Penetrating Radar, Ground Probing Radar, Georadar, Subsurface Radar) olarak isimlendirilmektedir. Yer Radarı; yer altının toprak, kaya ve oluşturulmuş diğer yapay koşullarının yüksek çözünürlükte tespit edilmesi, görüntülenmesi ve haritalanması için kullanılan elektromanyetik bir jeofiziksel yöntemdir (Moorman, 2001). Çalışma yapılan yüzeyin sığ derinliklerini yer altına gönderilen elektromanyetik dalgalar yardımıyla yüksek çözünürlükte görüntülenmesini sağlayan hızlı ve tahribatsız bir muayene yöntemidir. Bir yer radarı düzeneği; verici anten, alıcı anten, kontrol ünitesi (birimi) ve kayıtçıdan oluşmaktadır. Verici anten aracılığıyla 10 MHz ile birkaç GHz frekansları aralığında değişen bir frekanstaki elektromanyetik dalga (radyo dalgaları) yer içerisine gönderilir. Yerin değişkenlik, farklılık gösteren dielektrik özellikteki (ϵ ; dielektrik permitivite, σ ; elektriksel iletkenlik, μ ; manyetik geçirgenlik) sınırlarından yansıma ve kırılmaya (ilettime) uğrar. Kırılan dalga yer içerisine doğru ilerlerken soğrulur. Başka bir dielektrik özellikteki sınırla karşılaştığında kırılma ve yansıma durumları tekrarlanır. Bu durum dalga enerjisi bitene kadar devam eder. Yansıyan dalga yeryüzüne doğru ilerler ve alıcı antene ulaşır. Alıcı anten ise yansıyan sinyalleri almaktadır. Alınan sinyaller kontrol biriminde

biriktirilmekte ve çift yol seyahat zamanı nano saniye cinsinden kaydedilmektedir (Davis ve Annan, 1989). Bu durumlar bir profil boyunca sürekli tekrarlanarak dalganın gecikme zamanı kaydedilerek belirlenir (Şekil 1.1).



Şekil 1.1. Yer radarı yönteminin basit gösterimi

Yapılan araştırmalar için genellikle tek bir profil üzerinden ölçü almak yetmemektedir. Daha detaylı araştırmalar için ızgara şeklinde (birbirine paralel ve dik) profiller belirlenerek ölçüler alınmaktadır. Bu yöntemlerle toplanan verilere gerekli veri işlem adımları uygulandıktan sonra incelenen ortam, 2 ve 3 boyutlu olarak görüntülenebilmektedir (Annan, 2001).



Şekil 1.2. Yer radarı yönteminin çalışma prensibi

Çalışma prensibi şekil 1.2’de verilen yer radarı yöntemi; araştırılan yüzeyin sığ derinliklerini yüksek çözünürlükte görüntüleyebilme özelliğiyle çok çeşitli problemlerin çözümünde kullanılmaktadır (Davis ve Annan, 1989; Harrari, 1996; Powers ve Olhoeft, 1996; Zeng ve McMechan, 1997; Dannowski ve Yaramancı, 1999; Aspiro 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; Şeren vd. 2008; Kadioğlu, 2008; Öğretmen ve Şeren, 2014).

Genel olarak;

- Görmediğimiz yüzeylerin ve yerin altında nelerin olduğunu görmek,
- Nereyi kazacağımızı veya nereyi kazmayacağımızı bilmek,
- Kayıp olan alanların, yapıların ve nesnelerin yerlerini belirlemek,
- Köprülerdeki, tünellerdeki, yapılardaki bozulmaların nerede olduğunu bilmek,
- Günlük yaşantıda karşılaşılabileceğimiz tehlikeleri hafifletmek veya ortadan kaldırmak,

- Doğal afetlerde yaşayan veya hayatlarını kaybedenlerin yerlerini belirlemek,
için jeofiziksel bir yöntem olan yer radarı yöntemi kullanılmaktadır.

Tablo 1.1. Kullanılan anten frekansına göre nüfuz derinliği (URL-4).

Frekans (MHz)	Çözünürlük (m)	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

Kullanılan anten frekansına göre toprak ve kaya ortamlarında etkin olarak yaklaşık inilebilen derinlikler gösterilmiştir. Söz konusu anten frekanslarında belirtilen derinliklerin altına inilmesi mümkündür. Ancak inilen bu derinlikler; en yüksek çözünürlükte veri alınan derinliklerdir.

Malzeme	Bağlı dielektirik, Sabit, ϵ_r (ϵ/ϵ_0)	Yayılm hızı, V, (m/n sn)	İletkenlik, σ , (mS/m)	Soğrulma, Soğrulma sabiti, α	Malzeme	Bağlı dielektirik, Sabit, ϵ_r (ϵ/ϵ_0)	Yayılm hızı, V, (m/n sn)	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	$8 \cdot 10^{-6}$ - 0.025	$4 \cdot 10^{-6}$ - 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	$1 \cdot 10^{-5}$ - 0.7	$5 \cdot 10^{-8}$ - 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	$2 \cdot 10^{-5}$ - 50	$1 \cdot 10^{-2}$ - 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	$3 \cdot 10^{-4}$ - 0.6	Kuvars	4.2-5	0.13-0.15	$3 \cdot 10^{-4}$ - $5 \cdot 10^{-12}$	$2 \cdot 10^{-8}$ - $4 \cdot 10^{-12}$
Gnays	8.5	0.10	0.0003 - 0.02	n/a	Kuvarsit	n/a	n/a	$5 \cdot 10^{-6}$ - 100	n/a
Gölsel 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	0,03 3	0,5	0,1
Islak kil	27	n/a	n/a	n/a	Su (tuzlu)	80	0,01	3000	1000
Islak kireç taşı	8	n/a	n/a	n/a	Sualtında bul. kültürel tabaka	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	0,03 3	0,5	0,1
Islak toprak	6	n/a	n/a	n/a	Toprak (doğgun)	20-30	0,06	0,1-1,0	0,03-0,3
Kalsit	7,8-8,5	0,11	$5 \cdot 10^{-10}$	$3 \cdot 10^{-10}$	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	0,09 5	500	300	Tuzlu su	81-88	0,03 3	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					

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).

1.4. Yer Radarı Yönteminin Tarihçesi

II. Dünya Savaşı'yla birlikte askeri savunma amaçlı kullanılan radar sistemleri, daha sonra yeraltının fiziksel özelliklerini araştırmak amacıyla kullanılmaya başlanmıştır. Günümüzde sığ aramacılıkta son derece yaygın kullanım alanına sahip olmasına rağmen, yöntemin yaygınlaşması oldukça yenidir ve tarihsel gelişim süreci dört ana aşamada ele alınabilir (Moorman, 2001).

Birinci aşama ilk ekipmanların denenmesini içerir. Elektromanyetik enerjinin, metal nesnelere bulmak amacıyla, ilk kez uygulanması Hulsmeier tarafından 1904 yılında gerçekleştirilmiştir. Daha sonra 1911 yılında Lowy yeraltı ara yüzeylerinin derinliğini saptayan bir teknik geliştirmiştir. Yer radarı jeolojik ortamların haritalanmasında ilk kez Stern (1930) tarafından kullanılmıştır. Daha sonraki 20 yıllık süreçte, uygulama alanlarının net olarak tanımlanamamasından dolayı konu üzerinde çok fazla çalışılmamıştır (Moorman, 2001).

1950'li yıllarla başlayan ikinci aşamada, belirli amaçlar için yapılmış yer radarı sistemleri ortaya çıkmıştır (Moorman, 2001). Bu dönemin ilk sistemleri buz kalınlığının ölçülmesi ve buzul tabakaları içerisindeki buz ceplerinin belirlenmesi (Annan ve Davis, 1976; Bentley vd., 1979; Bryan, 1974; Evans, 1963; Steenson, 1951), yeraltı madenlerindeki ana kayanın haritalanması (Cook, 1973, 1975, 1977; Dellwig ve Bare, 1978), gömülü boruların ve kamusal amaçlı yapılmış telefon, elektrik vb. yapıların konumlarının bulunması (Caldecott vd., 1988; Morey, 1974, 1976; Osumi ve Ueno, 1988) amacıyla tasarlanmıştır. Ayrıca, sığ sulardaki derinlik ölçümleri (Austin ve Austin, 1974; Ulriksen, 1982) ile tuz, kömür ve kaya madenlerini belirlemeye yönelik ilk araştırmalar (Behrendt vd., 1979; Thierbach, 1973) da bu dönemde gerçekleştirilmiştir.

Gelişimin üçüncü ve önemli bir aşaması, ilk ticari analog yer radarı sisteminin gelişmesiyle başlar (Moorman, 2001). 1970'lerde söz konusu uygulama alanlarında araştırma etkinliği oldukça hızlı bir biçimde artmasına rağmen, ilk ticari sistemlerdeki performans düşüklüğü ve sayısal veri-işlemenin yetersizlikleri göz önüne alındığında, yöntemin uygulamada yeterince pratik olmadığı söylenebilir (Moorman, 2001). Ayrıca, bu dönemde sistemlerin büyük ve ağır olması da farklı araştırma alanlarında inceleme yapma olanaklarını kısıtlamıştır.

Gelişimin son ve dördüncü aşaması, 1980'lerin ortasında ilk sayısal yer radarı sistemlerinin ortaya çıkması ile başlar (Moorman, 2001). Bu sistemler ilk çıkanlara göre daha yüksek bir sistem verimine ve daha derine nüfuz etme olanaklarına sahiptir. Ayrıca veriler sayısal formatta elde edilebildiğinden,

verilerin değerlendirilmesi ve yorumlanması aşamasındaki önemli gelişim, bu dönem içinde ortaya çıkmıştır. Kısaca, yöntem bu dönem içinde ticari bir nitelik kazanmış ve yaygın uygulama koşullarının temeli atılmıştır (Moorman, 2001). 1990'lardan itibaren yer radarı sığ jeofizik araştırmalarda yaygın uygulanmaya ve kullanılmaya başlamıştır. Bu dönemde yöntem arkeoloji (Conyers ve Goodman, 1997; Goodman vd., 1993; Neubauer vd., 2002; Kayen vd., 2002), jeoloji (Conyers vd., 1997; Davis ve Annan, 1989; Hamonn vd., 2000; Cai vd., 1994), jeoteknik ile mühendislik jeofiziği (Cheng vd., 2013; Daniels, 1989; Green vd., 2003) ve çevresel amaçlı çalışmalarda (Annan, 2004; Bristow vd., 2003; Huisman vd., 2003) etkin bir biçimde uygulanmıştır. Günümüzde sistemler oldukça gelişmiş bir durumdadır ve yapılan uygun tasarım koşullarında (bot, kızak, tekerlekli araçlar gibi) birçok alanda hızlı ve büyük boyutlu taramaları başarabilecek özelliğe sahip durumdadır. Ayrıca tomografik ölçümlere olanak sağlayacak anten düzenlemeleri de ortaya çıkmıştır (Cardelli vd., 2003; Cai ve McMechan, 1994; Hamonn vd., 2000; Vafidis vd., 2005). Bu nedenle yer radarı yöntemi, sığ aramacılığın önemli ve etkili arama yöntemlerinden biri durumuna gelmiştir (Kurtulmuş, 2007). Özellikle tahribatsız bir yöntem olması kent merkezlerindeki altyapı aramalarında ve arkeolojik alanlarda kullanımı ve popülerliği giderek artmaktadır.

1.5. Yer radarı Yönteminin Üstünlükleri ve Zayıflıkları

Yer radarı yöntemi son zamanlarda birçok alanda, problemin belirlenmesinde ve çözüme kavuşturulmasında sıklıkla kullanılmaktadır. Bu yöntemin kullanım alanlarını gittikçe artıran önemli üstünlükleri söz konusudur. Ancak her yöntemde olduğu gibi bu yöntemde zayıf yönleri bulunmaktadır.

Yer radarı (GPR) yönteminin üstünlükleri;

- Hemen hemen her türlü arazi şartlarında hareket kabiliyeti sayesinde kullanım kolaylığı sunmaktadır.
- Yer altının araştırılmasından, yerüstündeki yapıların araştırılmasına kadar birçok alanda güvenli bir şekilde kullanılabilir. 50-60 m'ye kadar penetrasyon derinliğine ulaşılabilir.
- Yüksek frekanslı elektromanyetik dalga kullanılması ve yığma yapmaya olanak vermesi ile elde edilen çözünürlük yüksektir.

- Yöntemde 10 MHz ile birkaç GHz aralığında frekans kullanılabilmesi ve farklı anten tipleriyle aynı profilde çalışma imkânı verdiği için daha sağlıklı yorum yapılabilir.
- Verilerde çevresel faktörlerden kaynaklanan veya insan kaynaklı gürültüler genelde veri işleme yöntemleri ile veriden atılabilir.
- Araştırma alanına herhangi bir zarar ve hasar vermeden uygulanabilmektedir. Bu özelliği ile hassas olan arkeolojik çalışmalarında özellikle tercih edilen bir yöntem olmuştur.
- Araştırılan hedef yapısı veya objenin yeri ve derinliği hassas bir şekilde belirlenebilmektedir.
- Diğer elektromanyetik yöntemlerden farklı olarak araştırılan alanın tek bir fiziksel özelliğine bağlı olmayıp, araştırılan alanın (ϵ ; dielektrik permitivite, σ ; elektriksel iletkenlik, μ ; manyetik geçirgenlik) fiziksel özelliklerindeki değişime duyarlıdır.

Yer radarı (GPR) yönteminin zayıflıkları;

- Yeraltı yapısının jeolojik durumu yer radarı dalgalarının derinlere nüfus etmesinde olumsuz bir şekilde etki edebilmektedir.
- Yöntemde, verici anten aracılığıyla üretilen elektromanyetik radyo dalgaları kullanıldığı için, çevredeki diğer radyo vericileri, önemli bir gürültü kaynağı olabilmektedir. Bu durumda ölçülen sinyaller kayıt aygıtının dışına taşabilmektedir.
- Alıcı anten aracılığıyla kaydedilen verilere çevredeki yapılardan (duvar vb.) gelen yansımalar karışabilir. Bu durum radargramlardaki hiperbollerin yansımaları kenarlarda ve keskin olarak görünebilir.
- Araştırılan alandaki yerin iletkenliği çok yüksek ise yer-hava ara yüzeylerinde enerji yayılımında keskin yansıma sinyali oluşturabilir. Bu durum iletken birimler üzerinde bilgi alınmasını zorlaştırmaktadır.
- Daha derinlerden bilgi alınmak için kullanılan frekansın düşüklüğü radargramların düşük çözünürlükte olmasına sebep olmaktadır. Bu da yorumlamayı güçleştirmektedir.
- Çok iletken ortamlarda yapılan araştırmalarda istenilen verim ve bilgi alınmayabilir.

1.6. Yer Radarı Yönteminin Kullanım Alanları

Gelişen teknolojiyle birlikte yer radarı yönteminin ekipmanları da güncellenmektedir. Yapılan çalışmalardan elde edilen başarılı sonuçlar yer radarının başka alanlarda da kullanılmasının önünü açmaktadır. Bu bağlamda yer radarı;

- Yeraltının Haritalanmasında
 - Metalik ya da metalik olmayan (temiz su boruları, atık boruları, gaz boruları, telefon kabloları gibi.) yapıların problemlili olan kısımlarının tespit edilmesinde, güzergâh ve yerlerinin bulunması
 - Yeraltındaki anomali kütlelerinin bulunması
 - Tarımsal araştırmalar
- Hasar Vermeme Özelliğiyle Köprü ve Tünel Araştırmalarında
 - Yeni yapıların inşa edileceği yerlerin uygun olup olmadığına karar verilmesi
 - Yeni yapıların iç kısımlarının araştırılması
 - Restorasyon amaçlı çalışmalarda yapının son durumunun ortaya konulması
 - Duvar, zemin araştırmaları
 - Kolonların ve bağlantı yerlerinin araştırılması
 - Köprü ve tünellerin deformasyon durumlarının belirlenmesi
 - Beton ya da duvar arkalarındaki boşlukların yerlerinin belirlenmesi
 - Beton kalınlıklarının belirlenmesi, ölçülmesi
- Yol Araştırmalarında
 - Asfalt ve beton kaldırımların kalınlıklarının, durumlarının haritalanması
 - Demiryolu, asfalt yol vb. yapıların güzergâhların altındaki boşluk yerlerinin belirlenmesi
- Kuyu Uygulamalarında
 - Kırıkların tanımlanması
 - Karstik arazilerin görüntülenmesi
 - Kirlilik çalışmaları
 - Kuyu tomografisinin çıkarılması
- Yer ile İlgili Uygulamalar
 - a) Jeolojik ve Madencilik Uygulamalarında
 - Zemin etütlerinde ana kayanın haritalanması

- Kırıkların tanımlanması
 - Irmak ve göl tabanlarının haritalanması
 - Kutup alanları
 - Yeraltı suyu kaynaklarının bulunması
 - Yeraltında maden alanlarının haritalanması
 - Mermer ocaklarındaki kırık çatlak sistemlerinin araştırılması
 - Fay/kırık ve çatlaklarının haritalanması
 - Heyelan araştırmaları
- b) Çevresel Uygulamalarda
- Buz kalınlıklarının belirlenmesi
 - Deniz altı çalışmaları
 - Toprak ve çakıl durumu araştırmaları
 - Atık alanlarının belirlenmesi
 - Mayınların yerlerinin belirlenmesi
 - Dolgu alanlarının ortaya çıkarılması
- c) Jeoteknik Uygulamalarda
- İnşaat mühendisliği uygulamaları
 - Baraj çalışmaları
- d) Arkeolojik Çalışmalarda
- Eski medeniyetlere ait yapıların ve eski parçaların yerlerinin bulunması
 - Arkeolojik alan çalışmaları
 - Adli tıpta ceset ve toplu mezarların yerlerinin bulunması

gibi sığ yeraltının fiziksel özelliklerinin belirlenmesi çalışmaları ve yer altına konulmuş yapıların, birimlerin, sistemlerin araştırılmasında jeofiziğin önemli bir yöntemi olarak kullanılmaktadır (Çataklı, 2003).

1.7. Yer Radarında Kullanılan Temel Elektromanyetik Dalgaların Yayılım Teorisi

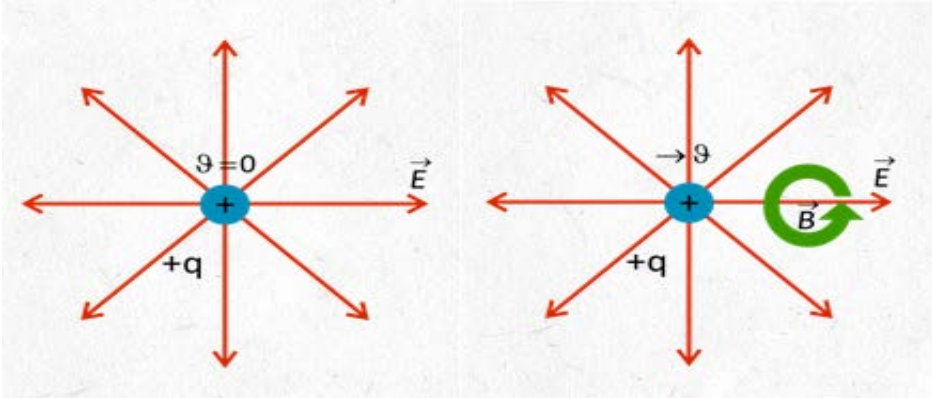
1.7.1. Elektromanyetik Dalgaın Oluşumu

Elektromanyetik dalgalar; enerjinin, elektrik ve manyetik alan etkisiyle dalgalar halinde taşınmasıyla meydana gelir. Yer radarı yönteminin temeli olan radyo dalgaları ile mikrodalgalar, televizyon dalgaları, ışık, ısı dalgaları, X ışınları, , gamma ışınları, ultraviyole ışınları vb. birer elektromanyetik dalgadır. Elektromanyetik dalgaların karakteristik özellikleri normal harmonik dalgalardaki 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 mıknatıs 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 alana 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. Bunun sonucunda çevreye elektromanyetik dalga yayılır. Bu durum şekil 1.3'te gösterilmiştir.



Şekil 1. 3. Elektrik alan (E) ve manyetik alanın (B) gösterimi

Görüldüğü gibi elektromanyetik dalgaların kaynağı elektrik yükleridir. Elektrik yükleri, hem durgun hem de hareketli durumda elektrik alan oluşturabilirler.

Elektrik yükü hareketiz ise yalnızca elektrik alanı (E) vardır. Elektrik yükü ϑ sabit hızıyla hareket ederse hem elektrik alanı (E), hem de manyetik alan (B) alanı vardır.

Birlikte değişen ve birbirine dik düzlemdeki elektrik ve manyetik alanlar elektromanyetik dalgaları meydana getirir. Uzayda değişen elektrik alanlar, manyetik alanları meydana getirir. Elektromanyetik dalgalar, uzayda yayılırken elektromanyetik alan oluştururlar. 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.

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

Formülde ifade edilen c; ışık hızı, ϵ_0 ; boşluğun dielektrik sabiti, μ_0 ; boşluğun manyetik geçirgenliği olarak tanımlanır.

1.7.2. Elektromanyetik (EM) Dalga Özellikleri

Elektromanyetik dalgaların özelliklerini ve yer içerisindeki hareketlerini açıklayabilmek için kullanılan parametreler vardır. Bu parametreler faz hızı (v), sönmülme (a) ve elektromanyetik empedans (Z)'tır. Elektromanyetik teoride basit ortamlar olarak ifade edilen; sabit özelliklerdeki dielektrik geçirgenlik, elektrik iletkenlik ve manyetik geçirgenliğe sahip ortamlarda dalga karakterlerinin hepsi; benzer davranışlar sergilemekte ve frekans değerlerine bağlı olarak değişimler göstermektedir. Düşük frekanslarda, tüm dalga özellikleri açılal 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.

Elektromanyetik alanlar düşük frekanslarda, 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 ve 1.4) bağıntılarıyla tanımlanmıştır.

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

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

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

Elektromanyetik alanlar yüksek frekanslarda, ortam içerisinde dalgalar şeklinde yayılırlar. Frekansın tüm bileşenleri aynı sönümlenmeden etkilenirler ve aynı hızda seyahat ederler. 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 ve 1.7) bağıntıları ile bulunabilir. Burada ortamın manyetik özellikleri ihmal edilmektedir ve (1.8) bağıntısıyla verilen Z_0 boşluğun empedansını göstermektedir.

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

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

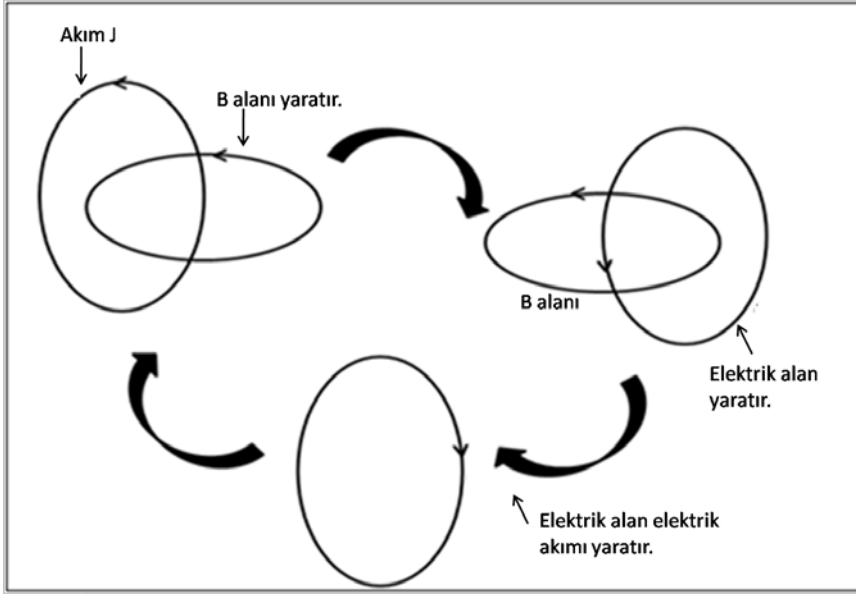
$$Z = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} = \frac{Z_0}{\sqrt{K}} \quad (1.7)$$

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

1.7.3. Elektromanyetik (EM) Alanların Dalga Yapısı

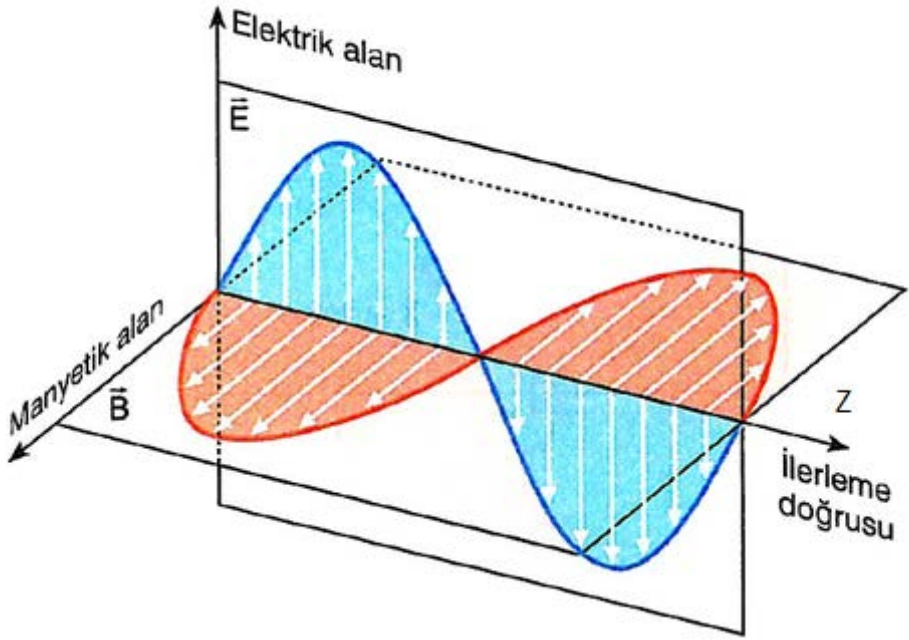
Homojen ve basit bir ortam için elektromanyetik alanların dalga yapısı dikkate alınmıştır. Malzeme özellikleri; izotropik, frekans; bağımsız ve lineer

olarak ifade edilmiştir. Elektrik alan indüklenerek, şekil 1.4' te gösterildiği 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).

Daha öncede belirtildiği gibi elektromanyetik dalga, elektrik ve manyetik alanların bileşkesinden oluşur. Birbirlerine dik sinüs dalgaları şeklindedir. Bu elektrik alan (E) ve manyetik alan (H) dışarıdan gelen herhangi bir etki olmadığı müddetçe aynı fazdadırlar. Dalga boyları ve dalga genlikleri (yükseklikleri) aynıdır. Bu nedenle birisi maksimum olduğunda diğeri de maksimum, birisi minimum olduğunda diğeri de minimumdur. Elektromanyetik dalgalar boşlukta ışık hızında hareket ederler. İlerleme yönü $E \times H$ vektörü yönünde ve z eksenini doğrultusundadır (Şekil 1.5).

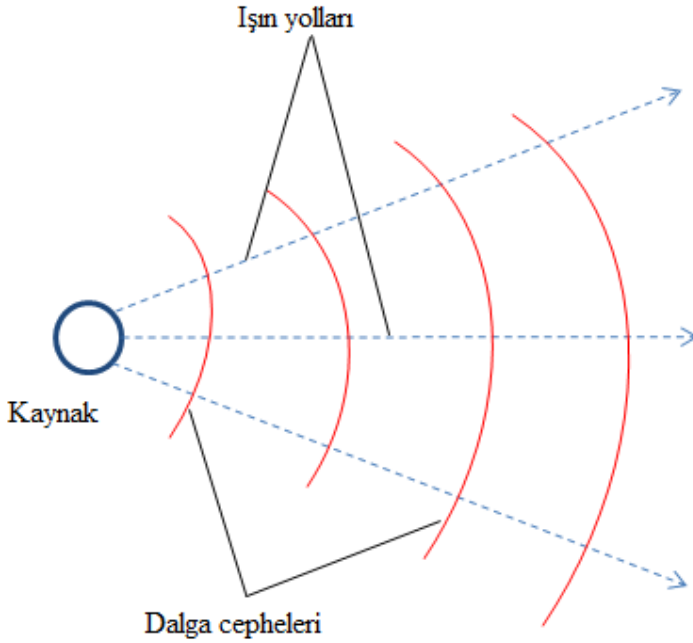


Şekil 1.5. Elektrik, manyetik ve elektromanyetik alan gösterimi (URL-5)

1.7.4. Elektromanyetik (EM) Dalganın Yayılımı

Dalga cepheleri ve ışın yolları kullanılarak elektromanyetik (EM) bir dalganın yayılımı temel olarak karakterize edilebilir. Dalga cepheleri ve ışın yolları kavramları 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 cephelerini 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 şekil 1.6'da gösterildiği gibi ışınlar olarak davrandığında, kavramsal olarak, ışın tarafından tanımlanan yol boyunca seyahat ederler.



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

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

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

Elektromanyetik (EM) dalganın yer içinde ilerleyişi, seyahat ettiği ortamın elektrik iletkenliğine bağlıdır ve yüksek elektrik iletkenlikli ortamlarda elektromanyetik dalgalar çok çabuk sönümlenir. Bu nedenle yayılım 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.

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

Radar uygulamalarında elektrik geçirgenlik çok büyük önem taşımaktadır ve genellikle bağıl geçirgenlik ya da bağıl dielektrik geçirgenlik katsayısı şeklinde açıklanır ve (1.11) bağıntısında gösterildiği gibi verilir. Denklemdeki 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 $i \sigma_{DC}$ 'de DC iletkenlik kayıp faktörünü ifade etmektedir.

$$\varepsilon / \varepsilon_0 = K^* = K' \varepsilon_0 + i K'' \varepsilon_0 \quad (1.11)$$

$$K = [\omega \mu_0 \varepsilon_0 (\omega K' + i \omega K'' + i \omega \sigma_{DC})]^{0.5} \quad (1.12)$$

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

1.7.5. Elektromanyetik (EM) Dalgaların Yayılımını Etkileyen Fiziksel Özellikler

Elektromanyetik alanlar zamanla değişen elektrik (E) ve manyetik (H) alan bileşenlerinden oluşurlar. Bu elektromanyetik alanlar içinden geçtikleri ortamların farklı fiziksel özelliklerinden etkilenirler. Manyetik ve elektrik alanlarda zamanla meydana gelen bu değişim, elektromanyetik alanların ortamda yayılım ve sönümlenmelerini etkiledikleri gibi, farklı karakterlerde yansımalar elde edilmesine de neden olur.

Yerin fiziksel özellikleri (ε , μ , σ), yer radarı uygulamalarında 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 (ε), elektrik iletkenlik (σ) ve bağıl manyetik geçirgenlik (μ) olarak sıralanabilir.

1.7.5.1. Dielektrik Geçirgenlik (ϵ)

Dielektrik (ϵ) ifadesi kelime olarak elektriksel yalıtkanlıkla eş anlamlıdır. 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/voltmetre olan dielektrik geçirgenlik (ϵ) matematiksel olarak (1.13) bağıntısında verildiği gibi gösterilmektedir.

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

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 (Olhoft, 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).

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

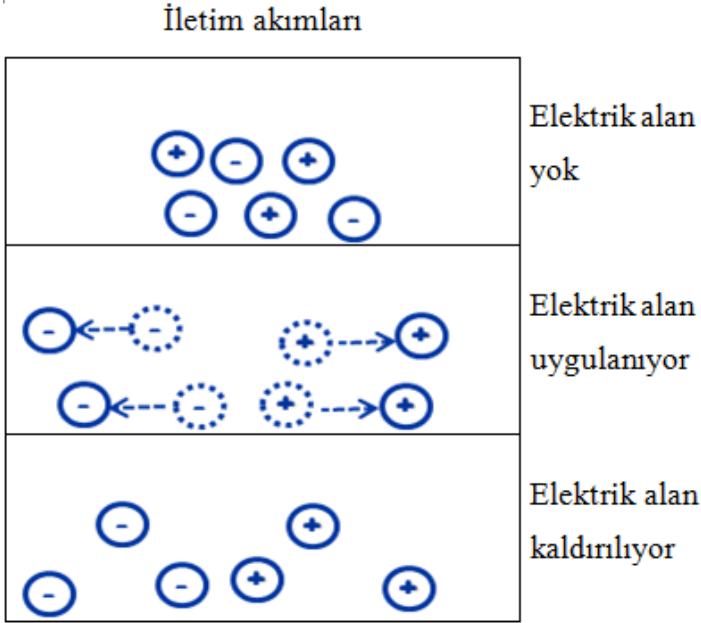
Arazide, bağıl dielektrik geçirgenlik katsayısını (ϵ_r) hesaplamak oldukça zordur. Bunun kestirimi arazide kullanılan bazı hız analizi teknikleri yardımıyla yapılabilir. Ayrıca, toprak ve çökel örnekleri üzerinde laboratuvar ölçümleri yapılarak da dielektrik geçirgenlik ölçülebilir. Bazı materyaller için verilen dielektrik geçirgenlik katsayıları tablo 1.2'de verilmektedir.

1.7.5.2. Elektrik İletkenlik (σ)

Bir ortamda elektrik alanının (E) oluşmasına, ortaya çıkmasına o ortamda bulunan elektrik yükleri 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

Elektrik iletkenliğe (σ) sahip ortamlarda, bağımsız (serbest) 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).

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad \sigma, \text{ elektrik iletkenliktir} \quad (1.15)$$

Elektrik alan ile uygulanan iletim akımı arasındaki ilişki (1.15) bağıntısı ile ifade edilmektedir. Bu bağıntı bir elektrik alan var olduğunda, serbest yüklerin elektrik akımı oluşturabilmeleri için yaptıkları hareketlerini tanımlar.

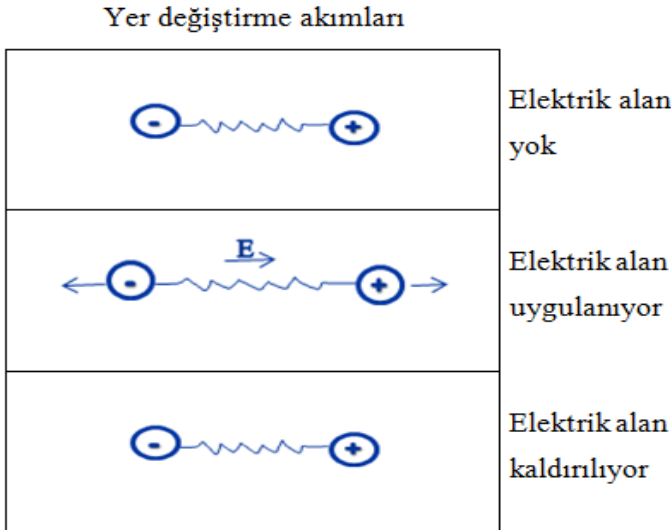
Matematiksel olarak çözümünü basite indirmek için, ortamın elektrik iletkenlik açısından homojen, yönden bağımsız (izotrop) ve frekanstan bağımsız olduğu düşünülür. Bu durumda, ortamdaki elektrik akımı ile elektrik alan arasındaki ilişki doğrusaldır ve aralarındaki oransallık katsayısı elektrik iletkenlik 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. Bu durumda bir enerji yitimi söz

konusudur ve bu ortamlarda radar dalgalarının ilerleyemeyeceği anlamına gelmektedir. Bu yüzden, maksimum enerjinin yer içerisine nüfuzu (elektromanyetik enerji iletimi) için ortam düşük elektrik iletkenliğe ve yüksek derecede dielektrik özelliklere sahip olmalıdır. Bu durumun matematiksel ifadesi $\sigma/\omega\epsilon \ll 1$ şeklindedir (Beyaz Özdemir, 2015).

b) Yer Değiştirme (Kutuplanma) Akımları

Dışarıdan uygulanan bir elektrik alan etkisiyle maddenin yapısında bulunan bağlı yüklerin harekete zorlanması sonucu yer değiştirme (kutuplanma) akımları meydana gelir. Bağlı yükler atomun çekirdeği çevresindeki elektron bulutu buna örnek olarak 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.

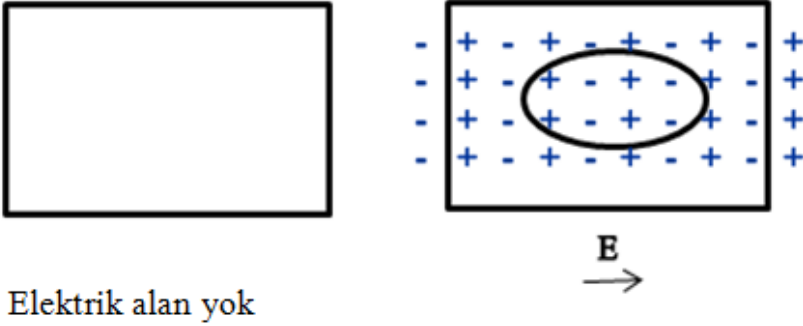


Şekil 1.8. Uygulanan elektrik alan doğrultusunda bağlı elektrik yüklerinin yer değiştirme hareketi (Annan, 2001).

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 dağılımı 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).

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

Dipol moment yoğunluğu



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

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

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).

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.

1.7.5.3. Manyetik Geçirgenlik (μ)

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 yönlendirilmesinden 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;

$$\vec{M} = IA\hat{n}$$

(1.17)

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 (1.18) bağıntısıyla tanımlanır ve birimi A/m' dir.

$$\vec{m} = \frac{\vec{M}}{V} \quad (1.18)$$

k , boyutsuz bir nicelik olan manyetik duyarlılığı gösterirken, (H) manyetik alanı tarafından indüklenen manyetik moment miktarı ise (1.19) bağıntısı ile ele alınmıştır.

$$\vec{m} = k\vec{H} \quad (1.19)$$

Yer değiştirme akımı indüklenmiş elektrik dipol momenti ile indüklenmiş manyetik moment arasında önemli bir benzerlik vardır. Maddedeki manyetik akı (1.20) olarak tanımlanır.

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M}) \quad (1.20)$$

Manyetik geçirgenlik ise;

$$\mu = \mu_0(1 + k) \quad (1.21)$$

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

Maddenin manyetik geçirgenliğinin boşluğun manyetik geçirgenliğine oranı bağıl manyetik geçirgenlik (K_m) kavramını vermektedir. Manyetik geçirgenlik kavramı (1.22) bağıntısı ile ifade edilir. Burada k ; suseptibilitiyi temsil etmektedir.

$$K_m = \frac{\mu}{\mu_0} = (1 + k) \quad (1.22)$$

Ortamda bulunan bir manyetik alan manyetik dipol momenti, 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 bağıl manyetik geçirgenlik değerleri çok yüksek olabilir. Demir, kobalt ve nikel gibi maddelerde bağıl 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 (1.23) ampirik bağıntı geliştirilmiştir. Burada θ madde içerisindeki manyetik özelliklere sahip mineralin hacimsel miktarını vermektedir.

$$k = 3.8\theta \quad (1.23)$$

1.7.6. Elektromanyetik (EM) Empedans

Elektrik ve manyetik alanlar (EM alanların bileşenleri) birbirine dik yönlerde oluşur ve her iki alana dik yöndeki doğrultu boyunca hareket ederler. Oluşacak manyetik alanın genliği, uygulan 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) (1.24) bağıntısı ile ifade edilir.

$$Z = \frac{E}{H} \quad (1.24)$$

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

$$Z = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon + i\frac{\sigma}{\omega}}} \quad (1.25)$$

$$Z = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \left(1 - i \frac{\sigma}{2\omega\varepsilon} \right) \quad (1.26)$$

bağıntılarıyla hesaplanır.

1.8. Yer Radarı (GPR) Yönteminin Temel İlkeleri

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

Yer radarı sinyallerinin tanımlanması için elektromanyetik (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 (Beyaz Özdemir, 2015).

1.8.1. Maxwell Denklemleri

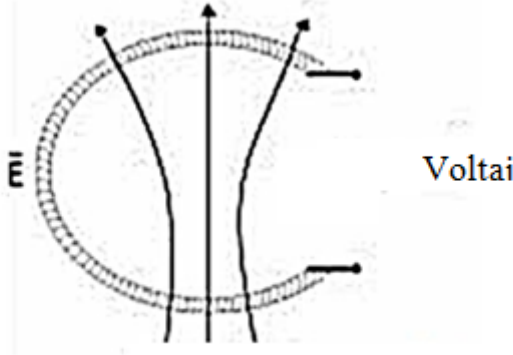
İskoç Fizikçi James Clerk Maxwell (1831 – 1879), Andre Marie Ampere (1775-1836), Michael Faraday (1791-1867) ve Karl Friedrich Gauss (1777-1885)'un yapmış olduğu çalışmalar ışığında 1865 ve 1868 yıllarında 4 denklem içinde tüm elektromanyetik olayları içeren iki makale yayınlamıştır. Maxwell denklemleri elektrik yüklerinin ve elektrik akımlarının elektrik alan ve manyetik alan için kaynak olarak nasıl hareket ettiklerini tanımlamaktadır. Dahası, zamanla değişen bir elektrik alanının zamanla değişen bir manyetik alanı nasıl ürettiği veya tam tersi durumda zamanla değişen bir manyetik alanının 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 alanının 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 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 1.10).

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\left(\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}\right) \quad (1.27)$$

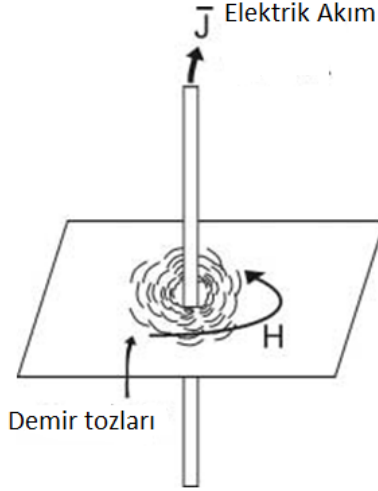


Zamanla değişen manyetik akı yoğunluğu

Şekil 1.10. Bir manyetik alanın bir elektrik alan meydana getirmesi (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 kâğıt düzleminde manyetik alanın şeklini alan demir tozlarıdır (Şekil 1.11). Kısaca Amper kanunu; bir ortamdan akım geçerse mutlaka manyetik alan oluşur ifadesini açıklar.

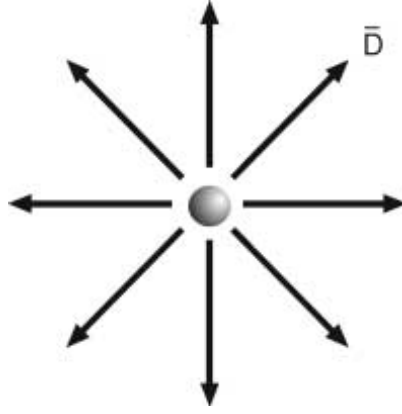
$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J} + \left(\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}\right) \quad (1.28)$$



Şekil 1.11. Bir elektrik akımının bir manyetik alan meydana getirmesi (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 1.12). Kısaca Gauss kanunu; elektrik alanın skaler kaynağının yük yoğunluğu olduğudur veya elektrik alanın noktasal olarak yüklerde sonlandığını belirtmekte ve (1.29) bağıntısı ile ifade edilmektedir.

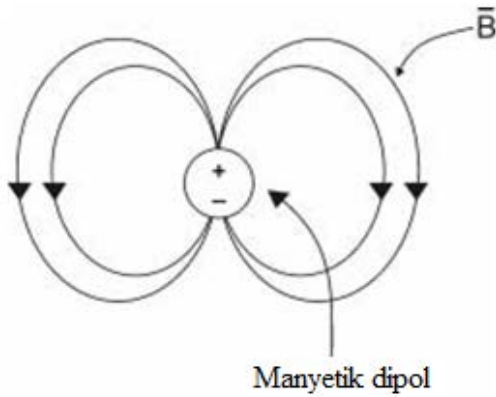
$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \vec{q} \quad (1.29)$$



Şekil 1.12. Kapalı bir yüzeydeki elektrik alan akışının, bu yüzey etrafından çevrelenmiş olan hacimde bulunan net yük ile orantılıdır (Annan,1992).

Manyetik Alan İçin 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 akısı sıfırdır (1.30) (Şekil 1.13).

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (1.30)$$



Şekil 1.13. Kapalı bir yüzeydeki manyetik alan akışının sıfır olduğu ve dolayısıyla manyetik yüklerin var olmadığını belirtir (Annan, 1992).

(1.27) – (1.30) eşitlikleri Maxwell denklemleri olarak adlandırılır.

1.8.2. Katkı Eşitlikleri

İzotropik, homojen bir ortamdaki alan miktarları arasındaki ilişkileri katkı eşitlikleri tanımlamaktadır. Bu eşitlikler (1.31, 1.32, 1.33) elektromanyetik alandaki uygulamalarda elektronun, atomun ve moleküler tepkinin nasıl tanımlandığını gözle görülebilir şekilde sağlamaktadır.

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (1.31)$$

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (1.32)$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (1.33)$$

\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 (Beyaz Özdemir, 2015).

1.8.3. Zaman Ortamında Elektromanyetik (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

(1.27) denklemine sırasıyla aşağıda verildiği gibi (1.31)-(1.33) denklemleri yerleştirilerek elektrik alan dalga denklemi elde edilir.

$$\nabla \times \vec{E} = -\left(\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}\right) \xrightarrow{\vec{B} = \mu \vec{H}} \nabla \times \vec{E} = -\left(\frac{\partial \mu \vec{H}}{\partial t}\right) \xrightarrow{\mu \rightarrow s\mu} \nabla \times \vec{E} = -\mu \left(\frac{\partial \vec{H}}{\partial t}\right) \quad (1.34)$$

Bu denklemde her iki tarafın rotasyoneli (döneli) alınırsa;

$$\nabla \times \nabla \times \vec{E} = -\mu \left(\frac{\partial(\nabla \times \vec{H})}{\partial t}\right) \xrightarrow{\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \left(\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}\right)} \nabla \times \nabla \times \vec{E} = -\mu \left(\frac{\partial\left(\vec{J} + \left(\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}\right)\right)}{\partial t}\right) \xrightarrow{\substack{\vec{J} = \sigma \vec{E} \\ \vec{D} = \epsilon \vec{E}}} \quad (1.35)$$

$$\nabla \times \nabla \times \vec{E} = -\mu \left(\frac{\partial\left(\sigma \vec{E} + \left(\frac{\partial \epsilon \vec{E}}{\partial t}\right)\right)}{\partial t}\right) \xrightarrow{\sigma \text{ ve } \epsilon \text{ s\text{b}t}} \nabla \times \nabla \times \vec{E} = -\mu \sigma \left(\frac{\partial \vec{E}}{\partial t}\right) - \mu \epsilon \left(\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}\right) \quad (1.36)$$

ve

$$\nabla \times \nabla \times A = \nabla(\nabla A) - \nabla^2 A \quad (1.37)$$

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

$$\nabla^2 \vec{E} = \mu \sigma \left(\frac{\partial \vec{E}}{\partial t}\right) + \mu \epsilon \left(\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}\right) \quad (1.38)$$

b) Manyetik Alan Dalga Denklemi

(1.27) eşitliği için yapılanlar (1.28) manyetik alan eşitliği içinde yapılır. Buna göre;

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \left(\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}\right) \xrightarrow{\substack{\vec{J} = \sigma \vec{E} \\ \vec{D} = \epsilon \vec{E}}} \nabla \times \vec{H} = \sigma \vec{E} + \left(\frac{\partial \epsilon \vec{E}}{\partial t}\right) \xrightarrow{\epsilon \text{ s\text{b}t}} \nabla \times \vec{H} = \sigma \vec{E} + \epsilon \left(\frac{\partial \vec{E}}{\partial t}\right) \quad (1.39)$$

Bu denklemde her iki tarafın rotasyoneli (döneli) alınırsa;

$$\nabla \times \nabla \times \vec{H} = \sigma \left(\frac{-\partial(\mu\vec{H})}{\partial t} \right) + \varepsilon \left(\frac{\partial \left(\frac{-\partial(\mu\vec{H})}{\partial t} \right)}{\partial t} \right) \xrightarrow{\mu s b t} \nabla \times \nabla \times \vec{H} = \sigma \mu \left(\frac{-\partial\vec{H}}{\partial t} \right) + \frac{\partial\varepsilon}{\partial t} \left(-\mu \frac{\partial\vec{H}}{\partial t} \right) \quad (1.40)$$

$$\nabla \times \nabla \times \vec{H} = \sigma \mu \left(\frac{-\partial\vec{H}}{\partial t} \right) + \frac{\varepsilon \mu \partial}{\partial t} \left(-\frac{\partial\vec{H}}{\partial t} \right) \quad (1.41)$$

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

$$\nabla^2 \vec{H} = \mu \sigma \left(\frac{\partial\vec{H}}{\partial t} \right) + \mu \varepsilon \left(\frac{\partial^2\vec{H}}{\partial t^2} \right) \quad (1.42)$$

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

$$\nabla^2 \vec{E} = \mu \varepsilon \frac{\partial^2\vec{E}}{\partial t^2} \quad (1.43)$$

ve manyetik alan dalga denklemi

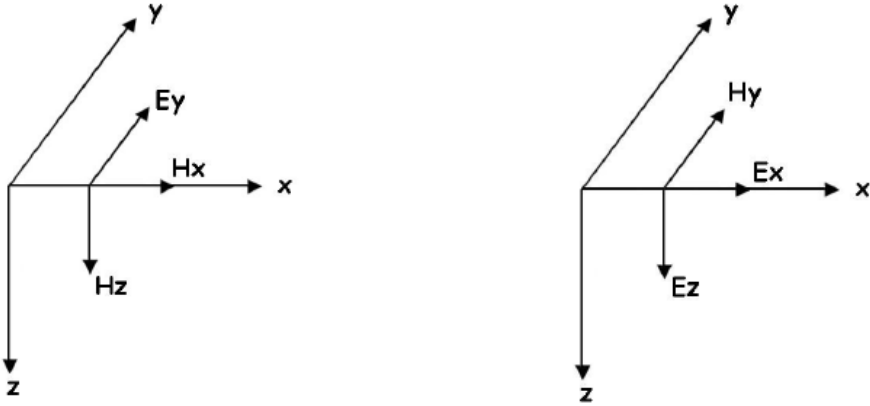
$$\nabla^2 \vec{H} = \mu \varepsilon \frac{\partial^2\vec{H}}{\partial t^2} \quad (1.44)$$

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

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.



(a)

(b)

Şekil 1.14. a) TM modu ve b) TE modu için EM alan bileşenleri

1) Enine Manyetik Alan (TM) Modu İçin Alan Denklemleri

Enine manyetik alan (TM) modunda x ve z yönünde zamanla değişen manyetik alan ve manyetik alana bağımlı olarak oluşan elektrik alan vardır (Şekil 1.14 a). X ve z yönündeki elektrik alan ve y yönündeki manyetik alan bileşenleri sıfır kabul edilir. Bu duruma göre;

$$H_z \neq H_x \neq E_y \neq 0 \quad \text{ve} \quad H_y = E_x = E_z = 0 \quad (1.45)$$

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

$$\frac{\partial E_y}{\partial x} = \mu \frac{\partial H_z}{\partial t} \quad (1.46)$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial z} = -\mu \frac{\partial H_x}{\partial t} \quad (1.47)$$

ve manyetik alan denklemleri;

$$\sigma E_y + \varepsilon \frac{\partial E_y}{\partial t} = \frac{\partial H_z}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial z} \quad (1.48)$$

olarak ifade edilir.

2) Enine Elektrik Alan (TE) Modu İçin Alan Denklemleri

Enine elektrik alan (TE) modunda x ve z yönünde zamanla değişen elektrik alan ve elektrik alana bağlı olarak değişen bir manyetik alan vardır (Şekil 1.14 b). X ve z yönündeki manyetik alan ve y yönündeki elektrik alan bileşenleri sıfır kabul edilir. Bu duruma göre;

$$H_y \neq E_x \neq E_z \neq 0 \quad \text{ve} \quad H_x = H_z = E_y = 0 \quad (1.49)$$

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

$$\frac{\partial H_y}{\partial x} = -\varepsilon \frac{\partial E_z}{\partial t} - \sigma E_z \quad (1.50)$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial z} = \varepsilon \frac{\partial E_x}{\partial t} + \sigma E_x \quad (1.51)$$

$$\mu \frac{\partial H_y}{\partial t} = \frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x} \quad (1.52)$$

olarak yazılır.

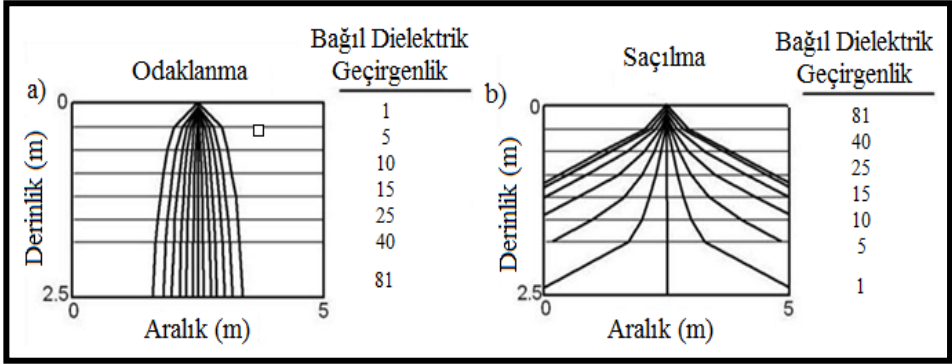
1.9. Yer Radarı (GPR) Sinyallerinin Oluşturulması ve Yayılımı

Yer radarı yönteminin sistemlerinde genellikle iki oktav bant genişliğine sahip dipol antenler kullanılır. Yani, 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 yayılan radar ışınları göndermektedirler ve bu yayılım 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, ısıtım örüntüsü ve derinlik tarafından belirlenir. Isıtım örüntüsü, bir antenin ısıtım gücünün konum ve açıya göre dağılımının bir ölçüsüdür ve korumalı ya da korumasız yatay elektrik dipol anteni tarafından üretilir. Korumalı antenler, ısıtım örüntüsünün yukarı yönde yayılımını azaltır. Bu tür bir mekanizmaya sahip antenden yayılım 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 1.15 a) 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 1.15. 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 meydana gelecek yansıma ya da kırılma 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 küçülerek, 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 1.15 b).

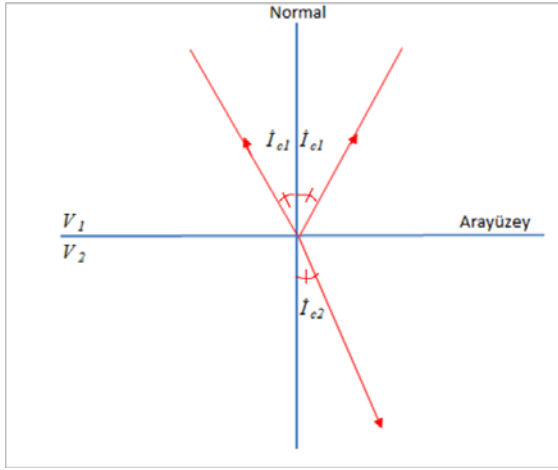
Yeraltının bağıl dielektrik geçirgenlik değeri artma eğilimi gösteriyorsa, radar ışınları odaklanma eğilimi gösterir. Bu nedenle, yüksek bağıl dielektrik geçirgenlik değerine sahip alanlarda çalışma yapılırken, arandılan tüm yer altı yapılarının belirlenebilmesi için radar profillerinin aralığı sıklaştırılmalıdır (Beyaz Özdemir, 2015).

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

Yer radarı (GPR) yönteminin temeli, sismik yöntemde olduğu gibi, yeraltına gönderilen darbe biçimli enerjinin bir kısmının yeraltında bulunan farklı ara yüzeylerden geriye yansıması ve kırılmasına dayanır. Radar enerjisi akustik değil elektromanyetik enerjidir ve ara yüzeyler 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 (Şekil 1.16). Bu kanun yansıyan ve kırılan ışınların genliği konusunda bilgi vermez fakat yansıyan ve kırılan ışınların normalle olan doğrultularını gösterir ve genellikle (1.53) bağıntısı ile verilir.

$$\frac{\sin i_{c1}}{V_1} = \frac{\sin i_{c2}}{V_2} \quad (1.53)$$



Şekil 1.16. 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 yansıdıkları ara yüzeylerin yeraltında buldukları derinlik

sırasına göre ulaşırlar. Bu, yüzeye yakın olanın derinde olandan daha kısa sürede alıcılar tarafından kaydedilmesi anlamına gelir.

Radar dalgaları ara yüzeylerden 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. Yeryüzündeki ortamların bağıl dielektrik geçirgenlik değerleri azar azar değiştiğinde, yansıtırlık 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 ifade edildiği 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);

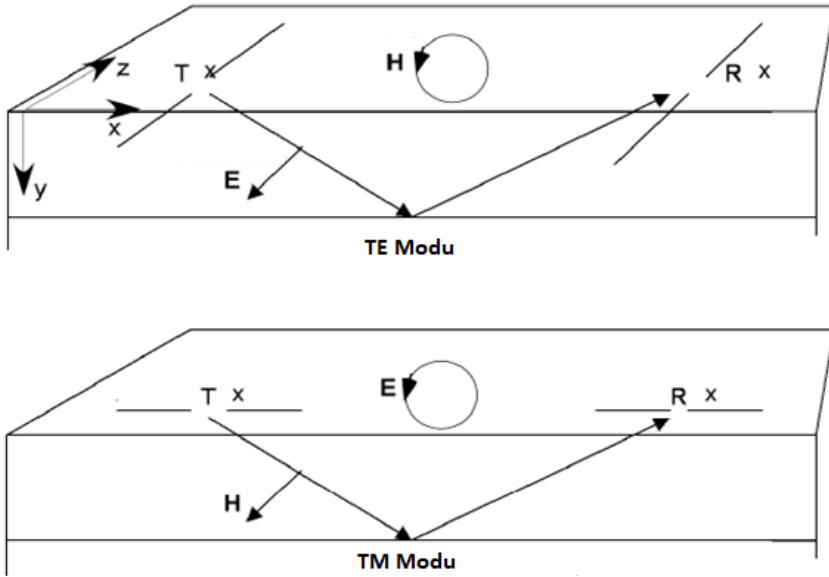
$$R = \frac{\sqrt{\epsilon_{r1}} - \sqrt{\epsilon_{r2}}}{\sqrt{\epsilon_{r1}} + \sqrt{\epsilon_{r2}}} \quad (1.54)$$

$$T = \frac{2\sqrt{\epsilon_{r2}}}{\sqrt{\epsilon_{r1}} + \sqrt{\epsilon_{r2}}} \quad (1.55)$$

bağıntılarıyla ifade edilir.

Elektromanyetik 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 1.17). TE modunun elektrik alan bileşeni ara yüzeye paralel iken ve TM modunun manyetik alan bileşeni ara yüzeye paraleldir.

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 1.17).



Şekil 1.17. TE ve TM modlarında anten durumları. Tx: Verici anten, Rx: Alıcı anten, E: Elektrik alan, H: Manyetik alan (Van der Kruk vd., 2006'dan düzenlenmiştir).

Elektromanyetik alan TE ve TM bileşenlerine ayrıldığında yansıma ve kırılma katsayıları,

TE modu için;

$$T = \frac{E_r}{E_i} = \frac{Z_2 \cos \vartheta_i - Z_1 \cos \vartheta_t}{Z_2 \cos \vartheta_i + Z_1 \cos \vartheta_t} \quad (1.56)$$

$$R = \frac{E_t}{E_i} = \frac{2Z_2 \cos \vartheta_i}{Z_2 \cos \vartheta_i + Z_1 \cos \vartheta_t} \quad (1.57)$$

$$1 + T = R$$

TM modu için;

$$T = \frac{E_r}{E_i} = \frac{Z_2 \cos \vartheta_t - Z_1 \cos \vartheta_i}{Z_2 \cos \vartheta_t + Z_1 \cos \vartheta_i} \quad (1.58)$$

$$R = \frac{E_t}{E_i} = \frac{2Z_2 \cos \vartheta_i}{Z_2 \cos \vartheta_i + Z_1 \cos \vartheta_t} \quad (1.59)$$

$$1 + T = R \frac{\cos \vartheta_t}{\cos \vartheta_i} \quad (1.60)$$

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, 1992).

1.11. Yer Radarı (GPR) Sinyal Ölçümü

Yer radarı (GPR) sistemleri kavramsal olarak basittir. Verici anten ve onu oluşturan parçalar, alıcı anten ve onu oluşturan parçalar, kontrol ünitesi (sistem), kayıt ünitesi ve gösterim (monitör) 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 yayıldığını 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

Yer içerisinde 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,

$$v = \frac{c}{(K'(\sqrt{1+\tan^2\delta}+1))^{1/2}} \quad (1.61)$$

$$v = \frac{0.3}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (\text{m/ns}) \quad (1.62)$$

denklemleriyle verilir. Burada c ; ışık hızı, K' ; ortalama bağıl dielektrik katsayısı, ϵ_r bağıl dielektrik geçirgenlik, $\tan \delta$ ise; $\tan \delta = \sigma / \omega \epsilon$ eşitliği ile verilen kayıp tanjantını ifade etmektedir. Kayıp tanjantı bir maddedeki iletim akımlarının yer değiştirme akımlarına oranını verir.

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 görsel 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;

$$t^2 = \frac{x^2}{v^2} + t_0^2 \quad (1.63)$$

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 ofsetteki tek yönlü seyahat süresini göstermektedir (Telford vd., 1976). Hızı hesaplamak için (1.63) bağıntısı tekrar düzenlenecek olursa,

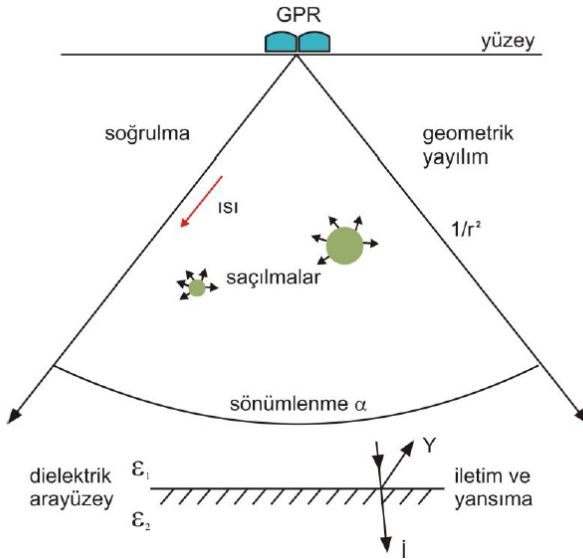
$$v = \frac{x^2}{\sqrt{t^2 - t_0^2}} \quad (1.64)$$

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 göz önünde bulundurulmalıdır (Beyaz Özdemir, 2015).

1.13. Sinyalin Sönümlenmesi

Elektromanyetik 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 1.18).



Şekil 1.18. Sinyalin sönümlenmesi (Reynolds, 1997).

Dalga enerjisindeki kaybın 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.

$$e^{-\alpha x}, \quad \alpha = 1.69 \frac{\sigma}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (1.65)$$

Sönümlenme katsayısı (α) için benzer bir ifadeyi Moorman (2001), (1.66) bağıntısıyla vermiştir.

$$\tan^2 \delta = \sigma_{DC} (\omega K' \epsilon_0)^{-1} \quad ve \quad c = 2.998 * 10^8 \text{ms}^{-1}$$

ise

$$\alpha = \omega c^{-1} \{ [K'((1 + \tan^2 \delta)^{0.5} + 1)] / 2 \}^{0.5} \quad (1.66)$$

Çeşitli yeraltı ortamlarının sönümlenme oranı tablo 1.2'de verilmektedir. 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 yayılımına 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 yayılımına 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 az olmaktadır.

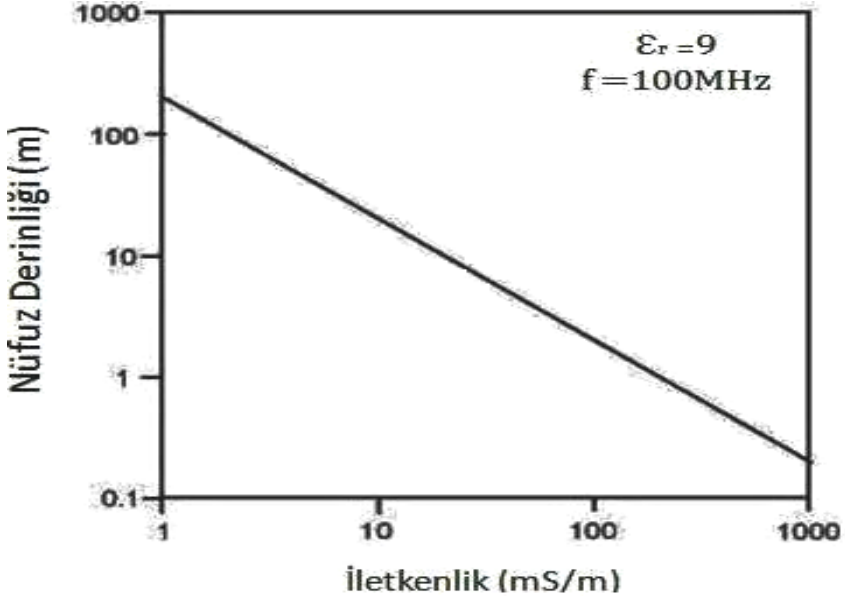
Gerçek radar sinyalinin aralığının saptanabilmesi için; aletsel özellikler, EM dalgalarının yayıldığı ortamın özellikleri (elektriksel iletkenlik, dielektrik katsayısı) ve araştırılması istenen hedefin yüksekliği, uzunluğu, derinliği, eğimi, dalımı gibi parametrelerin de hesaplamaya dâhil edilmesi gerekir. Belirli bir uzaklık için toplam kayıp; verici ve alıcı antenlerinin yönlendirmesinden 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

Araştırılan ortamda bulunan ara yüzeylerin sayısı ve bu ara yüzeyler arasındaki dielektrik farklılık; kullanılan antenin merkez frekansını, sinyalin sönümlenme oranını ve GPR'ın yeraltını görüntüleyebilme yeteneğini etkiler. Bununla birlikte yer içerisine doğru hareket eden radar dalgalarının nüfuz derinliği üzerinde de etkiye sahiptir.

GPR 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 arttıka, 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 (EM) 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. Elektromanyetik enerjinin nüfuz derinliği ile elektrik iletkenlik arasındaki ilişki şekil 1.19'da verilmiştir. Bu şekilden görüldüğü gibi, ortamın iletkenliğinin artması radar dalgalarının nüfuz derinliğini çok hızlı bir biçimde azaltmaktadır.



Şekil 1.19. Elektromanyetik enerjinin yayıldığı ortamın elektrik iletkenliği ile enerjinin nüfuz derinliği ilişkisi (Moorman, 2001).

Kullanılan antenin merkez 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 nesnelerin belirlenememesi ve ince tabaka kalınlıklarının ölçülememesidir. Bu durum, yeraltının çözünürlüğünü azaltır (Conyers ve Goodman, 1997).

Eğer d derinlik çözünürlüğü alınırsa uygun frekans;

$$f = 150/d\sqrt{\epsilon} \quad \text{MHz} \quad (1.67)$$

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 $\frac{1}{4}$ ünden

daha büyük ise kuramsal olarak tanımlanabilir hedefler belirlenemez. Bu koşul yaklaşık olarak;

$$D_x = 75/f\sqrt{\epsilon} \quad (\text{m}) \quad (1.68)$$

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.

$$D_{\text{anten}} = (2 d)/\sqrt{(\epsilon - 1)} \quad (\text{m}) \quad (1.69)$$

Yer radarında kullanılan en yüksek frekans merkezi frekansın 1,5 katı olduğuna göre örnekleme aralığı merkezi frekansın en az 3 katı olmalıdır (Conyers ve Goodman, 1997).

1.15. Düşey ve Yanal Ayrırlılık

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

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (1.70)$$

Frekans değeri büyüdükçe, düşey ayrırlılık ta artar (Neal, 2004). Yer radarı sistemlerinde, her bir anten belirli bir frekans aralığında (bandwidth) çalışmaktadır. 500 MHz'lik bir anten için merkez frekansta 500 MHz'dir. Merkez frekans, sinyal periyodu (ns) ile ters orantılıdır. Düşey ayrırlılık teorik olarak dalga boyunun ¼'üne ($\lambda/4$) karşılık gelmektedir. Dolayısı ile tabaka kalınlığının veya araştırılan nesnelerin, dalga boyunun ¼'nden küçük olması durumunda, bu tabakanın ve nesnenin radargramlarda izlenebilmesi zordur. Anakaya ve toprak için, üç farklı frekans değerinde teorik olarak hesaplanmış düşey ayrırlılık değerleri tablo 1.3'te verilmiştir.

Tablo 1.3. 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; Fresnel zonunun genişliği ile ilişkilidir. Bu ise, dalga boyu ve yansıtıcının derinliğine bağlıdır (Neal, 2004). Genel olarak; 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). Bağlı dielektrik katsayısındaki artış bu zonun küçülmesine, derinliğin artması ise Fresnel zonunun büyümesine neden olmaktadır.

1.16. Radar Anten Frekansının Seçimi

Yer radarı (GPR) 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 (nüfuz 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).

Yeraltı çözünürlüğü ile nüfuz derinliği 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 1.4'te 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 1.4 ile verilen değerler sadece genel bir değerlendirmeyi kapsar (Conyers ve Goodman, 1997).

Seçilecek anten frekansının, derinliği ve boyutları bilinen veya tahmin edilen yapıları belirleyip belirlemedikleri 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 1.4. Farklı bağıl dielektrik geçirgenlik değerlerine sahip ortamlarda seçilen anten frekanslarına göre radar dalga boylarının değişimi (Conyers ve Goodman, 1997).

Anten Merkez Frekansı (MHz)	Hava İçinde Merkez Frekansın Dalga Boyu (Metre)			
	$\epsilon_r = 1$	$\epsilon_r = 5$	$\epsilon_r = 15$	$\epsilon_r = 25$
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

Aranılan nesne ve 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 maskeleymesi 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, yönlenimi ve gömülü bulunduğu derinliğe bağlı olarak seçilecek herhangi frekans değerine sahip bir antenle görüntülenebilir. 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 aranan 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 Fresnel 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).

Çalışma yapılan alanın manyetik ve elektrik 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 karelajlanmış alanlarda hatlar boyunca çalışılırken, sistemleri hareket ettirebilmek için tekerlekli ya da kızaklı aksamların kullanılması gerektiğinden, düşük frekanslı antenleri kullanmak oldukça zorlaşmaktadır. Oysa tam tersine, yüksek frekanslı antenler oldukça küçük boyutlardadır ve kolaylıkla taşınabilir (Conyers ve Goodman, 1997).

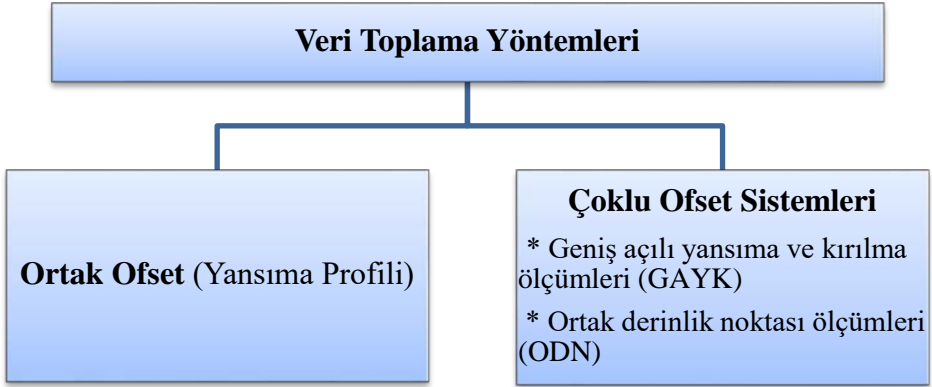
Kullanılacak antenin frekansı, çözümlenecek yapıların boyutları ve yapıları çevreleyen ortamın fiziksel ve kimyasal bileşimi tarafından belirlenir. Çoğu zaman, eğer hedef yapı büyük, geniş düzlemsel bir yüzeye sahip değilse ve ortamda mevcut bir bozucu etki varsa, aranılan yapının belirlenebilmesi için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

Yer radarı 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.

1.17. Yer Radarı (GPR) Veri Toplama Yöntemleri

Yer radarı (GPR) çalışmalarında yaygın olarak veri toplama yöntemleri aşağıda şematik olarak gösterildiği gibi 2 farklı yöntemle gerçekleştirilir.



Bu yöntemler ile veri toplama aşamasında, verici ve alıcı antenler, birbirlerine ve ilerleme yönüne göre farklı konumlarda olabilirler. Yer radarı yönteminde bu iki yöntemin dışında tomografi ölçümleri de yapılmaktadır. 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).

1.17.1. Örnekleme Kriteri

Yer radarı (GPR) araştırmalarının amacı, radyo dalgalarını kullanarak, dolaylı olarak yeraltı yapılarına ilişkin bilgiler edinmektir. Uzaklığın ve zamanın bir fonksiyonu olarak elektromanyetik (EM) alan örneklennmeli, 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 (1.71):

$$\Delta t \leq \frac{1}{2f} \quad (1.71)$$

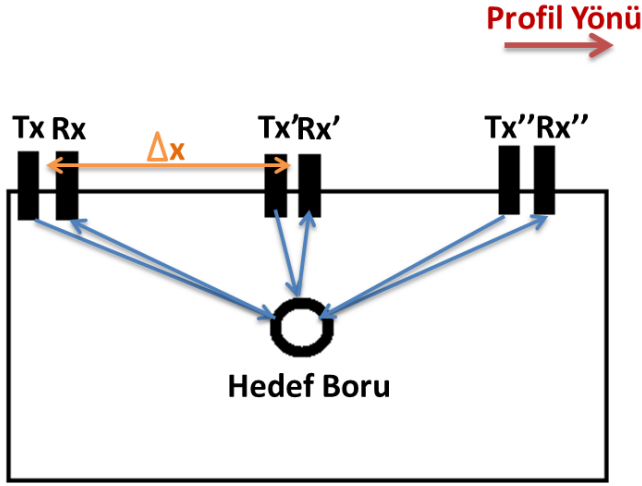
$$\Delta x \leq \frac{V}{2f} \quad (1.72)$$

1.17.2. Ortak Ofset (Yansıma Profili)

Ortak Ofset (yansıma profili) düzeneğinde verici ve alıcı antenler, elektromanyetik (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 1.20).

Yansıma profili yönteminde, bir veya daha fazla radar anteni, eş zamanlı olarak yer yüzeyi boyunca ilerlerken yeraltı yansıtırlılığının derinliğe bağlı olarak haritalanması amaçlanmaktadır.

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



Tx , Tx' , Tx'' : Verici Antenler

Rx , Rx' , Rx'' : Alıcı Antenler

Δx : Ölçüm Aralığı

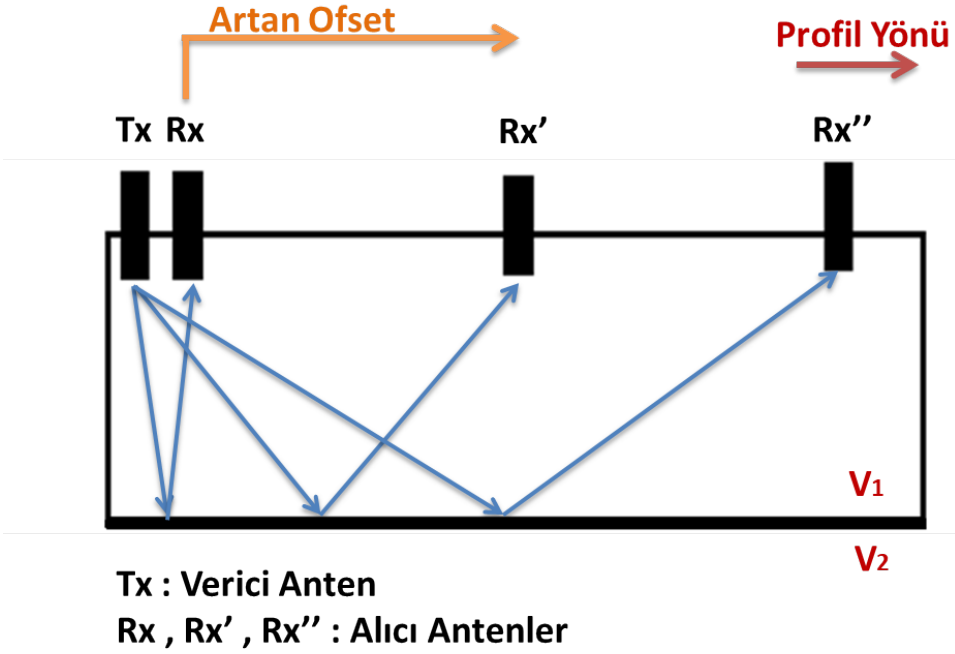
Şekil 1.20. Yansıtma profili (ortak ofset) yönteminin şematik gösterimi

1.17.3. Çoklu Ofset Sistemleri

Çoklu ofset sistemleri yöntemi ile veri toplama iki şekilde gerçekleşmektedir. Bunlar, Geniş Açılı Yansıtma ve Kırılma (GAYK), Ortak Derinlik Noktası (ODN) yöntemleridir. Bu yöntemler, ortak ofset (yansıtma profili) yöntemi ile karşılaştırıldığı zaman, uygulamasının zaman alması ve değerlendirmesinin basit olmaması nedeni ile çok sık kullanılmamaktadır (Annan, 2005).

1.17.3.1. Geniş Açılı Yansıtma ve Kırılma Ölçümleri (GAYK)

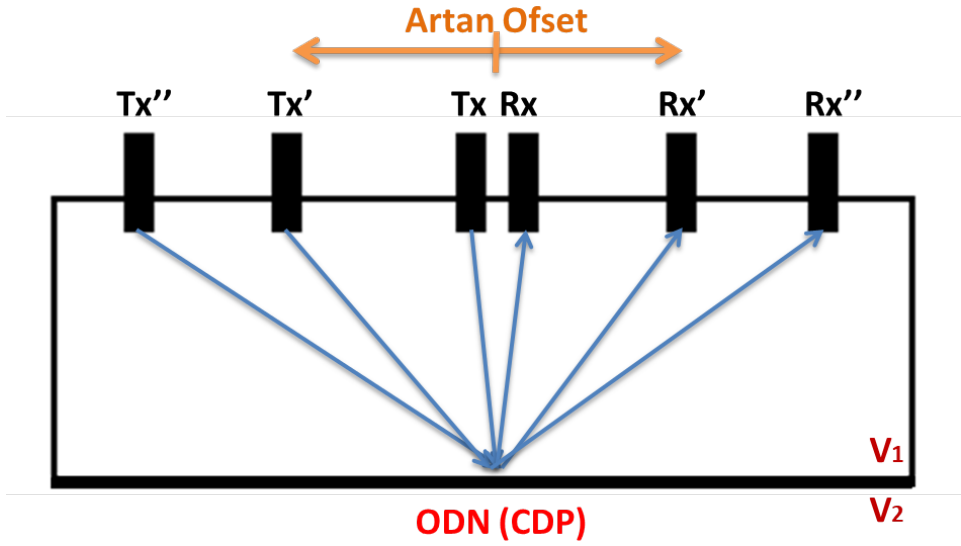
Geniş Açılı Yansıtma ve Kırılma Ölçümleri (GAYK) ölçümlerinde verici anten, başlangıç noktasında sabit kalırken, alıcı anten, ofsetin arttırılmasıyla doğrultu boyunca ilerler (Şekil 1.21). Bu yöntemin uygulanabilmesi için, araştırma alanındaki temel yansıtıcı yüzeyin yatay veya eğiminin çok az olması gerekmektedir (Reynolds, 1997).



Şekil 1.21. Geniş Açılı Yansıma ve Kırılma Ölçümleri (GAYK) yönteminin şematik gösterimi

1.17.3.2. Ortak Derinlik Noktası (ODN) Ölçümleri

Geniş Açılı Yansıma ve Kırılma 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 1.22) (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.



Tx , Tx' , Tx'' : Verici Antenler
Rx , Rx' , Rx'' : Alıcı Antenler

Şekil 1.22. Ortak Derinlik Noktası (ODN) yönteminin şematik gösterimi

1.18. GPR (Yer Radarı) Yönteminde Modelleme

Diğer jeofizik yöntemlerde ve yer radarı yönteminde modelleme yapılmasının genel amacı; araştırma yapılan ortamda anomaliye neden olan kaynağın veya yapının şeklini, büyüklüğünü, cinsini ve uzunluğunu doğru yorumlayabilmektir.

Araştırılan arazideki 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 nedenle bilgisayar yardımıyla geometrisini ve ortam şartlarını kendimizin belirlediği modeller oluşturup, bu modellerin nasıl belirttiğini belirleriz. Elde edilen modellerle araziden alınan veriler karşılaştırılır. Radargramın yorumlanmasında da karşılaştırma sonuçlarından yararlanır. Böylelikle yorumlamada hem kolaylık, hem de doğruluk oranı artırılmaya çalışılır. Yorumlama yaparken karşılaşılan en önemli sorunlardan biri, elde edilen radargramların karmaşık olması ve aranan hedef yapı-ortam özelliklerini her zaman doğru yansıtmamasıdır.

Yer radarı yöntemindeki modellemeyle, 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 arazi 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 imkân tanımaktadır (Conyers ve Goodman, 1997).

Yer radarı (GPR) yönteminde kullanılan modelleme tekniklerinden bazıları;

- Işın izleme algoritması
- Fourier yöntemi
- Zaman ortamı sonlu farklar yöntemi

Bu yöntemlerden 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 antenin 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 dâhil edilmesiyle gerçekleştirilir (Roberts ve Daniels, 1997). Bilgisayara model ortamında bulunan yapıların fiziksel özellik ve geometrileri girilerek, çeşitli ara yüzelerde 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 radargramlarda farklı renk paletleri tercih edilebilir (Conyers ve Goodman, 1997).

GPR yönteminde modelleme yaparken dikkat edilmesi gereken hususlar:

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

• Seçilen anten frekansı ile model geometrisinin konulacağı derinlik uyumlu olmalıdır. 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.

• Yüze yakın modeller için yüksek frekans, derinde olan modeller için düşük frekanslı anten seçilmelidir. Derinde bir model oluşturup yüksek frekans seçildiğinde de radargramda istenilen anomali görüntülenemez ve yine aynı sonuçlarla karşılaşılır.

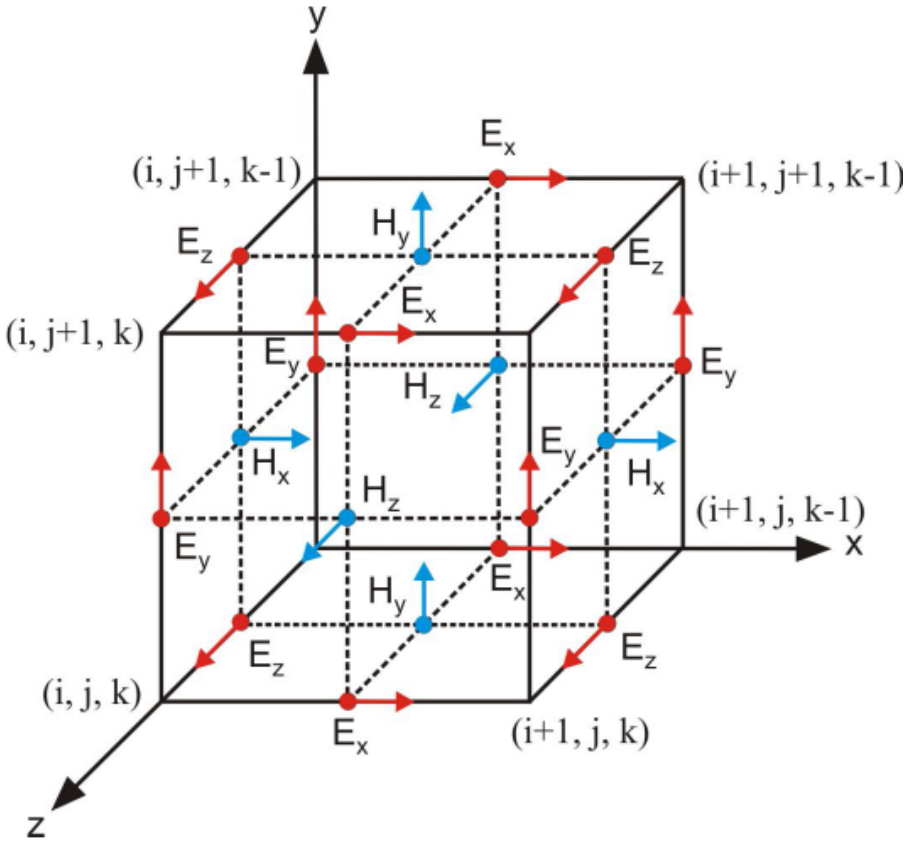
❖ GPR modellemesinde dikkat edilmesi gereken diğer bir husus ise soğurucu sınır koşullarıdır. Gerçekte sınırsız bir ortamda ölçüm alınırken, modelleme yaparken belirli sınırlar içerisinde modelleme yapılmaktadır. Bu durumda da sınırlar bir yansıtıcı kaynak gibi davranıp bu sınırlardan yansımalar neden olmaktadır. Dikkat edilmediği takdirde yanlış yorumlamaya neden olur. Bu durumu düzeltmek için soğurucu sınır koşullarının rolü, sınıra çarpan herhangi bir dalgayı ortadan kaldırmak ve ortamı sınırsız bir model haline getirmektir.

❖ Ayrıca elektriksel iletkenlik (σ), manyetik geçirgenlik (μ), ve dielektrik geçirgenlik (ϵ) değerlerinin doğru seçilmesi gerekmektedir. İletken bir ortamda elektromanyetik (EM) dalga sönümünden dolayı modelin içerisinde bulunduğu ortamın iletkenliği düşük seçilmelidir. Aksi takdirde elektro manyetik dalga sönümlenir ve model geometrisi elde edilen radargramlarda görüntülenemez. Aynı zamanda yapı - ortam arasındaki empedans farkı ne kadar fazla ise model yapı radargramlarda daha belirgin ortaya çıkar.

1.18.1. Zaman Ortamında Sonlu Farklar Yöntemi (FDTD)

Bilgisayar teknolojinin gelişmesiyle birlikte son yıllarda 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 ayrıştırılmasına 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 1.23). 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 1.23).



Şekil 1.23. Elektrik ve manyetik alan vektör bileşenlerinin Yee'nin hesaplama ağı üzerindeki konumları (Giannopoulos, 2005).

1.18.2. Yee Algoritması

Yee (1966), Maxwell'in zamana bağlı rotasyonel denklem sistemleri için enerji kaybının olmadığı materyallerin varlığı durumunda 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).

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 sağlanması açısından küpler eşit büyüklüklerde düzenlenmektedir. Elektrik ve manyetik alan bileşenlerinin konumları şekil 1.23'te görüldüğü gibi olmaktadır.

1.18.3. Sonlu Farklar Yöntemi

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

$$f(a) = f(x) + f'(x)(a - x) + f''(x)(a - x)^2 \frac{1}{2!} + f'''(x)(a - x)^3 \frac{1}{3!} + 0(\delta^4) \quad (1.73)$$

olarak tanımlanır. Denklemden de görüldüğü üzere türevin derecesi arttıkça değer düşmekte ve ihmal edilmektedir. (1.73) bağıntısında x yerine x_i ve a yerine x_{i+1} yazılıp gerekli hesaplamalar yapıldıktan sonra,

ikinci dereceden ileri fark denklemi;

$$f'(x_i) = \frac{f(x_{i+1}) - f(x_i)}{x_{i+1} - x_i} - 0(\delta^2) \quad (1.74)$$

ve ikinci dereceden geri fark denklemi;

$$f'(x_i) = \frac{f(x_i) - f(x_{i-1})}{x_i - x_{i-1}} - 0(\delta^2) \quad (1.75)$$

olarak verilir. Buradaki (1.75) denklemi (-) ile çapılıp ileri ve geri fark denklemleri alt alta toplanarak merkezi fark denklemi elde edilir. Buna göre ikinci dereceden merkezi fark denklemi;

$$f'(x_i) = \frac{f(x_{i+1}) - f(x_{i-1})}{x_{i+1} - x_{i-1}} \quad (1.76)$$

olarak hesaplanır (Kurt vd., 2009).

1.18.4. 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;

$$f'(t_i) = \frac{f(t_{i+1}) - f(t_{i-1}))}{\Delta t} \quad (1.77)$$

ve dördüncü dereceden merkezi fark denklemi;

$$f'(x_i) = \frac{-f(x_{i+2}) + 27f(x_{i+1}) - 27f(x_{i-1}) + f(x_{i-2}))}{24\Delta x} \quad (1.78)$$

olarak yazılır (Kurt vd., 2009).

1.18.5. 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.

$$\frac{\partial H_y}{\partial z} = -\varepsilon \frac{\partial E_x}{\partial t} - \sigma E_x \quad (1.79)$$

denklemi zaman ve konum değerleri eklenerek ifade edilirse;

$$\frac{\partial H_y^{n+\frac{1}{2}}(k)}{\partial z} = -\varepsilon(k) \frac{\partial E_x^{n+\frac{1}{2}}(k)}{\partial t} - \sigma(k) E_x^{n+\frac{1}{2}}(k) \quad (1.80)$$

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

$$E_x^{n+1}(k) = \frac{2\varepsilon(k)-\sigma(k)\Delta t}{2\varepsilon(k)+\sigma(k)\Delta t} E_x^n(k) - \frac{2\Delta t}{(2\varepsilon(k)+\sigma(k)\Delta t)\Delta z} \left(H_y^{n+\frac{1}{2}} \left(k + \frac{1}{2} \right) - H_y^{n+\frac{1}{2}} \left(k - \frac{1}{2} \right) \right) \quad (1.81)$$

gereken elektrik alan bileşeni elde edilmiş olur (Kurt, 2009). (1.81) 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;

$$\frac{\partial E_x}{\partial z} = -\mu \frac{\partial H_y}{\partial t} \quad (1.82)$$

Maxwell denklemi zaman ve konum değerleri eklenerek düzenlenir ve hesaplamalar yapılır;

$$H_y^{n+\frac{1}{2}} \left(k + \frac{1}{2} \right) = H_y^{n-\frac{1}{2}} \left(k + \frac{1}{2} \right) - \frac{\Delta t}{\mu(k)\Delta z} (E_x^n(k+1) - E_x^n(k)) \quad (1.83)$$

gereken manyetik alan bileşeni elde edilir. (1.83) 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 (Kurt, 2009).

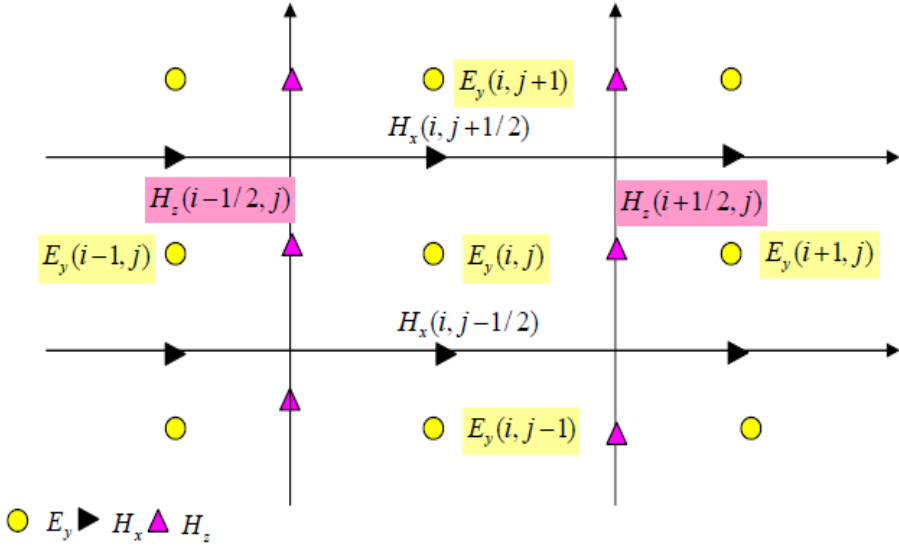
1.18.6. İki Boyutta Maxwell Denklemleri

GPR yönteminde ortamın 2B olması durumunda, önceki bölümlerde Maxwell denklemlerinden ve TE, TM modlarından bahsedilmişti. Burada TE ve TM modları için Maxwell denklemleri sonlu farklar ile kısaca ifade edilecektir.

1.18.6.1. TM Modu Bileşenlerinin Sonlu Farklar ile Hesaplanması

2 boyutlu (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 1.24).



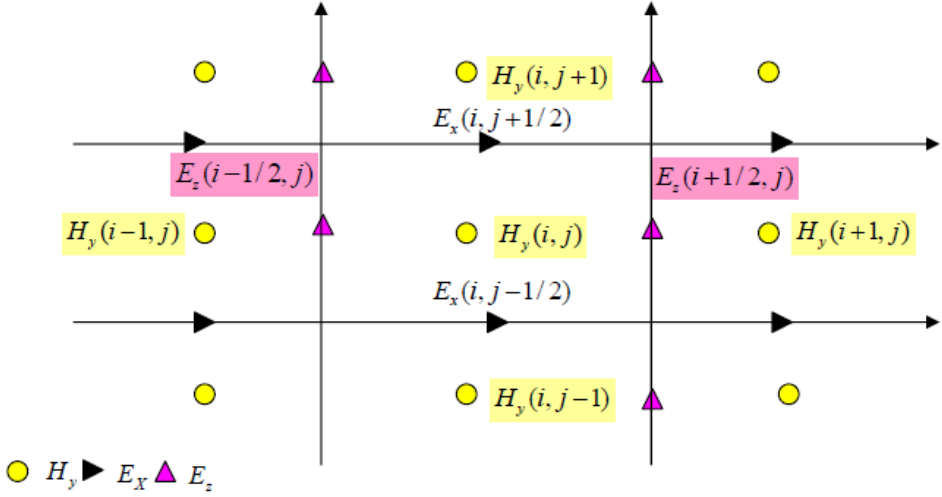
Şekil 1.24. TM modunda elektrik ve manyetik alanların i, j koordinatlarında gösterimi (Lee ve Teixeira, 2006).

Elektrik alanın (E_y) x yönündeki değişimi için sonlu farklar denklemini, Elektrik alanın (E_y) z yönündeki değişimi için sonlu farklar denklemini ve Elektrik alanın (E_y) z yönündeki değişimi için sonlu farklar denklemini elde etmek için; elektrik alan ve manyetik alan içeren terimler, zamana ve konuma göre türevleri 2. dereceden merkezi farklara göre açılır daha sonra bu denklemlerde gerekli hesaplamalar ve düzenlemeler yapılırsa; söz konusu ilgili denklemler elde edilir (Kurt, 2009).

Manyetik alanın x ve z yönündeki değişimi için sonlu farklar denklemini elde etmek için; ilgili denklem zamana ve koordinatlara bağlı yazılıp, denklemdaki terimler açılır daha sonra bu denklemlerde elektrik alan yalnız bırakıldığında söz konusu denklemler elde edilir (Kurt, 2009).

1.18.6.2. 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 1.25).



Şekil 1.25. TE modunda elektrik ve manyetik alanların i, j koordinatlarında gösterimi (Lee ve Teixeira, 2006)

İlgili denklemler kullanılarak benzer şekilde eşitlikler çıkarılırsa; H_y ve E_x E_z hesaplanır (Lee ve Teixeira, 2006; Kurt, 2009).

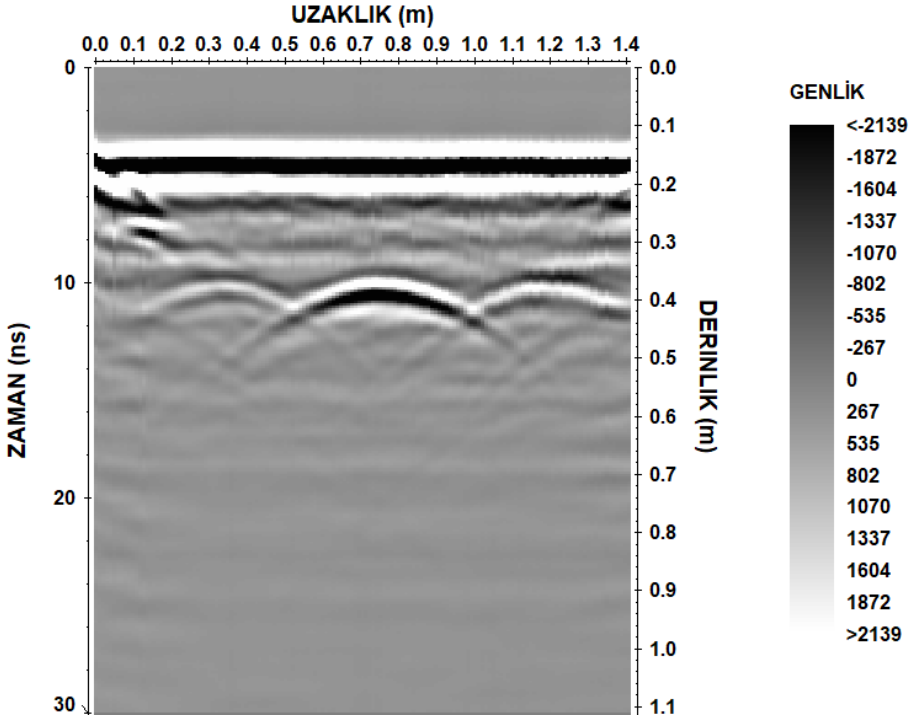
1.18.7. Sınır Koşulları

EM saçılma ve ışınma problemlerinde uzay bölgesi 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, yanıltıcı 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.

1.19. GPR (Yer Radarı) Verilerine Uygulanan Veri İşlem Adımları

GPR yönteminin doğası 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 1.26'da 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. 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.



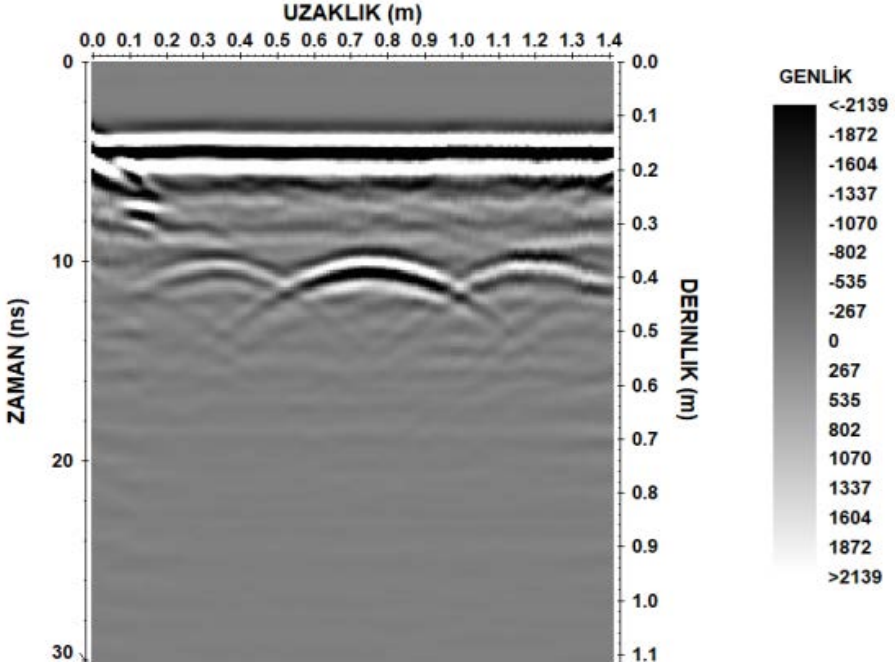
Şekil 1.26. Ham yer radarı verisi

1.19.1. Temel Veri İşlem Adımları

1.19.1.1. Dewow (Düşük Frekanslı İzlerin Giderilmesi)

Düşük frekanslı izlerin giderilmesini (Dewow) amaçlayan süzgeçleme yöntemi veriden gürültüyü uzaklaştırmak ve doğru GPR 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 hesaplanması için zaman penceresi için bir zaman değeri girilmelidir.

İlk aşama olarak ham veriye Dewow uygulanması; şekil 1.27 'ye bakıldığında, Dewow işlemi uygulandıktan sonra izdeki değişim görülmektedir. Uygulanan bu veri işlem ile ilgili daha geniş açıklama Gerlitz vd., (1993)'de bulunabilir (Annan, 2001).



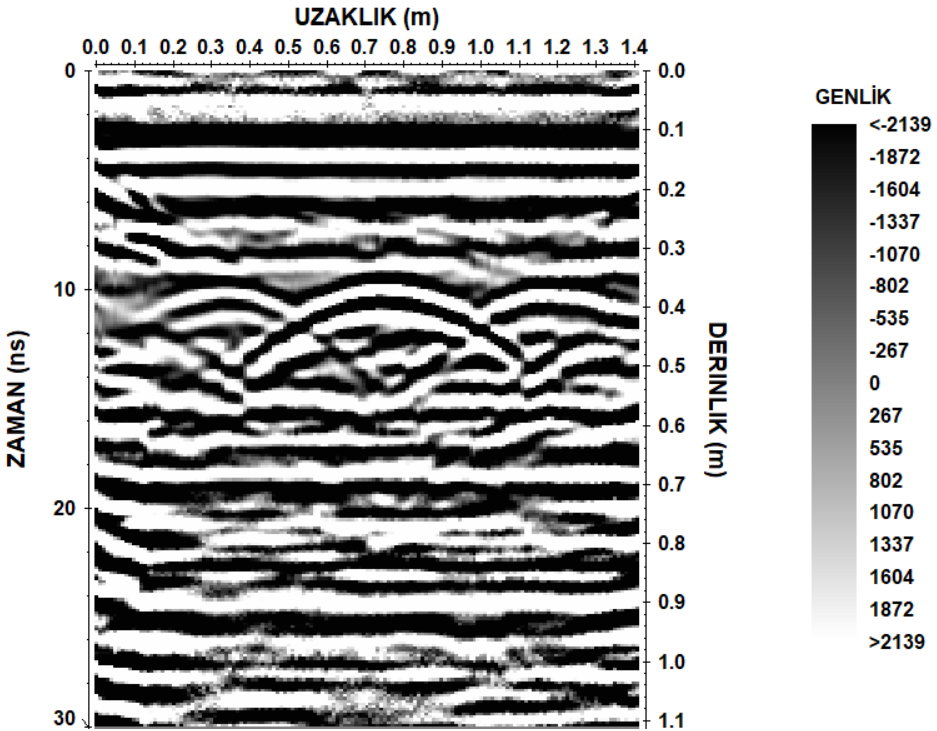
Şekil 1.27. Şekil 1.26'daki ham yer radarı verisine Dewow işlemi uygulanmış yer radarı kesiti

1.19.1.2. 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 (Mertzanides vd., 2003). Kazanç, GPR kesitlerinin görünürlüğünü 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, 2009). Geometrik açılım ve sinyal soğrulmasının 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 soğrulma kayıpları fonksiyonda artı bir faktör olarak içerebilir (db/m) fakat bunların etkili olabilmeleri için düzgün soğrulma bilgisi gerektirir. Bu durum ODN ve GAYK yöntemleriyle elde edilmede bile zor olabilir ve uygun bir öncü bilgi veya 'en iyi tahmin' kullanılır.

Şekil 1.27'deki Dewow yapılmış kesite kazanç fonksiyonlarından Energy Decay uygulandıktan sonra elde edilen radargrama bakıldığında kazanç işlemlerinin önemi anlaşılacaktır (Şekil 1.28).

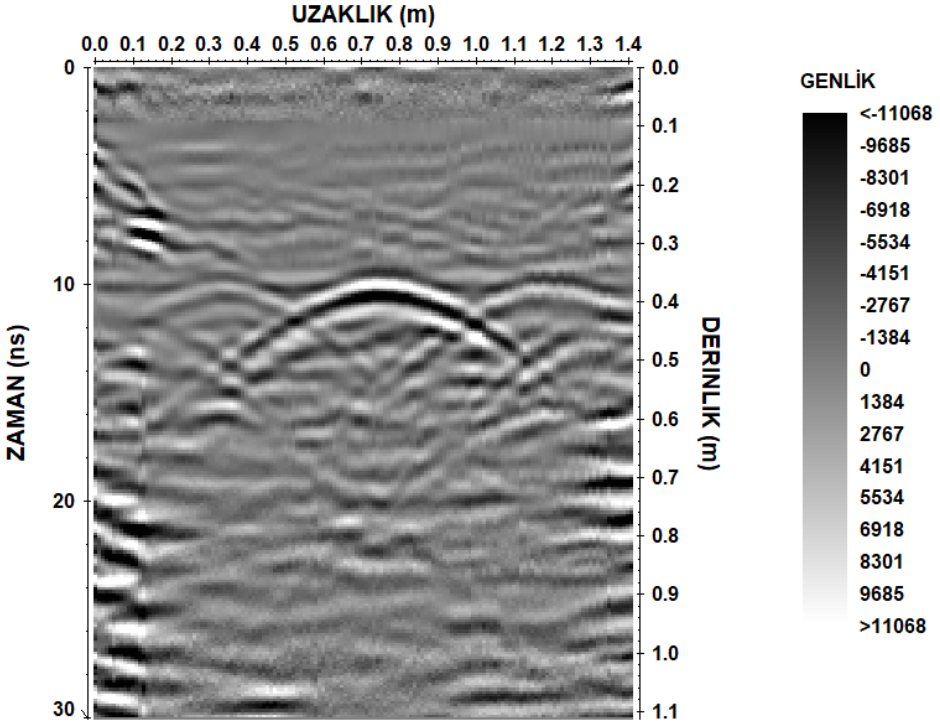


Şekil 1.28. Dewow yapılmış şekil 1.27'deki yer radarı kesitine kazanç fonksiyonlarından energy decay uygulandıktan sonra elde edilen radargram

1.19.1.3. Background Removal

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

Yer radarı 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 maskeleymektedirler. Bundan dolayı 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 1.29) (Kim vd. 2007). Ringing etkisini gidermek için kullanılan birçok teknikten birisi de Background Removal’dır.



Şekil 1.29. Genlik kazancı (energy decay) uygulanmış şekil 1.28’deki kesite background removal uygulandıktan sonra elde edilen radargram

Radargram kesitlerinin daha düzgün görünmelerini sağlamak için; veri taşımayan kısımlar radargramdan kesilip atılabilmektedir. Bu durumda kesitte sadece hedef yapı veya ortam ile ilgili bilgi taşıyan kısımlar tutulabilmektedir.

Elektromanyetik (EM) 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 boru gibi olan metalik, plastik, beton gibi alt yapı elemanlarının yer radarı kesitlerindeki görünümü hiperbol şeklindedir. Gerçek araziden elde edilen yer radarı radargramlarında saptanan hiperbolik yansımaların ne tür elemandan kaynaklandığı konusunda deneyim kazanmak ve bilgi sahibi olmak için modelleme çalışmaları yararlı olmaktadır.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Günlük yaşamda kullanılan su, insan hayatında çok önemli bir yere sahiptir. İlgili şehir belediyesi ve müdürlüğü tarafından vatandaşlarına sunulan içme suyu hizmeti, yeraltına döşenen sistemler sayesinde yapılmaktadır. Zamanla bu sistemlerde problemler (tıkanma, su sızdırma, çürüme, paslanma) meydana gelmektedir. Meydana gelen problemlerin en kısa sürede çözüme kavuşturulması vatandaşlar tarafından istenilen bir durumdur. Ancak altyapı sistemlerindeki karmaşık ve belirsiz döşeme şekilleri, meydana gelen problemi bulmakta zorluklar yaşatmaktadır. Dolayısıyla bu problemleri bulup çözmek bazen günlerce sürmektedir. Problemleri çözüme kavuşturmak için hem insan kaynağı hem de makine ekipmanların kullanımında ciddi maliyet artışları ortaya çıkmaktadır. Bu maliyetler ülke ekonomisine önemsenecek miktarda bir yük getirmektedir. Ayrıca günlük yaşamı önemli ölçüde aksatmaktadır. Aynı şekilde yerleşim yerlerindeki atık suların tahliye edilmesinde de kanalizasyon altyapı sistemleri kullanılmaktadır. Bu sistemler koruge, PVC gibi borular vasıtasıyla gerçekleştirilmektedir. Kullanıma bağlı olarak ve boruların malzeme yapısı gereği bu sistemlerde de problemler ortaya çıkmaktadır. Dolayısıyla bu problemlerin çözülmesi için de ciddi kaynaklar harcanmaktadır. Birçok kez bu problemler vatandaşın beklediği süre içerisinde çözülememektedir. Hem temiz su hem de atık su sistemlerinde meydana gelen problemleri çözmek için, problemlili olduğu düşünülen yer kazılmaktadır. Bu kazma işlemi hem maliyetleri arttırmakta hem de kazı sırasında o alanda bulunan başka altyapı sistemlerine de (telekomünikasyon, elektrik, doğalgaz vb.) zararlar verebilmektedir. Sonuçta ikinci bir maliyet emek, zaman ve kaynak ortaya çıkmaktadır.

Yaşanan tüm bu problemlerin en kısa zamanda, en az maliyetle ve en hassas bir şekilde giderilmesi ekonomik ve sosyal kazanımlarla sonuçlanacaktır. Buna yönelik olarak öncelikle problemlili olan alt yapı sisteminin yeri ve derinliğinin bilinmesi gerekir. Ancak ülkemizde çoğu ilgili kurumlarda belirli bir plan dâhilinde olmadığı için bu bilgilere ulaşmak oldukça zor olmaktadır. Yeri ve derinliği bilinmeyen alt yapı sistemlerinin yüzeyden hiçbir hasar/delgi yapmaksızın yer radarı yöntemiyle belirlemek mümkündür. Çalışma kapsamında, arazide yapılan altyapı sistemleri ile ilgili çalışmaları daha doğru yorumlamaya yardımcı olması için; bu yöntem kullanılarak modelleme, laboratuvar ve arazi çalışmaları yürütülerek konu edilen temiz ve atık su iletimini sağlayan borulardaki problemler incelenmiştir. Amaçlanan çalışmalara başlamadan önce; Trabzon Büyükşehir Belediyesi Trabzon İçme Suyu ve Kanalizasyon İdaresi (TİSKİ) ile görüşülmüş, temiz ve

atık su altyapı sistemlerinin döşenme şekli, derinliği, cinsi ve çevreleyen malzeme hakkında bilgi alınmıştır.

Yürütülen laboratuvar ve arazi çalışmalarında Mala Geosicene Proex kontrol birimi ile 500 ve 800 MHz merkez frekanslı korumalı antenler kullanılarak toplanmıştır. Ayrıca belirli derinlikte olan bu boruların hangi merkez frekansına sahip antenle araştırma yapılmasının daha iyi sonuçlar vereceğini anlamak için yapılmıştır.

2.1. Modelleme Çalışmaları

Araştırma kapsamında, laboratuvar çalışmalarına ve özellikle arazi çalışmalarına ışık tutması için Reflex-Win programının modelleme modülü kullanılarak tasarlanmış model geometri ve fiziksel özelliklerine göre düz çözümleme çalışmaları yapılmıştır. Bu tür çalışmaların amacı; içi boş (hava dolu) ve içi su dolu PVC boruların (Tablo 2.1) vereceği yansıma hiperbollerinin birbirine göre olan genlik ve polarite farklılığını irdelemek içindir. Bu araştırmanın tüm aşamalarında yürütülen çalışmaların uyumlu olması için, modelleme çalışmasında; laboratuvarında kullanılan ıslak kum dolgu malzemesinin ve arazide mevcut olan boruların etrafına konulan yine ıslak olan kumun dielektrik özellikleri (Tablo 2.2) kullanılmıştır. Düz çözümleme hesaplamaları öncesi oluşturulan model geometrisindeki boruların et kalınlıklarını tanımlayabilmek için; iç içe olacak şekilde iki çember konulmuştur. Oluşturulmaya çalışılan et kalınlığı için; içteki çemberin yarıçapı, et kalınlığı kadar dıştaki çemberin yarıçapından küçük alınmıştır (Tablo 2.2).

Tablo 2.1. Modelleme çalışmalarında borular tanımlanırken uygulanan yöntem

Boru (İç İçe İki Çember)		Çemberin İçi	Çemberin Dışı
Boş PVC Boru	Dış Çember	PVC	Islak Kum
	İç Çember	Hava	PVC
İçi Su Dolu PVC Boru	Dış Çember	PVC	Islak Kum
	İç Çember	Su	PVC
Çelik Boru	Dış Çember	Çelik	Islak Kum
	İç Çember	Hava	Çelik
Koruge Boru	Dış Çember	Koruge	Islak Kum
	İç Çember	Hava	Koruge

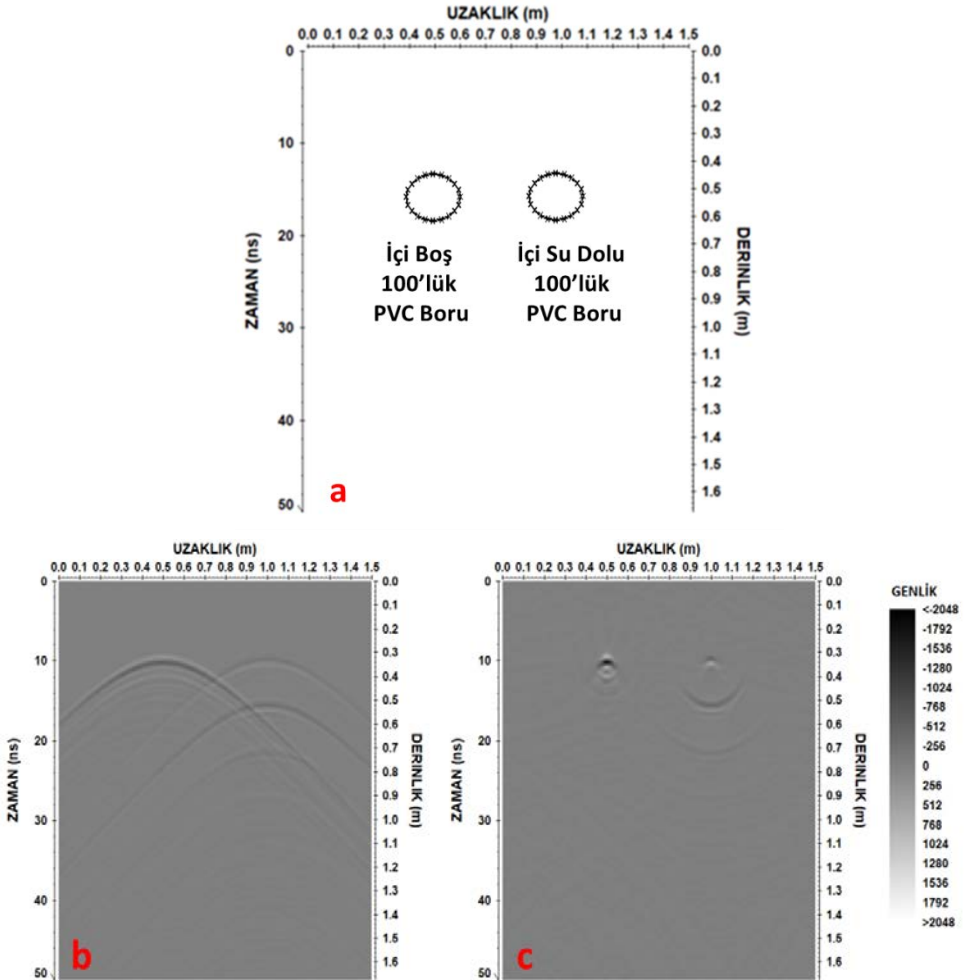
Tablo 2.2. Modelleme çalışmalarında oluşturulan modellerin parametreleri

Model No	Malzeme	ε (F/m)	σ (S/m)	μ (H/m)	Yarıçap (m)	x merkez (m)	z merkez (m)	Tmax	Frekans	
Model 1	1. Boru	Islak Kum	20	0.01	1	-	-	50	500	
		İçi Boş (hava dolu) PVC Boru (içteki)	1	0	0	0.048	0.5			0.3
		İçi Boş PVC Boru (dıştaki)	3	0.006	0	0.05	0.5			0.3
	2. Boru	Islak Kum	20	0.01	1	-	-			-
		İçi Su Dolu PVC Boru (içteki)	80	0.0005	0	0.048	1			0.3
		İçi Su Dolu PVC Boru (dıştaki)	3	0.006	0	0.05	1			0.3
Model 2	1. Boru	Islak Kum	20	0.01	1	-	-	20	800	
		İçi Boş (hava dolu) PVC Boru (içteki)	1	0	0	0.048	0.5			0.3
		İçi Boş PVC boru (dıştaki)	3	0.006	0	0.05	0.5			0.3
	2. Boru	Islak Kum	20	0.01	1	-	-			-
		İçi Su Dolu PVC Boru (içteki)	80	0.0005	0	0.048	1			0.3

		İçi Su Dolu PVC Boru (dıştaki)	3	0.006	0	0.05	1	0.3		
Mod el 3	1. Boru	Islak Kum	20	0.01	1	-	-	-	20	800
		İçi Boş (hava dolu) PVC Boru (içteki)	1	0	0	0.048	0.5	0.3		
		İçi Boş PVC boru (dıştaki)	3	0.006	0	0.05	0.5	0.3		
	2. Boru	Islak Kum	20	0.01	1	-	-	-		
		İçi Boş (hava dolu) Çelik Boru (içteki)	1	0	0	0.048	0.75	0.3		
		İçi Boş Çelik Boru (dıştaki)	5.15	10	0	0.05	0.75	0.3		
	3. Boru	Islak Kum	20	0.01	1	-	-	-		
		İçi Boş (hava dolu) Koruge Boru (içteki)	1	0	0	0.048	1.2	0.3		
		İçi Boş Koruge Boru (dıştaki)	3.23	0	0	0.05	1.2	0.3		

2.1.1. Modelleme Çalışması-1

Modelleme çalışmalarında yapılan ilk tasarı için şekil 2.1 b ve c’ de gösterilen radargramda içi boş (hava dolu) ve içi su dolu 10 cm çapındaki (100’lük) PVC borular (şekil 2.1 a) uzaklık ekseninde sırasıyla 0.5 m ve 1 m’lerde, 30 cm derinliğe yan yana konulmuştur. Hesaplamalarda 500 MHz frekansa sahip anten seçilmiştir. Bu hesaplamalarda kullanılan diğer büyüklükler “Model 1” olarak isimlendirilip tablo 2.2’ de verilmiştir.

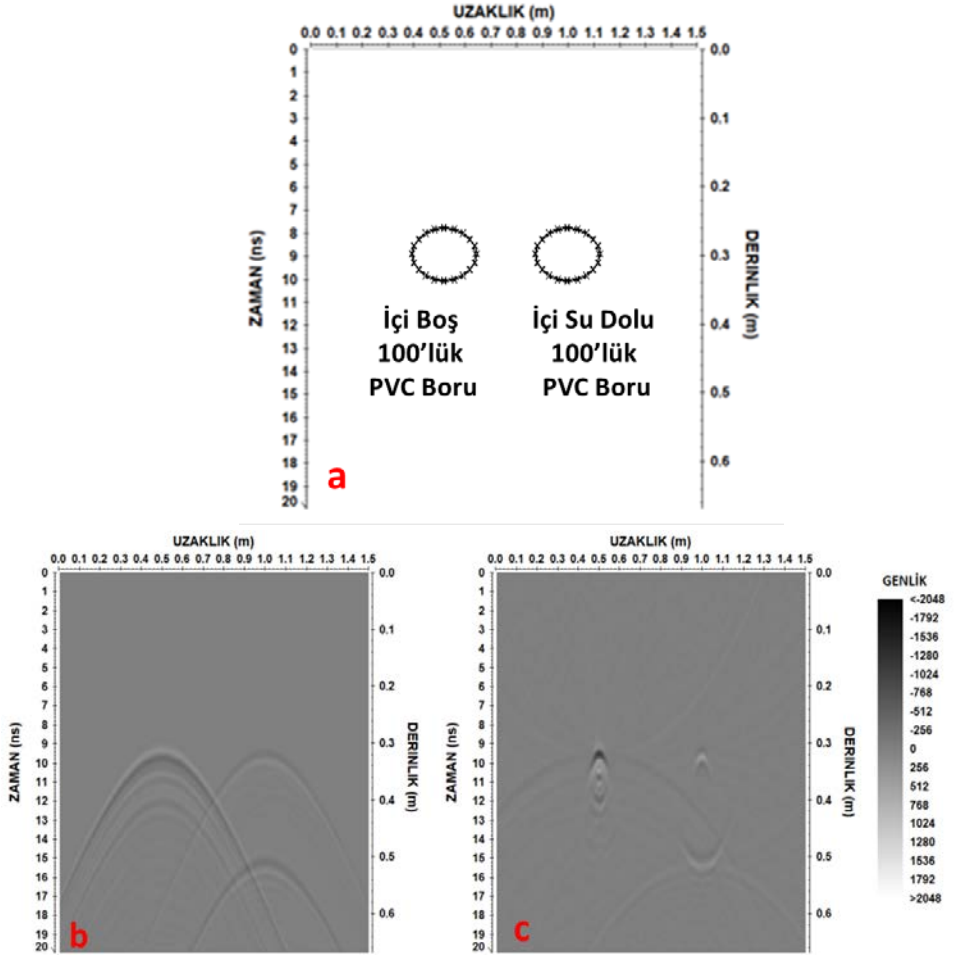


Şekil 2.1. a) “Model 1” in yeraltı geometrisi, b) “Model 1” nin 500 MHz anten kullanılarak elde edilen yapay radargramı, c) b’deki radargramın f-k migrasyonu uygulanması sonucu elde edilen radargram

Şekil 2.1. b' de genliği yüksek ilk hiperbol içi boř (hava dolu) borunun, genliği dūřuk ikinci hiperbol ise içi su dolu borunun vermiş olduğu yansımalarıdır. Bu radargramdaki saçılmış yansımaların gerçek yerlerine toplanması amacıyla f-k migrasyonu (hız; $v=0.067$ m/ns alınmıştır) uygulanmıştır (Şekil 2.1 c).

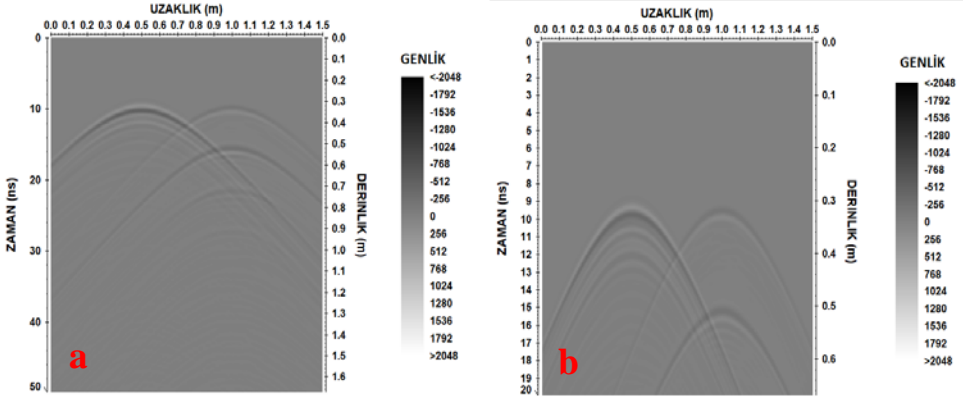
2.1.2. Modelleme alışması-2

Tablo 2.2'de "Model 2" ile tanımlanan bu modelleme çalışmasında, Model 1'deki aynı koşullar ve geometri dikkate alınarak 800 MHz merkez frekanslı anten kullanılması durumunda nasıl radargram görüntüsü elde edilebileceği incelenmiştir. Bu koşullarda elde edilen radargram ve migrasyon sonucu Şekil 2.2 b ve c' de görülmektedir. Anten frekansı arttıķa oznrlğn artması nedeniyle daha belirgin bir görünüm elde edilmiştir.



Şekil 2.2. a) “Model 1” in yeraltı geometrisi b) 800 MHz anten kullanılarak elde edilen yapay radargramı, c) b’ deki radargramın f-k migrasyonu uygulanması sonucu elde edilen radargram

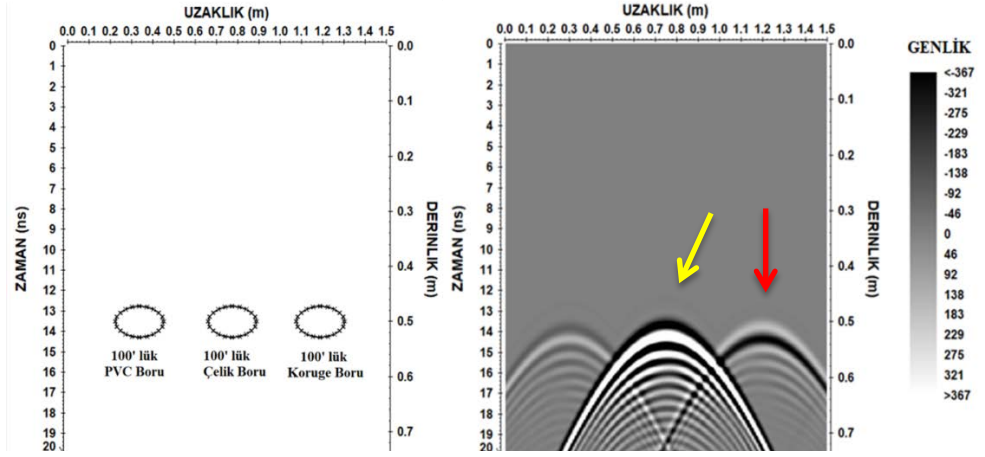
Aynı yeraltı geometrisine sahip “Model 1” ve “Model 2” için hem 500 MHz hem de 800 MHz merkez frekanslı antenler kullanılarak elde edilen radargramlar (Şekil 2.3) karşılaştırıldığında her iki anteninde ortam koşullarının homojen olması nedeniyle oldukça iyi sonuçlar verdiği görülmektedir. Ayrıca çalışmanın amacına yönelik olarak; iç i boş ve iç i su dolu PVC boruların verdiği yansıma hiperbollerinin genlikleri kıyaslandığında boş boruya ait hiperbolün sinyal genlikleri, su dolu boruya ait hiperbolün genliklerine göre daha yüksek olduğu ilgili radargramlarda görülmektedir (Şekil 2.3).



Şekil 2.3. “Model 1” için 500 MHz (a) ve 800 MHz (b) anten frekansları kullanılarak elde edilen radargramlar

2.1.3. Modelleme Çalışması-3

Modelleme çalışmalarında yapılan üçüncü tasarı için şekil 2.4’ te (solda) gösterilen model geometrisinde sırasıyla içi boş (hava dolu) 10 cm çaplarındaki (100’ lük) PVC, çelik ve koruge borular uzaklık ekseninde sırasıyla 0.3 m ve 0.75 m ve 1.2 m’lerde, 50 cm derinliğe yan yana konulmuştur. Dolgu malzemesi olarak kullanılan ıslak kuma ait fiziksel özellikler {dielektrik geçirgenlik (ϵ), elektrik iletkenlik (σ) ve manyetik geçirgenlik (μ)} kullanılmıştır. Hesaplamalarda 800 MHz merkez frekansına sahip anten seçilmiştir. Bu hesaplamalarda kullanılan diğer parametreler “Model 3” olarak isimlendirilip tablo 2.2’de verilmiştir.



Şekil 2.4. Model 3'e ait yeraltı geometrisi ve elde edilen yapay radargram

Radargramdaki hiperboller karşılaştırıldığında; boruların fiziksel özellikleri (ϵ , σ , μ) farklı olduğundan hiperbollerin sinyal genlikleri de farklı görülmüştür. Hiperbollerde en düşük genliği PVC boru, en yüksek genliği ise çelik boru (sarı okla gösterilen) göstermiştir. Koruge borunun vermiş olduğu hiperbolün (kırmızı okla gösterilen) sinyal genliği PVC boruya göre yüksek, çelik boruya göre düşük izlenmiştir (Şekil 2.4).

2.2. Laboratuvar Çalışmaları

Gerçek arazi koşullarına yakın ortam sağlamak amacıyla metal ve plastik aksamı deney sandıkları oluşturularak dolgu malzemesi olarak dişli siyah kum (kum tanelerinin boyutları 0 ile 3 mm aralığında) kullanılmıştır. Laboratuvar çalışmalarında, KTÜ Mühendislik Fakültesi Jeofizik Mühendisliği Uygulamalı Jeofizik Laboratuvarındaki Mala/Ramac GPR sistemleri (CU II ve Proex) ile 500 ve 800 MHz merkez frekanslı korumalı antenler (Şekil 2.5) kullanılarak yer radarı (GPR) verileri toplanmıştır.



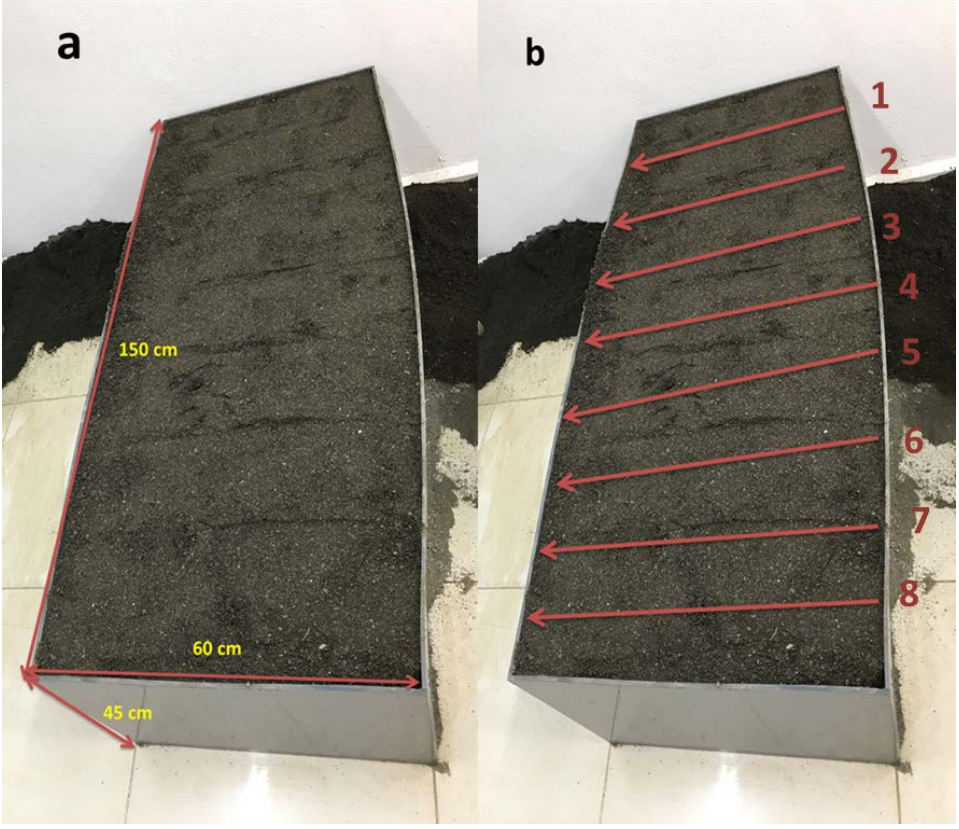
Şekil 2.5. GPR verilerinin toplanmasında kullanılan antenler ve sistemleri

Laboratuvar çalışmaları için yapılan metal aksamli sandığın dıştan dışa ölçüleri: boy; 150 cm, en; 100 cm, derinlik; 120 cm şeklindedir. İçten içe ölçüleri ise: boy; 142 cm, en; 92 cm, derinlik; 116 cm'dir (Şekil 2.6 a). Bu sandığın içerisine doldurulacak malzemenin sandığı dağıtmaması için dik kenarlarına ortalama 20 cm aralıklarla 4 cm kalınlığında metal profillerle çevrilmiştir. Ayrıca sandığın iç kısmı da metal sac levhalarla kaplanmıştır. Bu sandık kullanılarak toplamda 6 adet model oluşturulmuştur. Bu sandık üzerinde yapılan tüm çalışmalarda, 500 MHz antenle 0.3 m aralıklarla 3 profilde ve 800 MHz antenle 0.2 m aralıklarla 5 profilde GPR ölçüleri alınmıştır (Şekil 2.6 b).



Şekil 2.6. a) Laboratuvar çalışmalarının yapıldığı metal deney sandığının ölçüleri ve b) 500 MHz ve 800 MHz antenler ile GPR ölçümlerinin alındığı profiller

Laboratuvar çalışmalarının yapıldığı ikinci sandık plastikten imal edilmiştir. Sandığın ölçüleri: boy;150 cm, en; 60 cm, derinlik; 45 cm şeklindedir (Şekil 2.7 a). Dolgu malzemesi olarak dişli siyah kum (0 ile 3 mm arası boyutlarda) kullanılmıştır. Bu sandık kullanılarak toplamda 3 adet model oluşturulmuştur. Sandık üzerinde 800 MHz merkez frekanslı antenle 0.17 m aralıklarla 8 profilde ölçüler alınmıştır (Şekil 2.7 b).



Şekil 2.7. Laboratuvar çalışmalarının yapıldığı plastik deney sandığının ölçüleri (a) ve 800 MHz anten ile GPR ölçümlerinin alındığı profiller (b)

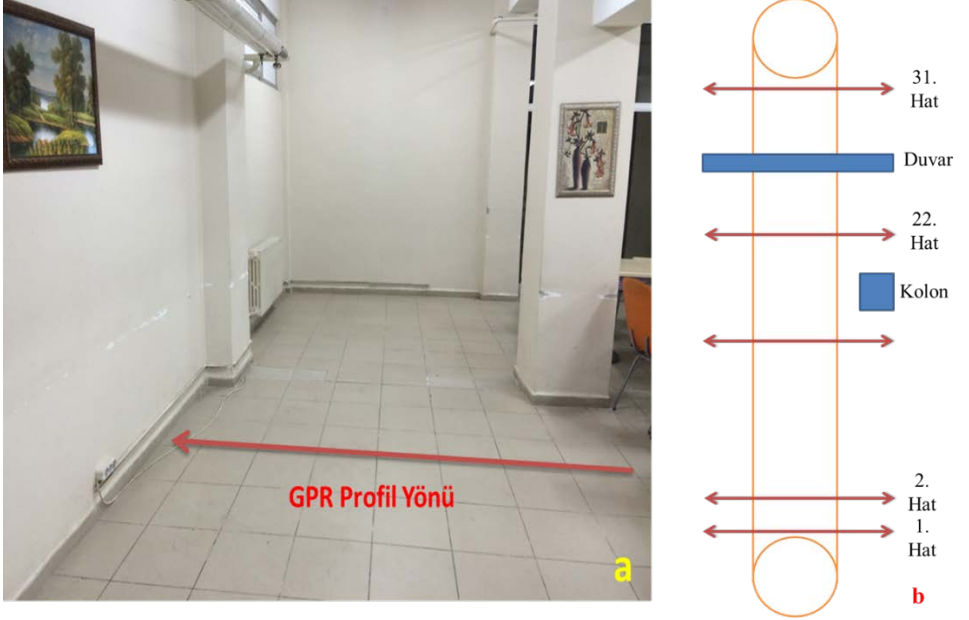
2.3. Arazi Çalışmaları

2.3.1. Çalışma Alanı-1

Gümüşhane Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi kantin tarafındaki lavabo akarlarında nedeni bilinmeyen tıkanıklığın çözülmesi için tıkanıklığın yerinin tespitine yönelik olarak, (GPR) yöntemi kullanılarak problemlili alanın alt yapısı görüntülenmeye çalışılmıştır.

Çalışma alanı, mühendislik fakültesi kantin girişinin sol tarafındaki akar borusunun geçtiği güzergâh üzerinde yer almaktadır (Şekil 2.8 a). GPR ölçüm hat uzunluğu 3.5 m, ölçü hatları aralığı karotaş genişliği (40 cm) ve ölçü alanının uzunluğu kolona kadar 8.4 m, kolondan sonra ise 3.6 m olacak şekilde

akar borusuna dik konumda toplamda 31 hatta (Şekil 2.8 b) ölçümler yapılmıştır.



Şekil 2.8. Gümüşhane Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi'nde bulunan kantindeki çalışma alanı (a) ve alınan ölçüm hatlarının krokisi (b)

2.3.2. Çalışma Alanı-2

Araştırma konusu kapsamında gerçekleştirilen arazi uygulamalarından biri olan Trabzon ili Ortahisar ilçesi Karşıyaka Mahallesi'nde su kaçağı sorunu yaşanan bir güzergâh üzerinde 500 MHz merkez frekanslı anten kullanılarak 13 hatta birbirine paralel olarak 0.5 m ölçüm aralıklı GPR ölçümleri alınmıştır (Şekil 2.9).



Şekil 2.9. Araştırma yapılan çalışma alanı-2'den görünüm



Şekil 2.10. Ölçüler alındıktan sonra kazılan alanın görüntüsü

Ölçüler alındıktan sonra problemin çözümü için, TİSKİ tarafından alan kepçe yardımıyla kazılmış (Şekil 2.9), bakım onarım işleri gerçekleştirilerek üzeri kumla kapatılmıştır.

2.3.3. Çalışma Alanı-3

Trabzon 100. Yıl park alanında bulunan çeşmenin atık su tahliye borusunun çıkış noktasına yakın bir yer arazi uygulaması için 3. alan olarak seçilmiştir. Bu alanda atık su tahliye işlemi için TİSKİ tarafından daha önceden 100'lük (10 cm çapında) PVC boru döşenmiştir.



Şekil 2.11. Çalışma alanı-1'in yer bulduru haritası

Bu çalışma alanında 4 ayrı aşamada veriler toplanmıştır. Her aşamada hem 500 MHz hem de 800 MHz korumalı antenler kullanılmıştır. Bu aşamalar şu şekildedir;

- 1. Aşamada; PVC boru boş iken (herhangi bir su akışı yok) 0.5 m aralıklarla 5'er profil ölçü alınmıştır.
- 2. Aşamada; PVC borunun görünen ucundan yaklaşık 120 cm içerisine doğru tıkama malzemesi (poşet, bebek bezi, peçete) konularak tıkanıklığın olduğu kısımda 1'er profil ölçü alınmıştır. Bu aşamada boru sadece tıkalıdır. İçerisinden su akışı olmamaktadır.
- 3. Aşamada; boru tıkalıyken bu borunun bağlı olduğu çeşmenin musluğu (yaklaşık 200 m ötesinde) açılarak borunun su dolması sağlanmıştır. Boru tamamen su dolduktan 0.5 m aralıklarla 5'er profil ölçü alınmıştır.
- 4. Aşamada; borunun çeşmeye bağlanan güzergahı üzerinde bulunan ve betondan yapılmış merdivenin basamaklarında, her basamakta bir profil olacak şekilde 7'şer profil ölçü alınmıştır.

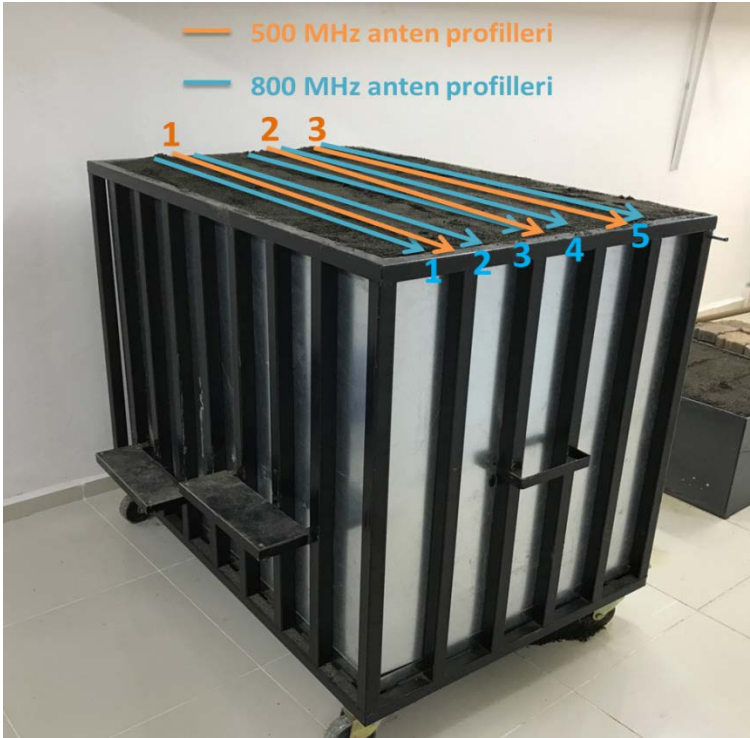
Tüm bu aşamalarda toplanan GPR verilerine de gerekli temel veri işlem adımları uygulanmıştır. Bu verilerin radargram görüntüleri elde edilmiştir.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Şehir veya çeşitli yerleşim alanlarındaki altyapı elemanlarından temiz ve kirli su iletimi için kullanılan farklı tür ve çaptaki borularda yaşanan sorunlar; çalışma alanına herhangi bir hasar vermeyen ve bu hasar vermeme özelliğiyle günlük yaşamı da aksatmayan bir yöntem olan GPR yöntemiyle incelenmesini amaçlayan bu çalışmanın bulguları ayrı ayrı sunulmuştur.

3.1. Laboratuvar Çalışmaları

Bu sandık üzerinde yapılan tüm çalışmalarda, 500 MHz antenle 0.3 m aralıklarla 3 profilde ve 800 MHz antenle 0.2 m aralıklarla 5 profilde GPR ölçüleri alınmıştır (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. Laboratuvar çalışmalarının yapıldığı metal deney sandığında, 500 MHz ile 800 MHz antenler ile GPR ölçümlerinin alındığı profiller

Laboratuvar çalışmalarının yapıldığı bu plastik sandık üzerinde 800 MHz merkez frekanslı antenle 0.17 m aralıklarla 8 profilde ölçüler alınmıştır (Şekil 3.2).

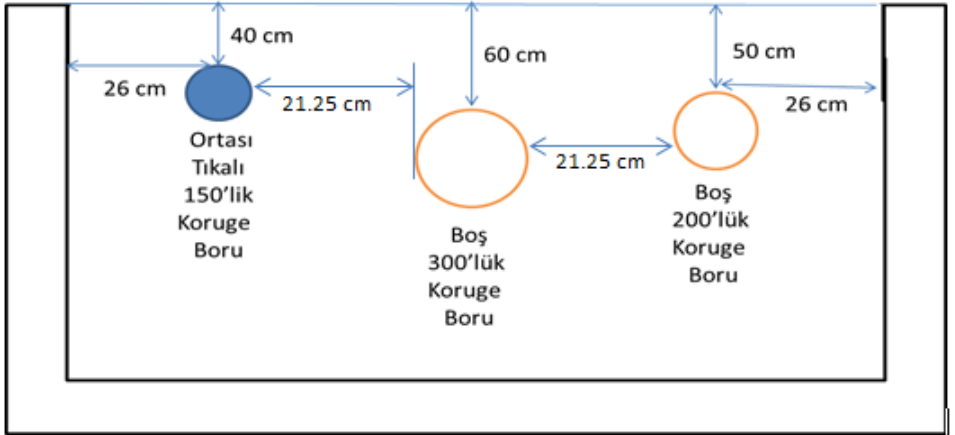


Şekil 3.2. Laboratuvar çalışmalarının yapıldığı plastik deney sandığında, 800 MHz anten ile GPR ölçümlerinin alındığı profiller

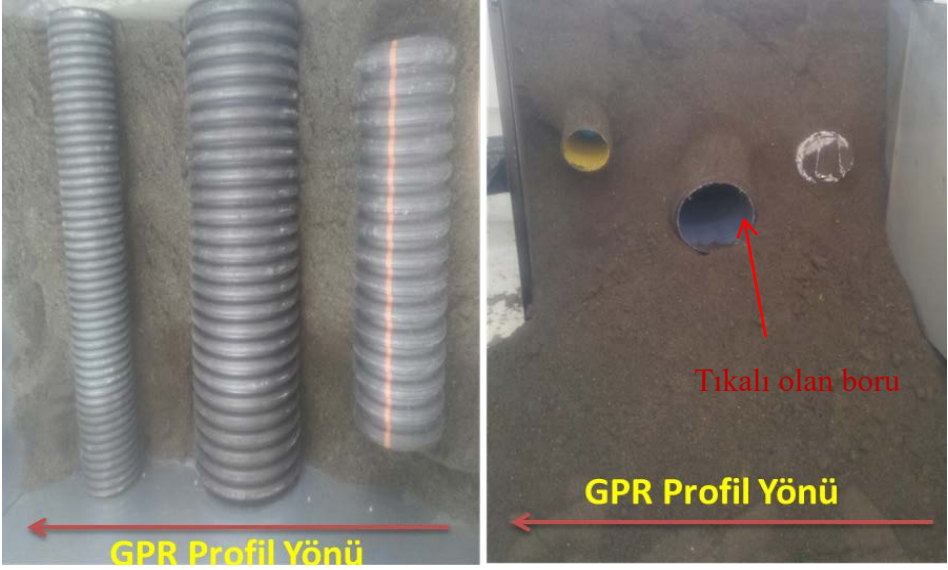
Laboratuvar çalışmalarında kullanılan boruların isimleri altyapı sistemleri ile ilgili kamu kurumunun kullandığı isimlerdir. Boruların çaplarıyla ilgili olarak örneğin; 100'lük PVC borunun çapı: 10 cm, 150'lik koruge borunun çapı: 15 cm, 63'lük sert PVC borunun çapı 6.3 cm, 125'lik borunun çapı 12.5 cm çapa karşılık gelmektedir.

3.1.1. Laboratuvar Model-1

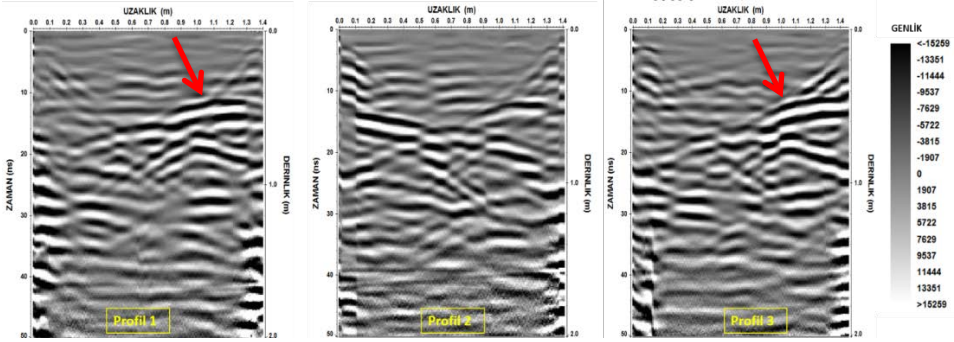
Şekil 3.3' teki 150, 200 ve 300'lük koruge borularıyla oluşturulan bu modelde; 150'lik koruge borusunun orta kısmı tam tıkanacak şekilde ıslak malzemeye (boruya sığacak bir top büyüklüğüne getirilen peçete, bebek bezi ve poşet) yerleştirilmiştir. Diğer iki borunun içerisi boş bırakılmıştır. En sağdaki 200'lük borunun boyu kısa olduğundan içerisine kum dolmaması için ağız kısımları kapatılmıştır (Şekil 3.4). Boruların metal deney sandığı içerisine yerleştirildiği mesafeler ve derinlikler şekil 3.3' te verilmiştir. Tercih edilen derinlikler; arazide uygulanan altyapı sistemlerinin genellikle yaklaşık olarak konuldukları derinliklerdir.



Şekil 3.3. Oluşturulan laboratuvar model-1'e ait parametreler



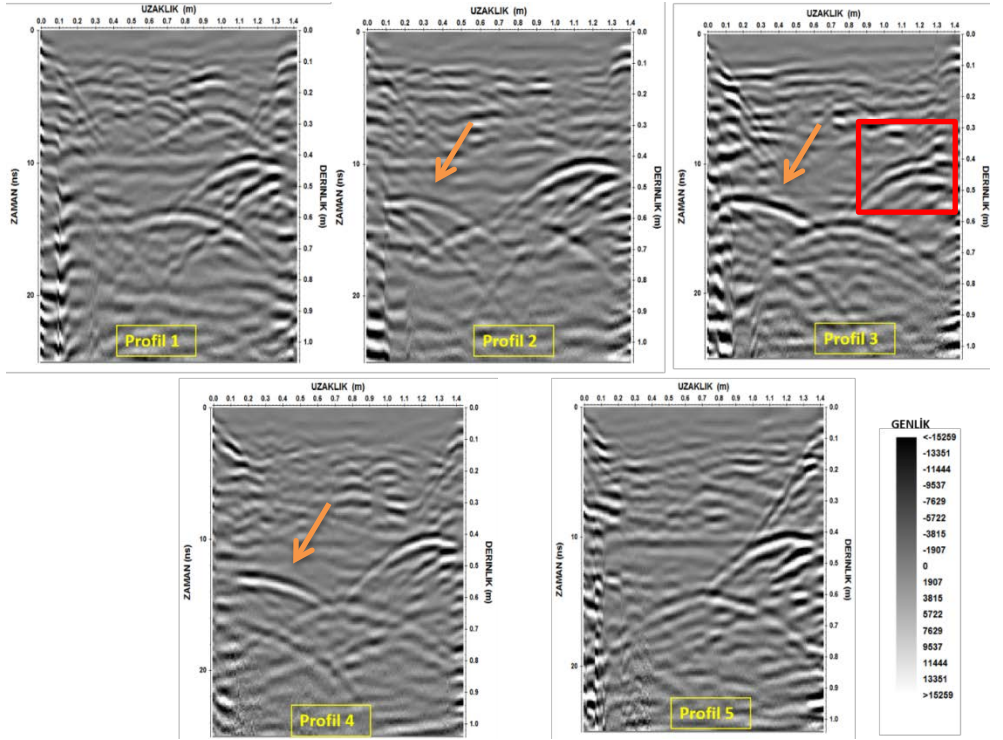
Şekil 3.4. Soldan sağa sırasıyla 150'lik, 300'lük ve 200'lük korige borularla oluşturulan laboratuvar model-1



Şekil 3.5. Model-1'de 500 MHz antenle elde edilen radargramlar

Profil 1 ve Profil 3'teki radargramlarda, 0.4 m derinlikli 150'lik korige borunun hiperbolü yüksek genliğe sahip bir şekilde görülmektedir (Şekil 3.5'te okla gösterilen). 0.6 m derinlikteki 300'lük korige borunun hiperbolü diğerlerine nazaran daha geniş bir şekilde görülmektedir. Bu profillerdeki radargramlarda, 200'lük korige borunun görünmemesinin nedeni; borunun uzunluğunun kısa olması ve profil hatlarının altına denk gelmemesidir. Profil

2'deki radargramda, her 3 borunun verdiği hiperboller gömüldükleri derinliklerde görülmektedir. 0.4 m derinlikte bulunan 150'lik koruge boruya ait hiperbol, diğer profillere ait radargramlardaki hiperbollere kıyasla belirgin bir şekilde daha düşük genlikte görülmektedir. Bu durum; Profil 2'nin 150'lik borudaki tam tıkalı olan kısımdan geçmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Metal sandıktan gelen kenar yansımaları çok güçlü olmasına rağmen borulara ait hiperboller seçilebilmektedir.



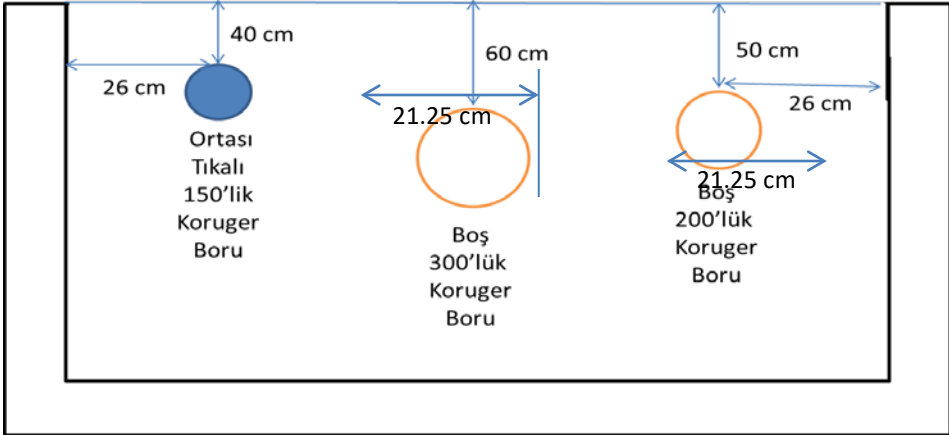
Şekil 3.6. Model-1'de 800 MHz antenle elde edilen radargramlar

Profil 1 ve Profil 5'e ait radargramlarda, boş 200'lük koruge boruya ait hiperbol görülmeyişinin nedeni; borunun uzunluğunun kısa olmasından dolayı bu hatların altına denk gelmeyişidir. Profil 2, 3 ve 4'teki radargramlarda ise 0.5 m'de bu boruya ait hiperbol görülmektedir (Şekil 3.36'da okla gösterilen). Bütün profillerde 150'lik ve 300'lük koruge borularının hiperbollerini radargramlarda ortaya çıkmıştır. Profil 3'e ait radargramda, 0.4 m derinlikte gözlenen hiperbol; 150'lik koruge borunun tıkalı olan kısmının üstünden geçtiği

için genliği diğer profillerdeki hiperbollere kıyasla daha düşüktür. Buradaki hiperbolün tepe noktasının görünümü (kare içerisine alınan) ise diğer profillere ait radargramlardaki hiperbollerden biraz bozukluk ve farklılık göstermektedir. Metal sandığın kenarlarından gelen yansımalar; beklendiği gibi kenarlara yakın GPR ölçülerde etkili olmaktadır. Bu durum radargramlarda bazen hiperbollerin daha net bir şekilde görünmelerini engellemektedir (Şekil 3.6).

3.1.2. Laboratuvar Model-2

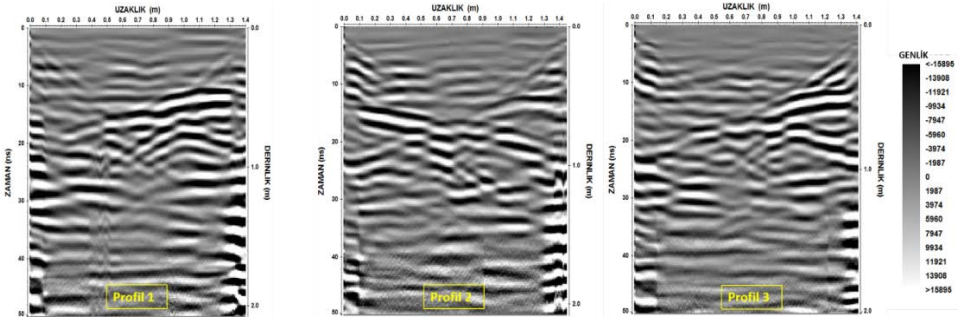
Laboratuvar çalışmalarının ikinci modeli; Model-1’de oluşturulan boruların konumları ve özellikleri değiştirilmeden (Şekil 3.7) sadece sandığın üzerine fayans döşenerek oluşturulmuştur (Şekil 3.8). Buradaki amaç fayans tabakasının radargramlara etkisini anlayabilmek içindir.



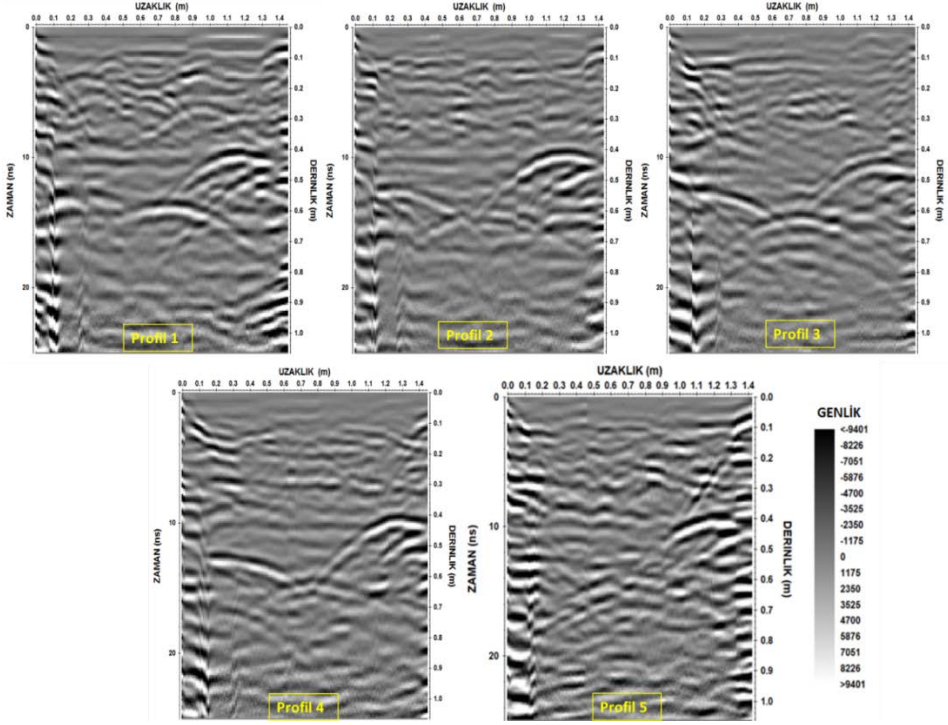
Şekil 3.7. Oluşturulan laboratuvar model-2'ye ait parametreler



Şekil 3.8. Soldan sağa sırasıyla 150'lik, 300'lük ve 200'lük koruge borularla oluşturulan fayans kaplı laboratuvar model-2



Şekil 3.9. Model-2'de 500 MHz antenle elde edilen radargramlar



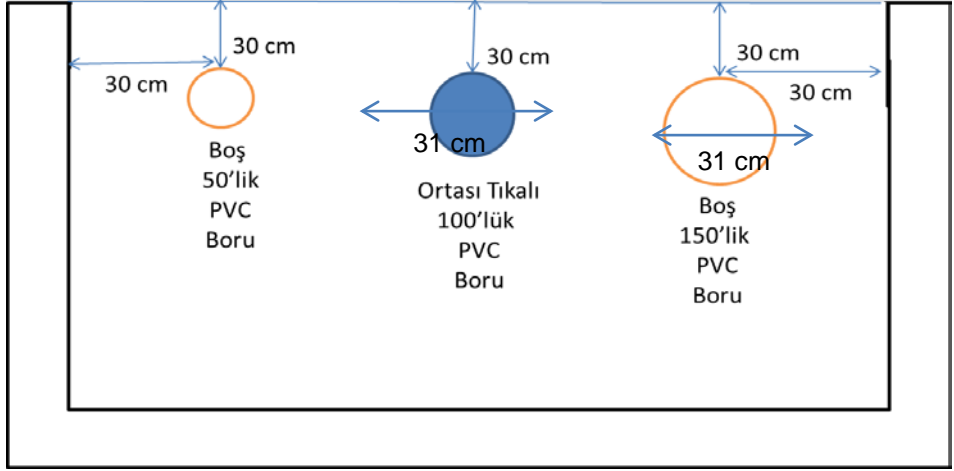
Şekil 3.10. Model-2’de 800 MHz antenle elde edilen radargramlar

Bu model, üzerine döşenen fayanslar hariç Model-1 ile aynı olduğu için hem 500 MHz hem de 800 MHz anten ile elde edilen radargramlarda gözlenen hiperbollerin durumları da benzerlik göstermektedir. Bu modelde 500 MHz antenle elde edilen radargramlarda döşenen fayansların etkisi olmamıştır (Şekil 3.9).

Ancak 800 MHz antenle elde edilen radargramlardaki hiperbollerin genlikleri (Şekil 3.10) Model-1’de 800 MHz antenle elde edilen radargramların (Şekil 3.6) genliklerinden daha düşük görülmektedir. Bu durum sandığın üzerini kapsayacak şekilde döşenen fayans tabakasının da etkisiyle birlikte 800 MHz antenin nüfuz derinliğiyle alakalı olduğu düşünülmektedir.

3.1.3. Laboratuvar Model-3

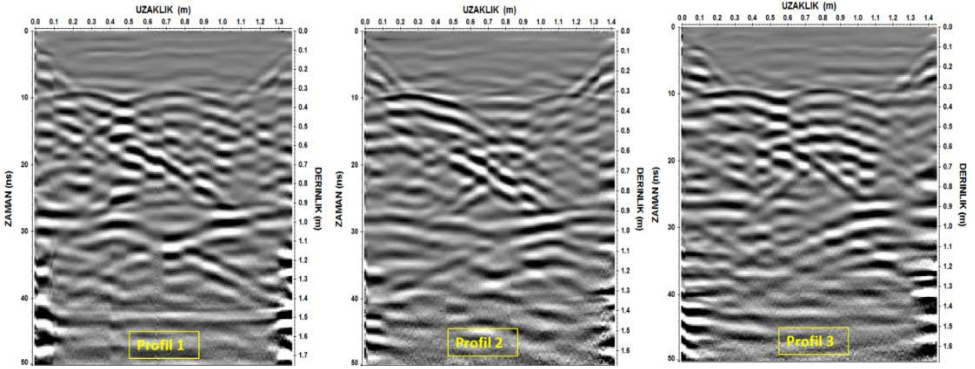
Bu model 50, 100 ve 150'lik PVC borular kullanılarak oluşturulmuştur. şekil 3.12' de gösterilen şekilde sandığa yerleştirilmiştir. 100'lük PVC borusunun orta kısmı tam tıkanacak şekilde ıslak malzemeyle (boruya sığacak bir büyüklüğe getirilen peçete, bebek bezi ve poşet) tıkanmıştır. Diğer iki borunun içerisi boş bırakılmıştır. Tercih edilen derinlikler altyapı sistemlerinin genellikle yaklaşık olarak konuldukları derinliklerdir (Şekil 3.11).



Şekil 3.11. Oluşturulan laboratuvar model-3'e ait parametreler



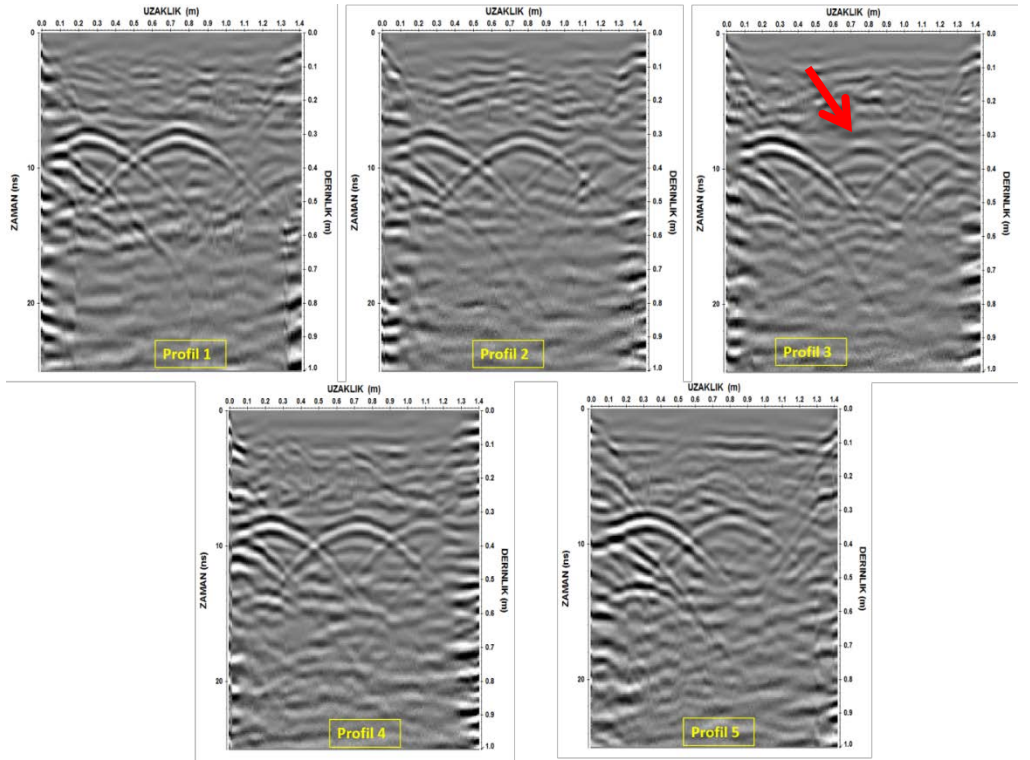
Şekil 3.12. Soldan sağa sırasıyla 50'lik, 100'lük ve 150'lik PVC borularla oluşturulan laboratuvar model-3



Şekil 3.13. Model-3'te 500 MHz antenle elde edilen radargramlar

500 MHz antenle alınan ölçüler sonucunda elde edilen her üç radargramda 150'lik PVC borunun hiperbolü 0.3 m'de baskın bir şekilde görülmektedir. Radargramlarda ortada bulunan hiperbol ortası tıkalı olan

100'lük boruya aittir (Şekil 3.13). Profil 2 tıkalı olan kısmın tam üzerinden geçtiği için buradaki radargramda görünen hiperbolün genliği diğer iki profildeki hiperbollerden daha düşüktür ve yapısı da diğerlerinden farklılık göstermektedir. Bu farklılık tam bir hiperbol olmamak şeklindedir. Profil 1 ve profil 3'te 50'lik PVC borunun hiperbolleri kolay görülebilecek şekilde ortaya çıkmamıştır. Bunda borunun uzunluğunun biraz kısa olmasından kaynaklandığı ve kenar yansımalarının önemli bir etkisinin olduğu düşünülmektedir. Ancak profil 2'deki radargramda 100'lük boruya ait hiperbolün genliğinin zayıflamasıyla birlikte 50'lik PVC borunun hiperbolü görülmüştür.



Şekil 3.14. Model-3'te 800 MHz antenle elde edilen radargramlar

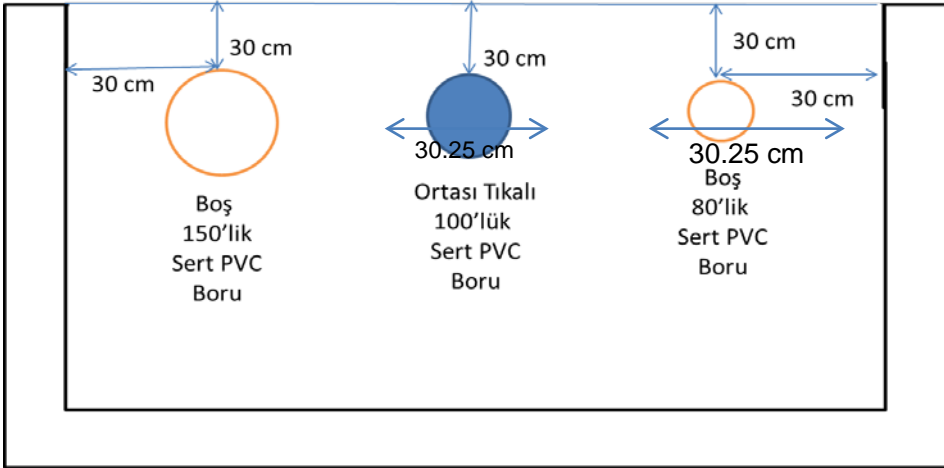
800 MHz antenle elde edilen bu radargramlar 500 MHz antenle elde edilen radargramlardan daha iyi çözünürlükte ve boruların durumlarını daha iyi ortaya çıkarmaktadır. Sandıktan kaynaklanan kenar yansımaları da 500 MHz antenle elde edilen radargramlara kıyasla daha azdır. Profil 1 ve profil 5'teki

radargramlarda 50'lik PVC borunun hiperbolünün görülmemesi uzunluğunun kısa olmasından kaynaklanmaktadır.

150'lik PVC boru en büyük çapa sahip olmasından dolayı radargramlarda baskın bir şekilde görülmektedir. Profil 3'teki radargramda ortadaki hiperbol (okla gösterilen) 100'lük borunun tıkalı olan kısmına ait olduğu için genliği diğer radargramlardaki hiperbollerden farklı görülmektedir. En küçük çapa sahip 50'lik PVC boru radargramlarda daha düşük genliklerde ortaya çıkmaktadır (Şekil 3.14).

3.1.4. Laboratuvar Model-4

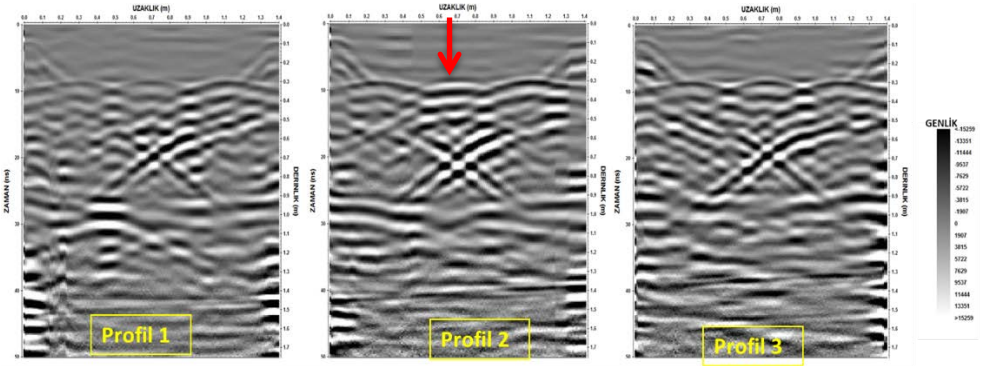
Bu modelde 150, 100 ve 80'lik sert PVC borular kullanılmıştır. Borular şekil 3.15'te gösterilen geometride sandığa yerleştirilmiştir. 100'lük sert PVC borusunun orta kısmı tam tıkanacak şekilde ıslak malzemeye (boruya sığacak bir büyüklüğe getirilen peçete, bebek bezi ve poşet) tıkanmıştır. Diğer iki borunun içerisi boş bırakılmıştır. Burada boruların bulunduğu derinlikler altyapı sistemlerinde genellikle konuldukları derinliklerdir (Şekil 3.16).



Şekil 3.15. Oluşturulan laboratuvar model-4'e ait parametreler



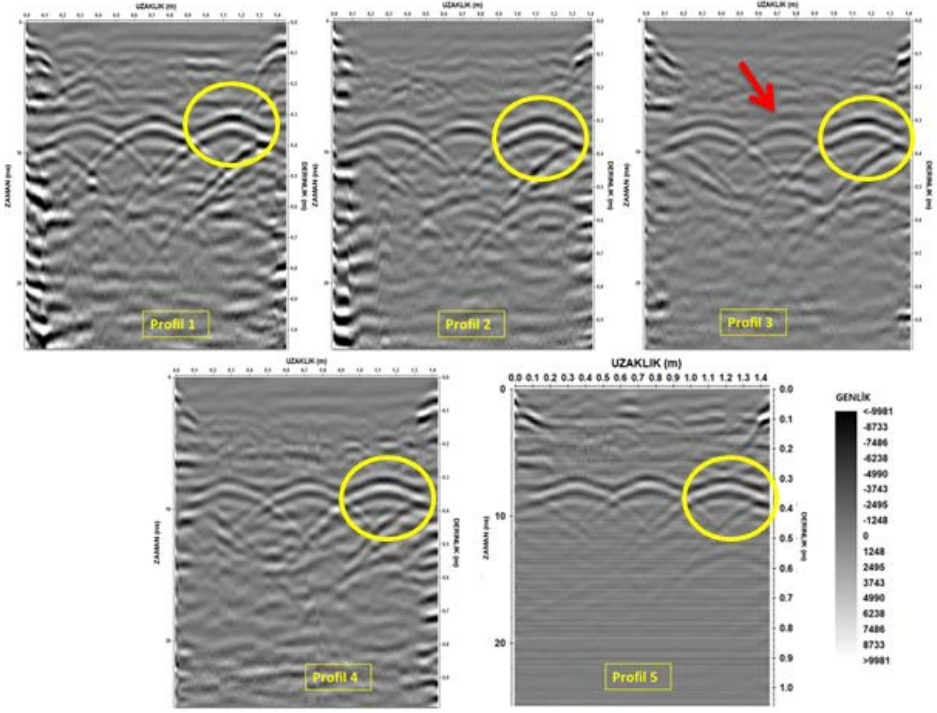
Şekil 3.16. Soldan sağa sırasıyla 150'lik, 100'lük ve 80'lik sert PVC borularla oluşturulan laboratuvar model-4



Şekil 3.17. Model-4'te 500 MHz antenle elde edilen radargramlar

0.3 m'lerde her 3 profildeki radargramlarda da hiperboller gözlenmektedir (Şekil 3.17). Profil 2'deki radargramda okla gösterilen hiperbol

borunun tıkalı olan kısmına aittir. Bu hiperbol profil 1 ve 2'deki radargramlarda görülen hiperbollerden yansıma genliği bakımından farklılık göstermektedir.

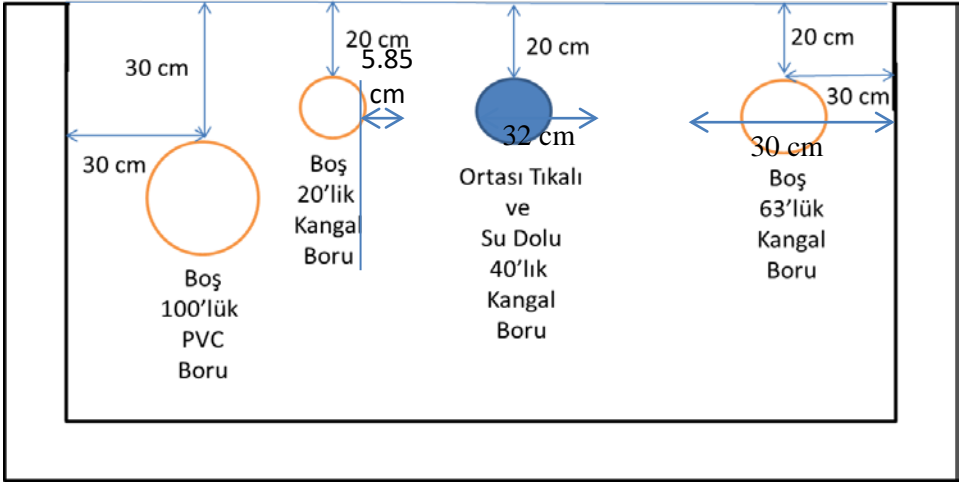


Şekil 3.18. Model-4'te 800 MHz antenle elde edilen radargramlar

Şekil 3.18'de gösterilen radargramlarda boruların gömüldükleri derinliklerde hiperboller ortaya çıkmıştır. Çapı büyük olan borunun hiperbolü (Şekil 3.18'de çember içerisine alınan) radargramlarda daha yüksek genliklerde görülmektedir. Profil 3'teki radargramda ortada olan hiperbol (okla gösterilen) tıkalı olan borunun tıkalı kısmına ait ve genliği diğer radargramlardaki hiperbollerden daha düşük izlenmektedir.

3.1.5. Laboratuvar Model-5

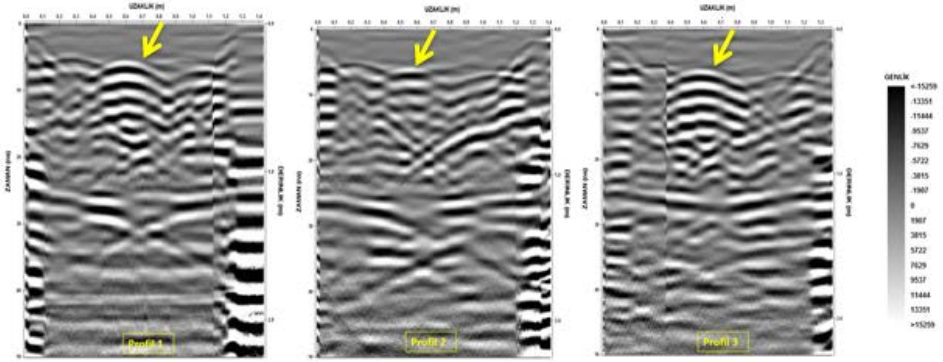
Model-5'te 63'lük, 40'luk ve 20'luk kangal borular ile 100'lük PVC boru kullanılmıştır. 100'lük PVC boru 20'lik kangal borunun yan tarafına ve ondan 10 cm daha derine yerleştirilmiştir. Bu dizilim şekil 3.19'da gösterilen şekilde sandığa yerleştirilmiştir. 40'luk kangal borunun hem ortası tıkanmıştır hem de borunun içerisi tamamen su ile doldurulmuş ağız kısımları bant ile kapatılmıştır. Tıkama borunun orta kısmında olacak şekilde ve boruya sığacak bir büyüklüğe getirilen poşet malzemeye tıkanmıştır. Diğer boruların içerisi boş bırakılmıştır. Burada boruların kondukları derinlikler altyapı sistemlerinde genellikle bulunduğu derinliklerdir (Şekil 3.20).



Şekil 3.19. Oluşturulan laboratuvar model-5'e ait parametreler



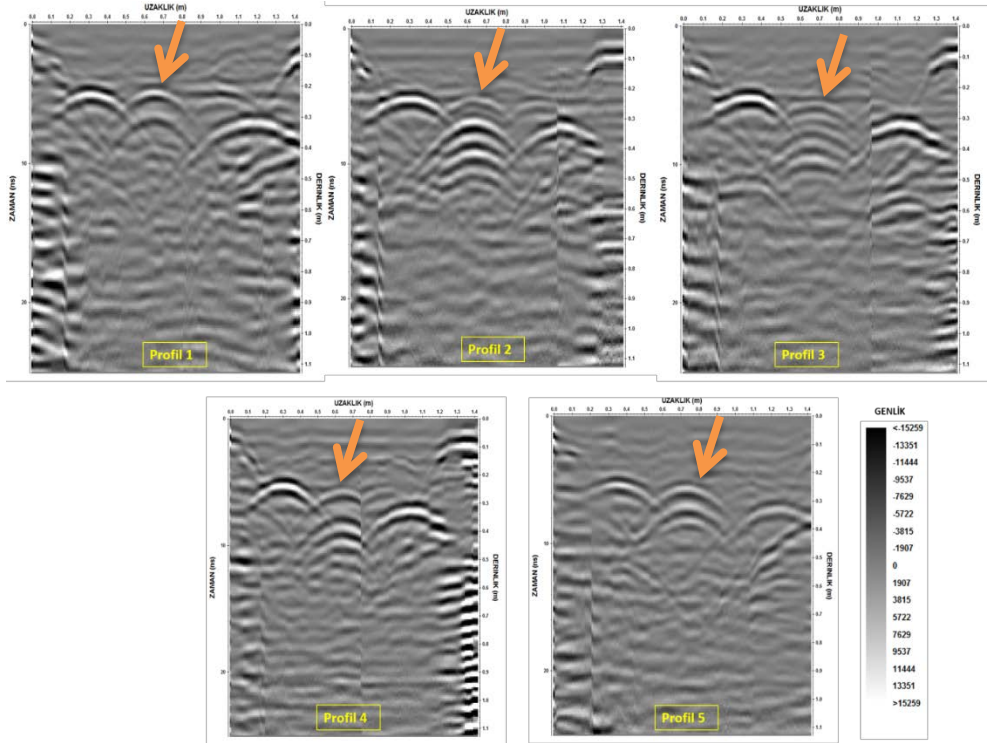
Şekil 3.20. Soldan sağa sırasıyla 100'lük PVC boru, 20'lik, 40'lık ve 63'lük kangal borularla oluşturulan laboratuvar model-5



Şekil 3.21. Model-5'te 500 MHz antenle elde edilen radargramlar

500 MHz antenle elde edilen bu radargramlarda her ne kadar hiperboller kısmen de olsa görülseler de, boruların ayırımı ve fiziki durumları hakkında yorum yapmak zor olmaktadır. Ancak boruların buldukları derinlikler

hakkında bilgi edinilebilir. Tamamen su dolu olan 40'lık kangal borunun verdiği hiperbolün genliği ve yansımaları (Şekil 3.21'de ok ile gösterilen) diğer hiperbollerden farklı görülmektedir. Borunun tıkalı olan kısmına denk gelen profil 2'deki bu durum profil 1 ve profil 2'deki radargramlarda aynı borunun hiperbolünden de farklı bir yapıda ortaya çıkmıştır. Sandıktan gelen kenar yansımaları kuvvetli bir şekilde radargramlarda görülmektedir (Şekil 3.21).



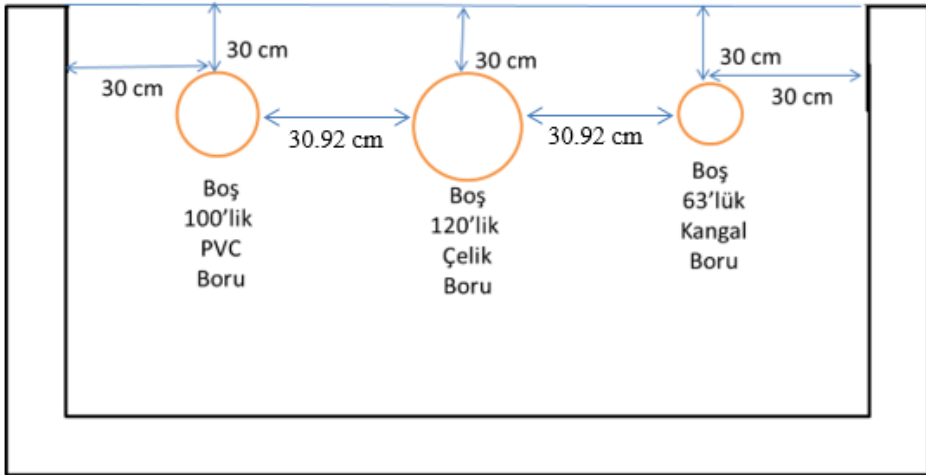
Şekil 3.22. Model-5'te 800 MHz antenle elde edilen radargramlar

800 MHz antenle elde edilen bu radargramlar (Şekil 3.22) 500 Mhz antenle elde edilen radargramlardan (Şekil 3.21) çok daha iyi çözünürlükte olmakta ve daha fazla bilgi taşımaktadır. Tıkalı ve su dolu olan boruya ait hiperboller (okla gösterilen) diğerlerinden farklı bir genlik ve sinyal yansıması sergilemiştir. Bu farklılık tekrarlı yansımalara sahip olmak şeklindedir. Profil 3'teki radargramda bu boruya ait hiperbol diğer profillerdeki radargramlarda gözlenen hiperbollerden daha düşük genlikte görülmektedir. Bu durumun, profil 3'ün borunun tıkalı olan kısmından geçmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Boru su dolu olduğu zaman radargramda, boruya ait

hiperbolde tekrarlı yansımalar söz konusu olmaktadır. En küçük çapta olan 20'lik kangal boru radargramlarda zayıf bir şekilde görülmektedir. Yanında ve biraz daha derininde bulunan 100'lük PVC borunun bu 20'lik boruyu gölgelediği düşünülmektedir (Şekil 3.22).

3.1.6. Laboratuvar Model-6

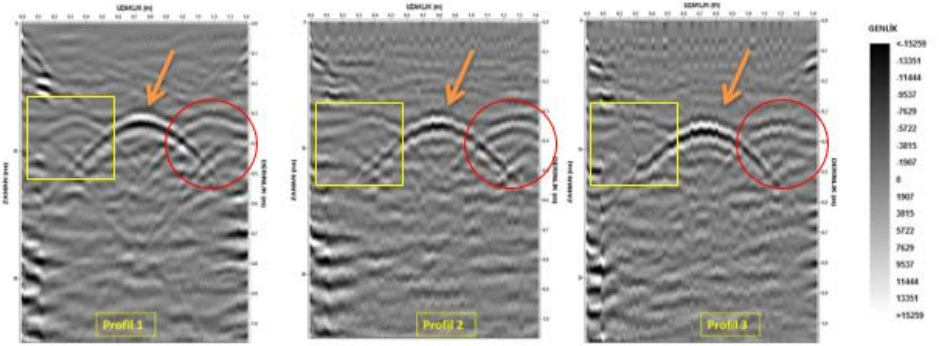
Bu modelde soldan sağa sırasıyla 100'lük PVC, 120'lik çelik ve 63'lük kangal borular kullanılmıştır. Bütün borular içerisi boş olarak, şekil 3.23'te gösterilen parametrelerde metal sandığın içerisine yerleştirilmiştir. Bu modelde amaç; elde edilecek radargramlarda farklı boru türleri arasındaki farkı görebilmektir. Bu amaçla sadece 800 MHz merkez frekanslı korumalı anten kullanılmıştır.



Şekil 3.23. Oluşturulan laboratuvar model-6'ya ait parametreler



Şekil 3.24. Soldan sağa sırasıyla 100'lük PVC, 120'lik çelik ve 63'lük kangal borularla oluşturulan laboratuvar model-6



Şekil 3.25. Model-6'da 800 MHz antenle elde edilen radargramlar

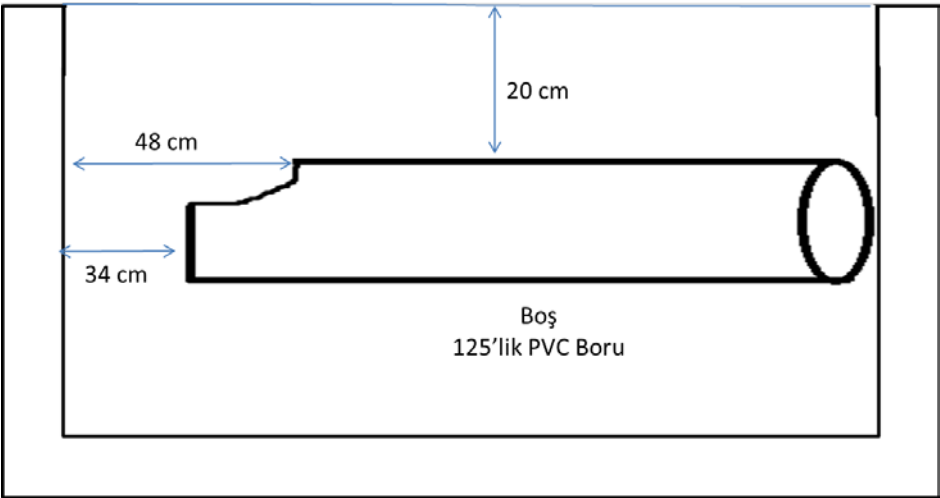
Radargramlardaki hiperboller, sarı renkli kare içerisine alınan; 100'lük PVC, ok ile gösterilen; 120'lik çelik ve kırmızı çember içerisine alınan; 63'lük kangal boruya aittir. Çelik boruya ait olan hiperbol (okla gösterilen)

radargramlarda en yüksek genlikte görülmektedir (Şekil 3.25). 63'lük kanga boruya ait hiperbol (yuvarlak içine alınan) orta genlikte ve 100'lük PVC boruya ait hiperbol (kare içine alınan) düşük genlikte izlenmektedir. Bu durum çelik borunun fiziksel özelliklerinin {dielektrik geçirgenlik (ϵ) ve elektrik iletkenlik (σ)} yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. Çelik borunun elektrik iletkenlik (σ) değeri 10^7 S/m iken, PVC borunun 0.006 S/m dir. Çapı küçük olsa da et kalınlığı 100'lük PVC borunun neredeyse 4 katı olan kanga borunun verdiği hiperbolün genliği 100'lük PVC borunun verdiği hiperbolün genliğinden yüksek görülmektedir.

Şekil 3.25'te verilen profil 2 ve 3'e ait radargramlarda gözlenen genel yapay bozukluklar; ölçü aletinin güç kaynağındaki zayıflama nedeniyle oluşmuştur.

3.1.7. Laboratuvar Model-7

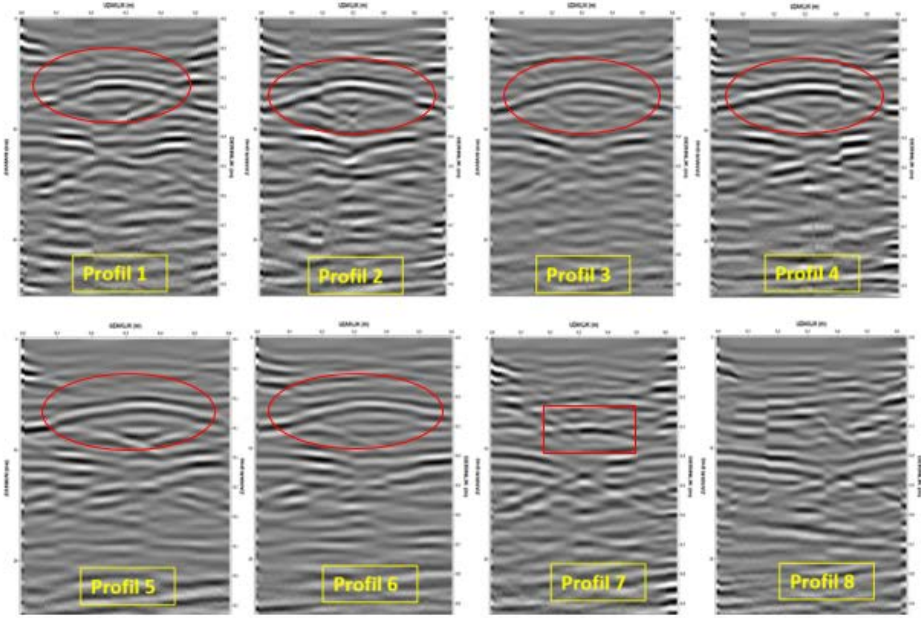
Plastik sandıkta yapılan bu modelde bir ucu kırık ve eksik olan, içi tamamen boş 125'lik PVC boru kullanılmıştır. Boru sandığın tam ortasına denk gelecek şekilde 20 cm derinliğe yerleştirilmiştir. Modelin diğer parametreleri ve görüntüsü şekil 3.26 ve şekil 3.27'de gösterilmiştir. GPR profil yönleri, başlangıç ve bitiş noktaları şekil 2.7'de gösterilmiştir.



Şekil 3.26. Oluşturulan laboratuvar model-7'ye ait parametreler



Şekil 3.27. İçi boş 125'lik PVC boru ile oluşturulan laboratuvar model-7

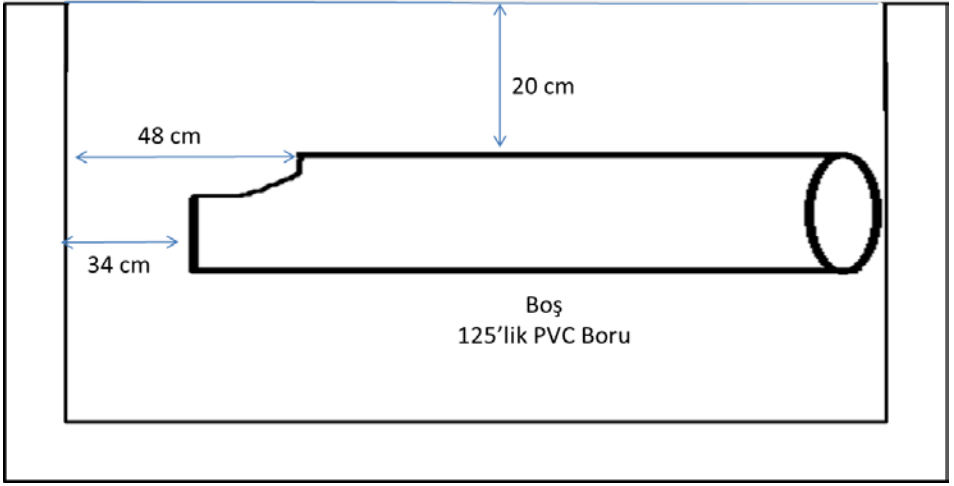


Şekil 3.28. Model-7’de 800 MHz antenle elde edilen radargramlar

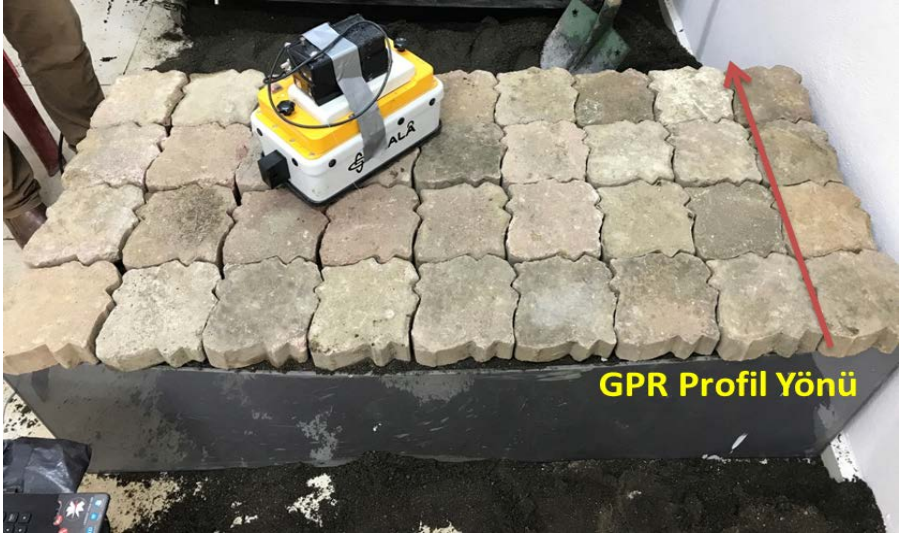
Profil 1 ile profil 6 arasındaki radargramlarda boruya ait hiperboller (elips içerisinde gösterilen) ve borunun konulduğu derinlik radargramlardan görülmektedir. Profil 7’deki radargramlarda hiperbolün küçük bir kısmı (dikdörtgenle gösterilen) farklı bir genlikte izlenmektedir. Yapısı da diğer hiperbollerden farklıdır. Bu durumun, profil 7’ nin borunun kırık ve eksik olan ucunun yaklaşık olarak üzerinden geçmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca borunun üstü kum ile kapatılırken kırık olan bu ucun içerisine kum girmiştir. Kumun, borunun bu kısmını dolu gösterdiği ve tam bir hiperbol vermesini engellediği düşünülmektedir. Profil 8’deki radargramda ise herhangi bir hiperbol beklenmiyordu. Bunun sebebi borunun uzunluğunun kısa seçilmesiyle birlikte profil 8’in borunun üzerinden geçmemesidir. Bu modeldeki profillerde elde edilen radargramlarda sandıktan gelen kenar yansımaları söz konusu olmuştur (Şekil 3.28).

3.1.8. Laboratuvar Model-8

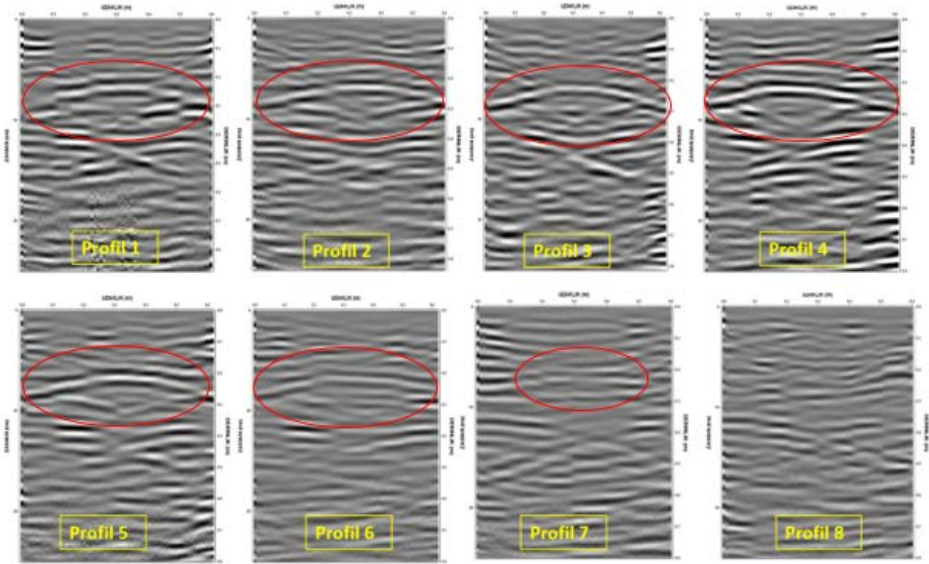
Model 7’de oluşturulan durum korunmakla birlikte, sandığın üzeri parke taşları ile kaplanarak model-8 elde edilmiştir (Şekil 3.30). Model geometrisi ile ilgili diğer parametreler şekil 3.29’da gösterilmiştir. Modelin bu şekilde oluşturulmasındaki amaç parke taşlarının radargramlara nasıl etki edeceğini gözlemlemek içindir.



Şekil 3.29. Oluşturulan laboratuvar model-8'e ait parametreler



Şekil 3.30. İçi boş 125'lik PVC boru ile oluşturulan parke taşı kaplı laboratuvar model-8

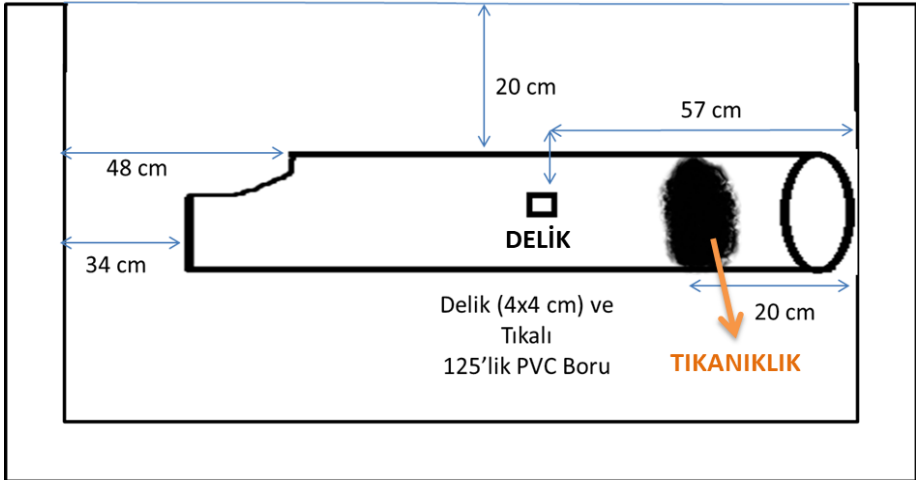


Şekil 3.31. Model-8'de 800 MHz antenle elde edilen radargramlar

Bu modelde, model-7’de elde edilen radargramlara benzer radargramlar elde edilmiştir. Model-7’nin 7. profilindeki radargramda (Şekil 3.28) dikdörtgen içerisinde gösterilen küçük hiperbol burada daha çok sönümlenmiştir (Şekil 3.31). Bu durumun sandığın üzerine döşenen parke taşlarından kaynaklandığı düşünülmektedir. Profil 8’deki radargramda, model-7’de olduğu gibi borunun uzunluğunun kısa olmasından dolayı herhangi bir hiperbol görülmektedir.

3.1.9. Laboratuvar Model-9

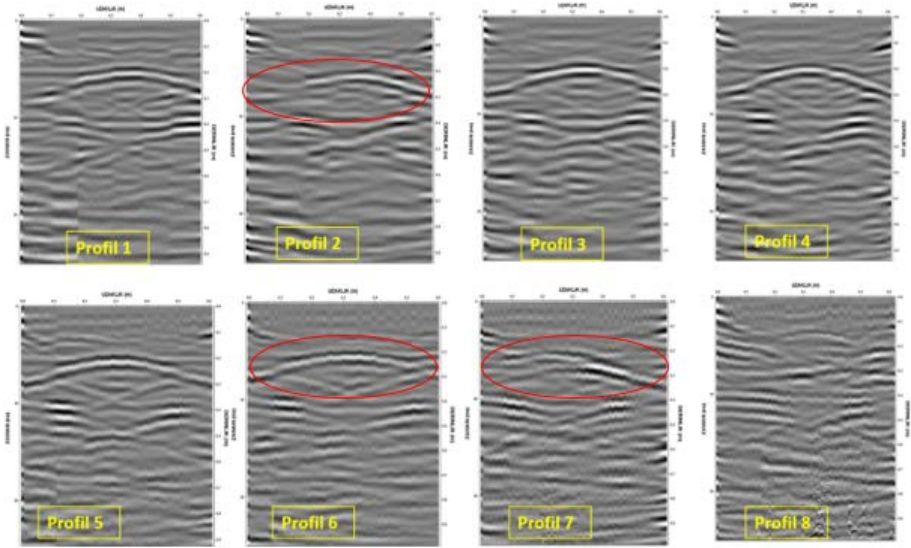
Plastik sandık kullanılarak oluşturulan bu modelde bir ucu kırık ve eksik olan 125’lik PVC boru (12.5 cm çapında) kullanılmıştır. Boru sandığın tam ortasına denk gelecek şekilde 20 cm derinliğe yerleştirilmiştir. Sağlam uç tarafından 20 cm içeriye doğru boru tıkanmıştır. Bu kısım tam tıkanacak şekilde ıslak malzemeye (boruya sığacak bir büyüklüğe getirilen peçete, bebek bezi ve poşet) tıkanmıştır. Sağlam uç tarafından 57 cm içeriye doğru 4x4 cm ölçülerinde bir delik açılmıştır. Deliğe kum dolmaması için, deliği kapatacak 7x7 cm ebatlarında ince bir defter yaprağıyla kapatılmıştır. Borunun kırık ve eksik olan ucuna kum dolmaması için ince çöp poşetiyle kapatılmıştır. Modelin görüntüsü ve diğer parametreleri şekil 3.32 ve şekil 3.33’te gösterilmiştir.



Şekil 3.32. Oluşturulan laboratuvar model-9'a ait parametreler



Şekil 3.33. Tıkalı ve delik 125'lik PVC boru ile oluşturulan laboratuvar model-9



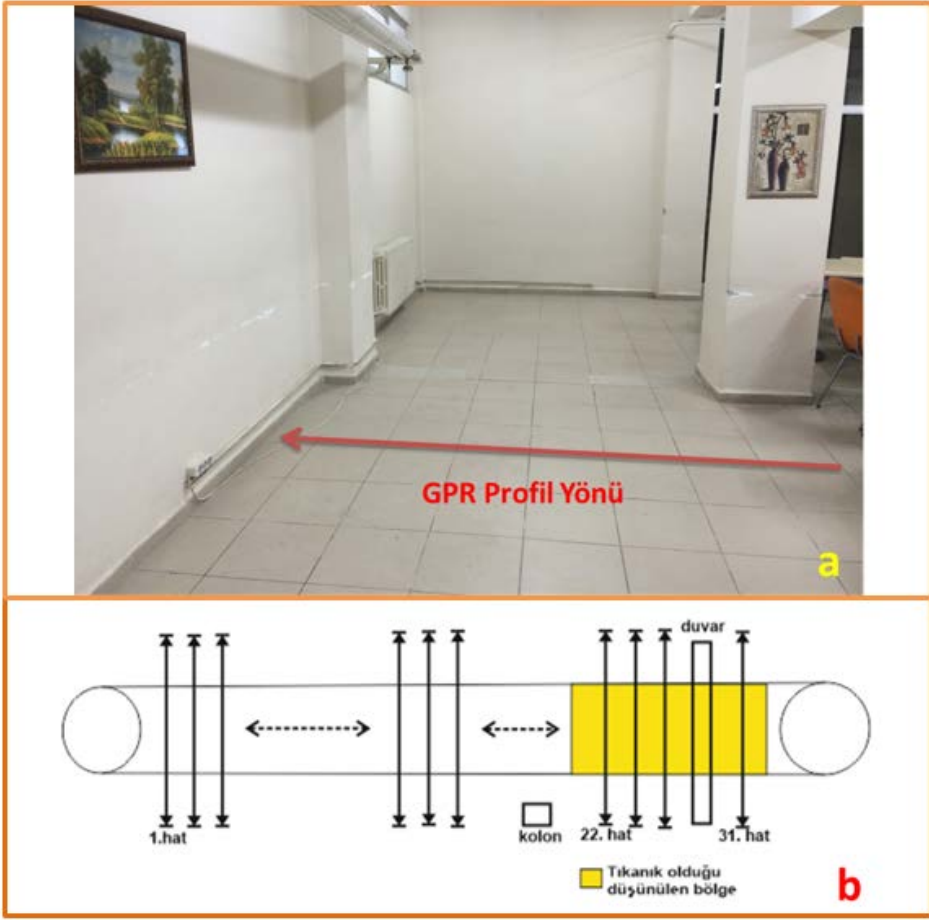
Şekil 3.34. Model-9'da 800 MHz antenle elde edilen radargramlar

Profil 1, profil 3, profil 4 ve profil 5 borunun sağlam ve boş kısımlarına denk geldiği için bu radargramlarda belirgin ve simetrik hiperboller ortaya çıkmıştır. Profil 2'deki radargramda hiperbolün sol kolu eksik bir şekilde ve çok düşük bir genlikte kalmıştır. Bu durumun, profil 2'nin tıkama malzemesinin başına denk gelmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Profil 6 ve özellikle profil 7 borunun kırık ve eksik olan ucunun üzerinden geçtiği için bu radargramlardaki hiperboller de (elips içerisine alınan) simetrik olarak oluşmamıştır. Özellikle profil 7'deki radargramda hiperbolün yarısı görülmemektedir (Şekil 3.34). Borunun delik olan kısmı radargramlarda gözlenememiştir. Bunun nedeni, deliğin ebatlarının kullanılan anten frekansına göre uyumsuz olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

3.2. Arazi Çalışmaları

3.2.1. Çalışma Alanı-1

Çalışma alanı, Gümüşhane Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi kantin girişinin sol tarafındaki akar borusunun geçtiği güzergâh üzerinde yer almaktadır. GPR ölçülerinin alındığı hatların uzunluğu 3.5 m, ölçü hatları aralığı 40 cm (karotaş genişliği) olacak şekilde akar borusuna dik konumda toplamda 31 hatta (Şekil 3.35 b) ölçüler alınarak veriler toplanmış, işlenmiş ve kesitler/derinlik düzlem haritaları üzerinde tıkalı bölge belirlenmeye çalışılmıştır.



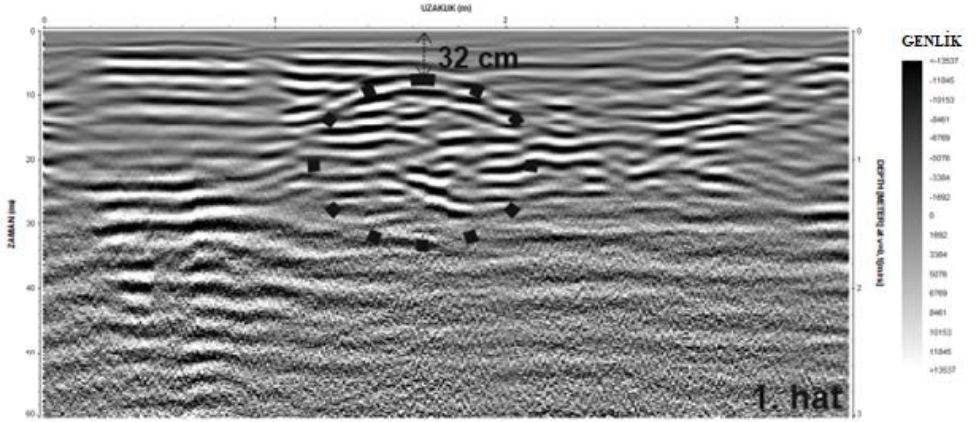
Şekil 3.35. (a) Gümüşhane Üniversitesi'ndeki çalışma alanı ve (b) GPR ölçüm hatları

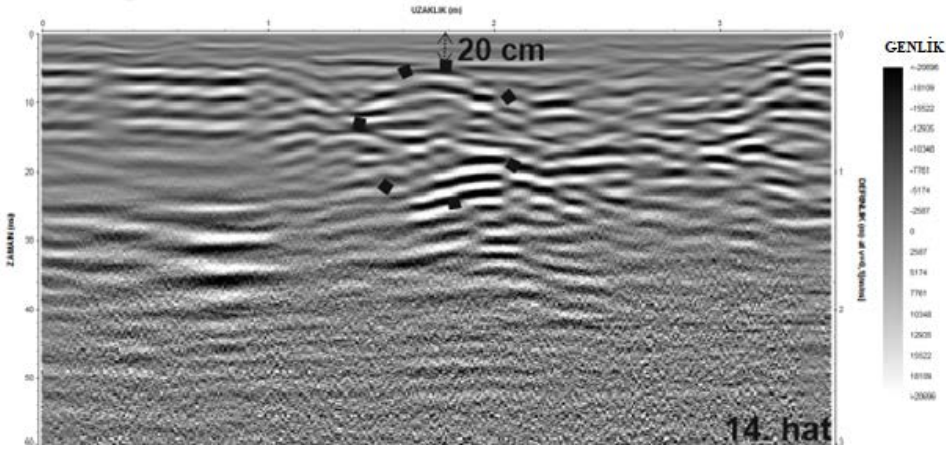
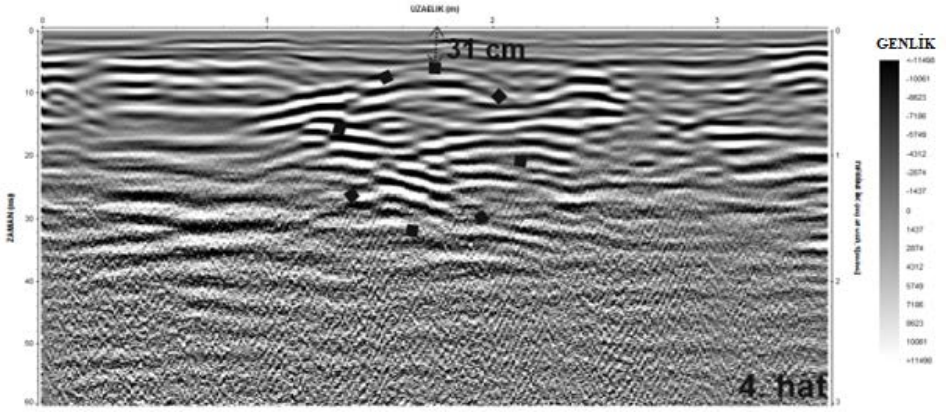
Bu çalışma alanında Arş. Gör. Mahmut SARI tarafından 500 MHz merkez frekanslı antenle alınan yer radarı ölçümleri 2 ve 3 boyutlu olarak değerlendirilerek yorumlamaya hazır hale getirilmiştir. 2B yer radarı kesitlerinde akar borusunun geçtiği bölgede yüksek genliğe sahip hiperboller tespit edilmiştir (Şekil 3.36). Bu hiperbollerin derinlikle olan ilişkisi irdelenerek akar borusunun eğimi hakkında bilgi edinilmiştir.

Şekil 3.35 b'de ölçüm hatlarının krokisinde kolana kadar bütün hatlar aynı özellikte seyrettiği için Şekil 3.36'da 1., 4. ve 14. hatlar örnek olarak buradaki görünüm aktarılmaya çalışılmıştır. Bu radargramlardaki yuvarlak kesikli çizgilerle daire içine alınmış yüksek genlikli hiperbolik yansımalar akar borusunun geçtiği güzergâhı ve hangi derinlikte olduğunu

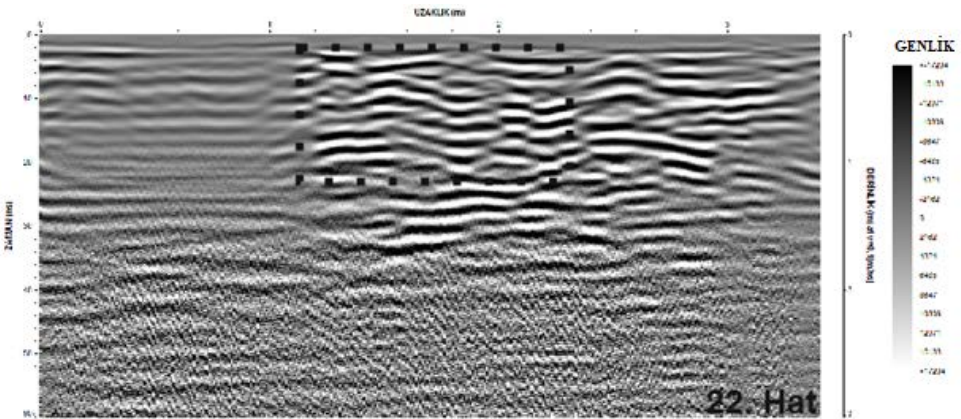
göstermektedir. Şekil 3.36'da; 1. hatta elde edilen radargramda borunun derinliği yaklaşık 32 cm, 4. hattaki radargramda 31 cm ve 14. hattaki radargramda ise 20 cm olarak belirlenmiştir. Bu durum akar borusunun bulunduğu derinliğin lavaboya doğru sürekli bir azalma halinde olduğu düşünülmüştür.

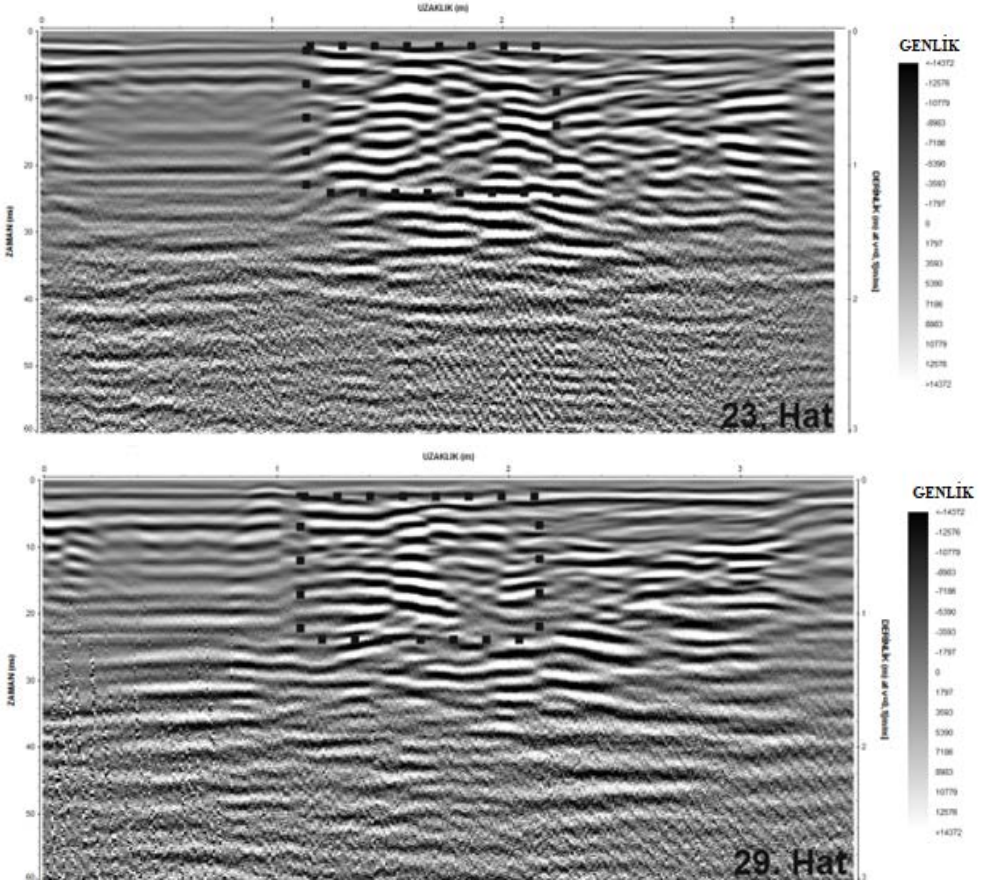
Kolon sonrasındaki alanda elde edilen yer radarı kesitleri incelendiğinde ise büyük genlikli hiperbolik yansımalar ilk kesitlere nazaran gözlenememiştir. Bundan ötürü akar borusunun içerisinde gelen malzeme ile dolduğu bu yüzden boşluklu boru gibi hiperbol yansıması vermediği gözlenmiştir ve tıkanıklığın bu bölgede olabileceği sonucuna varılmıştır. Bu bölgenin genelini yansıtan 22. 23. ve 29. hatlardaki radargramlar seçilerek yorumlanmıştır. Bu radargramlarda kesikli dikdörtgen içerisine alınan alanda belirgin hiperbolik yansımanın olmadığı (zayıf genliğe sahip sinyallerin oluşturduğu hiperbol) görülmüştür. Radargramlarda gözlenen bu durumdan yola çıkarak tıkanıklığın 22. hattan sonra olabileceği düşünülmüştür (Şekil 3.37). Şekil 3.35 b'de de görüldüğü gibi tıkanıklığın düşünüldüğü bölge sarı ile renklendirilmiştir.





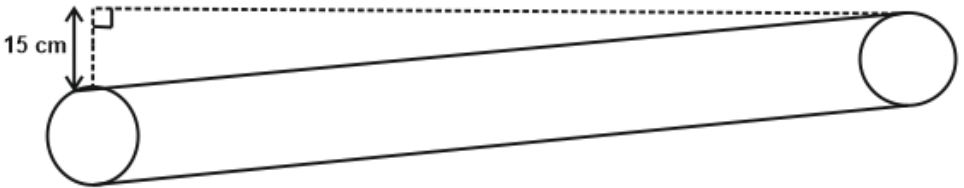
Şekil 3.36. 1. 4. ve 14. hatlardan elde edilen radargramlar





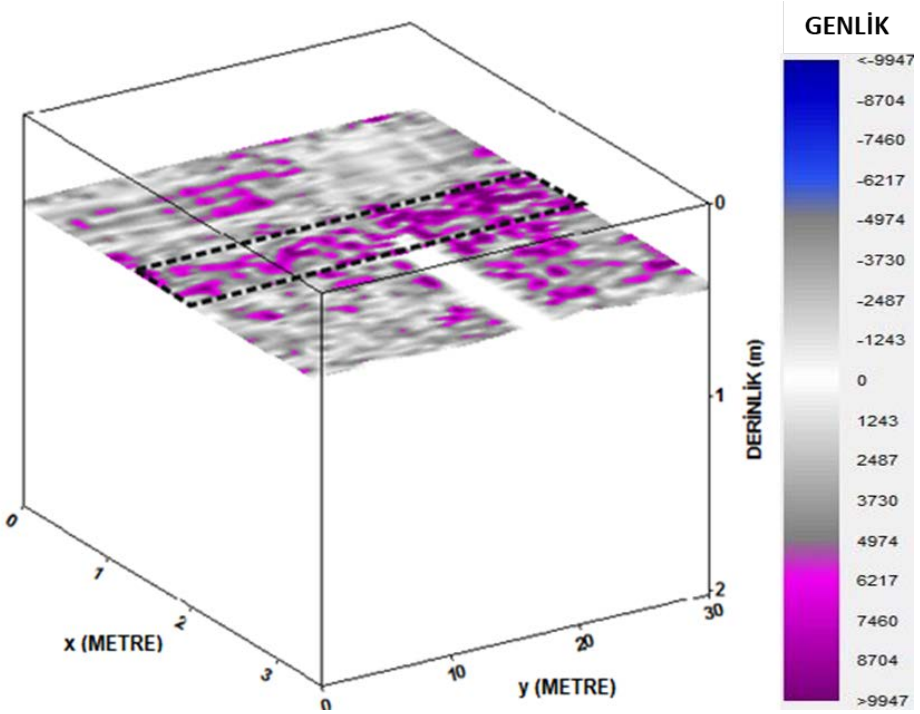
Şekil 3.37. 22. 23. ve 29. hat radargram kesitleri

Bütün hatlar 2B olarak incelendiğinde akar borusunun başlangıç ve bitiş noktaları yaklaşık olarak 15 cm'lik derinlik farkına sahiptir. Bu da çok düşük bir eğim farkını göstermektedir. Tıkanıklığın bir diğer sebebinin bu olabileceği düşünülmektedir (Şekil 3.38).

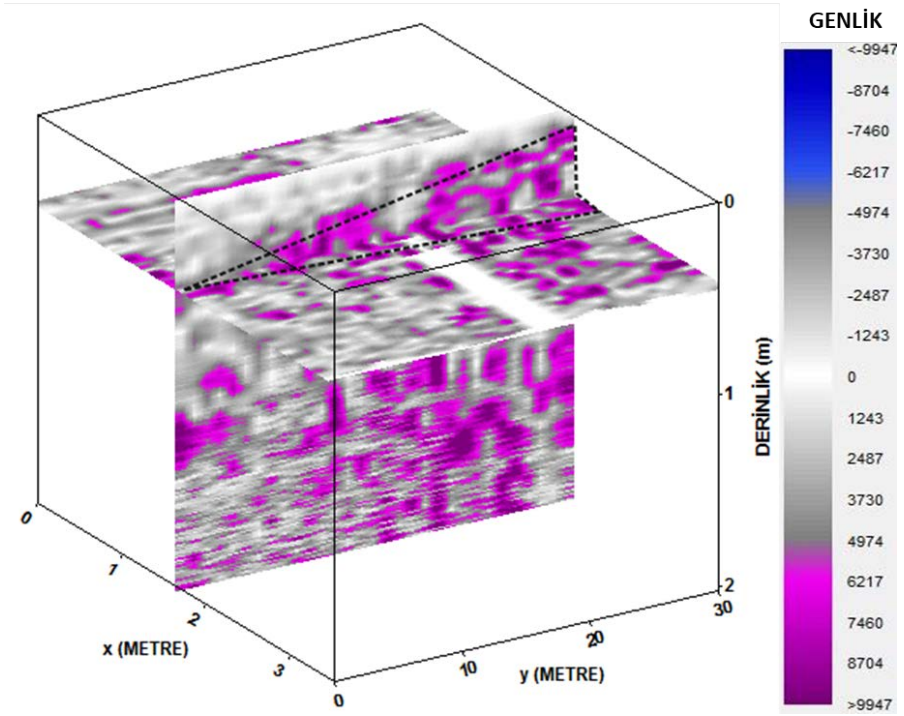


Şekil 3.38. Akar borusu eğim krokisi

Ayrıca alınan 2B radargamlar birleştirilerek 3B görüntüler elde edilmiştir. Elde edilen 3B görüntülerde dilim kesit oluşturularak akar borusunun devam ettiği derinlik ortaya konulmuştur (Şekil 3.39 ve Şekil 3.40). Şekillerde kesikli çizgilerle belirlenen alan borunun geçtiği alandır. Eğime göre yüzeye yakın olan kısım daha belirgin görülmektedir.



Şekil 3.39. GPR derinlik-düzlem haritası



Şekil 3.40. GPR derinlik-düzlem haritası ve X yönündeki yer radarı kesiti.

3.2.2. Çalışma Alanı-2

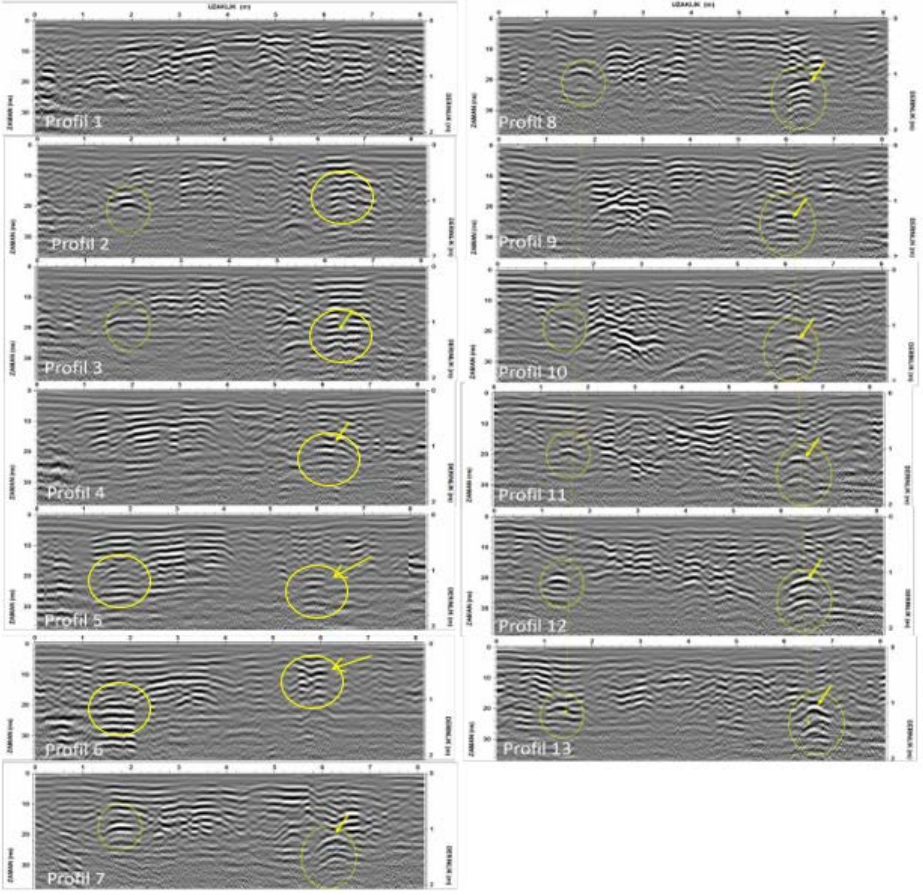
Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen arazi çalışmalarından ikincisi; Trabzon ili Ortahisar ilçesi Karşiyaka Mahallesinde su kaçağı sorunu yaşanan alan üzerinde 500 MHz merkez frekanslı anten kullanılarak 13 hatta birbirine paralel olarak 0.5 m ölçüm aralıklı GPR ölçümleri alınmıştır (Şekil 3.41).



Şekil 3.41. Araştırma yapılan çalışma alanı-2'den görünüm ve GPR profil yönü

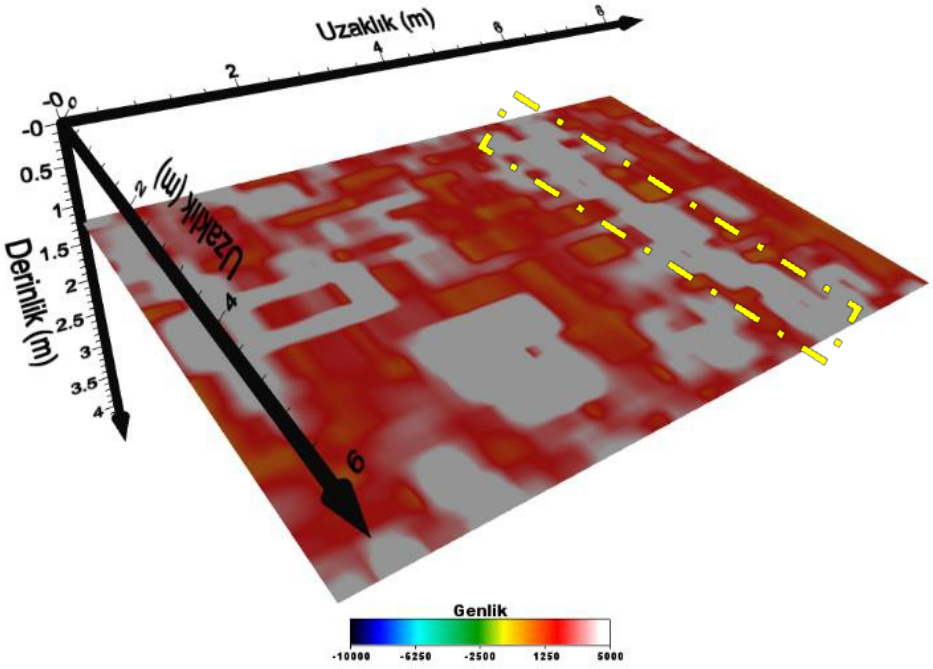
Yer radarı yöntem gereği; ölçülen ham verilerinden araştırılan ortamın yapısal durumunu incelemek ve yorumlamak zor olduğundan bu verilerin değişik yaklaşımlarla ve veri işlem adımlarıyla değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu değerlendirmelerden sonra, inceleme alanına ait işlenmiş GPR verilerini değerlendirmek ve yorumlanmak için, 2 ve 3 boyutlu (2B/3B) olarak görüntülenmiştir.

Çalışma alanında 500 MHz antenle yaklaşık doğu-batı (D-B) yönünde alınan ölçümlerden elde edilen radargramlar şekil 3.42'de gösterilmektedir. Burada yanal yönde sürekliliği olan anomaliler (boruların göstergesi) oklarla ve çemberle gösterilmiştir. Radargramların sol taraflarında gözlenen hiperboller, oradan geçen telekomünikasyon boru ve kablolarından gelen yansımalar olduğu yargısına varılmıştır. Radargramlarda, çember içerisine alınan hiperbollerin haricinde başka hiperboller de görülmektedir. Bu hiperbollerin, TİSKİ görevlileri tarafından alanda daha önceden döşeli olduğu ifade edilen borulara ait olduğu düşünülmektedir.



Şekil 3.42. Çalışma alanında 500 MHz antenle yaklaşık doğu-batı (D-B) yönünde alınan ölçümlerden elde edilen radargramlar

Şekil 3.42’de gözlenen yansımaların yanıl ve düşey yöndeki devamlılıklarını görüntülemek için zaman-düzlem-genlik haritalarının da oluşturulması gerekmektedir. Bunun için inceleme alanında, yaklaşık aynı başlangıçlı hatlara ait radargramlardan zaman düzlem/genlik haritaları Voxler programı (URL-6) kullanılarak oluşturulmuştur. Bu haritalarda gözlenen yüksek genlikli yansımaların derinlikleri ve yanıl uzanımları incelenerek olası boru hatlarının konumları belirlenmeye çalışılmıştır (Şekil 3.43).



Şekil 3.43. Çalışma alanı-2 'de yaklaşık D-B yönlü, 500 MHz antenle toplanan yer radarı verilerinden tüm hatlar için elde edilen zaman-düzlem-genlik haritalarından 1.2 m derinlik seviyesindeki kat haritası. Kesikli çizgi ile belirtilen boru hattını göstermektedir

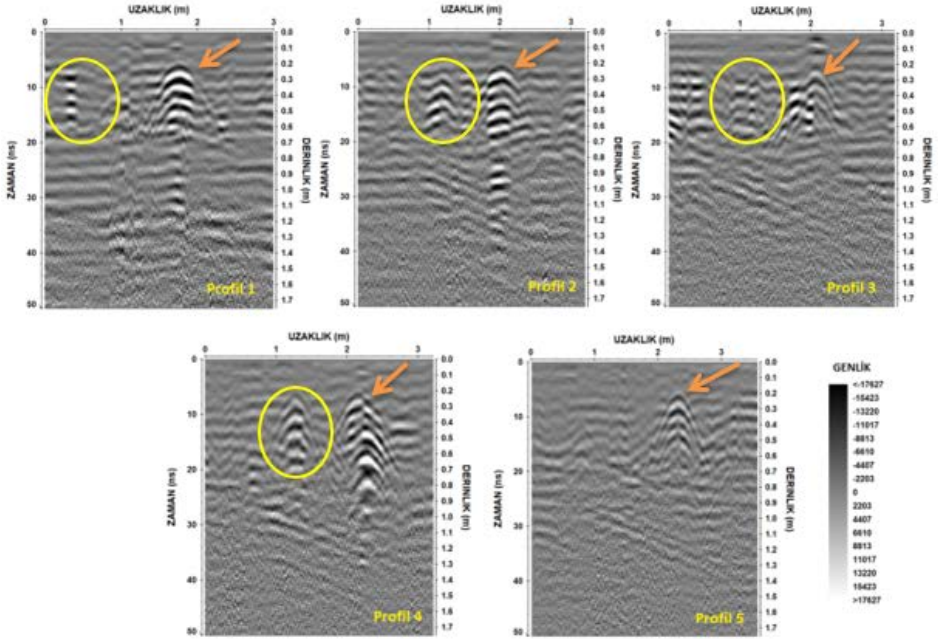
3.2.3. Çalışma Alanı-3

Araştırma kapsamında seçilen Trabzon 100. Yıl parkında, çeşmenin atık su tahliyesi için TİSKİ tarafından daha önceden yaklaşık 25 cm derinliğe döşenen 100'lük (10 cm çapında) PVC borunun geçtiği alanda çalışmalar yapılmıştır. Bu alanda çalışmalar 4 aşamada gerçekleştirilmiş ve yorumlanmıştır.

1. Aşama: PVC boru boş, herhangi bir su akışı olmadan; 500 MHz korumalı antenle, daha sonra 800 MHz korumalı antenlerle Şekil 3.44'te gösterilen profil yönünde 0.5 m aralıklarla 5'er profil ölçü alınmıştır.

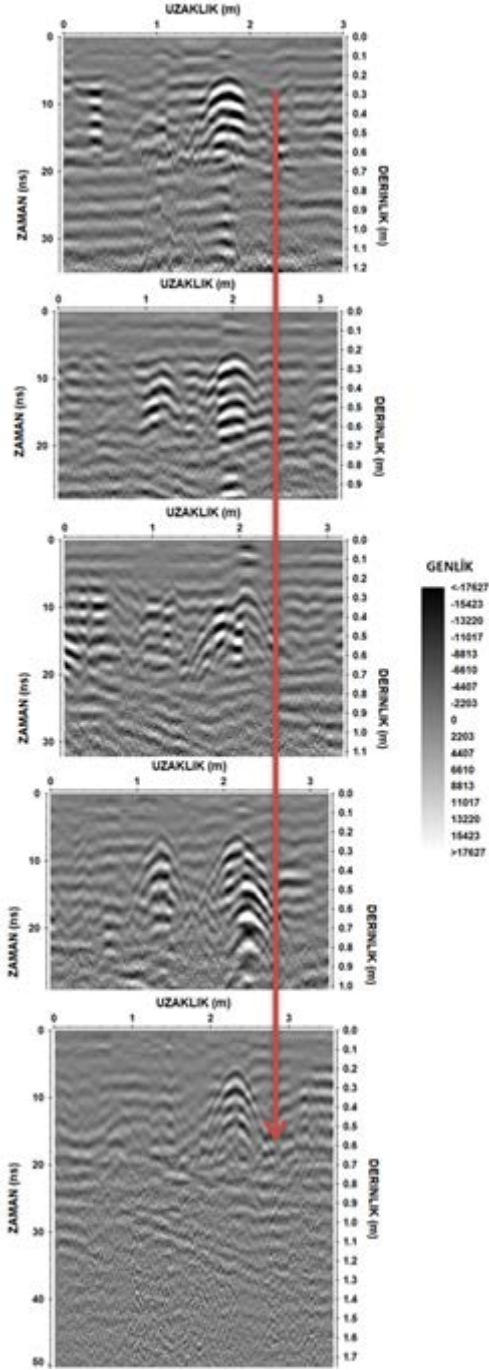


Şekil 3.44. Çalışma alanı-1'de bulunan, ölçülerin alındığı 100'lük PVC akar borusu



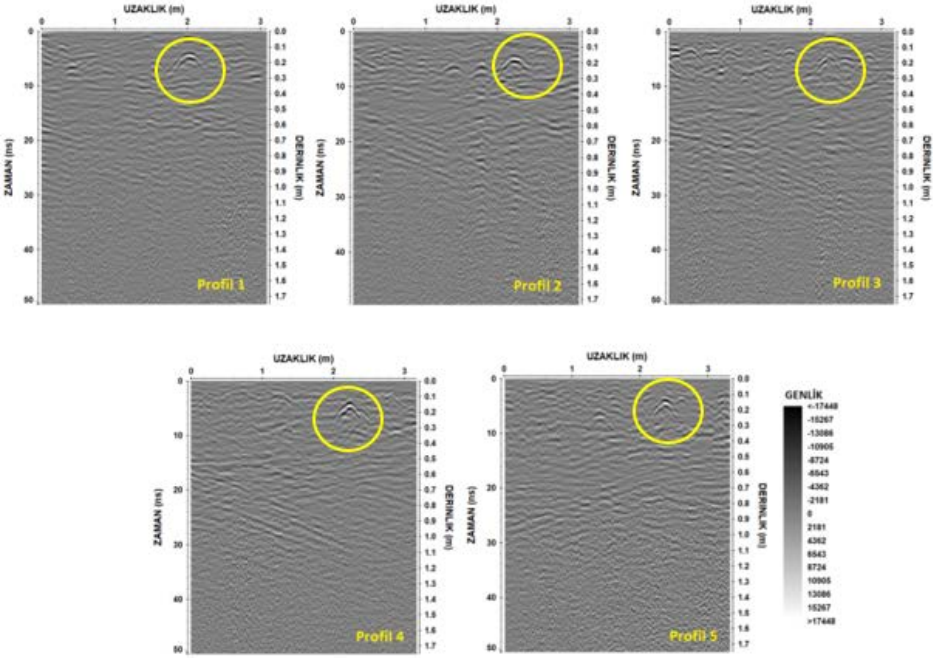
Şekil 3.45. Akar borusu boş iken 500 MHz antenle elde edilen radargramlar

Akar borusu boş iken 500 MHz antenle 0.5 m aralıklarla 5 profilde Şekil 3.45'te gösterilen radargramlar elde edilmiştir. Profillerin tamamında elde edilen radargramlarda, bu 100'lk PVC borusuna ait hiperboller (oklarla gösterilen) ve profil 1, 2, 3 ve 4'te diŐer boruya/borulara ait hiperboller (ember içerisine alınan) ortaya çıkmıştır (Şekil 3.45).



Şekil 3.46. Akar borusu boş iken 500 MHz antenle elde edilen radargramların alt alta gösterimi

Bütün profillerdeki bu radargramlarda borunun uzanımını temsil eden hiperboller gösterilen ok yönünde görülmektedir (Şekil 3.46). Şekil 3.45'te gösterilen profil 1, 2, 3 ve 4'teki radargramlarda izlenen hiperbollerin yer altında bulunan başka borulara ait olacağı düşünülmektedir. Trabzon TİSKİ'de görevli kişilerle yapılan görüşme neticesinde bu durum doğrulanmış ve orada daha önceden döşenmiş boruların olduğu ifade edilmiştir.

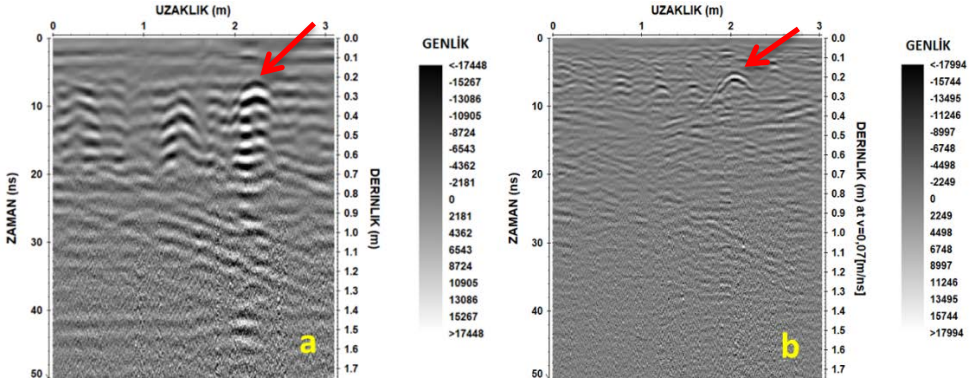


Şekil 3.47. Akar borusu boş iken 800 MHz antenle elde edilen radargramlar

800 MHz antenle elde edilen bu radargramlarda da 100'lük PVC'nin verdiği hiperboller (çember içerisine alınan) ortaya çıkmıştır. Bütün bu profillerdeki radargramlarda daha önceden döşenmiş borulara ait olacağı düşünülen başka hiperboller de gözlenmiştir (Şekil 3.47).

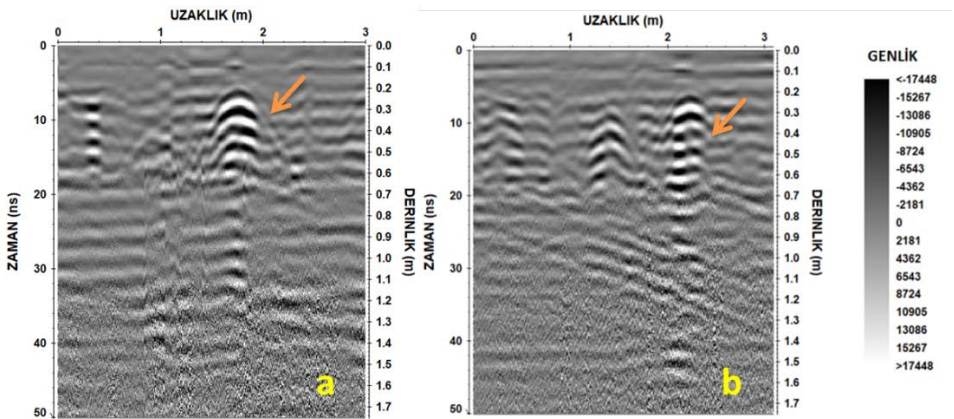
2. Aşama: PVC borunun görünen ucundan yaklaşık 120 cm içerisine doğru tıkama malzemesi (poşet, bebek bezi) konularak 500 MHz ve 800 MHz korumalı antenlerle tıkanıklığın olduğu kısımda, şekil 3.44'te gösterilen profil

yönünde 1'er profil ölçü alınmıştır (Şekil 3.48). Bu aşamada boru sadece tıkalıdır içerisinde su akışı olmamaktadır.



Şekil 3.48. Akar borusu tıkalı olduğu durumda 500 MHz (a) ve 800 MHz (b) antenlerle elde edilen radargramlar

Akar borusu tıkalı olduğu durumda, 500 MHz (Şekil 3.48 a) ve 800 MHz (Şekil 3.48 b) antenlerle elde edilen radargramlar karşılaştırıldığında; 800 Mhz antenle elde edilen radargramda hedef boruya ait hiperbolün daha iyi olduğu görülmüştür. Oklarla gösterilen hiperboller hedef boru olan 100'lük PVC boruya aittir (Şekil 3.48).

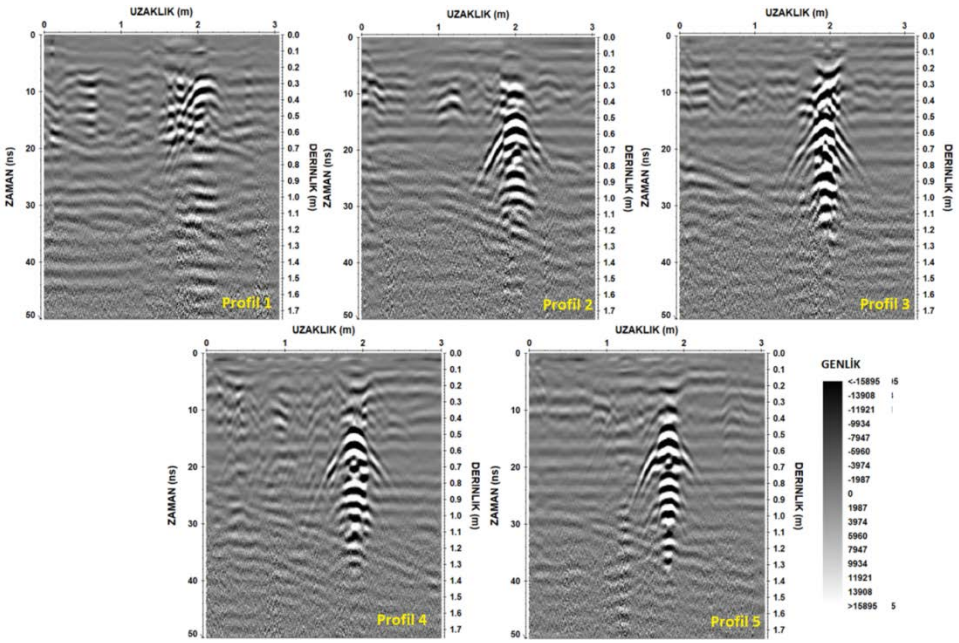


Şekil 3.49. Akar borusu boş (a) ve tıkalı (b) olduğu durumlarda 500 MHz antenle elde edilen radargramların karşılaştırılması

Şekil 3.49 a'da gösterilen ve boru boş iken elde edilen radargramda gözlenen hiperbolün yapısı aynı antenle elde edilen ve şekil 3.49 b'de gösterilen ve boru tıkalı iken elde edilen radargramın yapısından farklılık göstermektedir. Şekil 3.49 a'daki radargramda hiperbolün yapısı tam olarak görünürken, Şekil 3.49 b'de bu hiperbolün yapısında bozulmalar meydana gelmiştir.

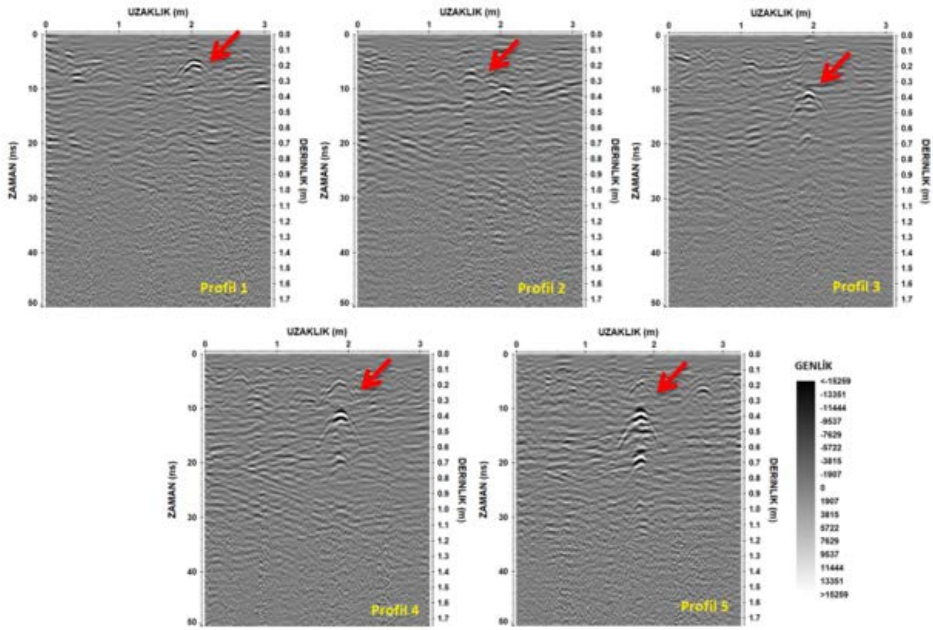
Şekil 3.48 ve Şekil 3.49'daki radargramlarda oklarla gösterilen hiperbollerin dışındaki diğer hiperboller yeraltında gömülü bulunan diğer borulara aittir.

3. Aşama: Boru tıkalıyken, bu borunun bağlı olduğu çeşmenin musluğu (yaklaşık 200 m ötesinde) açılarak borunun su dolması sağlanmıştır. Boru tamamen su dolduktan sonra 500 MHz ve 800 MHz korumalı antenlerle 0.5 m aralıklarla, şekil 3.44'te gösterilen profil yönünde 5'er profil ölçü alınmıştır.



Şekil 3.50. Akar borusu tıkalı ve tamamen su dolu iken 500 MHz antenle elde edilen radargram

Akar borusu tıkalı ve su dolu iken 500 MHz anten kullanılarak 5 profilde ve 0.5 m aralıklarla elde edilen bu radargramlarda (Şekil 3.50) hiperboller izlenmiştir. Bu hiperbollerin yapısı boş borunun verdiği hiperbollerin yapısından (Şekil 3.49 a) saçılmış yansımalar ve yüksek genlik bakımından farklılık göstermektedir. Bu durum borunun tamamen su dolu olmasından ve ölçü alınan zeminin ıslak olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Profil 1 ve 2'deki radargramlarda başka hiperbollerde görülmektedir. Profil 3, 4 ve 5'te bu hiperbolün genliği zayıflamıştır. Ayrıca bu antenle ölçü alınırken çalışma alanının zemini akar borusunun başka yerlerindeki su kaçağından dolayı ıslanmıştır. Ölçüler ıslak olan bu zeminin üzerinden alınmıştır.

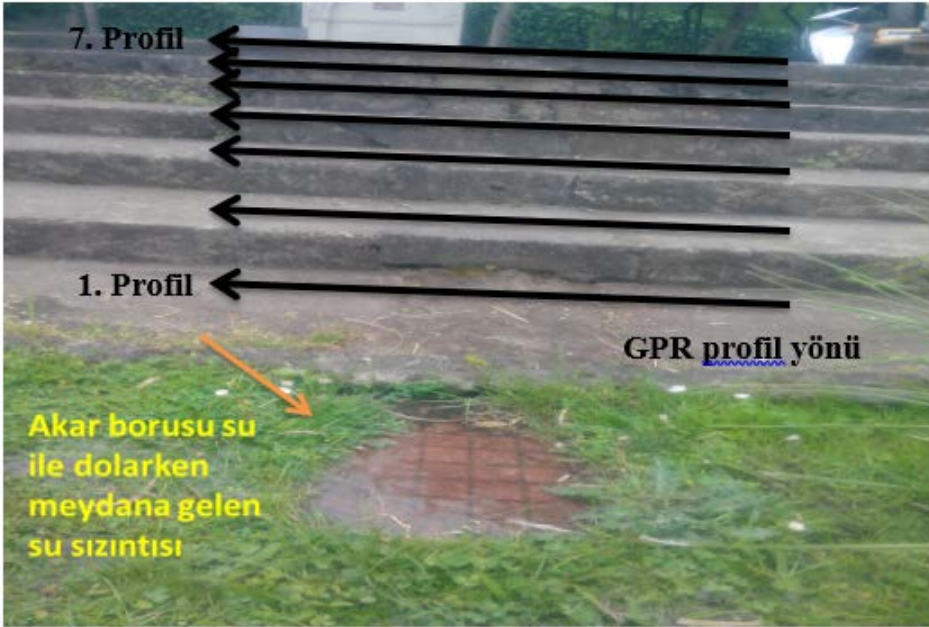


Şekil 3.51. Akar borusu tıkalı ve tamamen su dolu iken 800 MHz antenle elde edilen radargram

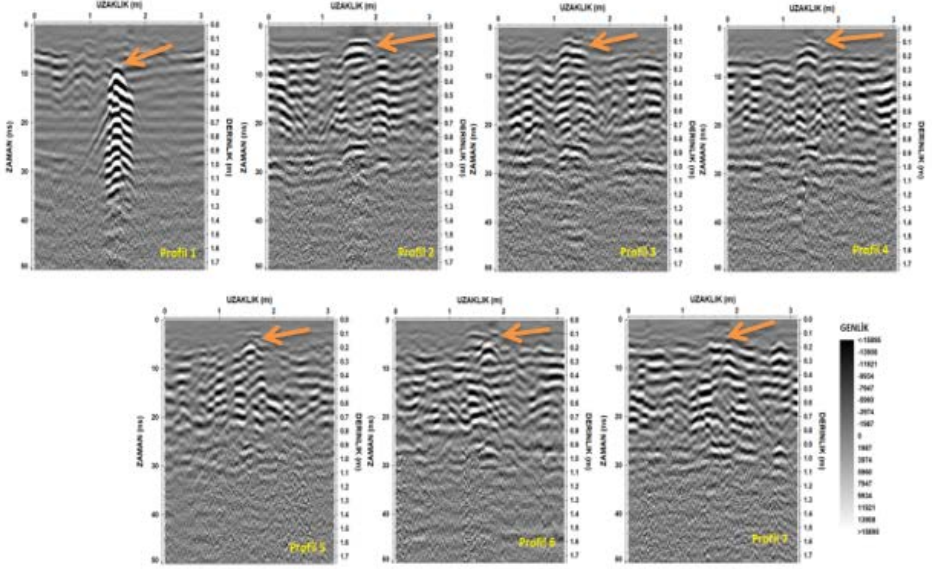
800 MHz antenle, akar borusu tıkalı ve tamamen su dolu iken ölçüler alınmış ve elde edilen radargramlar Şekil 3.51'de gösterilmiştir. Bütün profillerdeki radargramlarda hedef boruya (okla gösterilen) ve boru olduğu düşünülen diğer nesnelerin ortaya çıkardığı hiperboller görülmektedir. Bu radargramlarda izlenen hiperbollerin yapısı (Şekil 3.51), boru boş iken 800 MHz antenle alınan profillerdeki hiperbollerin (Şekil 3.47) yapısından farklılık göstermektedir. Boru boş olduğunda hiperbollerin yapısı daha düzgün iken, boru su dolu olduğunda

ortaya çıkan hiperbollerin yapısında bozulmalar ve saçılmalar meydana gelmiştir.

4. Aşama: Borunun çeşmeye bağlanan güzergahı üzerinde bulunan ve betondan yapılmış merdivenin basamaklarında, her basamakta bir profil olacak şekilde 500 MHz ve 800 MHz merkez frekanslı korumalı antenlerle 7'şer profil ölçü alınmıştır (Şekil 3.52). Profillerin uzunluğu 3 m' dir. Ölçüler, buradan geçtiği düşünülen boru tamamen su dolu iken alınmıştır.

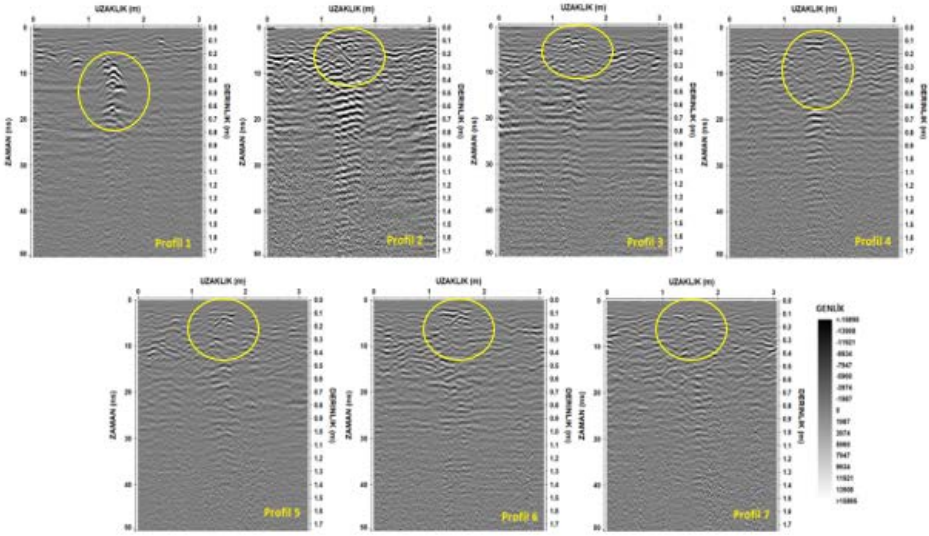


Şekil 3.52. 500 MHz ve 800 MHz antenlerle ölçü alınan, çeşmenin yakınında bulunan betondan yapılmış merdivenlerden ve meydana gelen su sızıntısından görünüm



Şekil 3.53. 500 MHz antenle merdivenlerde yapılan ölçülerde elde edilen radargramlar

500 MHz antenle, her basamakta 1 profil olacak şekilde 7 profilde ölçü alınmış ve elde edilen radargramlar gösterilmiştir (Şekil 3.53). Bütün profillerdeki radargramlarda, uzaklık ekseninde yaklaşık 1.75 m’de hedef boruya ait olduğu düşünülen hiperboller (okla gösterilen) gözlenmiştir. Radargramlarda başka boruların ortaya çıkardığı düşünülen hiperboller de görülmektedir. Radargramlardaki veriler, merdivenlerin betondan yapılmış olması ve betonun homojen bir yapıda olmamasından dolayı bir karmaşık hale gelmiştir.



Şekil 3.54. 800 MHz antenle merdivenlerde yapılan ölçülerde elde edilen radargramlar

Araştırılan hedef boru, 500 MHz antenle elde edilen profillerdeki radargramlarda (Şekil 3.53) görülen hiperbollere benzer şekilde bu profillerdeki radargramlarda (Şekil 3.54) uzaklık ekseninde yaklaşık 1.75 m’de hiperboller (çember içerisine alınan) görülmüştür. Ayrıca, bu profillerdeki radargramlarda ortaya çıkan başka hiperbollerde görülmektedir. Hem 500 MHz hem de 800 MHz frekanslı antenlerle elde edilen radargramlarda hedef borunun uzanımı ve derinliği tespit edilebilmektedir.

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Modelleme Çalışmaları;

Reflex-Win programının modelleme modülü kullanılarak tasarlanmış model geometri ve fiziksel özelliklerine göre düz çözümüleme çalışmalarında hem 500 MHz hem de 800 MHz merkez frekanslı antenler kullanılarak elde edilen radargramlar (Şekil 2.3) karşılaştırıldığında her iki anteninde ortam koşullarının homojen olması nedeniyle oldukça iyi sonuçlar verdiği görülmektedir. Bununla birlikte arazi ortamı homojen bir yapıda olmadığı için yapılan çalışmaya uygun anten frekansı seçilmesinde yarar olacaktır.

Laboratuvar Çalışmaları;

Metal ve plastik deney sandıklarında oluşturulan modellerde, 500 MHz ve 800 MHz frekanslı antenler kullanılmıştır.

- Metal sandıkta; 500 MHz frekanslı anten ile elde edilen radargramlarda kenar yansımaları 800 MHz frekanslı anten ile elde edilen radargramlardan daha belirgin ve baskın bir şekilde görülmektedir. 800 MHz frekanslı anten ile genellikle daha iyi sonuçlar alınmaktadır.
- Plastik sandığın derinliği az olduğu için, bu sandıkta 800 MHz anten kullanılmıştır. Bu sandıktan elde edilen radargramlardaki kenar yansımaları metal sandığa göre daha az olmaktadır.
- Derinliği sığ olan boruların 800 MHz anten ile araştırılması daha iyi sonuçlar vermektedir.
- Tıkalı, problemlı ve su dolu boruların verdiği hiperbollerin genlikleri boş boruların verdiği hiperbollerin genliklerinden daha düşük olduğu görülmüştür. Ayrıca boş ve sağlam boruların hiperbollerini daha düzgün olurken, problemlı ve su dolu boruların hiperbollerinin yapısı daha bozuk olmaktadır.
- Toplanan verilere ileri veri işlem adımlarının uygulanması radargramların daha iyi yorumlanmasına yardımcı olacaktır.
- Yer radarı (GPR) yönteminde boruların; derinlikleri, uzanımları, çapları, türleri, problemlı, tıkalı vb. durumları tespit edilebilmektedir.

- Borulardaki tıkanıklıkları ve küçük hasarları tespit edebilmek için daha sık profillerle ölçülerin alınması yararlı olacaktır. Diğer bir deyişle profil aralığı küçük seçilmelidir.

❖ Laboratuvar Model-1

Farklı çaptaki ve derinlikteki koruge borularıyla oluşturulan Model-1'de hem 500 MHz hem de 800 MHz antenle ölçüler alınmış ve radargramlar elde edilmiştir. Temel veri işlem adımları uygulanarak yorumlanan radargramlardan 800 MHz merkez frekanslı antenin daha iyi daha belirgin sonuçlar verdiği görülmüştür.

❖ Laboratuvar Model-2

Model-1'de oluşturulan geometride sandığın üzerine fayans döşenerek oluşturulan bu modelde; fayans tabakasının 500 MHz antenle elde edilen radargramlara gözle görülür bir etkisi olmadığı ancak, 800 MHz antenle elde edilen radargramlardaki hiperbollerin genlikleri düşürdüğü gözlemlenmiştir.

❖ Laboratuvar Model-3

50, 100 ve 150'lik PVC borular kullanılarak oluşturulan bu modelde, boruların durumları ve tıkalı olan kısmı her iki anten frekansında da izlenebilmektedir. Ancak 800 MHz antenle elde edilen radargramların boruların durumlarını daha iyi ortaya koyabilir.

❖ Laboratuvar Model-4

Bu modelde 150, 100 ve 80'lik sert PVC borular kullanılmıştır. Radargramlarda; et kalınlığı fazla olan borunun hiperbolü, et kalınlığı az olan borunun hiperbolüne kıyasla daha yüksek genliklerde görülmektedir. Tıkanıklık her iki anten frekansında da tespit edilebilmektedir. Radargramlara göre 500 MHz anten ile 800 MHz anten kıyaslandığında; 800 MHz antenin tıkanıklık ve boruların durumları hakkında daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür.

❖ Laboratuvar Model-5

Model-5'te 63'lük, 40'luk ve 20'lik kangal borular ile 100'lük PVC boru kullanılmıştır. 500 MHz antenle küçük çaptaki boruların tespit edilmesi zorlanmıştır. Buna karşın 500 MHz anten hem küçük çaptaki

boruyu hem de boruların durumlarını (tıkanıklık, boş, su dolu vb.) daha iyi ortaya çıkarabilir.

❖ Laboratuvar Model-6

Farklı türdeki 100'lük PVC, 120'lik çelik ve 63'lük kangal boruların kullanıldığı bu modelde, elektrik iletkenlik (σ) değeri yüksek olan borular radargramlarda daha yüksek genliklerde izlenmiştir. Ayrıca boruların et kalınlıkları arttıkça elde edilen hiperbolün genliği de yükselmektedir. Ölçü aletinin güç kaynağındaki zayıflama radargramlarda yapay bozulmalara sebep olabilmektedir.

❖ Laboratuvar Model-7

Plastik sandıkta yapılan bu modelde bir ucu kırık ve eksik olan, içi tamamen boş 125'lik PVC boru kullanılmıştır. Elde edilen radargramlarda borunun kırık ve eksik olan ucu tespit edilebilmektedir. Borunun kumla dolması durumunda, boş boruda olduğu gibi görülmesi beklenen hiperbol gözlemlenmeyebilir.

❖ Laboratuvar Model-8

Sandığın üzeri parke taşları ile kaplanarak oluşturulan bu modelde elde edilen radargramlardaki hiperbollerin genliklerinde düşmeler gözlemlenmiştir. Bununla birlikte sığ derinlikte bulunan, araştırılan hedef borunun durumu radargramlarda gözlemlenmektedir. Düşük frekanslı antenle (800 MHz) alınan ölçülerde düşüş fark edilebilmektedir. Bunun etkisini ortadan kaldırmak için yüksek (500 MHz vb.) frekanslı antenler tercih edilebilir.

❖ Laboratuvar Model-9

800 MHz merkez frekanslı antenin kullanıldığı, plastik sandıkta oluşturulan bu modelde; borunun uzanımı, derinliği, kırık/eksik olan yeri ve tıkalı olan kısmı tespit edilebilmektedir. Ancak delik olan yeri tespit edebilmek için daha küçük aralıklarla ölçülerin alınması ve daha düşük frekanslardaki antenlerin tercih edilmesi gerekebilir. Tıkalı olan yer radargramda daha düşük genlikte izlenmektedir. Borunun eksik, kırık olan kısmından elde edilen radargramda hiperbolün yapısında ise bozulmalar meydana geldiği görülmüştür.

Arazi Çalışmaları;

Yapılan arazi çalışmalarında 500 MHz ve 800 MHz frekanslı antenler kullanılmıştır. Arazi yapısının daha karmaşık olması ve boruların buldukları konumlara göre her iki anten frekansından da iyi sonuçlar alınabilmektedir. Bununla birlikte yapılan çalışmalarda elde edilen sonuçlar kıyaslandığında, genel olarak 800 MHz frekanslı antenin problemin tespitine yönelik daha uygun olduğu görülmüştür. Borularda problemlili olduğu düşünülen kısımların tespit edilebilmesi için daha sık profillerle ölçülerin alınması sağlıklı olacaktır.

❖ Çalışma Alanı-1

Gümüşhane Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi kantin girişinin sol tarafındaki akar borusunun geçtiği güzergâh üzerinde, toplamda 31 hatta toplanan verilerde elde edilen radargramlarda 22. hata kadar olan radargramlarda araştırılan boruya ait hiperboller gözlenmiştir. 22. hattan itibaren bu hiperbollerin yapısında bozulmaların meydana geldiği ve genliklerinin zayıfladığı izlenmiştir. Bu durumdan hareketle tıkalı olan kısmın 22. hat ile 31. hat arasında olduğu düşünülmüştür. Ayrıca 1. hattan 31. hata doğru borunun gömüldüğü derinliğinde azalma tespit edilmiştir.

❖ Çalışma Alanı-2

Bu çalışma sahasında su kaçağı sorunu yaşanan alan üzerinde 500 MHz merkez frekanslı anten kullanılarak 13 hatta alınan GPR ölçümlerinde hedef borunun güzergâhı ve konumu tespit edilmiştir. Bunun yanında çalışma alanında gömülü diğer borularında verdiği hiperboller de radargramlarda gözlenmiştir. Alanın asfalt tabakalı ve heterojen yapıda olması radargramları karmaşık hale getirebilmektedir.

❖ Çalışma Alanı-3

Çalışma kapsamında seçilen Trabzon 100. Yıl parkında, çeşmenin atık su tahliyesi için döşenen 100'lük PVC borunun geçtiği alanda 4 aşamada gerçekleştirilen çalışmalarda, hem 500 MHz frekanslı antenle hem de 800 MHz frekanslı antenle alınan ölçülerden başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Söz konusu borunun gömüldüğü derinlik düşük olduğu için her iki anten frekansında da borunun durumu hakkında bilgiler elde edilebilmiştir. Akar borusu boşken radargramlarda gözlenen hiperbol düzgün ve yüksek genlikli; tıkalıyken gözlenen hiperbol bozuk ve düşük genlikli olarak meydana gelmiştir. 500 MHz ve 800 MHz frekanslı

antenlerle elde edilen radargramlarda hedef borunun uzanımı ve derinliği tespit edilebilmektedir.

Sonuç olarak; bu çalışma kapsamında, temiz ve atık su altyapı sistemlerinde kullanılan farklı tür ve çaptaki borularda yaşanan problemler (delinmeler, su sızdırmaları, tıkanma vb.) yapılan çalışmalarla yer radarı yöntemi ile araştırılmıştır. Çalışmalar neticesinde, bu tarz problemlerin başarılı bir şekilde tespit edilebileceği gösterilmiştir. Ülkemizin kaynaklarını ekonomik kullanmak; zaman, işçilik, makine-ekipmanlardan tasarruf etmek ve en önemlisi su kaynaklarımızı boşa akıtmamak için yapılacak benzer araştırmalarda bu çalışmanın dikkate alınması faydalı olacaktır.

Çalışmalara katılanların sağlık ve güvenlikleri açısından bakıldığında; uygulamalı mühendislik çalışmaları genellikle laboratuvar veya arazi şartlarında yapılmaktadır. Hem laboratuvarlar hem de araziler sahip olduğu şartlar bakımından birbirinden farklı tehlike ve riskler barındırmaktadır. Bu tehlike ve riskler Fiziksel, Kimyasal, Biyolojik, Ergonomik ve Psikososyal şeklinde olabilmektedir.

Laboratuvara veya araziye gidecek kişilerin öncelikle Temel İş Sağlığı ve Güvenliği Eğitimini almaları farkındalıklarını arttıracaktır. Bununla birlikte laboratuvara veya araziye gitmeden önce İş sağlığı ve güvenliği bağlamında gerekli tedbirlerin alınması, kişisel koruyucu donanımların hazır bulundurulması önem arz etmektedir. Benzer şekilde laboratuvarın içerisinde veya arazide de tehlike ve risklere karşı önlemlerin alınması gerekmektedir. İlkyardım gerektirecek olaylara karşı ilkyardım çantası da bulundurulmalıdır.

5. KAYNAKLAR

- Allred, B. J. ve Redman, J. D., 2010. Location of Agricultural Drainage Pipes and Assessment of Agricultural Drainage Pipe Conditions Using Ground Penetrating Radar, USA
- 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

- 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 (SingenBasin, 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, 177.
- Batey, R. A., 1987. Subsurface interface radar at Sephoris, 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.

- Beyaz Özdemir, M., Alt Yapı Elemanlarının Yer Radarı Yöntemi İle Araştırılması (KTÜ Kanuni Yerleşkesi), Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2015.
- 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.

- 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.
- 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.
- Çataklı, A., Sığ Yeraltının Görüntülenmesinde Yer Radarı Yöntemi, Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2003.
- 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.
- 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.
- Dellwig, L. F. ve Bare, J. E. , 1978. A radar investigation of North Louisiana salt domes. Photogrametric Engineering and Remote Sensing, 44, 1411-1419.
- Demirci, S., Yigit, E., Eskidemir, I. H., Ozdemir, C., 2011. Ground penetrating radar imaging of water leaks from buried pipes based on back-projection method, NDT&E International, 35-42, Mersin, Türkiye.
- 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, Polar Record, 11, 406-410.
- Eyuboglu, S., Mahdi, H. H., ve Al-Shukri, H. J., 2003. Detection of water leaks using ground penetrating radar, The 3rd International Conference on Applied Geophysics, Orlando, America.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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 Akkopru Dam Reservoir Area, Mugla, 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,
- Karataş K., Çolak E. ve Sancar C., 2014. HKMO-Mühendislik Ölçmeleri STB Komisyonu 7. Mühendislik Ölçmeleri Sempozyumu 15-17 Ekim 2014, Hitit Üniversitesi Çorum.
- Kayen, R. E., Barnhardt, W. A., Ashford, S., Rollins, K., Minasian, D. L., & 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.
- Kurt, B.B., Kadioğlu, S. ve Ekinioğlu, E.E., 2009. Yer radarı yöntemi ile gömülü boruların konum, byklk ve fiziksel özellikleri ile belirlenmesi. Yerbilimleri, 30, 1
- Kurtulmuş, T.., 2007. Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Sığ Jeofizik Aramacılıkta Yer Rradarı Modellemesi
- 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.
- Mertzanides, I.C., Soupios, P. M., Tsokas, G. N., Vargemezis, G. ve Paliadeli-Saatsoglou, C., 2003. 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_Mertzanides_1.PDF, 24.12.2016
- 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.
- 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.
- Olhoeft, G. R., 1981. Electrical Properties of Rocks. in Y. S. Touloukian, W. R. Judd, and R. F. Roy, (Ed.). Physical Properties of Rock and Sand Minerals, 257-330, NY: McGraw-Hill.
- 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. 7 th 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.
- Öğretmen, Z. ve Şeren A., 2014. Investigation Fracture-Crack Systems with Geophysical Methods in Bayburt Kıratlı Travertine, Journal of Geophysics and Engineering, 11-6.
- 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.

- 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.
- Roden, J. A. ve Gedney, S. 2000. An efficient FDTD implementation of the PML with CFS in general media, IEEE.
- 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.
- Sensors and Software, 1996. Pulse EKKO100 User's Guide, V1.2, technical manual 25, Canada.
- Sevgi, L. 1999. Elektromagnetik problemler ve sayısal yöntemler, Canada
- 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 fur Gletscherkunde, 18-24.
- Şeren, A., Gelişli, K. and Çataklı, A., 2008. A Geophysical Investigation of The Late Roman Underground Settlement at Aydıntepe, 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.
- Van der Kruk, J., Streich, R., Green, A.G., 2006. Properties of Surface Wave Guides Derived from Separate and Joint Inversion of Dispersive TE and TM GPR Data, Geophysics, 71, 1.
- 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.

- Wallace W.L. Lai, Ray K.W. Chang, Janet F.C. Sham, K. Pang, 2014. Perturbation Mapping Of Water Leak In Buried Water Pipes Via Laboratory Validation Experiments With High-Frequency Ground Penetrating Radar (GPR).
- Wahab, S. W., 2013. Assessing The Condition Of Buried Pipe Using Ground Penetrating Radar. A Thesis submitted to The University of Birmingham For the degree of MASTER OF PHILOSOPHY (MPhil). School Of Civil Engineering College Of Engineering And Physical Science The University Of Birmingham.
- Wang, T. ve Tripp, A.C., 1996 FDTD Simulation of EM Wave Propagation in 3-D Media. *Geophysics*, 61, 1, 110-120.
- 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.
- 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., and McMechan, G.A., 1997. GPR characterization of buried tanks and pipes. Geophysics, 62, 797-806.
- URL-1 <https://egov.nik.gov.pl/g/egov/TR/2008/MunicipalInvestments/2008-1Aykome.pdf>, 22.09.2016
- URL-2 <http://www.aykome.com.tr>, 24.01.2017
- URL-3 <http://www.sandmeier-geo.de/index.html>, 08.10.2016
- URL-4 http://www.tespitmuhendislik.com/YERALTI_RADARI_-_GPR.html, 17.02.2016
- URL-5 <http://www.fizik.net.tr/site/elektromanyetik-dalgalar/>, 31.08.2016

URL-6 <https://www.fullprogramlarindir.com/etiket/golden-software-voxler-indir>, 27.01.2017