

**T.C.  
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YER RADARI ÖLÇMELERİNDE TOPOGRAFIK ETKİLERİN DÜZELTİLMESİ:  
KÜRESEL KONUM BELİRLEME SİSTEMİ VE EĞİTİM ÖLÇER ENTEGRASYONU**



**CELALETTİN UÇAR**

**DOKTORA TEZİ  
HARİTA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
UZAKTAN ALGILAMA VE CBS PROGRAMI**

**DANIŞMAN  
DOÇ. DR. FÜSUN BALIK ŞANLI**

**İSTANBUL, 2017**

T.C.  
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YER RADARI ÖLÇMELERİNDE TOPOGRAFIK ETKİLERİN DÜZELTİLMESİ:  
KÜRESEL KONUM BELİRLEME SİSTEMİ VE EĞİMÖLÇER ENTEGRASYONU**

Celalettin UÇAR tarafından hazırlanan tez çalışması 18.12.2017 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Harita Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Tez Danışmanı**

Doç. Dr. Füsun BALIK ŞANLI  
Yıldız Teknik Üniversitesi

**Jüri Üyeleri**

Doç. Dr. Füsun BALIK ŞANLI  
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Fatmagül KILIÇ GÜL  
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Nebiye MUSAOĞLU  
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Cem GAZİOĞLU  
İstanbul Üniversitesi

Doç. Dr. Burak AKPINAR  
Yıldız Teknik Üniversitesi

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

## ÖNSÖZ

Bu tez, Yıldız Teknik Üniversitesi Geomatik Mühendisliği Bölümü - Uzaktan Algılama ve CBS doktora programı kapsamında yazılmıştır. Tezden üretilen 1 adet Türkçe, 2 adet İngilizce bilimsel makalenin yanı sıra Türk Patent Enstitüsünde 2016/07013 başvuru numarası ve “Jiroskopik Jeoradar” buluş başlığıyla kayıtlı ulusal patent başvurusu bulunmaktadır. WIPO kapsamındaki uluslar arası patent başvurusu ise Tübitak tarafından desteklenmektedir. Türkiye’de Harita Mühendisliği alanında GPR konusunda yapılan ilk doktora çalışmasıdır.

Araştırmam boyunca yapıcı yorumları, titiz yaklaşımı ile her zaman yanımda olduğunu hissettiren değerli danışman hocam Füsun BALIK ŞANLI’ya teşekkürlerimi sunmayı borç bilir, benim için ayrı bir motivasyon kaynağı olan bu bilim insanına öğrencileri tarafından verilen “ana” ünvanının haklılığını burada tüm kalbimle teyit etmek isterim.

Tezin izlenmesi sürecinde jüri üyelerim Prof. Dr. Fatmagül KILIÇ GÜL ve Prof. Dr. Nebiye MUSAOĞLU’na, benden yardımını hiç esirgemeyen Prof. Dr. Uğur ŞANLI ve Araş. Gör. Mustafa ÜSTÜNER’e katkı ve tavsiyeleri için ayrıca teşekkür ederim.

Yerli literatürün son derece kısıtlı olduğu bir alanda yapılan bu çalışmayı; kendilerinden esirgemek zorunda kaldığım zamana karşılık olarak Zehram’a, kızım Eylül’e ve sevgili dedem’e ithaf ediyorum.

Aralık, 2017

Celalettin UÇAR

## İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ .....	vi
KISALTMA LİSTESİ .....	vii
ŞEKİL LİSTESİ.....	viii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xi
ÖZET.....	xii
ABSTRACT .....	xiv
<b>BÖLÜM 1</b>	
GİRİŞ.....	1
1.1 Literatür Özeti.....	1
1.2 Tezin Amacı.....	6
1.3 Hipotezler .....	6
<b>BÖLÜM 2</b>	
GPR.....	8
2.1 Radar Enerjisinin Üretilmesi ve Yayılması.....	10
2.2 GPR Dalgalarının Üretilmesi ve Kaydedilmesi .....	13
2.3 Veri Toplama Prosedürleri .....	15
2.4 Grid Tasarımı ve Profil Verilerinin Toplanması .....	20
2.5 Veri Kaydı.....	23
2.6 GPR da Anten ve Anten Seçimi .....	24
2.7 Radar Dalgalarının Yeraltındaki Yansıma ve Yayılımı.....	28
2.7.1 Radar Yansıma ve Yayılımının Ölçülmesi.....	28
2.7.2 Radar Enerjisinin Yeraltında Saçılması ve Sönümlenmesi.....	33
2.7.3 Yansıma Türleri.....	38
2.7.4 Yüzeyaltında Çözünürlük ve Özellikleri .....	40
2.8 Hız Analizi.....	43
2.9 Veri İşleme Aşamaları .....	60
2.9.1 Ölçek Düzeltmesi ve Yansıma Profillerinin Oluşturulması: .....	62
2.9.2 Yatay Bantlaşmanın Giderilmesi.....	63
2.9.3 Yüksek Frekans Gürültüsünün Giderilmesi .....	65
2.9.4 Çoklu Yansımanın Giderilmesi .....	66
2.9.5 Migration - Göçme Etkisi .....	67

2.9.6	Zayıf Yansımaların Görünürlüğünü Artırma: .....	69
2.9.7	Veri İşleme Sonuçları: .....	69
2.10	GPR Yöntemini Etkileyen Parametreler .....	70
2.10.1	Di-Elektrik Parametreler .....	70
2.10.2	Geçirgenlik- $\epsilon$ .....	70
2.10.3	Elektronik ve Atomik Polarizasyon .....	71
2.10.4	İletkenlik - $\sigma$ .....	74
2.10.5	Manyetik Geçirgenlik - $\mu$ .....	74
<b>BÖLÜM 3</b>		
<b>YÖNTEM VE METODOLOJİ .....</b>		
		<b>76</b>
3.1	Jiroskopik Düzeltme Modeli .....	76
3.2	Veri Setlerinin Tanımlanması .....	79
3.2.1	GNSS/GPS Verileri.....	79
3.2.2	Dijital Jiroskop .....	79
3.2.3	GPR Verileri .....	80
3.3	Jiroskopik Jeoradar Veri Tabanı (JJVT) .....	81
3.3.1	Çizelgeler .....	82
3.3.2	Veri Entegrasyonu .....	85
3.3.3	İşlem Adımları.....	85
<b>BÖLÜM 4</b>		
<b>BULGULAR.....</b>		
		<b>91</b>
4.1	GPR/GPS Kombinasyonu Uygulama Çalışması.....	91
4.2	GPR/GPS/İnklinometre Kombinasyonu Uygulama Çalışması.....	102
4.2.1	Ön Etüd Çalışması.....	104
4.2.2	Çalışma Alanının Oluşturulması.....	104
4.2.3	İklim.....	105
4.2.4	Jeoloji.....	105
4.2.5	Arazi Çalışmaları.....	106
4.2.6	Eşzamanlı GPR, GPS ve İnklinometre verilerinin kaydedilmesi.....	107
4.2.7	GPR Radargramlarının İşlenmesi.....	107
4.2.8	Modellerin Oluşturulması.....	112
4.2.9	GPR/GPS Kombinasyon Modeli ve Jiroskopik Düzeltme Modelinin Oluşturulması.....	124
4.3	Değerlendirme Analizleri.....	128
4.3.1	Klasik GPR, GPR/GPS Kombinasyon Modeli ve Jiroskopik Düzeltme Modelinin boyutları bilinen gömülü obje ile karşılaştırılması.....	133
<b>BÖLÜM 5</b>		
<b>SONUÇ VE ÖNERİLER.....</b>		
		<b>157</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>		
		<b>163</b>
<b>EK-A</b>		
<b>JİROSKOPİK JEORADAR VERİ TABANI (JJVT) İÇİN SQL VE EXCEL KODLARI.....</b>		
		<b>173</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>		
		<b>177</b>

## SİMGE LİSTESİ

---

A	Genlik
c	Işık hızı
$\epsilon_r$	Geçirgenlik
$\sigma$	İletkenlik
$\lambda$	Dalgaboyu
f	Frekans
$f_c$	Merkez Frekansı
$f_s$	Örnekleme Frekansı
$\phi$	Phi dönüklük açısı
$\omega$	Omega dönüklük açısı
K	Kappa dönüklük açısı
$K_d$	Dielektrik Sabiti
$\mu$	Manyetik Geçirgenlik
T	Periyot
V	Elektromanyetik dalga

## KISALTMA LİSTESİ

---

CMP	Common mid-point
EM	Elektromanyetik
Ems	Elektronik Conductivity Meter
FIR	Finite Impulse Response
GPR	Ground Penetrating Radar
GPS	Global Positional System
IIR	Infinite Impulse Response
JJVT	Jiroskopik Jeoradar Veri Tabanı
Mhz	Megahertz
Ns	Nanosaniye
RDP	Relative Dielectric Permittivity
UTM	Universal Transvers Mercator Projeksiyonu
WARR	Wide Angle Reflection and Refraction

## ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1 Elektromanyetik Dalga Yayılımı.....	11
Şekil 2.2 GPR Frekans Dağılımı.....	12
Şekil 2.3 Elektromanyetik dalga formlarının üretilmesi.....	13
Şekil 2.4 GPR anteni ile veri toplama.....	14
Şekil 2.5 Bir anten ölçüm tekerleği.....	16
Şekil 2.6 Yansıma İzi.....	17
Şekil 2.7 Tek kişilik GPR Sistemi.....	18
Şekil 2.8 Topografik olarak düzeltilmiş yansıma profili.....	19
Şekil 2.9 Düşük Frekans Anten.....	26
Şekil 2.10 Yüksek Frekans Anten.....	27
Şekil 2.11 Elektriksel Geçirgenlik (Elektrik İletkenlik) .....	30
Şekil 2.12 Gömülü Metal Objenin Ürettiği Yansıma.....	37
Şekil 2.13 Çok sayıda küçük hiperboller.....	38
Şekil 2.14 Yansıma Hiperbollerinin Üretilmesi.....	39
Şekil 2.15 Hız değerinin belirlenmesi için stratigrafik yapıların tanımlanması.....	46
Şekil 2.16 Dalgaların teorik seyir güzergahları.....	50
Şekil 2.17 CMP Testi.....	51
Şekil 2.18 CMP Testi (Radargram).....	52
Şekil 2.19 Ara Kesit (Tansillumination) Testi.....	55
Şekil 2.20 Ara Kesit(Transillumination) Test sonuçları.....	57
Şekil 2.21 RDP değerinin belirlendiği laboratuvar testi.....	59
Şekil 2.22 Topografik düzeltme yapılmış bir yansıma profili.....	62
Şekil 2.23 Yatay bantlaşmanın giderilmesi.....	64
Şekil 2.24 Çoklu Yansıma.....	66
Şekil 2.25 Migration uygulaması.....	68
Şekil 3.1 Klasik GPR Ölçme Tekniği.....	77
Şekil 3.2 Eğimli arazide UTM koordinat sistemine göre phi, omega ve kappa açıları ile uzaysal olarak dönük GPR profili tasviri.....	78
Şekil 3.3 Jiroskop ve Eksenleri.....	80
Şekil 3.4 Radargram üzerinde işaretlenen noktalar.....	81
Şekil 3.5 JJVT Model Diyagramı.....	81
Şekil 3.6 Jiroskopik Jeoradar Veri Tabanı (JJVT) ilişkilerinin kurulması.....	84
Şekil 3.7 Semt Açısı.....	86



Şekil 3.8	“Ölçülen Derinlik” - “Gerçek Derinlik” .....	88
Şekil 3.9	“Dikboy” .....	88
Şekil 4.1	İmalat Tip-Kesiti .....	93
Şekil 4.2	Sınır elemanı ile asfaltın kesiştiği ölçüm hattı.....	93
Şekil 4.3	İstanbul İli- Millet Caddesi üzerinde sağ ve sol şeritte yer alan ölçüm profilleri.....	95
Şekil 4.4	10 No’lu Profile ait Radargram .....	95
Şekil 4.5	20 No’lu Profile ait Radargram .....	96
Şekil 4.6	Çakarlı Trafik Aracı.....	97
Şekil 4.7	GPR/GPS entegrasyonu sağlanmış radargram örneği.....	98
Şekil 4.8	GPR ölçümleri sonucu üretilen NDT (Hasarsız Karot) örnekleri.....	101
Şekil 4.9	Maltepe Orhangazi Şehir Parkı ve Gömülü Su Depoları.....	103
Şekil 4.10	GPR ölçme modeli .....	104
Şekil 4.11	GPR ölçüm profilleri.....	105
Şekil 4.12	GPR profillerinin ölçümü.....	106
Şekil 4.13	GPR-GPS ve İnklinometre için data logger bağlantısı ve eşzamanlı veri kaydı.....	107
Şekil 4.14	40 No’lu Profile ait Ham (İşlenmemiş) Radargram örneği.....	108
Şekil 4.15	40 No’lu Profile ait Static Correction – Hava Düzeltmesi.....	109
Şekil 4.16	40 No’lu Profile ait radargrama uygulanan Dewow işlemi.....	109
Şekil 4.17	40 No’lu Profile ait radargramda zamansal sınırlama (Time Cut) işlemi.....	109
Şekil 4.18	40 No’lu Profile ait radargramda Genlik Artırımı (Gain Function).....	110
Şekil 4.19	40 No’lu Profile ait radargramda frekans bandı geçişi filtrelemesi .....	110
Şekil 4.20	40 No’lu Profile ait radargramda uygulanan 0,1 m/ns’lik hız düzeltmesi....	111
Şekil 4.21	Reflex-w yazılımıyla oluşturulan 3-D modelde 8 no’lu düşey kesit .....	112
Şekil 4.22 - 4.63:	İşaretlenmiş radargramlar.....	113
Şekil 4.64	Cor uzantılı GPS veri dosyası örneği.....	124
Şekil 4.65	GPR/GPS Kombinasyon Modeli.....	124
Şekil 4.66	GPR anteni üzerine sabitlenen 2 Eksenli Dijital İnklinometre.....	125
Şekil 4.67	GPR ile eşzamanlı yapılan İnklinometre kayıtları örneği.....	126
Şekil 4.68	Jiroskopik Düzeltme Modeli.....	127
Şekil 4.69	Gömülü Su depolarının 3 Boyutlu Modeli.....	130
Şekil 4.70	Su Depolarının İmalat Safhasına ait bir görünüm.....	129
Şekil 4.71	Su Depolarının inşaat safhasına ait bir görünüm.....	130
Şekil 4.72	Su Depolarının İmalat sonrasına ait görünüm.....	131
Şekil 4.73	22 No’lu radargram ve yüksek genlikli anomalilerin işaretlenmesi.....	132
Şekil 4.74	3 No’lu depo üzerinde yapılan 22 No’lu ölçüm profilinin her iki modelle kıyaslanması görülmektedir.....	133
Şekil 4.75	36 No’lu radargram üzerinde yüksek genlikli anomalilerin işaretlenmesi....	133
Şekil 4.76	36 No’lu profilde işaretlenen yüksek genlikli yansıma anomalilerinin Klasik GPR, GPR/GPS Kombinasyonu Modellerine dair noktaların aplikasyonu.....	134
Şekil 4.77	36 No’lu profilde işaretlenen yüksek genlikli yansıma anomalilerinin Klasik GPR ve GPR/GPS Kombinasyonu Modellerine dair koordinatlı noktalarının kesit görünümü.....	134
Şekil 4.78	41 No’lu ölçüm profili için Klasik GPR, GPR/GPS olmak üzere her iki modele ait detay noktaları.....	135

Şekil 4.79 41 No'lu ölçüm profili için Klasik GPR, GPR/GPS olmak üzere her iki modele ait detay noktalarının kesit görünümü.....	136
Şekil 4.80 41 no'lu Profil 3 No'lu su deposu üzerinde artan arazi eğiminin neden olduğu topografik değişiklikler ve GPR/GPS Kombinasyon Modelinin modellemeye olan katkısı.....	137
Şekil 4.81 Farklı eğim gruplarından alınan örneklemelerin profil ve lokasyonların depo sınırları ile ilişkisi.....	146
Şekil 4.82 Klasik GPR (siyah), GPR/GPS Kombinasyon Modeli (Mavi) ve Jiroskopik Düzeltme Modeli (yeşil) olmak üzere her üç modeldeki karşılıklarının depo sınırlarıyla olan ilişkisi.....	148
Şekil 4.83 1 derece eğimli arazi koşullarında seçilen detay noktalarının 3 modeldeki tasviri.....	150
Şekil 4.84 16 derece eğimli arazi koşullarında ve zemin anomalisinden seçilen detay noktalarının 3 modeldeki tasviri.....	151
Şekil 4.85 Yüzey anomalileri için GPR GPS Kombinasyon modeli (mavi) ve Jiroskopik Düzeltme Modeli (kırmızı) için modelleme başarısı grafiği.....	154
Şekil 4.86 Zemin anomalileri için GPR GPS Kombinasyon modeli (mavi) ve Jiroskopik Düzeltme Modeli (kırmızı) için modelleme başarısı grafiği.....	154

## ÇİZELGE LİSTESİ

---

	Sayfa
Çizelge 2.1 RDP değerleri.....	31
Çizelge 2.2 RDP ve Frekans değerleri arasındaki bağıntı.....	42
Çizelge 2.3 Veri işlemede kullanılan metotlar.....	61
Çizelge 3.1 GPS verileri .....	82
Çizelge 3.2 Detay noktaları.....	83
Çizelge 3.3 Dijital inklinometre verileri çizelgesi.....	84
Çizelge 3.4 Veri entegrasyonu çizelgesi.....	85
Çizelge 4.1 Eğimsiz arazide Klasik GPR ve GPR/GPS standart sapma hesabı.....	138
Çizelge 4.2 Eğimli arazide Klasik GPR ve GPR/GPS standart sapma hesabı.....	141
Çizelge 4.3 Standart sapma hesapları özet çizelgesi.....	144
Çizelge 4.4 Konum hatası özet Çizelgesi.....	144
Çizelge 4.5 Yüzey anomalisi örnekleri.....	147
Çizelge 4.6 Zemin anomalisi örnekleri.....	147
Çizelge 4.7 Standart sapma hesapları özet Çizelgesi.....	152
Çizelge 4.8 Yüzey örneklemeleri için modelleme başarı Çizelgesi.....	153
Çizelge 4.9 Zemin anomalileri için modelleme başarı Çizelgesi.....	153
Çizelge 4.10 Klasik GPR ve GPR/GPS Modelleri – Kübaj hesapları özet listesi.....	156

**YER RADARI ÖLÇMELERİNDE TOPOGRAFİK ETKİLERİN DÜZELTİLMESİ:  
KÜRESEL KONUM BELİRLEME SİSTEMİ VE EĞİMÖLÇER ENTEGRASYONU**

Celalettin UÇAR

Harita Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Füsun BALIK ŞANLI

Bu çalışmanın amacı bir uzaktan algılama teknolojisi olan GPR yöntemini etkileyen parametrelerden topoğrafik değişkenliğin ölçme sonuçlarına etkisini belirlemek ve söz konusu GPR ölçmelerinde arazi eğiminin sebep olduğu sistematik olmayan hatanın ortadan kaldırılması problemine Harita Mühendisliği disiplini içerisinde ölçme tekniğinin güncel metot ve teknolojilerini kullanarak çözüm bulabilmektir. Güncel Jeoradar tekniğinde arazi eğiminden kaynaklanan jiroskopik etkilerin neden olduğu gömülü objenin konumlandırma ve modelleme üzerindeki bozucu etkilerini GPS ve Dijital İnklinometre kullanılarak geliştirilen “Jiroskopik Düzeltme Metodu” yardımıyla gidermek mümkündür. Önerilen yöntem gömülü objenin yeraltındaki gerçek konumunu (UTM) koordinat sisteminde belirleyerek güncel uygulamalardan daha doğru konum verisine sahip yer altı haritalarının oluşturulmasına imkan tanımaktadır. GPS teknolojisi ile elde edilen topoğrafik verilerle dijital inklinometre verilerinin GPR ölçmeleriyle eşzamanlı olarak toplanması ve birlikte yorumlanması sayesinde arazi eğiminden kaynaklanan jiroskopik etkiler önemli ölçüde giderilebilmiştir. GPR/GPS/İnklinometre kombinasyonundan oluşan metodun performansının test

edilebilmesi için İstanbul İli, Maltepe İlçesi sınırlarında bulunan Orhangazi Parkında yer alan gömülü su depoları referans obje olarak kullanılmıştır.boyutları önceden bilinen gömülü obje referans alınarak klasik GPR ölçmeleri ile elde edilen 3D model, GPR-GPS kombinasyonundan elde edilen 3D model ve Jiroskopik Düzeltme modelleri referans objenin gerçek boyutlarıyla karşılaştırılmıştır. Klasik GPR yöntemi sonuçlarıyla karşılaştırıldığında düz arazi koşullarında her 3 yöntemle de birbirine yakın standart sapma değerleri elde edilirken eğimli arazide Jiroskopik Düzeltme Modelinin daha duyarlı nokta konum hatası ürettiği belirlenmiş, yatay nokta konum hatasının eğimli arazi koşullarında yaklaşık %54 civarında küçüldüğü/iyileştiği gözlemlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** GPR, GPS, Topografik Düzeltme, Jiroskopik Düzeltme



**TOPOGRAPHIC CORRECTION IN GROUND PENETRATING RADAR  
SURVEYS: GLOBAL POSITIONING SYSTEM AND TILTMETER INTEGRATION**

Celalettin UÇAR

Department of Geomatic Engineering

PhD. Thesis

Adviser: Assoc. Prof. Dr. Füsün BALIK ŞANLI

The objective of this study is defining the effect of topographic slope differences, as being one of the parameters that affect GPR -remote sensing technology, on measurement results, and to find out a solution to the problem of the unsystematic error resulted from slope area on GPR measurements with in the discipline of Geomatic Engineering by using recent survey methods and technologies. Using the "Gyroscopic Correction Method" developed by using GPS and Digital Inclinator, it is possible to determine the effect of the gyroscopic effects caused by land slope on the current Georadar technique, the buried object is to determine the underground real location in the (UTM) coordinate system, allowing for the creation of underground maps with more accurate location data than current applications. It is considered that it is possible to eliminate "Gyroscopic Effects" or an other words "antenna orientation problem" resulted from area slope differences with "Gyroscopic Correction Method" which improved with using digital inclinometer and GPS. This method provides determining the actual location of the buried object in (UTM) coordinate system and mapping the underground more accurately. Thanks to synchronized GPS and

inclinometer data collection the gyroscopic effect or an other word “antenna orientation error”, which caused by area slope differences, was eliminated significantly. In order to test the performance of the method derived from combination of GPR-GPS-Inclinometer, was compared with the actual dimensions of the buried water tanks in Orhangazi Park, located in Maltepe region of İstanbul. When comparing the results of the traditional GPR survey with those of the GPR/GPS/Inclinometer combination model, it has been noted that the Gyroscopic Correction method produced better horizontal point positioning precision, and the horizontal positioning uncertainty was improved about %54 for slope land area types.

**Keywords:** GPR, GPS, Topographic Correction, Gyroscopic Correction



#### 1.1 Literatür Özeti

Gömülü boru ve araçların güvenli ve doğru pozisyonlarının belirlenmesinde, yol durum incelemesi ve güçlendirme çalışmalarında, köprülerde ve havaalanı pistlerinde, binaların yapısal denetimlerinin sağlanması gibi çok geniş alanlarda kullanılmakta olan bir teknoloji olarak GPR, her geçen gün kelimenin tam anlamıyla milyonlarca insanın güvenliğini sağlayan hayati bir teknik haline gelmiştir. GPR'ın diğer önemli uygulama alanları; mayın arama ve boşluk tespiti gibi gömülü potansiyel tehlikeleri içerirken jeolojik oluşumların ve buzul ortamların araştırılması, arkeolojik alanların keşfedilmesi, tanımlanması ve kazı öncesinde konumlandırılmaları, yeraltındaki insan kalıntılarının ve silahların bulunması gibi adli tıp araştırmalarını da içerir. GPR her ne kadar geniş kullanım alanlarına sahip olsa da bu tekniğin başarılı bir şekilde uygulanabilmesi arka planındaki bilimsel temellerin iyi anlaşılmasını ve her bir uygulama alanına özel olarak yüksek düzeyde uzmanlığı gerektirmektedir (Perciso [1]).

Literatürde her bir konu başlığına karşılık gelebilecek çok sayıda araştırma bulabilmek mümkündür. Bunlara örnek olarak; sığ derinliklerdeki stratigrafik yapıların saptanması (Davis ve Annan [2]), sığ derinliklerdeki jeolojik oluşumların belirlenmesi (Koralay vd. [3]), Jeolojik fay hatlarındaki kırıkların haritalanması (Grandjean ve Gaury [4]; Greenet vd. [5]; Kadioğlu vd. [6]), karstik boşlukların belirlenmesi (Kadioğlu vd [6]), yer altı sularının belirlenmesi (Harrari [7]; Dannowski and Yaramancı [8]; Aspiron and Aigner [9]), yer altı sıvı hidrokarbon içeriklerinin belirlenmesi (Changryol vd. [10]). Bunların yanında; Arkeolojik araştırmalarda, tapınaklar, mezarlıklar, duvarlar, taban ve tarihi kalıntıların bulunması (Sambuelli ve Daniels [11], Kadioğlu vd. [12]), Metal tesisatların araştırılması, Yer altı tüplerinin, boru hatlarının, su



ya da benzin depolarının ve eski endüstriyel atık alanlarının belirlenmesi (Kadioğlu ve Daniels [13]), yapı denetim alanında yol, ray hatları, su tünelleri araştırmaları, madenlerde galeri duvarlarının sağlamliğının araştırılması, Maden galerilerindeki deformasyonların izlenmesi, galeri düzergahlarının belirlenmesi (Cardelli vd. [14]) gibi pek çok alanda GPR teknolojisi yaygın olarak kullanılmaktadır.

Bunların yanı sıra özellikle arkeolojik alanda tezin konu ile de alakalı oldukça önemli çalışmalar bulunmaktadır. Roma İmparatoru Trajanus'un Villasında yapılan araştırma bunlardan biri. Dean Goodman ve arkadaşları tarafından 2003 yılında yayınlanan ve Archeological Prospection adlı derginin 10. sayısında yer alan "The study and characterization of Emperor Trajan's villa using high-resolution integrated geophysical surveys" başlıklı makale oldukça önemlidir. Makaleye göre milattan sonra 52-117 yılları arasında yaşamış Roma İmparatoru Marcus Ulpius Trajanus savurgan yaşam tarzıyla tanınmasının yanı sıra Alplerin doğusundaki Affiliani dağında avlanarak zaman geçirmekte büyük zevk aldığı bilinmektedir. Bu bölgede imparator için 9 hektardan daha büyük bir alana inşa edilmiş bir villa bulunmaktaydı. Kaynaklara göre imparator avlanmak için buraya gelirdi. Villanın konumu 18. ve 19. Yüzyıllarda yapılan kazılar neticesinde bulundu. Villanın payandalı ince duvarlar üzerine inşa edilmiş teraslardan oluştuğuna inanılmaktadır. En düşük teras seviyesinde olan halka ait yapıları gün yüzüne çıkarmak için kazı faaliyetlerine halen devam edilmektedir. Villanın tamamı ise önümüzdeki 10 veya 20 yıl gibi bir sürede aşama aşama restore edilerek gün yüzüne çıkacaktır. GPR ölçümlerinden önce villa arazisi içerisindeki yapıların yalnızca % 5 kadarı bilinmekte idi. Kültür mirası uygulamaları teknoloji enstitüsü ile ortaklaşa yürütölen GPR ölçümlerine 1998 de başlanılmıştır. Villa arazisinde yapılan kapsamlı GPR ölçümleri 1998 den 2002 ye kadar sürmüştür. Ölçmelerden gelen ilk sonuçlar çevredeki gömölü vaziyette bulunan geometrik yapıları göstermiştir. GPR görüntülerine göre yüzeyden 3 metre derinde yüzme havuzu biçiminde oval bir yapı göze çarpmaktadır. Arkeologlar bunun bir yüzme havuzu değil sıcak yaz aylarında taze besin bulundurabilmek için hazırlanmış bir yılan balığı yetiştirme havuzu olduğunu tahmin etmektedirler. Daha derinlerden alınan yansıma ise (yaklaşık 8 m) kare zeminli bir başka zemin detayını göstermekteydi. Buranın ise villanın mozaik zemini olduğu tahmin edilmektedir. Bu bir tahmindir çünkü en dip yansımalara göre kare zeminin etrafında oval

yılan balığı havuzundan başka ikinci bir çembersel duvar daha görülmekteydi. Bu yapı daha çok bir Roma sarnıcına benzemektedir. Kare zeminin muhtemelen bu sarnıçla bitişik olduğu düşünülmektedir. 50 cm aralıklarla 500 Mhz'lik antenler kullanılarak gerçekleştirilen GPR ölçümleri sonucu toplanan veriler ışığında oluşturulan eş yüzey modellerin analiz edilmesi sayesinde tüm bu detaylar tanımlanabilmiştir.

GPR ile 3 boyutlu model oluşturmanın bir başka metodu da aynı derinlikteki yüzey üzerinde aynı genlik düzeyindeki yansımaları sınıflandırmaktır. Bu yöntem ilk defa Japonya'da 6. Yüzyıla ait gömülü mezar odalarının görüntülenmesinde kullanılmıştır. Yöntem 3 boyutlu hacimde yapılan gömülü obje araştırmasında aynı genlik değerindeki yüzeyleri belirleme esasına dayanır. Bu yöntemle elde edilen aynı genlikli yüzeylerin görseline "isosurface" denilmektedir. Genellikle aynı derinlikteki aynı genlik değerine sahip olan sinyallerin hesaplanması oldukça zaman alan bir işlemdir. Aynı yüzeyden yansıyan sinyalleri gömülü objenin eğiklik ve dönüklüğünü anlayarak sınıflandırmanın en iyi ve en basit yolu aynı derinlikten yansıyan sinyallere genlik seviyelerine göre birer renk ataması yapmaktır. Bu sayede ölçme yapılan yüzeye göre 90 derece eğimle dik olan bir başka gömülü yüzey koyu renklerle görüntülenirken dönüklüğü daha düşük olan veya 0 derece eğimle paralel konuşlanmış olan gömülü yüzeyler daha açık renk tonlarıyla görüntülenecektir. Bir 3 boyutlu GPR modelinde referans alınan uzaysal dönüklüğe göre sonsuz sayıda eşyüzey "isosurface" görüntüsü elde edilebilir. Genlik düzeyindeki çok küçük değişikliklere göre oluşturulan eşyüzey görüntüleri yeraltında gömülü bulunan yapının gerçek boyutları ve şekliyle tanımlanmasında kayda değer şekilde yararlı olabilir. Fakat eşyüzey görüntülerin hangisinin yapıyla olan ilişkisinin gerçeği daha doğru ifade ettiğine karar vermek arkeologların işidir. Yer altı yapılarına dair olası pek çok şekil ve detayı gösterebilmek için oldukça fazla sayıda "isosurface" eşyüzey görüntüsünden oluşan bir 3 boyutlu model hazırlanmıştır. Bu analiz imparator Trajanus'un villası için yapılmıştır. Eşyüzey araştırması ile yüzeyaltı yapıların genel şekilleri görüntülenebilmiş ve bu sayede yılanbalığı yetiştirme havuzunu içeren duvarlar gösterilebilmiştir. Bilgisayar animasyonlarıyla hazırlanan görsel sunum ile 3 boyutlu yapıların uzaydaki dönüklüklerinin belirlenmesi oldukça gerçekçi ve yararlı jeofizik sunumların yapılabilmesine imkan tanımaktadır (Piro vd. [15]).

İtalyanın Tiber vadi bölgesinde M.Ö 1. Yüzyılda inşa edilen Forum Novum kasabası ve Pazar alanı M.S 4. Yüzyıla kadar gelişimini sürdürmüş ve Lombard istilasında yok olmuştur. Bugün bu kasabanın tüm tarihi yapıları ve temelleri toprak altındadır. Alanın bazı bölgelerinde hava fotoğraflarında rastlanan ton farklılıkları ile toprakaltındaki bazı yapılaşma alanları fark edilebilmektedir. Renk tonlarındaki farklılaşma tarımsal alanlardaki ekin biçme izlerinden kaynaklanmaktadır. Ekinler üzerinde algılanan bu silik lekeler gömülü duvarların üzerine denk gelen kısımlardır ve çeşitli materyallerin etkisiyle toprağın nem değerindeki farklılıklardan kaynaklanmaktadır. Roma arkeologları bu hava fotoğraflarını görür görmez bölgeyi tanımladılar. Fakat alanın tüm detaylarını sadece yüzeydeki bitki örtüsünde oluşan ton farklılıkları ile belirlemek mümkün olmamıştır. Forum Novum yeraltı arkeolojisi için yüzeydeki bitki örtüsünün incelenmesinin tek başına yeterli olmadığını gösteren güzel bir örnektir.

Alanda 500 Mhz'lik merkez frekansında antenler kullanılarak yapılacak GPR ölçümlerinden sonra gömülü yapıların tespit edilebileceği umuduyla GPR ölçmeleri yapılmıştır. (0-8 ns) aralığında kaydedilen GPR yansımalarında dairesel geometride yapıların sınırları algılanmıştır. Bunların Lombard baskınında yerle bir edilen mozale alanı olduğu anlaşılmaktaydı. Daha derinlere ait GPR kesitlerinde geniş oval yapıların varlığı tespit edilmiştir. Yansıma kayıtları bugüne kadar keşfedilmemiş bir amfi tiyatronun iç duvar sınırlarını ifade etmekteydi. Hava fotoğraflarında yüzeydeki bitki örtüsü incelenerek amfi tiyatronun algılanabilmesini mümkün kılacak bir farklılık bulunmamaktaydı. GPR ölçümleri ile yeraltı yapıları tespit edilene kadar böyle bir detayın varlığı tespit edilememiştir. Yapılan kazı çalışmalarından sonra duvarın 0,8 m kalınlıkta ve 1,5 m derinlikte bulunduğu görüldü. Amfi tiyatro temelinde rastlanan çanak çömlek buluntuları yardımı ile bu buluntu M.S 1. Yüzyıl'ın sonlarına tarihlenmiştir.

Forum Novumda yapılan 3 yıllık GPR ölçümleri boyunca çok sayıda önemli antik yapı keşfedilmiştir. Amfi tiyatroya ek olarak bir roma dönemi villa yapısı havuzu ve avluları ile birlikte tespit edilmiştir. Villa duvarları yüzeye çok yakın bir derinlikte bulunduğundan (25 cm) yer dalgası (ground wave) nedeni ile 2D radargramlarda seçilememiş fakat time slice görünümde (kuşbakışı kesit) yersel dalganın filtrelenmesiyle kolaylıkla görüntülenebilmiştir. Forum Novum'da tespit edilen bir diğer yapı ise hamamdır. Radargramlarda oluşturduğu belirgin karakteristikteki anomalileri ile kolayca fark edilebilmiştir. 7 m<sup>2</sup> lik dikdörtgen zemini ile kilisenin önünde kurulmuş ve büyük bir anıt mozole ile de desteklenmiş vaziyettedir. Bazı bodrum kısımları ve açılı bahçe duvarları ile birlikte keşfedilmiştir.

GPR görüntüleme Forum Novum araştırmasında arkeologlara yapısal bir altlık sunmak sureti ile çok yardımcı olmuştur. Çalışmanın neredeyse tamamı hiçbir kazı işlemi yapılmadan gerçekleştirilirken tarihi eserlerin kurtarılması için gömülü yapıların bulunduğu potansiyel araştırma noktaları belirlenmiştir. GPR'ın yüzeyaltı görüntüleme netliği bu uzaktan algılama aracının potansiyelini gözler önüne sermektedir (Gaffney vd. [16]).

“Ground Penetration Radar and Application” adlı eserin “GPR Archaeometry” bölümünde Japonya'nın Saitobaru, Miyazaki bölgesinde topografyanın kayda değer derecede değişken olduğu, yer yer 25 derecelik eğim değerlerinin görüldüğü bir ortamda tarihi mezar odasının tespiti için yapılan arkeolojik araştırmada topografik düzeltmenin uygulanabilmesi için anten eğimine bağlı bir düzeltmenin getirilmesi gerektiği ve ancak bu sayede yeraltındaki yapıların doğru şekilde görüntülenebileceği anlatılmaktadır. Anten eğimi düzeltmesi ve topografik düzeltme yapıldıktan sonra radargram verilerinin mezar odasının gerçek şeklini ve boyutlarını ifade etmekte olduğu belirtilmektedir (Jol [17]).

Hızla gelişmekte olan teknoloji ile birlikte GPR teknolojisi de ilerlemekte ve daha doğru yer altı haritalarının elde edilebilmesi adına yeni yöntemler denenmektedir. Daha doğru yer altı haritalarının oluşturulabilmesi ise GPR elektroniğindeki gelişiminin yanı sıra verilerin işlenmesinde ve yorumlanmasında son derece önemli olan yansıma hiperbollerinin doğru bir geometride üretilmesi ile mümkündür. Jeofizikçilere göre yansıma hiperbollerinin varlığı veri yorumlama aşamasında dikkat dağıtıcı bir etkidir çünkü gömülü objenin gerçek konumunu ifade etmemektedir. Bu hiperboller, yeraltında yayılan radar enerjisinin izlediği yolun kompleks geometrisinin ürünüdürler. Öte taraftan hiperbollerin varlığı bazen verilerin yorumlanmasına yardımcı da olabilir, çünkü yansıma profillerinde kolaylıkla tanımlanabilen yeraltı objelerinin geometrilerini ve spesifik boyutlarını gösterirler. En önemlisi hız analizlerinde hızın belirlenmesine olan katkısı görmezden gelinemez. Doğru bir hız analizi ise ancak yansıma hiperbollerinin doğru geometride üretilmiş olması ile mümkündür (Conyers [18]).

Kayda değer bir eğimin olmadığı ortamlar için radar yansımalarının düşey varsayıldığı klasik GPR metodu yeterli olmaktadır. Ancak topografik değişikliklerin büyük oranda olduğu yüksek eğimli arazilerde yapılacak çalışmalarda klasik GPR metodu yetersiz kalmaktadır. Topografyanın değişken olduğu alanlarda GPR araştırmaları için 2006 yılında Goodman ve ark. tarafından arazi eğimini dikkate alan statik düzeltme konusunda ilk iyileştirmeler

yapılmıştır. Fakat bu ilk araştırmalarda eğim ölçer bir mekanizma kullanılmadan arazinin sabit bir eğimde olduğu varsayılmıştır. Sonraki yıllarda GPR profilinin eğimini ölçen tiltmetreler bazı ekipmanlarda standart olarak sunulmaya başlanmış ve GPR taramaları ile senkronize şekilde kullanılmış olsa da konu ile ilgili yayımlanmış hiçbir makalenin bulunmadığı bildirilmektedir (Goodman ve Piro [19]).

## 1.2 Tezin Amacı

Bu çalışmanın amacı bir uzaktan algılama teknolojisi olan GPR yöntemini etkileyen parametrelerden topoğrafik değişkenliğin anten oryantasyonuna ve ölçme sonuçlarına etkisini belirlemek, söz konusu GPR ölçmelerinde arazi eğiminin sebep olduğu sistematik olmayan hatanın ortadan kaldırılması problemine Harita Mühendisliği disiplini içerisinde ölçme tekniğinin güncel metot ve teknolojilerini kullanarak çözüm bulabilmektir.

## 1.3 Hipotezler

1) Yapı denetim sektöründe yaygın olarak kullanılan fiziki karot numunelerinin GPR/GPS Kombinasyon modeli sayesinde daha az maliyet ve daha kısa zamanda konum bazlı olarak üretilmesi mümkündür.

a) GPR/GPS Kombinasyonu hangi güncel uygulamalar için yararlıdır?

b) GPR/GPS Kombinasyon modeli ile konum bazlı yeraltı haritaları oluşturmanın Klasik GPR yöntemine kıyasla maliyet ve zaman açısından avantajları ve dezavantajları nelerdir?

c) Önerilen yöntem hangi koşullarda kullanılabilir? Sınırlayıcı etkenler nelerdir?

2) Eğimli arazi koşullarında Klasik GPR tekniğinde odometrenin tekerlek devir sayısı ile ölçülendirilen baz uzunluğu hatası GNSS/GPS teknolojisi yardımıyla planimetrik koordinat farkları kullanılarak yataya indirgenebilir. GPR/GPS Kombinasyonu Modeli ile Klasik GPR tekniğine kıyasla istatistiksel anlamda daha doğru konum verileri üretebilir.

a) GPR/GPS Kombinasyon Modeli Klasik GPR yöntemine kıyasla gömülü obje ya da katman sınırlarını belirlemede ne ölçüde başarılıdır?

b) GPR/GPS Kombinasyon modelinin istatistiksel başarısı gömülü obje ya da katman araştırmasının hangi parametrelerine bağlı olarak değişmektedir?

3) Güncel Jeoradar tekniğinde eğimli arazilerde topografik değişkenlikten kaynaklanan anten oryantasyonunun neden olduğu gömülü objenin konumlandırma ve modellenmesi üzerindeki bozucu etkileri GNSS/GPS ve Dijital İnklinometre kullanılarak geliştirilen “Jiroskopik Düzeltme Metodu” yardımıyla giderilebilir. Gömülü objenin yeraltındaki gerçek konumunu (UTM) koordinat sisteminde belirleyerek güncel uygulamalardan daha doğru konum verisine sahip yer altı haritalarının oluşturulması mümkündür.

a) Jiroskopik Düzeltme Metodu Klasik GPR yöntemine ve GPR/GPS Kombinasyon Modeline kıyasla gömülü obje ya da katman sınırlarını belirlemede ne ölçüde başarılıdır?

b) Jiroskopik Düzeltme Modelinin istatistiksel başarısı gömülü obje ya da katman araştırmasının hangi parametrelerine bağlı olarak değişmektedir?

c) Önerilen yöntemin Klasik GPR yöntemine kıyasla avantaj ve dezavantajları nelerdir?

## BÖLÜM 2

### GPR

Elektromanyetik spektrumun yüksek frekanstan (radyo bandı) kızılötesi frekanslarına kadar olan bant aralıklarındaki elektromanyetik dalgalar penetrasyon özelliğine yani katman ve cisimlerin içine nüfuz edebilme kabiliyetine sahiptir. Elektromanyetik dalgaların bu özelliği günümüzde yeraltında gömülü bulunan nesnelerin algılanmasında ve görüntülenmesinde kullanılmaktadır. Yeraltı görüntüleme; su altında, toprak altında, doku altında, hatta insan yapımı yapıların altında bulunan cisimlerin tespitinde kullanılan optik, x-ray, elektromanyetik, elektrik ve ultrasonik metotların hepsini içine alan yeni bir disiplindir. Yeraltının görüntülenmesitarih botunca insanoğlunun ilgisini çekmesine ve konu hakkında araştırmalar kesintisiz bir şekilde devam etmesine rağmen, problemi tam olarak çözebilen tek bir method henüz keşfedilememiştir (Daniels [20]). Elektromanyetik dalgaların yüzeyaltına ne ölçüde nüfuz edebileceği ortamın elektriksel parametrelerine ve kullanılan elektromanyetik dalganın frekansına bağlıdır. Tarama işleminin yapıldığı yüzeyler, elektriksel özellikleri bakımından farklılıklar gösterdiğinden elektromanyetik dalgalarının yüzeyaltına nüfuz etme derecesi her yüzey için farklı olabilmektedir. İngiliz fizikçi James Clerk Maxwell tarafından 1865 yılında bulunan elektromanyetik dalga ve bunların yayılmasını açıklayan elektromanyetik ışık kuramı, 1886 yılında Alman fizikçi Heinrich Rudolf Hertz tarafından da kanıtlanmış ve radar uygulamalarının başlangıç tarihi olmuştur. 1904 yılında Alman radar mühendisi Christian Hülsmeier su üzerindeki trafiği denetlemek için telemobiloskop'u icat etmiştir. Bu alet ile metal bir nesneden çarparak dönen elektromanyetik dalgaların süresi ölçülmekte ve böylece menzil hesaplanabilmektedir. Christian Hulsmayer elektromanyetik dalgalar ile gemilerin yerini belirlemekte kullanılabilen icadını tescil ettirmek için 1904 yılında Almanya ve

İngiltere'de patent başvurusunda bulunmuş, 30 Nisan 1904 tarihinde Kraliyet Patent Dairesi, Christian Hülsmeier tarafından geliştirilen, “uzaktaki metal nesnelere yerini bir gözlemciye bildiren” cihazı 165-546 no'lu belge ile tescil etmiştir. Patent belgesinde bir yansıma sayesinde, yaklaşmakta olan bir gemiyi tespit eden cihaz ile bir buharlı geminin resmi yer almıştır. Ren nehrinde yapılan bu deneme ile cihazın başarısı kanıtlanmıştır. 1921 yılında Albert Wallace Hull tarafından güçlü verici tüpü “magnetron” icat edilmiş, 1922 yılında ise ABD Donanma Araştırma Laboratuvarından A. H. Taylor ve L.C.Young ilk kez bir ahşap gemiyi algılamayı başarmışlardır. 1930 yılında yine ABD Donanma Laboratuvarından L. A. Hyland havadaki bir uçağı algılamayı başarmıştır. 1939 yılında İngiltere Birmingham Üniversitesi'nden John Randall ve Henry Boot adlı iki fizikçi hafif fakat güçlü mikrodalga radarını geliştirerek, radarın denizaltı savaşlarında da bir dönüm noktası olmasına sebep olmuştur. 1940 yılında ilk olarak yeraltındaki nesnelere bu uygulama ile belirlenmesine yönelik çalışmalar gerçekleştirilmiştir. İkinci Dünya Savaşı esnasında Alman, Fransız, İngiliz ve Amerikan fizikçilerinin çalışmaları iyice artmış ve bu çalışmaların neticesinde 180 km mesafedeki hedefi hassas bir şekilde tespit edebilecek radarlar yapılmıştır. 1940 senesinde İngiliz fizikçiler çok oyuklu magnetronu keşfedince, radar gücü binlerce kat arttırılmıştır. İkinci Dünya Savaşından sonra “barışçıl kullanım” olarak adlandırılan bir yönde kullanılmaya başlanan radar yöntemi, günümüzde günlük hayatta çok sık kullanılmaktadır. GPR (Ground Penetrating Radar) yöntemi, yeraltının sığ tabaka ve katmanlarında yapılan araştırmalarda kullanılan jeofizik bir yöntemdir. Son otuz yıl içerisinde elektronik endüstrisinde yaşanan gelişmeler, zahmetli ve pahalı bir iş olan ışık hızı ölçümlerinin daha ucuz, kolay ve daha duyarlı yapılmasını sağlamıştır. Işık hızının duyarlı ölçümlerinin sonucunda yeraltında ışık hızına yakın hareket eden elektromanyetik dalgaların daha hassas ve nanosaniye mertebesinde ölçülmesini ve sığ jeofizik araştırmalarda doğru sonuçlara ulaşılmasını sağlamıştır. Bu çalışmalar ve gelişmeler GPR uygulamalarını doğurmuştur.

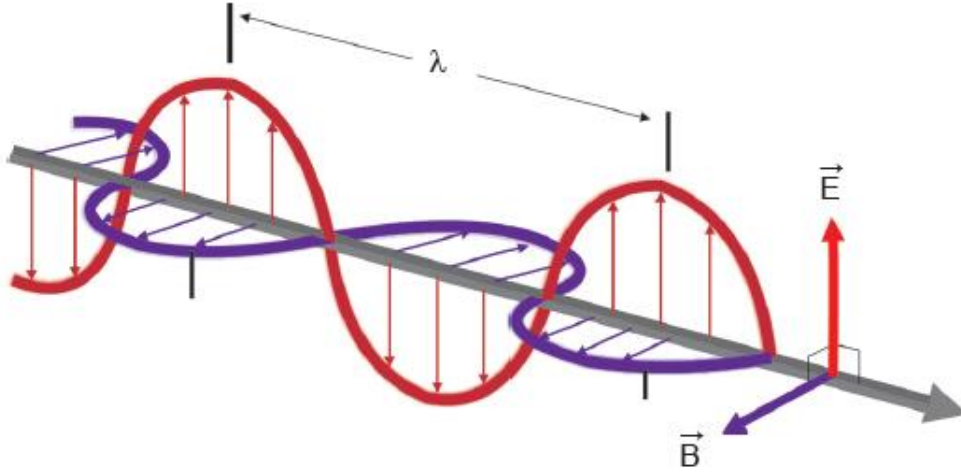
GPR ilk önce buz kalınlığının ölçülebilmesi için geliştirilmiştir. Normal yer ortamında yapılan çalışmalarda elde edilen verilerin sismik yöntemlerde kullanılan veri işlem teknikleri ile işlenmesi sonucunda 10 – 20 m gibi araştırma derinliğine ulaşıldığı görülmüştür. Günümüzde ise GPR yöntemi sığ derinliklerde yapılan yer araştırmaları ile arkeometri alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Madencilik ve jeolojik çalışmalarda 1970'li yıllarda kullanılmaya başlanan GPR, 1980'li yıllarda iyi ayrımlılık veren 500 MHz -1GHz antenlerle doğal



soğurmanın daha az olduğu sığ incelemeler için kullanılmaya başlanmıştır. Bu çalışmalar içerisinde arkeolojik çalışmaları da bulmak mümkündür. 1990'larda ise düşük (10, 20 ve 50 MHz) ve yüksek (2,5-3 GHz) merkez frekanslı antenler kullanılmıştır. Daha sonra GPR, maden arama, stratigrafi, yol kaplama denetlemesi, yapı, inşaat, su arama vs. gibi alanlarda da kullanılmaya başlanmıştır (Alp [21]).

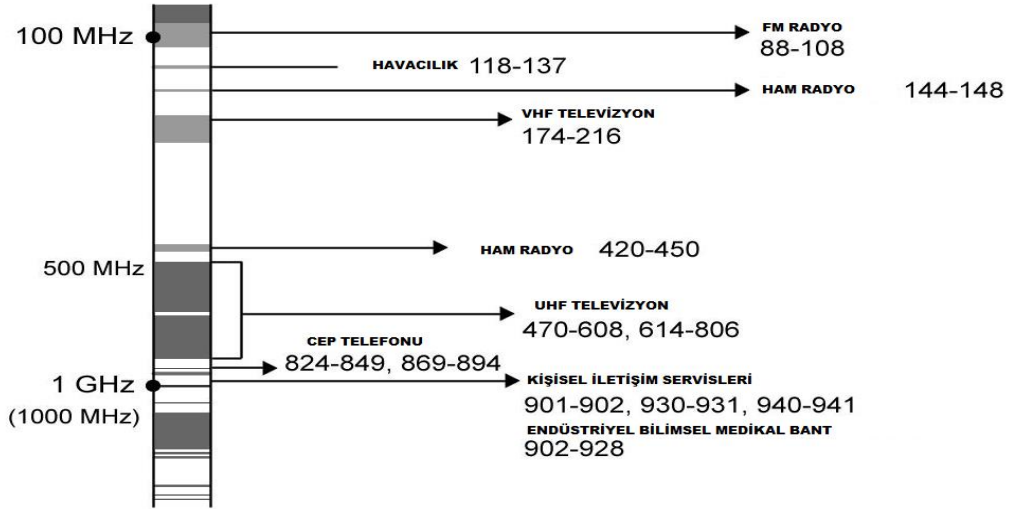
## **2.1 Radar Enerjisinin Üretilmesi ve Yayılması**

Havada ve yeraltında yayılan radar dalgaları birbirine yapışarak titreşen elektrik ve manyetik alanlar formudur (Şekil 2.1). Bu dalgalar iletken bir yüzeye darbeli elektrik akımı uygulanmasıyla oluşur ve beraberinde birde manyetik alan oluştururlar (Kraus [22], Rojensky [23]). Elektromanyetik dalgalar üretildikleri kaynaktan dışa doğru iletken elektriksel dalga formuyla birlikte yayılırlar. Eğer elektromanyetik dalganın elektriksel veya manyetik bileşeni karşılaştıkları yüzeyin zayıflatıcı, absorbe edici veya iletken etkileri ile kaybolursa elektromanyetik dalganın yayılımı durur. Radar dalgaları hava ortamında veya uzayda yayılırken onu yansıtan veya absorbe eden bir ortamla karşılaşmazsa sonsuza dek yayılmaya devam ederler. Radar dalgaları zayıflatılmadıkça veya yayıldıkları ortamda enerjilerini kaybetmedikleri sürece yeraltına birkaç metre veya daha fazla nüfuz edebilirler. Dalgalı akımın frekansına bağlı olarak değişik dalgaboylarında yayılan radar dalgaları üretilir. Daha yüksek titreşim frekansı, frekans artışının tersine olacak şekilde daha kısa dalgaboylarına sahip elektromanyetik enerjiyi üretir. Uzun dalgaboylarında radar dalgaları üretmek için daha büyük antenler ve düşük titreşim frekansları gereklidir. Uzun dalgaboylarında elektromanyetik enerji genellikle yer içinde daha derinlere nüfuz ederek yayılmaktadır. Dolayısıyla her dalgaboyunda ki enerji yayılımı yeraltında farklı davranış sergiler. Kısa dalgaboyları yeraltı katmanları tarafından sönmölenmeye müsait olduklarından genellikle sığ derinliklere nüfuz ederler (Leckebusch [24]). Elektromanyetik dalgalar genel olarak üretildikleri kaynağa bağlı olarak belirlenebilen dalgaboylarıyla tanımlanırlar. Görünür ışık gibi herkesçe bilinen elektromanyetik dalgaların yanısıra, X ışınları, ultraviyole ve kızılötesi ışınım ile TV, radyo ve hücrese mobil telefon iletişimde kullanılan elektromanyetik dalgalar, gama ışınları ve daha birçok elektromanyetik dalga formları mevcuttur.



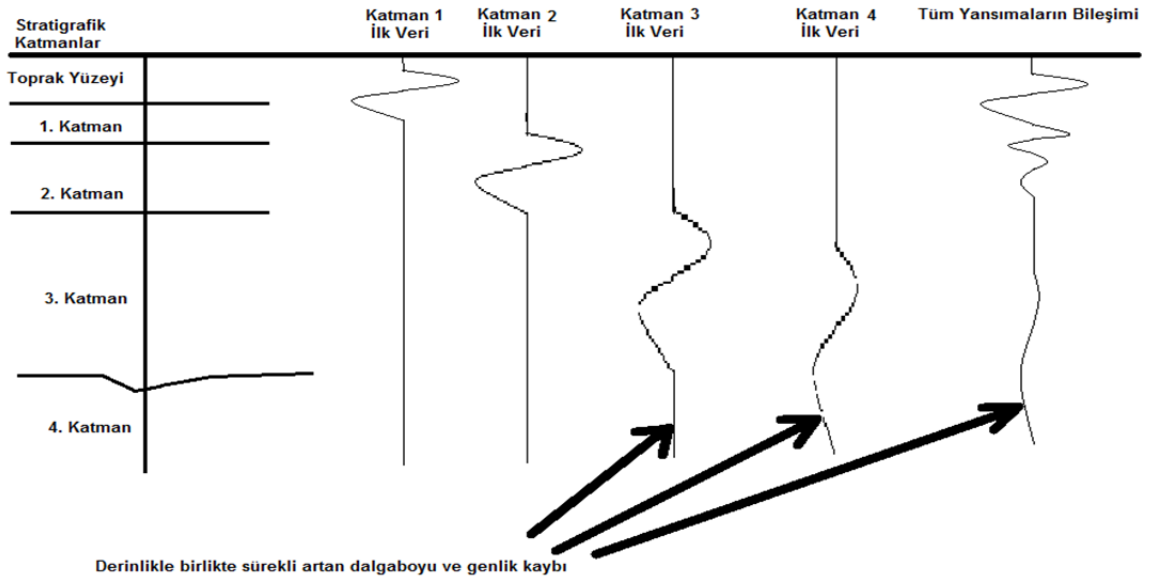
Şekil 2.1 Elektromanyetik Dalga Yayılımı. Bir elektromanyetik dalga birbirini besleyen elektriksel ve manyetik dalga bileşenlerinden oluşur [25].

Radar dalgaları tüm GPR sistemler tarafından kullanılan elektromanyetik spektrumun radyo bandının özel bir bölgesine tekabül eder (Şekil 2.2). Yayılan radar dalgalarının frekansı birim saniyedeki periyot sayısını ifade eden hertz biriminde ölçülür. Gama ışınları, X ışınları ve görünür ışık saniyede  $10^{12}$  ila  $10^{17}$  gibi yüksek frekanslara sahiptir. Bu çok yüksek frekans değerlerine sahip dalga formları milimetrik titreşimlerde kısa dalga boylu enerjileri üretirler. Radar dalgalarını da içeren radyo dalgaları buna nazaran oldukça düşük frekanslarda fakat santimetreden onlarca metre boya ulaşan çeşitli formlardan oluşurlar. GPR uygulamalarında kullanılan radar enerjileri 10 ila 1500 megahertz frekans aralığındadır. Bu aralıktaki enerji formları iletişimde kullanılan taşıyıcı frekanslarla çakışmasından duyulan endişe ile kanuni düzenlemelere bile konu olmuştur (Şekil 2.2). Çünkü Televizyon ve FM radyolar, mobil telefon ve kişisel iletişim cihazları da elektromanyetik spektrumun aynı bölgesini işgal etmektedirler (Chignell [25]).



Şekil 2.2 İletişim aygıtları için kullanılan frekans aralıkları. GPR antenleri de iletişim cihazları ile aynı frekans bandında çalışmaktadır (Chignell [25]).

GPR metodu dalgalar halinde elektromanyetik darbelerin yer içinde yayılımına ve dalganın seyir süreci boyunca radar antenine geri yansıyan sinyallerin zamanın bir fonksiyonu olarak kaydedilmesi esasına dayanır. Yeraltındaki her fiziksel veya kimyasal değişim radar sinyali derinlere indikçe enerjisinin bir kısmının yüzeye geri yansımaya sebep olur. Bu süreç sinyalin enerjisi tamamen tükenene kadar devam eder. Yer içi katmanlarındaki süreksizliğin meydana getirdiği yansıma, kaya, tortu, toprak, bunların su içerikli çeşitli karışımları, taş veya kaya yapısındaki değişiklikler veya stratigrafik ara yüzeylerin kitlesel yoğunluk farklılıkları gibi yansıtıcı yüzeylerin elektriksel ve manyetik özelliklerindeki değişimlere bağlı olarak oluşur (Van Dam ve Schlager [26]). Radar yansımaları, radar enerjilerinin yeraltı katmanları arasında arkeolojik yapılar ve etraflarını çevreleyen yığınlardan geçerken üretilirler. Yeraltındaki ortam boyunca karşılaşılan mezar, tünel, gömü veya boru gibi gömülü yapılar radar dalgalarının yayılma hızlarında değişikliklere neden olduklarından belirgin radar yansımaları üretirler (Şekil 2.3). Birbirine çakışık haldeki çok sayıda dalga formu aynı lokasyonda yeraltından farklı derinliklerde yansıyan bir dizi halinde kaydedilirler. Buna o lokasyona ait radar yansıma izi denilir.



Şekil 2.3 Dalgaformlarının üretilmesi. Bir dalgaformu; yeraltındaki birçok katmandan üretilen tüm yansımaların sırayla kaydedilmesinden oluşan kompozit yansıma izidir (Van Dam ve Schlager [26]).

## 2.2 GPR Dalgalarının Üretilmesi ve Kaydedilmesi

GPR yansımaları alıcı verici anten çiftlerinin yeryüzünün bölümlendirilmiş etapları üzerinde hareket ettirilmesi ile toplanır (Şekil 2.4). Bir anten radar dalgaları yayarken ikinci bir anten yeraltında üretilen yansıma izlerini algılar. Yüzlerce veya binlerce yansıma izlerinden oluşan veri yığını anten bölümünde sırayla toplanır ve yansıma profili üretilmiş olur. Binlerce radar izinden oluşan çok sayıdaki profillerden elde edilecek verilerin bilgisayar yardımıyla derinliklerine ve konumlarına göre ayrıldığı grid modele dönüştürülür, belirgin yansımaların bu sayede analiz edilmesiyle yeraltındaki doğal ya da yapay materyalin 3 boyutlu görüntüsü üretilmiş olur.



Şekil 2.4 GPR anteni ile veri toplama. Yansıma profilleri GPR antenin profil boyunca taşınması ile elde edilir. Bu fiberglas muhafazanın içerisinde 400 Mhz merkez frekansında alıcı ve verici anten çifti bulunmaktadır. Algılanan enerji bir kablo vasıtası ile kontrol ünitesine gönderilir (Leckebusch [24]).

Radar antenleri genellikle direk yeryüzüne temas edecek şekilde konuşlandırılmış fiberglas ya da plastik kızaklara veya yeryüzünün birkaç santimetre üzerinden tekerleklerle desteklenmiş platformlar içerisine yerleştirilirler (Şekil 2.4). Ticari GPR sistemlerde farklı anten yapılarında üretilen çeşitli ürünler bulunsa da bunların hepsi ifade edildiği gibi ya direk yeryüzüne temas eden ya da birkaç santimetre üzerinde bulunmaktadır. Genellikle tercih edilen çift antenli sistemlerde antenlerden biri verici diğeri alıcı olmak üzere çift anten bulunmaktadır. Bunlar bistatik mod antenler olarak anılmaktadır. Tek bir antenin hem alıcı hem verici olarak kullanıldığı monostatik sistemlerde vardır. Bu veri toplama türlerinde anten dönüşümlü olarak verici modunda radar darbeleri üretirken anında alıcı moda geçerek yeraltından gelen yansımaları ölçerler. Ticari olarak piyasada bulunan GPR sistemleri arasında verici ve alıcı olarak görev yapan multistatik anten tasarımları da bulunmaktadır. Fakat bu tür antenler maliyet, boyut ve kompleks veri yapıları nedeniyle arkeolojik uygulamalarda tercih

edilmemektedirler. Araştırmacılar yeraltını 3 boyutlu görüntüleyebilmek adına yansımaları algılayabilecek onlarca ve yüzlerce alıcı anten dizilerinden oluşan sistemler geliştirmiş olsalarda bunların ancak sınırlı bir bölümü güncel uygulamalarda görülebilmektedir. Antenler ölçme yapılan bölgede yürüme hızında ve genellikle elde taşınırlar. Fakat bir aracın arkasından çekilerek, göl veya nehir üzerinde bir botla yüzdürülerek veya bir helikoptere asılarakta ölçme yapılabilir (Leckebusch [24]). Bütün GPR sistemleri sinyal üretme ve yansımaları toplama işlevini bir aracın ardından yüksek hızda çekilmek suretiyle yapabilirler fakat bu veri toplama metodu arkeolojik uygulamalar için tercih edilen bir yöntem değildir. GPR sistemleri duraksanmadan taşındığı takdirde ölçme bölgesine mahsus yansıma izlerini toplayabilirler. Veri toplama aşamasında ölçüm yapılan şeritler arasındaki mesafenin kısa tutulması birim mesafe başına düşen yansımaların sayısını artıracığından yeraltı katmanlarının tanımlanma doğruluğunu veya bir başka ifade ile çözünürlüğü artırır. Bu ölçme şeritleri üzerinden verilerin toplandığı ölçme yönteminde antenlerin her bir şeritte manuel olarak taşınması suretiyle yansıma izlerinin kaydedilmesini zorunlu kıldığından ölçmeler için daha fazla zamana ihtiyaç vardır. Öte taraftan şeritler arası mesafenin arttırılması ile veri sayısı azaltılarak zamandan tasarruf edilebilir. Bütün GPR sistemleri veri işleme aşamasında kayıtlı radar yansıma izlerinin tümünü spesifik olarak belirlenen yeryüzü referans noktasından itibaren cihazın ölçmeyi yaptığı lokasyonun mesafesini ölçmek için bir tekerlek veya benzeri bir aletle veri toplayacak şekilde programlanmışlardır (Şekil 2.5). GPS veya Lazer Teodolit yardımıyla antenin yeryüzündeki referans noktasına olan mesafesini ölçmek için geliştirilmiş birkaç prototip sistem bulunsa da 2000 li yıllara dek herhangi bir uygulamada kullanılmamıştır (Lehman ve Green [27]). Günümüzde GPS entegrasyonuna uygun şekilde tasarlanmış GPR sistemleri bulunmaktadır.

### **2.3 Veri Toplama Prosedürleri**

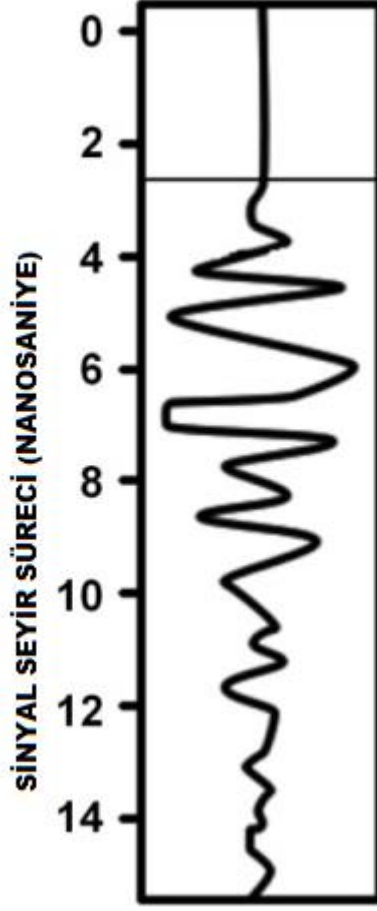
Antenler genellikle yeryüzüne direk temas edecek ya da çok yakın olacak şekilde yerleştirilir. Eğer anten yeryüzünden aşırı yukarıda konumlandırılırsa radar enerjisi yeraltına etkili şekilde nüfuz edemez. Bu gerçekleşecek olursa gönderilen elektromanyetik enerjinin büyük kısmı yeryüzü ile anten arasındaki hava boşluğunda yansıyarak alıcıya ulaşacak ve penetrasyon derinliğinde kayıplara neden olacaktır. Yeryüzündeki antenlerden üretilen radar darbelerinin

belirli bir formdaki radar enerji darbesi olduğu düşünülse de bu yaklaşım teknik olarak doğru değildir. Bütün GPR sistemleri saniyede 25000 ila 50000 gibi çok yüksek sayıda darbe üretirler ve sayısallaştırıcı sistemler bunun tamamını işleyebilecek kadar hızlı değildir (Leckebusch [24]). Bu problemin üstesinden gelmek için radar kontrol sistemleri ile dijital örnekleme olarak gönderen ilk darbeyi takip eden ilk yansımayı kaydederek birbirine çakışık vaziyetteki radar izlerini üretirler. Bu esasa dayanan örnekleme tipine “Ardışık Örnekleme Metodu” denilir. İkinci örnekleme ikinci darbe ile birlikte kaydedilir ve böylelikle devam eden süreçte yansıma izi bütün halde elde edilmiş olur.



Şekil 2.5 Bir anten ölçüm tekerleği.

Antenlere bir ölçüm tekerleği eklenerek, profil boyunca istenilen mesafede istenilen sayıda yansıma izi toplaması için programlanabilir. Bir radar izinde genellikle 512 veya biraz daha fazla örnekleme bulunur (Şekil 2.6). GPR kullanıcıları her bir yansıma izi için 512 dijital örnekleme toplar. Bu sayının artırılıp azaltılması GPR in sistem ayarları değiştirilerek mümkün olabilmektedir. Kesintisiz veri elde edilirken antenler yeryüzü boyunca yürüme hızında hareket ettirilirse örnekleme işlemi sonucunda yeraltı katmanlarındaki değişimleri ifade eden makul sayıda yansıma kayıtları elde edilebilir.



Şekil 2.6 Yansıma İzi. Bu yansıma izi yeryüzeyine 2,5 nanosaniyede ulaştıktan sonra dalga formunun zamanla genlik değerinin azaldığı, enerjinin yer içinde giderek sönümlendiğini ifade eden 512 örnekleme kaydı ile tanımlanmıştır (Davis ve Annan [28]).

Veri toplama faaliyeti çok hızlı gerçekleştiğinden yalnızca yeraltı katmanlarının çok çeşitli olduğu veya antenlerin yeryüzünde aşırı hızlı hareket ettirilmesi halinde sonuçları etkiler, bunun dışında bu prosedür ihmal edilebilir. Kademeli veri elde ederken de genel metot kullanılır. Yansıma verileri her bir kademe için algılanıp kaydedilir. Anten bir sonraki kademeye taşındığında yansıma izi yeniden 512 veya daha fazla örnekleme ile algılanıp kaydedilir. Antenler kademeli metotla veri algılamaya ayarlandıysa anten taşıyıcısını anteni ölçüm bölgesi boyunca bir sonraki istasyona taşıması için bir alarm veya uyarıcı sinyal ile yansıma izinin tamamen algılandığına dair bilgilendirir. Radar antenleri genellikle GPR kontrol ünitesine kablolarla bağlıdır (Şekil 2.4). Fakat yansıma verilerini direkt antende dijital olarak kaydedip fiberoptik kablolar veya dijital sinyallerle kontrol ünitesine ileten sistemlerde vardır (Davis ve Annan [28]). Diğerleri yansıma dalga formlarını dijitalleştirip kaydeden kontrol ünitesine koaksiyal kablolar yardımıyla analog sinyal formlarında gönderir. Yakın gelecekte



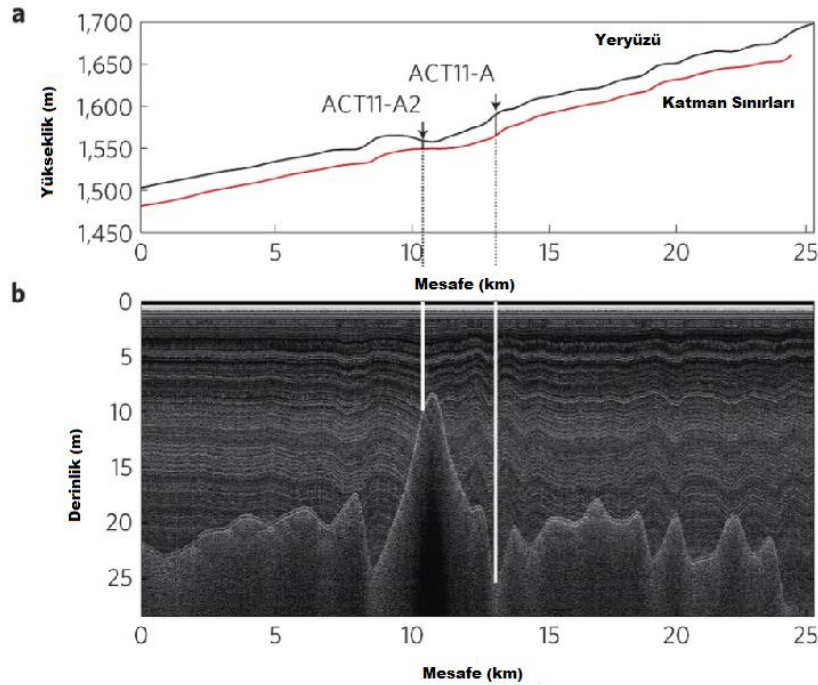
kablolarla gereksinimi ortadan kaldıracak teknolojilerle anten kontrol ünitesine kablosuz veri transferi mümkün olabilir. Piyasada bulunan çoğu üretici firmanın GPR ürünleri; tek kişi ile kullanılabilen, GPR kontrol ünitesi, güç kaynağı ve tamamı tekerlekler üzerine konuşlandırılmış anten ünitelerinden oluşan sistemlerdir. Yeraltı yansımaları; yansımaların düşey görüntüsünü oluşturmak için hangi veri elde etme yönteminin kullanıldığına bakılmaksızın çift yönlü seyir zaman veya yansıma verisinin yaklaşık derinliğini düşey eksen ve ölçüldüğü noktanın yeryüzündeki konumunu, yeryüzündeki referans noktasından olan mesafeyle ifade eden yatay eksenle olacak şekilde benzer biçimli formatlarda gösterilirler (Şekil 2.7).



Şekil 2.7 Tek kişilik GPR Sistemi [106].

Yeryüzünde antenlerin kesintisiz olarak taşınmasıyla elde edilen standart 2 boyutlu yansıma profillerinde radar enerji darbeleri zamanın bir fonksiyonu olarak üretilirler. Mesafeyi ifade eden yatay ölçek antenlerin taşınması esnasındaki hız değişimlerine bağlı olarak değişir. Antenlerin yeryüzü üzerinde farklı hızlarda hareket ettirilmesine bağlı olarak mesafe başına kaydedilen yansıma izi sayısı da farklılık gösterir. Bu durum yatay ölçekte lineer olmayan hatalara neden olur. Verilerin bu şekilde farklı hızlarda toplanması halinde kullanıcılar veri dizilerindeki veri etiketlerini kullanarak önceden bilinen mesafeleri manuel olarak tanımlayarak yatay ölçeği sonradan ayarlayabilirler (Shih ve Doolittle [29]). Yatay ölçek,

bilgisayar yardımıyla her bir yansıma izinin "fiducal mark" adı verilen etiketler kullanılarak daraltıp genişletilmesiyle lineer olarak düzeltilebilir. Böylelikle yatay ölçek hatası giderilebilir. Tekerlekli ölçüm metodunda yatay ölçek verinin alındığı istasyonlar arası mesafeler kullanılarak ya da yeryüzündeki mesafe başına düşen yansıma izi sayısının programlanması ile otomatik olarak düzenlenir. Böylelikle sonradan yapılacak veri işleme adımlarında yatay ölçek düzeltmesine gerek kalmaz. GPR profillerindeki düşey ölçek ise çift yönlü seyir zaman ile ölçülür. Fakat radar enerjisinin yeraltındaki hızının bilinmesi halinde yaklaşık derinlik olarak da ifade edilebilirler. Eğer ölçme bölgeleri arasında kayda değer düzeyde yükseklik farklılıkları varsa yansıma veri kayıtlarındaki yüzeysel düzensizlikten kaynaklanan bu hata topografik düzeltmeyle giderilir (Şekil 2.8). İdeal GPR ölçmeleri için 3 kişiye ihtiyaç vardır. Taşınabilir sistemlerde tek kişi işin tamamını yapabilirken, birden çok çalışanın bulunması halinde bir kişi anteni ölçme için belirlenen bölgenin her bir ölçüm kademesine taşınmasını sağlarken, bir diğer kişi de kontrol ünitesinin başında durarak yansıma verilerini bilgisayar ekranından izler ve kaydedilen belirgin yansıma verilerini not eder. Gerekli olduğu durumlarda üçüncü kişi anten kablosunun yüzeydeki engellere takılmadığından emin olmak için bulundurulabilir. Antenler için taşıyıcı araç veya sırt çantası kullanılarak bu işçiliklerden tasarruf edilebilir.



Şekil 2.8 Topografik olarak düzeltilmiş yansıma profili. Şekilde radar enerjisinin seyir zaman ekseninin derinliğe çevrilerek yeryüzündeki engebeye göre düzenlendiği yansıma profili görülmektedir (Jol ve Brislow [30]).

GPR ölçmelerinde en meşakkatli fakat bir o kadar da önemli olan bölüm anteni taşıyan kişi tarafından gerçekleştirilir. Bu işlev kesintisiz veri elde etmede en zor iştir çünkü anten çarıklarını taşıyan kişinin asla geriye doğru yürümemesi fakat antenlerin dizayn edilen ölçüm profili doğrultusuna paralel şekilde taşıdığından emin olarak mümkün olduğunca sabit bir hızla ilerlemesi gerekmektedir. Eğer kesintisiz veri modunda veri elde edilecekse, saniye başına üretilecek radar enerji darbelerinin sayısı programlanmamışsa, anten taşıyıcısı anteni önceden belirlenen yüzey etiketlerine dikkat etmek zorundadır. Her ölçüm lokasyonunda antende bulunan etiketleme butonuna basılmalı ve bu sayede yansıma kayıtlarına "fiducal marks" etiketleri yerleştirilmelidir. Fakat ölçme tekerleği kullanıldığı takdirde ya da antenler kademeli olarak taşındığında bu tarz bir etiketlemeye gerek kalmaz, anten taşımak göreceli olarak daha basit bir görev haline gelir. Antenler yeryüzü üzerinde taşınırken dikkat edilmesi gereken bir başka husus ise yerden yüksekliklerinin ve oryantasyonunun aynı olmasına özen gösterilmesidir. Antenlerin yeryüzeyine göre oryantasyonunun değiştirilmesi yeraltındaki materyallerin gerçek dağılımını görüntülemeye engel teşkil edecek şekilde yansıma kayıtlarının etkilenmesine sebep olabilir. Bu durumun gerçekleşmesine "coupling loss" denilmektedir. Profil boyunca yansıma verileri toplanmadan evvel, kontrol ünitesinin başındaki personel gridin hangi profilinde çalışıyorsa numarasını ilgili dosyaya kaydetmelidir ve yansıma verilerinin kaydedileceği dosya adının profili kaydettiği dosyayla aynı olduğunu doğrulamalıdır. Bu işlem hafife alınmamalıdır çünkü her sofistike bilgisayar kaydında kullanıcı kaynaklı veri kayıpları sıkça yaşanmaktadır. Büyük ağaçlar veya diğer arazi detayları gibi yüzeyde ve yeraltında karşılaşılabilecek engellerin radar enerjilerini yansıtması mümkündür. Bu sebeple bu tarz detayların ölçülen profildeki yaklaşık konumlarının not edilmesi gerekir (Jol ve Brislow [30]).

#### **2.4 Grid Tasarımı ve Profil Verilerinin Toplanması**

Tüm gömülü obje araştırmalarında gridin bulunduğu ölçme alanındaki GPR verileri toplanırken bunların düz çizgiler halinde yani lineer hatlar halinde toplanması gerekir (Doolittle ve Miller [31]). Grid kuzeye yönlendirilecek şekilde tasarlanırsa profil ölçümlerinin de kuzey güney doğu batı doğrultusuna yöneltmesi sağlanmış olur. Grid alanındaki yüzeysel engellerden mümkün olduğunca uzak durulmalı ve grid tasarlanırken olabildiğince yeryüzüne yatay şekilde konumlandırılmalıdır. Yüzeysel engellerin var olması halinde engellerden

kurtulmak için ölçülen profiller farklı uzunluklarda olabilir. Bu sebeple grid kompleks bir şekil alabilmektedir. Anten bölmesinin kendi içinde paralel veya dik konumda olması koşuluyla her şekildeki gride ait yansıma verilerini işleyebilecek bilgisayar programları mevcuttur. Eğer gömülü boru, tünel veya elektrik kablolarının varlığı biliniyorsa, bunların konumları mutlaka detaylarıyla not edilmesi önemlidir. Grid konumlandırılırken bu engellerden mümkün olduğunca kaçınılmalıdır. Bunun mümkün olmadığı durumlarda veri yorumlama aşamasında bu gibi detayların konumları tanımlanabilecektir. Dikdörtgen veya düz hatlardan oluşan gridlerin diğer grid dizaynlarına tercih edilmesinin bazı önemli sebepleri vardır. Dijital yansıma verileri paralel veya birbirine dik profiller halinde toplanabilir ve bilgisayar ekranına kolayca aktarılıp görüntülenebilir. Görüntü işleme programları bu tarz grid modellerine göre tasarlanmıştır. Bunun yanı sıra dikdörtgen gridlerde ki belirgin yansıma verilerinin diğer profillerdeki yansımalarla korelasyonu sağlanır ve bu sayede grid boyunca paralel veya dik profiller arasında görsel bağlantı kurulabilir. Her halükarda gridi oluşturan profillerin uzunlukları, dönüklükleri ve başlangıç bitiş noktaları her bir profil için not edilmelidir. Yüzey koşulları veya zamansal sınırlamalar profillerin paralel olmayan seriler halinde dağılmasını zorunlu kılsa da bazen bu halde bile yeraltı katmanlarını iyi şekilde ifade eden sonuçlar elde etmek mümkün olabilmektedir. Dikdörtgen şekilde olmayan gridler oluşturulurken profillerin konumlarının doğru ölçüldüğüne ve yansıma veri kayıtlarının 3 boyutlu haritalanmasındaki doğruluğa dikkat edilmelidir. Bu tarz gridlerde veri toplanırken yansıma verileri manuel olarak yorumlanır ve haritalanması aynı şekilde zaman alan, zahmetli bir iştir. Fakat her halükarda iyi sonuçlar elde edilebilir. Ölçüm profilleri merkezden dışa doğru yayılacak şekilde, örnek verilecek olursa su dolu bir hendeğin içerisindeki yapıyı merkez alacak şekilde hendeğin kenarlarına doğru yayılmalıdır (Bevan [32]). Amerikada başarıyla denenen bir paralelkenar grid örneği bir tepenin kenarında, şeker kamışlarının içinde antenlerin şeker kamışından yapılmış sütunlar üzerinde hareket ettirilmesi ile başarılı sonuçlar elde edilmiştir (Conyers [33]). İsviçrede hiçbiri birbirine göre düzgün veya paralel olmayan "sinuous" profillerinin yansıma verileri bir gölet üzerinden römorkörle çektilerle toplanabilmiştir (Leckebusch [24]). Sinüs formundaki profillerden oluşan çok karmaşık bir grid model verileri ölçümün doğrultusundaki akıntının etkisiyle yalpalayan bir botla toplanmış, kompleks mekansal ayarlamalardan birçok düzenlemelerden sonra yorumlanabilmiştir. Tüm bu düzensiz hatlarda yapılan ölçmeler ekstra veri işleme süresi gerektirse ve yansımalar

üzerinde ekstra mekansal düzenlemeleri zorunlu kılsa da sonuçta düzenli gridlerden elde edilen veriler kadar iyi sonuçlar elde edilmiştir. Her grid doğru şekilde ölçülmeli ve GPR verileri toplandıktan sonra ya da toplanmadan önce ölçme teknikleri kullanılarak bir harita üzerine yerleştirilmelidir. En azından eğer düz hatlardan oluşuyorsa grid kenarları doğru şekilde konumlandırılmalı ve tüm profillerin birbirine paralel ya da dik olmasına dikkat edilmelidir. GPR ölçmelerinin en fazla zaman alan ve en yorucu kısmı bu olsa da son derece önemlidir. Yakın gelecekte ölçüm profillerinin kenarlarının küresel konum belirleme sistemi kullanılarak kaydedilmesi mümkün olacaktır (Czarnowski vd. [34]). Bu sayede her bir profil için hassas koordinatlar ve yeryüzeyinden yükseklikleri ölçüm esnasında dijital veriler halinde otomatik olarak kaydedilebilecektir. Bu teknoloji jeolojik veri elde etmede giderek önem kazanan GPR sistemlerine adapte edilmeye başlanmıştır. Bu teknoloji gelecekte geleneksel ölçme yöntemlerinde kullanılan halat, lazer teodolit ve pusulanın yerini alabilir. Yeryüzeyinin eğimli, engebeli, pürüzlü veya topografik yüksekliklerinin ölçüm profili boyunca sık değiştiği durumlarda yeraltı radar yansıma verilerine ölçümlerden sonraki veri işleme aşamasında bir düzeltme getirilmelidir (Sun ve Young [35]). Yeryüzünün düzenli bir eğime sahip olduğu durumlarda profilin sadece başından sonundan ve ikisi arasındaki birkaç noktadan ölçülmesi yeterli olabilir. Bu sayede ölçme yapılan zaman aralığı için ölçülen yükseklik verileri enterpole edilebilir. Yüzeyin belirgin biçimde düzensiz olduğu durumlarda ise yükseklik ölçümleri belkide her bir metrede bir veya daha da sık yapılmalıdır. Her yüzey detayı noktasal olarak radar enerjisi yansıtabilir. Ağaçlar, evler veya diğer objeler bu sebeple mutlaka ölçüm haritasına işlenmeli, veriler işlenirken bu detaylara dikkat edilmelidir. Nadiren de olsa bir haritalandırmaya ihtiyaç duyulmayan ve önemli yeraltı yansımalarını anlık olarak yorumlamayı gerektiren durumlar da vardır. Böyle durumlarda profil yansımaları anlık olarak çok hızlı şekilde toplanıp yorumlanabilir. Herhangi bir grid kurulumunu gerektirmeyecek şekilde üretilen yansımaları bilgisayar ekranında görüntülemeye yetecek kadar yansıma kaydı yapılır. Bu yöntem daha çok gömülü altyapı tesislerini tesbit etmekte kullanılmaktadır. Belirgin yansımaların görüldüğü noktalar yeryüzeyi üzerinde kazıklarla ya da onu ifade edecek bayraklarla işaretlenir. Bu GPR verilerini yorumlamak adına oldukça basit bir yöntem olsa da arkeolojik modelleme uygulamalarında kullanılamaz. Tek profil üzerinden ve bilgisayar ekranına bakılarak yapıldığı düşünülürse yansıma anomalilerini anlık olarak yorumlayabilmek zor bir iştir. Belirgin yansımalar antenin yeraltındaki yansımaya neden olan

detayın üzerinden taşınıp detay objeyi geçene kadar ekranda görülemez, bu sebeple objelerin konumları ancak anten üzerinden geçip gittikten sonra yaklaşık olarak tahmin edilebilir. Bu "anlık görüntüleme" tipi veri elde etme ve yansıma profili yorumlama metodu dikdörtgen gridler içerisinde konumlanmış düzgün profillerden veri toplayarak sonradan bunların yorumlandığı standart veri toplama metodunun kullanıldığı yerlerde kabul görmez. Radar enerjisi tabandaki tortu içerisinde bulunan buz ve tatlı su ortamlarından kolaylıkla geçebilir. Dolayısıyla göl ya da nehir tabanının özellikleri hakkında bilgi verebilir (Annan ve Davis [36]; Fuchs vd. [37]; Jol ve Albrecht [38]; Leckebusch [24]). Radar antenleri göl ya da nehir yüzeyinden kolaylıkla çekilebilir ve nehir tabanının altına ait verilerin toplanması esnasında bu işlem bir kablo yardımıyla bir araç tarafından çekilerek yapılır(Haeni vd. [39]). Bu teknik tuzlu su ve acı su ortamlarında kullanılamaz, çünkü tuzluda suyun yüksek seviyedeki elektrik iletkenliği sebebiyle elektromanyetik enerjinin yayılımı kısa sürede kesilir. Dibe doğru yayılan veya yüzeye yansıyan herhangi bir elektromanyetik enerji gözlemlenemez. Son zamanlarda alçak irtifadan uçan bir helikoptere asılı antenler kullanılarak yapılan GPR ölçmelerine rastlanmaktadır. Bu metotla yeryüzeyinden yansıyan veriler kaydedilir ve düşük ayrımlı fakat yinede tanımlanabilir seviyede yeraltı yansımaları elde edilebilir. Amacına uygun olarak sürekli veya kademeli metotla antenlerin üzerinde çekilerek verilerin toplandığı düzgün şekilli dikdörtgen gridler; ara mesafeleri eşit, birbirini izleyen paralel profillerden oluşur. Anten ilk profilden başlanmak suretiyle profil boyunca taşınarak başlanır ve diğer profil ölçümleri de bu şekilde devam eder. Bu standart veri toplama şekli gridi oluşturan tüm profiller tamamlanıncaya kadar devam eder. Birbirine dik profiller aynı grid üzerinde ölçülür. Yansıma verileri dijital olarak kaydedildiğinden basit bilgisayar programları bu veri kayıtlarını gridi oluşturan profilleri referans yeryüzeyine göre aynı oryantasyona olacak şekilde döndürebilirler.

## **2.5 Veri Kaydı**

Tüm standart GPR veri toplama işlemleri; radar enerji darbelerinin üretilmesinden yeraltı tabakalarından yansıması ve sonuç olarak yansıma verilerinin alıcı antenler tarafından kaydedilmesine kadar olan süreçtir. Yansıyarak yeryüzeyinden algılanan radar dalgalarının genlik ve dalgaboyu yükseltilir, işlenir ve bilgisayar ekranında anında görüntülenir. Daha sonra yapılacak veri işleme işlemleri ve görüntülemeler için dijital ortamda kaydedilir. Radar

yansıma verileri çift yönlü zamanlarla kaydedilir. Çünkü radar dalgasının yüzeydeki verici antenden yeraltına olan seyir süreci sinyalin antenden üretildiği andan yeraltında yansyarak tekrar yeryüzündeki bir başka alıcı anten tarafından algılanıncaya kadar olmak üzere her sinyal için gönderildiği ve algılandığı zamanı ifade eden iki zaman kaydı bulunmaktadır.

İlk GPR sistemlerinden bazıları yansıma verilerini yalnızca grafik yazıcılar yardımıyla kağıt ortamına aktarabiliyordu (Batey [40]; Fischer vd. [41]; Loker [42]). Bu sistemlerde elektrik akımına duyarlı kağıtlarla yine elektrik yüklü bir iğne kullanılıyordu. Antenler profil üzerinde taşınırken tüm yansımalar kağıt ortamına uzun sarımlı bantlar halinde aktarılıyordu. Algılayıcı antenden gelen yansıma sinyalleri elektriksel olarak yükseltilerek iğneye aktarılıyor ve yüksek genlik değerleri oldukça karanlık gri değerler halinde kağıda çiziliyor sinyalin zayıf olduğu kısımlar beyaz kalıyor, sinyal seyir sürecinin çift zamanlı ve nanosaniye mertebesinde bir hassasiyetle ölçülmesiyle derinlik ölçeği bu kağıt profillere aktarılıyordu. Grafik kaydediciler kullanıldığında bir işlemci kağıdın yazıcıdaki sarım hızını ve iğnenin hareket hassasiyetini ayarlıyor çeşitli profil stillerinde çizimler yapabiliyordu (Batey [40]; Fischer vd. [41]). Bu tip veri kayıtları dijital kayıt sistemlerinin gelişmesiyle tamamen tedarikten kalkmıştır.

Yansıma profillerinin kağıt çıktıları GPR ölçmeleri için ancak arşiv niteliğinde olabilir. Çünkü sinyaller tarayıcı kullanılarak sayısal forma dönüştürülmedikçe işlenemezler. Çünkü grinin farklı tonlarından oluştuklarından dolayı yansıma değerlerinin yaklaşık genliklerinin belirlenmesi ancak bu dijital değer atama işleminden sonra mümkün olabilir. 1980 lerin ilk yıllarında GPR üniteleri GPR yansımalarını dijital olarak kaydedebilecek nitelikte geliştirildi (Annan ve Davis [43]). Bu sayede bir bilgisayar yardımıyla yansıma verileri kolaylıkla işlenip, filtrelenip doğru şekilde kaydedilebildi. Bugün GPR sistemleri için bu dijital ekipmanlar standart hale gelmiştir. Veriler bilgisayar harddisklerine ya da taşınabilir belleklere kaydedilebilmektedir.

## **2.6 GPR da Anten ve Anten Seçimi**

GPR ölçmelerinin en önemli aşaması araştırmanın amacına uygun olarak anten ve merkez frekansının seçimidir (Huggenberger vd. [44]; Smith ve Jol [45]). Piyasada ticari amaçla satışa sunulan GPR antenleri genellikle 10 ila 1500 megaherts merkez frekansı aralığındadır (Fenner

[46]; Olsen ve Doolittle [47]; Jol ve Britsow [48]). GPR sistemlerinde genellikle dipol antenler kullanılır. Bunlar merkez frekansının yarısı ve iki bant genişliğinde değişen frekanslar kullanılır. Mesela 300 megahertz merkez frekanslı 150 ile 600 megahertz aralığında değişen radar enerjileri üretirler. Elektriksel bileşenlerine ve her bir antenin kendi dizaynına bağlı olarak grafiğin ekstrem kısmı merkez frekansı ifade edecek şekilde bir çan eğrisi şeklinde dağılım göstermektedir. Yapılan bir deneyde 500 megahertzlik (bow-tie) antenin gerçek merkez frekansının 505 megahertz olduğu görülmüştür. Bu farklılık anten yüzeyindeki düzensizliklerden, anten sisteminin içerisinde konuşlandırılmış diğer elektronik sistemlerden veya GPR sisteminin kendi ürettiği parazit etkilerinden kaynaklanmaktadır. Her anten kendine has düzensizliklere sahip olabildiği gibi ürettiği sinyal işareti ve merkez frekansına bağlı olarak bu tarz farklılıklar tüm antenlerde bulunmaktadır. Dolayısıyla üretici firma tarafından deklare edilen anten frekansı antenin gerçekte ürettiği radar enerjisini kesin olarak göstermemektedir. Tüm anten üreticilerinin öncelikli amacı yeraltına gönderilecek enerji darbelerinin dalgaboylarını kesin ve net bir değerde üretebilmek olsada hiçbir anten bunu kesinlikte net darbeler üretmez. Yansıma kayıtlarında, üretilen darbelerde gürültü oluşumu her zaman için bir miktar da olsa vardır. 500 megahertzlik antenle bir test yapılmıştır. Bu testte gürültüden arındırılmış olarak modellenen sinyalin 2 nanosaniye ve 6 nanosaniyedeki gürültü içerikli kaydında ana sinyali takiben meydana gelen küçük genlikteki artçıl dalgalar görülmektedir. Sonradan yapılacak veri işlemlerle üretici firmanın gürültüden arınmış ideal dalga modeli kullanılarak tüm antenlerin yansıma kaydındaki gürültü etkileri temizlenebilir. Antenin kendine özgü olan merkez frekansının seçimi GPR ölçmelerinin başarısını veya başarısızlığını belirlediğinden detaylı şekilde planlanmalıdır. Genel olarak daha derin araştırmalarda düşük anten frekansı (uzun dalgaboyu) tercih edilir (Smith ve Jol [45]). Düşük frekans antenler daha geniş daha ağır ve yüksek frekanslı antenlere göre ölçme alanında taşınmaları çok daha zordur. Öyle ki; GPR ölçmeleri için kullanılmış 42 galonluk yağ bidonu ebatlarında 80 megahertz eski model bir antenin ağırlığı yaklaşık 125 ila 150 pound aralığındadır. Daha yeni model düşük frekans antenler birkaç kişi tarafından plastik borularla desteklenerek taşınabilmektedir (Şekil 2.9). Bu tarz antenlerin taşınması zor olduğundan profil doğrultu boyunca tekerlekli araçlar kullanılmalıdır. Öte taraftan Şekil 2.10'da görüldüğü gibi 900 megahertz frekansında yüksek frekans bir anten ayakkabı kutusuna sığabilecek boyutlarda ve oldukça hafiftir (Arcone [49]).





Şekil 2.9 Düşük Frekans Anten (Arcone [49]).

İlk GPR antenleri bakırdan üretilmiş dipol anten sistemleridir. Bu antenlerde elektrik akımı anten merkezindeki bakır plaka ya da sargıya darbeler halinde uygulanır ve bu şekilde dışa doğru yayılan elektromanyetik enerjinin üretilmesi sağlanırdı. Elektromanyetik ortamı anten içerisindeki fazla titreşimden ve kompleks dalga yayılımından koruyarak belirgin darbeler elde edebilmek için bakır plakayı çevreleyen direçler yerleştirilirdi.



Şekil 2.10 Yüksek Frekans Anten (Arccone [49]).

Daha küçük boyutlardaki yüksek frekanslı antenler genellikle bir muhafaza içerisinde bulunur, enerjinin yerin içine doğru yayılırken anten kablosu veya onu çekerek ilerleten personelden ya da yüzeysel detaylardan üretilebilecek yansımaları algılamayacak şekilde tasarlanırlar (Lanz vd. [50]). Radar enerjisini absorbe eden koruyucu materyal antenin üzerinde ve etrafında bulunur, bu sayede enerjinin direkt yerin içine doğru yayılması sağlanır. Koruyucusu bulunmayan antenler kullanıldığında yeryüzündeki objelerden yansıyan birçok veri yeraltındaki hedeflerden yansıyarak algılanan verilerle karışacağından bunlar birbirinden ayırmak oldukça güç olabilmektedir. Fakat koruyucusu bulunmayan antenlerde istenmeyen yansıma kayıtlarında da verilerin dijital olarak kaydedilmesi halinde sonradan filtre edilerek giderilebilir (Leckebusch [24]). Eğer bu yansımalar rastgele dağılmış ağaçlardan, yüzeysel engellerden veya anten yakınında bulunan kişilerden kaynaklanıyorsa bu yanıltıcı yansıma verilerini yer altı yansımalarından ayırmak kolay olmaz. Verinin alındığı bölgeye ait mekansal haritalar olmaksızın bu tarz verilerin yorumlanması çok daha zordur.

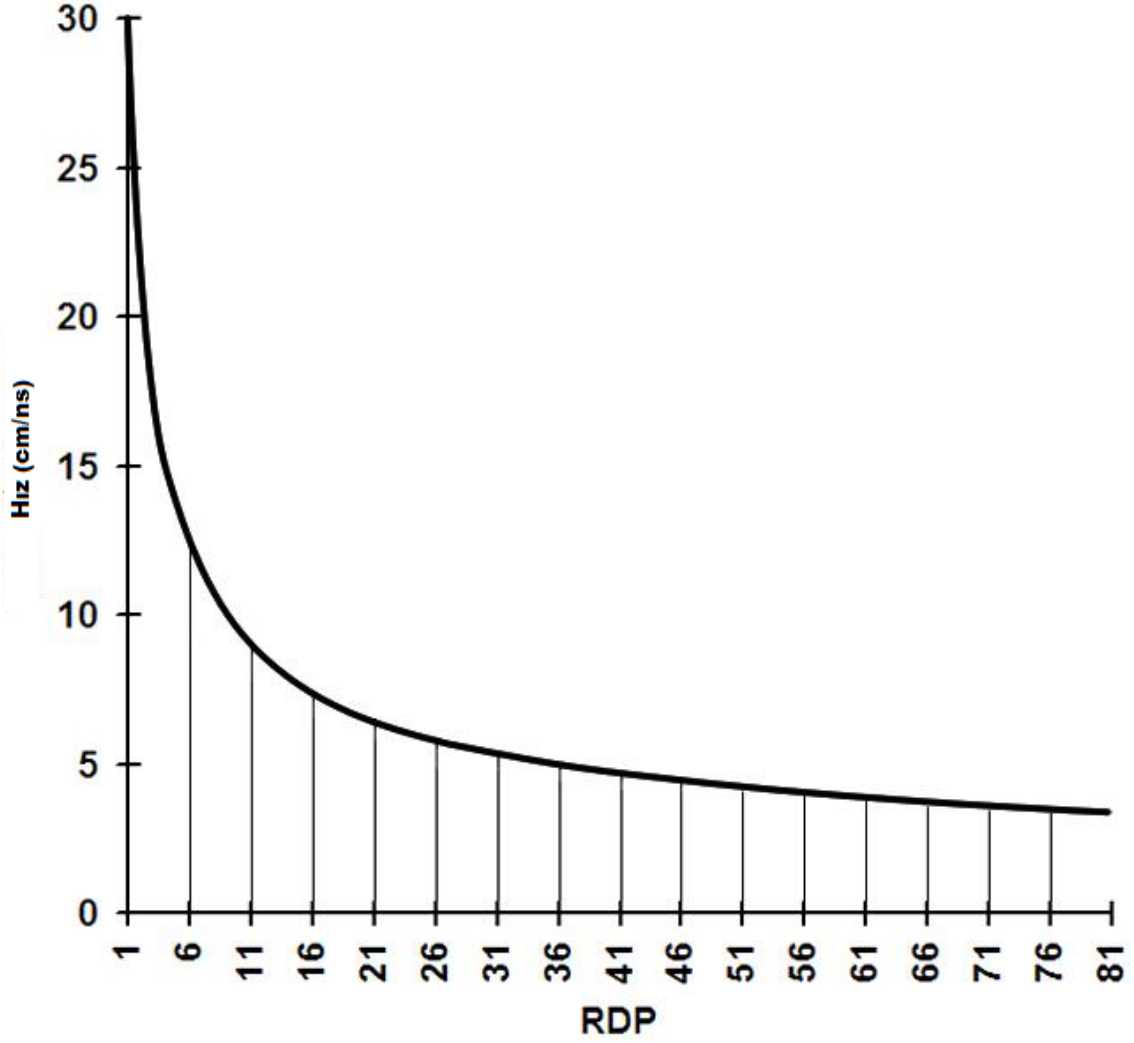
Daha büyük boyutlardaki daha düşük frekanslı antenlerde ise bu tarz bir koruma çok daha zordur. Yüzeysel engellerden gelen dış kaynaklı yansımaları içirme potansiyeli yüksektir. Bu sebeple veriler oldukça gürültü içermektedir. Bow-Ties anten tipleri genellikle elektromanyetik titreşimi bakır plaka çevresinde odaklama anlamına gelen “ring” etkisi gösterme eğilimindedir. Orijinal geometrisine tam olarak uymayan dalgaları üretirler. Daha güçlü elektromanyetik enerji elde etmek ve daha yüksek genlikte radar dalgaları üretebilmek için yüksek voltaj uygulandığında antenlerin “ring” eğilimi artar ve gürültü seviyesi oldukça yüksek dalgalar üretirler. Günümüzdeki antenlerde klasik bow-tie dizaynı terk edilmiş, yüksek genlikte net radar enerji darbeleri ring etki azaltılarak elde edilebilmiştir. Bu sayede GSSI in geliştirmiş olduğu 500 megahertz lik anten; güçlü, yüksek genlikte net darbeler üreterek ve eski bow-tie dizayn 400 megahertzlik antenlerden daha derinlere nüfuz edebilmektedir. Dar bir tabandan yeraltına gönderilen enerjiler aşağıya doğru daha iyi odaklanır ve daha net yansıma profilleri elde edilir. Maalesef günümüzde hükümetler tarafında radyo yayınlarının dalgaboyuna özel hukuki düzenlemeler yapılmakta ve anten gücünün düşük tutulması için kısıtlamalar getirilmektedir.

## **2.7 Radar Dalgalarının Yeraltındaki Yansıma ve Yayılımı**

### **2.7.1 Radar Yansıma ve Yayılımının Ölçülmesi**

GPR araştırmalarının öncelikli amacı yer altı katmanları arasındaki farklılıkları ayıt ederek ölçme yapılan alanın mekansal yer altı haritasını oluşturmaktır. Radar enerjisi yeraltında farklı fiziksel veya kimyasal özelliklerde iki objeyle karşılaştığında objenin özelliklerine göre dalganın geçiş hızı değişir ve enerjinin bir kısmı yeryüzüne geri yansır. Yeraltındaki tüm çökelti tabakaları ve diğer gömülü materyaller yanına dalgalarının hızını ve elektromanyetik enerji yayılımını farklı şekilde etkileyen ayırt edici özelliktedir (Van Dam vd. [51]). Gömülü nesnenin fiziksel ya da kimyasal özellikleri, farklılıkları ve içeriğindeki su miktarına bağlı olarak iletkenlik ve geçirgenliğini dolayısıyla radarın yayılma ve yansımalarını etkiler (Olhoeft [52]; Van Dam ve Schlager [51]). Eğer araştırılan alan için toprak ve çökelti örnekleri detaylı laboratuvar analizleri ile belirlenmişse yansıma miktarına göre gömülü katmanların türü hakkında tahmin yapılabilir. Bağlı Dielektrik Geçirgenlik (Relative Dielectric Permittivity - RDP), dielektrik sabiti olarak bilinir. Gömülü materyalin elektriksel ve manyetik özelliklerini belirlemek için kullanılmaktadır. Materyalin elektromanyetik ortamda enerjiyi tutma ve

geçirme kabiliyetini ifade etmektedir (ASTM International [53]; Wensink [54]). RDP; ortamda yapılan deneysel ölçmelerle belirlenebileceği gibi laboratuarda doğrudan tespit edilebilir. Materyalin RDP değerinin yüksek olması radar enerjisinin materyal içeisinden geçiş hızını yavaşlatır (Şekil 2.11). Bağlı Dielektrik Geçirgenlik (RDP) radar enerjisinin ne kadar derine iletileceğini belirleyen, radar enerjisinin yayılma hızının ve gücünün belirlenmesinde kullanılan genel ölçmedir. RDP değeri ile radar enerjisinin yeraltında yayılma hızı aynı anlama gelmektedir. Radar dalga bileşenlerinin ölçümü oldukça zor olan karmaşık RDP hesaplamalarıyla belirlenir. Tüm arkeolojik çalışmalarda, RDP ve hız kavramı radar enerjisinin yer içindeki yayılma hızının belirlenmesinde birbirinin yerine kullanılan kavramlardır. Mesela tatlı suyun RDP değeri 80 gibi çok yüksek bir değer olmasına karşın radar enerjisi herhangi bir azalmaya uğramaksızın kolaylıkla fakat düşük bir hızla geçirir. Organik materyal ve tatlı su içerikli kömür yatakları da yüksek RDP değerine sahiptir, radar enerjisinin çok derine iletilmesine imkân tanırken doymuş kum veya diyer materyallere oranla enerjiyi çok daha düşük bir hızla geçirir (Clarke vd. [55]; Worsfold vd. [56]).



Şekil 2.11 Elektriksel Geçirgenlik (Elektrik İletkenlik) - Hız İlişkisi Grafiği. RDP radar iletim hızı ile doğrudan ilişkilidir (Dobrin [57]).

Ortamdaki RDP değerinin hesaplanması genelde zordur fakat hız analizleri başlığında değinileceği üzere her ortama özel oluşturulmuş prosedürler kullanılarak tahmin edilebilir. Her çalışma için yeraltındaki materyalin RDP değerinin bilinmesi radar kesitinin seyir zaman çizelgesinin derinliğe dönüştürülebilmesi için önemlidir. Enerjinin yer içinde ne hızla yayıldığına bilinmesi işin en can alıcı kısmıdır. Hız değerinin doğru bilinmemesi; ideal şekilde veri elde etmek için gerekli olan tüm kalibrasyon prosedürlerini ve veri ediniminden sonra yapılacak düzeltme işlemlerini anlamsız hale getirir. Elektromanyetik enerjiyi zayıflatma etkisi ihmal edilebilir düzeyde olan hava ortamında RDP değeri yaklaşık 1,0003 tür. Ve genellikle 1 kabul edilir (Dobrin [57]). Arkeolojik bölgelerde bulunan toprak ve çökelti 3 ila 25 aralığında değişen RDP değerlerine sahiptir. Yeraltında tamamen kuru vaziyetteki tüm doğal materyaller 3 ila 5 arasında değişen RDP değerlerine sahiptir. Fakat çöl ortamında değilse

doğal kondisyonunda az da olsa su içeriği bulun materyallerde RDP artar ve bu artış bazen çarpıcı boyutlara ulaşabilir (Conyers [18]). Çizelge 2.1 de göülebileceği gibi RDP değeri 3 olan kuru kum, tatlı su içerikli kum çökeltisinde RDP değeri 80 olmaktadır. Materyalin toplam RDP değeri hesaplanırken %30 kum karışımı su çözeltisi için suyun RDP değeri 80 ve suyla karıştığında hacimsel olarak toplamda %70 artan kuru RDP değeri kum karışımı için toplam RDP değeri  $[0,30 \times 0,80 + 0,70 \times 0,30]$  şeklinde hacimsel oranları ve RDP değerleri çarpılarak toplanır.

Çizelge 2.1 Davis ve Annan Tarafından 1989 da güncellenen materyallerin RDP değerleri (Geophysical Survey System [32])

	RDP
Hava	1
Kum	3-5
Kuru Silt	3-30
Buz	3-4
Asfalt	3-5
Volkanik Kül	4-7
Deniz Suyu	81-88
Kireçtaşı	4-8
Granit	4-6
Donmuş Toprak	4-5
Taşkömürü	4-5
Kaya Tortusu	5-15
Balçık	5-40
Beton	6
Doymuş Çamur	10-40
Kumsal Kum (Kuru)	10
Yüzeysel Organik Toprak	12
Ormanlık Bölge Bataklığı	12
Organik İçerikli Tarımsal Toprak	15
Islak Kum	20-30
Tatlı Su	80

Ortamdaki gerçek kondisyonun tesbit edilmesi bu yöntemle mümkündür. Çünkü yeraltındaki tüm materyaller diğer birçok farklı RDP değerinde materyalin karışımından oluşmaktadır. Çoğu volkanik ve diğer sert kayalar ile nemli kum 6 ila 16 aralığında değişen RDP değerlerine sahiptir (Wensink [54]). Mineral içeriği bulunmayan ya da az miktarda mineral bulunan doymamış çökeltilerde RDP değeri genellikle 5 in altındadır. Eğer yeraltındaki materyallerin türleri hakkında bir veri yoksa, RDP değeri ancak radar enerjisinin hız değeri kullanılarak yaklaşık olarak belirlenebilir.

$$K=(C/V)^2 \quad (2.1)$$

K= Relative Dielectric Permittivity (RDP)

C= Işık Hızı (Sniyede 2998 metre)

V= Radar enerji darbesinin materyal içerisinden geçiş hızı

Kaliteli yansıma verilerinin üretilebilmesi için materyalin iki sınırı arasındaki RDP değerlerinin kısa mesafede fazla değişmemesi gerekir. RDP değeri derinlikle birlikte büyük oranda değişim gösterdiğinde yansımalar ya çok hafif ya da tamamen silik olacaktır (Van Dam ve Schlager [26]). RDP değerleri bilinen iki katman arasında üretilen yansımanın genliği 2.2 eşitliği kullanılarak hesaplanır (Sellman vd. [59]; Walden ve Hesken [60]).

$$R=(\sqrt{K_1}-\sqrt{K_2})\times(\sqrt{K_1} + \sqrt{K_2}) \quad (2.2)$$

R= Gömülü yüzeyin yansıtma katsayısı

K1= Üstteki materyalin yansıtma değeri

K2= Alttaki materyalin yansıtma değeri

En yüksek genlikli radar yansımaları özellikleri büyük oranda farklılık gösteren katmanlar arasındaki ince arakesitlerde görülür. Örnek verecek olursak bina temelindeki toprak ile üzerini kaplayan mıcır tabakası arasında ki radar yansımaları oldukça belirgindir. Özetle gömülü obje ya da yeraltı katmanlarının arayüzleri yüksek genlikte yansımalar üretir. Fakat bu her zaman için geçerli olmaz. Eğer hedef obje onu çevreleyen materyalle aynı fiziksel ve kimyasal özellikler sergiliyorsa, yani RDP değerleri arasında ciddi farklılıklar yoksa katmanlar arasında ya hiç yansıma gözlenmeyecek ya da oldukça silik yansımalar üretilecektir. Denklem 2.2 deki hesaplamalar yansıtma değerini sayısal değerlerle ifade edebilmek için kullanılır. Dalganın ara kesitindeki yansıma ve genlik daha sonra bu sayısal değerlerle yorumlanır.

### 2.7.2 Radar Enerjisinin Yeraltında Saçılması ve Sönümlenmesi

Yeraltındaki penetrasyon derinliğini ve yansıyan radar dalgalarının genliğini etkileyen bir diğer faktör de saçılma ve enerji sönümlenmeleridir. Eğer radar enerjisi fazla derinlere inerse elde edilecek yansımalar ve yansıma genlikleri azalacaktır. Orjinal enerji yeraltına iletilip yerin ulaşabildiği en dip katmanından yeryüzüne geri yansır. Orjinal enerji yeryüzündeki antene ulaşınca kadar içinden geçtiği materyallerin etkisiyle sönümlenir. Sonuç olarak radar enerjisi yeraltındaki seyri boyunca sürekli olarak zayıflar. Yeraltı katmanlarından üretilen yansımalar yeterli RDP değişkenliğinde ve radar enerjisinin algılanabildiği sığ derinliklerde olmalıdır. Bazı durumlarda filtreleme ve yükseltme teknikleri ile düşük genlikli zayıf yansımalar iyileştirilerek daha görünür hale getirilebilir. Radar enerjisinin maksimum penetrasyon derinliği ve yansıma potansiyeli kullanılan anten ve veri işleme tekniği her ne olursa olsun her bölge için farklıdır. GPR da etkili penetrasyon derinliğinin maksimum değeri yer içinde yayılan dalganın frekansına bağlı bir fonksiyona ve yine dalganın içinden geçtiği materyallerin fiziksel karakteristiğine bağlı olarak değişir (Annan vd. [61]; Batey [40]; Keller [62]; Olhoeft [52]).

Dielektriksel olarak tanımlanan toprak, çökelti ve kaya büyük miktarda elektromanyetik enerjinin kayıpsız şekilde geçişine imkan tanır. Bir materyalin elektriksel iletkenliği, düşük dielektrik ve sığ derinliklerde fazla enerji kaybı anlamına gelir. Yüksek iletken bir ortamda elektromanyetik dalganın elektriksel bileşenleri kısa sürede iletildiği ortam içerisinde kaybolur. Böylelikle elektromanyetik dalga kaybedilmiş olur. Bu yayılmadan dolayı gerçekleşen bir durumdur, elektromanyetik dalganın elektriksel ve manyetik bileşenleri iletim süreci boyunca birbirini beslemelidir.

Yüksek elektriksel iletken ortamlar tuzlu su ve özellikle tuz içerikli elektriksel iletken kil içermektedir. Özellikle bu kil ıslaksa ortamı daha da elektriksel iletken hale getirir. Her toprak ya da çökelti yeraltı sularında bulunan çözülebilir tuz veya elektrolit içerdiğinden yüksek elektrik iletkenlikli bir ortam oluştururlar. Çorak bölgelerdeki kalsiyum karbonat içeren topraklar gibi su içerisinde eriyebilen nitrojen ve potasyum karbonatça zengin tarımsal artıklar ortamın elektriksel iletkenliğinin artmasına neden olur. Çöl toprakları her ne kadar



radar enerjisinin iletimine uygun ve tamamen kuru olsalarda elektriği ileten tuzlu su bileşenli ara katmanlara sahiptir. Bu tarz topraklarda radar enerjisi sığ derinliklerde sönümlenir.

Toprak kimyası özellikle yapısı ve türü farklı olan killi minerallerden oluşur ve radar enerjisinin iletilmesinde rolü vardır. Fakat bu mekanizma hala tam olarak anlaşılammıştır (Walker vd. [63], Wensink [54]). Bazı alışılmış toprak türleri kil minerallerinden oluşur. Ne türden olursa olsun ıslak kilin radar dalgalarını sönümlediği ve killi ortamın GPR ölçmeleri için uygun olmadığı bilinmektedir (Leckebusch [24]). Bununla beraber, Kuzey Oregon'da doygun kil içeren bir ortamda 400 megahertzlik antenle yapılan deneyde 2 metreden daha fazla olan derinliklerde belirgin radar yansımaları kaydedilebilmiştir. Bu başarılı deneyinardından alana geri dönölüp toprak ve çökelti örnekleri analiz edildiğinde kilin mineral yapıda olmadığı görülmüştür. Bölgedeki kompozisyon; kil türünde fakat kaya kırıntılarında oluşan bir çökeltiden oluşmuş ve daha önce denenmemiş bir kil mineraliydi (Birkeland [64]). Materyal daha önce bilinen türler gibi bir elektriksel iletkenlik göstermedi. Dolayısıyla mineral yapısı analiz edilmeden ortamdaki kilin mineral kil mi yoksa kil türünden kaya kırıntısı mı olduğu bilinemez. İçerdiği su sebebiyle %40 oranında oldukça yüksek RDP değerine sahip olan bu doygun kil oldukça ilgi çekiciydi. Radar enerjisi düşük hızlarda olsa da içinden geçebiliyordu. Çünkü elektriği iletmeyen bir ortamdı.

Tam tersine Güney Colorado 'da 400 megahertzlik anten kullanılarak kuru kumsal çamurunda toplanan verilerde radar penetrasyonunun maksimum 50 cm olduğu görüldü. Ancak GPR ölçüleri tamamlanıp çökeltinin mineralojik yapısı analiz edildiğinde ortamda bentonit kil bulunduğu tesbit edildi. Bu sonuç; kuru çökeltinin neden iletken hale geldiğini ve radar enerjisinin neden sığ derinliklerde sürekli sönümlendiğin açıklamak için yeterliydi. Peru sahillerinde kuru kumsalda yapılan bir başka deneyde radar enerjisi yine yüksek iletken etkilerle sığ derinliklerde sönümlendiği görüldü. Anlaşıldı ki kumsalda kille sarılmış elektriksel iletken tuz katmanları ortamı oldukça iletken, bir başka deyişle dielektrik değeri olmayan bir hale getirmişti. Bu örnekler GPR ın kadim kanunlarından olan kuru kumsal toprağının radar penetrasyonu için en iyi fakat ıslak kilin kötü olduğunu radar yayılımında etkili olan diğer birçok önemli faktörle birlikte kanıtladı (Gerber vd. [65]). Yer kömürü gibi organik bileşenlerden ayrılmamış, ıslak olmadığı sürece elektrik iletkenliği bulunmayan maddelerin

çökeltlerinde yüksek oranda su bulunduğundan bu ortamlarda radar enerjisinin hızı düşer. Yerkömürü yüksek PDH değerine sahipken radar dalgalarının azami derinliklere ulaşmasına imkan tanır (Clarke vd. [55]; Leopard ve Volkel [66]). Organik maddeler ayrıştırıldığında, ayrıştırıldığında metal birikimi özellikle kimyasallardan arındırılmış çevrelerde ve bu materyalin elektriksel iletkenliğini artırabilir (Van Dam vd. [51]). Bu tarz nemli organik materyaller yerin asitlik derecesini artırır, hidrojen iyonları üretir bu da elektrik iletkenliğinin artmasına sebep olur. Yer içindeki diğer suda çözünmeyen materyaller sebest iyon üretirler ve yüksek seviyede elektrik iletkenliğine sebep olurlar. Sülfat ve karbonat mineralleri, demir, tuz çökeltleri ve element yüklü mineral türleri yüksek iletken bir ortam oluşturur. Bu da radar enerjisini sığ derinliklerde sönmelenmesine neden olmaktadır (Van Dam vd. [51]).

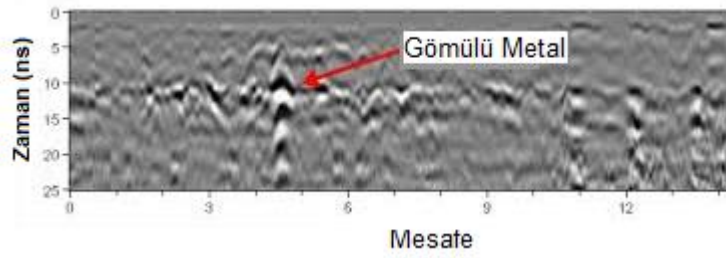
Arzu edilmeyen nemli ortamlarda, kireçli çökeltelerde veya zengin mineral içerikli killi topraklarda maksimum GPR penetrasyonu 1 metre ve altında gerçekleşir. Bölgede detaylı kimyasal toprak analizi yapılmadığı takdirde veri depolanmadan önce GPR çalışmaları için ortamın elektrik iletkenliğini tain etmenin en iyi yolu GPR verilerini toplayarak yansıma profillerinin penetrasyon derinliklerini karşılaştırmaktır. Bazı araştırmacılar yeryüzünün yakın yüzeylerinin elektrik iletkenliğini ölçmek için EMs (Elektronik Conductivity Meter) adı verilen cihazı kullanırlar. Bu sayede GPR enerjisinin arzu edilen derinliğe iletilmesinde ne kadar başarılı olunabileceği kestirilebilir. Bu metodun kullanılmasında dikkat edilecek husus öncelikle EMs cihazının bilinen ortamda kalibrasyonunun doğru şekilde yapılmasıdır, aksi takdirde yapılacak iletkenlik ölçümleri geçersiz olur. GPR ekipmanı kullanıma hazır vaziyette ise daha kesin sonuçlar elde edebilmek adına yapılabilecek en uygun kalibrasyon kontrolü bilinen bir sahada bir ya da iki radar profil verisi toplayarak radar enerjisinin ne kadar derine nüfuz edebildiğini görmektir.

Araştırmacılar toprak örneklerinin iletkenlik değerlerini kısa sürede ve doğru şekilde ölçebilen aletler geliştirmekte ve GPR in ölçme alanında ki etkinliğini artırmak için sürekli çalışmaktadırlar. Bazıları nem içeriğini belirlemek amacıyla toprak örnekleri alıp bellekte depolayacak şekilde geliştirilmiş sistemlerdir. Diğerleri daha basit şekilde direk elektriksel cihazlar yardımıyla yeryüzündeki bir elektrottan diğer ikinci bir elektrota elektrik akımı göndererek elektriksel direnci ölçen ve bu sayede elektriksel direncin tam tersi olan

elektriksel iletkenlik değerini belirleyebilecek şekilde tasarlanmışlardır. Ancak her ikisinde yalnızca bir örnekleme üzerinden ölçüm yaptığı için alanın tamamı hakkında bilgi veremeyebilir veya yer içerisinde dolambaçlı bir yol izleyen elektrik akımının karşılaşacağı gerçek direnci tam olarak ifade edemeyeceği için radar enerjisinin yer içindeki iletimini tahmin etmekte kısmen başarılı olabilmektedirler. Bugün örnekleme üzerinden laboratuvar ortamında yapılan analiz sonuçları dışında, yer altındaki elektriksel iletimi tam bir doğrulukla belirleyecek veya radar iletimini ne ölçüde etkileyeceğini kesin suretle ortaya koyabilecek bir yöntem bulunmamaktadır. Manyetik geçirgenlik radar penetrasyon derinliğini etkileyen faktörlerdendir. Manyetik geçirgenlik ortamın manyetik alana maruz kalması halinde ne ölçüde magnetize olduğunun ölçülmesidir (Sheriff [67]). Bütün toprak türleri ve çökelti az da olsa manyetiktir ve dolayısıyla manyetik geçirgenlikleri düşük seviyededir. Manyetik geçirgenliğin artması halinde radar iletimi esnasında enerji sönümlenmesi daha fazla olmaktadır. Böylece elektromanyetik dalganın manyetik bileşeni, tıpkı elektriksel iletken ortamda elektriksel bileşenin yok oluşu gibi yok olacaktır. Magnetit mineral içeren ortamlar demir oksit veya demir içeriği zengin topraklar yüksek manyetik geçirgen olduğundan bu ortamlardaki radar enerji iletimi oldukça zayıftır (Van Dam vd. [51]). Havai nin bazaltik kumsallarında yapılan ölçümlerde bu fiziksel özellikten kaynaklanan sebeplerle radar enerjisinin penetrasyon derinliğinin düşük olduğu görölmüştür (Olhoeft [52]). Aynı durum doğal etkenlerle aşınmamış granit çökeltilerinin bulunduğu Arizonada da yaşanmış, her iki ortamda da magnetit bileşenler bulunduğu anlaşılmıştır. Fakat İzlanda da bazalt alanlarda düşük frekanslı antenlerle radar enerjisi metrelerce derine iletilebilmiştir (Cassidy vd. [68]).

Radar enerjisi metallere geçemez. Metal bir obje radar enerjisinin tamamını yansıtarak objenin hemen altında bir gölge oluşturacaktır. GPR yansıma profillerinde gömülü metal objeyi tanımlamak oldukça kolaydır. Çünkü metal objenin üzerinde birbirini takip eden çoklu yansımalar üretilecektir (Şekil 2.12). Bu etki, radar enerjisinin metal objeden yeryüzüne ve yeryüzünden metal objeye doğru gerçekleşen tekrarlı yansımaların sonucudur. Bu şekilde çok sayıda yansımanın bulunduğu bölgeler orada gömülü bir metal bulunduğuna dair bir işaret olabilir. Metal dışındaki pişmiş kil veya plastik obje gibi yüksek seviyede yansıtma

özelliği bulunan maddelerde çoklu yansıma kümeleri oluştururlar. Özetle bu kümelenmenin görülmesi orada kesin suretle metal bulunduğu anlamına gelmez.



Şekil 2.12 Gömülü Metal Objenin Ürettiği Yansıma (Cassidy vd. [68])

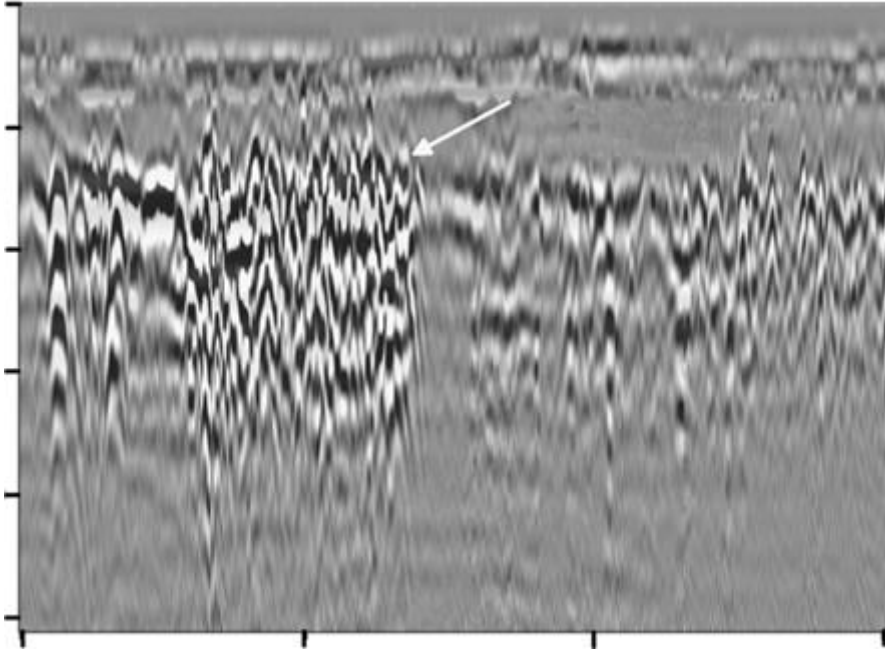
Radar enerjisinin penetrasyon derinliği ve yeraltı çözünürlüğü ortamı oluşturan sayısız bileşen, boşluk yapısı ve nem miktarı gibi bölgeye özel çok sayıda faktörden etkilenir. Burada unutulmaması gereken yüksek iletken özellikte toprak bileşenlerinin dalgaboyu farketmeksizin radar enerjisinin sığ derinliklerde sönümlenmesine neden olduğudur. Yüksek frekanslı antenlerin penetrasyon derinliğinin 50 santimetre fakat düşük frekanslı antenlerin daha derine penetrasyon kabiliyetine sahip olduğu şeklinde hatalı bir inanış vardır. Aynı penetrasyon derinliğinde 300 megahertzlik güvenilir bir antenle elektrik iletkenliği yüksek bir ortamda radar enerjisi çok daha derine iletilebilir. Bunun antenle ya da frekans değeri ile bir alakası yoktur.

1500 megahertzin üzerindeki çok yüksek frekanslarda su içerikli jeolojik materyallerdeki enerji kaybı moleküler etkileşim nedeniyle normal enerji sönümlenme seviyesinin çok daha üzerinde gerçekleşmektedir (Annan ve Cosway [43]). Arkeolojik uygulamalar için bu sorun değildir fakat bant genişliği 800 megahertz ve üzerindeki merkez frekansında olan çok yüksek frekans değerlerine sahip antenlerce üretilen radar enerjileri moleküler etkileşimden etkilenebilirler. Moleküler etkileşim su moleküllerinin bipolar olması ve maruz kaldıkları elektromanyetik ortamın etkisiyle döndürülmelerinden kaynaklanmaktadır. Tıpkı mikrodalga fırınlardaki gibi enerjinin bir bölümünün ısıya dönüşmesine neden olurlar (ASTM International [53]). Frekanstan bağımsız olan bu enerji kaybı "dielectric relaxion" olarak bilinir. Nemli ortamlarda yüksek frekanslı antenlerle yapılan GPR ölçmeleri için önemli bir faktördür.

### 2.7.3 Yansıma Türleri

Bir profil boyunca gömülü tabakaların elde edilen bir dizi yansıma izi toplandığında profil doğrultusunda alt alta yatay hatlar elde edilecektir. Bunlar koyu ve parlak gri tonlarda yansıma profilleridir ve “Planar Reflection” olarak adlandırılır. Bu belirgin yansıma türü genellikle stratigrafik ortamlarda veya diğer fiziksel süreksizlik gösteren su tabakalarında veya arkeolojik objeler gibi farklı yeraltı tabakalarının sınırlarında üretilir. Bunlar yeraltındaki nokta hedeften kaynaklanan yansılarda olabilir.

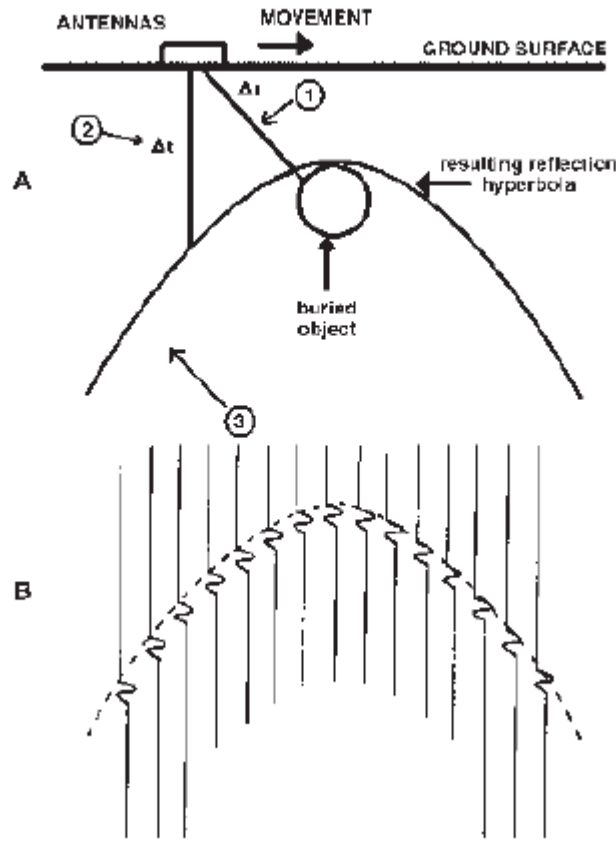
Nokta kaynaklı yansımaları üreten gömülü materyaller tek bir kaya, metal obje, doğru açıyla yerleştirilmemiş çakışık borular ve bu bağlamda değerlendirilebilecek diğer küçük objeler olabilir. Nokta hedefler radar profillerinde yansıma hiperbollerini olarak görülürler. Aşırı sayıda veya yoğunlukta hiperboller içeren yansıma profilleri yorumlamayı zorlaştırır. Hiperbolik yansımalar oldukça kompleks ve yoğun profiller oluşturur (Şekil 2.13).



Şekil 2.13 Çok sayıda küçük hiperboller (Conyers [18]).

Şekil 2.13 te Metal veya seramik bir objeden kaynaklanan yoğun yansımaların hiperbolik görünümü karmaşık bir yansıma profili oluşturmuş, Kalifornyanın güney kesimlerindeki San Gabriel Nehri yakınlarında yapılan ölçüm sonuçlarında 19. Yüzyıldan kalma bir ev kalıntısı olduğu anlaşılmıştır. Nokta kaynaklı yansıma hiperbollerini bazen diffraksiyon terimiyle ifade edilir. Tüm GPR antenlerinin ürettiği radar dalgasının yeraltında konik bir eğri şeklinde

yayılmışından dolayı yansımaları da hiperboller şeklinde oluşur. Derinlere indikçe dışa doğru yayılan radar enerjisinin seyrini ifade eder.



Şekil 2.14 Yansıma Hiperbollerinin Üretilmesi. A harfiyle gösterilmiş. Sinyalin gidiş ve dönüşü zamanın fonksiyonu olarak ( $cxt/2$ ) antende algılanıp derinliğe göre kaydedilerek görüntülenir. Cismin üzerinden geçerken yüzeydeki anten tarafından kaydedilen gömülü objeye ait çok sayıdaki yansıma tüm yansıma izlerinin profile gösterildiği B çiziminde olduğu gibi bir yansıma hiperbolü oluşturur (Conyers [18]).

Radar enerjisi gömülü katmandan yansırken verici antenin direk altından olmasada yayılmakta olan dalgaın konik yüzeyinin içinden yansır. Radar dalgasının eğrisel ve zikzaklı seyri yansıdığı katmanın yeryüzüne olan mesafesinden radar enerjisinin seyir süresiyle ölçülen mesafeye oranla daha uzundur. Fakat objeden üretilen yansımalar antenin direk altında olmasada altındaymış gibi kaydedilir. Yüzeydeki anten gömülü nokta hedefin yakınlarında taşınırken alıcı anten gömülü nokta hedeften gelen yansımaları kaydettiğinden obje üzerinden gelen yansıma verileri kullanıcı ekranında ancak obje geçildikten sonra görülebilir. Bir yansıma hiperbolü üretilmiş olur çünkü enerjinin antenden objeye olan seyir

süreci boyunca istediği rota eğimli bir patika şeklindedir. Bu zikzaklı seyir yolu yansıma kaynağının antenle olan gerçek mesafesinden büyüktür. Anten gömülü objeye yaklaştığında yansımalar kısa sürede kaydedildiğinden yansıma süresinin en kısa olduğu an antenin objenin tam üzerinde bulunduğu pozisyonudur. Bu doğal süreç anten yansıma kaynağının üzerinden taşınıp geçtikten sonrada tekrarlanır. Sonuç olarak bir parabolün ekstrem (tepe) noktası gömülü yansıma kaynağının bulunduğu konumu ifade etmektedir. Parabolün uzantıları ise enerjinin yeraltında izlediği eğimli ve zikzaklı güzergahın yansıma kayıtlarından üretilmektedir. Bazen evlerin gömülü zeminleri veya bu tarz platformlarda gömülü objenin noktasal olmayan yansıtıcı yüzeylerinin etkisi ile süreksiz yansımalar da oluşabilmekte ve yarım hiperboller olarak kaydedilmektedirler.

Jeofizikçilere göre yansıma hiperbollerinin varlığı veri yorumlama aşamasında dikkat dağıtıcı bir etkidir, çünkü gömülü objenin gerçek konumunu ifade etmemektedirler. Yeraltında yayılan radar enerjisinin izlediği yolun kompleks geometrisinin, zikzaklı seyrinin birer ürünüdürler. Öte taraftan hiperbollerin varlığı bazen verilerin yorumlanmasına yardımcı da olabilir, çünkü yansıma profillerinde kolaylıkla tanımlanabilen yeraltı objelerinin geometrilerini ve spesifik boyutlarını gösterirler. En önemlisi hız analizlerinde hızın belirlenmesine olan katkısı görmezden gelinemez. Daha sonraki aşamalarda hiperbollerin radargramlardan veya profillerden çıkarılması gerekirse yazılım programları migration prosedürlerini kullanarak parabolün tepe noktasını hiperbolün diğer uzantılarından ayırt edebilirler. Bu işlev özellikle karmaşık mekansal analizlerde ve gömülü katmanların 3 boyutlu haritalanmasında çok sayıda hiperbolün varolması halinde hatalı anomalilerin oluşmasına neden olacağından son derece önemlidir. Bazı objelerin konumunun belirlenmesini haritalarda ve 3 boyutlu görüntülemelerde zorlaştırmaktadır.

#### **2.7.4 Yüzeyaltı Çözünürlük ve Özellikleri**

Yeraltı çözünürlüğü gömülü materyalin içinde bulunduğu yeraltı katmanında yayılan radar enerjisinin dalga boyu ve materyalin geometrisine bağlı bir fonksiyondur. Düşük frekanslı antenler (10 ila 120 mhz arası) uzun dalga boylu radar enerjileri yayarlar ve bunlar 50 metrenin üzerinde penetrasyon özelliğine sahiptir. Fakat bu frekans aralıkları ancak çok büyük çaplı yeraltı katmanlarında çözümleme yapabilirler. Saf buz tabakalarında belirtilen

frekanslardaki radar penetrasyonu kilometrelerce olabilmekte ve bu özellik buz tabakasının kalınlığının ya da buzul altındaki en dip yeryüzü seviyesinin belirlenmesinde kullanılır. (Bogorodsky vd. [69])

Buna karşın 900 megahertz gücünde bir antenin penetrasyonu normal toprak yüzeyde 1 metre ve belki daha da az olmakta fakat birkaç santimetre boyutlarında yeraltı objelerine ait yansımalar üretebilmektedirler. Dolayısıyla penetrasyon derinliği ve yeraltı katmanlarının çözünürlüğü arasında bir ilişki bulunmaktadır. Çizelge 2.2'de farklı merkez frekanslı antenlerin dalga boyları ile bu dalga boylarını farklı RDP değerlerindeki materyallerden geçerken sergilediği enerji değişimleri görülmektedir. Gömülü katmanların özelliklerinin belirlenmesi gömülü oldukları derinlikte enerjinin dalga boyunun bir fonksiyonu olarak tanımlanabilir.



Çizelge 2.2 Radar dalga formuna ait dalgaboyu (metre) RDP ve Frekans değerleri arasındaki bağıntıyı göstermektedir.

**Frekans (Mhz)**

RDP	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
1	2.998	1.499	0.999	0.750	0.600	0,500	0.428	0.375	0.333	0,300
2	2.120	1.060	0.707	0.530	0.424	0.353	0.303	0.265	0.236	0.212
3	1.731	0.865	0.577	0.433	0.346	0.288	0.247	0.216	0.192	0.173
4	1.499	0.750	0.500	0.375	0.300	0.250	0.214	0.187	0.167	0.150
5	1.341	0.670	0.447	0.335	0.268	0.223	0.192	0.168	0.149	0.134
6	1.224	0.612	0.408	0.306	0.245	0.204	0.175	0.153	0.136	0.122
7	1.060	0.567	0.378	0.283	0.227	0.189	0.162	0.142	0.126	0.113
8	1.060	0.530	0.353	0.265	0.265	0.177	0.151	0.132	0.118	0.106
9	0.999	0.500	0.333	0.250	0.200	0.167	0.143	0.125	0.111	0.100
10	0.948	0.474	0.316	0.237	0.190	0.158	0.135	0.119	0.105	0.095
11	0.904	0.452	0.301	0.226	0.181	0.151	0.129	0.113	0.100	0.090
12	0.865	0.433	0.288	0.216	0.173	0.144	0.124	0.108	0.096	0.087
13	0.831	0.416	0.277	0.208	0.166	0.139	0.119	0.104	0.092	0.083
14	0.801	0.401	0.267	0.200	0.160	0.134	0.114	0.100	0.089	0.080
15	0.774	0.387	0.258	0.194	0.155	0.129	0.111	0.097	0.086	0.077
16	0.750	0.375	0.250	0.187	0.150	0.125	0.107	0.094	0.083	0.075
17	0.727	0.364	0.242	0.182	0.145	0.121	0.104	0.091	0.081	0.073
18	0.707	0.353	0.236	0.177	0.141	0.118	0.101	0.088	0.079	0.071
19	0.688	0.344	0.229	0.172	0.138	0.115	0.098	0.086	0.076	0.069
20	0.670	0.335	0.223	0.168	0.134	0.112	0.096	0.084	0.074	0.067
30	0.547	0.274	0.182	0.137	0.109	0.091	0.078	0.068	0.061	0.055
40	0.474	0.237	0.158	0.119	0.095	0.079	0.068	0.059	0.053	0.047
50	0.424	0.212	0.141	0.106	0.085	0.071	0.061	0.053	0.047	0.042
60	0.387	0.194	0.129	0.097	0.077	0.065	0.055	0.048	0.043	0.039
70	0.358	0.179	0.119	0.090	0.072	0.060	0.051	0.045	0.040	0.036
80	0.335	0.168	0.112	0.084	0.067	0.056	0.048	0.042	0.037	0.034

Thumb kanunu yeraltındaki objeye yüklenen enerjinin dalgaboyunun %25'i nin algılanabilecek minimum obje boyutu olduğunu ifade etmektedir. Yüklenen radar enerjisi yeraltında ilerlerken enerji geçişleri yaşanır, ve frekans azalır (Jol ve Bristour [48]). Radar enerjilerinin dalgaboyunun artmasıyla yayılımları artar. Örneğin 400 megahertz merkez frekanslı bir anten hava ortamında 75 cm dalgaboyu üretir (Çizelge 2.2). Bu enerji

yeraltındaki seyri esnasında merkez frekansı 300 megahertze düşerken dalgaboyu 100 santimetreye yükselir. Dolayısıyla yüklenen enerjinin dalgaboyunu kesin olarak hesaplamak neredeyse imkansızdır.

## 2.8 Hız Analizi

Günümüzde yapılan GPR araştırmalarındaki esas maksat yeraltı katmanlarının ve 3 boyutlu gömülü arkeolojik yapıların doğru şekilde haritalanmasıdır. Geçmişte kazı tamamlanana kadar GPR çalışmasında arkeolojik yapılara ait olabilecek gömülü katman ya da obje anomalilerinin tanımlanması pek mümkün olamıyor, her objenin gerçek derinlik ve doğrultusunun belirlenmesi, onu çevreleyen doğal katmanın bu derinlik ve yönelimle olan ilişkisinin araştırılması genellikle ikinci planda kalıyordu. Günümüzde ise GPR çalışmalarındaki öncelikli amaç; kazı yapmaksızın gömülü objeyi detaylı şekilde haritalamaktır. Çoğu zaman kazı çalışmalarının planlanması bu jeofizik çalışmalar referans alınarak yapılmaktadır. GPR yer altı haritaları çok geniş alanların kazılmasına mahal bırakmayacak nitelikte spesifik kazı alanını oldukça doğru biçimde tanımlayabilmektedir. Bu hedefe ulaşabilmek için gerçek derinlik değerlerine sahip yer altı haritalarına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu hassasiyette gömülü katman bilgisi tranşe kazılarla veya yoğun karot yöntemi gibi diğer hiçbir metotla elde edilemez. Andropojenik bozulmalarla ilgili çalışmalar, çökme alanlarının analiz aşamaları, gömülü toprak katmanlarının veya tarihi tarım alanlarının haritalanması bunlara örnek olarak gösterilebilir. Arkeolojik uygulamalarda kullanım alanları genişleyerek değişen GPR için gerçek derinlikte yer altı verilerinin üretilmesi zaruridir. GPR verilerindeki spesifik yansımalar iki boyutlu bir gösterimle derinlik ve mesafe olarak betimlenir ve ölçülebilen derinlikler için arkeolojik yapı ya da yer altı katmanının özelliklerini ifade eden radargramlar olarak olarak adlandırılır (Conyers ve Lawrence [70]). Radar enerjisinin gidiş dönüş süresinin derinlik değerine dönüştürülmesi ekipmanın veriler toplanmadan önceki kalibrasyon prosedürü ile ilişkilidir ve her gerçekçi veri yorumlama işlevinden önce mutlaka yapılmalıdır. Radar enerjisinin gidiş dönüş süresinin derinlik değerine çevrimi ancak materyalden gelen enerjinin seyir süresi boyunca olan hız değeri biliniyorsa mümkündür. Bu bölümde ölçümün yapıldığı alanda veya laboratuvar ortamında yapılan testlerle hız ölçümünün nasıl yapıldığı anlatılmaktadır. Ortamdan GPR ekipmanı ile direkt olarak elde edilebilecek tek ölçüm radar dalgasının seyir süresidir. Gömülü obje ya da katmanın derinliği ancak şerit metre veya diğer

uzunluk ölçme araçlarıyla kazı alanından, sondaj noktasından ya da karot numuneleri üzerinden direkt olarak ölçülebilir. Eğer zaman ve derinlik değeri direkt olarak ölçülmüşse yeraltındaki elektromanyetik dalga yayılım hızı yaklaşık olarak hesaplanabilir. Hızın belirlenmesinde kullanılan iki genel teknik vardır. Bunlar; yansıyan dalga metodu ve direkt dalga metodudur. Yansıyan dalga metodunda objeden veya ara katmandan yansıyan radar enerjisinin yansıdığı derinlik direkt olarak ölçülür (Strenberg ve McGill [71]).

Direkt dalga metodunda yeryüzeyindeki bir antenden diğer antene olarak ulaşan radar dalgasının hızını antenler arasındaki mesafe direkt ölçülerek hesaplanır. Diğer bütün metotlar örneklemenin laboratuvar ortamında test edilmesi veya gömülü objenin yansıma hiperbollerinin uygun bilgisayar programları kullanılarak analiz edilmesi esasına dayanır. Eğer mümkünse çalışma alanının farklı bölgelerinde birden fazla hız testi yapılmalıdır. Çünkü test alanındaki toprak ve çözeltilerde hız değeri derinlikle birlikte değişebilmektedir. Hız değerleri ortamın faktörlerine bağlı olarak farklılık gösterebilir. Özellikle ortamdaki su içeriği her zaman için radar enerjisinin yayılma hızını etkileyen faktörlerin başında gelir. Kuru kuvars kumunun RDP değeri 4 tür. Radar dalgasının hızı bu ortam için 14,99 cm/ns olarak hesaplanır. Bunun tersine RDP değeri su için 80 iken, radar dalgasının hızı 3,3 cm/ns olmaktadır. Dahası; eğer kum gözenekleri az miktarda bile olsa suyu tutuyorsa radar enerjisinin hızı nem dolayısıyla iyice azalır. Her halükarda topraktaki ve çökeltideki su içeriği derinlere inildikçe arttığından radar enerjisinin ortalama hız değeri de giderek azalmaktadır. Su saçaklarının üzerinde bulunan toprak ya da çökeltinin içerisinde barındırdığı su miktarı, su saçığının derinliğine de bağlı olarak akıntının konumu, yüzey topografyası ve stratigrafi değişimi nedeniyle düzensiz ve sürekli değişken olabilmektedir.

Arkeolojik kaynaklara göre; gömülü antropojenik yapılar bir bölgede su doygunluk seviyesini değiştirebilecek, düzensiz hız değişikliklerine neden olabilecek nitelikte farklı kompozisyonlarda tabakalar üretebilirler. Dolayısıyla hız değeri; tıpkı çökelti ve toprak karışım kompozisyonlarından etkilendiği gibi su doygunluk seviyesinin değişiminden de etkilenir. Çoğu zaman arazideki hız değişimlerinin nedenini belirlemek oldukça zordur. Çünkü hız değişimine neden olan faktör materyal farklılığı veya su içeriği olabildiği gibi bazı durumlarda aynı anda her iki faktör birden etkili olabilmektedir. GPR çalışmaları için hız ölçümleri hayati önem taşımaktadır. Topraktaki ve çökeltideki nem miktarına bağlı olarak ani değişiklikler gösterebilen hız değeri bazen aniden bazende mevsimsel olarak

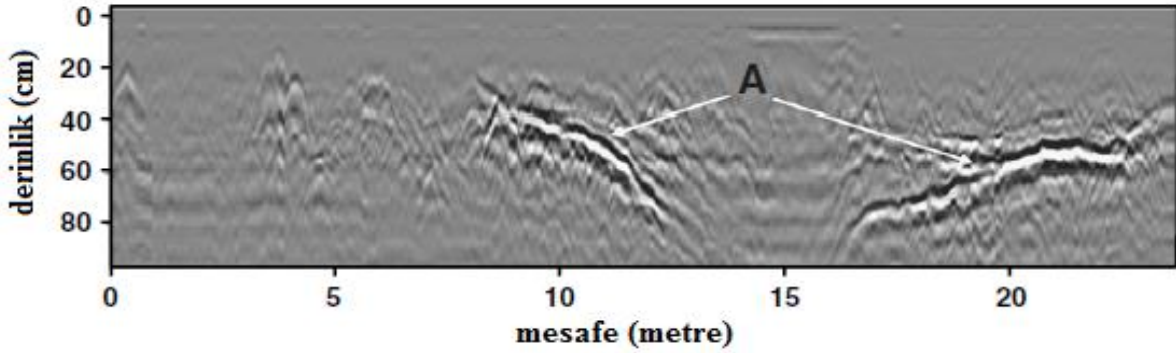
gerçekleşmektedir. Ölçüm esnasında yağın sağanak yağmur, erimekte olan kar veya sel gibi durumlar ortamdaki nem yüzdesini etkileyeceğinden hız değerini ölçüm esnasında bile değiştirebilmektedir. Örneğin Amerika'da volkanik külden oluşan bir alanda yapılmış hız testine göre yağmur sezonunda ölçülen RDP değeri 12 (ortalama hız 8,7 cm/ns) iken aynı ortamda 6 ay sonra kuru mevsimde yapılan testte RDP değeri 5 ve ortalama hız değeri 13,4 cm/ns olarak ölçülmüştür (Doolittle ve Miller [72]). Bu sebeple eğer hız testinin yapıldığı sezonda değil de birkaç ay sonra bile GPR ölçümleri işlenip yorumlandıysa, yansıma anomalileri ve derinlikleri kesinlikle yanlış olacaktır. Buna benzer bir başka dramatik etki de gece yapılan ölçümlerde gözlemlenmiştir. Güneybatı Amerika'da yapılan bir çalışmada 500 mhz antenle 2 m derinliğe ulaşılan çalışmada oldukça iyi radar yansımaları elde edildi. Bir gecede metrekareye 8 cm lik yağıştan hemen sonraki sabah aynı antenle yapılan ölçümlerde oldukça zayıf yansımalar üretilmiş ve ulaşılabilen maksimum araştırma derinliği (penetrasyon) yalnızca 0,5 m olarak kaydedilmiştir. Aynı şekilde RDP değerleri de aynı bölge ve aynı anten kullanılmasına rağmen farklılıklar göstermekteydi (Cameron [73]). Bu yüzden ortama suyun dahil olması demek yalnızca radar enerjisinin yayılma hızının değil yeraltındaki penetrasyon derinliğinin de değiştiği anlamına gelir.

Yansıyan Dalga Metodu:

Hız ölçümünde kullanılan en basit ve en doğru yöntem araştırmaya konu olan ve derinliği önceden bilinen obje, yapı veya katmandan üretilen GPR profillerindeki yansımaları tanımlamaktır. Bu yöntem radar dalgasının yeryüzündeki antenle ölçülen derinlik arasındaki ortalama hız değerini direkt olarak belirlemeye imkan tanır. Bu hız testleri geçmişte bakır kabloların (tellerin) bulunmasında (Kenyon [74]), boş boya kutularının tespit edilmesinde (Doolittle ve Miller [75]), arkeolojik alanlardaki balina kemiklerinin bulunmasına varana kadar çok çeşitli objelerin araştırılmasında kullanıldı. Çünkü metaller radar enerjisi için mükemmel yansıtıcı özelliktedir. GPR profilleri üzerinde oluşturduğu farklı türdeki parabollerle ölçüm hattı üzerindeki metal objeden kaynaklanan yansımalar kolaylıkla tanımlanabilir. Gömülü duvar veya diğer nokta hedeflerden kaynaklanan yansımalar buna benzer testlerle GPR profilleri üzerinden kısmen kazılarak tanımlanabilmektedir.

Benzer şekilde yeraltındaki materyal türlerinin değişiminden kaynaklanan farklı türdeki yansımaları tanımlamak için karot testi yöntemi ya da yansıma yüzeyi boyunca yapılacak kazılar bu amaca olumlu katkı yapacaktır. Bu uygulama yansıma profilleri üzerinde görülen

akarsu kanalı gibi farklı türde zeminler içeren bölgelerde yapılmış ve akarsu kanalındaki bu tür yüzeyler iri taneli kum ve çakıl taşından killi toprak türlerine kadar kolaylıkla ayırt edilebilmiştir (Şekil 2.15). Kanalın dibine yapılan sondajlarla ölçülen derinlik sayesinde hız değeri kolaylıkla hesaplanabilmektedir.



Şekil 2.15 Hız değerinin belirlenmesi için stratigrafik yapıların tanımlanması. Kaliforniya-Lompoc kırsalında 500 MHz antenle yapılan ölçümlerden elde edilen profilde akarsu kanal yatağındaki kum (A) görülmektedir. Burada kanal yatağının derinliği sondajla ölçülerek hız değeri hesaplanmıştır (Conyers [73]).

Her halükarda yer yüzeyinden derinlere doğru yapılan hız değeri ölçümleri ortalama hız değeridir. Bu tarz testlerde yeraltına dair birçok farklı noktadan yapılan hız ölçümleri derinlikle birlikte büyük değişimler gösteriyorsa yeraltına dair hız değeri farklı derinliklerde birçok noktadan yapılacak çoklu hız testleri ile ortalama hız değeri belirlenebilir. Doğru hız ölçümleri olmadan yapılacak 3 boyutlu GPR analizi hatalı olacaktır. En basit ve en doğru yöntem hız değerinin belirlenmesinde kazılarak ya da tranşe kazılar yapılarak düşey kesite göre yatay olarak yerleştirilmiş demir borular kullanmaktır. Antenler yavaşça borunun üzerinden çekilerek yer altı yansımaları kaydedilir. Metal boru farklı türde yansıma hiperbollerini ile görülecektir. İnce metal bordan maksimum miktarda yansımayı elde edebilmek için yüzeydeki antenin hareket ettirildiği aksın eğiklik ve dönüklüğü, gömülü metal boru ile paralel olmalıdır. Demir boruya paralel olarak yöneltilen anten boruya paralel şekilde elektrik alan üretir ve maksimum düzeyde yansımaya sebep olur. Bu testler yapılırken derinliğe uygun doğru anten frekansı ve obje türü kullanılmalıdır. Düşük frekanslı bir anten kullanıldığında antenin düşük çözünürlüğü sebebiyle oldukça büyük boyutlarda bir obje gerekir ki 2 boyutlu radargramlarda görülebilsin. Veri toplanırken bilgisayar ekranında yansıma profilleri görüldüğü anda eğer zaman ölçeği doğru ise hiperbollerin tepe noktası kesit üzerinden ölçülebilir. Böylelikle zaman ve derinlik değerleri kullanılarak hız değeri

derinlik ölçeğine çevirilebilir. Eğer demir boru görüntülenemeye profil analizi daha sonra hedefin görünürlüğünü veri filtreleri kullanarak ve görüntü işleme yöntemleri kullanarak artırmak üzere ertelenir. Çalışma alanındaki farklı derinlikler için testler yapıldığında farklı hız değerleri hesaplanacaktır. Su doygunluk düzeyi ve yer altı kompozisyonlarındaki derinlikle birlikte gerçekleşen değişimler nedeniyle eğer yalnızca bu ortalama hız değeri kullanılırsa düşey ekseninde deformasyon oluşabilir. Ara yüzeylerden üretilen yansımalar yeryüzeyine yakın ise derinlik değerleri doğru olacaktır. Fakat derinlere inildikçe radar enerjisinin seyri zaman penceresinden bakıldığında yavaşlayacak ve yansımalar düzleşecektir. Alternatif olarak daha derindeki bir hız değeri ortalama hız değeri kabul edilirse daha doğru bir tercih yapılmış olur. Bu değer yüzeydeki sığ derinlikteki hız değerine göre daha düşük olacaktır. Bu düşük hız değeri veri setlerine uygulandığında derinlerdeki silik yansımalar daha görünür hale gelecektir. Bu veri işleme aşamasında radar seyir süresini derinliğe çevirirken tek bir ortalama hız değeri kullanmak veri işleme aşamasında karşılaşılan en büyük hatadır. Spesifik derinlikler için farklı RDP değerleri biliniyorsa bilgisayar programları kullanılarak farklı derinliklerdeki farklı hız değerleri kullanılarak profildeki zamanı derinliğe çevirmek mümkündür. Buna rağmen farklı RDP değerlerindeki yer altı katmanlarının sınırlarında ani hız değişimleri nedeniyle sanal (sahte) distorsiyonlar varolabilir. Daha doğru bir yaklaşımla elde edilen her bir RDP değeri her bir derinlik için farklı hız değerlerine dönüştürülerek yer altı katmanlarının her bir bölgesi için ayrı ayrı uygulanıp analiz edilebilir. Bazı GPR veri işleme programları bu tarz ileri düzeltmelere imkan tanıyarak çok daha doğru derinlik ölçeğinde GPR profilleri üretebilirler [76].

Tek bir RDP değeri kullanarak tüm GPR verilerini ve onları çevreleyen profillerin derinliğini hesaplamak ancak araştırmanın yapıldığı sahada yer altı kondisyonun yalnızca yatayda değiştiği ve araştırmanın tek bir bölgesinde yapıldığı koşullarda mümkün olabilir. Mesela su içermesi sebebiyle yüksek su yüzdesine sahip bölgelerde hız değeri düşeceğinden araştırmaya konu olan ara yüzey katmanların derinlik değerleri önemli ölçüde değişken olacaktır. Çoğunlukla bir bölgeye ait detaylı stratigrafik yapı bilinmeden yer altı katmanlarındaki varyasyonlar çoğu zaman algılanamayacak ve derinlik analizleri muhtemelen yanlış olacaktır. Coğrafik olarak daha detaylı veri setleri ile yapılan hız analizi ve kalibrasyonu testlerinde arazinin 3 boyutlu hız gridleri oluşturulabilir. Bu sayede çok daha doğru profiller ve yer altı haritaları üretilebilir. Bunlar olmadan bahsi geçen potansiyel hız problemlerinin

GPR metodunun presizyonunu olumsuz etkilediği kabul edilmelidir. Sıkça yapılan diğer bir hata ise yalnızca direkt dalga metoduyla hız dönüşümü yapılacak alanlarda yıllar önce açılmış kazıların bulunduğu yerlerde hız testi yapmaktır. Açılan kazı yer altı kompozisyonlarını net ifade edemediği gibi çevresel faktörlerle taşınarak gelen materyallerin uzun süre birikimine maruz kalmış kazı alanında, ortamda gerçekte bulunmayan farklı türde materyallerin birikimine ve dolayısıyla yanlış hız analizlerine neden olurlar. Ürdündeki bir çöl alanında bu durumla karşılaşıldı. Rüzgarla taşınan kumlardaki farklı türden materyaller bölgeye karıştı. Demir boru kullanılarak yapılan çok sayıda direkt dalga testi farklı derinlikler için uygulandı ve bölge içerisindeki hız değeri sabitinin çok yüksek düzeyde olduğu görüldü. RDP değeri ise 3 olarak ölçüldü. Griddeki tüm yansımalar bu ortalama hız değerine göre düzeltildi ve yer altı katmanları derinlikleri ile birlikte haritalandı. Bu ara katmanların haritalandığı çalışma sahası daha sonra kazıldığında haritalanan her bir katmanın gerçekteki yeryüzüne 3 misli daha sığ derinliklerde olduğu görüldü. Nerede hata yapıldığı araştırıldığında çevresel etkilere maruz kalan kumun kuru olduğu, testlerin bu kuru kum üzerinden yapıldığı anlaşıldı. Kuru materyallerden oluşan alanlar radar enerjisinin çok yüksek hızlarda yayılmasına imkan tanımaktadır. GPR verilerinin toplandığı alanda da aynı türden gömülü materyaller vardı. Fakat doğal nem içeriyorlardı. Dolayısıyla son derece hatalı bir hız değeri yansıma profillerine uygulandı. Bu durum ölçmeye katılan jeofizikçi arkeologların kalifiye seviyesini tartışmalı hale getiriyordu. Ortamın özellikleri koruyamadığı belli iken ölçüm alanında bulunmuyorlardı (Conyers [73]).

Dahası; hız değeri hatasının GPR verilerinin izlenmesinde hayati olduğu herkes tarafından anlaşıldıktan (ya da anlaşılacak zorunda kalındığından) ekstra kazılar yapılmadan veri işlemedeki hata çabucak düzeltildi. Eğer kazı çalışmaları günler veya haftalar sonra yapılmış olsaydı, jeofizikçi araştırmacılar çalışma alanını çoktan terk etmiş ve GPR ölçüm sonuçlarındaki hata hala sorgulanıyor olacaktı. Bu durumlarda hız testi için yeni tranşer kazılar açılır, kuru çözelti ya da katmanların olduğu doğallığını yitirmiş eski kazılar kullanılmaz (Conyers ve Hartmut [77]).

#### Direkt Dalga Metodu:

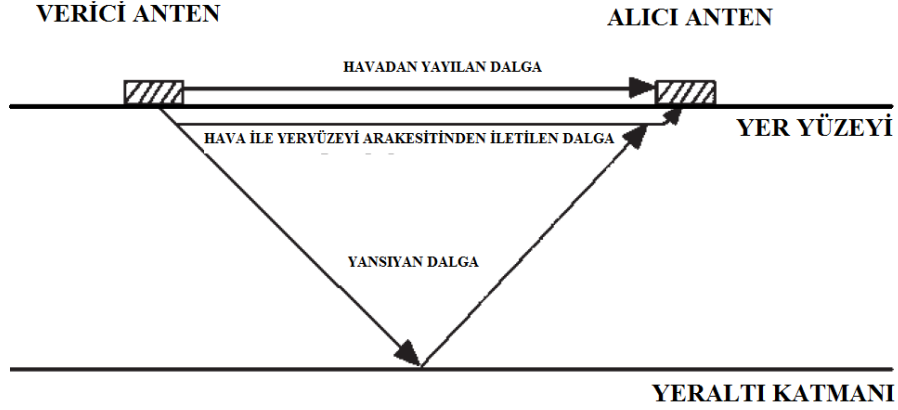
Hernekadar yansıyan dalga metodu kadar doğru sonuçlar vermese de direkt dalga tekniği ortamdaki radar enerjisinin hızını belirlemek için alternatif bir yoldur. Bu test tekniğinde antenin alıcı ve verici merkezleri birbirinden ayrılır ve test edilecek materyal iki anten arasına yerleştirilir. Bir antenden diğerine doğru ve tek yönlü olarak seyreden elektromanyetik dalganın hızı ölçülebilir. Antenler arası mesafe bilindiğinden hız değeri hesaplanabilir. Merkezi Orta Nokta ("Comon Mid Point" - CMP) olarak adlandırılan test türüdür (Fisher vd. [78]; Leckebusch [79]; Malagodi vd. [80]). Buna benzer bir başka test Geniş Açılı Yansıma ve Kırılma (Wide Angle Reflection and Reflection-WARR) olarak adlandırılır (Milligan ve Atkin [81]). Her iki test içinde anteni alıcı ve verici iki parçaya ayrılabilen bir GPR sistemine ihtiyaç vardır. Çoğu GPR sisteminde antenler birbirine bitişik çift anten yapıda kutulardadır. Yalnızca tek frekansta çalışan tek anten kontrol ünitesinden gelen bir kablo ile yönetilirler. Bu sistemlerde hız testi diğerlerindeki gibi olmaz. Bazı üreticiler ise alıcı ve verici anten çiftlerini birlikte üretir ve antenler kolaylıkla ayrılabilir. Fakat bu ayırma işlemi için özel bağlantılar gerekir. Başka bir deyişle ya iki anten arasında bağlantı kabloları ya da multi channel (çok kanallı) GPR sistemleri gereklidir. Eğer direkt dalga metodu için ayrı frekansta olmayan iki farklı anten varsa (mesela 400 mhz ve 500 mhz) her ikisi birlikte kullanılabilir.

#### CMP ve WARR Testleri:

CMP ve WARR testlerinin her ikisinde de radar enerjisi bir antenden diğerine iletilirken antenler, aralarındaki mesafe giderek artırılabilecek şekilde taşınır. Böylelikle aşama aşama elde edilen yansıma izi üretilmiş olur. Radar enerjisi bir antenden diğerine doğru ilerlerken hava ve yakın yüzey ortamdan geçerek alıcı anten tarafından algılanır (Şekil 2.16). İki anten arasındaki mesafe biliniyorsa ve radar enerjisinin taşınıyorken izlediği güzergâh üzerinden alıcıya ulaşan dalgalar, zamanın fonksiyonları olarak ölçülebilir ve seri halde yapılacak ölçümlerle yeraltındaki farklı katmanlar için hız değerleri hesaplanabilir. CMP metodunda antenin her ikisinde de ilk durumda ve yan yana iken ilk yansıma izi kaydedilir. Bu pozisyonda üç veya daha fazla veri toplanır. İlki havadan geçerek alıcıya ulaşan, ikincisi hava ile yeryüzünün kesişim ekseninden geçerek alıcıya ulaşan ve son olarak yeraltındaki arayüzeylerden yansıyarak alıcıya ulaşan radar izleri toplanır. Daha sonra antenler aralarında 10 cm mesafe olacak şekilde birbirinden ayrılır ve Şekil 2.16'da görüldüğü gibi bir başka yansıma izi kaydedilir. Bu veri toplama işlevi antenler arası mesafe 5 ila 10 metreye ulaşana



kadar sürdürülür. Enerji iki anten arasında farklı güzergâhlar üzerinden taşınmış olur. Antenler arasındaki mesafe biliniyor ve yeraltından alıcıya ulaşan veriler tanımlanabiliyorsa hız değeri hesaplanabilir.



Şekil 2.16 CMP Tesi için elektromanyetik dalgaların teorik seyir güzergahları (Fisher vd. [41]).

CMP ve WARR testlerinde en az üç dalga formu kaydedilir. Bunlar sırasıyla; Verici antenden alıcı antene hava yoluyla taşınan (air wave), Hava ile yeryüzeyi arakesitinden yayılarak alıcı antene ulaşan dalga formu (ground wave) ve yeraltı katman veya objelerinden yansıyan dalgalar.

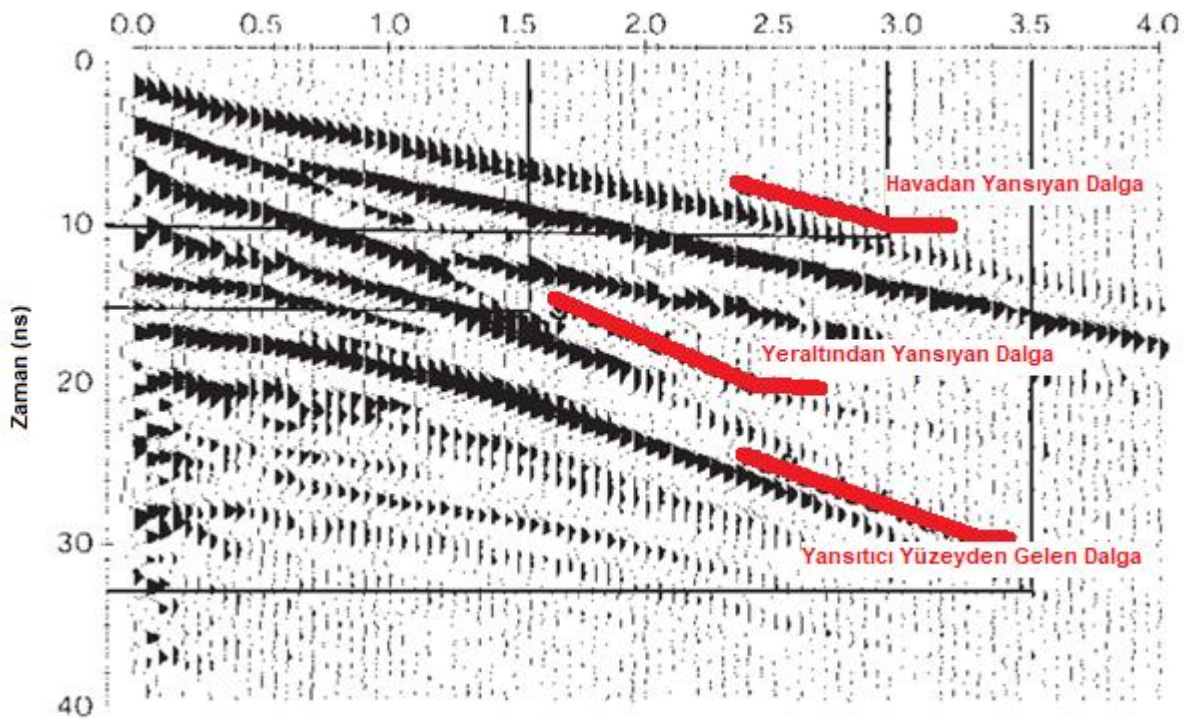


Şekil 2.17 CMP Testi yapılırken antenler alıcı verici antenler birbirinden ayrılır ve antenler arası bilinen mesafe aşama aşama artırılarak her bir anten konumu için yansıma izleri ayrı ayrı kaydedilir (Fisher vd. [41]).

Yansıma izlerinin toplanması WARR metodunda da aynıdır. Yalnızca antenlerden biri taşınırken diğer anten bu metotta sabit tutulur. WARR testi için enerjiyi yansıtacak yer altı katmanlarının yatay ve eğimsiz olması gerekir. Bunun nedeni enerjinin her iki anten arasında izlediği yörüngenin tahmin edilebilir olmasıdır. Bu yüzden CMP testi daha çok tercih edilir. Yeraltındaki aynı yansıtıcı tabakadan yansıma almak amacıyla antenler arası mesafenin orta noktası belirlenen her bir anten konumu için sabit kalır. Ayrıca WARR testinin sonuçlarının doğru olabilmesi için münferit yer altı katmanlarının hız değerlerinin yatayda değişmediği varsayılır. Oysa gerçekte çoğu zaman değişmektedir. CMP ve WARR test verileri antenler arası mesafe ile beraber standart GPR yansıma profili üzerinde görüntülenir. Yatay eksen antenler arası mesafeyi düşey eksen ise radar dalgasının zaman çizelgesini ifade eder (Şekil 2.16). Antenler taşınırken ilk algılanan havadan taşınarak gelen dalga olacaktır. İdeal koşullarda sıfır zamanında kaydedilmiş olması gerekir. Veya sıfır zamanı uyarlama işlemi veri

işleme aşamasında da yapılabilir. İkinci dalga yer seviyesi ile hava arasındaki ara yüzey kesişiminden gelen dalgadır ve havadan direkt olarak gelen dalgadan sonra kaydedilir. Son olarak üçüncü dalga formu yerden veya yeraltındaki yansıtıcı yüzeylerden gelen yansımalarıdır. Sığ derinliklere ait su çizelgesinde kuru topraktan gelen dalgalarla sulu olanları ayırt edilebilir (Fisher vd. [41]).

Yeryüzeyi ile hava ara kesitinden gelen dalga, havadan gelen dalga kesiti ile radargram üzerinde sıfır zamanında kesişir (Şekil 2.18). Diğer radar dalgaları topraktan veya diğer gömülü katmanlardan yansımış olabilir. Bazende yer altı katmanından alıcı antene ulaşmaya dek seri halde sahte yansımalar oluşabilir. Bu tarz tekrarlı yansımalar hava ile yer arakesitinden gelen (ground-air) yansımalarından veya havadan direkt iletilen (air) yansımalarından kolaylıkla ayırt edilebilir. Çünkü sıfır zamanında bu dalga formları ile kesişmezler.



Şekil 2.18 Şekilde bir CMP Testi görülmekte (Fisher vd. [41]).

Seri haldeki bu yansıma verileri profil üzerinde sırasıyla havadan yayılmalı dalga formu (air waves), Hava ile yeryüzü katmanı arakesitinden yayılan (ground wave) dalga formu ve yer içindeki obje ya da katmanlardan yansımalarla üretilmiş dalga formlarının yansıma izleridir.

Dalga formlarının alıcıya ulaşma süreleri zamanın fonksiyonu olarak kaydedilmektedir. Dolayısıyla Zaman ve deınlik değeri birlikte kullanılarak hız değeri hesaplanabilir.

Zaman ölçülmüş ve antenle olan mesafe biliniyorsa; bu bilinen mesafe içerisindeki yer altı yansımaları tanımlanabilir ve hız değeri hesaplanabilir (Şekil 2.18). Hava dalgası diyagramın her bölgesi için tanımlanabilir. Bu örneklemede hava dalgası antenler arası mesafe 3 metre iken 10 ns de alıcı antene ulaşmış. Buradan hız değerinin 0,3 m/ns olduğu sonucu çıkar. Bu değer aslında hava dalgasının hızıdır. Yer dalgası ve antenler arası mesafe 1.6 metre iken 15 nanosaniyede alıcıya ulaşmış. Bunun hızı da 0,1 m/ns dir. Havadan yayılan dalgaya nazaran 3 misli daha yavaştır. Bilinmeyen bir yer altı katmanından gelen yansıma hızı ise antenler arası mesafe 3,5 metre iken 33 nanosaniyede kaydedilmiştir. Bu üçüncü katman için hız değeri ise 0,1 m/ns olarak hesaplanır. Her durumda CMP ve WARR testlerinde toprak yüzeyi ya da yüzeye yakın materyaller için hız ölçümü yapılır. Radar dalgasını yeraltında derinlere indikçe izlediği güzergah tam olarak bilinmeksizin her derinlik için hız değerinin bu şekilde belirlendiği bilinmelidir. Sığ derinliklerde yüzeyden daha derin araştırmalar için direk dalga metodu kullanılmalıdır. Piyasadaki çoğu GPR veri işleme programı bu yöntemle veri işleyen algoritmalar içerirler. Veri işleme aşamasına kadar ortalama hız değeri her bir derinlik için tahmini olarak alınır.

#### Ara Kesit/Yüzey(Transillumination) Testi:

Ara kesit (Transillumination) metodu bir başka direkt dalga hız testi yöntemidir. Birbirine komşu iki kazı arasında araştırmaya konu olan materyalin bulunduğu bölgeye uygulanır. Köken olarak Yapı Denetim sektörü için geliştirilmiş bir yöntemdir. Yapı mühendisliği ve arkeolojik uygulamalarda kullanılmaktadır. ara kesit testini yapabilmek için açılacak iki kazı noktası birbirine olabildiğince yakın ve paralel olmalıdır. Kazı yapılır yapılmaz materyallerin karakteristiğini değiştirmeyecek şekilde doğal su materyal içerisinden buharlaşmadan derhal testlerin yapılması gerekir. Biri radar dalgasını gönderen ve diğeri algılayan iki anten iki kazı alanı arasındaki duvar üzerinde bir noktadan diğere konumları işaretlenir (Şekil 2.19). İki kazı arasındaki mesafenin radarın dalga boyu kadar veya daha fazla olması önemlidir. Seri halde yapılacak ara kesit testi, kazıların dip noktasından başlanarak yukarı doğru devam ettirilir. Her ikianten de yukarı doğru birlikte taşınır. Her aşama için bir veya birden fazla yansıma izi veya iki anten arasında sürekli devam eden radar enerji transferi kaydedilir.

Antenler taşınırken antenler arası bilinen mesafeye ve kazı temelinden başlanarak yukarı yönlü devam eden ölçümlerde başlangıç noktasından itibaren yüksekliğe dikkat edilmelidir. Eğer bu aşamada antenler taşınırken her bir anteni birlikte hareket ettirilebiliyorsa antenler arası mesafe her zaman biliniyor demektir. Ancak eğer kazılar arasında oluşan ve ölçümün üzerinde yapıldığı duvar eğimli ise seri halde mesafe ölçümleri yapılarak antenler arası mesafe her bir ölçüm noktası için belirlenmelidir. Bu materyal bu yöntemle katman katman test edilirken dipol antenlerin ürettiği elektrik alana ve dolayısıyla düşey aksa paralel şekilde yöneltilmiş olmalarına dikkat edilmelidir. Bunu başarabilmek için antenlerin üzerinde hareket ettirildiği uzun aksa paralel şekilde yan yana iletilmeleri gerekir. Bu yöntemle elektromanyetik alanda büyük orandaki elektriksel partiküller düşey aksa paralel hareket ederek ve titreşerek her bir yer altı katmanı için radar bandında maksimum izolasyon sağlanmış olacaktır. Radar enerjisinin koni şeklinde antenden yayılarak ilerleyişi enerjinin yeraltındaki seyir güzegahının tahmin edilmesini zorlaştırır. Bu sebeple alıcı verici antenlerin yönelimleri ve doğrultuları maksimum doğrulukta veri transferi için aynı olmalıdır. Ara kesit testi uygulanan volkanik kül alanda ara mesafesi çok ince olan iki kazı açılarak oluşturulan bir ara kesit kullanıldı (Conyers [73]). Kazı arayüzeyinde sekiz farklı kül katmanı tespit edildi. 300 mhz 800 mhz 1600 mhz antenler alıcı, 500 mhz anten verici olarak yerleştirildi. Herbir aşama için zaman bilgisi analiz edilerek görüldü ki hız değeri kazının dip noktasında 6 cm/ns iken RDP değeri 11 olarak ölçüldü. Yukarıya çıkıldıkça hız değeri 28 cm/ns ve RDP değeri ise 1.1 olarak ölçüldü (Şekil 2.20). İki uç noktada yapılan ölçümler radar dalgasının örnekleme kesiti içerisindeki seyrinin ölçümleri değildir. Kazının tepe noktasında anten çiftleri arasındaki enerji transferi, ürettiği 1.1 RDP değerine bakılırsa ve radar enerjisinin hava ortamındaki seyir değerine oldukça yakındır. Yani gerçeği yansıtmamaktadır.



Şekil 2.19 Ara Kesit (Transillumination) testi. Bu test yapılırken antenler düşey kesit üzerinde karşılıklı ve paralel şekilde taşınır. Alıcı ve verici antenler arasında test edilmek istenilen materyalden oluşan arayüzey kesit bulunur (Conyers [73]).

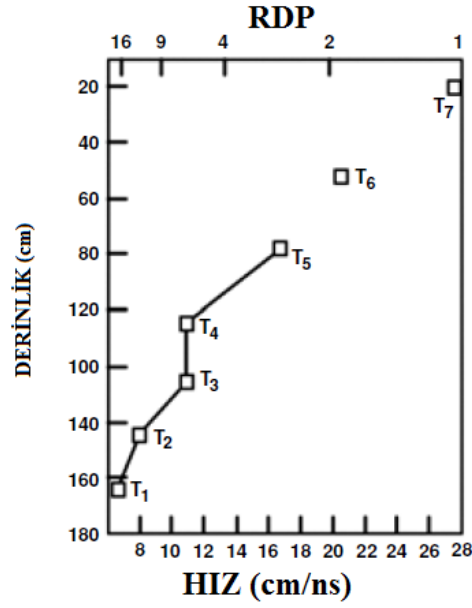
İki kazı arasındaki arayüzey üzerinden sızan bu radar dalgasının tanımlanması Ara kesit testi için kazı derinliğinin ne kadar önemli olduğunu göstermektedir. Eğer bu testler yüzeye çok yakın noktalarda yapılacak olursa radar dalgası test edilen materyal üzerinden veya etrafından sızarak sonucu olumsuz etkileyecek ve ilk dalga muhtemelen havadan iletilerek gelen radar dalgası olacaktır. Her pozisyon için antenler arası mesafenin doğru ölçülmüş olması hayati derecede önemlidir. Bu sayede havadan iletilen dalga için hız değeri hesaplanarak tanımlanabilir ve diğer yansımalarından ayırt edilebilir. Antenlerin yatay mesafelerinin, dağılımlarının, konumlandırılmalarının ve radar enerjisini tek yönlü seyrinin bilinmesi ile hız ve RDP değerleri (Denklem 2.1) kullanılarak bulunabilir. Şekil 2.19’de görülen 7 aşamalı hız ölçümleri farklı anten derinlikleri için yapılarak düşeyde bir hız değerleri gridi, derinlikle değişen hız dağılım modeli belirlenmiş olur. Ara kesit (Arakesit) testi ile belirlenen hız değeri derinlikle değişen hız değerini tanımlayabildiğinden dolayı oldukça önemlidir. Bu olarak direkt dalga metodunda bulunmamaktadır. Şekil 2.20’de görülen grafikte derinlik arttıkça RDP değerinin arttığı görülmektedir. Muhtemelen buna neden olan derinlik artışıyla birlikte artmakta olan su yüzdesidir. Volkanik kül testinde suya maruz kalan yüzeylerde su yüzdesine bağlı olarak az miktarda renk değişikliklerinin olduğu görülmüştür. 100 cm li hız

dağılım modelindeki bu küçük çaplı hız değişimi tabakalar arasındaki çok farklı kompozisyonları ve su yüzdelerindeki farklılıkları ifade etmektedir. Eğer hız değişimleri ile materyal içerisindeki su yüzdesi veya diğer kompozisyonlar arasında bir korelasyon varsa; yansıma profillerinin yorumlanma aşaması için önemli bir bilgidir. Aynı zamanda GPR çalışmasının yapıldığı her alanda yansıma merkezlerinin anlaşılması ve dolayısıyla GPR verilerinin anlaşılması açısından oldukça önemlidir. Çünkü tüm yansımalar hız değişimlerinin gerçekleştiği gömülü katmanlarda gerçekleşir. Ara Kesit testi; stratigrafik yapıyı tanımlama ve bu farklılıkları anlama konusunda en iyi metottur.

Ara Kesit test verileri dikkatle kullanılmalıdır. Çünkü radar dalgasının materyal içerisinde izlediği güzergah CMP veya WARR gibi bilinen hiçbir testle kesin olarak belirlenemez. Tüm buna benzer direkt dalga testlerinde radar enerjisi en yüksek hızda hareket edebildiği materyal üzerinden ilerleme eğilimindedir. Dolayısıyla yansımalarından antene ulaşan ilk veri de en yüksek hızlı materyallerden gelen yansımalar olacaktır. Materyalin bulunduğu derinlikten antenin konumlandırıldığı noktaya direkt olarak gelmiyor olabilir. Dolayısıyla düşük hız değerinde tabakalardan gelen yansımalar düşük hızlı tabakaların üzerini örter ve sonuç verilerindeki yansıma izlerinde bu tabaka verileri tanımlanamaz hale gelir. (Ara Kesit , CMP ve WARR testlerinin tamamı direkt dalga testleridir ve derinliği bilinen objeler üzerinden yapılırlar. Bu testlerin tümünün kombinlenerek kullanıldığı hız testleriyle derinliğe bağlı hız gridi modeli oluşturulabilir.

**RDP Değerlerinin Laboratuvarda Ölçülmesi:**

Arkeolojik alanda RDP değeri elektrik iletkenlik ve manyetik geçirgenliği belirlemek için yüzeyaltı ünitelerden alınan örnekler daha sonra yapılacak laboratuvar aşaması için toplanır. Bu ölçümlerde hız ve radar enerjisinin materyallerdeki zayıflama oranları tahmin edilebilir.



Şekil 2.20 Ara Kesit (Transillumination) Test sonuçları. Hız değerleri derinliğin bir fonksiyonu olarak belirlenebilir. Bu teste derinlikle birlikte hız değerinin azaldığı görülmektedir. (Saarenketo [104]).

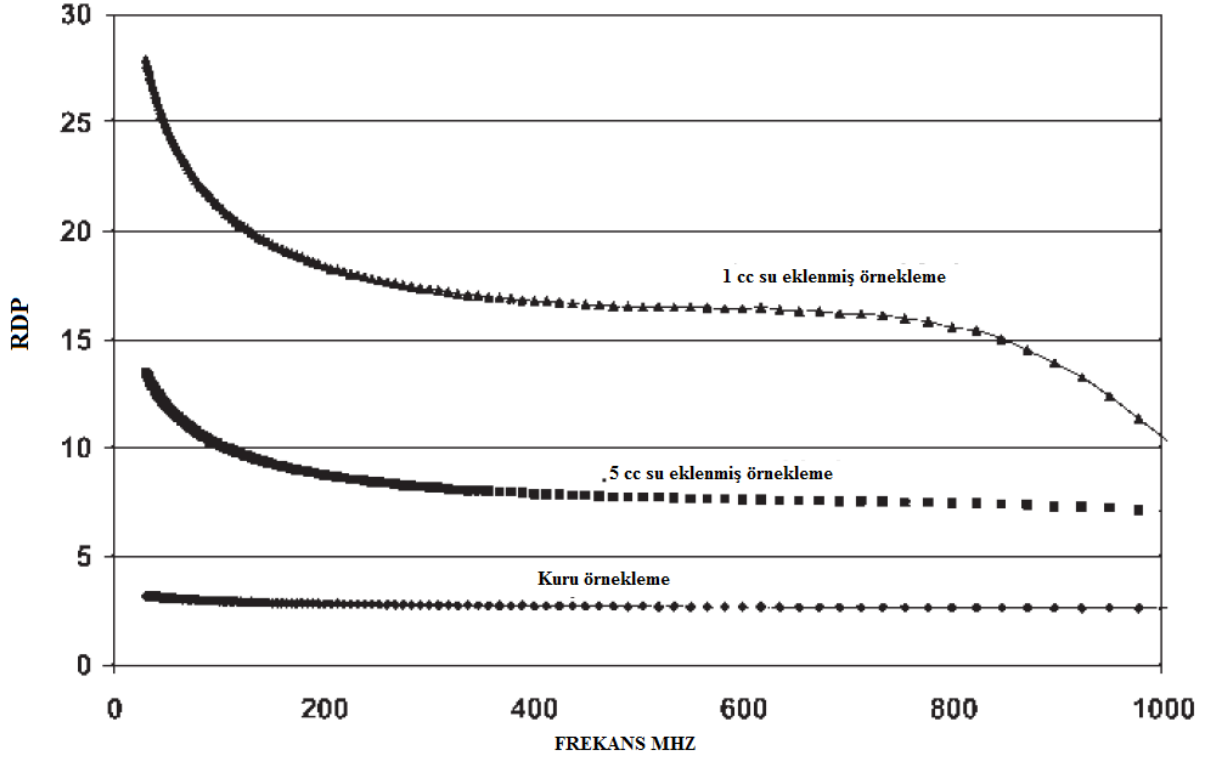
Eğer toprak ve çökelti örnekleri toplandıktan hemen sonra su sızdırmaz kaplarda depolanırsa örneklerin ortamdaki kondisyonlarına yakın olarak muhafaza edildikleri düşünülebilir. Ancak; örneklemeler plastik kutularda veya şişelerde saklanacak ve taşınacak olursa birdaha asla ortamdaki gözenek yapısı, su yüzdesi gibi doğal kondisyonlarında olmazlar. Maalesef bu tarz laboratuvar ölçümlerini yapabilen birkaç alet vardır ve bunların hiçbiri arkeologların temin edebileceği türden aletler değildir. Örneğin manyetik ve elektriksel özelliklerin belirlendiği bir yöntemin tanımlandığı laboratuvar çalışması gerçekleştirilmiştir (Saarenketo [104]). Bu testlerde örneklemeler önce kurutulup sonra ezilmiş ve sonra Network Analizörü olarak adlandırılan özel bir aletle farklı frekanslarda elektromanyetik etkiye maruz bırakılmıştır. RDP iletkenlik ve manyetik geçirgenlik ölçümleri ancak örneklemeler tamamen kurutulup sudan arındırıldıktan sonra yapılabilir. Bu testlerde su yüzdesindeki değişiklikler ortamdakine benzer şekilde simüle edilir. Örneklemedeki nem miktarı ortama su eklenerek giderek artırılır ve suyun materyale yeterince nüfuz etmesi için beklenir. Bu tarz laboratuvar testlerinden elde edilen verilerin kullanımında bazı sakıncalar vardır. Çünkü materyalin gözenek yapısında ve tanecik yapısında test süresince değişiklikler olur (Olhoeft [52]).



Ancak laboratuvar ortamında kurutulmuş olan örneklemeye yeniden su ilave edildiğinde doğal ortamındaki kondisyonlar üretilebilir. Örneklemenin elektromanyetik özelliklerini ölçen aygıtlar örnekleme için doğal ortamda olabileceğinden daha fazla elektromanyetik enerjiye maruz bırakılır ve böylelikle enerjinin derinlikle değişen şekilde elektromanyetik dalga dağılımının ve sönümlenmesinin nasıl gerçekleştiği görülmüş olur. Illinois’de killi toprak örnekleme için bu tarz bir laboratuvar testi gerçekleştirilmiştir. Sonradan gözenekli kil için belirlenmiş ve kilin mineralojik kil olmadığı fakat rüzgarla parçalanmış kil türünde kaya parçaları olduğu görülmüştür. Örnekleme ilk önce fırında bir gece kurutularak su içeriğinden arındırılmıştır. RDP değeri 10 mhz den 1200 mhz ye kadar değişen frekanslarda birçok defa ölçülmüştür (Şekil 2.21). Tüm bu farklı frekanslardaki analizler bu tarz frekans bağımlı ölçümlerin yüksek ve düşük frekanslardaki varyasyonlarına rağmen RDP değerinin tüm GPR antenleri için neredeyse sabit bir değerde olduğunu göstermiştir. Yüksek frekanslarda elektromanyetik enerji; materyallerin atomik yapısında ki elektron yörünge değişimleri sebebiyle sönümlenmektedir. Düşük frekanslarda ise materyallerdeki iyonların elektromanyetik alana maruz kaldığında yeterince hızlı tepki vermediği, iyonik iletkenliğin çok yüksek düzeyde olduğu ve yüksek RDP değerleri ölçülmüştür. Frekans değişimlerini bir tarafa bırakırsak Şekil 2.21’de gösterilen testin göz alıcı yanı; örnekleme su ilave edildiğinde gözlenen değişimdir. 0,5 santimetreküp su ilave edilen çözelti örneğinde RDP değeri 3 ten 8 e çıkmıştır. 0,5 santimetreküp daha ilave edildiğinde ise RDP değeri artarak 17 olmuştur. Bu test küçük miktardaki su içeriğinin bile radar hızını ve dolayısıyla RDP değerini nasıl etkilediğini ortaya koymaktadır. Aynı olgu Şekil 5.6’da Ara Kesit testinde de görülmektedir. Burada da volkanik kül olarak tanımlanan ve çok değişken olan RDP değerlerine artan derinliklerde rastlanmaktadır. Buna sebep olan derinlikle birlikte değişen su yüzdesidir. Bir başka enteresan laboratuvar ölçümü (Stenberg ve McGill [71]) tarafından Arizona’da gerçekleştirilmiştir. Çalıştıkları alanda örnekleme için alınıyor yüzeyaltı çökeltileri parçacık yapılarına, mineral bileşenlerine ve su yüzdelere göre analiz edildi. Laboratuvar ölçümlerindeki RDP değerlerine ve elektrik iletkenliğine değil; içerdikleri kum miktarlarına ve kil ve su yüzdelere göre RDP çizelgeleri yayınladılar ve diğer materyaller için de ölçümler yaptılar. Basit ama etkili bir yöntemdi. Çalıştıkları alana özel RDP ve hız değerleri ile radar zaman çizelgesini oldukça iyi sonuçlarla derinlik değerlerine dönüştürebildiler (Olhoeft [52]).

### Noktasal Yansıma Hiperbollerinin Analizi:

GPR profil kesitlerinde boru, duvar, kaya veya münferit küçük çaplı maddeler gibi nokta yansıma kaynakları hiperbolik yansıma izleri üretirler (Şekil 2.21). Üretilen hiperbolün geometrisi paralel kollarının ne açıklıkta olduğu materyalden geçen radar enerjisinin ortalama hız değerinin bir fonksiyonudur.



Şekil 2.21 RDP değerinin belirlendiği laboratuvar testi. Kuru kil örnekleme için RDP değeri 3 iken çok küçük oranda su eklendikten sonra bu değer aniden artmaktadır. Bu grafik su yüzdesindeki çok küçük oranlı değişimlerin radar enerjisinin yeraltındaki yayılımında ne kadar etkili olduğunu göstermektedir (Leckebusch [24]).

Ölçülen profildeki yansıma izlerinin tamamı ölçüm tekerleği ile kaydedildiğinden yatay mesafe tek boyutlu olarak bilinmektedir ve hız değerleri antenin yüzeyindeki farklı lokasyonlarından yapılan ölçümlerle yeraltındaki noktasal kaynaktan yansıyan radar izlerinin oluşturduğu yer altı objesinin hiperbollerden bilgisayar tarafından üretilen benzer hiperbolün üretilmesi ile hesaplanır. Böylelikle hız ve mesafe ölçülebilir ve ortalama hız değeri yeryüzeyinden noktasal kaynağa kadar olan mesafe boyunca uygun bilgisayar programlarıyla ve trigonometrik fonksiyonlarla hesaplanabilir. Bu tarz veri işlemede en basit program Fieldview olarak bilinir (Leckebusch [24]). Fakat çok sayıda diğer ticari paket programlarda

mevcuttur. Bir GPR ölçümünde yansıma profilleri üzerinde üretilmiş çok sayıda hiperbol kullanılarak hız değeri derinliğe dönüştürülebilir ve profil boyunca oluşacak farklı derinliklere ait hız değerleri grid modeli diğer hız testlerine gerek kalmadan üretilebilir. Bu yöntemle hiperboller birçok yansıma profili üzerinden farklı derinlikler için test edilebilir ve hız değerlerindeki farklılıklar grid boyunca belirlenebilir. Yaklaşık ortalama hız değerini belirleyerek veri setlerindeki zaman çizelgesini derinliğe çevirmek için kullanılır.

## **2.9 Veri İşleme Aşamaları**

GPR yansıma profillerinin analizi genellikle veri edinimi esnasında veya veri ediniminden sonra alana ait radargramlar üzerinde gürültü, yankı, girişim, karmaşa, modül ve karlanma gibi etkilerle gizlenmiş verilerin yorumlanması esasına dayanır. Her yansıma profili ayrıntı nitelikli yansımalar içerebilir. Bunlar hava dalgaları, çoklu yansıma, nokta hedeften kaynaklanan yansıma hiperbollerini olabilir ve verinin yorumlanmasını zorlaştırır. İşlenmemiş yansıma profilleri genellikle aynı derinlik doğruluğu ve aynı yatay ölçekte olacak verilerle toplanmamış olabilir. Bunların yansıma kayıtlarının alındığı alan değerlerine konumlandırılmaları/yerleştirilmeleri gerekir. Çok sayıda ticari, şahsi ve ücretsiz erişilebilen GPR veri işleme programı bu tarz veri işlemleri için erişilebilir durumdadır. Çoğu GPR işleme tekniğini içeren bu programlar ve modifiye edilmiş versiyonları ile petrol endüstrisinde sismik yansıma verilerinin analizinde veya diğer uzaktan algılama uygulamalarında kompleks, karmaşık görüntü işlemleri için kullanılmaktadırlar. Her halükarda dijital veriler ya da analog verilerin sayısallaştırılması ile elde edilen dijital verilerle işlenirler (Malagodi vd. [80]; Milligan ve Atkin [81], Sherrif ve Geldert [82]; Ulriksen [83]; Yılmaz [84]).

Çizelge 2.3 Veri işlemede kullanılan metodlar ve kullanıldığı konu başlıkları.

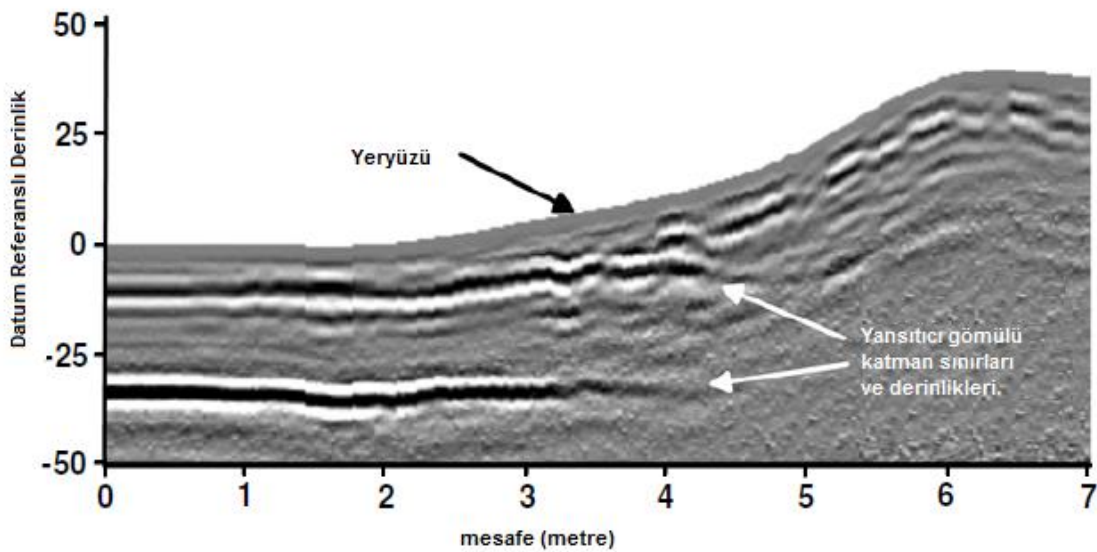
İşlem Konusu	Kullanılan Metod
Yatay ve Düşey ölçek düzeltmesi	Standart “rubber sheeting”; “distance düzeltmeleri.
Frekans girişimi, Sistem Gürültüsü ve Yatay Bantlaşma'nın giderilmesinde	Background removal; Yüksek Geçirgen Filtreleme
Yüksek Frekans Gürültüsü (“snow”) Çoklu Yansımanın Giderilmesi	Alçak geçirgen filtreler; F-k filtesi “Deconvolution”
Nokta hedeften kaynaklanan hiperbollerin temizlenmesi ve gömülü katmanların doğru şekilde oryantasyonunun sağlanması	Migration

Veri manipülasyon tekniklerinin içeriği anlaşılmadan veri işleme programları kullanılmamalıdır. Çünkü çok sayıda spesifik obje için çok sayıda farklı teknik bulunmaktadır. Bunlar bazen arkeolojik veya jeolojik hedefler için kullanılıyor olabilir. Veriyi sonuçta daha iyi görünsün diye bilinçsizce işlemek çok tehlikelidir. Kayıtların yapıldığı alanın orjinal verileri saklanmalı ve veri işlem adımlarının doğru bilinmesi gerekmektedir. GPR verilerinin işlenmesinde kullanılan teknikler ve amaçları gösterilmektedir (Çizelge 2.3). Diğer sonradan yapılan veri işlemleri gibi, işleme prosedürü aşamalar halinde sırasıyla izlenmelidir (Pedley ve Hill [85]; Woodmard vd. [86]). Çizelge 2.3 de bu aşamalar sıralanmıştır. Background Removal, yansıma profillerinden yatay yansımaları yokedebilir, fakat bunu yaparken de bazı orjinal yansımaların kayıtlı verilerinin genlik değerini düşürdüğü bilinmelidir. Bu sebeple veriyi görünür kılmak adına genlik artırımı (gain) işlemi yapılmalıdır. Veya Background Removal "snow" kar efekti olarak bilinen etkiyi yansımalarından elemine edebilir. Oysa bu etkinin frekans filtreleriyle giderilmesi gerekmektedir. Bu aşama tamamlandığında 3. adım ya da prosedür (range gaining) genlik artırımı ile görüntüde seçilemeyen yansımaların görünür hale getirilmesidir. Bu aşamaların her biri hemen her farklı uygulamada yapılması gerekli olan işlem adımlarıdır.

### 2.9.1 Ölçek Düzeltmesi ve Yansıma Profillerinin Oluşturulması:

En basit veri işleme prosedürüdür. Aynı yansıma izindeki kayda değer yansımaları alarak onları olması gereken doğru konumlarına kaydırarak yüzeyaltının iki boyutlu ve doğru profilleri halinde görüntülemeye yarar. "Wiggle Trace" formatında da görüntülenebilirler. Bu formatta kayda değer yansıma ve genlik verileri gri renk skalası halinde ölçeklenip enterpole edilmiş formda görüntülenebilir. Bu formda gömülü arkeolojik yapının özelliklerine veya stratigrafik yapının belirleyici görüntüsüne göre her aşamada yansıma verileri yatayda ve düşeyde abartılarak çizilir. Bu vurgulama profil üzerinde bilgisayarın faresiyle yapılır ve bilgisayar ekranında görüntülenen profil ölçeği arzu edilen boyutlara genişletilmiş olur. Tüm bu işlemler tek bir profile uygulanabildiği gibi tüm yansıma profilleri üzerinde otomatik olarak da uygulanabilmektedir.

Yansımaların değişken genlik değerleri atanan renk skalası dahilinde olması için standart yansıma profilleri modifiye edilebilir. Bu aşamada yeraltında araştırmaya konu olan katmanlara ait önemli yansımalar görünür hale getirilmiş olur. Renk paleti seçilirken dikkat edilmelidir. Çünkü bazen çok renkli yansıma profilleri verilerin yorumlanmasını zorlaştırmaktadır (Leckebusch [24], Milligan ve Atkin [81]). Genellikle gri skala renk paleti insan beyni için kompleks renk paletleri kullanılan versiyonlara göre daha kolay anlaşılıp yorumlanabilmektedir.

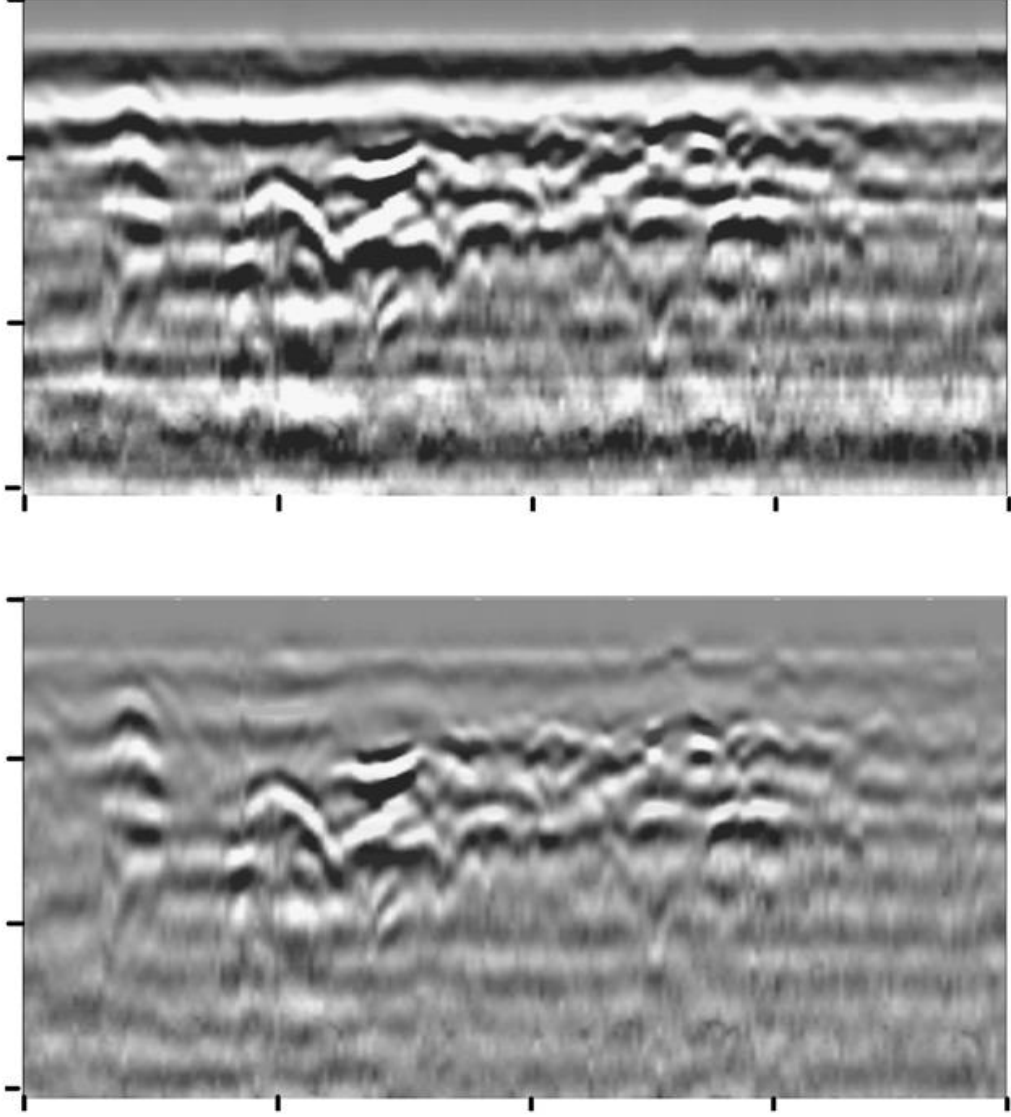


Şekil 2.22 Topografik düzeltme yapılmış bir yansıma profili (Lehman ve Green [87]).

Eğer veriler kesintisiz modda toplanmış ise antenin taşınma hızındaki değişimlere bağlı olarak aynı nitelikte olmayan yansıma izleri oluşacaktır. Verilerin topografyanın düzensiz eğime sahip olduğu alanlarda toplanması halinde yüzeydeki yükseklik değişkenlikleri yeraltındaki katmanlarının doğru konumlandırılabilmesi için mutlaka düzenlenmelidir (Şekil 2.22). Eğer bu yapılmazsa oryantasyondan kaynaklanan sebeplerle yeraltı katmanlarının gerçek konumları asla bilinemez ve yorumlanması son derece güç sonuçlar doğurur. Yeryüzü yükseklik düzeltmesi yansıma profillerinin "static correction" olarak bilinen veri düzeltme veri işlem aşamasıdır. Paket yazılımlarda bu düzeltmeyle ilgili komut mevcuttur. Topografik ayarlama, statik düzeltme hız versiyonlarındaki sapmaları ve antenler arasındaki bağlantı veya konumlama hatalarını da giderir (Lehman ve Green [87]).

### **2.9.2 Yatay Bantlaşmanın Giderilmesi**

Tüm GPR yansıma profillerinde yatay bantlaşmanın giderilmesi için kullanılan filtreleme türüdür (Şekil 2.23). Bazı anten türlerindeki "ringing" adı verilen çınlama etkisinden dolayı tüm profillerde yatay bantlaşma etkisi oluşur (Leckebusch [24]; Shih ve Doolittle [88]). Bu tarz bantlaşmanın GPR ünitesinin kendi içinden ya da yakınlardaki radyo veya elektromanyetik frekans girişimlerinden kaynaklanan sebeplerle "sistem gürültüsü" olarak adlandırılan bu etki oluşur. Profillerdeki yatay bantlaşma veri toplanırken antenle aynı mesafedeki objelerden üretilen yansılardan da kaynaklanabilir. Anteni taşıyan kişi ya da yedekleme aygıtı gibi faktörler sıralanabilir. Bu etki oluştuğunda önemli yeraltı yansımalarının üzerini örter ve profilde görünmez hale getirir.



Şekil 2.23 “Background Removal” Yatay bantlaşmanın giderilmesi işlemine dair uygulama öncesi ve sonrasını gösterir Radargram örnekleri (Leckebusch [24]).

Bütün veri işleme programları yansıma profili boyunca var olan eşzamanlı bantlaşmayı genlik değerini basit aritmetik işlemlerle toplayarak bantlaşma etkisini giderebilme kabiliyetindedir. Sonuçta elde edilen dijital dalga formu ortalama gürültü düzeyinde olduğu varsayılan yatay bantlaşmadan arındırılmış veri şeritlerine dönüşür. Bu sonradan yapılan filtreleme işlemi ile profillerde yalnızca yatay olmayan yansımalar görünür halde kalır. Bazı işleme programları profilde yer alan her yansıma izi üzerindeki bantlaşmayı giderecek şekilde tasarlanmıştır (Leckebusch [24]). Yatay bantlaşma gürültüsü frekans filtreleri ile giderilebilir. Bunlar alçak geçiren ve yüksek geçiren frekans filtreleridir. Yatay bantlaşma gürültüsü alçak frekans

girişiminden kaynaklanıyor olabilir. Bunlar yansıma izlerinde uzun dalgaboyu varyasyonları üretir. Veri toplanırken doğru yüksek geçirgen filtreler kullanılarak giderilebildiği gibi sonradan yapılacak veri işlemlerde yapılacak frekans filtrelemeleriyle de giderilebilirler (Malagodi vd. [93]). Eğer bu işlem adımları hala yansıma verilerindeki bantlaşmayı temizleyemediyse veya uyumsuz yeraltı katmanlarından kaynaklanan sebeplerle hala varsa ek işlemler gerekebilir. Fakat bu işlemler arkeologlar tarafından pek kullanılan teknikler olmamakla beraber verinin anlaşılabilirliğini artırır (Conyers ve Comeron 1998 [73]).

### **2.9.3 Yüksek Frekans Gürültüsünün Giderilmesi**

Bu işlem veri kalitesini yükseltmek için bir dizi karmaşık işlem parametresi kullanır. Eğer cep telefonu, çağrı cihazı, radyo vericisi veya buna benzer bir dış kaynaklı aygıtlarca yüksek frekans girişimi oluşmuş ve karlanma ya da bantlaşma etkilerine maruz kalmışsa veriler yorumlanamaz hale gelir. Bu gerçekleştiğinde Background Removal genellikle ilk yapılan işlem adımdır. Oldukça zayıf, silik yansıma profillerinin üretilmesine neden olur. Veri işleme programlarındaki çok sayıda filtre frekans girişimi etkisini gidermek için kullanılabilir durumda mevcuttur. Bunların başlıcaları (Infinite Impulse Response) IIR, veya (Finite Impulse Response) FIR, filtreleridir. Ortalama değer ya da ortalama değer belirleme türevli enterpolasyon algoritmaları kullanan bu filtrelerin her ikisinde yansıma izlerinden sözkonusu mutlak frekans girişimini giderebilirler. Her halükarda yüksek frekans etkisini gidermek için kullanılan sofistike metodlardan hangisi kullanılırsa kullanılsın gürültü oluşumunu artıracaktır. Bu konuda çok sayıda gelişmiş filtreleme tekniği bulunmaktadır. Esasında sismik detayı işlemek amacıyla geliştirilen ve petrol arama endüstrisinde kullanılan teknikler GPR verilerinin işlenmesinde de kullanılmaktadır (Lehman vd. [89]; Maijala [90]; Milligan ve Atkin [81]; Yu vd. [91]). Bu yöntemler kullanılırken dikkat edilmelidir. Çünkü sismik yöntemle radar arasında önemli farklılıklar bulunmaktadır. Geniş açıklıklı radar antenleri yeraltı katmanlarından gelen yansımaları kaydeden her türlü otomatik uygulamayı sismik tekniklerle yapar fakat bazen kullandıkları dalga formunun özellikleri ve farklılıkları kadar apayrı ve zorlu olabilmektedir.

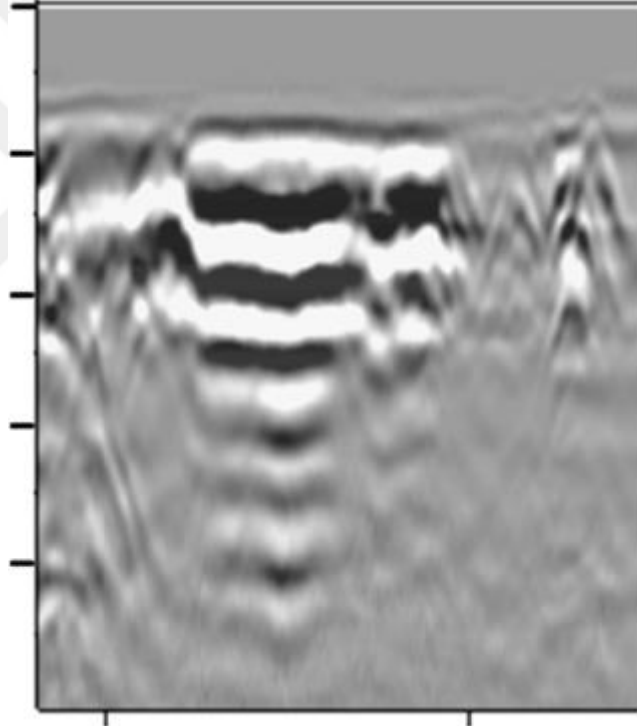
Bir başka farklılığı ise radar enerjilerinin yer içinde yayılırken sönümlenmeleridir. Oysa sismik dalgalar derinlere inildikçe hızlarını artırır (Leckebusch [24]). F-k filtrelemesi de sismik veri



işlemeden alıntılanan bir tekniktir. Yansımaların kayıt zamanını frekans verilerine dönüştüren istatistiksel algoritmalar kullanılır (Maijala [90]). Bu işlem prosedürünün amacı geniş açılı yansılardır. Fakat nokta hedef kaynaklı yansıma hiperbollerinden yatay bantlaşma etkisini gidermek içinde kullanılabilir olsada bu sismik teknikler GPR verileri için pekte arzu edilmezler ve dikkatle kullanılmalıdır.

#### 2.9.4 Çoklu Yansımanın Giderilmesi

Çoklu yansıma radar enerjisinin yeryüzeyinden veya bir gömülü objeden yoğun şekilde ve kısa aralıklarla yansıması durumudur. Objeden ya da ara katmandan gelen yansımaların tamamı yüzeydeki antence kaydedilir. Bunlar yatayda birbirini tekrar eden yansımalar olarak görünürler (Şekil2.24).



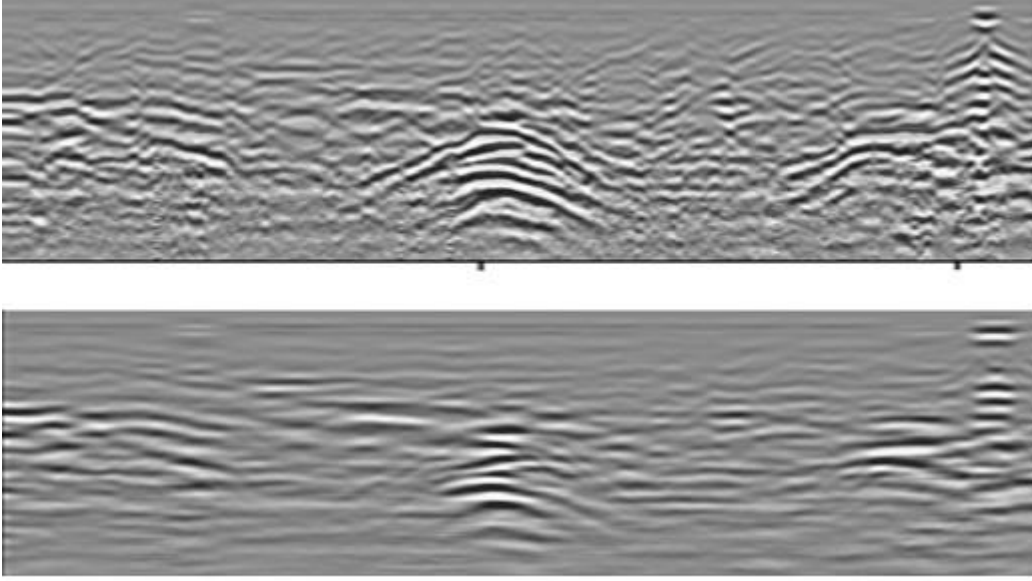
Şekil 2.24 Çoklu Yansıma (Neves vd. [94]).

Bu tür istenmeyen yansımalar eşzamanlı olarak kaydedildiklerinden gerçek yansıma verisini gizlerler. Bu nedenle giderilmeleri gerekir. Bu işlem adımına "deconvolution " denilir. Metodun çalışma prensibi gönderilen radar darbesinin yüzeydeki antenden itibaren yer içinde nasıl hareket ettiğini tahmin etmektir. Bu veri işleme tekniği sismik çalışmalarda kullanılan yöntemin GPR için biraz daha modifiye edilmiş halidir (Fisher vd. [78]; Lafleche vd. [92]; Maijala [90]; Malagadi vd. [80]). Deconvolution işleminde esas alınan teori yer içine

gönderilen radar darbesinin elektromanyetik dalga fazı formundaki değişimleri izleme üzerine kuruludur. İşlev yansıyan dalgayı restore ederek bir profil üzerinde orjinal formunda gösterimini sağlar. Eğer dalgaformunun hareketi doğru tahmin edilebilirse bu teknik çoklu yansıma giderici olarak da kullanılabilir.

### **2.9.5 Migration - Göçme Etkisi**

Standart GPR sistemleri yeraltı stratigrafisinin ve özelliklerinin çarpık, deforme olmuş bir tasviri gibidir. Bu çarpık tasvir geniş bantla yayılan radar yayılımının hızı ve derinlere inildikçe refraksiyonla saçılması sebebiyle farklı ışın yolları izlemesinden kaynaklanır. Migration bu tarz deformasyonların neden olduğu ve tüm yansımalara ait veri toplama prosedürlerinde aynı deformasyona neden olan etkileri yok etmek için kullanılır. Bir çeşit 2 boyutlu görüntü işlemedir (Malagodi vd. [93]; Bears vd. [95]; Fisher vd. [96]; Young ve Jinsheng [97]; Grasmueck [98]). Migration işlemi ile düzeltilebilen deformasyonlar radar anteninin geniş bant aralığı sebebiyle nokta hedeflerden üretilen hiperbol şeklindeki yansımalar (Şekil 2.14). Yansıma profili verisi işlenmeden önce iki boyutlu haritalar ya da üç boyutlu görüntülemeler oluşturabilmek için bu hiperboller giderilmelidir. Yüksek eğimli yüzeyler sinyalin yayılım ve hedeften yansıyarak geri dönüşü esnasında radar enerjilerinin yönünü saptıracaktır (Jol ve Bristow [48]). Sinyalin seyir süresinin uzun olduğu durumlarda bu sapmaların sonucu olarak yeraltındaki yansıma noktasının derinliği ve konumu yanlış konumlanacaktır. Yeraltındaki objenin boyutu ve geometrisinde bu sapmadan kaynaklanan sebeplerle deforme olacaktır. "Migration" işlevi bu tarz sapmalardan kaynaklanan mekansal düzenlemeler için kullanılabilir veya hiperbolik yansımalar kullanılarak olması gereken konumlarına geri döndürülebilirler (Şekil 2.25).



Şekil 2.25 Migration uygulaması yapılmış bir yansıma profili örneği. Petra, Jordan civarında gömülü bir duvar kalıntısına ait yansıma hiperbolü görülmektedir. İşlem tamamlandığında hiperbol merkezleri kendi orjinlerine kaydırılmış ve radargram hiperbol uzantılarından temizlenmiştir (Conyers [73]).

En basit “migration” metodu (hiperbolleri yok etmek için) hiperbol uzantıları boyunca tüm yansımaları toplayarak ortalamasını almak ve hiperbolün tepe noktasını yeniden konumlandırmak olacaktır. Bu işlem genellikle profildeki tüm hiperboller için manuel olarak yapılır. Öncelikle her birinin ayrı ayrı tanımlanmaları gerekmektedir. Buda uzun ve yorucu bir çalışmayı gerektirir.

Daha sofistike bir yöntem olan Kirchoff metodu yüzeyaltı yansımalarda her bir mesafeye karşılık gelen açığı hesaplayarak yapılır. Verideki hız profillerini ve hız değerlerini kullanarak yansımaların konumlarını düzeltir. Aynı veri işleme prosedürü dik eğimli arazilerde de kullanılarak geometrik düzeltme yapılabilir. “Migration” işlevi için kullanılmakta olan 3 algoritma vardır. Bunlar; Stolt, Phase Shift ve Finite-Difference algoritmalarıdır. “Migration” işlevi GPR verilerini işlemede kullanılan paket programlarda artık standart bir teknik olarak yer almaya başlamıştır. Fakat bu yöntem oldukça fazla zaman kaybına ve çoğu yansıma verisinde de bozulmalara sebep olmaktadır. Dahası; özel veri analizlerini gerektirmektedir. Ancak bozuk yansımaların merkez noktası kesin olarak belirlendikten sonra; yeraltındaki materyallerde hız değerinin belirlenip, elektromanyetik dalganın yeraltındaki seyir güzergahı

geometrisinin bilinmesiyle yorumlanabilir. Tüm 2 boyutlu yansıma profillerinde uygulanan “migration” standartlarına ek olarak 3 boyutlu migration işlevinin gerçekleştirilmesi de mümkündür (Grasmueck [98]; Leckebusch ve Peikert [99]). Genel kanı; radar yansıma profillerini incelerken “migration” işlevi uygulanmamış veriler üzerinde çalışmanın daha doğru olduğu yönündedir. Çünkü nokta hedeften kaynaklanan yansıma hiperbollerini çoğu zaman yer altı anomalilerini ve arkeolojik bulguların özelliklerine dair bilgileri içermektedir. Eğer tüm hiperboller tepe noktasına indirgenecek olursa, yani migration işlemi uygulanırsa nokta hedefleri algılamak zorlaşacak ve gömülü objelerin profil üzerinde görünmemesine sebep olacaktır. Bunun aksi ancak önemsenen yansıma verilerinin yani nokta hedeften kaynaklanan yansımalarla oluşan hiperbollerin bir aks boyunca sabit kaldığı durumlarda geçerli olur. Bu durumda “migration” işlemi ile hiperboller yok edilecek, tepe noktaları orijinal konumlarına kaydırıldığında araştırmada önemsenen yansımalar kısmen gizlenecek fakat yansıma profilinde nokta hedefler olarak görülebilecektir.

#### **2.9.6 Zayıf Yansımaların Görünürlüğünü Artırma:**

Yansıma genlik seviyeleri arasında sayısal manada yüksek farklılıkların bulunmadığı durumlarda düşük genlikli yansımalar kayıt zamanlarındaki genlik değerleri artırılarak yansıma profillerinde görünür hale getirilebilir (Şekil 2.25). Paket yazılımların hemen hepsinde bu fonksiyon mevcuttur. Genlik artırımı yapıldıktan sonra “Background Removal” filtresi kullanılmalı ve genlik artırımıyla birlikte artan yatay bantlaşma giderilmelidir. Bu işlem görünmeyen yansımalar görünür hale gelene dek tekrarlanır. Sonradan yapılan veri işleme çalışmalarının tamamında bu işlem adımlarından kaynaklanan bir risk vardır. Bu risk her bir filtrelemede verinin başlangıçtaki orijinal formunun bozulmasıdır. Elde edilen sonuç başlangıçtaki veriyi tanınmaz hale getirecektir (Conyers [73]). Bu sebeple verinin orijinal kaydı muhafaza edilmelidir.

#### **2.9.7 Veri İşleme Sonuçları:**

Elbette her yansıma profili yatay ve düşey mesafeyi normalleştirmek için işlenmek durumundadır. Background Removal, oldukça basit ve önemli bir tekniktir. Araştırmaya konu olan önemli yansımaların görünürlüğünü artırma amacıyla etkili biçimde kullanılmaktadırlar. Tüm bu basit GPR veri işleme aşamalarının yansıma verilerinin orijinal formunu bozacağı

bilinmeli ve dikkatle kullanılmalıdır. Oldukça gürültülü ve bozulmuş veriler düzeltilerek ve filtrelenerek daha kullanışlı formlara getirilebilse de veri kaybı her zaman yaşanacaktır. Sismik veri işleme çalışmalarında kimi insanlar veri işlemeye bir ömür adanmış ve düşük kaliteli verilerden etkili sonuçlar elde etmişlerdir. Fakat müşteri taleplerine cevap verebilecek sonuç ürünü hiçbir zaman elde edemedikleri kendi aralarında her daim konuşulagelen bir kara mizah konusu olmuştur (Conyers [73]). Günümüzde de yüzeyaltı görüntüleme problemini kesin olarak çözebilen bir yöntem ya da veri işleme metodu bulunmamaktadır.

## **2.10 GPR Yöntemini Etkileyen Parametreler**

### **2.10.1 Di-Elektrik Parametreler**

Yeraltı materyelleri geçirgenlik ve iletkenlik gibi di-elektriksel parametrelerle tanımlanırlar. Başka bir deyişle dielektrik terimi elektromanyetik dalganın yayılmasını engelleyen yani elektriksel anlamda iletken olmayan materyelleri ifade eder. Elektromanyetik alana maruz kalan serbest yük akımının materyal üzerinde ki enerji kaybı ve zayıflama etkileridir. Serbest yüklü tüm yeraltı materyalleri Elektromanyetik zayıflamaya sebep olduklarından sinyal kaybına neden olurlar (Conyers [73]). Yüksek düzeyde serbest yüklü bir materyalin elektrik akımını büyük oranda durduran bir etkiye sahip olması GPR'in yüksek iletken ortamlarda etkisiz olmasının sebebidir.

### **2.10.2 Geçirgenlik- $\epsilon$**

En basit şekilde veri kaydında kullanılan kapasitörlerde olduğu gibi, materyalin elektriksel yüklü tutma veya salıverme kabiliyetini ifade eder. Başka bir deyişle serbest yük akışı veya polarizasyon düzeyi, elektrik Alana maruz kalan materyal için (F/m), olarak tanımlanabilir. Akademik literatürde (relative permittivity) terimi kullanılır.

Normal şartlarda geçirgenlik veya geçirgenlik sabiti  $\epsilon_r=8.8542 \times 10^{-12}$  F/m (havadan koşullarından bağımsız)

Bazı kaynaklarda elektrik geçirgenlik terimi dielektrik sabiti adıyla da geçmekte olup K ile gösterilmektedir. Fakat birçokları bu kullanımı yaygın olmayan terim yerine kompleks geçirgenlik tanımını kullanmaktadır. Yeraltı materyellerinin geçirgenlikleri anlık olarak değişebilir. Özellikle akışkan ve durağan sularda sıklıkla bu durum görülebilmektedir.

Genellikle kompleks yapıda ve frekansa bağımlı olarak elektriksel yükleri tutan ve kayba neden olan bileşenler içerebilirler. Bir materyalin geçirgenlik değeri için basit şekilde geçirgenlik sabiti denilebilir. Bu sabit değer radar dalgasının hızını ve dalga boyunu yaklaşık olarak hesaplamak için uygundur. Fakat detaylı analiz için son derece yetersiz kalmaktadır. Çizelge 2.2, deki listede geçirgenlik ve iletkenlik değerleri 100 mhz'lik elektromanyetik dalga frekansında ve doğal koşullarındaki bazı materyaller için gösterilmektedir (Goodman [100]; Reynolds [101]; Daniell [102]). Elektromanyetik enerjinin materyallere nasıl nüfuz ettiğini gösteren en iyi ve en basit model; atomik yaklaşımdır. Buna göre materyallerin atomlardan, atomlarında pozitif yüklü çekirdek ve negative yüklü elektron bulutundan oluştuğu düşünülür. Elektromanyetik dalganın materyalin içinden geçerek yayılması sürecinde yükler orjinal pozisyonlarına nazaran fiziksel olarak yerdeğiştirir, ya da başka bir deyişle polarize olur. Elektromanyetik yük konsantrasyonu atomic düzeyde materyalin uç kısımlarında etkiyi dengeleyecek herhangi bir komşu yükün bulunmadığı kısımlarda olur. Elektromanyetik yükleme anlık olarak uygulandığında elektriksel yükler partiküller aracılığıyla uç noktalara taşınırken bir diğer uçtan boşalmaktadır. Polarize olmuş yükler zıt uçlarda toplanarak materyalde kutuplaşmaya neden olurlar. Saf materyallerde elektrik alanın gücüne bağlı olarak orantılı bir kutuplaşma yoğunluğu görülür. Bu orantı geçirgenlik sabitidir ve ( $\epsilon$ ) ile sembolize edilir. Darbeli enerji uygulanması halinde yükler üzerinde oluşan bu ivmelenme ile anlık olarak yerdeğiştiren elektrik akımı neticesinde elektromanyetik enerji yayılımı gerçekleşir. Kısacası (permittivity) geçirgenlik; parametresi enerjinin materyal içerisindeki yayılma hızı ile direk ilişkilidir.

### **2.10.3 Elektronik ve Atomik Polarizasyon**

Tüm kuru ve katı materyaller için GPR in frekans aralığına bağlı olarak neredeyse sabit bir geçirgenlik değeri mevcuttur. Atomik veya atom altı ölçekte ve elektron bulutundaki veya durağan atomlardaki yerdeğiştirmeye bağlı polarizasyon mekanizmasındandır (Von Hippell [103]). Ilıman bölgelerde yapılan GPR uygulamalarında ihmal edilsede elektronik ve atomic polarizasyon etkisi kurak ve buzul alanlarda önemlidir ve geçirgenlik değeri yüksek frekansın sınırlarını belirler.

### a) Kutupsal Polarizasyon

Yük boşalma mekanizması moleküller üzerinde kalıcı elektriksel kutuplaşmaya neden olur. Durağan gazlar, akışkanlar veya iyonik kristal içerikli toprak türlerinde rastlanan yapısal sorundur. Hangi formda olursa olsun davranışlarını tanımlamak için çeşitli teoriler geliştirilmiştir. Temel yaklaşımlar Von Hippell [103] ve Hasted (1973) eserlerinde detaylı biçimde eleştirilmiş ve tartışılmıştır. Konuyu detaylandırmak gereksiz olsada polarizasyon mekanizması ve davranışlarını anlamada oldukça önemlidir. Su moleküllerindeki kutuplaşma etkisinin toprak, kum ve gözenekli kaya gibi kompleks karışumlu materyallerdeki değişken geçirgenlik reaksiyonunun nedenini açıklamaktadır.

### b) (Simple Polar) Yalın Kutupsal Materyaller – Doğal Su

Saf su (H<sub>2</sub>O) belkide kutupsal boşalım davranışını izah etmek için en güzel örnektir. Serbest yörüngelerindeki moleküllerin davranışları ile ilgilidir. Yörüngeleri diğer yüklerce kısıtlanmamış olan su gibi kutupsal akışkanlar münferit kutuplaşmış izole moleküllerin bir araya geldiği yapılardır. Elektriksel alanın bulunmadığı şartlarda, komşu moleküller tarafından ortaya çıkan sıcaklık değişimlerinde bu kutuplaşmalar rastgele düzensiz değişim eğilimi gösterirlerken, denge durumunda iken polarizasyonları sıfırlanır. Eğer elektrik Alana maruz kalırsa uygulanan elektrik alana paralel olarak kutuplaşma eğilimi gösterirler. Termal etki, moleküler eylemsizlik ve zayıf direnç hidrojen molekülleri arasında ki dönme eğilimini engelleyen ilişki maksimum kutuplaşmanın gecikmesine neden olur. Bu yüksek enerji durumunda kutuplaşmanın hacimsel yoğunluğu, (static permittivity) durağan geçirgenlikle  $\epsilon_s$  doğrudan ilişkilidir. Elektrik alan etkisi ortadan kaldırıldığında moleküller olağan hallerine geri dönünceye kadar kutupsal boşalma oluşur. Bu zamansal tepkiye boşalım tepkisi denilir ve  $T$  ile gösterilir. Boşalım frekansı ise  $f_{relax} = 1/(2 \times T \times \pi)$  ile formüle edilir. Aynı materyallerin alternative akıma maruz kalması halinde, kutuplaşma eğilimi elektrik alanda tepkisiz kalmaz. Sonuç olarak molecule nüfuz eden enerji elektrik alanın şiddeti arttıkça artar ve azaldıkça molekülde biriken elektriksel yükler boşalır. Bu da kompleks geçirgenlik parametresini belirleyen enerji tutma ve salıverme mekanizmasını işletir.

### c) Bağlı Su

Klasik olarak kutupsal boşalma tepkisi saf su için geçerlidir. Toprak ve kayada su tanecikleri ile mineral tanecikleri arasında moleküler hareketi sınırlandırılmış ve absorbe edilmiş mikroskobik su tabakaları bulunur (Saarenketo [104]). Kritik boşalım frekansında akışkan bileşenlerin neden olduğu bilinen bir di-elektrik fenomenidir. Enerji kaybına neden olan ve boşalım frekansının doğal suya nazaran çok daha düşük olduğu bağlı moleküllerin eğlemsizliğinin artmasına ve değişen bir geçirgenliğin ortaya çıkmasına neden olur. Toprak, kil ve kayada gözlemlenmektedir. Aynı zamanda çok sayıda hidrolojik GPR araştırmasının konusudur. Malesef bu etki önemsiz değildir ve mineral dağılımına doygunluk derecesine bağlı olarak değişir. Düşük doygunluk düzeylerinde geçirgenlik oldukça geniş spektrumlu olmaktadır. Farklı türlerdeki kaya minerali içeren toprak karışımlarında görülmektedir. Genel olarak GPR frekansları için az miktarda kaya içeren kuru topraklar için şunlar söylenilebilir;

-200 MHz nin altındaki düşük frekanslarda bağlı su boşalım tepkisi daha belirgindir.

-Kaya içermeyen materyallerde alüvyon ve kum gibi bağlı su yüzdesi düşük (%1-5 ten az) ve akışkan geçirgenliği doğal suya eşdeğerdir. Doygunluk düzeyi %1-2 den daha az bir değer olduğunda bağlı su içerikli akışkanlar etkin geçirgen özelliğindedir.

-Doygunluk yüzdesi %2-20 aralığında iken akışkan geçirgen özellikler kuru toprak için çok çeşitli olabilmektedir. Su tabakasının kalınlığına bağlı olarak topraktaki kaya parçacıkları yüzeydeki elektrokimyasal etkiler nedeniyle düşük doygunluk düzeyindeki kaya parçacıklarına göre çok çeşitli geçirgenlik düzeyleri üretirler.

### d) Kompleks Kutupsal Materyaller

Debye nin kutuplaşma teorisi saf ve seyreltilmiş çözeltiler için başarılı bir yaklaşım olsada kompleks kutupsal materyaller için uygun değildir. Bunlar hidrokarbon bileşikler, çözeltiler ve moleküler karışımlardır. Oldukça kompleks polarizasyon aralıkları oluştururlar. Cole ve Cole, bu yaklaşımı formulize ederek doğal akışkanların, katı ve heterojen karışımların geçirgenliklerini tam olarak ifade etmeyi başardı (Turner [105]).



GPR çalışmalarında sürekli kullanılan genişletme faktörünü ( $\alpha$ ) de içeren yük boşalıklarının zamansal dağılımını ya da moleküler çarpışmayı ifade eden kompleks geçirgenlik;

$$\epsilon(w) = \epsilon_{\infty} + \epsilon_s - \epsilon_{\infty} / (1 - jwT)^{1-\alpha} \quad (2.3)$$

Şeklinde formulize ifade edilir.

### e) Serbest Yük ve Arayüzey Kutuplaşması

Gözenekli heterojen materyaller ve karışımlar için yük boşam etkisini ifade eder. (Maxwell-Wagner etkisi) Genel olarak materyaller arasında veya materyal yüzeyinde biriken serbest yüklerle ilgilidir. 1 mhz nin altında gözlenen yüksek metal geçirgenliği ile yük boşalımı etkisi arasındaki ilişki Cole-Cole modeli ile açıklanabilmektedir. Uygulamada ise yüzeyarası polarizasyon etkileri GPR uygulamaları için önemli değildir. Fakat gözenekli ve ince taneli materyaller için dikkate alınmalıdır.

#### 2.10.4 İletkenlik - $\sigma$

En basit tanımla iletkenlik elektriksel alana maruz kalan materyalin serbest elektrik yüklerini iletme kapasitesini ifade eder. Materyallerde bu yükler metal atomlarının serbest elektronları ile taşınırken akışkanlarda çözülmüş elektriksel anlamda yüklü anyon ve katyonlar aracılığı ile gerçekleşir. Elektromanyetik yayılımında ise iyon veya electron bazında diğer atomlarla çarpışarak enerji kaybı ve ısı oluşturur. Düşük frekanslı GPR uygulamalarında elektrik yükleri anlık tepkilerle elektrik alanının şiddetine bağlı olarak elektrik akımı oluşturur (Turner [105]).

Bu durumda ( $\sigma$ ) ile gösterilen statik veya alternatif akım iletkenliği  $\sigma_s$  ve S/M olarak ifade edilmiştir.

#### 2.10.5 Manyetik Geçirgenlik - $\mu$

Her koşulda materyallerin dia-magnetik, paramanyetik ve süpermanyetik düzeylerdeki manyetik etkileri GPR dalgasının yayılımında etkilidir (Olhoeft [52]). Manyetik geçirgenlik ( $\mu$ ) =  $1,26 \times 10^{-6}$  H/m dir. Fakat ferromanyetik mineraller GPR dalgasının hızında ve sinyalinde kayda değer bir zayıflatma etkisine sahiptir. Demir, Nikel ve bunların sülfid oksitleri ferromanyetik boşalım olgusu gereği elektronların dönüş yörüngelerinde sapmalara neden

olurlar. Manyetik boşalım frekansı etki alanı ve tanecik yapısı ile manyetik materyalin fiziksel yapısına bağılı olarak değişir. Yüzeyaltı jeolojik materyallerin tamamı için ferromanyetik materyal miktarı önemsenmeyecek boyuttur. Öte taraftan kayda değer oranda mıknatıs, maghetit ve hematite ve bazı kaya ve demir bakımından zengin topraklarda bulunabilir. Yük boşalımına ve elektromanyetik dalğanın nüfuzunda sebep olduğu kayıplardan ötürü aynı etkileri gösteren elektriksel geçirgenlikle karşılaştırılabilir (Cassidy [68]).

Güncel GPR uygulamalarında manyetik özellikler yalnızca elektriksel tepkiler üzerinde kayda değer nispette etkili olduğunda önemsenir. "Marsis" ve "Sharad" gibi mars radar keşif araştırmalarındaki gelişimler manyetik minerallerin GPR üzerindeki etkilerine olan ilgiyi artırdı. Çünkü "Mortion" yüzeyindeki elektromanyetik kaybın büyük oranda demir oksit minerallerinden kaynaklandığına inanılmaktadır (Conyers [73]). Mars yüzeyindeki bu bulgular mineralojik yersel GPR uygulamaları için de uygulanabilir bulunmaktadır. Güncel araştırmalar düşük miktardaki magnetitin (%10) sinyal hızında ve enerjisinde önemli kayıplara neden olduğunu göstermektedir. Özellikle kuru, kristalize materyallerde manyetik olmayan materyallerle kıyaslandığında hızın düştüğü ve sinyal kaybı yaşandığı ve aynı etkinin biyomedikal ferrofloridlerde de görüldüğü bilinmektedir.

### YÖNTEM VE METODOLOJİ

#### 3.1 Jiroskopik Düzeltme Modeli

Tezin bu bölümünde literatür taramasından da görüldüğü üzere güncel GPR araştırmalarında eğimli arazilerde topografik değişkenlikten kaynaklanan anten dönüklüklerini ve tekerlek devir sayısı ile ölçülendirilen yatay mesafe ölçümünün neden olduğu yatay ölçek hatasını gidermek amacı ile oluşturulan “Jiroskopik Düzeltme Modeli” tarif edilecektir.

Yeraltında derinlere inildikçe radar sinyalin nasıl bir güzergah izleyeceği asla kesin olarak bilinemez. Radar sinyalleri yeraltında boşlukta yayılan ışık ışınları gibi doğrusal yayılmazlar. Sinyalin yer içinde izlediği güzergah derinlik artışı ve gömülü objenin etrafını çevreleyen katmanların farklılaşması ile giderek daha düzensiz bir hal alır. Fakat enerjiyi sönmüleyecek nitelikte manyetik geçirgen ya da elektrik iletken olmayan homojen katmanlar için maksimum birkaç metreye kadar penetrasyonun sağlandığı sığ derinlikler; radar dalgalarının doğrusala en yakın seyrettiği bölümdür. GPR-GPS-Dijital İnklinometre kombinasyonundan oluşan “Jiroskopik Düzeltme Modeli” özellikle arkeometri ve NDT gibi belirtilen sığ derinliklerde yapılan yüksek frekanslı GPR uygulamaları için geçerlidir.

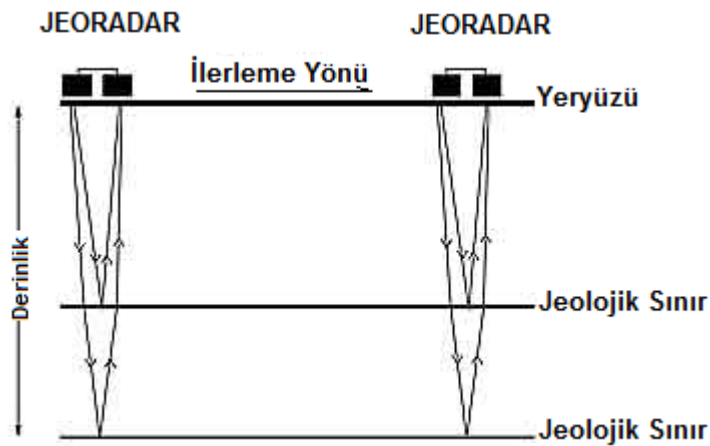
Jiroskopik Düzeltme Metodu GPR ünitesi (1), GNSS-GPS (2), 2 Eksenli Dijital İnklinometre (3), Veri Kayıt Ünitesi (4), Jiroskopik Jeoradar Veri Tabanı (JJVT) (5) kısımlarından oluşmaktadır. Klasik GPR ölçümünden farklı olarak GNSS-GPS ve Dijital İnklinometre verilerinin eşzamanlı

kaydedilmesi sonucu elde edilen verilerin Jiroskopik Jeoradar Veri Tabanı (JJVT) ile işlenmesi ve gömülü objenin UTM koordinatlarının hesaplanması esasına dayanmaktadır.

Klasik GPR tekniğinde gömülü obje ya da katmanın radargram üzerinde tespit edildiği nokta; yalnızca başlangıç ve bitiş noktaları bilinen ölçüm profilinin başlangıcından itibaren ölçüm tekerleği ile ölçülendirilmiş mesafe ve derinlik değeriyle ifade edilen 2 boyutlu lokal bir koordinat sistemine göre tanımlıdır. Bu durumda ölçülen mesafe Şekil 3.1’de teorik olarak gösterildiği gibi planimetrik (yataya indirgenmiş) mesafeden  $(\pi \times r)/(2r) = (\pi \times r)/(2r) = \pi/2$  kadar fazladır. Eğiklik ve dönüklük parametrelerine bağlı olarak 3 eksendeki eğim düzensizliği ile birlikte daha da artabilecek olan bu hata Klasik GPR Radargramının başlangıç noktasından itibaren mesafeyi ifade eden yatay ekseninde ölçek hatasına neden olmaktadır. Bir koordinat sisteminde tanımlı ve koordinatları bilinen iki nokta arasındaki yatay mesafe;

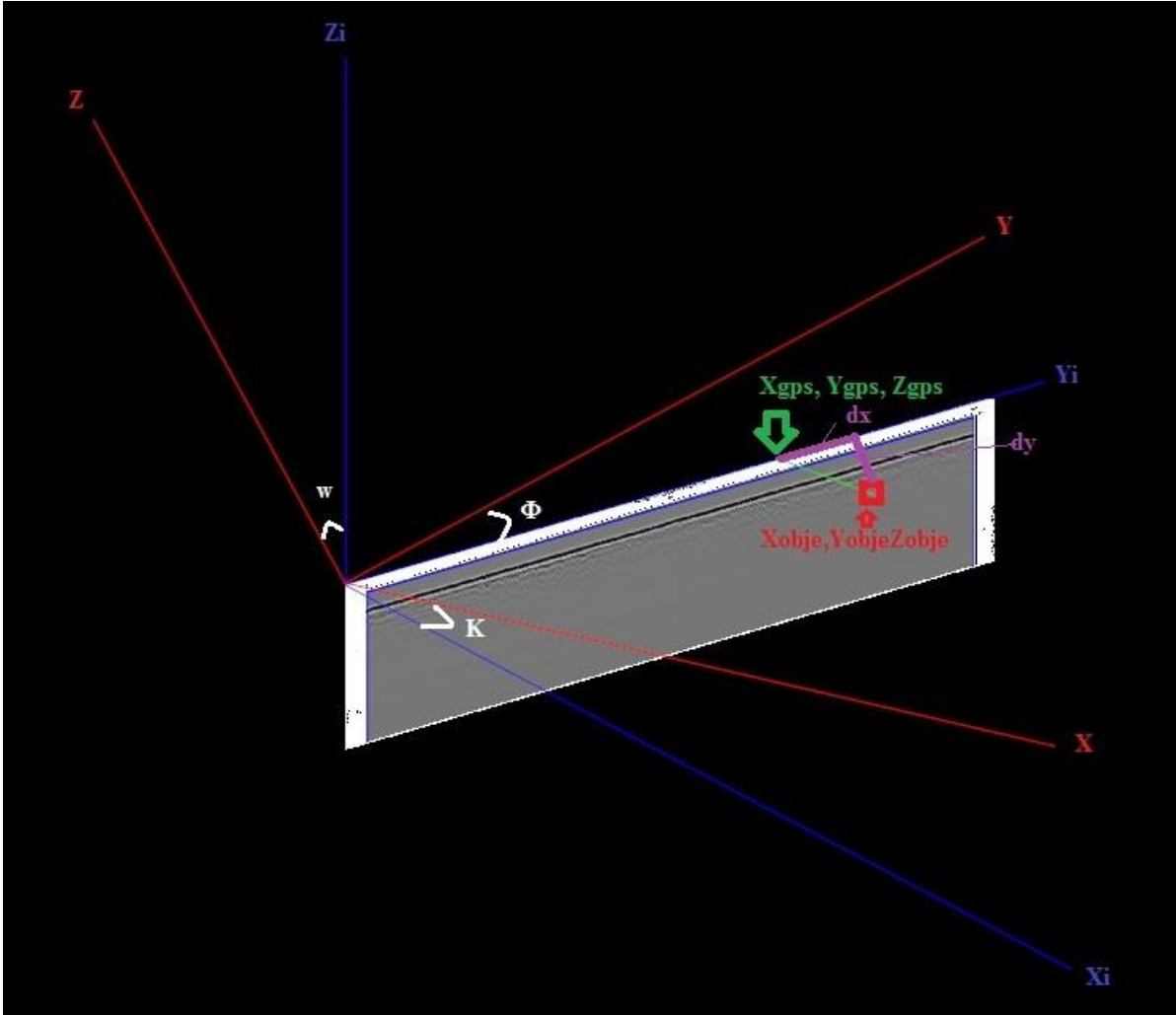
$$\sqrt{((X2 - X1)^2 + (Y2 - Y1)^2)} \quad (3.1)$$

eşitliği ile hesaplanabilir. Yataya indirgenmiş mesafenin elde edilmesi; GPR ile eşzamanlı yapılan GNSS/GPS ölçümleri ile mümkündür. Bu sayede her radar yansıma izi, GPR antenin yer yüzeyinde yer altı katmanlarına dair verileri topladığı konumda kaydedilen GNSS/GPS verisi ile  $X_{gpr}, Y_{gpr}$  ve  $Z_{gpr}$  olarak tanımlanmış olmaktadır.



Şekil 3.1 Klasik GPR Ölçme Tekniği

Ancak eğimli arazide her klasik GPR profili Ülke Koordinat Sistemi (UTM)'e göre oryantasyon parametreleri olan  $\phi$ ,  $\omega$ ,  $\kappa$  kadar eğik ve dönüktür. Dolayısıyla radargramın tanımlı olduğu koordinat sistemi başlangıç noktası olan  $X_{gpr}, Y_{gpr}$  ve  $Z_{gpr}$  'da GPS koordinat sistemine çakışık, fakat  $\phi$ ,  $\omega$ ,  $\kappa$  kadar eğik ve dönüktür. Bu ikinci koordinat sisteminin birinci koordinat sistemi olan GPS koordinatlarına dönüştürülmesi gerekmektedir. Dijital İnklinometre verilerinin GPR ve GNSS/GPS ile eşzamanlı toplanarak oryantasyon parametrelerinin bilinmesi halinde radargram üzerinde işaretlenen nokta hedef ya da katman sınırlarına dair her detay için Ülke Koordinat Sisteminde  $X_{utm}, Y_{utm}$  ve  $Z_{utm}$  değerlerinin hesaplanması mümkündür (Şekil 3.2).



Şekil 3.2 Eğimli arazide UTM koordinat sistemine göre  $\phi$ ,  $\omega$  ve  $\kappa$  açıları ile uzaysal olarak dönük GPR için bulunduğu pozisyon ( $X_{gps}-Y_{gps}-Z_{gps}$ ) ile gömülü obje pozisyonu ( $X_{obje}-Y_{obje}-Z_{obje}$ ) ve konumsal sapmayı ifade eden "dx" ve "dy" gösterilmektedir.

## 3.2 Veri Setlerinin Tanımlanması

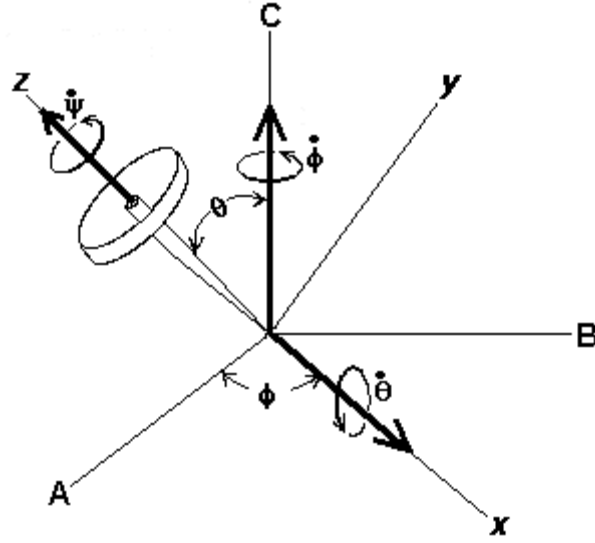
### 3.2.1 GNSS/GPS Verileri

Günümüzde GPR verileri ile eşzamanlı toplanan GNSS/GPS verileri GPR verilerinin işlenmesinde kullanılan Reflex-Win, GPR-Slice veya benzeri paket programlar vasıtası ile entegre edilebilmektedir. Buradaki amaç yükseklik farklarını sürekli ölçerek topografik düzeltmeyi sağlamak ve her radargram üzerine coğrafi koordinat sistemindeki enlem/boylam değerlerini işlemektir. GNSS/GPS entegrasyonu sağlanmış GPR ölçümünde her radar yansıma izi (reflection trace) için .COR uzantılı entegrasyon dosyası üretilir. Çizelge 3.1 de görüldüğü gibi (.COR) uzantılı bu dosyada her bir yansıma izi için sırasıyla Trace No, Emlem, Boylam ve Yükseklik verileri bulunmaktadır. Yansıma izleri arasındaki mesafe yine ölçüm tekerleği ile yapılmakta ve (reflection trace) yansıma izleri GPR parametre ayarlarında belirlenen mesafe aralıkları için otomatik olarak üretilmektedir. Ölçüm tekerleği ile ölçülen bu mesafe arazi eğimi ve oryantasyon parametreleri göz önüne alınarak yataya indirgenmediğinden GNSS/GPS entegrasyonuna rağmen üretilen tüm radargramlarda yatay ölçek hatası ve arazi eğiminden kaynaklanan koordinat sapması bulunmaktadır.

Her bir yansıma izinin (reflection trace) (UTM) koordinat sisteminde koordinatlandırılması ve kartezyen koordinat sisteminde işlem yapılabilmesi için ilk adım; Coğrafi Koordinat Sistemindeki koordinatların 3 derecelik UTM Ülke Koordinat Sistemine dönüşümünün sağlanmasıdır.

### 3.2.2 Dijital Jiroskop Verileri

Bir jiroskop geometrik eksenini etrafında serbest hareketi gerçekleştirebilen bir rotordan oluşur. Serbest uzayda kütle merkezi değişmemek üzere, bir askı düzlemi içerisinde (Şekil 3.3) istenilen açısız konumu alabilir. Bu sayede değişen açı değerlerini algılayabilmektedir.



Şekil 3.3 Jiroskop ve Eksenleri.

Günümüzde duyarlılık seviyelerine göre değişen dijital jiroskop sensörleri akıllı cep telefonu, tablet bilgisayar gibi platformlarda standart halde bulunabilirken model uçaklarda, robotlarda ve mekatronik teknolojilerin geliştirilmesinde kullanılmak üzere üretilmiş yüksek duyarlılıkta pek çok model 2 Eksenli ve 3 Eksenli seçeneklerle kullanıcılara sunulmaktadır.

GPR-GPS-Dijital Jiroskop Metodu “Jiroskopik Jeoradar” 2 eksenli Dijital İnklinometre ile modellenmiştir. Dijital Jiroskop verisi .txt formatlı olup, belirlenen zaman aralıkları için üretilen zaman (t),  $\phi$  ve omega eğiklik ve dönüklük verilerini içermektedir.

### 3.2.3 GPR Verileri

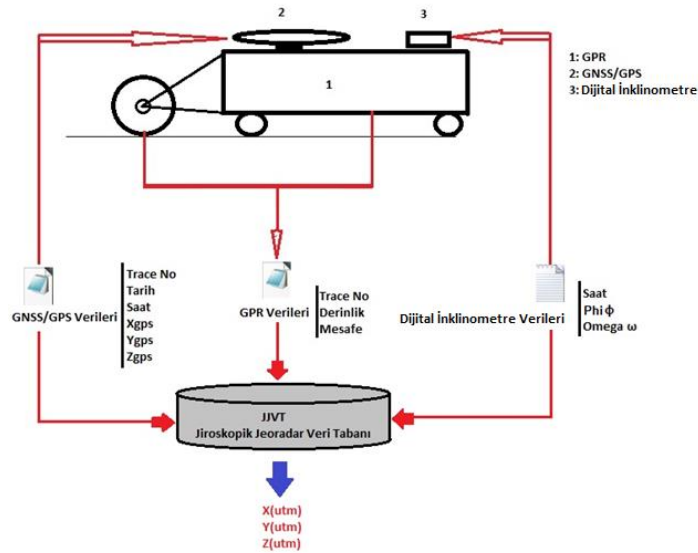
GPR tekniğinin güncel durumu 1. Ve 2. bölümlerde detayları ile anlatılmıştır. 900 Mhz'den yüksek frekans aralıklarında çalışan bir GPR ünitesi kullanılmalıdır. GPR verileri önceki bölümde ifade edildiği gibi 2 Boyutlu radargramlarla ifade edilir. Radargramlar yorumlanırken nokta hedefler ya da katman sınırları “pick” adı verilen işaretlemeler yapılır. İşaretlenen her nokta için Trace No (Yansıma izi numarası), profil başlangıcından olan mesafe ve genlik değerleri gibi veriler kullanıcının tercihine göre dijital olarak kaydedilebilir. Şekil 3.4'te radargram üzerinde gerçek koordinatı hesaplanmak istenilen noktalar işaretlenmiş ve trace no, derinlik ve mesafe bilgileri (JJVT) Jiroskopik Jeoradar Veri Tabanında işlenmek üzere kaydedilmiştir.



Şekil 3.4 Radargram üzerinde işaretlenen noktalar. Reflex WIN yazılımı kullanılarak gömülü obje ya da katmana dair Trace No, Profil Mesafesi ve Derinlik değerlerinin kaydedilmesi.

### 3.3 Jiroskopik Jeoradar Veri Tabanı (JJVT)

JJVT Veri tabanı Microsoft Access yazılımı kullanılarak oluşturulmuştur. GPS, GPR radargramından UTM koordinatı hesaplanmak istenilen detay noktalar ve Dijital İnklinometre olmak üzere 3 çizelge içermektedir. GPR ile eşzamanlı kaydedilen GNSS/GPS ve Dijital İnklinometre verilerinin bulunduğu bu 3 çizelge; JJVT veri tabanı kullanılarak entegre edilmiştir (Şekil 3.5).



Şekil 3.5 (1)GPR, (2)GPS, (3)Dijital İnklinometre kısımları olmak üzere; GPS, GPR radargramından UTM koordinatı hesaplanmak istenilen detay noktaları, Dijital İnklinometre olmak üzere 3 verilerinin senkronize edildiği, entegrasyonun sağlanıp verilerin işlendiği JJVT (Jiroskopik Jeoradar Veritabanı) gösterilmektedir.



### 3.3.1 Çizelgeler

Çizelge 3.1 GPS verileri Çizelgesi.

trace	tarih	Saat	Y koordinatı	X koordinatı	Z koordinatı	anten (H)
102	8.10.2016	12:51:30	425250.781	4533906.124	4.19	1.2
103	8.10.2016	12:51:31	425250.769	4533906.101	4.23	1.2
104	8.10.2016	12:51:31	425250.757	4533906.077	4.23	1.2
105	8.10.2016	12:51:31	425250.744	4533906.054	4.23	1.2
106	8.10.2016	12:51:31	425250.732	4533906.031	4.23	1.2
107	8.10.2016	12:51:31	425250.720	4533906.007	4.23	1.2
108	8.10.2016	12:51:32	425250.695	4533906.011	4.27	1.2
109	8.10.2016	12:51:32	425250.665	4533906.025	4.27	1.2
110	8.10.2016	12:51:32	425250.635	4533906.038	4.27	1.2
111	8.10.2016	12:51:32	425250.606	4533906.052	4.27	1.2

GPR/GPS Kombinasyon Modelinde GPS anteninin GPR ünitesine dikey pozisyonda sabitlenmiş olduğu varsayılmaktadır. Radargramlar yorumlanırken nokta hedefler ya da katman sınırlarını tanımlayabilmek için “pick” adı verilen işaretlemeler yapılır. İşaretlenen her nokta için Trace No (yansıma izi numarası), profil başlangıcından olan mesafe ve genlik değerleri gibi veriler kullanıcının tercihine göre dijital olarak kaydedilebilir. Radargram üzerinde gerçek koordinatı hesaplanmak istenilen noktalar işaretlenmiş ve Trace No, derinlik ve mesafe bilgileri GPR/GPS Veri Tabanında işlenmek üzere kaydedilmiştir (Çizelge 3.2).

Çizelge 3.2 GPR radargramında işaretlenerek UTM koordinatı hesaplanmak istenen detay noktaları çizelgesi.

Trace No	Derinlik	Mesafe
102	0,774	1,125
103	0,720	1,725
104	0,684	2,275
105	0,927	2,825
106	0,964	3,225
107	1,045	4,1
108	1,054	4,7
109	1,081	5,65
110	1,144	6,125
111	1,279	6,85

GPR radargramın da işaretlenen (pick) detay noktaları Trace No, Derinlik ve Profil başlangıcından itibaren ölçülen mesafe seçilerek “.txt” uzantılı dosya olarak kaydedilir. Radargram üzerinde işaretlenen nokta verilerinin “.txt” uzantılı bu kaydı Microsoft Excel yazılımı kullanılarak çizelge haline getirilir ve kaydedilir. Çizelge 3.1 ve Çizelge 3.2, aynı yansıma izi (trace) numarasına tanımlı GPS ile GPR radargramında işaretlenen nokta verilerini entegre etmek amacıyla Trace No sütunu birincil anahtar olarak kullanılmak üzere ilişkilendirilir. Her “trace\_no” için yalnızca bir GPS verisi ve yalnızca bir işaretlenen nokta kaydı bulunduğundan eşleşmede herhangi bir hata oluşmaz (Çizelge 3.2).

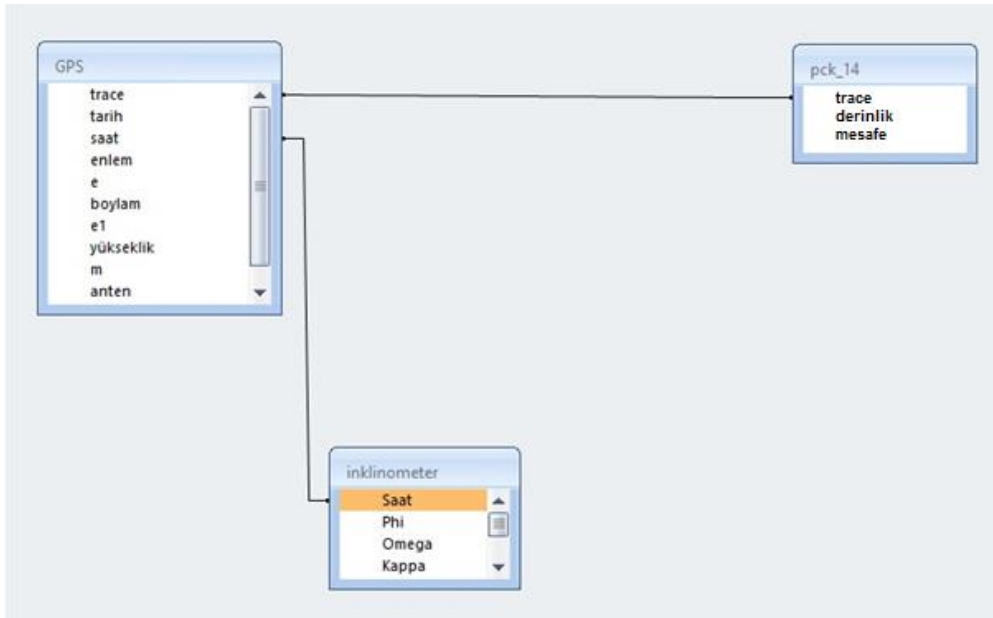
#### Dijital İnklinometre Verileri Çizelgesi:

Jiroskopik Jeoradar Metodu 2 eksenli Dijital İnklinometre ile modellenmiştir. Dijital İnklinometre verisi .txt formatlı olup, belirlenen zaman aralıkları için üretilen zaman, fi, omega eğiklik açılarını içermektedir (Çizelge 3.3).

Çizelge 3.3 Dijital inklinometre verileri çizelgesi

Saat	Phi	Omega
12:51:30	-0.00044	-0.00578
12:51:31	-0.00052	-0.00634
12:51:31	-0.00052	-0.00628
12:51:31	-0.00051	-0.00625
12:51:31	-0.00051	-0.00625
12:51:31	-0.00044	-0.00628
12:51:32	-0.00040	-0.00628
12:51:32	-0.00037	-0.00621
12:51:32	-0.00037	-0.00618
12:51:32	-0.00031	-0.00616

Çizelgeler arası ilişkiler: GPS ve Dijital inklinometre verileri çizelgesi saat alanlarının ilişkilendirilmesi ile entegre edilirken işaretlenen detay noktaları çizelgesi yansıma izi numarası “trace” kayıtları kullanılarak ilişkilendirilir.



Şekil 3.6 Jiroskopik Jeoradar Veri Tabanı (JJVT) ilişkilerinin kurulması

### 3.3.2 Veri Entegrasyonu

GPS ve işaretlenen nokta çizelgelerinin ilişkilendirilmeleri ve oluşturulan veri tabanı sorgusu sonucunda işaretlenen her nokta için bu iki çizelge verilerinin entegrasyonu sağlanır (Çizelge 3.4).

Çizelge 3.4 Veri entegrasyonu çizelgesi

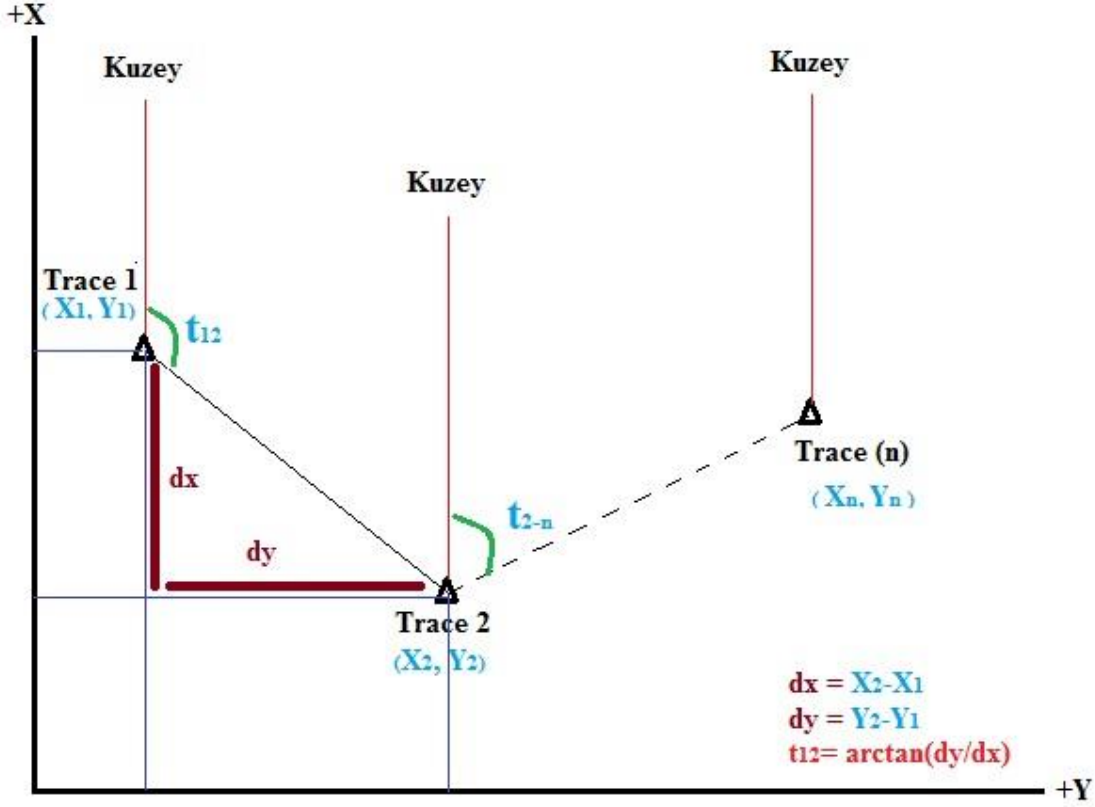
trace	tarih	saat	enlem	boylam	yükseklik	ante n	Phi	Omega	Derinlik	Mesafe
102	8.10.2016	12:51:30	425250.781	4533906.124	4.19	1.2	-0.00044	-0.00578	0,774	1,125
103	8.10.2016	12:51:31	425250.769	4533906.101	4.23	1.2	-0.00052	-0.00634	0,720	1,725
104	8.10.2016	12:51:31	425250.757	4533906.077	4.23	1.2	-0.00052	-0.00628	0,684	2,275
105	8.10.2016	12:51:31	425250.744	4533906.054	4.23	1.2	-0.00051	-0.00625	0,927	2,825
106	8.10.2016	12:51:31	425250.732	4533906.031	4.23	1.2	-0.00051	-0.00625	0,964	3,225
107	8.10.2016	12:51:31	425250.720	4533906.007	4.23	1.2	-0.00044	-0.00628	1,045	4,1
108	8.10.2016	12:51:32	425250.695	4533906.011	4.27	1.2	-0.00040	-0.00628	1,054	4,7
109	8.10.2016	12:51:32	425250.665	4533906.025	4.27	1.2	-0.00037	-0.00621	1,081	5,65
110	8.10.2016	12:51:32	425250.635	4533906.038	4.27	1.2	-0.00037	-0.00618	1,144	6,125
111	8.10.2016	12:51:32	425250.606	4533906.052	4.27	1.2	-0.00031	-0.00616	1,279	6,85

### 3.3.3 İşlem Adımları

Aşağıda izah edilen işlem adımlarının tamamı JJTV veri tabanı tarafından gerçekleştirilmektedir. Tüm hesaplamalar “GPS Sorgu1” üzerinden SQL kodlarla hazırlanmıştır. Fakat daha kolay anlaşılabilmesi adına veri entegrasyonundan sonra yapılacak işlem adımları Microsoft Excel sütun adlarıyla isimlendirilerek ayrıca formülize edilmiştir. Ek A’da sunulan indekste her veri grubu için Microsoft Excel çizelgesinde karşılık gelen alan adları gösterilmektedir.

Semt Açısı Hesabı:

Manyetik kuzey ile radar profilinin yeryüzeyi üzerinde taşıdığı doğrultu arasındaki açıdır (Şekil 3.7).



Şekil 3.7 Semt Açısı

Profil başlangıcından itibaren GPS anteninin tanımlı olduğu koordinat sisteminin X eksenindeki yerdeğiştirme miktarı "dx" ve profil başlangıcından itibaren GPS anteninin tanımlı olduğu koordinat sisteminin Y eksenindeki yerdeğiştirme miktarı "dy" ile ifade edilir.

Arctan(dy/dx) değerinin Denklem 3.2 ile hesaplanır.

$$\tan^{-1} \frac{YGPS(n) - YGPS(n-1)}{XGPS(n) - XGPS(n-1)} \quad (3.2)$$

1.Semt Açısının hesaplanması ile GPR'ın yeryüzündeki profil güzergahının manyetik kuzeyle yaptığı açı matematiksel olarak ifade edilmiş olur.

Başlangıç noktasının  $X_0$  ve  $Y_0$  koordinatları, semt açısı ve başlangıçtan itibaren profil üzerindeki yatay mesafesi bilinen bir noktanın  $X_n$  ve  $Y_n$  koordinatları Denklem 3.3 ve Denklem 3.4 ile hesaplanır.

$$X_n = X_0 + L(\text{mesafe}) \times \cos(t_{0-n}) \quad (3.3)$$

$$Y_n = Y_0 + L(\text{mesafe}) \times \sin(t_{0-n}) \quad (3.4)$$

Gömülü obje ya da katmanın konumu arazi eğimiyle birlikte değişen  $\phi$ ,  $\omega$  açıları ve derinliğe bağlı olacak şekilde GPS anteninin bulunduğu konumdan farklıdır. Bir başka değişle eğimli arazide GPS anteninin  $Y_{GPS}$  ve  $X_{GPS}$  koordinatlarının tanımlandığı UTM (Ülke Koordinat Sistemi) ile GPR ölçümünün radargramda ifade edildiği lokal koordinat sistemi birbirine göre  $\phi$   $\omega$  açıları kadar dönüktür. Bu ikinci sistemin dönüklüğü 3 boyutlu uzaysal dönme matrisleri kullanılarak UTM koordinat sistemine dönüştürülebilir.

X, Y ve Z eksen etrafında xyz sisteminin uzaysal dönme matrisi;

$$R_{\phi\omega\kappa} = \begin{bmatrix} \cos\phi \cdot \cos\kappa + \sin\phi \cdot \sin\omega \cdot \sin\kappa & -\cos\phi \cdot \sin\kappa + \sin\phi \cdot \sin\omega \cdot \cos\kappa & \sin\phi \cdot \cos\omega \\ \cos\omega \cdot \sin\kappa & \cos\omega \cdot \cos\kappa & -\sin\omega \\ -\sin\phi \cdot \cos\kappa + \cos\phi \cdot \sin\omega \cdot \sin\kappa & \sin\phi \cdot \sin\kappa + \cos\phi \cdot \sin\omega \cdot \cos\kappa & \cos\omega \cdot \cos\phi \end{bmatrix}$$

Eksen dönüklüklerini ifade eden  $\phi$ ,  $\omega$  ve  $\kappa$  açı değerleri her trace (yansıma izi) için Dijital İnklinometre tarafından üretilmekte ve JJVT veri tabanı yardımı ile entegre edilmektedir. Eksenler arasında öteleme bulunmadığından dolayı orjin olan  $X_0$  ve  $Y_0$  noktasında birbirine çakışık fakat uzaysal olarak dönüktür. Dolayısıyla uzaysal üç eksenli dönme matrisi için  $dX$  ve  $dY$  öteleme değerleri "0" ve gömülü obje ile GPS anteni arasındaki mesafe ( $dZ$ ) = (Anten Yüksekliği + GPR radargramdan ölçülen obje derinliği) olacak şekilde  $R_{\phi\omega\kappa}$  uzaysal dönme matrisinin X matrisi ile çarpımı, özel bir hal alarak dikyayak, dikboy ve gerçek derinlik değerleri Denklem 3.5, Denklem 3.6 ve Denklem 3.7 elde edilir.

$$\begin{bmatrix} \cos\phi \cdot \cos\kappa + \sin\phi \cdot \sin\omega \cdot \sin\kappa & -\cos\phi \cdot \sin\kappa + \sin\phi \cdot \sin\omega \cdot \cos\kappa & \sin\phi \cdot \cos\omega \\ \cos\omega \cdot \sin\kappa & \cos\omega \cdot \cos\kappa & -\sin\omega \\ -\sin\phi \cdot \cos\kappa + \cos\phi \cdot \sin\omega \cdot \sin\kappa & \sin\phi \cdot \sin\kappa + \cos\phi \cdot \sin\omega \cdot \cos\kappa & \cos\omega \cdot \cos\phi \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} dx = 0 \\ dy = 0 \\ dz \end{bmatrix}$$

### DİKAYAK

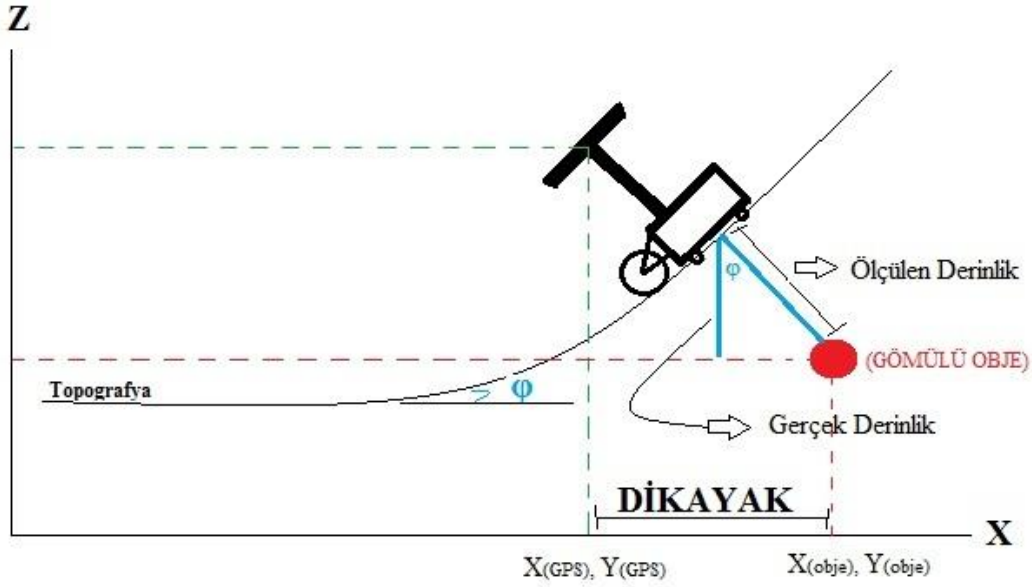
$$-(\cos\phi \cdot \cos\kappa + \sin\phi \cdot \sin\omega \cdot \sin\kappa)x_0 + (-\cos\phi \cdot \sin\kappa + \sin\phi \cdot \sin\omega \cdot \cos\kappa)x_0 + (\sin\phi \cdot \cos\omega) x dz = Y \quad (3.5)$$

### DİKBOY

$$(\cos\omega \cdot \sin\kappa)x_0 + (\cos\omega \cdot \cos\kappa)x_0 - (\sin\omega) x dz = X \quad (3.6)$$

### GERÇEK DERİNLİK

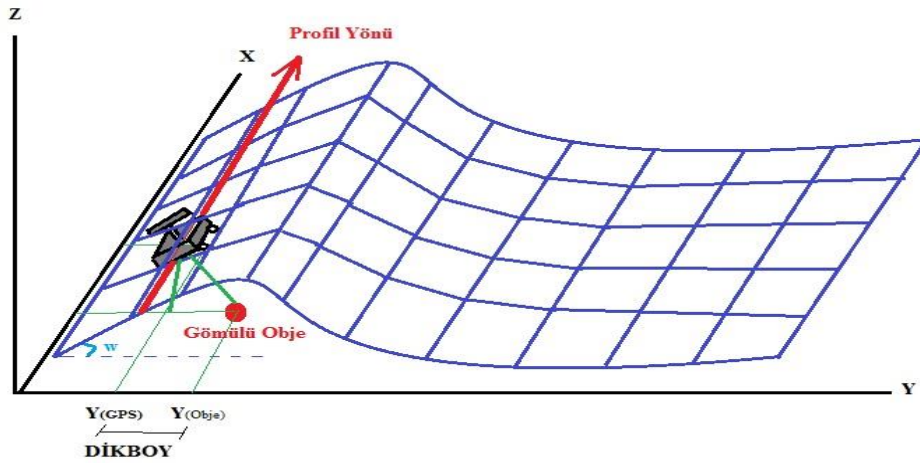
$$(-\sin\phi \cdot \cos\kappa + \cos\phi \cdot \sin\omega \cdot \sin\kappa)x_0 + (\sin\phi \cdot \sin\kappa + \cos\phi \cdot \sin\omega \cdot \cos\kappa)x_0 + (\cos\omega \cdot \cos\phi) x dz = Z \quad (3.7)$$



Şekil 3.8 Profili doğrultusundaki arazi eğimi ( $\Phi$ ) olan GPR ölçümü için GPS'in anten merkezi koordinatları ile gömülü obje koordinatları arasındaki öteleme miktarı "Dikayak" ve eğim dolayısıyla düşey pozisyonda olmayan "Ölçülen Derinlik" - "Gerçek Derinlik" farklılıkları gösterilmektedir.

#### Gömülü Objenin X eksenindeki ötelemesi - "Dikayak" hesabı;

$$-\sin(\varphi) \times \cos(\omega) \times (-H_{\text{obje\_derinliği}} - h_{\text{anten}}) \quad (3.8)$$



Şekil 3.9 Eğimli arazide profil doğrultusuna göre omega dönüklüğü ( $w$ ) bulunan GPR profili için GPS'in anten merkezi koordinatları ile gömülü obje koordinatları arasındaki öteleme miktarı "Dikboy" gösterilmektedir.

Not: Şekil 3.9;  $F_i(\Phi)$  ve  $Kappa(K)$  dönüklüklerinin sıfır "0" olduğu varsayılarak tasvir edilmiştir.

**Gömülü Objenin Y eksenindeki ötelemesi – “Dikboy” hesabı için;**

$$-\sin(\omega) \times (-H_{\text{obje\_derinliği}} - h_{\text{anten}}) \quad (3.9)$$

Denklemleri ile hesaplanır.

Yataya indirgenmiş ve dönüklüğü giderilmiş DİKAYAK ve DİKBOY uzunluklarının hipotenüsü gömülü objenin UTM koordinatlarının hesaplanmasında kullanılacak olan bazdır. GPR ile gömülü obje arasındaki yataya indirgenmiş bu “L” mesafesi (Denklem 3.10) ‘da gösterildiği gibi hesaplanır.

$$L = \sqrt{\left( (-\sin(\varphi) \times \cos(\omega)) \times (-H(\text{obje\_derinliği}) - h(\text{anten})) \right)^2 + \left( -\sin(\omega) \times (-H(\text{obje\_derinliği}) - h(\text{anten})) \right)^2} \quad (3.10)$$

**Radargram üzerinde işaretlenen detay noktasının yeryüzeyinden gerçek derinlik değeri, veya Z eksenindeki ötelemesi için;**

$$\cos(\varphi) \times \cos(\omega) \times (-H(\text{obje\_derinliği})) \quad (3.11)$$

GPR ölçümünün yapıldığı nokta ile yatay mesafesi bilinen gömülü objenin UTM koordinatlarını hesaplayabilmek; ancak profil doğrultusu (2. Semt Açısı) ile gömülü obje arasındaki artık açının hesaplanarak 3. semt açısının, yani Trace no ile gömülü obje arasındaki doğrultunun manyetik kuzeyle yaptığı açının belirlenmesi ile mümkün olabilir.

Bu amaçla Alan\_DİKAYAK ve Alan\_DİKBOY değerleri kullanılır ve artık açı Denklem 3.12 ile hesaplanır (Ek A);

$$\tan^{-1} \frac{180 \times (-\sin(\omega) \times (-H(\text{obje\_derinliği}) - h(\text{anten})))}{\pi \times (-\sin(\varphi) \times \cos(\omega)) \times (-H(\text{obje\_derinliği}) - h(\text{anten}))} \quad (3.12)$$

Bu açı değeri de semt açısında olduğu gibi hesaplanırsa da; manyetik kuzeye göre değil profil hattına göre olan eksen sapmasını ifade eder. Çünkü “dy” ve “dx” değerlerinin yerine kullanılan Dikayak ve Dikboy değerleri başlangıç noktasından itibaren olan yerdeğiştirmeyi değil gömülü objenin radargramda tespit edilerek işaretlendiği trace (yansıma izi) noktası ile gömülü obje ya da katman arasındaki yatay ve düşey eksenli yerdeğiştirmeleri ifade eder. Dikayak ve Dikboy değerlerinin hesaplandığı trace için bu sapma açısı Alan\_Y’de hesaplanan 2. Semt açısı değerine eklenerek ya da çıkarılarak 3. Semt açısı hesaplanır (Ek A).



### Gömülü Obje İçin $X_{UTM}$ , $Y_{UTM}$ , $Z$ (elipsoidal) Koordinatlarının Üretilmesi

GPR ölçümü ile eşzamanlı yapılan GPS ölçümleri ve yukarıda açıklanan adımlar sonucunda GPR radargramı üzerinde tanımlı olan yansıma izlerinin (trace) tamamına ait  $X_{GPS}$ ,  $Y_{GPS}$  koordinatları hesaplanmıştır. Yükseklik değeri  $Z$  elipsoidal; GPS ölçülerinden alınan yükseklik bilgisi ile Alan\_AI 'da hesaplanan  $Z$  eksenindeki öteleme miktarı kullanılarak belirlenmiştir. GPR ölçümünün yapıldığı nokta ile gömülü obje arasındaki yatay mesafe (planimetrik koordinatlarla) hesaplanmış ve bu ölçüm bazının manyetik kuzeyle yaptığı semt açısı 3. Semt Açısı hesabı ile bulunmuştur. Bu aşamada yukarıda sıralanan bilgiler ışığında "Gömülü Obje" için jiroskop değerleri ve uzaysal dönme matrisi kullanılarak (Denklem 3.5, 3.6 ve 3.7)  $X_{UTM}$ ,  $Y_{UTM}$  ve  $Z$  koordinat değerlerinin hesaplanması mümkündür.

#### Seçilen detay noktasının $X_{UTM}$ koordinatının hesaplanması;

$$\begin{aligned} & \left( X_{GPS} + \sqrt{\left( (-\sin(\varphi) \times \cos(\omega)) \times (-H(\text{obje\_derinliği}) - h(\text{anten})) \right)^2 + \left( -\sin(\omega) \times (-H(\text{obje\_derinliği}) - h(\text{anten})) \right)^2} \right) \times \\ & \cos \left( \tan^{-1} \frac{180 \times (-\sin(\omega) \times (-H(\text{obje\_derinliği}) - h(\text{anten})))}{\pi \times (-\sin(\varphi) \times \cos(\omega)) \times (-H(\text{obje\_derinliği}) - h(\text{anten}))} \times \frac{\pi}{180} \right) \end{aligned} \quad (3.13)$$

#### Seçilen detay noktasının $Y_{UTM}$ koordinatının hesaplanması;

$$\begin{aligned} & \left( Y_{GPS} + \sqrt{\left( (-\sin(\varphi) \times \cos(\omega)) \times (-H(\text{obje\_derinliği}) - h(\text{anten})) \right)^2 + \left( -\sin(\omega) \times (-H(\text{obje\_derinliği}) - h(\text{anten})) \right)^2} \right) \times \\ & \sin \left( \tan^{-1} \frac{180 \times (-\sin(\omega) \times (-H(\text{obje\_derinliği}) - h(\text{anten})))}{\pi \times (-\sin(\varphi) \times \cos(\omega)) \times (-H(\text{obje\_derinliği}) - h(\text{anten}))} \times \frac{\pi}{180} \right) \end{aligned} \quad (3.14)$$

#### Seçilen detay noktasının $Z$ koordinatının ( $Z$ -elipsoidal) hesaplanması;

$$(Z)_{\text{object}} = Z_{GPS} + (\cos(\varphi) * \cos(\omega) * (H(\text{obje\_derinliği}) + h(\text{anten}))) \quad (3.15)$$

## BÖLÜM 4

---

### BULGULAR

Bu bölümde tez çalışmasının hipotezleri doğrulayabilmek amacıyla yapılan arazi çalışmaları yer almaktadır. Önceki bölümde izah edilen yöntem ve metotların hangi arazi koşullarında ne amaçla ve nasıl kullanıldığı bu bölümde anlatılacak, tezin hipotezlerine elde edilen bulgular yardımı ile araştırma soruları üzerinden cevap aranacaktır .

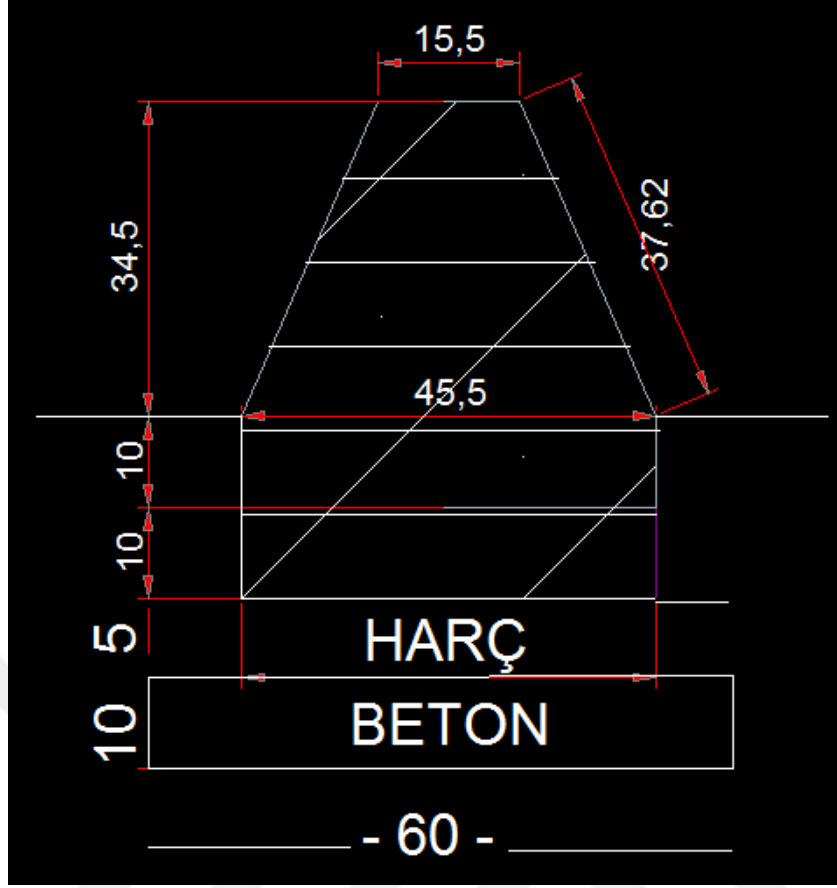
#### 4.1 GPR/GPS Kombinasyonu Uygulama Çalışması

Tezin ilk hipotezi olan “Yapı denetim sektöründe yaygın olarak kullanılan fiziki karot numunelerinin GPR/GPS Kombinasyon modeli sayesinde daha az maliyet ve daha kısa zamanda konum bazlı olarak üretilmesi mümkündür.” savını doğrulayabilmek için GPR/GPS Kombinasyonunu konu alan bir arazi çalışması yapılmıştır. Bu çalışmanın amacı, yüksek frekanslı yer radarı (GPR) ve CORS-GPS kombinasyonu yöntemi ile İstanbul İli Millet Caddesi üzerinde imalatı tamamlanan gömülü beton tabakasının konum bazlı sanal karotlarının belirlenebildiğini, laboratuvar ve arazi çalışmaları ile ortaya koymaktır. Bu amaçla öncelikle tip kesiti bilinen imalat güzergahı üzerinde asfalt yüzeyi üzerinden arazi çalışmaları gerçekleştirilmiştir. CORS-GPS ile eşzamanlı GPR verilerinin toplanmasında, Mala ProEx sistem serisi kontrol ünitesi ve 1200/1600 mhz merkez frekanslı antenler kullanılmıştır. Veriler işlendikten sonra beton tabakasına paralel uzanan profillere ait radargramlar üzerinde yansımış/saçılmış elektromanyetik (EM) dalga alanları irdelenmiştir. Böylece imalat tip kesiti bilinen fakat gerçekte imalatı yapılan beton miktarına dair ölçü ve bilgi bulunmayan cadde üzerindeki gömülü beton tabakasının üst ve alt katman sınırları derinlik ve konum bazlı

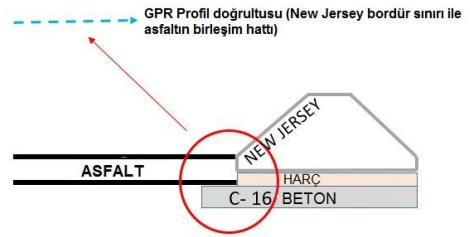
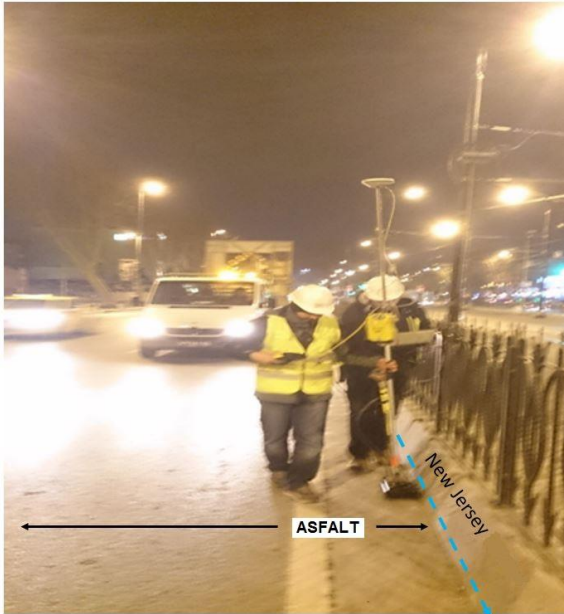
olarak belirlenebilmiştir. Sonuçlara göre işlenmiş radargramlar üzerindeki beton tabakasına ait yansımış/saçılmış dalga alanı konumları, gerçekte imalatı yapılan beton tabakasını tanımlamaktadır. Üst katman ve alt katmanların derinlik değerleri arasındaki fark; beton tabakasının kalınlığını ifade etmektedir. Söz konusu imalata dair yeni beton tabakası genlik bilgileri ışığında aynı alanda mevcut bulunan eski beton katmanı, harç veya asfalt gibi farklı özelliklerdeki yüzeylerden ayırt edilebilmiştir. Çalışmanın sonucunda elde edilen 511 adet hasarsız karot numunesi üzerinden yapılan hesaplamalar ile İstanbul Büyükşehir Belediyesi kontrollüğünde yüklenici firmaya ödenecek meblağı belirleyen imalat metrajı belirlenmiş, bu sayede imalatın fazla ödenmesi halinde karşılaşılabilecek "haksız kazanç sağlama" ya da tamamen kesinti yapılması sonucu doğabilecek "görevi kötüye kullanma/kötü niyet" temalı kamusal hukuk problemleri çözüme kavuşmuştur.

#### Ön Hazırlık Aşaması:

Araştırmanın ana problemi; yeni beton imalatının bulunduğu bölümlerin imalat bulunmayan bölümlerden ayırt edilmesi ve söz konusu imalata dair beton tabakasının miktarının belirlenmesidir. Arazi çalışması yapılmadan önce ölçüm için uygun profil hattını belirlemek amacıyla imalat tipkesiti incelenmiştir. Yapılan ön araştırmada; New-Jersey imalatlarının Millet Caddesi üzerindeki Bağcılar-Kabataş Hafif Metro Hattı hattının sağında ve solunda olmak üzere çift şerit halinde yapıldığı. Şekil 4.1' de görüldüğü gibi en üstteki fabrikasyon New-Jersey bloklarının altında kalan ve yol kotuna göre 8 ila 13 cm aralığında değişken olan asfalt, 7 cm harç ve 10 cm beton olmak üzere 3 gömülü katmanın bulunduğu, New-Jersey in üzerine yerleştirildiği C-16 beton katmanının ise mevcutta var olan C-25 yol betonunun üzerine dökülerek yol kotuna uygun olarak imal edildiği, dolayısıyla beton kalınlığının değişken olduğu anlaşılmıştır. İmalat tipkesiti incelendiğinde Beton tabakasının 45,5 cm genişliğinde olan New-Jersey bloklarından 15 cm daha geniş olacak şekilde 60 cm genişliğinde şerit bantlar halinde imal edildiği görülmüştür.



Şekil 4.1 İmalat Tip-Kesiti (Uzunluk değerleri santimetre birimindedir)



Şekil 4.2 Sınır elemanı ile asfaltın kesiştiği ölçüm hattı.

Şekil 4.2'de görüldüğü gibi asfalt sınırı ile New-Jersey bloklarının birleşim noktasının araştırmaya konu olan C-16 yeni beton tabakası olduğu ve GPR ölçmelerinin New-Jersey'in oturma alanının dışına taşan bu 10 cm lik hat üzerinde gerçekleştirilebileceği anlaşılmıştır. Beton tabakasının alt sınırının yeryüzeyinden yaklaşık olarak 0,4 m civarında sığ bir derinlikte olduğu görüldüğünden, mümkün olduğu kadar yüksek frekanslı bir GPR ile çalışılması gerektiğine karar verilmiştir. Bu sayede yüksek çözünürlükte radargramlar üreterek araştırmaya konu olan C-16 beton tabakasını; kontrakt halde bulunduğu mevcut C-25 beton yol betonundan genlik farklılığı ile ayırt edebilmek amaçlanmıştır. GPR profillerinin güzergahı belirlendikten sonra araştırmanın diğer problemi olan; beton imalatının var olduğu bölümleri, imalat bulunmayan bölümlerden ayırt etmek ve hasarsız karot örneklerini koordinatlı şekilde haritalamak amacıyla ölçmelerin GPS destekli yapılması gerektiği düşünüldüğünden, GPR-GPS kombinasyonundan oluşan metodoloji tercih edilmiştir.

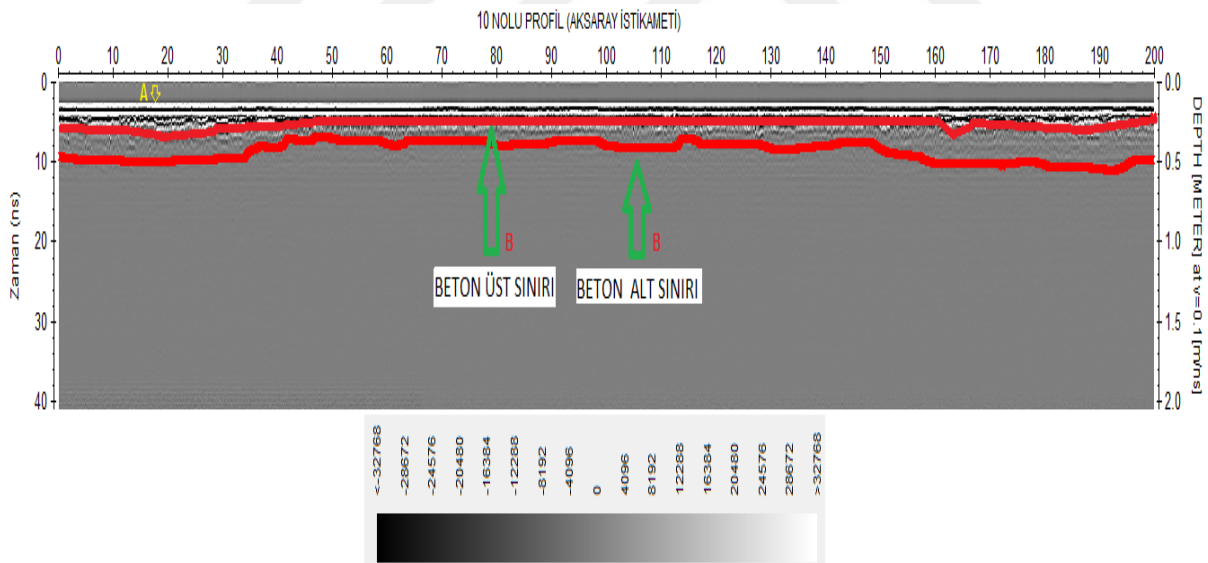
#### Arazi Çalışmaları:

Arazi çalışmaları İstanbul'un Fatih İlçesi, Millet Caddesi üzerinde gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.4). Burada İstanbul Büyükşehir Belediyesi tarafından yüklenici firmaya ihale edilerek gerçekleştirilen Millet Caddesi Düzenleme İnşaatı işi kapsamında Bağcılar-Kabataş Hafif Metro Hattı hattı sınırlarına döşenen New-Jersey imalatları yapılmıştır. New-Jersey Tip kesitinde 10 cm olarak belirtilen gömülü beton tabakası, mevcutta var olan C-25 yol betonu üzerine tesfiye mahiyetinde ve yol kotuna uyumlu olacak şekilde döküldüğünden şerit genişliği sabit olmakla birlikte beton kalınlığı değişken olduğundan kullanılan beton miktarı bilinmemektedir. İmalatların 24 saat kesintisiz sürdürülmesi ve gece yapılan imalatların nivelman, şenaj gibi klasik ölçme yöntemleri kullanılarak takip edilememesi sebebiyle değişken beton katmanının ortalama kalınlık değeri belirlenememiştir. Çalışmada öncelikli amaç cadde boyunca beton imalatının hangi kısımlarda var olduğunu, konumunu ve nicel büyüklüğünü bir uzaktan algılama teknolojisi olan GPR ve Küresel Konum Belirleme sistemi GPS yardımıyla tanımlayabilmektir. Arazi çalışmalarını gerçekleştirmek için cadde üzerinde ön çalışma aşamasında belirlenen ölçüm hatları üzerinde 36 profilden oluşan ölçümler GPS verileri ile eşzamanlı olarak Mala ProEx serisi GPR sistemi ve bu sistemle uyumlu 1200/1600 mhz kapalı anten kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Şekil4.3'te profillerin bulunduğu ölçüm hattının cadde üzerindeki konumlarını görülmektedir. Hız analizi sonucunda ortamın Elektromanyetik dalga hızı 0,0995 m/ns olarak bulunmuştur. Araştırmaya konu olan beton

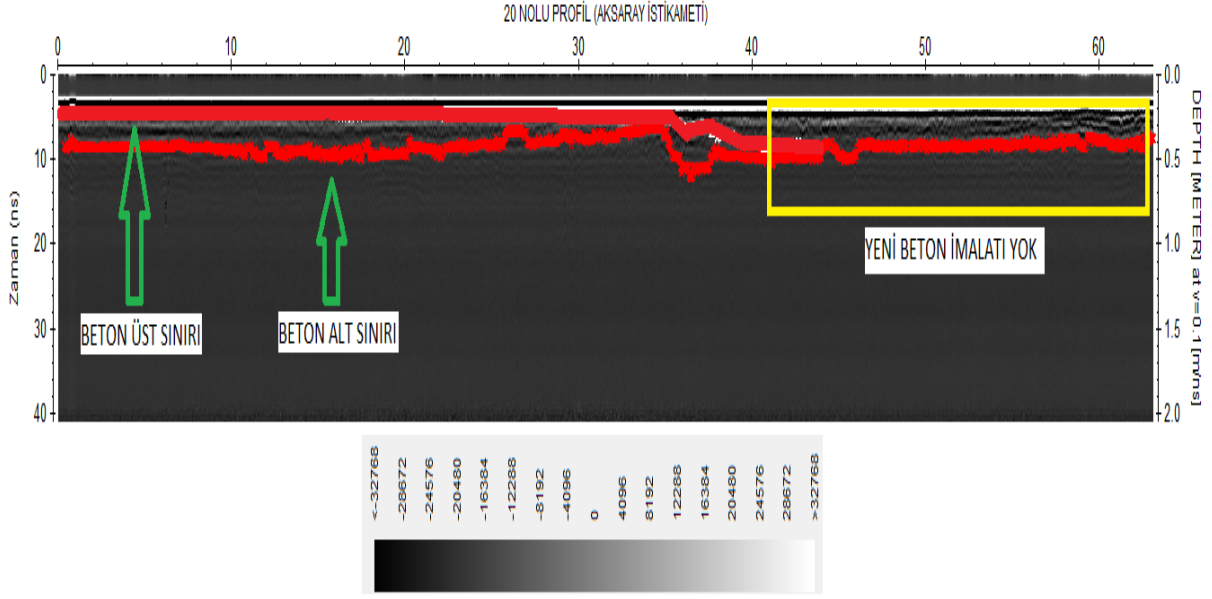
imalatını gösteren ve cadde boyunca uzanan profillere ait radargram örnekleri Şekil 4.4 ve Şekil 4.5 ile gösterilmektedir.



Şekil 4.3 İstanbul İli- Millet Caddesi üzerinde sağ ve sol şeritte yer alan ölçüm profilleri



Şekil 4.4 10 No'lu Profile ait Radargram (Tamamında yeni beton imalatına rastlanılan ve genlik farkıyla ayırt edilebilen profil örneği- Beton Üst ve Alt sınırları - İletilen dalga Alanı (A) Saçılan Dalga Alanı (B) )



Şekil 4.5 20 No'lu Profile ait Radargram (Kısmen yeni beton imalatı bulunan ve imalat bulunmayan kısımlara dair beton sınırları görülmektedir.)

Laboratuvar Çalışması:

Toplanan verilerin işlenmesinde Reflex-Win V.3.5 yazılımı kullanılmıştır. Veri işlem aşamasında sırasıyla;

- 1) Sıfır zamanın düzenlenmesi (Time Zero Correction)
- 2) Yüksek geçişli gürültü filtrelemesi (Dewow)
- 3) Ortalama değer filtrelemesi (Substracting Average)
- 4) Dalga genlik yükseltme filtrelemesi (Gain)
- 5) Frekans bandı geçişi (Frequency Band Pass)

İşlemleri uygulanmıştır. Derine doğru yapay olarak yansıma anomalisi düşüren yeraltı oluşumlarının (farklı genlik kontrastına sahip yapısal elemanların) etkileri ölçümlerden derinlere doğru şiddeti artan ve duruma özel tasarlanan logaritmik negatif genlik fonksiyonları ile azaltılarak çıkarılmış, bu sayede yüksek genliğe sahip metal tesisat ve donatıların yer içine doğru bıraktıkları gölgeleme etkileri (shadow effect) büyük ölçüde temizlenmiştir. Son olarak yeraltı beton tabaka sınırları odaklanması adımıyla ayrıca tüm GPR profilleri için migration odaklanma filtresi de uygulanmıştır. Arazide toplanan GPR verileri CORS-GPS ile eşzamanlı olarak toplanmış ve CORS-TR referanslı çalışan GPS donanımının ortalama konum hatası  $\pm 2$  cm olarak ölçülmüştür. Reflex-Win yazılımı



kullanılarak gpr verileri ile GPS verilerinin entegrasyonu sağlanmıştır. Hız analizi sonucu beton tabakasının Elektromanyetik dalga hızı 0,12 m/ns olarak bulunmuştur. Elektromanyetik dalga hızı radargramlar üzerindeki gerçek bir hiperbol anomalisi ile matematiksel olarak hızı belirli bir hiperbolle karşılaştırılarak elde edilmiştir. Radargramlara ait hız ve zaman bilgisi kullanılarak basit " $\text{derinlik}=(\text{hız} \times \text{zaman})/2$ " denklemi ile belirlenen derinlik bilgisi tip kesitle karşılaştırılarak hız değeri doğrulanmıştır. İşlenmiş profil verilerine ait radargramlarda (2B radar kesitlerinde); yatay eksen profil yönü üzerindeki uzaklık değerini, dikey eksen ise sinyalin geliş gidiş zaman değerlerini göstermektedir (Şekil 4.5).

Arazi çalışmaları İstanbul ilinin en işlek caddelerinden biri olan Millet Caddesi üzerinde yapıldığından, trafik yoğunluğunun nispeten daha az olması düşünülerek 25/4/2015 tarihinde gece 00:30 civarında başlatılmıştır. 26/4/2015 tarihinde yoğun yağış olması ve ölçümlerin olumsuz etkilenmesi endişesiyle çalışma ertelenmiş, ölçüm hattının geri kalan bölümünün ölçülmesine 27/4/2015 tarihinde yine gece 00:30 da başlanılarak devam edilmiş ve arazi çalışması aynı gün tamamlanmıştır. İş güvenlik tedbiri olarak çalışma süresince çakarlı araç görevlendirilmiş ve ölçüm ekibinin güvenliği sağlanmıştır (Şekil 4.6).

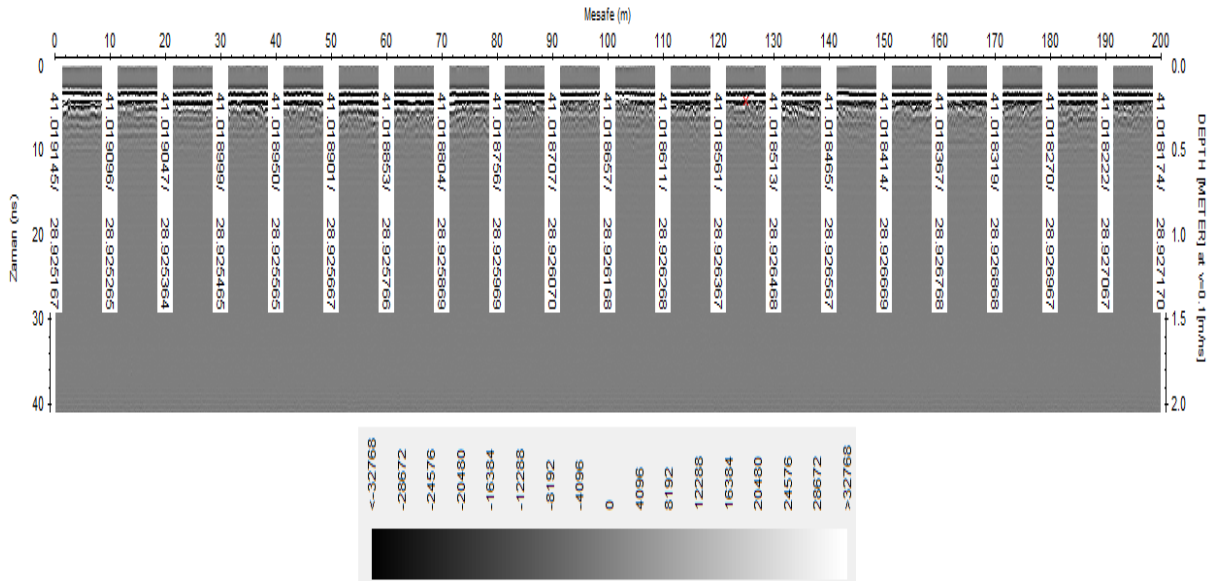


Şekil 4.6 Arazi çalışmaları süresince iş güvenlik önlemi olarak Çakarlı Trafik Aracı kullanılmıştır.



## Çalışmaların Değerlendirilmesi:

Çalışmalar sonucu elde edilen radargramlar üzerinde konum, büyüklük ve cinslerin değerlendirilmesinde GPR verileri ile GPS verileri birlikte kullanılmıştır (Şekil 4.7).



Şekil 4.7 GPR/GPS entegrasyonu sağlanmış radargram örneği.

Şekil 4.4, Aksaray istikametinde 10 no'lu profil üzerinde toplanmış verilere ait radargramları göstermektedir. Genel olarak beton katmanına rastlanmayan profil örneği Şekil 4.5'te sunulmuştur. Bu radargram üzerinde tanımlanan yüzeydeki verici antenden saçılan çok yüksek frekanslı Elektromanyetik dalga enerji kaynağı alanın yüzey boyunca homojen asfalt yüzeyi üzerinde ilerleyerek alıcı antene ulaşan Elektromanyetik dalga alanı A ile beton katmanının üst ve alt sınırlarından saçılan dalga alanları B ile gösterilmektedir (Şekil 4.4). (A) ve (B) dalga alanları tüm profillerde görülmekte olup genlik farklılıkları dikkate alınarak belirlenen sınırların asfalt, harç, ya da mevcut C-25 yol betonu gibi diğer gömülü katmanlarla ilişkisi bulunmamaktadır.

Laboratuvar çalışmalarında radargramlar üzerinde beton tabakasının değişken kalınlıklarının aynı faz değerindeki radar izleri birleştirilerek oluşturulan alt ve üst katman sınırları arasındaki farktan yola çıkılarak hesaplanmıştır. Araştırmanın esas amacı düşey katman kalınlığını belirlemek olduğundan radargramda işaretlenen hedef obje konumunun alıcı ve verici anten çiftleri arasındaki sabit mesafenin yarısı kadar konumsal sapmaya maruz kaldığı

teorik olarak bilinse de desimetre mertebesindeki bu yatay konum hatası gözardı edilmiştir. Katman derinliğinde herhangi bir sapma veya kayıklık söz konusu değildir. Farklı profillerde ardışık katmanlar karşılaştırıldığında aynı derinlik değeri elde edilebilmektedir. Gömülü her bir katmanın cinslerini belirlemek için kullanılan en etkin yöntem genlik büyüklüğü ve polaritelerinin araştırılmasıdır. Bir nesneden yansımış veya saçılmış dalganın genlik değişiminde ilk gözlenen genlik pozitif ise polaritesi pozitif, ilk gözlenen genlik değeri negatif ise polaritesi negatiftir. Polarite değişimini gözlemlemek için öncelikle Şekil 4.4'te (A) ile tanımlanan doğrudan yansıyan dalga alanının polaritesi belirlenir. Bu ilk adımda doğrudan gelen dalga alanının sıfır zamanındaki genlik bilgisinin rengi, genlik renk ölçeğinde pozitif ise pozitif, negatif ise polaritesinin negatif olduğu anlamına gelmektedir. Buna göre, laboratuvar çalışmalarına ait radargramlarda doğrudan gelen dalga alanı polaritesi pozitifdir. İkinci adımda gömülü nesneden yansımış veya saçılmış dalga alanı polaritesi, genlik bilgisinin ilk rengi yine genlik-renk ölçeğinden karşılaştırılarak bulunur. Doğrudan gelen dalganın polaritesi ile nesneden yansımış/saçılmış dalga alanının polaritesi aynı ise polaritede bir değişim olmadığı anlaşılır. Farklı ise polaritede bir değişiklik olmuştur. Polaritenin aynı veya farklı olmasının nedenini ve genlik bilgisini, en basit şekilde, gömülü katmandan yansımış/saçılmış dalganın yansımaya katsayısı açıklamaktadır.

Yansımaya katsayısı gömülü beton tabakasına dik gelen bir dalga için aşağıdaki gibidir;

$$R = \frac{V_2 - V_1}{V_2 + V_1} = \frac{\sqrt{\epsilon_1} - \sqrt{\epsilon_2}}{\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2}} \quad (4.1)$$

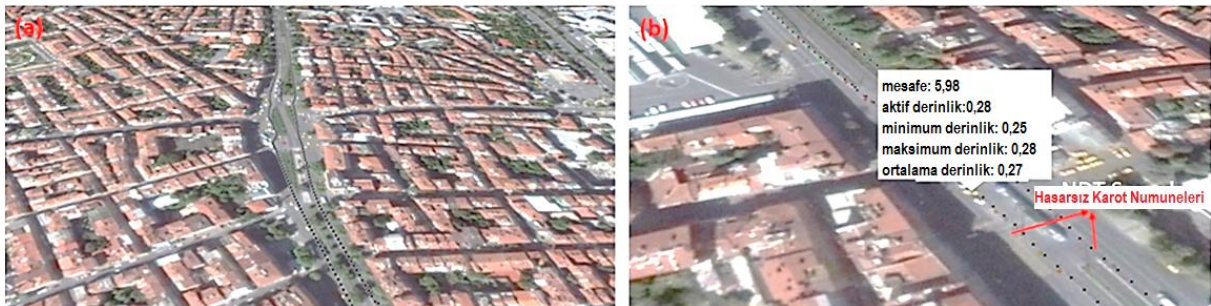
Burada  $V_1$  ve  $\epsilon_1$  sırasıyla; betonun içinde bulunduğu ortamın Elektromanyetik dalga hızını ve dielektrik katsayısını,  $V_2$  and  $\epsilon_2$  ise sırasıyla; betonun Elektromanyetik dalga hızını ve dielektrik katsayısını temsil etmektedir. Gelen dalga beton tabakasına çarptığı anda genliğin yansımaya katsayısı ile çarpımı sonucu elde edilen genlik değeri kadar yansıyarak/ saçılarak geri döner ve tüm alıcı noktalarındaki varış zamanına göre kaydedilirler. Bu dalgalar yansımış/saçılmış elektromanyetik dalga alanı olarak tanımlanırlar. Yansımaya katsayısı hızlara göre değerlendirildiğinde, beton tabakasına ait elektromanyetik dalga hızı ortamın elektromanyetik dalga hızından büyükse yansımaya katsayısı pozitif olmaktadır. Bu durum yansıyan, saçılan dalganın polaritesini değiştirmeyeceği, doğrudan gelen dalganın polaritesi

ile aynı olacağı anlamına gelmektedir. Tersi durumda ( $V_1 > V_2$  olması halinde) yansıma katsayısı negatif olmaktadır. Bu durumda yansıyan/saçılan dalga alanının polaritesi ile doğrudan gelen dalganın polaritesi değişmektedir. Yansımış/saçılmış dalga alanlarının genlik büyüklüğü ve polarite durumu gömülü tabakanın cinsini belirlemekte etkin olmaktadır. Genellikle ortamların elektromanyetik dalga hızı betonun elektromanyetik dalga hızından küçüktür. 1000 mhz frekansında bir dalganın RDP değeri 6 olan beton katmandaki h dalgaboyunun 0,122 m olduğu bilindiğinden elektromanyetik dalganın hızının ( $c = f \times \lambda$ ) 0,10 m/ns civarında olduğu anlaşılmaktadır (Conyers, 2004). Betonun içerisinde bulunduğu ortamdaki harç (kuru kum) ve asfalt gibi diğer katmanlara nazaran yüksek bir hız olduğundan beton için polarite değişimi teorik olarak beklenebilir. Nitekim yüzeyden itibaren ortalama 0,26-0,45 m derinlikte bulunan kontrakt beton katmanları diğer katmanlara göre yüksek genlik değerinde ve zıt (-) polaritededir. Beton katmanının diğer katmanlardan ayırt edilmesinde genlik ve polarite farklılığından yararlanılmıştır.

Sonuçta; Bağcılar-Kabataş Hafif Metro Hattı güzergahında, Millet Caddesi boyunca metro hattına gidiş ve geliş yönlerinde paralel uzanan New-Jersey sınır elemanlarının orutum hattında yapılan hasarsız tespit çalışması ile araştırmaya konu olan gömülü beton tabakasına ait radargramlar konum bazlı olarak üretilebilmiştir. Uygulama alanında genel olarak radar ölçüm şartlarını olumsuz etkileyecek herhangi bir bozunma zonu, negatif etkileşimli elektromanyetik dalga soğurucu veya genlik etkileyici bölge ile karşılaşılmasına rağmen, ölçümler sırasında yer altında tespit edilen çok sayıda gömülü tesisatın bulunduğu anlaşılmaktadır. Laboratuvar çalışmaları esnasında araştırma konusu dahilinde bulunmayan bu tesisatlar sonuçlardan çıkarılmış analizlerde yalnızca araştırmaya konu olan beton tabakasına odaklanılmıştır. İnilen maksimum derinlik sınırı yaklaşık 1,9 metre olarak göze çarpmaktadır. Veri-işleme, radargramlara filtrelerin uygulanması, çakıştırma, yükseklik düzeltmeleri ve dış kaynaklı diğer etkilerin ölçümlerden elenmesi sonucunda, etkin çözünürlüklü derinliğin profillerin çoğunda ortalama 1,6 metre aralığında olduğu görülmüştür. GPR sonuçlarının değerlendirilmesi aşamasında gerçekleştirilen yeraltı beton seviyesi üst okumalarında, birbirini takip eden 2B radargramların manuel ve otomatik faz/genlik takibi yoluyla işaretlemesi yapılmış, bu yöntemle beton tabaka derinlik ve geometrileri ayrıca kontrol edilmiştir. İstanbul İli, Fatih Millet Caddesi üzerinde, yaklaşık 2,5 km uzunluğundaki cadde alanında, metro hattına paralel gidiş ve geliş yönlerinde

gerçekleştirilen GPR yeraltı haritalama aşamalarının sonuçları genel olarak incelendiğinde aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

Alanın genelinde New-Jersey tipi sınır elemanları altında kalınlığı değişken (ortalama 0,07 ile 0,15 m) beton tabakasının varlığı tespit edilmiştir. Cadde boyunca değişken derinliklerde (0,3-0,4 m) gözlemlenen söz konusu beton tabakaların bazı kısımlarda altta bulunan bir diğer yüksek genlikli tabaka ile çakışık vaziyette olduğu görülmüştür. Diğer bölgelerdeki üst katman beton ile benzer polarite ve genlik özelliklerine sahip sözkonusu alt katmanın, eski uygulamalar sırasında dökülen C-25 yol betonu olduğu tahmin edilmektedir. Alanın gidiş ve geliş yönlerinde tamamında ve asfalt yol üzerinde ölçülen 5277,56 metre profil mesafesinde toplamda ortalama 4900 metre uzunluğunda yeraltı beton tabakası haritalanmıştır. Ancak bu tabakaların yaklaşık %15 gibi bir oranı (735 metre), ortalama 0,5 metre derinlikte olan ve yukarıda değinilen eski uygulamalarda dökülen C-25 yol betonu tabakasıdır. Bu 735 metrelik mevcut beton tabakasının ise  $5277,2-4900= 377,2$  metrelik bölümünde hiçbir beton imalatı bulunmamaktadır. Sözkonusu 735 metrelik güzergahta yeni beton imalatı bulunmamaktadır. Etkin araştırma derinliğine (yeryüzeyinden 0,4 m derinlik) dek yapılan araştırmalarda tespit edilen ve araştırmaya konu olan Millet Caddesi Düzenleme İnşaatı İş'i kapsamında imalatı yapılmış yeni beton tabakalarının toplam mesafesi =  $4900-735 =4165$  metre olarak göze çarpmaktadır. Profil hatları boyunca gidiş ve geliş istikametinde her 10 metrede bir olacak şekilde 511 sanal karot üretilmiş ve araştırmaya konu olan 4165 metrelik beton tabakasının ortalama kesit kalınlığı 13,47 cm olarak bulunmuştur. Her bir sanal karot örneğinin UTM ülke koordinat sistemindeki konumları GPR/GPS kombinasyonu sayesinde konumsal olarak yatayda  $\pm 2$  cm hata ile bilinmektedir (Şekil 4.8).



Şekil 4.8 GPR ölçümleri sonucu üretilen NDT (Hassarsız Karot) örnekleri

Fakat yapılan ölçüm sonuçlarına göre araştırmaya konu olan beton tabakası bir başka gömülü beton tabakası ile çakışık olduğundan, birbirine yakın di-elektrik geçirgenlikleri (RDP) sebebiyle ortalama beton tabakası kalınlık değeri (düşeyde)  $\pm 3$  cm duyarlılıkla belirlenebilmiştir. Bu durum hesaplanan ortalama değerin 10,47 ile 16,47 aralığında olduğu anlamına gelmektedir. New-Jersey tip kesitinde belirtilen beton imalatı 10 cm dir. Elde edilen sonuçlar beton imalatı tespit edilen 4165 metrelik bölümdeki ortalama beton kalınlığı; tip kesitte belirtilen metrajın üzerinde beton imalatı yapıldığını doğrulamaktadır. Fakat kamu yararı ve şartname gereği tipkesitte 0,1 m (10 cm) olarak ifade edilen değer kesin hesap çalışmalarına esas alınmıştır (Şekil 4.8).

Beton imalatının var olduğu bölümlerde sınır elemanlarının tip kesitinde belirtildiği gibi New-Jersey oturum alanına şerit halinde yapıldığı ve 0,6 m genişliğinde olduğu bilinmektedir. Bu durumda imalatı yapılan beton miktarının  $4165 \times 0,6 \times 0,1 = 249,9$  m<sup>3</sup> olduğu sonucuna varılmıştır. Bu veriler ışığında bir inşaat çalışmasında, klasik harita mühendisliği ölçme yöntemleri ile takip edilemeyen gömülü beton imalatlarının miktarı belirlenerek kesin hesap dosyası düzenlenmiştir. Profil güzergahlarını ve sanal karot örneklerini gösterir paftalar ataşmanlar halinde kesin hesap dosyasına dahil edilmiştir. Böylelikle bir kamusal hukuk problemi, idare aleyhine gelişebilecek herhangi bir hukuksal yaptırıma mahal bırakmaksızın çözüme kavuşmuştur.

#### **4.2 GPR/GPS/İnkilometre Kombinasyonu Uygulama Çalışması**

Çalışmanın birinci amacı tezin 2 no'lu hipotezi olan "Eğimli arazi koşullarında Klasik GPR tekniğinde odometrenin tekerlek devir sayısı ile ölçülendirilen baz uzunluğu hatası GNSS/GPS teknolojisi yardımıyla planimetrik koordinat farkları kullanılarak yataya indirgenebilir. "GPR/GPS Kombinasyonu Modeli ile Klasik GPR tekniğine kıyasla istatistiksel anlamda daha doğru konum verileri üretebilir." Önermesinin doğruluğunu araştırmak amacı ile boyutları önceden bilinen gömülü obje üzerinde Klasik GPR ve GPR/GPS Kombinasyon Metodunu karşılaştırmak, konum verilerinin modellemeye olan etkilerini araştırmaktır. Ölçüm profili üzerinde yansıma izleri (trace) arası mesafe ölçümü odometre ile yapılan Klasik GPR yönteminin GPS ile kombinasyonu sayesinde profil mesafesinin planimetrik koordinatlarla yataya indirgenmesini sağlamak ve gömülü objenin bilinen boyutlarıyla karşılaştırmaktır. Bu sayede hipotezin araştırma soruları olan GPR/GPS Kombinasyon Modeli Klasik GPR



yöntemine kıyasla gömülü obje ya da katman sınırlarını belirlemede ne ölçüde başarılı olduğu ve yöntemin başarısının hangi parametrelere bağlı olarak değiştiği irdelenecektir.

Çalışmanın ikinci amacı ise tezin 3 no'lu hipotezi olan "Güncel Jeoradar tekniğinde eğimli arazilerde topografik değişkenlikten kaynaklanan anten oryantasyonunun neden olduğu gömülü objenin konumlandırma ve modellenmesi üzerindeki bozucu etkilerini GNSS/GPS ve Dijital İnklinometre kullanılarak geliştirilen "Jiroskopik Düzeltme Modeli" yardımıyla giderilebilir." önermesinin doğruluğunu araştırmaktır. Bu sayede hipotez 3'ün araştırma soruları olan Jiroskopik Düzeltme Modelinin Klasik GPR yöntemine ve GPR/GPS Kombinasyon Modeline kıyasla gömülü obje ya da katman sınırlarını belirlemede ne ölçüde başarılı olduğu, Jiroskopik Düzeltme Modelinin istatistiksel başarısının gömülü obje ya da katman araştırmasının hangi parametrelerine bağlı olarak değiştiği ve önerilen yöntemin avantaj ve dezavantajlarının neler olduğu gibi araştırma sorularına cevap aranacaktır.

Bu amaçlar doğrultusunda İstanbul İli, Maltepe ilçesi, Orhangazi Şehir Parkında bulunan gömülü su depoları çalışma alanı olarak seçilmiştir (Şekil 4.9).



Şekil 4.9 Maltepe Orhangazi Şehir Parkı ve Gömülü Su Depoları

Söz konusu park 2010-2013 yılları arasında İstanbul Büyükşehir Belediyesi tarafından deniz dolgusu ile oluşturulmuştur. Gömülü su depoları deniz dolgusu tamamlandıktan sonra inşa edilmiştir. Aynı boyutta ve yan yana olan 3 su deposu ve 1 makine dairesi bulunmaktadır. Mimari ve statik olmak üzere tüm proje detayları, aplikasyon noktaları mevcuttur.

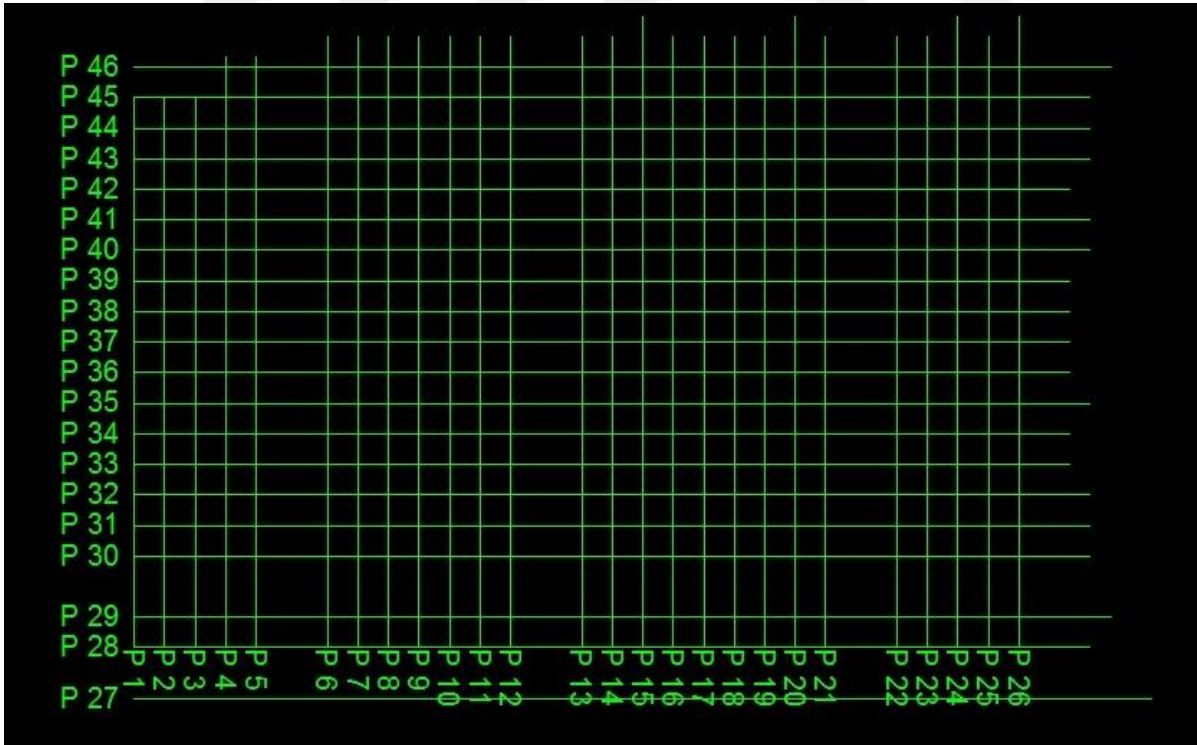
Dolayısıyla gömülü su depolarının geometrik boyutları detaylı olarak bilinmektedir. Profil hatları oluşturulurken gömülü su depolarının bilinen aplikasyon koordinatları göz önüne alınarak mümkün olduğunca şev eğimlerini de içerecek şekilde fazladan ölçü alınmasına özen gösterildi. Dolayısıyla şekilde gösterilen 1, 2, 27, 28, 29 ve 46 no'lu profiller su depolarının oturma alanının dışındadır. Ölçümlerden sonra GPS koordinatları referansıyla oluşan profiller Şekil 4.10'de sunulmaktadır.

#### 4.2.1 Ön etüt çalışmaları

GPR ölçümlerinin 8.11.2016 Salı günü yapılması planlandı. 7.11.2016 tarihinde çalışma alanı kontrol edildi. Toprağın nem durumu, ortamda ölçümü olumsuz etkileyebilecek faktörler kontrol edildi. Ölçüm yapılmasına engel oluşturacak herhangi bir husus bulunmadığı görüldü.

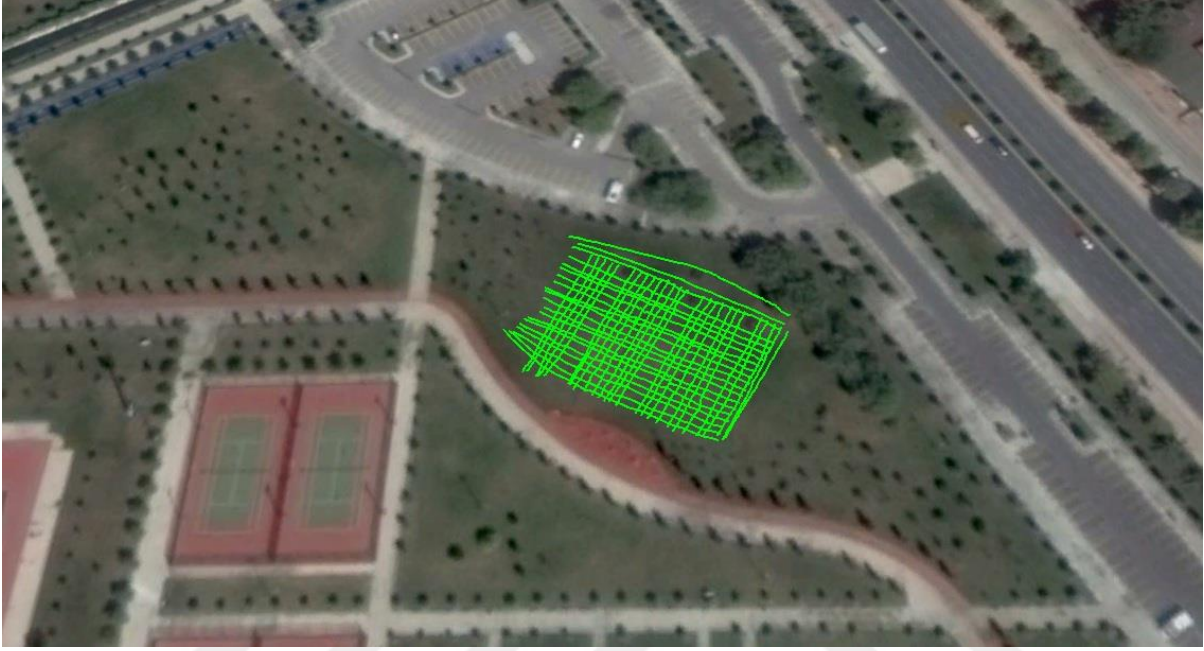
#### 4.2.2 Çalışma alanının oluşturulması

Ölçme modeli ara mesafeleri 1,5 m olan enine 30 ve boyuna 16 profilden oluşacak şekilde tasarlandı (Şekil 4.10).



Şekil 4.10 GPR ölçme modeli

Profil hatları oluşturulurken gömülü su depolarının bilinen aplikasyon koordinatları göz önüne alınarak mümkün olduğunca şev eğimlerini de içerecek şekilde fazladan ölçü alınmasına özen gösterildi. Dolayısıyla şekilde gösterilen 1, 2, 27, 28, 29 ve 46 no'lu profiller su depolarının oturma alanının dışındadır. Ölçümlerden sonra GPS koordinatları referansıyla oluşan profiller Şekil 4.11'de sunulmaktadır.



Şekil 4.11 GPR ölçüm profilleri

#### 4.2.3 İklim

GPR ölçüm çalışması 8.11.2016 tarihinde gerçekleştirilmiştir. Sonbahar aylarına rastlayan ölçüm çalışması esnasında hava sıcaklığı mevsim normallerinin üzerinde ve yağışsızdır. Ölçme esnasında ve ölçümden önce ortamdaki nem miktarı kontrol edilip toprağın kuru olduğu görülmüş olsa da yüzeyde kuru görünen katmanın derinlere inildikçe geçmiş yağışlardan nasıl etkilendiği bilinmemektedir.

#### 4.2.4 Jeoloji

Çalışma alanı denizden doldurma ile kazanılmış bir dolgu sahasıdır. Kıyı kenar çizgisinin deniz tarafında bulunduğundan nitelikli bir zemin değildir. Dolgu işlemi yaklaşık 2 m kotuna kadar hafriyat malzemesi kullanılarak oluşturulmuştur.



#### 4.2.5 Arazi Çalışmaları

Pilot alanların uygulaması

Maltepe Orhangazi Şehirparkında bulunan 3 lü su depolarının bulunduğu alanda 46 ölçüm profili için 1-26 numaralı profiller düşey, 27-46 kesitler diğerlerine dik şekilde yatay olarak uygulanmıştır. Tüm jeofizik ölçümler tam otomatik Mala marka ProEx serisi GPR donanımı ve kontrol ünitesi, 250Mhz merkez frekanslı kapalı antenlerle gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.11).



Şekil 4.12 GPR profillerinin ölçümü

İ.B.B Anadolu Yakası Park ve Bahçeler Müdürlüğünden alınan çalışma izni şartları göz önünde bulundurularak yersel işaretleme yapılmadı. Yatay ve düşey GPR Ölçme Profillerinin başlangıç noktasını belirleyen aks için 50 metrelik çelik şerit metre zemine yerleştirildi. Profiller çelik şerit metre aksının her 1.5 metrede bir olacak şekilde mümkün olduğu kadar lineer doğrultularla ölçüldü (Şekil4.10). Profillerin toplam uzunluğu 1714.2 metredir.

Ölçüm parametreleri her 0,025 metrede (2,5 cm) bir örnekleme alacak şekilde ayarlanmış, ayrıca seçilebilirliğin artırılması amacıyla tüm profillere ölçüm anında %25 oranında ve gerçek zamanlı AGC (Automatic Gain Control) genlik ayarlaması yapılmıştır.

#### 4.2.6 Eşzamanlı GPR - GPS ve İnklinometre okumaları

Araştırmaya konu olan jiroskopik düzeltmenin gerçekleştirilebilmesi için gerekli olan jiroskopik açıların ölçümü ( $\phi$ ,  $\omega$ ) dijital inklinometre kullanılarak gerçekleştirildi. Jiroskopik açıların ( $\phi$  ve  $\omega$ ) kaydedilmesi ve bir o kadar da önemli olan senkronizasyonunun sağlanması amacıyla Twedge data logger yazılımı kablosuz bluetooth bağlantı kurularak kullanıldı. Aynı sistem saati ile kaydedilen GPR ölçümleri ve inklinometre okumaları bu sayede eşzamanlı olarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.13).



Şekil 4.13 GPR-GPS ve İnklinometre için data logger bağlantısı ve eşzamanlı veri kaydı.

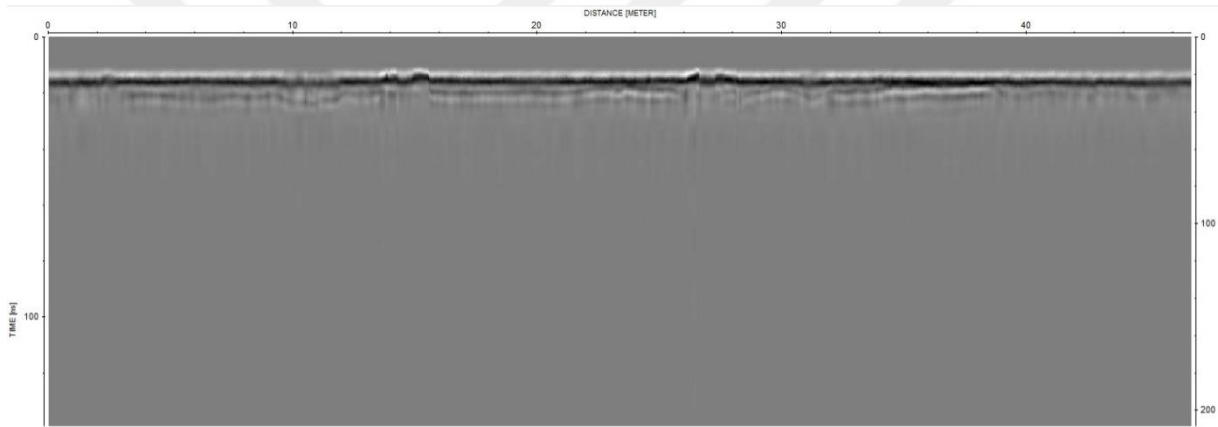
#### 4.2.7 GPR Radargramlarının İşlenmesi

Arazide toplanan GPR verisi, ofis ortamında değerlendirilerek yeraltı oluşumlarının karakteristiklerini gösteren kesit haritaları görsel olarak tanımlanabilir duruma ve yorumlamaya açık hale getirilmiştir. Arazide uygulanan ölçümlerin maruz kaldığı EM gürültü etkileri (araç sinyalleri, cep telefonları, telsiz vericileri, v.b. diğer istenmeyen dış etkiler) çeşitli filtreler kullanılarak temizlenmiştir. İşlenen 2 boyutlu (2B) GPR profilleri ilk olarak kendi içlerinde değerlendirilip yorumlanmış ve sonrasında koordinatlarıyla birleştirilerek 3 boyutlu (3B) yeraltı haritalarına çevrilmiştir.

Veri işlem kısmında, arazide uygulanan GPR yöntemi ile elde edilen radar profilleri işlenerek ayrı ayrı incelenmiştir. Oluşturulan her GPR profili için sırasıyla:

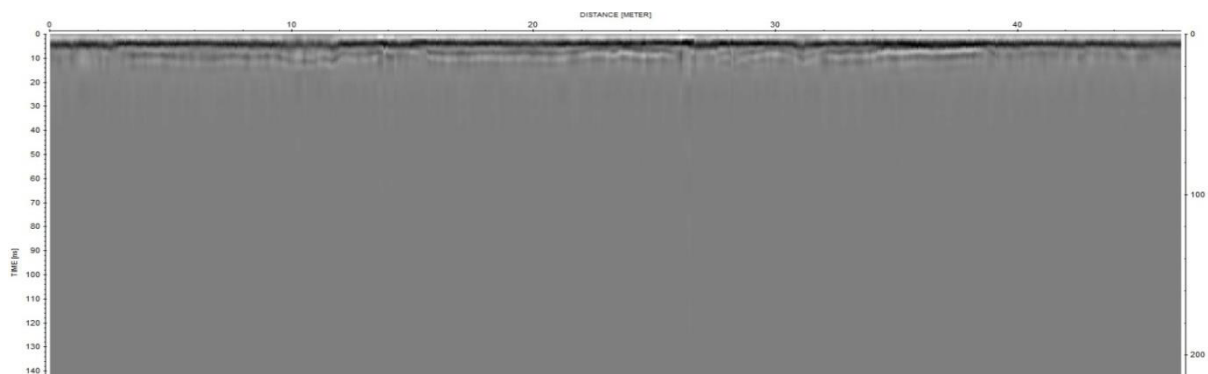
- (A) Hava/yansıma/topografik düzeltmesi (Static Correction) ,
- (B) Yüksek geçişli gürültü filtrelemesi (Dewow),
- (C) Zaman Sınırlaması (Time Cut)
- (D) Dalga genlik yükseltme filtrelemesi ve son olarak (Gain Function)
- (E) Frekans bandı geçişi (Background Removal)
- (F) Hız Düzeltmesi

işlemleri dikkatli bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Görsel olarak 40 no'lu ham profil üzerinde yapılan işlemlerin görüntüleri aşağıdaki gibidir (Şekil 4.14).



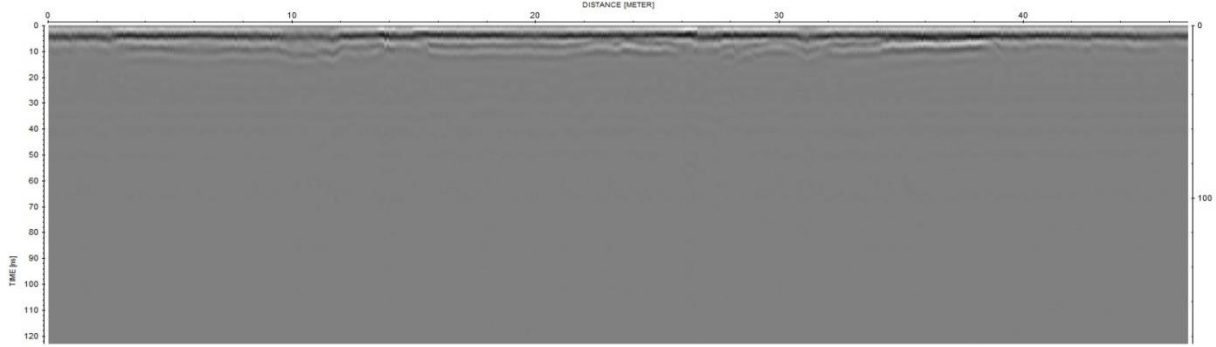
Şekil 4.14 40 no'lu Profile ait Ham (işlenmemiş) Radargram örneği

- (A) İlk varış zamanlarına ait düzeltmelerde (hava düzeltmesi) 12 ns'lik bant kullanılmıştır. Bu bant her bir iz üzerinden X yönündeki mesafelerde genlik penceresindeki ilk büyük değişime göre otomatik olarak seçilmiştir (Şekil 4.15). 11,57-12,28 ns lik bant aralığından ortalama 12 ns değeri kullanılmıştır.



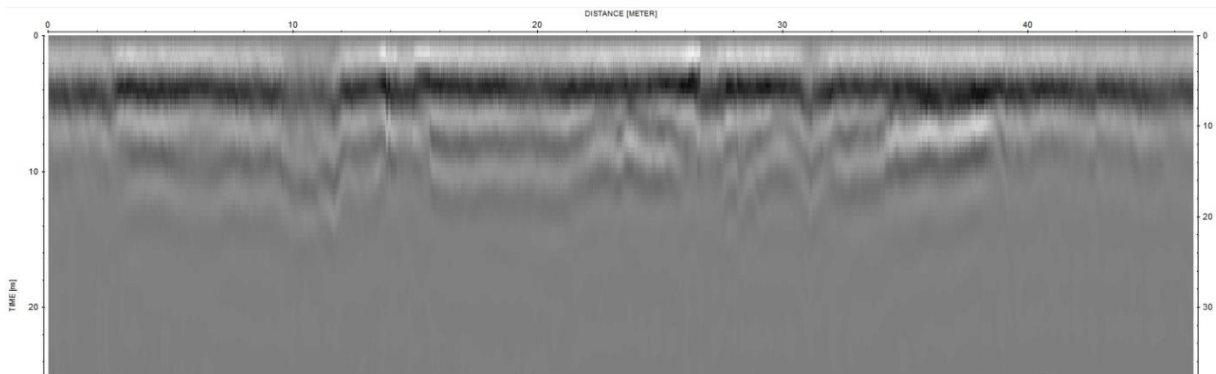
Şekil 4.15 40 No'lu Profile ait Static Correction – Hava Düzeltmesi

(B) Yüksek geçişli gürültü filtrelemesinde arazide kontrol ünitesinde tanımlı Dewow sinyal düzeltmesi dışında post-process olarak da 4 ns büyüklüğünde pencere ile ayrıca düzeltme işlemi gerçekleştirilmiştir. Tüm profillerde ve tüm izlerde gerçekleştirilen düzeltme işleminde orijinal ve ikincil dalgalar karşılaştırılarak düzeltmeler ayrıca göz ile de teyit edilmiştir (Şekil 4.16).



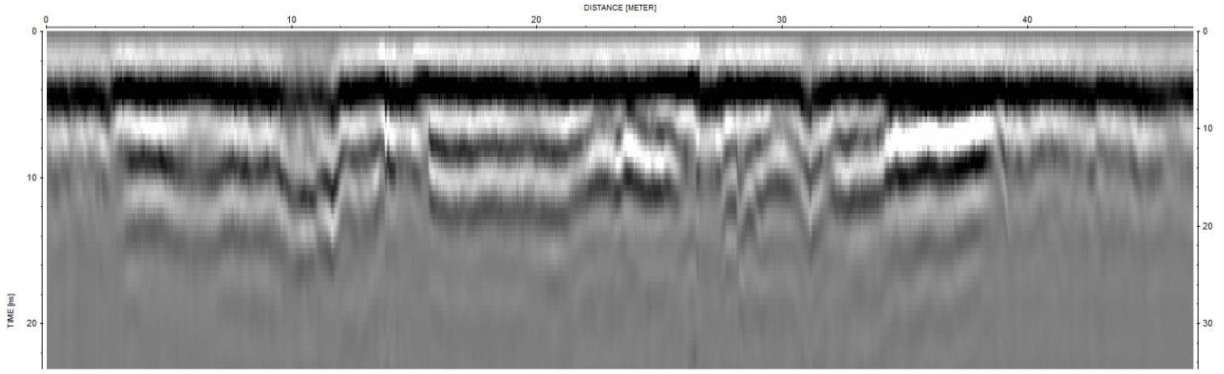
Şekil 4.16 40 No'lu Profile ait radargrama uygulanan Dewow işlemi

(C) Zamansal sınırlandırma yüksek genlikli anomalilerin bulunduğu data bölümünü veri bulunmayan derinliklerden ayırmak için kullanıldı. 50 ns ile sınırlandırılan radargram aşağıdaki gibidir (Şekil 4.17).



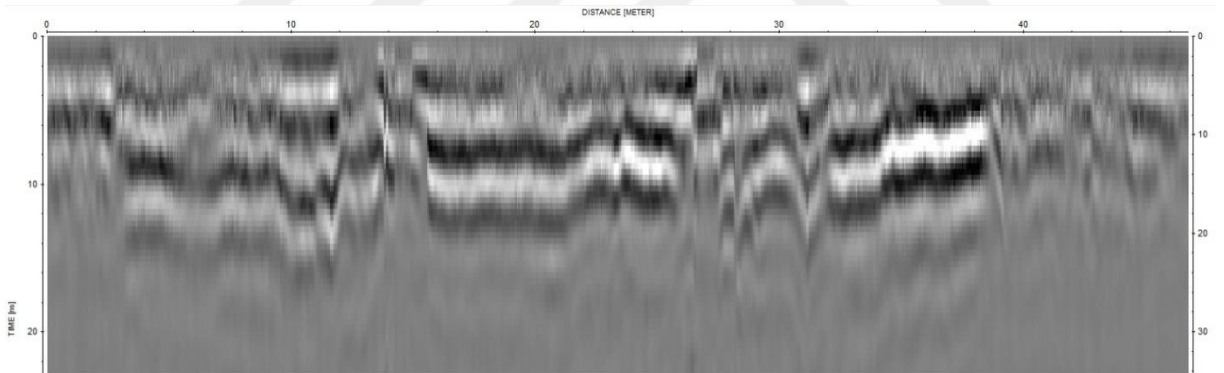
Şekil 4.17 40 No'lu Profile ait radargramda zamansal sınırlama (Time Cut) işlemi

(D) Genlik yükseltim işlemlerinde enerji bozunma türü filtre kullanılmıştır. İşlem sırasında her bir GPR profilinin tamamında/tüm izlerde gözlenen ve ortalaması (mean) hesaplanan Y eksenli enerji bozunum eğrisi ile uyumlu bir yükseltim eğrisi kullanılmıştır (Şekil 4.18). Bu aşamada boyut çarpanının 1 değerinden daha az alınması önerilmesine rağmen, orijinal genliklerdeki olası büyüme göz önüne alınarak çalışmanın amacına uygun bir şekilde çarpan 1 olarak seçilmiştir.



Şekil 4.18 40 No'lu Profile ait radargramda Genlik Artırımı (Gain Function)

(E) Frekans bandı geçişi filtrelemesi aşamasında frekans yöresinde ve her iz için ayrı ayrı çalışan konik tipi kosinüs filtreleme kullanılmıştır (Tukey). 4 limit tanımlı bu filtreleme tekniğinde, ölçümlerde kullanılan 250 Mhz merkez frekansına uygun olarak alt limit 100 Mhz, alt plato değeri 200 Mhz, üst plato 300 Mhz ve üst kesim limit değeri 400 Mhz olarak belirlenmiştir (Şekil 4.19).



Şekil 4.19 40 No'lu Profile ait radargramda frekans bandı geçişi filtrelemesi (Background Removal)

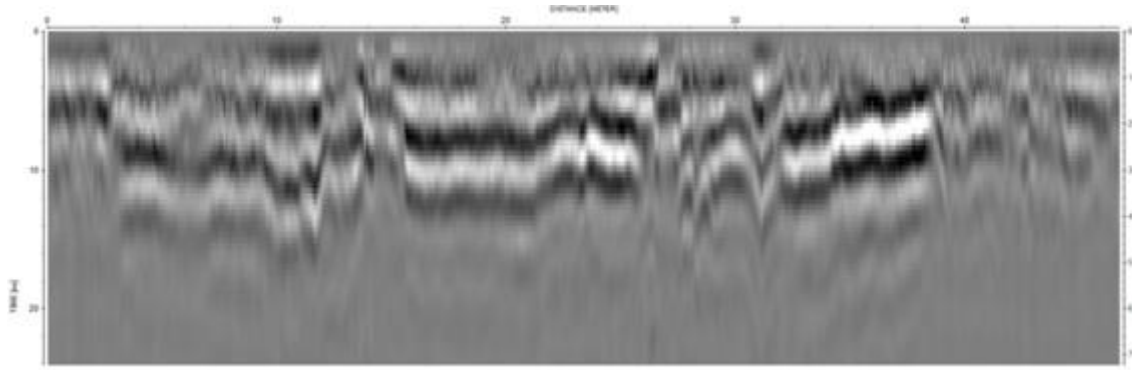
Son değerlendirmedeki zemin içi yapısal sınırlara odaklanılması adımında GPR profilleri için (migration) odaklanma filtresi de geleneksel olarak radargram işlemlerinde kullanılmalıdır. Derine doğru yapay olarak yansıma anomalisi düşüren modern zemin içi oluşumlarının (farklı genlik kontrastına sahip modern yapısal elemanların) etkileri ölçümlerden derinliğe doğru şiddeti artan ve duruma özel tasarlanan logaritmik negatif genlik fonksiyonları ile azaltılarak çıkarılır. Fakat bu çalışmanın amacı jiroskopik düzeltmenin yapay anomalilerin oluşumuna



olan etkilerini gözlemlemek olduğundan bu filtre kullanılmamıştır. Böylelikle yansıma hiperbollerini işaretlenerek jiroskopik düzeltmenin hiperbol geometrisini nasıl etkilediği görülecektir. Aynı işlemler 46 profil için ayrı ayrı uygulanmıştır.

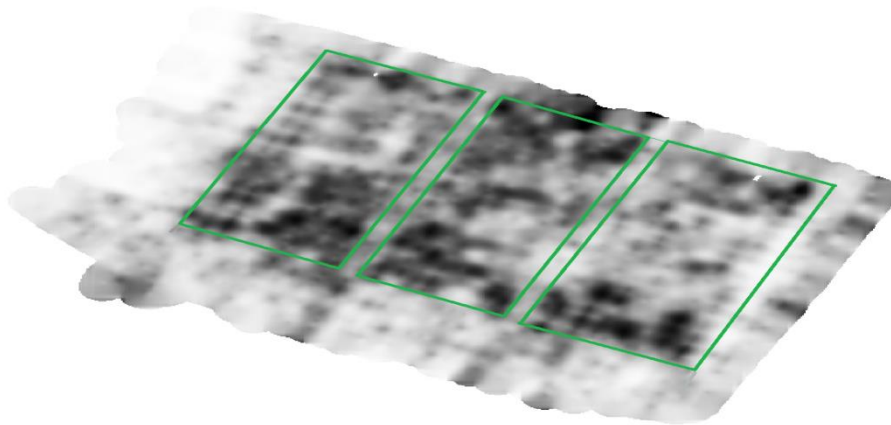
#### F) Hız Düzeltmesi

Gömülü objenin boyutları ve konumsal detayları bilinmektedir. Araştırmaya konu olan su depoları yüzeyden 0,75 cm derinde bulunmaktadır. Bu veriyi doğrulayacak şekilde hız değeri 0,6 m/ns olarak bulunmuş ve radargramın düşey eksenini belirten zaman çizelgesi derinlik değerlerine dönüştürülmüştür (Şekil 4.20).



Şekil 4.20 40 No'lu Profile ait radargramda uygulanan 0,1 m/ns lik hız düzeltmesi

İşlenen radargramlarla Reflex-w yazılımı kullanılarak oluşturulan 3-D model, Şekil 4.21'de görülmektedir. Yüzeyden itibaren 10 cm de bir alınan kesitlerde 8 numaralı kesitte gömülü depo sınırları görüntülenmektedir.



Şekil 4.21 Reflex-w yazılımı kullanılarak oluşturulan 3-D modelde 8 No'lu düşey kesit. (Yüzeyden 0,75-0,80 cm derinlikte bulunan kesitte gömülü su depolarının sınırları görülmektedir)

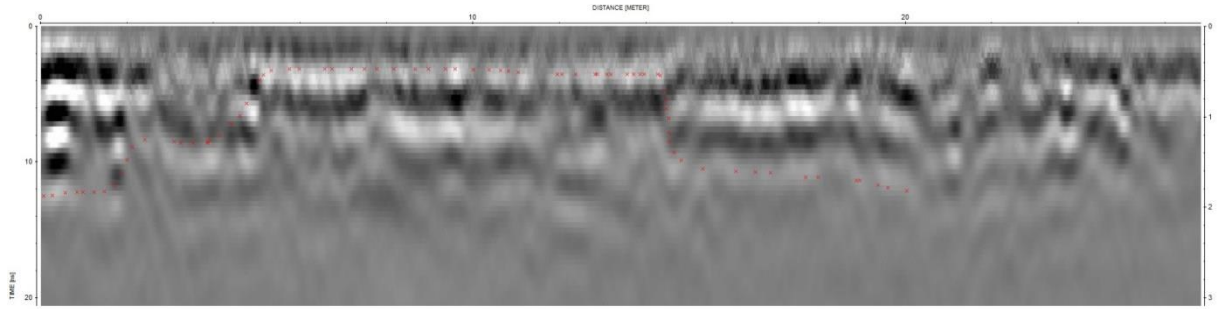
Yüksek Genlikli Anomalilerin İşaretlenmesi:

Önceki bölümde anlatıldığı şekilde işlenen radargramlar da arzu edilen anomaliler GPR/GPS veri tabanında işlenmek üzere işaretlenerek kaydedildi. Bu aşamada Reflex-W yazılımının genlik ölçeği kullanılarak yüzeye en yakın ve en yüksek genlikli anomaliler işaretlendi. Bu yüksek genlikli anomali araştırmaya konu olan gömülü su depolarının betonarme sınırlarıdır. 12000 ila 15000 genlik değerine sahip olan tabaka diğer anomalilerden kolaylıkla ayırt edilebilir durumdadır. Genlik değerlerindeki +/- işaret değişikliği polarite farklılaşmasından oluşmaktadır ve işareten bağımsız olarak en yüksek genlik değeri su depolarının betonarme zeminini ve tavan sınırlarını ifade etmektedir. Bu yüksek genlikli anomalilerin radargram profilleri üzerinde işaretlenmesi "Reflex-W" yazılımı kullanılarak 46 profil için ayrı ayrı yapılmış ve ".pck" uzantılı (pick) işaret dosyası olarak "trace no", "derinlik" ve "mesafe" verileri ile kaydedilmiştir. Bu adımların sonunda araştırmaya konu olan su depolarının Klasik GPR modeli oluşturulmuştur.

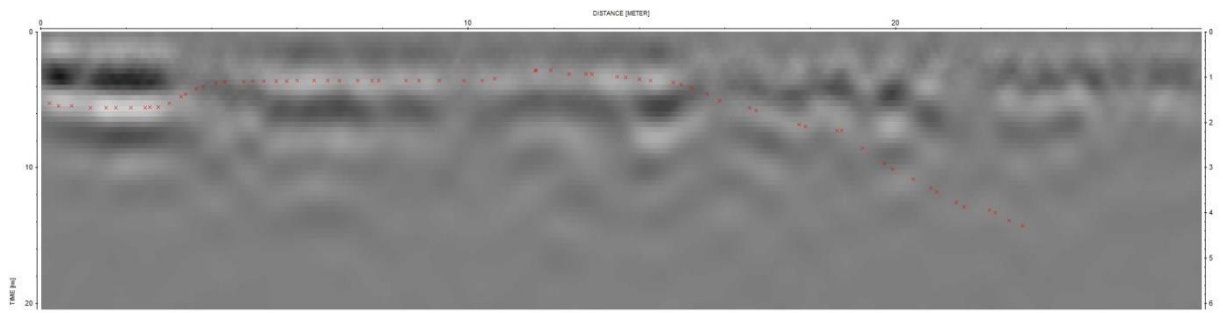
#### **4.2.8 Modellerin Oluşturulması**

Klasik GPR Modeli GPR radargramından ölçülen mesafe (odometre) ve derinlik bilgileri kullanılarak oluşturulan lokal koordinat sisteminde tanımlı bir modeldir. GPR/GPS Modeli ve Jiroskopik Düzeltme modeli ile karşılaştırılabilmesi için profil başlangıcındaki GPS koordinatı ile çakıştırılmış ve JJVT veri tabanında hesaplanan açıklık açısı değerleri kullanılarak koordinatlandırılmıştır. GPR/GPS kombinasyonu modelinde ise yansıma izi (trace) noktaları arası mesafelerin ölçümünde GPR ölçümü ile eşzamanlı yapılan GPS okumalarından elde edilen ".cor" uzantılı dosyadaki kartezyen koordinat verileri kullanılır. Bu sayede klasik GPR metodunda odometre (ölçüm tekerleği)'nin devir sayısına göre mesafe belirlemenin arazinin eğimli olduğu durumlarda neden olduğu sistematik olmayan hatanın giderilmesi ve mesafe ölçülerinin planimetrik koordinatlar kullanılarak yataya indirgenmeleri sağlanır. Ayrıca profil hattı boyunca arazinin kot farklılıkları "Z" koordinat verisi kullanılarak topografik düzeltme sağlanmış olur. Senkronize GPR ve GPS kayıtları GPR/GPS veri tabanında yüksek genlikli anomali sınırlarının işaretlendiği her bir yansıma izi için eşzamanlı GPS veri kayıtlarından elde edilen "Trace No", "X koordinatı", "Y koordinatı", "Z koordinatı", "Anten Yüksekliği" verileri ile GPR profillerinden işaretlemelerle kaydedilen "Trace No" ve "Derinlik" verileri eşleştirilerek GPR/GPS kombinasyon modeli oluşturulmuştur. Jiroskopik Düzeltme Modeli ise

benzer şekilde eşzamanlı olarak ölçülen dijital inklinometre ve GPS verilerinin JJVT veri tabanında EK A'da detaylarıyla açıklanan formülasyonlar sayesinde oluşturulmuştur.



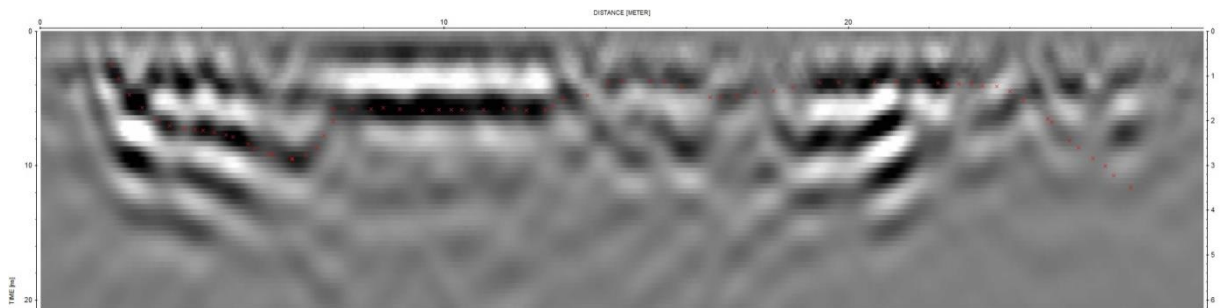
Şekil 4.22 2 No'lu Radargram



Şekil 4.23 3 No'lu radargram

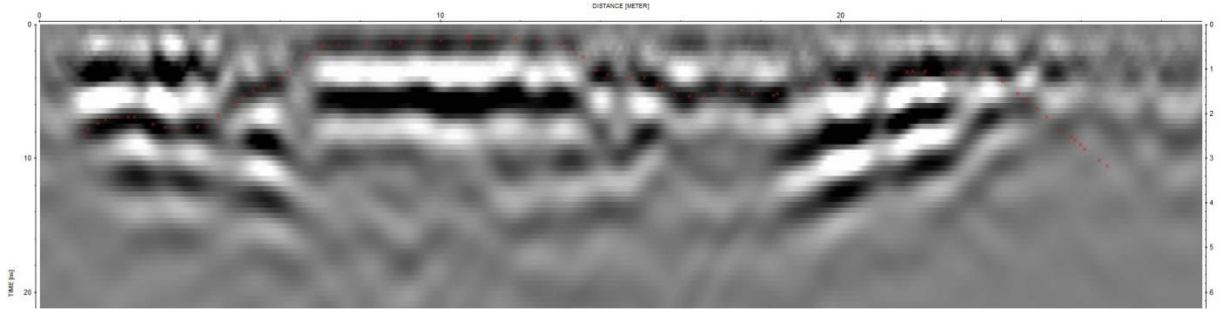


Şekil 4.24 4 No'lu radargram

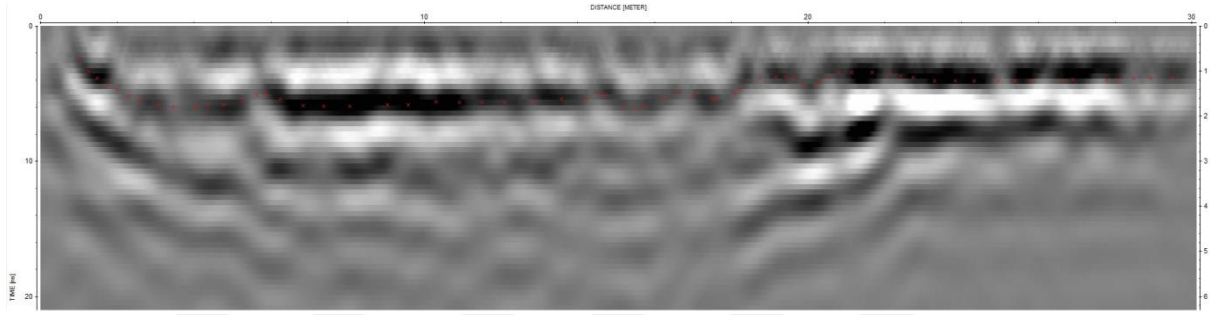


Şekil 4.25 6 No'lu radargram





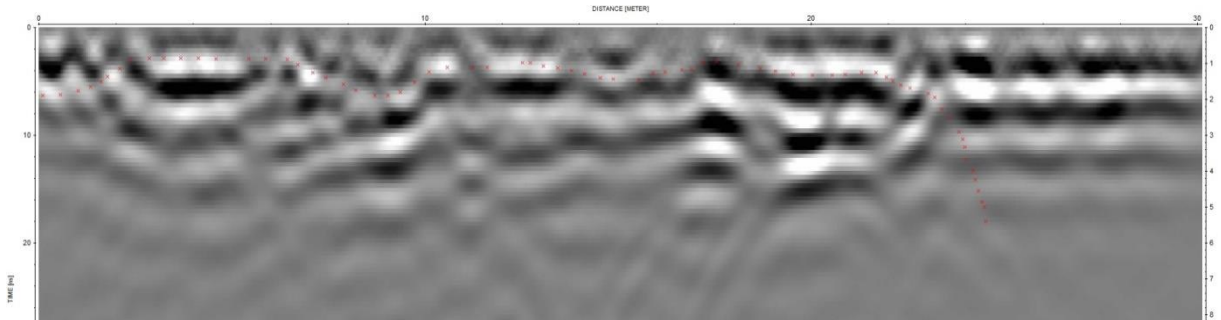
Şekil 4.26 7 No'lu radargram



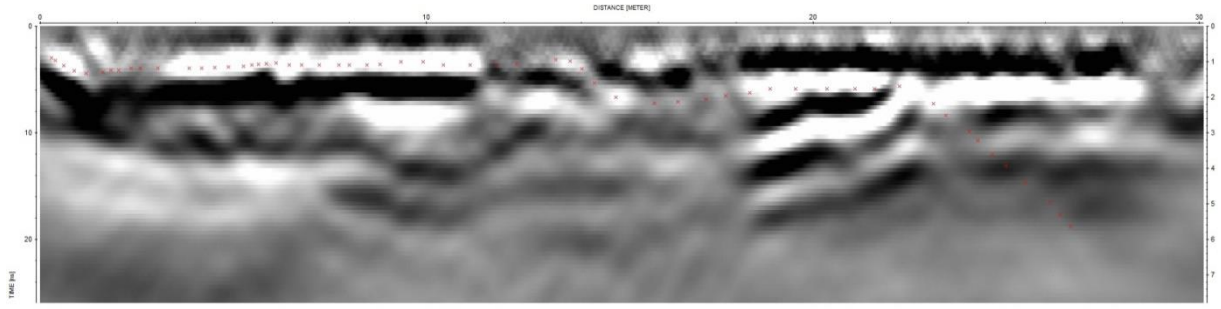
Şekil 4.27 8 No'lu radargram



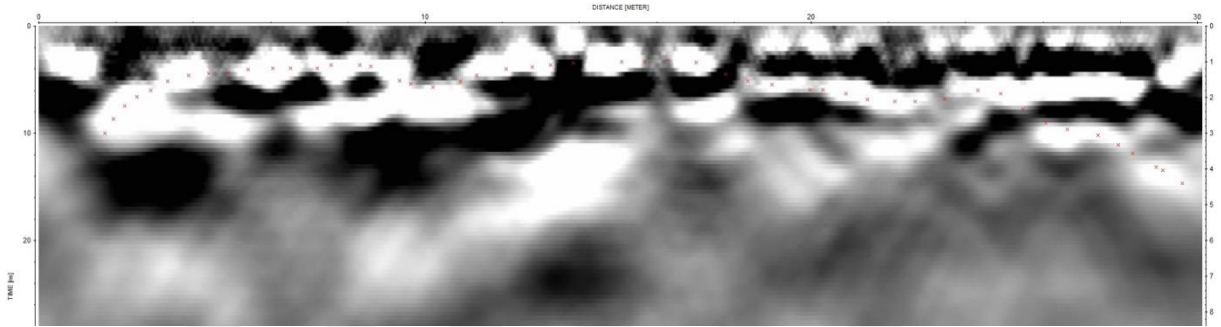
Şekil 4.28 9 No'lu radargram



Şekil 4.29 10 No'lu radargram



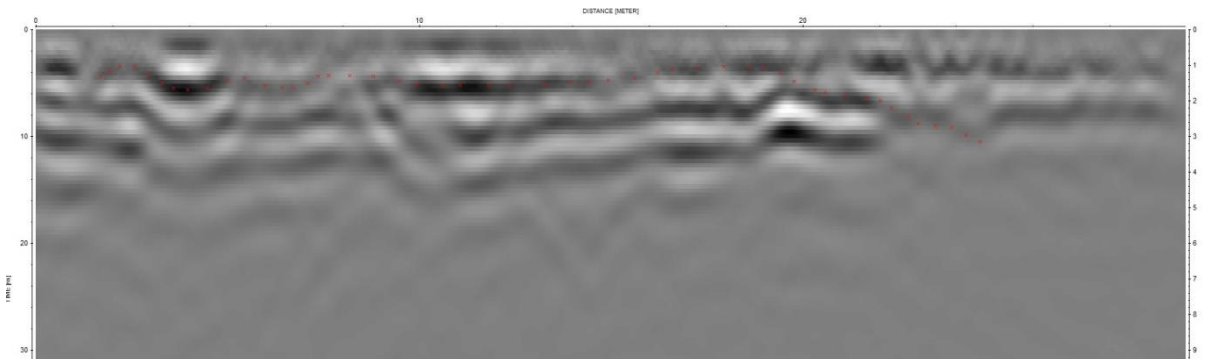
Şekil 4.30 11 No'lu radargram



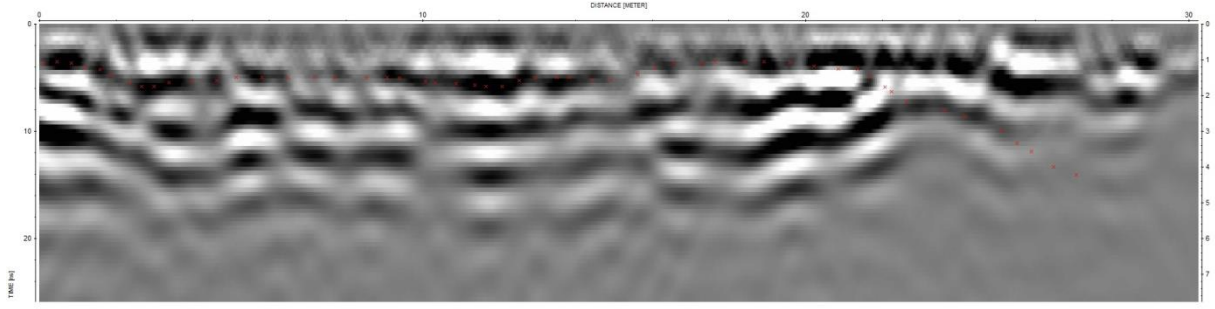
Şekil 4.31 12 No'lu radargram



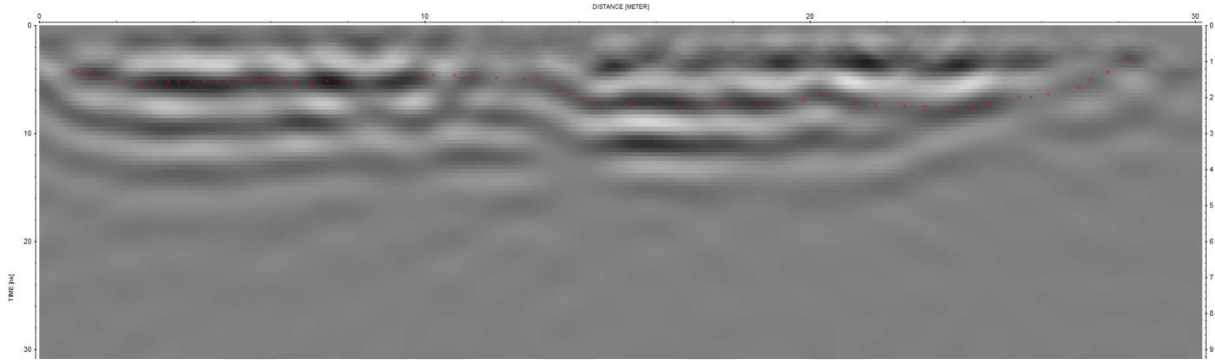
Şekil 4.32 13 No'lu radargram



Şekil 4.33 14 No'lu radargram



Şekil 4.34 15 No'lu radargram



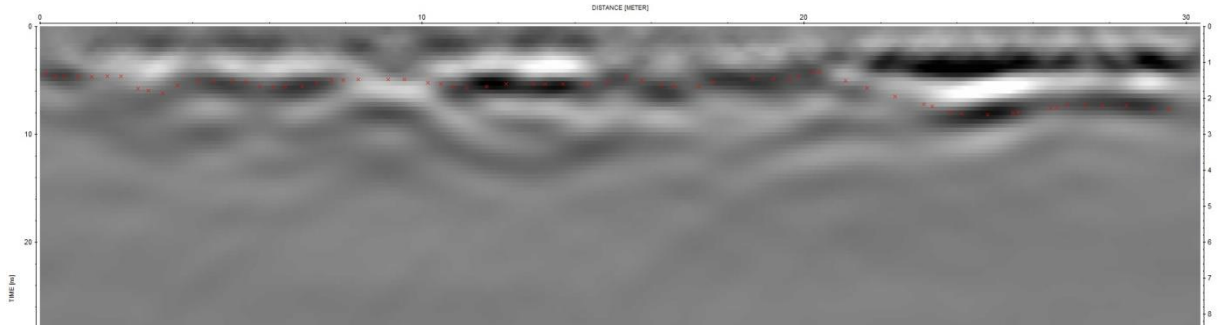
Şekil 4.35 16 No'lu radargram



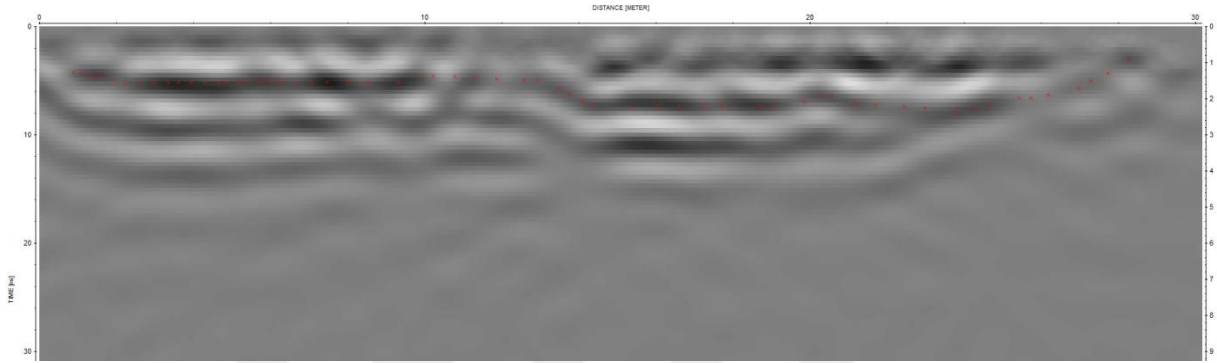
Şekil 4.36 17 No'lu radargram



Şekil 4.37 18 No'lu radargram



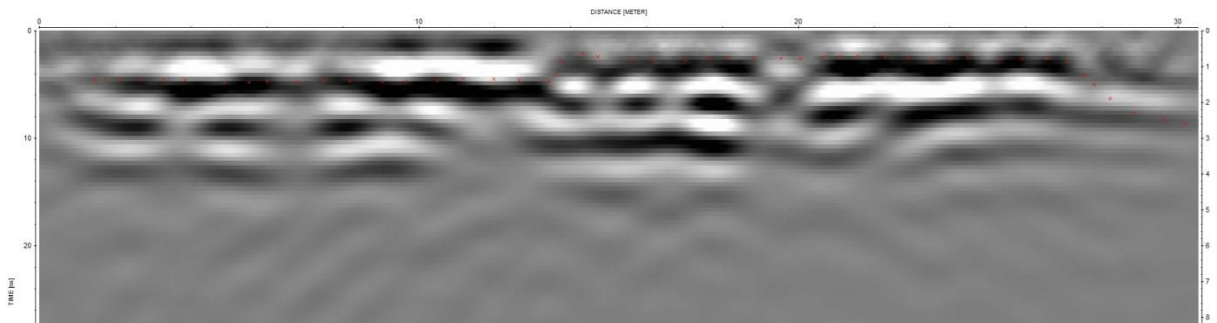
Şekil 4.38 19 No'lu radargram



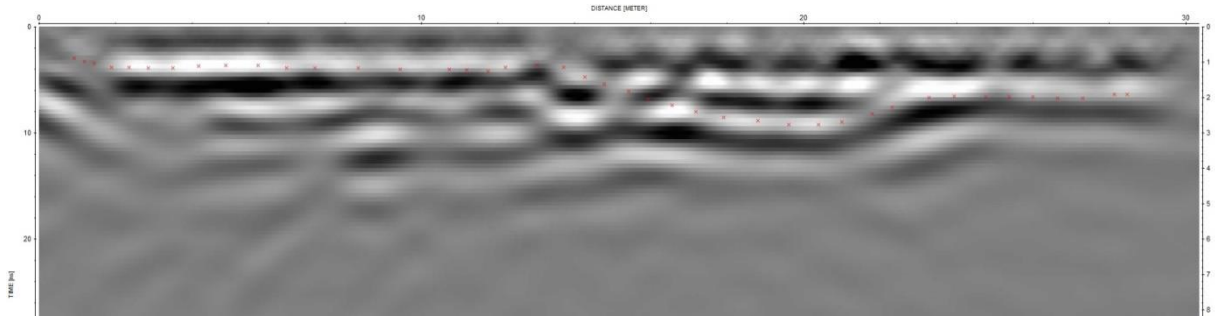
Şekil 4.39 20 No'lu radargram



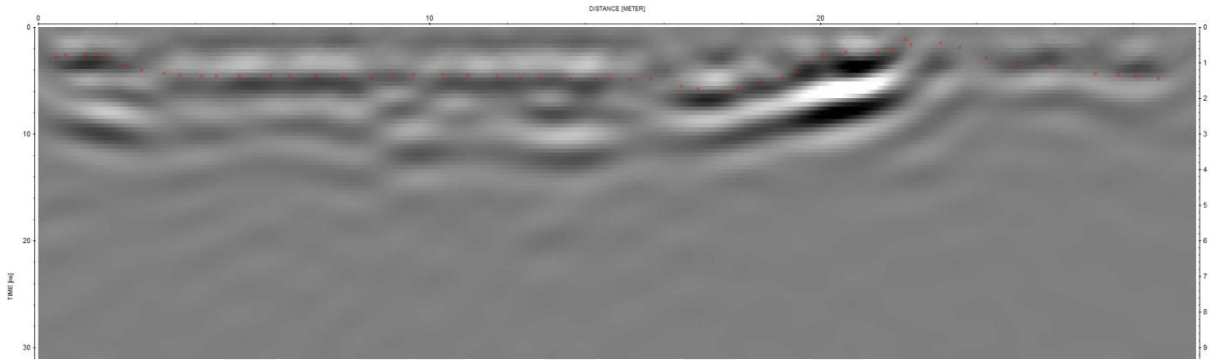
Şekil 4.40 21 No'lu radargram



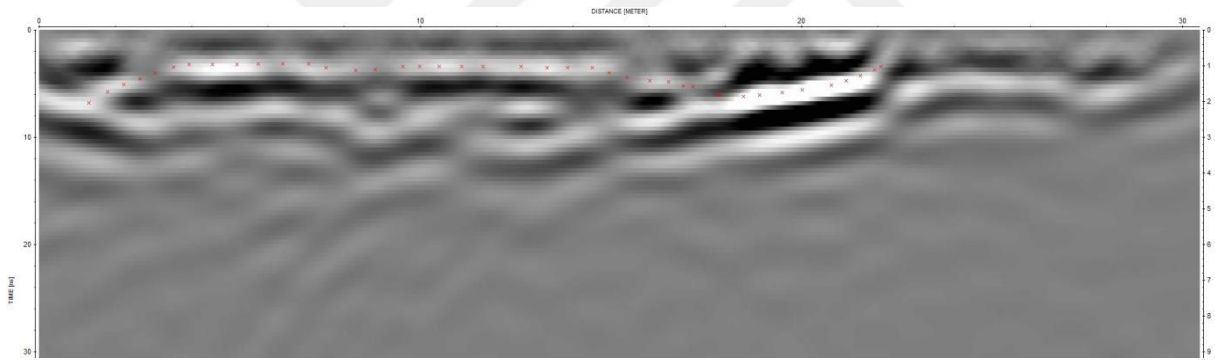
Şekil 4.41 22 No'lu radargram



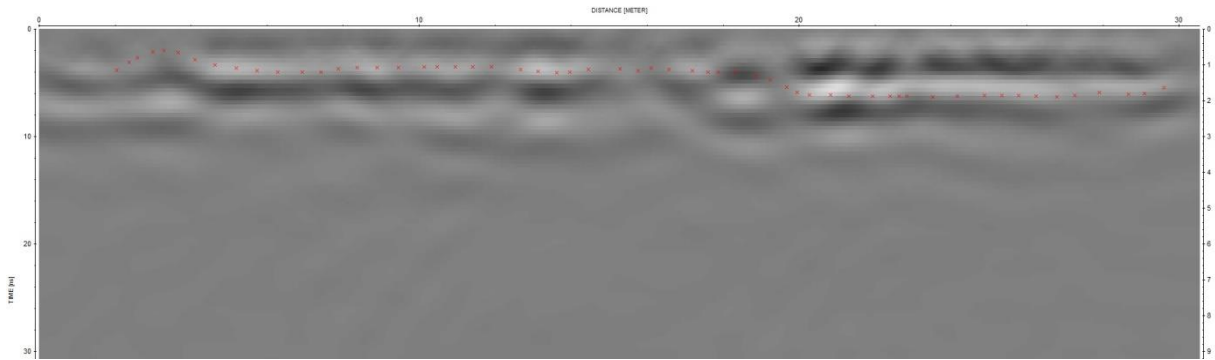
Şekil 4.42 23 No'lu radargram



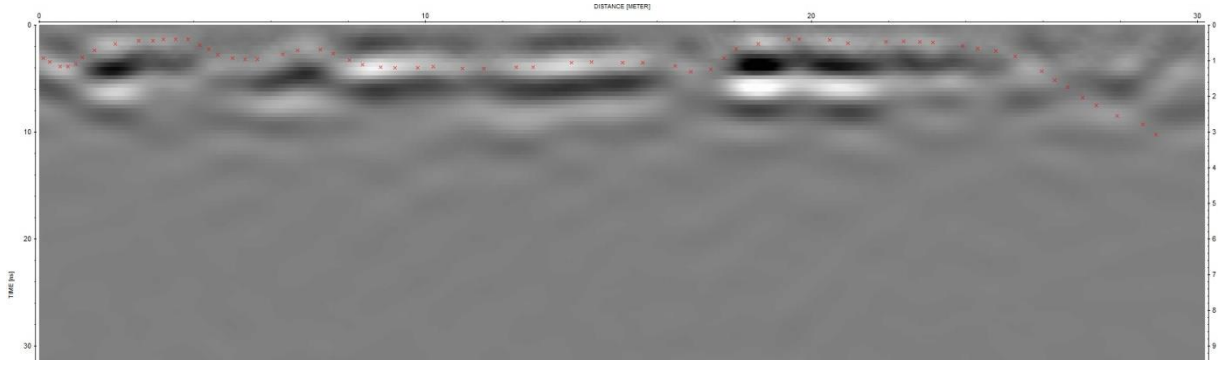
Şekil 4.43 24 No'lu radargram



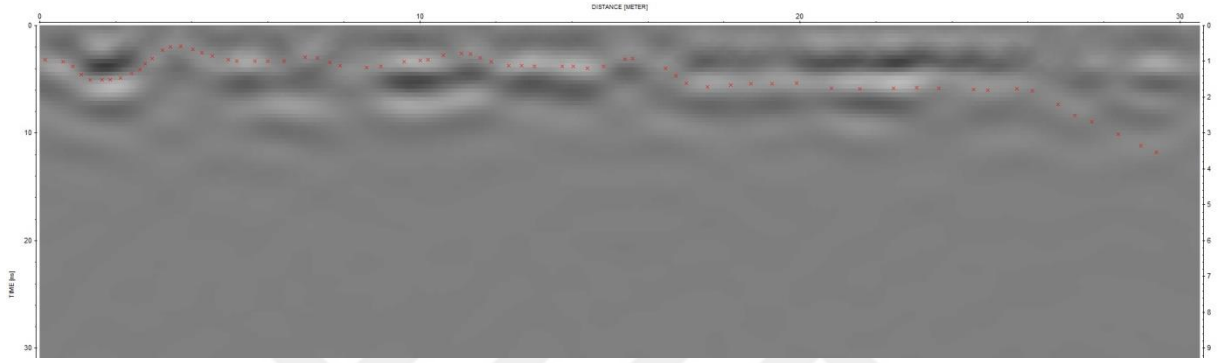
Şekil 4.44 25 No'lu radargram



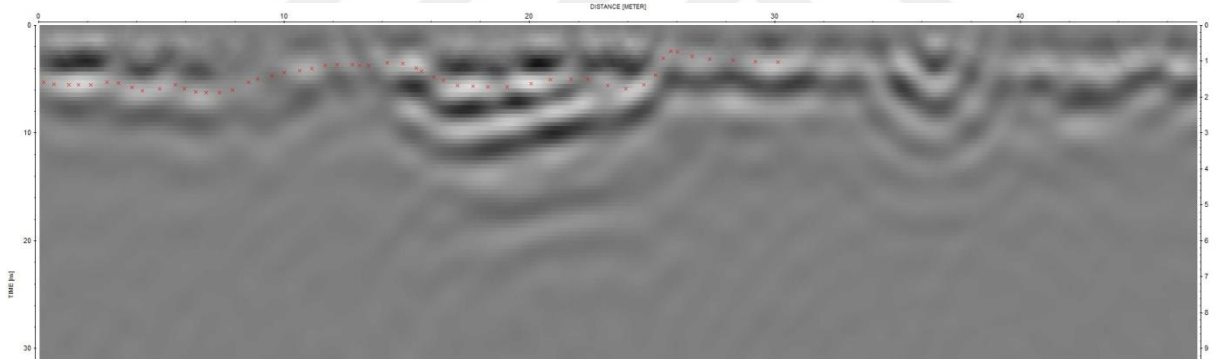
Şekil 4.45 26 No'lu radargram



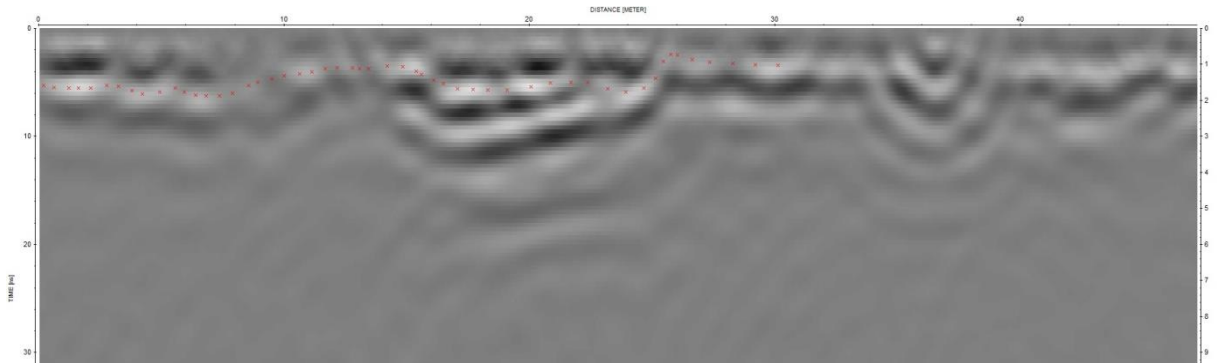
Şekil 4.46 28 No'lu radargram



Şekil 4.47 29 No'lu radargram

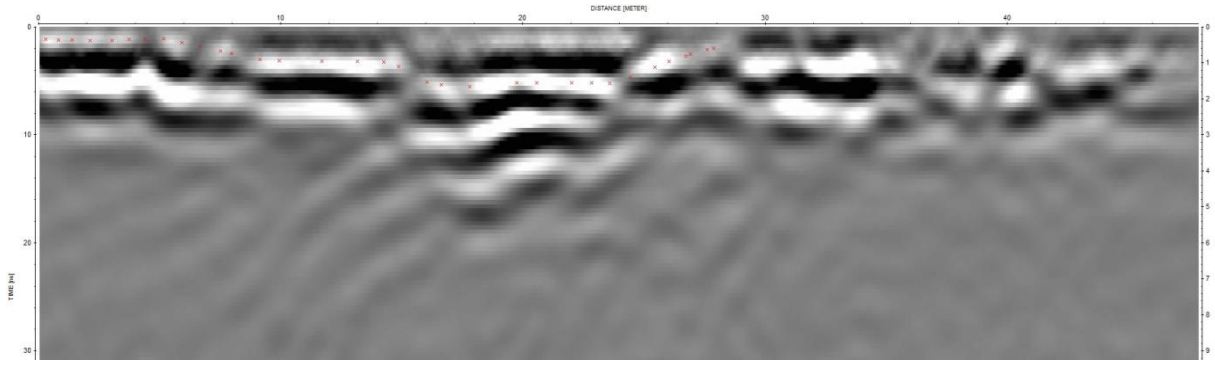


Şekil 4.48 30 No'lu radargram

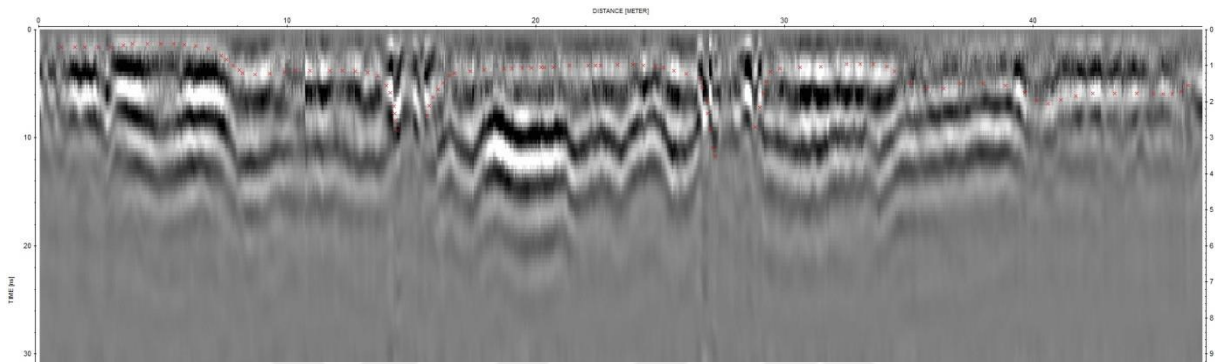


Şekil 4.49 31 No'lu radargram

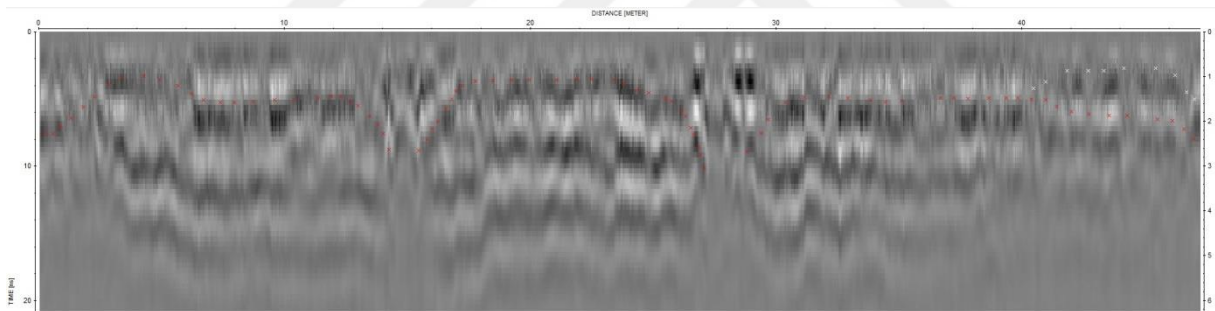




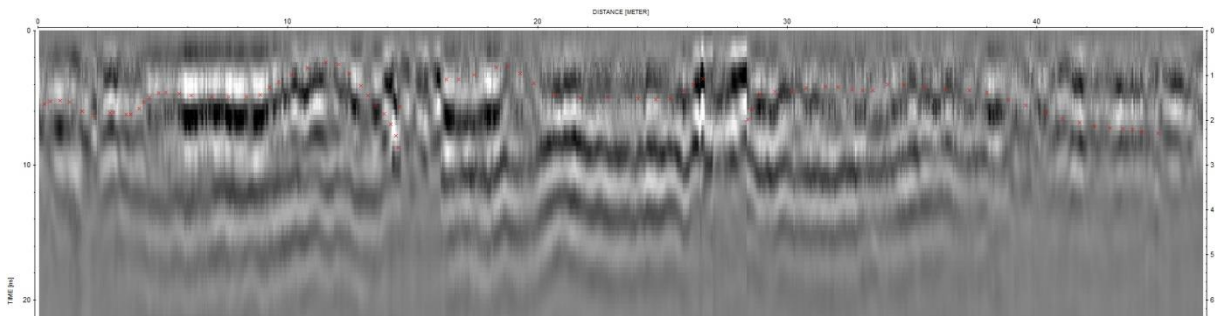
Şekil 4.50 32 No'lu radargram



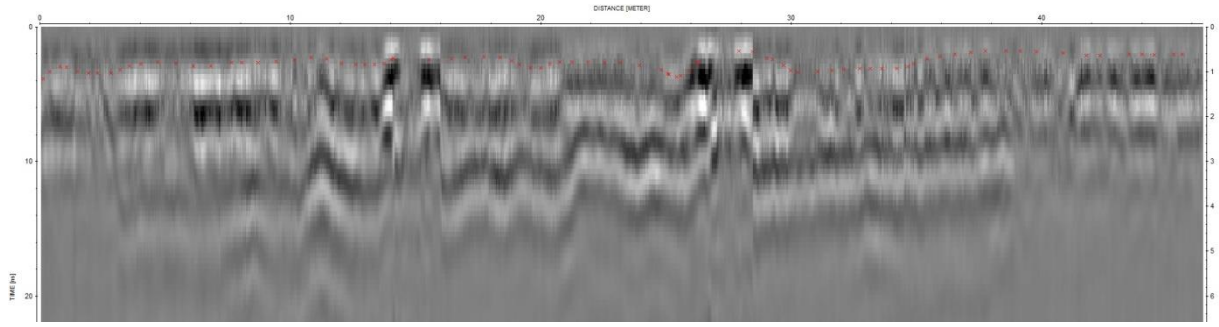
Şekil 4.51 33 No'lu radargram



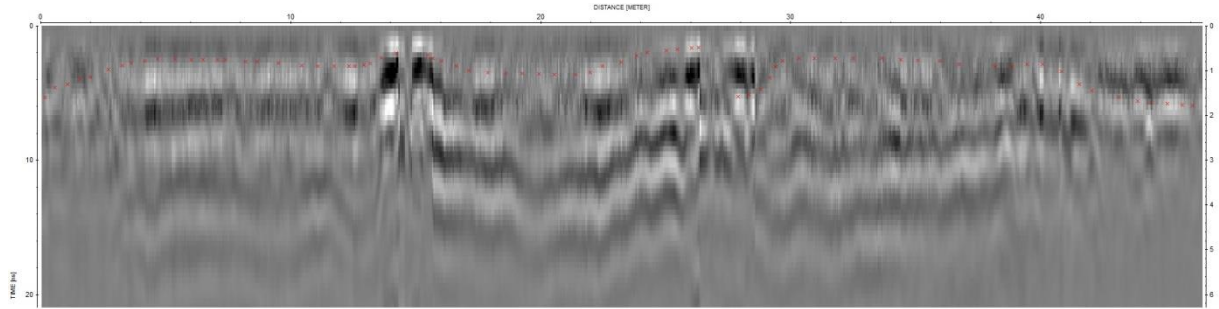
Şekil 4.52 34 No'lu radargram



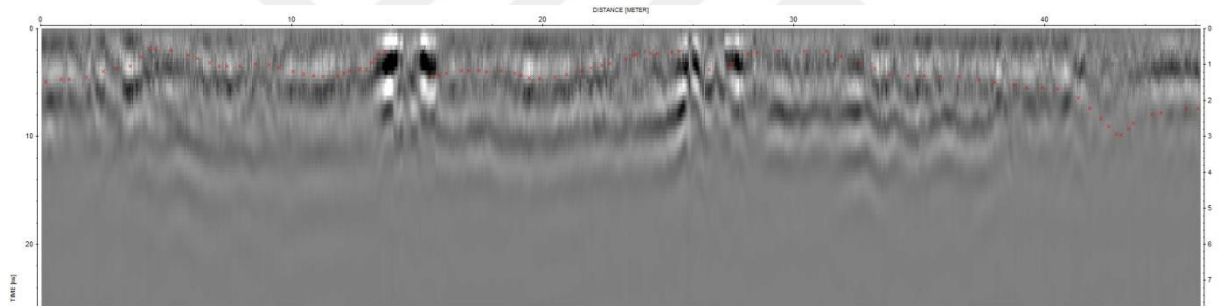
Şekil 4.53 35 No'lu radargram



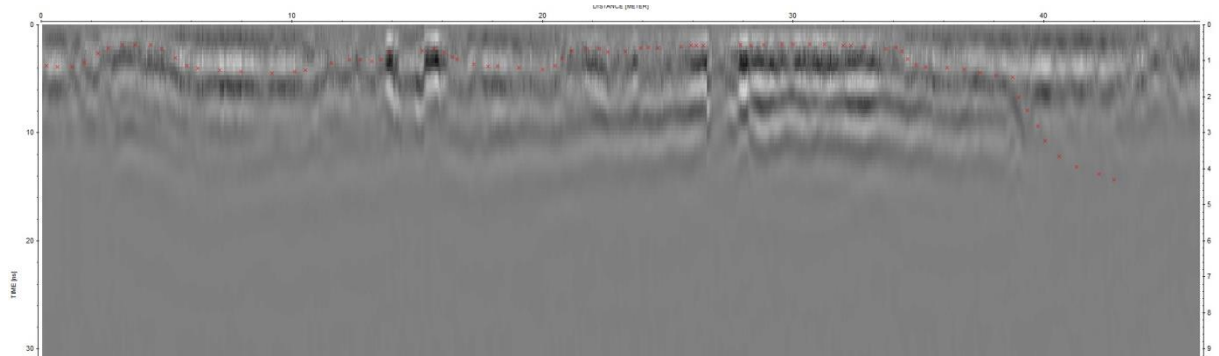
Şekil 4.54 36 No'lu radargram



Şekil 4.55 37 No'lu radargram

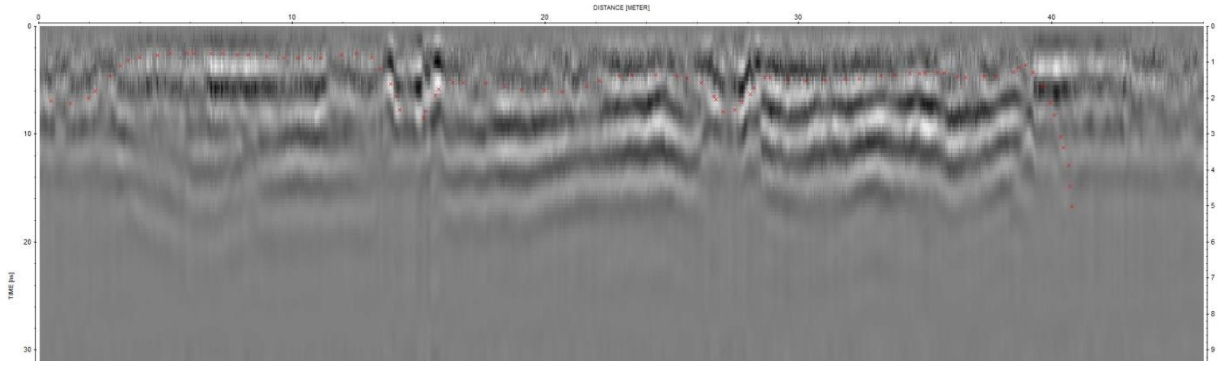


Şekil 4.56 38 No'lu radargram

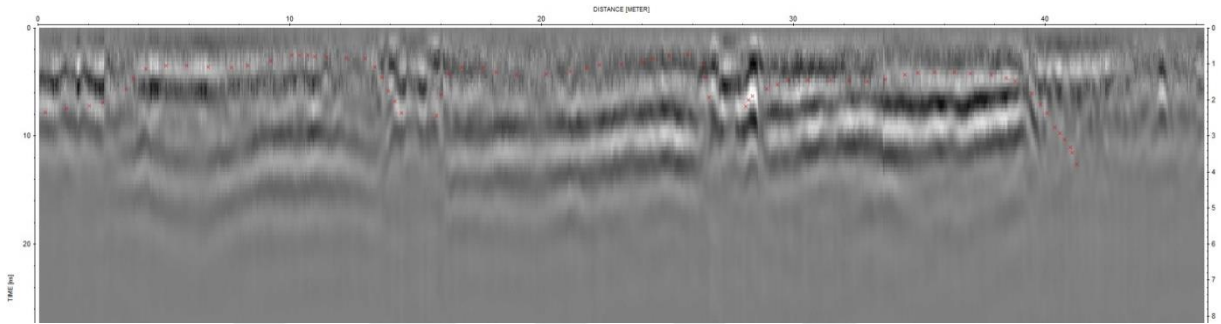


Şekil 4.57 39 No'lu radargram

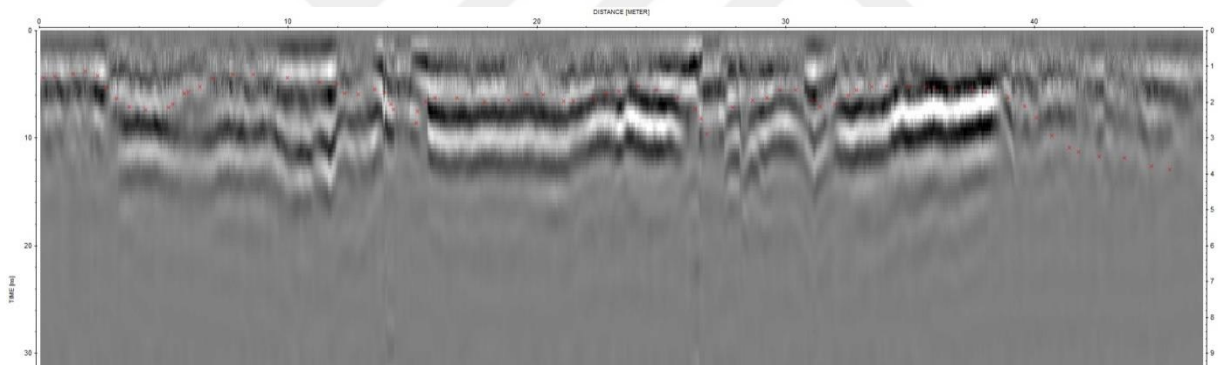




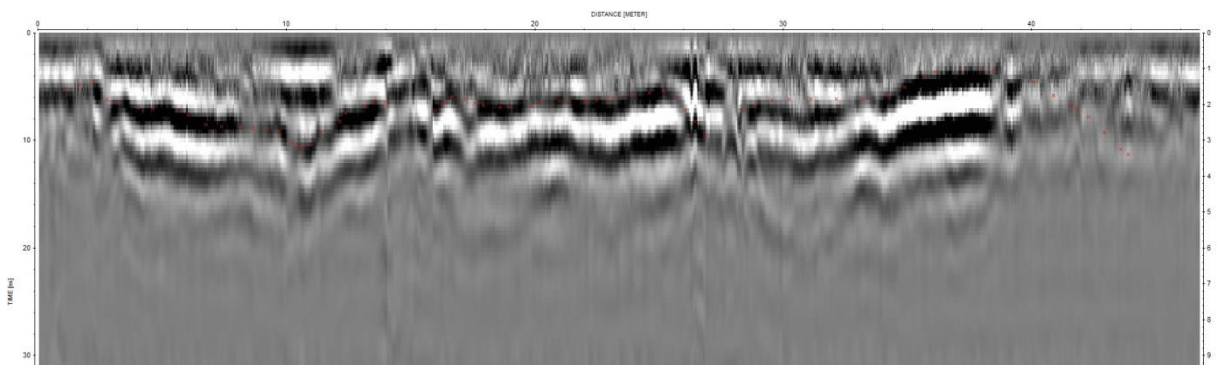
Şekil 4.58 40 No'lu radargram



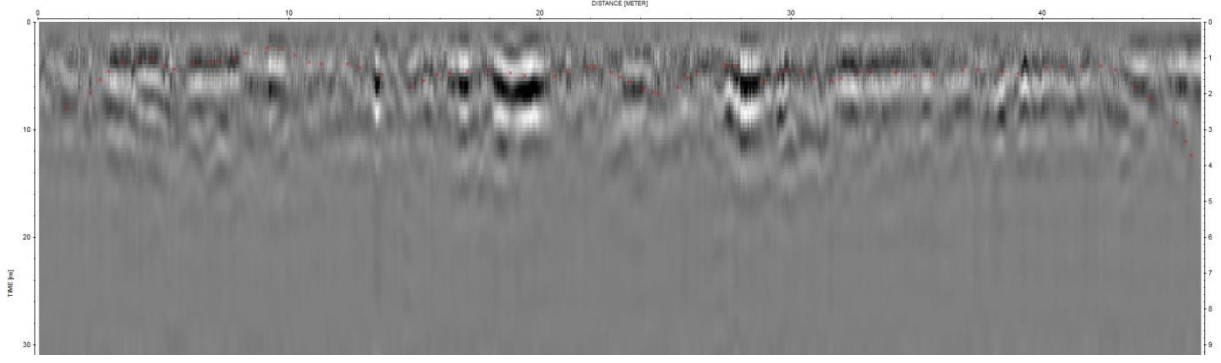
Şekil 4.59 41 No'lu radargram



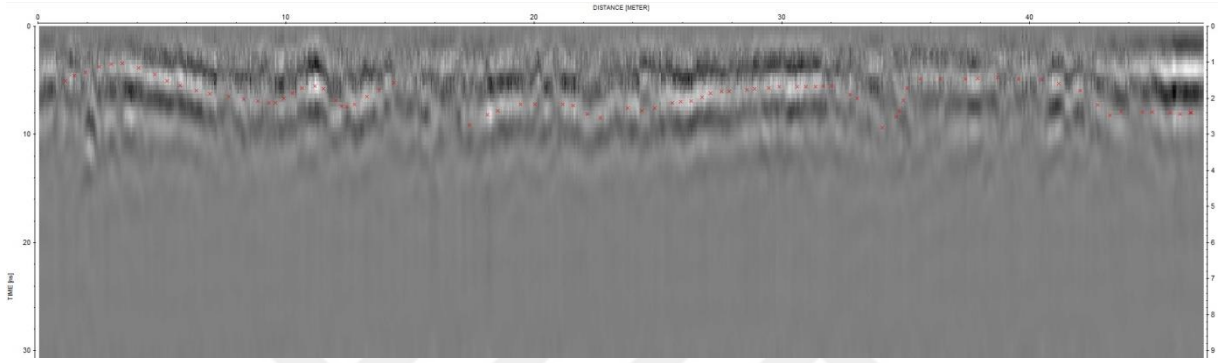
Şekil 4.60 42 No'lu radargram



Şekil 4.61 43 No'lu radargram



Şekil 4.62 44 No'lu radargram



Şekil 4.63 45 No'lu radargram

Not: 27 ve 46 No'lu Radargramlarda Depo sınırlarını belirten yüksek genlikli bir anomaliye rastlanmamıştır.

#### 4.2.9 Klasik GPR Metodu ile elde edilen modelin oluşturulması:

GPS donanımı içermeyen Klasik GPR metodunda; profil başlangıç noktasından itibaren ölçümden önce belirlenen aralıklarla her bir trace için mesafe ölçümü odometre (ölçüm tekerleği) ile yapılır. Bu çalışmada trace (yansıma izi) durakları arası mesafe çözünürlüğü artırmak amacıyla 2.5 cm olarak belirlenmiştir. GPR donanımı 2.5 cm lik mesafe kadar profilde ilerlediğinde verici antenden seri sinyal dizileri gönderir ve alıcı antenle algılanan yansıma sinyalleri zamanın fonksiyonu olarak kaydedilirler. Önceki bölümde radargram üzerinde işaretlenen (pick) her bir noktanın profil başlangıcına olan mesafe ve derinlik bilgileri işaretlenen nokta numaraları ile birlikte Reflex-W yazılımı kullanılarak .pck uzantılı dosyada kaydedilmiştir. Yüksek genlikli nomalilerin depo sınırlarını ifade eden sınırlarında yapılan bu işaretleme dosyası Microsoft Excel programında kaydedildi. Kaydedilen noktalar NETCAD çizim programı kullanılarak çizim ortamına aktarılmıştır. İşlem su depolarına dair anomalinin belirlenebildiği tüm profiller için benzer şekilde tekrarlanmıştır.

Bu adımların sonunda araştırmaya konu olan su depolarının Klasik GPR modeli oluşturulmuştur.

#### 4.2.10 GPR/GPS Kombinasyonu Modelinin Oluşturulması:

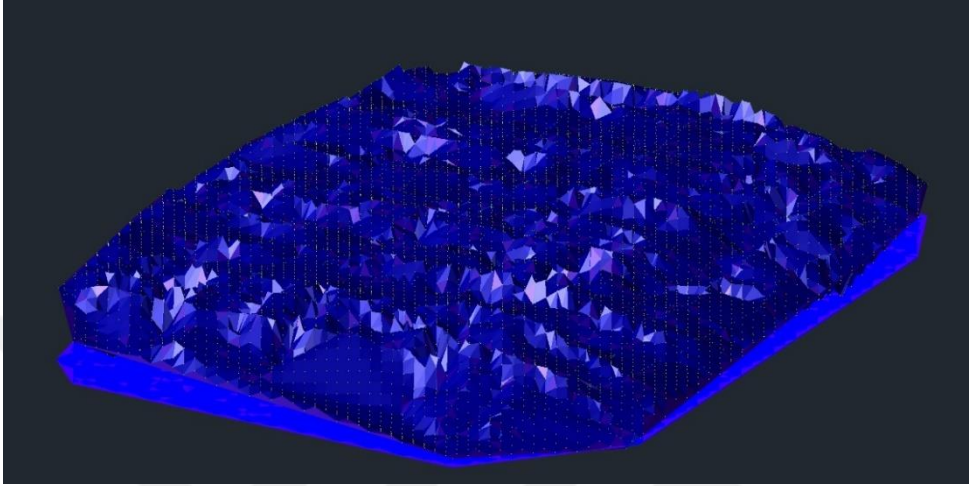
GPR/GPS kombinasyonu modelinde ise yansıma izi (trace) noktaları arası mesafelerin ölçümünde GPR ölçümü ile eşzamanlı yapılan GPS okumalarından elde edilen “.cor” uzantılı dosyadaki kartezyen koordinat verileri kullanılır (Şekil 4.64).

1	2016-11-08	11:24:42	40.93744262150	N	29.11235772400	E	4.457	M	1.300
17	2016-11-08	11:24:45	40.93744093000	N	29.11236037700	E	4.533	M	1.300
38	2016-11-08	11:24:46	40.93743604483	N	29.11235936383	E	4.700	M	1.300
71	2016-11-08	11:24:47	40.93743188000	N	29.11235477567	E	4.862	M	1.200
97	2016-11-08	11:24:48	40.93742535067	N	29.11235002700	E	4.859	M	1.200
117	2016-11-08	11:24:49	40.93741898250	N	29.11234411950	E	4.917	M	1.200
144	2016-11-08	11:24:50	40.93741308150	N	29.11234081183	E	4.939	M	1.200
188	2016-11-08	11:24:51	40.93740573083	N	29.11233828817	E	4.949	M	1.100
200	2016-11-08	11:24:52	40.93740056767	N	29.11233551817	E	4.980	M	1.100
245	2016-11-08	11:24:53	40.93739497600	N	29.11233068717	E	4.974	M	1.100
257	2016-11-08	11:24:54	40.93738969633	N	29.11232548550	E	4.991	M	1.100
317	2016-11-08	11:24:55	40.93738231283	N	29.11232124300	E	5.018	M	1.100
333	2016-11-08	11:24:56	40.93737755867	N	29.11231897950	E	5.042	M	1.100
365	2016-11-08	11:24:57	40.93737124833	N	29.11231568967	E	5.038	M	1.100
395	2016-11-08	11:24:58	40.93736478167	N	29.11231191617	E	5.040	M	1.100
429	2016-11-08	11:24:59	40.93735785867	N	29.11230853767	E	5.046	M	1.100
484	2016-11-08	11:25:00	40.93734950300	N	29.11230408083	E	5.009	M	1.100
503	2016-11-08	11:25:01	40.93734228367	N	29.11229897683	E	4.999	M	1.100
538	2016-11-08	11:25:02	40.93733482300	N	29.11229585117	E	4.939	M	1.100
568	2016-11-08	11:25:03	40.93732548367	N	29.11229075033	E	5.013	M	1.100
615	2016-11-08	11:25:04	40.93731962800	N	29.11228461233	E	5.022	M	1.100
645	2016-11-08	11:25:05	40.93731322217	N	29.11228078800	E	4.986	M	1.100
684	2016-11-08	11:25:06	40.93730654717	N	29.11227736583	E	5.026	M	1.100
727	2016-11-08	11:25:07	40.93729842650	N	29.11227256000	E	5.036	M	1.100
766	2016-11-08	11:25:08	40.93729063133	N	29.11226881200	E	4.994	M	1.100
798	2016-11-08	11:25:09	40.93728295400	N	29.11226399850	E	4.976	M	1.100
844	2016-11-08	11:25:10	40.93727515783	N	29.11225947883	E	4.901	M	1.100
862	2016-11-08	11:25:11	40.93726618550	N	29.11225319250	E	4.802	M	1.100
890	2016-11-08	11:25:12	40.93726143017	N	29.11224882050	E	4.774	M	1.100

Şekil 4.64 Cor uzantılı GPS veri dosyası örneği

Bu sayede klasik GPR metodunda odometre (ölçüm tekerleği)'nin devir sayısına göre mesafe belirlemenin arazinin eğimli olduğu durumlarda neden olduğu sistematik olmayan hatanın giderilmesi ve mesafe ölçülerinin planimetrik koordinatlar kullanılarak yataya indirgenmeleri sağlanır. Ayrıca profil hattı boyunca arazinin kot farklılıkları “Z” koordinat verisi kullanılarak topografik düzeltme sağlanmış olur. Bu amaçla 250 Mhz merkez frekansında Mala ProEx GPR ünitesi Trimble GPS donanımı ile entegre edilmiştir. Veriler profil başlangıcından profil bitiş noktasına kadar her profil için GPR ünitesi ile senkronize şekilde kaydedilmiştir. GPS verilerinin bulunduğu .cor uzantılı dosyada ki konum verileri Coğrafi Koordinat Sistemindedir. Kullanılan Reflex-Win yazılımında GPS veri entegrasyonu aşaması için UTM dönüşümüne imkan tanıyan arayüzler bulunsada dönüşüm parametreleri veya datum seçimi gibi detaylı jeodezik algoritmalar bulunmadığından koordinat dönüşümlerinde hatalarla karşılaşmıştır. Dolayısıyla modellemede yapabilmek ve özellikle Jiroskopik düzeltme değerlerini koordinat verilerine uygulayabilmek amacıyla bu verilerin tamamı Netcad dönüşüm modülü yardımıyla 3 derecelik Universal Transvers Mercator’a (UTM) çevrilmiştir.

Senkronize GPR ve GPS kayıtları JJVT veri tabanında yüksek genlikli anomali sınırlarının işaretlendiği her bir trace (yansıma izi) için eşzamanlı GPS veri kayıtlarından elde edilen Trace No, X koordinatı, Y koordinatı, Z Koordinatı, Anten Yüksekliği verileri ile GPR profillerinden işaretlemelerle kaydedilen Trace No ve Derinlik verileri eşleştirilerek GPR/GPS kombinasyon modeli oluşturulmuştur (Şekil 4.65).



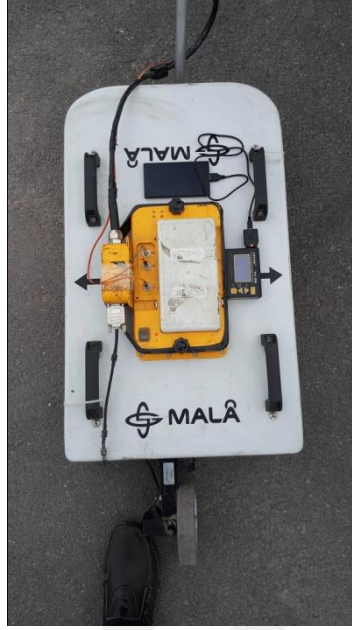
Şekil 4.65 GPR/GPS Kombinasyon Modeli

#### 4.2.11 Jiroskopik Düzeltme Metodu ile elde edilen 3-B modelin oluşturulması:

GPR/GPS Modeli Klasik GPR'a göre konumsal ve topografik açıdan avantajlar sağlıyor olsa da arazi eğiminden kaynaklanan sebeplerle GPR antenlerinin yatay düzlemle oryantasyonu sürekli değişmektedir. Bu düzensizlik GPR radargramında oluşan gömülü objeye dair anomalilerde deformasyona neden olmaktadır. Günümüzde GPR-GPS kombinasyon metodu ve sağladığı topografik düzeltme GPR aştırmalarında vazgeçilmez konuma gelmiş, eğim düzeltmesi adı altında ( $\phi$ ) dönüklüğüne dayalı sınırlı sayıda çalışma var olsa da 3 Boyutlu ( $\phi$ ,  $\Omega$  ve  $\kappa$ ) vektörel analiz; yani bu tezde ifade edildiği adıyla “Jiroskopik Düzeltme” ihmal edilmektedir.

Bu çalışmanın amacı jiroskopik düzeltmenin gömülü obje modellemesine ne ölçüde katkı sağladığını boyutları bilinen gömülü obje üzerinden araştırarak konunun önemini vurgulamak olduğundan ölçümler esnasında GPR anteni üzerine sabitlenen inklinometre ile jiroskopik açıların ölçümü yapılmıştır (Şekil 4.66).





Şekil 4.66 GPR anteni üzerine sabitlenen 2 Eksenli Dijital İnklinometre

Bluetooth kablosuz bağlantı ve Twedge data logger yazılımı kullanılarak GPR/GPS ölçümleri ile eşzamanlı olarak kaydedilmiştir (Şekil 4.67).

Date	Time	Data
08.11.2016	13:03:18	DUAL X:-00.025* DUAL Y:-00.331*
08.11.2016	13:03:18	DUAL X:-00.039* DUAL Y:-00.365*
08.11.2016	13:03:19	DUAL X:-00.030* DUAL Y:-00.363*
08.11.2016	13:03:20	DUAL X:-00.030* DUAL Y:-00.360*
08.11.2016	13:03:20	DUAL X:-00.029* DUAL Y:-00.360*
08.11.2016	13:03:21	DUAL X:-00.029* DUAL Y:-00.358*
08.11.2016	13:03:22	DUAL X:-00.029* DUAL Y:-00.358*
08.11.2016	13:03:22	DUAL X:-00.027* DUAL Y:-00.360*
08.11.2016	13:03:23	DUAL X:-00.025* DUAL Y:-00.360*
08.11.2016	13:03:24	DUAL X:-00.023* DUAL Y:-00.360*
08.11.2016	13:03:24	DUAL X:-00.023* DUAL Y:-00.358*
08.11.2016	13:03:25	DUAL X:-00.021* DUAL Y:-00.356*
08.11.2016	13:03:26	DUAL X:-00.021* DUAL Y:-00.354*
08.11.2016	13:03:26	DUAL X:-00.018* DUAL Y:-00.353*
08.11.2016	13:03:27	DUAL X:-00.018* DUAL Y:-00.353*

Şekil 4.67 GPR ile eşzamanlı yapılan İnklinometre kayıtları örneği

Bölüm 3.3'te Jiroskopik Jeoradar veri tabanı tüm detayları ile anlatılmaktadır. Veri tabanı işlem yapabilmek için 3 veri çizelgesine ihtiyaç duymaktadır. Bunlar Şekil 3.5'te görülen diyagramda ifade edildiği gibi;

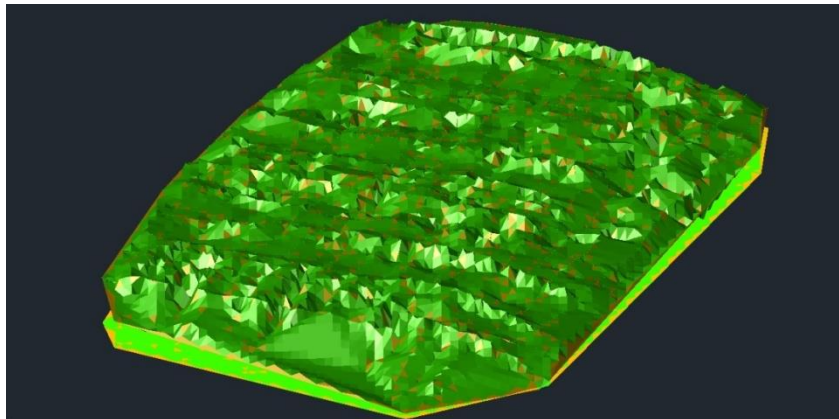
- GPS ölçümleri ile elde edilen .cor uzantılı (GPS) çizelgesi (Şekil 4.64)
- Dijital inklinometre ile elde edilen  $\Phi$ ,  $\Omega$  jiroskopik açılarını zaman kayıtları ile içeren (Jiroskop) çizelgesi (Çizelge3.3)
- Radargramlar üzerinde operatör tarafından seçilen detay noktalarını içeren .pck uzantılı (secilenpick) çizelgesi (Çizelge 3.2)

İlişkilerin Kurulması:

Microsoft Acces programı yardımıyla 1 numaralı GPS çizelgesi ile 3 numaralı detay noktaları çizelgesinde her veri için ortak olan Trace No süper anahtar seçilerek, 1 numaralı GPS çizelgesi ile 2 numaralı Jiroskop çizelgesi verinin kaydedildiği zamanı belirten saat alanları süper anahtar seçilerek ilişkilendirilmiştir.

Sorgu Oluşturulması:

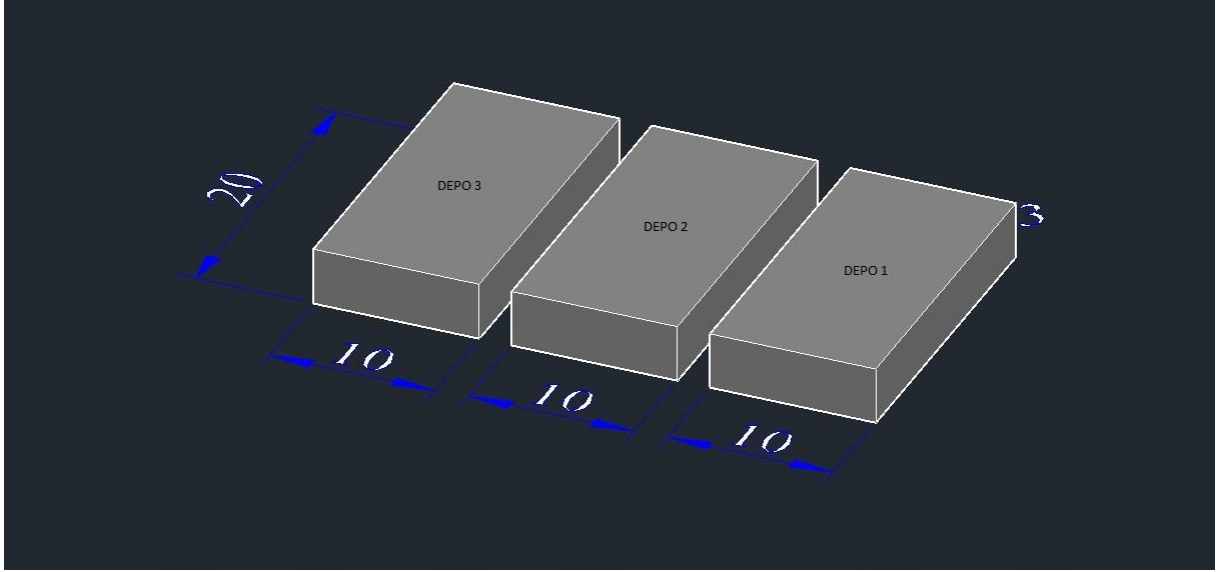
GPS çizelgesinin tüm alanları, Jiroskop çizelgesinin  $\Phi$ ,  $\Omega$  ve  $\kappa$  alanları, Secilenpick çizelgesinin "Derinlik" ve "Mesafe" bilgileri seçilerek Microsoft Access Sorgusu oluşturulmuştur. Her bir profil için bağlı çizelge güncellenerek sorgu yenilendi ve tüm profiller için Jiroskopik Jeoradar Veri Tabanı Sorgusu oluşturularak kaydedilmiştir. Veri tabanı sorgusunun Trace No alanı Nokta numarasını ifade ederken Yeni  $X_{utm}$ , Yeni  $Y_{utm}$  ve  $Z_{elipsoidal}$  alanları ise yüksek genlikli anomalilerden seçilen detay noktalarının jiroskopik olarak düzeltilmiş yeni koordinatlarını ifade etmektedir. 46 ölçüm profilinden 27 ve 46 No'lu profiller elendikten sonra kalan 44 profil için işaretlenen tüm noktalar kullanılarak Jiroskopik Düzeltme Modeli oluşturulmuştur (Şekil 4.68) .



Şekil 4.68 Jiroskopik Düzeltme Modeli

### 4.3 Değerlendirme Analizleri

Bu bölümde sırasıyla Klasik GPR metodu, GPR/GPS Kombinasyon Metodu ve Jiroskopik Etkileri Düzeltilmiş olarak hazırlanan 3 model; boyutları bilinen gömülü obje ile karşılaştırılmaktadır. Daha önce de ifade edildiği gibi Maltepe Orhangazi Parkında bulunan gömülü su depoları ve bilinen boyutları her 3 modelin kıyaslanması açısından referans olarak kullanılmıştır (Şekil 4.69).



Şekil 4.69 Gömülü Su depolarının 3 Boyutlu Modeli

Ölçmenin gerçekleştirildiği alanda 20 metre uzunluğunda ve 10 metre genişliğinde 3 ayrı depo gömülü vaziyettedir. Depolar arasında 2 metre boşluk bulunmaktadır. Üst kotu 3,45m ve temel beton seviyesi -0,2m dir. İnşaat safhasından itibaren imalatları kontrol edilip fotoğraflanmıştır (Şekil 4.70–4.71 – 4.72).



Şekil 4.70 Su Depolarının İmalat Safhasına ait bir görünüm





Şekil 4.71 Su Depolarının inşaat safhasına ait bir görünüm. (Depolar arasında bulunan 2 metrelik boşluklar görülmektedir)



Şekil 4.72 Su Depolarının İmalat sonrasına ait görünüm.

1, 2 ve 3 No'lu olmak üzere depo üst sınırlarının aplikasyon koordinatları UTM olarak aşağıda sunulmaktadır.

#### 1 No'LU DEPO KOORDİNATLARI

	Y	X
1-	425.221,16	4.534.015,71
2-	425.212,75	4.533.997,56
3-	425.221,68	4.533.992,24
4-	425.230,62	4.534.011,69

#### 2 No'LU DEPO KOORDİNATLARI

	Y	X
5-	425233,08	4.534.010,13
6-	425224,14	4.533.991,20
7-	425233,21	4.533.987,18
8-	425242,14	4.534.005,86

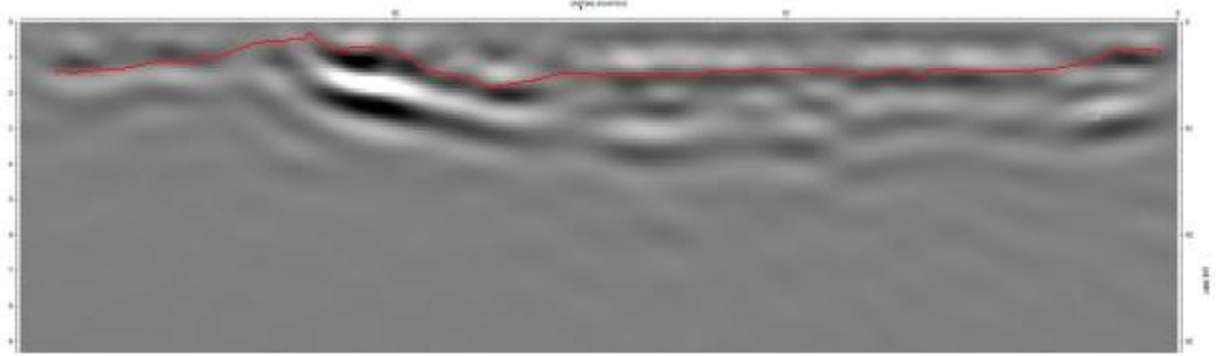
### 3 No'LU DEPO KOORDİNATLARI

	Y	X
9-	425235,80	4.533.986,00
10-	425243,31	4.533.982,90
11-	425252,76	4.534.000,67
12-	425244,60	4.534.004,82

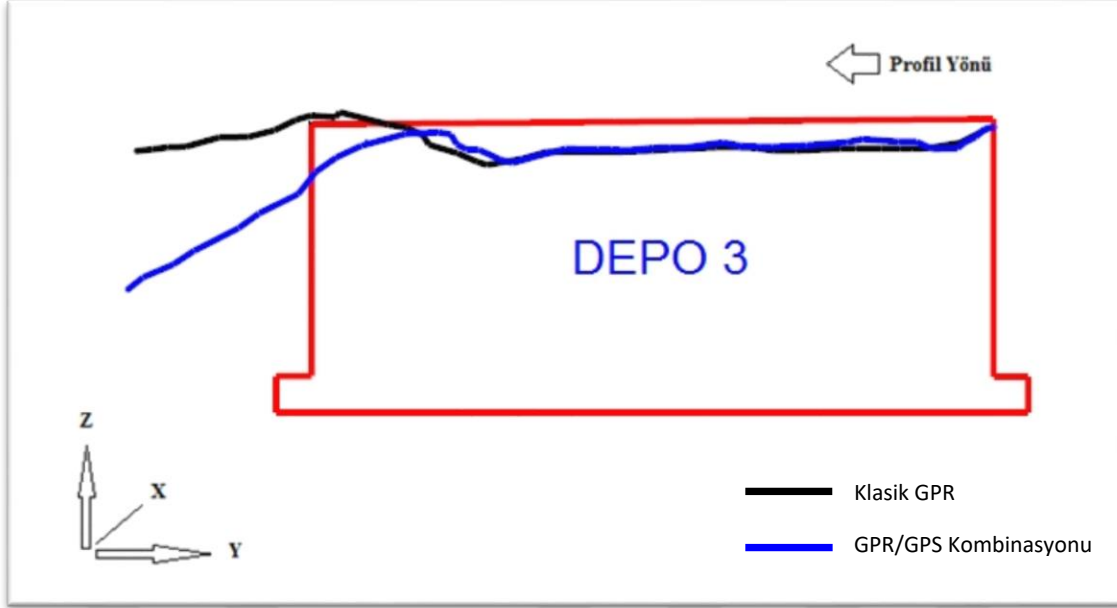
#### 4.3.1 Klasik GPR, GPR-GPS Kombinasyon Modeli ve Jiroskopik Düzeltme Modellerinin Boyutları Bilinen Gömülü Obje ile Karşılaştırılması

Geometrik Analiz 1:

Düşey yönlü ölçümlerden biri olan 22 No'lu profilde su deposu betonarme duvarlarının radargramda oluşturduğu yüksek genlikli anomaliler ve bu anomaliler üzerinde yapılan işaretlemeler Şekil 4.73'de görüldüğü gibidir. Siyah çizgi izi klasik GPR modelini, Mavi çizgi GPR/GPS Kombinasyon Modelini temsil etmektedir (Şekil 4.74). 3 No'lu depo üzerinden algılanan bu anomalinin Klasik GPR metoduna karşılık geldiği Şekil 4.73 ile Şekil 4.74 kıyaslandığında görülebilir.



Şekil 4.73 22 No'lu radargram ve yüksek genlikli anomalilerin işaretlenmesi

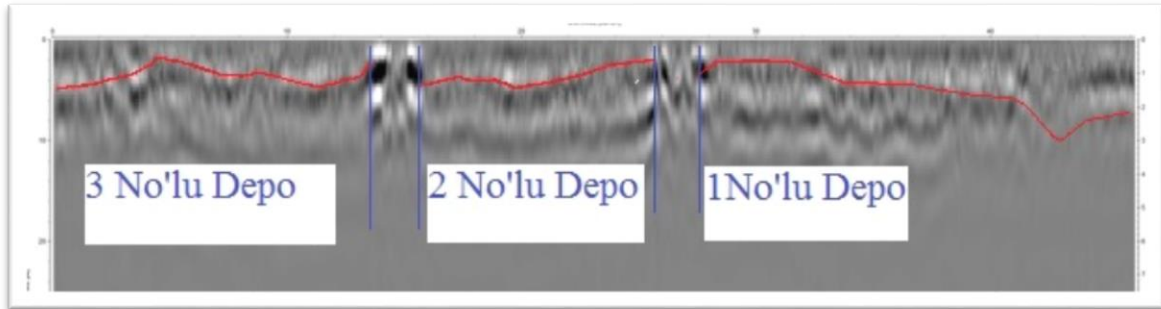


Şekil 4.74 3 No'lu depo üzerinde yapılan 22 No'lu ölçüm profilinin her iki modelle kıyaslanması görülmektedir.

Arazi eğiminin başladığı andan itibaren GPR/GPS Kombinasyon Modeli (Mavi) Klasik GPR Modelinden (Siyah) ayrılarak depo sınırları ile kıyaslandığında gömülü objeyi daha doğru ifade etmekte, azalmakta olan kot değeri ile birlikte depo sınırlarına daha yakın bir görünüm sergilemektedir.

Geometrik Analiz 2:

Her 3 depo sınırını da içeren yatay yönlü ölçüm profillerinden biri olan 36 No'lu radargram ve depo sınırlarını ifade eden yüksek genlikli anomali işaretlemeleri Şekil 4.75'de sunulmaktadır.



Şekil 4.75 36 No'lu radargram üzerinde yüksek genlikli anomalilerin işaretlenmesi.

1, 2 ve 3 No'lu depolar arasındaki yüksek genlikli düşey yönlü saçılma depolar arasındaki boşlukları ifade etmektedir. Depo sınırlarını ifade eden yüksek genlikli anomalide yapılan

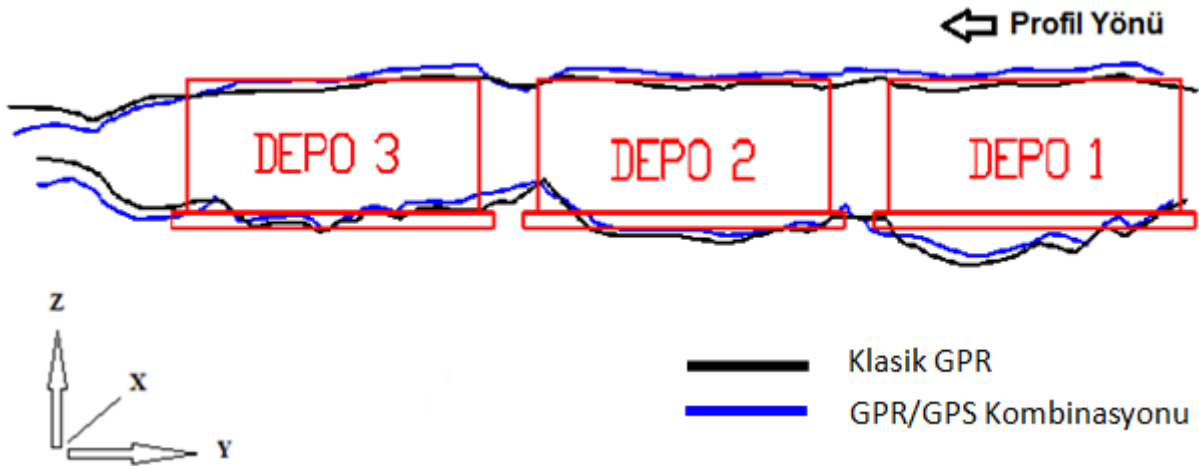


işaretleme noktaları kullanılarak Klasik GPR, GPR/GPS Modellerine ait nokta dosyaları üst kotu 3,45m olan su deposu sınırları ile koordinatlı şekilde çakıştırılmıştır (Şekil 4.76).



Şekil 4.76 36 No'lu profilde işaretlenen yüksek genlikli yansıma anomalilerinin Klasik GPR, GPR/GPS Kombinasyonu Modellerine dair noktaların aplikasyonu.

Modelin Y, X ve Z eksenlerine NetCAD çizim programı "Hesap" Menüsünde bulunan Nokta Editörü yardımıyla eksen transformasyonu uygulanmış ve Şekil 4.77'deki görünümü elde edilmiştir.

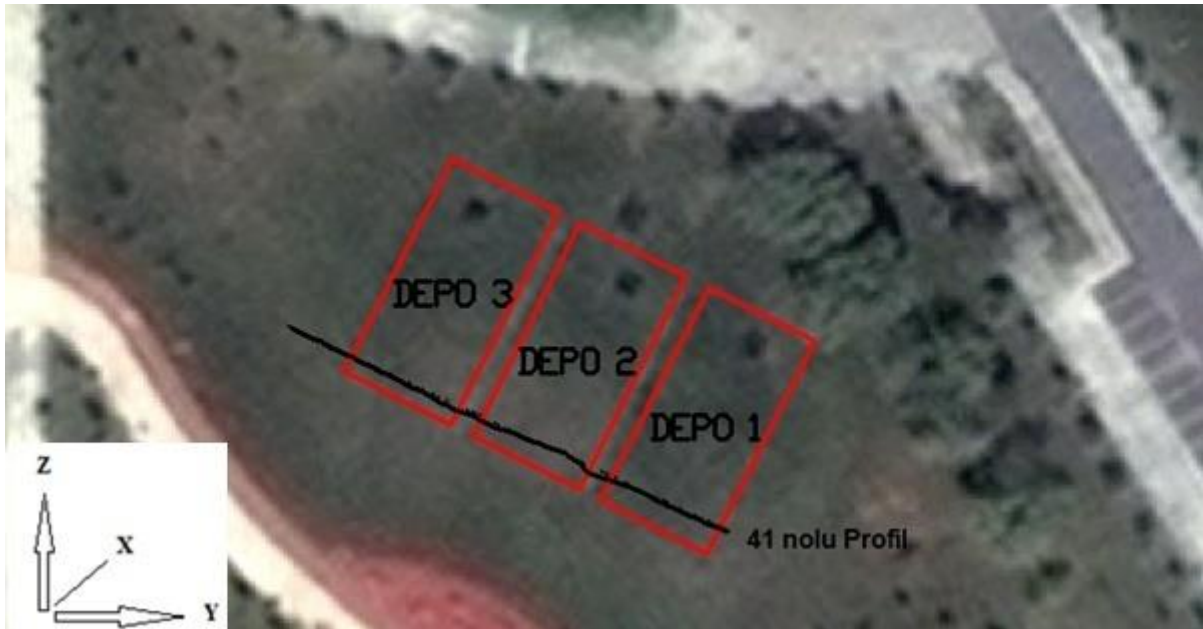


Şekil 4.77 36 No'lu profilde işaretlenen yüksek genlikli yansıma anomalilerinin Klasik GPR ve GPR/GPS Kombinasyonu Modellerine dair koordinatlı noktalarının kesit görünümü.

Şekil 4.77’de görülen siyah çizgi Klasik GPR, mavi çizgi GPR/GPS Kombinasyon modelini tasvir etmektedir. Depolar arası boşlukların olduğu bölüme bakıldığında her iki yöntemde de yüzey ve zemin eğrileri birbirine yaklaşmaktadır. Eğriler arazi eğiminin olmadığı düzlemsel bir zemin altında gömülü olan 2 No’lu depo üzerinde neredeyse çakışık bir vaziyette iken 3 No’lu depo sınırlarında farklılaşmaktadır. Görüldüğü gibi eğimli arazide klasik GPR eğrilerinden ayrılarak depo sınırlarına daha yakın bir profil sergileyen GPR/GPS Kombinasyon Modeli gömülü obje sınırlarını daha doğru ifade etmektedir. Tüm profillerde görsel olarak analiz edildiğinde iki model arasında depo sınırlarına en yakın olan eğri GPR/GPS Kombinasyon Modelini ifade eden mavi rekli çizgidir.

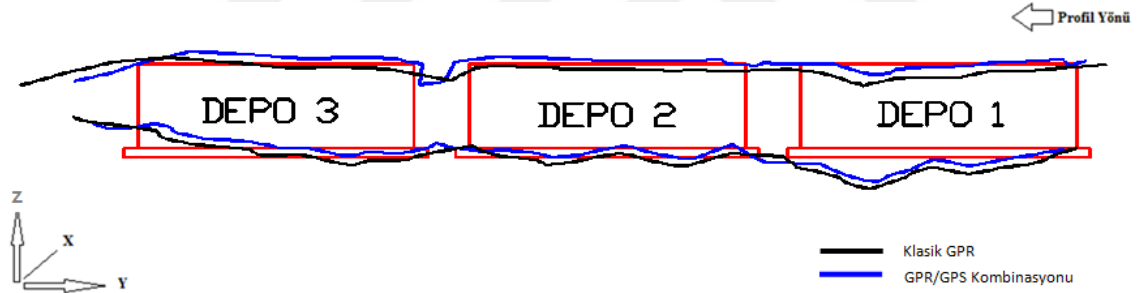
Klasik GPR Modeli ile GPR/GPS Kombinasyon Modelinin Karşılaştırılması:

1 ve 2 No’lu örneklerde Klasik GPR Metodu ile kıyaslandığında GPR/GPS Metodunun daha başarılı olduğu görülmektedir. Bu iki yöntemden hangisinin daha doğru bir modelleme imkanı sağladığını gösterebilmek amacıyla her iki yönetime dair detay noktaları, nokta konumları kıyaslanarak analiz edilmiştir. 3 ayrı su deposu sınırlarının tam olarak üzerinde bulunan 41 No’lu ölçüm profili ve Klasik GPR, GPR/GPS Kombinasyon Modeli olmak üzere her iki modele dair detay noktaları koordinatlı olarak sunulmaktadır (Şekil 4.78).

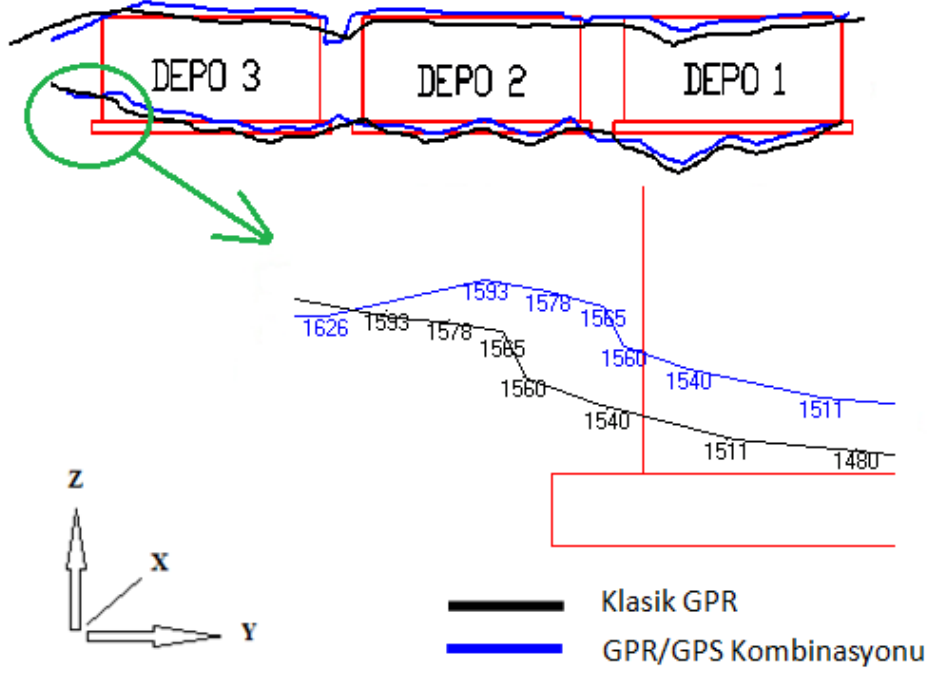


Şekil 4.78 41 No’lu ölçüm profili için Klasik GPR, GPR/GPS olmak üzere her iki modele ait detay noktaları.

Modelin Y, X ve Z eksenlerine NetCAD çizim programı "Hesap" Menüsünde bulunan Nokta Editörü yardımıyla eksen transformasyonu uygulanmış ve Şekil 4.79'da sunulan kesit görünümü elde edilmiştir. Şekil 4.79'da görülen siyah çizgi Klasik GPR, mavi çizgi GPR/GPS Kombinasyon Modelini ifade etmektedir. Depolar arası boşlukların olduğu bölüme bakıldığında her iki yöntemde de yüzey ve zemin eğrileri birbirine yaklaşmaktadır. 41 No'lu profil ölçüm profilleri arasında arazi eğiminin bulunduğu 1 ve 3 No'lu su depoları arasında en yüksek eğime sahiptir. 2 ve 3 No'lu depolar arasında bulunan boşluk kısmı yaklaşık 0,4 m kadar çökmüş olduğundan topografik düzeltmenin ve dolayısıyla GPR/GPS Kombinasyon Modelinin etkisinin en net görülebileceği örnektir. GPR/GPS Kombinasyon Modelini ifade eden mavi çizgi incelendiğinde 2 ve 3 No'lu depolar arasındaki çöküntü bölümünde yüksek eğim değerleri kaydedildiğinden bu noktalarda diğer modelden farklılaşmakta ve depo sınırlarına bariz şekilde yaklaşmaktadır. 3 No'lu depo üzerinde arazi eğiminden kaynaklanan topografik değişiklikler GPR/GPS Kombinasyon Modelinin başarısını öne çıkarmaktadır (Şekil 4.80).



Şekil 4.79 41 No'lu ölçüm profili için Klasik GPR, GPR/GPS olmak üzere her iki modele ait detay noktalarının kesit görünümü.



Şekil 4.80 41 No'lu Profil 3 No'lu su deposu üzerinde artan arazi eğiminin neden olduğu topografik değişiklikler ve GPR/GPS Kombinasyon Modelinin modellemeye olan katkısı.

Aynı radargram üzerinden alınan örneklemeler olmasına karşılık Klasik GPR Modelini ifade eden 1593 No'lu siyah nokta ile GPR/GPS modelini ifade eden 1593 No'lu mavi renkli nokta kıyaslandığında; GPR/GPS kombinasyonu sayesinde elde edilen planimetrik mesafenin yatayda 0,56 m, düşeyde 0,16 m ötelenerek depo sınırlarına daha yakın bir konuma taşındığı görülmektedir. Benzer durum Şekil 4.80'de görüldüğü gibi 1578, 1565, 1560 ve 1540 numaralı detay noktaları için de geçerlidir. Bu bölümde söz konusu eğimli arazi detay noktaları ile arazi eğimi bulunmayan 511, 539, 553, 566 No'lu detay noktaları için gömülü su depolarının bilinen koordinatları kullanılarak modellemenin istatistiksel başarısı araştırılmıştır. 41 No'lu profil hattının 1 No'lu depo ile kesişim noktasının koordinatları hesaplamalarda "ümit değer" olarak kullanılmıştır. Çizelge 4.1'de eğimsiz arazi için seçilen detay noktalarının gömülü deponun bilinen koordinatlarına göre standart sapma hesabı görülmektedir. Bilinen nokta koordinatları "ümit değer" kabul edilerek detay noktaların koordinat değerleri ile farkları olan gerçek hata, varyans ve Denklem 4.2 ile hesaplanan standart sapma değerleri ( $m_0$ ) sunulmaktadır.

$$m_0 = \sqrt{\frac{\sum[VV]}{n}} \quad (4.2)$$



Çizelge 4.1 Eğimsiz arazide Klasik GPR ve GPR/GPS Modelleri için standart sapma hesabı

NN	xi	yi	Klasik GPR X	_dx	_dx^2	Klasik GPR Y	_dy	_dy^2	GPR/GPS X	_dx	_dx^2	GPR/GPS Y	_Dy	_dY^2
Ümit Değer	4533983.398	425246.057												
85			4533983.096	0.302	0.091	425247.071	-1.014	1.028	4533983.096	0.302	0.091	425247.071	-1.014	1.028
86			4533983.103	0.295	0.087	425247.047	-0.990	0.980	4533983.103	0.295	0.087	425247.046	-0.989	0.979
87			4533983.110	0.288	0.083	425247.023	-0.966	0.933	4533983.111	0.287	0.083	425247.022	-0.965	0.930
88			4533983.117	0.281	0.079	425246.999	-0.942	0.887	4533983.118	0.280	0.078	425246.997	-0.940	0.883
89			4533983.124	0.274	0.075	425246.975	-0.918	0.843	4533983.125	0.273	0.074	425246.972	-0.915	0.837
90			4533983.131	0.267	0.071	425246.951	-0.894	0.799	4533983.132	0.266	0.071	425246.947	-0.890	0.793
91			4533983.139	0.259	0.067	425246.927	-0.870	0.757	4533983.140	0.258	0.067	425246.923	-0.866	0.749
92			4533983.146	0.252	0.064	425246.903	-0.846	0.716	4533983.147	0.251	0.063	425246.898	-0.841	0.707
93			4533983.153	0.245	0.060	425246.879	-0.822	0.676	4533983.154	0.244	0.059	425246.873	-0.816	0.666
94			4533983.160	0.238	0.057	425246.855	-0.798	0.637	4533983.162	0.236	0.056	425246.849	-0.792	0.627
95			4533983.167	0.231	0.053	425246.831	-0.774	0.599	4533983.169	0.229	0.053	425246.824	-0.767	0.588
96			4533983.174	0.224	0.050	425246.807	-0.750	0.563	4533983.176	0.222	0.049	425246.799	-0.742	0.551
97			4533983.181	0.217	0.047	425246.783	-0.726	0.527	4533983.183	0.215	0.046	425246.775	-0.718	0.515
98			4533983.188	0.210	0.044	425246.759	-0.702	0.493	4533983.191	0.207	0.043	425246.750	-0.693	0.480
99			4533983.195	0.203	0.041	425246.735	-0.678	0.460	4533983.198	0.200	0.040	425246.725	-0.668	0.446
100			4533983.202	0.196	0.038	425246.711	-0.654	0.428	4533983.205	0.193	0.037	425246.700	-0.643	0.414

101			4533983.209	0.189	0.036	425246.687	-0.630	0.397	4533983.212	0.186	0.034	425246.676	-0.619	0.383
102			4533983.216	0.182	0.033	425246.663	-0.606	0.368	4533983.220	0.178	0.032	425246.651	-0.594	0.353
103			4533983.223	0.175	0.030	425246.639	-0.582	0.339	4533983.227	0.171	0.029	425246.626	-0.569	0.324
104			4533983.230	0.168	0.028	425246.615	-0.558	0.312	4533983.234	0.164	0.027	425246.602	-0.545	0.297
105			4533983.238	0.160	0.026	425246.591	-0.534	0.285	4533983.241	0.157	0.025	425246.577	-0.520	0.270
106			4533983.245	0.153	0.024	425246.567	-0.510	0.260	4533983.249	0.149	0.022	425246.552	-0.495	0.245
107			4533983.252	0.146	0.021	425246.543	-0.486	0.237	4533983.256	0.142	0.020	425246.528	-0.471	0.221
108			4533983.259	0.139	0.019	425246.519	-0.462	0.214	4533983.263	0.135	0.018	425246.503	-0.446	0.199
109			4533983.266	0.132	0.017	425246.495	-0.438	0.192	4533983.271	0.127	0.016	425246.478	-0.421	0.177
110			4533983.273	0.125	0.016	425246.471	-0.414	0.172	4533983.278	0.120	0.014	425246.453	-0.396	0.157
111			4533983.280	0.118	0.014	425246.447	-0.390	0.152	4533983.285	0.113	0.013	425246.429	-0.372	0.138
112			4533983.287	0.111	0.012	425246.423	-0.366	0.134	4533983.292	0.106	0.011	425246.404	-0.347	0.120
113			4533983.294	0.104	0.011	425246.399	-0.342	0.117	4533983.300	0.098	0.010	425246.379	-0.322	0.104
114			4533983.301	0.097	0.009	425246.375	-0.318	0.101	4533983.307	0.091	0.008	425246.355	-0.298	0.089
115			4533983.308	0.090	0.008	425246.352	-0.295	0.087	4533983.314	0.084	0.007	425246.330	-0.273	0.075
116			4533983.315	0.083	0.007	425246.328	-0.271	0.073	4533983.321	0.077	0.006	425246.305	-0.248	0.062
117			4533983.323	0.075	0.006	425246.304	-0.247	0.061	4533983.329	0.069	0.005	425246.281	-0.224	0.050
124			4533983.374	0.024	0.001	425246.136	-0.079	0.006	4533983.337	0.061	0.004	425246.254	-0.197	0.039
125			4533983.382	0.016	0.000	425246.113	-0.056	0.003	4533983.346	0.052	0.003	425246.227	-0.170	0.029

Çizelge 4.1 verilerinden görüldüğü gibi Klasik GPR yöntemi ile X koordinatı için hesaplanan standart sapma değeri 0,187 iken GPR/GPS Kombinasyon modelinin X koordinatı için standart sapma değeri 0,0185 olarak hesaplanmıştır. Y koordinatı için ise Klasik GPR yönteminde standart sapma değeri 0,625 iken GPR/GPS Kombinasyon modelinde bu değer 0,619 olarak hesaplanmaktadır. Her iki koordinat için eğimsiz kabul edilebilecek arazi koşullarında (ortalama eğim 2 derece) hesaplanan standart sapma değerleri birbirine yakın olmakla beraber GPR/GPS Kombinasyon modelinin standart sapma değeri Klasik GPR modeline göre daha düşüktür. Klasik GPR Modeli ve GPR/GPS Kombinasyon Modeli için nokta konum hatası Denklem 4.3'te yerine konulduğunda sırasıyla 0,652 ve 0,646 değerleri elde edildi. Bu sonuçlara göre GPR/GPS Kombinasyon Modelinin Klasik GPR Modeline kıyasla konumsal olarak daha düşük bir standart sapma değerine sahip olmakla birlikte eğimsiz kabul edilebilecek arazi koşullarında her iki yöntemde de birbirine yakın sonuçlar elde edildiği söylenilebilir.

$$m_{(XY)} = \sqrt{((mo(X))^2 + mo(Y)^2)} \quad (4.3)$$

Çizelge 4.2'de ise eğimli arazi için seçilen detay noktalarının gömülü deponun bilinen koordinatlarına göre standart sapma hesabı görülmektedir.

Çizelge 4.2 Eğimli arazide Klasik GPR ve GPR/GPS Modelleri için standart sapma hesabı

NN	xi	yi	Klasik GPR X	_dx	_dx <sup>2</sup>	Klasik GPR Y	_dy	_dy <sup>2</sup>	GPR/GPS X	_dx	_dx <sup>2</sup>	GPR/GPS Y	_dy	_dy <sup>2</sup>
Ümit Değer	4533997.759	425215.210												
1512			4533997.897	-0.138	0.019	425214.938	0.272	0.074	4533997.759	0.000	0.000	425215.210	0.000	0.000
1513			4533997.906	-0.147	0.022	425214.914	0.295	0.087	4533997.769	-0.010	0.000	425215.185	0.025	0.001
1514			4533997.914	-0.156	0.024	425214.891	0.319	0.102	4533997.779	-0.020	0.000	425215.160	0.050	0.003
1515			4533997.923	-0.164	0.027	425214.867	0.343	0.117	4533997.789	-0.030	0.001	425215.135	0.075	0.006
1516			4533997.932	-0.173	0.030	425214.844	0.366	0.134	4533997.799	-0.040	0.002	425215.109	0.100	0.010
1517			4533997.941	-0.182	0.033	425214.820	0.390	0.152	4533997.809	-0.050	0.002	425215.084	0.125	0.016
1518			4533997.950	-0.191	0.037	425214.797	0.413	0.171	4533997.819	-0.060	0.004	425215.059	0.151	0.023
1519			4533997.959	-0.200	0.040	425214.773	0.437	0.191	4533997.829	-0.070	0.005	425215.034	0.176	0.031
1520			4533997.968	-0.209	0.044	425214.750	0.460	0.212	4533997.839	-0.080	0.006	425215.009	0.201	0.040
1521			4533997.977	-0.218	0.047	425214.726	0.484	0.234	4533997.849	-0.090	0.008	425214.984	0.226	0.051
1522			4533997.985	-0.227	0.051	425214.703	0.507	0.257	4533997.859	-0.100	0.010	425214.959	0.251	0.063
1523			4533997.994	-0.236	0.055	425214.679	0.531	0.282	4533997.869	-0.110	0.012	425214.934	0.276	0.076
1524			4533998.003	-0.244	0.060	425214.656	0.554	0.307	4533997.879	-0.120	0.014	425214.909	0.301	0.091
1525			4533998.012	-0.253	0.064	425214.632	0.578	0.334	4533997.889	-0.130	0.017	425214.884	0.326	0.106
1526			4533998.021	-0.262	0.069	425214.609	0.601	0.361	4533997.899	-0.140	0.020	425214.858	0.351	0.123
1527			4533998.030	-0.271	0.074	425214.585	0.625	0.390	4533997.909	-0.150	0.022	425214.833	0.376	0.142

Çizelge 4.2 Eğimli arazide Klasik GPR ve GPR/GPS Modelleri için standart sapma hesabı (Devamı)

1528			4533998.039	-0.280	0.079	425214.562	0.648	0.420	4533997.919	-0.160	0.026	425214.808	0.402	0.161
1529			4533998.048	-0.289	0.084	425214.538	0.672	0.451	4533997.929	-0.170	0.029	425214.783	0.427	0.182
1530			4533998.057	-0.298	0.089	425214.515	0.695	0.483	4533997.939	-0.180	0.032	425214.758	0.452	0.204
1531			4533998.066	-0.307	0.094	425214.491	0.718	0.516	4533997.949	-0.190	0.036	425214.733	0.477	0.227
1532			4533998.075	-0.316	0.100	425214.468	0.742	0.550	4533997.959	-0.200	0.040	425214.708	0.502	0.252
1533			4533998.084	-0.325	0.106	425214.445	0.765	0.586	4533997.969	-0.210	0.044	425214.683	0.527	0.278
1534			4533998.093	-0.334	0.112	425214.421	0.789	0.622	4533997.979	-0.220	0.048	425214.658	0.552	0.305
1535			4533998.102	-0.343	0.118	425214.398	0.812	0.660	4533997.989	-0.230	0.053	425214.633	0.577	0.333
1536			4533998.111	-0.352	0.124	425214.374	0.836	0.698	4533997.999	-0.240	0.058	425214.608	0.602	0.363
1537			4533998.120	-0.361	0.130	425214.351	0.859	0.738	4533998.009	-0.250	0.062	425214.582	0.627	0.394
1538			4533998.129	-0.370	0.137	425214.327	0.882	0.779	4533998.019	-0.260	0.067	425214.557	0.652	0.426
1539			4533998.138	-0.379	0.144	425214.304	0.906	0.820	4533998.029	-0.270	0.073	425214.532	0.678	0.459
1540			4533998.147	-0.388	0.151	425214.281	0.929	0.863	4533998.039	-0.280	0.078	425214.507	0.703	0.494
1541			4533998.156	-0.397	0.158	425214.257	0.953	0.907	4533998.049	-0.290	0.084	425214.482	0.728	0.530
1542			4533998.165	-0.406	0.165	425214.234	0.976	0.953	4533998.059	-0.300	0.090	425214.457	0.753	0.567
1543			4533998.174	-0.415	0.172	425214.210	0.999	0.999	4533998.069	-0.310	0.096	425214.432	0.778	0.605
1544			4533998.183	-0.424	0.180	425214.187	1.023	1.046	4533998.079	-0.320	0.102	425214.407	0.803	0.645
1545			4533998.192	-0.433	0.188	425214.164	1.046	1.094	4533998.089	-0.330	0.109	425214.382	0.828	0.686
1546			4533998.201	-0.442	0.196	425214.140	1.070	1.144	4533998.099	-0.340	0.115	425214.357	0.853	0.728

Çizelge 4.2 Eğimli arazide Klasik GPR ve GPR/GPS Modelleri için standart sapma hesabı (Devamı)

1547			4533998.210	-0.451	0.204	425214.117	1.093	1.195	4533998.109	-0.350	0.122	425214.332	0.878	0.771
1548			4533998.219	-0.460	0.212	425214.093	1.116	1.246	4533998.119	-0.360	0.129	425214.306	0.903	0.816
1549			4533998.228	-0.469	0.220	425214.070	1.140	1.299	4533998.129	-0.370	0.137	425214.281	0.928	0.862
1550			4533998.237	-0.479	0.229	425214.047	1.163	1.353	4533998.138	-0.380	0.144	425214.256	0.954	0.909
				$\Sigma\{[VV]\}$	4.086		$\Sigma\{[VV]\}$	22.826		$\Sigma\{[VV]\}$	1.899		$\Sigma\{[VV]\}$	11.976
				<b>m0=0.328</b>			<b>m0=0.775</b>			<b>m0=0.224</b>			<b>m0=0.561</b>	

Eğimli arazi koşullarında seçilen 39 detay noktasının X ve Y koordinatları için standart sapma hesabı her iki model için de yapıldığında Klasik GPR yöntemi ile X koordinatı için hesaplanan standart sapma değeri 0,328 olarak hesaplanmıştır. GPR/GPS Kombinasyon modelinin X koordinatı için standart sapma değeri 0,224 iken, Y koordinatı için Klasik GPR Modelinde 0,775; GPR/GPS Kombinasyon Modelinde standart sapma değeri 0,561 olarak hesaplanmaktadır. Her iki model için eğimli arazi koşullarında konum hatası Denklem 4.3 ile hesaplandığında Klasik GPR Modeli için 0,842 (m), GPR/GPS Kombinasyon modeli için 0,604(m) değerleri elde edilmiştir. Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4 incelendiğinde eğimli ve eğimsiz arazi koşulları için yapılan hesaplamalarda eğimli arazide Klasik GPR Modelinin standart sapması 0,652 değerinden 0,842' ye yükseldiği görülmüştür.

Çizelge 4.3 Standart sapma hesapları özet çizelgesi.

	Klasik GPR (X) m <sub>o</sub>	Klasik GPR (Y)m <sub>o</sub>	GPR/GPS Kom.(X)m <sub>o</sub>	GPR/GPS Kom.(Y)m <sub>o</sub>
<b>EĞİMLİ ARAZİ</b>	0,328	0,775	0,224	0,561
<b>EĞİMSİZ ARAZİ</b>	0,187	0,625	0,185	0,619

Çizelge 4.4 Konum hatası özet çizelgesi.

	Klasik GPR (XY) m <sub>o</sub>	GPR/GPS Kom. (XY) m <sub>o</sub>
<b>EĞİMLİ ARAZİ</b>	0,842	0,604
<b>EĞİMSİZ ARAZİ</b>	0,652	0,646

GPR/GPS kombinasyon Modelinde ise eğimsiz arazi koşullarındaki 0,646 olan standart sapma değeri eğimli arazi koşulları için 0,604 olarak hesaplandı. Bu değer GPR/GPS Kombinasyon modelinin standart sapmasının eğim farklılığından etkilenmediğini ortaya koymaktadır. Denklem 4.4 ile doğruluk analizi yapıldığında;

$$\frac{mo(KlasikGPR)-mo(GPR-GPS)}{mo(KlasikGPR)} X100 \quad (4.4)$$

Bu sonuçlara göre eğimli arazi koşulları için Klasik GPR tekniğinde odometrenin tekerlek devir sayısı ile ölçülendirilen baz uzunluğu hatası GNSS/GPS teknolojisi yardımıyla planimetrik koordinat farkları kullanılarak yataya indirgenebilmiştir.

Yapılan çalışmanın sonuç verileri “Eğimli arazi koşullarında Klasik GPR tekniğinde odometrenin tekerlek devir sayısı ile ölçülendirilen baz uzunluğu hatası GNSS/GPS teknolojisi yardımıyla planimetrik koordinat farkları kullanılarak yataya indirgenebilir. GPR/GPS Kombinasyonu Modeli ile Klasik GPR tekniğine kıyasla istatistiksel anlamda daha doğru konum verileri üretebilir” hipotezini doğrulamaktadır. Şekil 4.80 incelendiğinde GPR/GPS kombinasyonunu ifade eden mavi renkli anomalinin gömülü depo sınırlarını daha doğru ifade ettiği görsel olarak anlaşılmaktadır. Hipotezin araştırma soruları yapılan çalışmanın sonuç verileri ile cevaplanacak olursa;

a) GPR/GPS Kombinasyon Modeli Klasik GPR yöntemine kıyasla gömülü obje ya da katman sınırlarını belirlemede ne ölçüde başarılıdır?

- GPR/GPS Kombinasyon modelinin Klasik GPR yöntemine kıyasla eğimsiz kabul edilebilecek arazi koşullarında modellemeye olan katkısı % 0,89 ve eğimli (7°) arazi koşullarında % 28,20 olarak hesaplanmaktadır. Bu analizle GPR/GPS Kombinasyon Modelinin Klasik GPR Modeline göre daha başarılı olduğu istatistiksel olarak kanıtlanmıştır.

b) GPR/GPS Kombinasyon modelinin istatistiksel başarısı gömülü obje ya da katman araştırmasının hangi parametrelerine bağlı olarak değişmektedir?

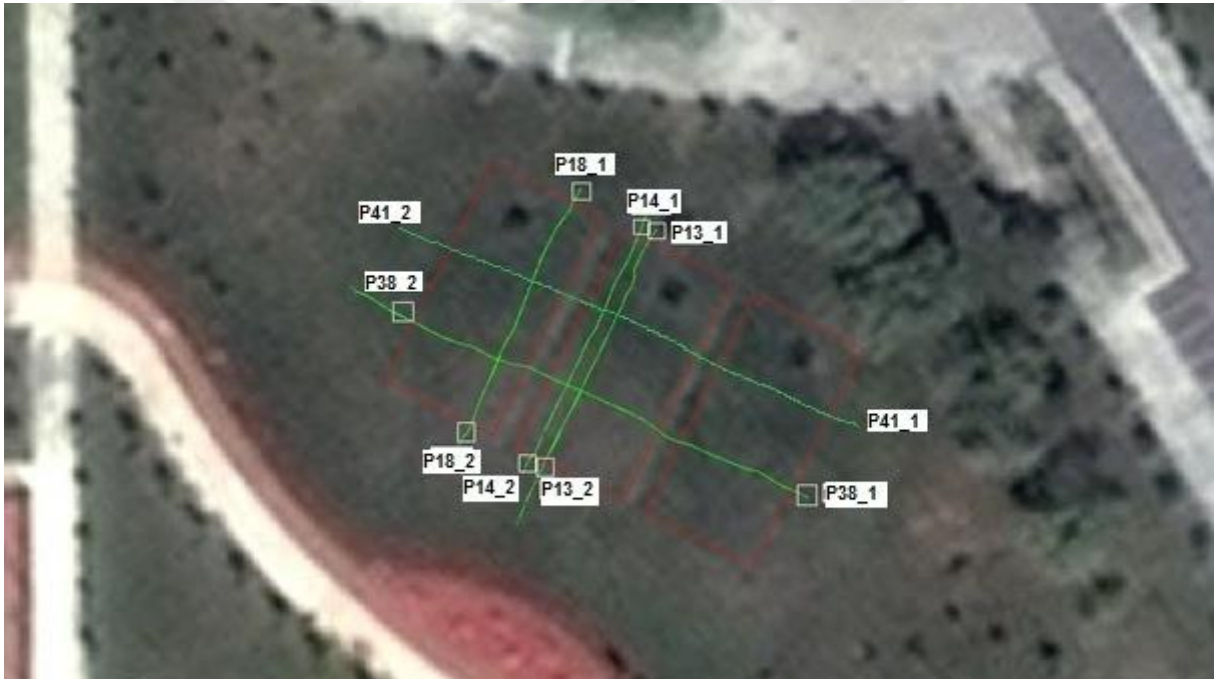
- Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4 incelendiğinde eğimli ve eğimsiz arazi koşulları için yapılan hesaplamalarda eğimli arazide Klasik GPR Modelinin standart sapması 0,652 değerinden 0,842' ye yükselmiştir. GPR/GPS kombinasyon Modelinde ise eğimsiz arazi koşullarındaki 0,646 olan standart sapma değeri eğimli arazi koşulları için 0,604 olarak hesaplanmıştır. Bu değer GPR/GPS Kombinasyon modelinin standart sapmasının eğim farklılığından etkilenmediğini ortaya koymaktadır.



## Klasik GPR – GPR/GPS Kombinasyonu ve Jiroskopik Düzeltme Modellerinin Karşılaştırılması:

### Sayısal Analiz 1

Bu bölümde sırasıyla Klasik GPR metodu, GPR/GPS Kombinasyon Metodu ve Jiroskopik Etkileri Düzeltmiş olarak hazırlanan 3 model; boyutları bilinen gömülü obje sınırları ile karşılaştırılacaktır. Klasik GPR, GPR/GPS Kombinasyon modeli ve Jiroskopik düzeltme yöntemlerinden hangisinin daha doğru bir modelleme imkanı sağladığını gösterebilmek amacıyla her 3 yönteme ait detayları noktalarının koordinatları kıyaslanarak istatistiksel olarak analiz edilecektir. Ölçüm profillerinden sırası ile 13, 14, 18, 38 ve 41 No'lu profiller üzerinde farklı eğim grupları seçilmiş, 8 yüzey ve 8 zemin olmak üzere toplam 16 örnekleme alınmıştır. Örnek profillerin depo sınırları ile olan ilişkileri ve profil yerleşimi Şekil 4.81'de görüldüğü gibidir.



Şekil 4.81 Farklı eğim gruplarından alınan örnekleme noktalarının profil ve lokasyonlarının depo sınırları ile ilişkisi yüzey ve zemin anomalilerine ait detayların örnekleme aralığı, eğim ve derinlik değerleri Çizelge 4.5 ve Çizelge 4.6'da görülmektedir.

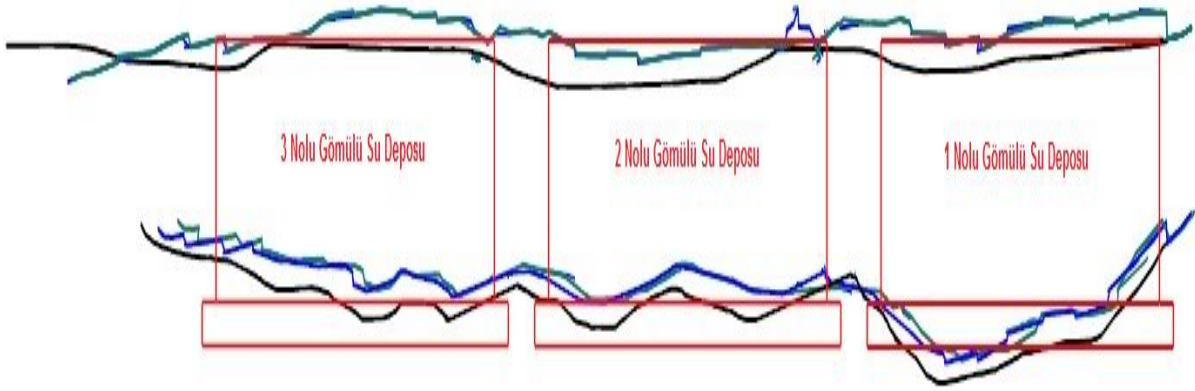
Çizelge 4.5 Yüzey anomalisi örnekleri

Profil Adı	Örnek Aralığı (Trace No)	Ort. Eğim ( $\Phi$ )	Ort. Eğim (w)	Derinlik (h)
P13-1	968-1024	-14,5	1	0,25
P14-1	102-148	-4	-2	0,44
P14-2	931-981	-12	-0,5	0,44
P18-1	942-1000	-13	0,3	0,30
P38-1	69-118	-22	-0,8	0,67
P38-2	1505-1563	-7	-2	0,47
P41-1	85-129	-1	1	0,38
P41-2	1512-1550	-16	1	0,58

Çizelge 4.6 Zemin anomalisi örnekleri

Profil Adı	Örnek Aralığı (Trace No)	Ort. Eğim ( $\Phi$ )	Ort. Eğim (w)	Derinlik (h)
P13-1 Zemin	968-1024	-14,5	1	1,36
P14-1 Zemin	102-148	-4	-2	1,25
P14-2 Zemin	931-981	-12	-0,5	1,25
P18-1 Zemin	942-1000	-13	0,3	1,20
P38-1 Zemin	69-118	-22	-0,8	2,12
P38-2 Zemin	1505-1563	-7	-2	2,11
P41-1 Zemin	85-129	-1	1	2,80
P41-2 Zemin	1512-1550	-16	1	2,88

41 No'lu profilden alınan "P41-1" ve "P41-1 Zemin" örneklerinde ortalama eğim yaklaşık  $1^\circ$  derecedir. Yine 41 No'lu profilden örneklenen "P41-2" ve "P41-2 Zemin" ise ortalama eğimin  $16^\circ$  olduğu bir lokasyonda bulunmaktadır (Çizelge 4.6). Şekil 4.82'da örneklemlerin alındığı 41 no'lu profil hattından üretilen yüzey ve zemin anomalilerinin Klasik GPR (siyah), GPR/GPS Kombinasyon Modeli (Mavi) ve Jiroskopik Düzeltme Modeli (yeşil) olmak üzere her üç modeldeki karşılıklarının depo sınırlarıyla olan ilişkisi gösterilmektedir.



Şekil 4.82 Klasik GPR (siyah), GPR/GPS Kombinasyon Modeli (Mavi) ve Jiroskopik Düzeltme Modeli (yeşil) olmak üzere her üç modeldeki karşılıklarının depo sınırlarıyla olan ilişkisi.

41 No'lu profil hattının 1 No'lu depo ile kesişim noktasının koordinatları 41\_1 yüzey ve 41\_1 zemin örneklemelerinin standart sapma hesabı için "ümit değer" olarak kullanılmıştır. seçilen detay noktaların koordinat değerleri ile farkları olan gerçek hata, varyans ve Denklem 4.5 ile hesaplanan standart sapma değerleri ( $m_o$ ) sunulmaktadır.

$$m_o = \sqrt{\frac{\sum[VV]}{n}} \quad (4.5)$$

Klasik GPR Modeli, GPR/GPS Kombinasyon Modeli ve Jiroskopik Düzeltme Modeli olmak üzere aynı anomali sınırından örneklenen detay nokta koordinatlarının (X,Y) her üç modeldeki karşılıkları ve gerçek koordinatları bilinen depo sınırlarını ümit değer kabul ederek hesaplanan standart sapmaları ile modellerin nokta konum hataları Tüm örneklemelerin özet bilgilerinin Çizelge 4.6 da görüldüğü gibidir.

Ortalama eğimin -1 derece olduğu "41\_1 yüzey" örneklemede Klasik GPR yöntemi ile X koordinatı için hesaplanan standart sapma değeri 0,184 iken GPR/GPS Kombinasyon modelinin için 0,183, Jiroskopik Düzeltme Modelinde ise aynı değer 0,179 olarak hesaplanmaktadır. Y koordinatı için ise Klasik GPR yönteminde standart sapma değeri 0,617 iken GPR/GPS Kombinasyon modelinde bu değer 0,611 ve Jiroskopik Düzeltme Modeli için 0,598 olarak hesaplanmaktadır. Klasik GPR Modeli ve GPR/GPS Kombinasyon Modeli ve Jiroskopik Düzeltme Modelleri için nokta konum hatası Denklem 4.6'de yerine konulduğunda

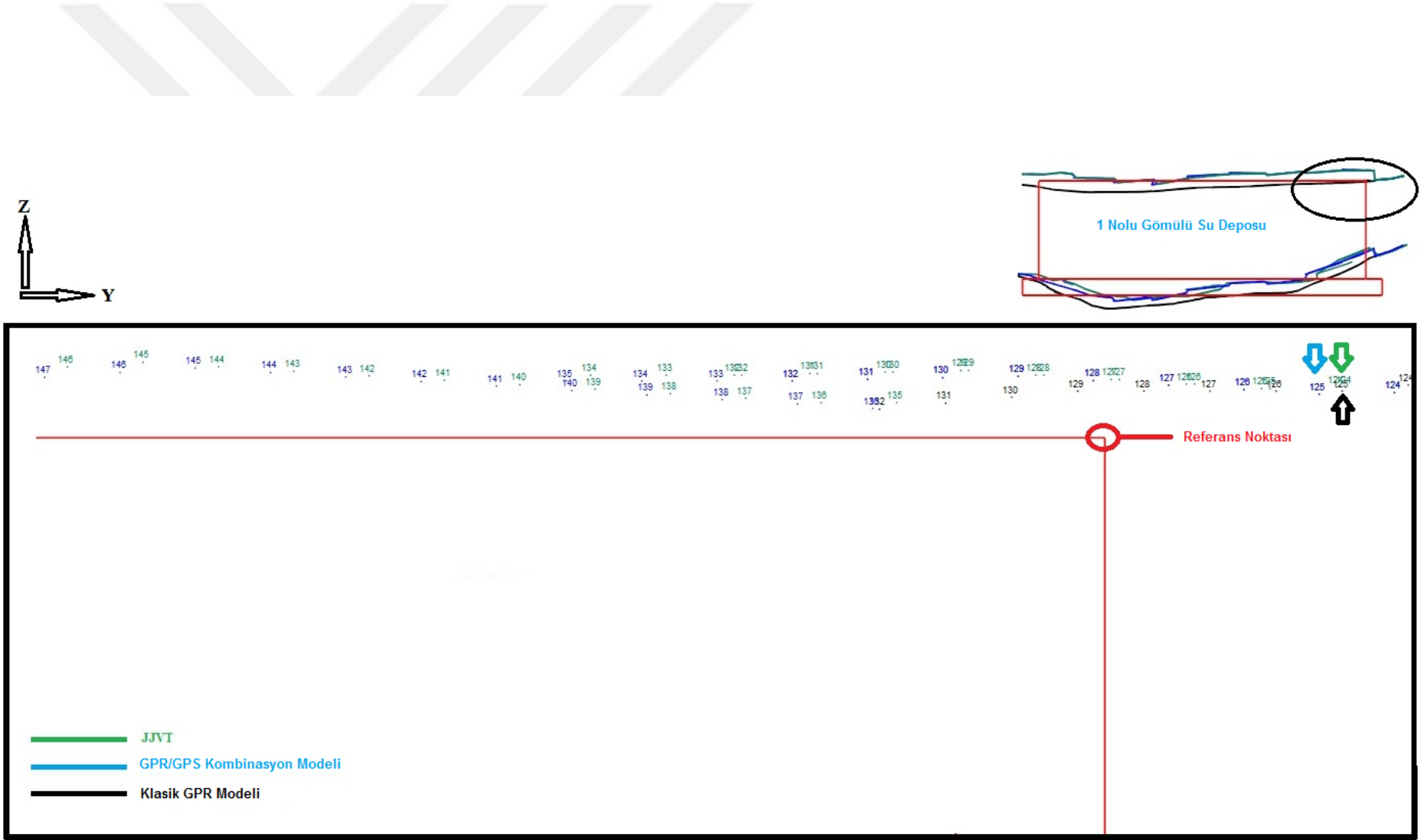
sırasıyla 0,644 (m), 0,638 (m) ve 0,640 (m) değerleri elde edilmektedir. Bu sonuçlara göre eğimsiz arazi koşulları için her üç yöntemde de birbirine yakın sonuçlar elde edilmektedir.

$$m_{(XY)} = \sqrt{((mo(X))^2 + mo(Y)^2)} \quad (4.6)$$

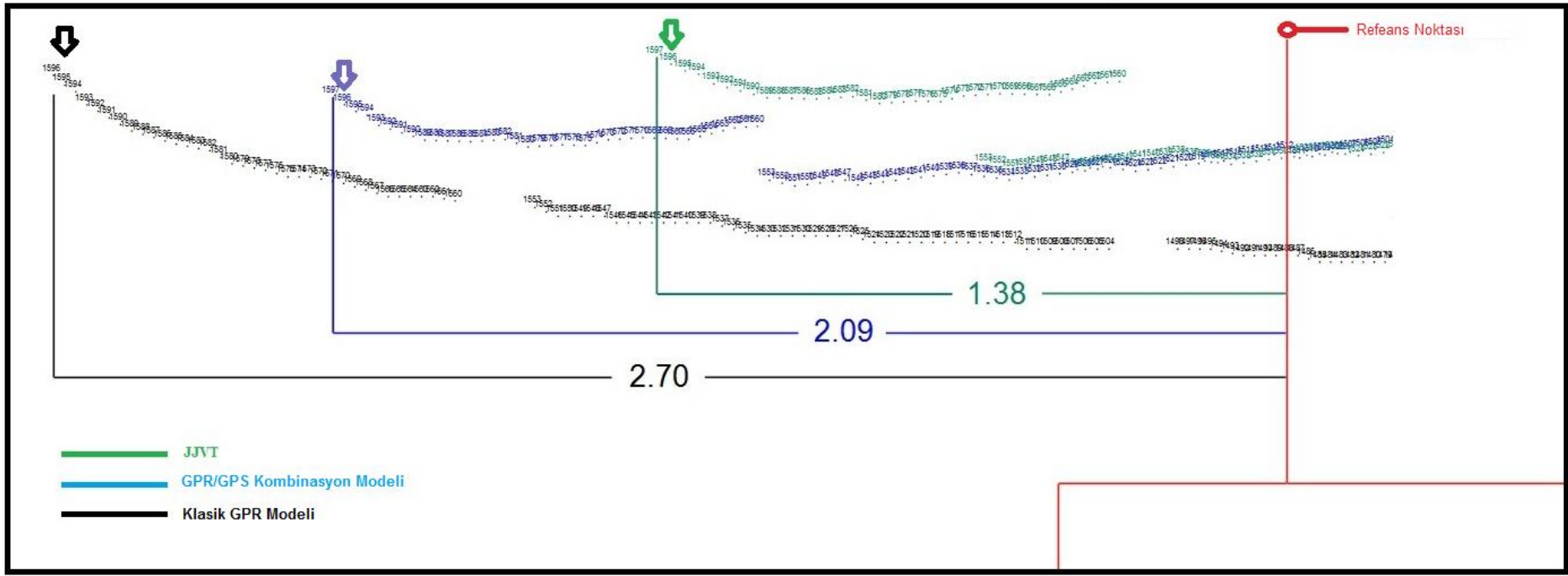
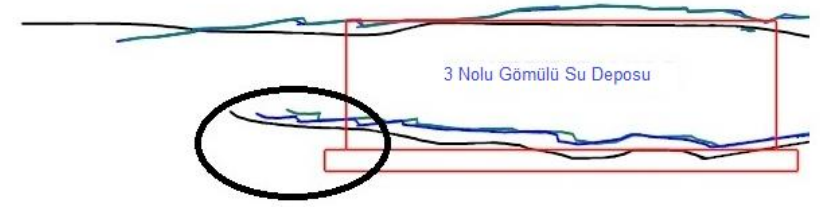
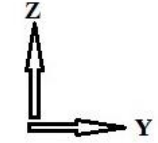
Eğimli arazi koşulları için aynı profilin 14 derece eğimdeki lokasyonundan örneklenen “41\_2 yüzey” ve “41\_2 zemin” örneklemelemlerinde ise durum farklılaşmaktadır. Yüzey örnekleme için nokta konum hataları Klasik GPR için 0,838 ; GPR/GPS Kombinasyon Modeli için 0,603 ve Jiroskopik düzeltme modeli için 0,535 olarak hesaplanmaktadır. Aynı lokasyon ve eğim koşullarında fakat daha derin bir anomaliden örneklenen “41\_2 zemin” anomalisi için hesaplanan nokta konum hataları ise Klasik GPR Modeli için 0,838; GPR/GPS Kombinasyon Modeli için 0,603 ve Jiroskopik Düzeltme Modeli için 0,386 olarak hesaplanmaktadır.

$$\frac{mo(Klasik\ GPR) - mo(GPR-GPS)}{mo(Klasik\ GPR)} \times 100 \quad (4.7)$$

Denklem 4.7 ile doğruluk analizi yapıldığında 41 No’lu profilden eğimsiz arazi koşullarında üretilen modellerde %1 olan düzeltme değeri eğimli arazi koşullarında üretilen “P14-2\_Zemin” adlı örneklemede %53,9 olarak hesaplanmıştır. 931 – 981 trace no aralığında bulunan noktaların her üç modelleme ile karşılaştırılmış görünümü Şekil 4.82 de görüldüğü gibidir. Siyahla çerçevelenen Klasik GPR detay noktaları depo sınırından itibaren 1,42 metrelik aralığa dağılmışken GPR/GPS Kombinasyon modelinde 1,01 metre ve Jiroskopik düzeltme modelinde 0,5 metrelik bir aralıkta kümelenmektedir. Bir başka ifade ile eğimli arazi koşullarında Jiroskopik Düzeltme Modeli gömülü depo sınırlarını en doğru ifade eden modeldir. Yüzey ve zemin anomalileri arasındaki derinlik ve eğim farklılığının sonuçları nasıl etkilediği Şekil 4.83 ve Şekil 4.84 de görülmektedir. Bu analizle GPR/GPS Kombinasyon Modelinin Klasik GPR Modeline göre daha başarılı olduğu istatistiksel olarak kanıtlanmıştır.



Şekil 4.83 Eğimsiz arazi (1°) koşullarında seçilen detay noktalarının Klasik GPR (siyah), GPR/GPS Kombinasyonu (mavi) ve (JJVT) Jiroskopik Düzeltme Modeli (yeşil) olmak üzere her 3 modeldeki tasviri.



Şekil 4.84 Eğimli arazi (16°) koşullarında ve zemin anomalisinden seçilen detay noktalarının Klasik GPR (siyah), GPR/GPS Kombinasyonu (mavi) ve (JJVT) Jiroskopik Düzeltme Modeli (yeşil) olmak üzere her 3 modeldeki tasviri.

Çizelge 4.7 Standart sapma hesapları özet çizelgesi.

PN	Eğim	Derinlik	Klasik GPR (X) m <sub>0</sub>	Klasik GPR (Y) m <sub>0</sub>	Klasik GPR m <sub>0 (xy)</sub>	GPR/GPS Kom. (X) m <sub>0</sub>	GPR/GPS Kom. (Y) m <sub>0</sub>	GPR/GPS Kom. m <sub>0 (xy)</sub>	JJVT (X) m <sub>0</sub>	JJVT (Y) m <sub>0</sub>	JJVT m <sub>0 (xy)</sub>
P13-1	-14,5	0,25	1,002	0,417	<b>1,085</b>	0,731	0,306	<b>0,792</b>	0,676	0,289	<b>0,735</b>
P13-1_Zemin	-14,5	1,36	1,002	0,417	<b>1,085</b>	0,731	0,306	<b>0,792</b>	0,439	0,215	<b>0,489</b>
P14-1	-4	0,44	0,863	0,606	<b>1,055</b>	0,750	0,561	<b>0,936</b>	0,561	0,747	<b>0,930</b>
P14-1_Zemin	-4	1,25	0,863	0,606	<b>1,055</b>	0,750	0,560	<b>0,936</b>	0,731	0,492	<b>0,881</b>
P14-2	-12	0,44	0,554	0,475	<b>0,730</b>	0,455	0,401	<b>0,607</b>	0,401	0,417	<b>0,369</b>
P14-2_Zemin	-12	1,25	0,554	0,475	<b>0,730</b>	0,445	0,401	<b>0,607</b>	0,355	0,318	<b>0,476</b>
P18-1	--13	0,30	1,346	0,610	<b>1,478</b>	1,086	0,430	<b>1,168</b>	1,037	0,409	<b>1,115</b>
P18-1_Zemin	-13	1,20	1,346	0,609	<b>1,478</b>	1,086	0,430	<b>1,168</b>	0,902	0,353	<b>0,968</b>
P38-1	-22~ -20	0,67	0,320	0,800	<b>0,860</b>	0,280	0,690	<b>0,750</b>	0,190	0,510	<b>0,540</b>
P38-1_Zemin	-22~ -20	2,11	0,322	0,796	<b>0,859</b>	0,278	0,694	<b>0,747</b>	0,188	0,334	<b>0,383</b>
P38-2	-7	0,47	0,356	0,744	<b>0,825</b>	0,306	0,642	<b>0,712</b>	0,285	0,557	<b>0,625</b>
P38-2_Zemin	-7	2,11	0,356	0,744	<b>0,825</b>	0,306	0,642	<b>0,712</b>	0,255	0,437	<b>0,506</b>
P41-1	-1	2,80	0,184	0,617	<b>0,644</b>	0,183	0,611	<b>0,638</b>	0,147	0,623	<b>0,640</b>
P41-1_Zemin	-1	2,80	0,184	0,617	<b>0,644</b>	0,183	0,611	<b>0,638</b>	0,179	0,598	<b>0,624</b>
P41-2	-16	2,88	0,343	0,765	<b>0,838</b>	0,238	0,554	<b>0,603</b>	0,242	0,477	<b>0,535</b>
P41-2_Zemin	-16	2,88	0,343	0,765	<b>0,838</b>	0,238	0,554	<b>0,603</b>	0,258	0,288	<b>0,386</b>

Çizelge 4.7 verileri ile oluşturulan Çizelge 4.8 ve Çizelge 4.9’da farklı eğim gruplarından seçilen örneklemelerden P13\_1, P14-1, P14-2, P18-1, P38-1, P38-2, P41-1 ve P41-2 için yüzey ve zemin anomalilerine özel olarak hazırlanan hesap özetleri sunulmaktadır.

Çizelge 4.8 Yüzey örneklemeleri için modelleme başarı çizelgesi

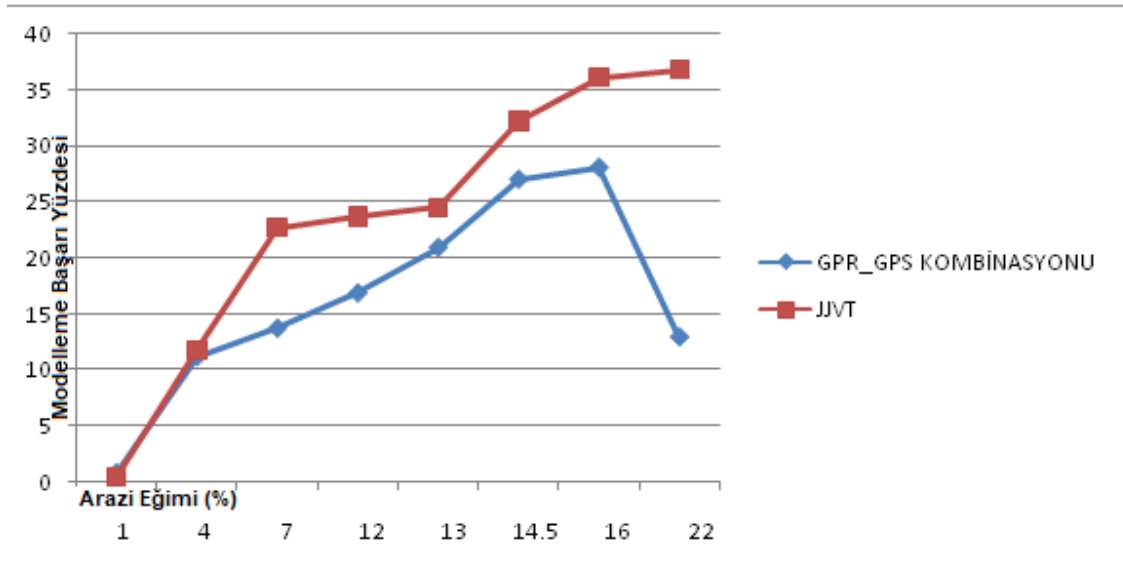
Profil Adı	Örnek Aralığı(Trace No)	Ort.Eğim (Φ) %	Ort.Eğim (w) %	Derinlik (m)	GPR/GPSDüzeltilme %	JJVTDüzeltilme %
P13-1	918-989	-14,5	1	0,25	<b>26,99</b>	<b>32,24</b>
P14-1	102-148	-4	-2	0,44	<b>11,24</b>	<b>11,86</b>
P14-2	931-981	-12	-0,5	0,44	<b>16,88</b>	<b>23,71</b>
P18-1	942-1000	-13	0,3	0,30	<b>20,93</b>	<b>24,56</b>
P38-1	69-118	-22	-0,8	0,67	<b>12,98</b>	<b>36,83</b>
P38-2	1505-1563	-7	-2	0,47	<b>13,75</b>	<b>22,74</b>
P41-1	85-129	-1	1	0,38	<b>0,89</b>	<b>0,54</b>
P41-2	1512-1550	-16	1	0,58	<b>28,05</b>	<b>36,21</b>

Çizelge 4.9 Zemin anomalileri için modelleme başarı çizelgesi

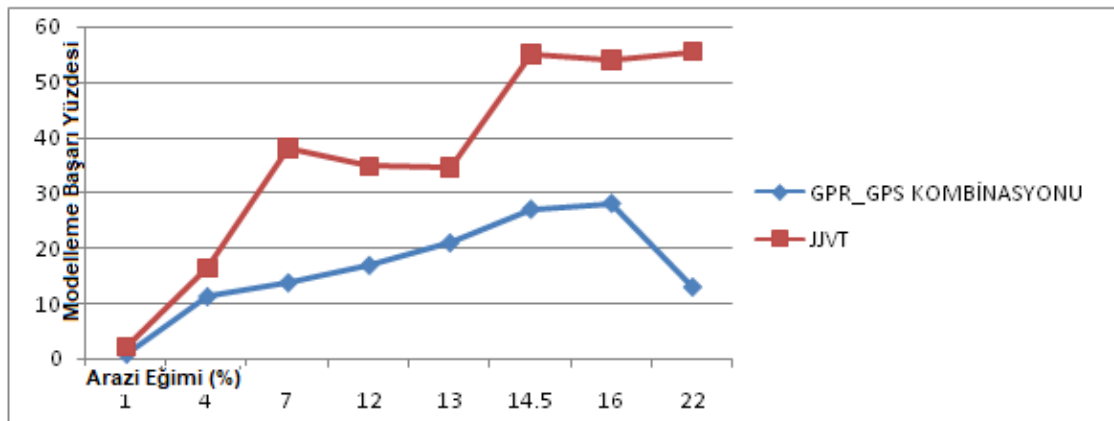
Profil Adı	Örnek Aralığı (Trace No)	Ort.Eğim (Φ)	Ort.Eğim (w)	Derinlik (h)	GPR/GPS Düzeltilme %	JJVT Düzeltme %
P13-1 Zemin	918-989	-14,5	1	1,36	<b>26,99</b>	<b>54,96</b>
P14-1 Zemin	102-148	-4	-2	1,25	<b>11,24</b>	<b>16,45</b>
P14-2 Zemin	931-981	-12	-0,5	1,25	<b>16,88</b>	<b>34,80</b>
P18-1_Zemin	942-1000	-13	0,3	1,20	<b>20,927</b>	<b>34,482</b>
P38-1 Zemin	69-102	-22	-0,8	2,12	<b>12,98</b>	<b>55,40</b>
P38-2 Zemin	1505-1563	-7	-2	2,11	<b>13,75</b>	<b>38,03</b>
P41-1 Zemin	85-129	-1	1	2,80	<b>0,89</b>	<b>2,24</b>
P41-2 Zemin	1512-1550	-16	1	2,88	<b>28,05</b>	<b>53,90</b>



Yüzeysel anomaliler için artan eğim değeri ile birlikte düzeltme değerini ifade eden grafik Şekil 4.85'te zemin anomalileri için artan eğim değeri ile birlikte modellerin düzeltme değerleri Şekil 4.86'da sunulmaktadır.



Şekil 4.85 Yüzeysel anomaliler için GPR GPS Kombinasyon modeli (mavi) ve Jiroskopik Düzeltme Modeli (kırmızı) için modelleme başarı grafiği.



Şekil 4.86 Zemin anomalileri için GPR GPS Kombinasyon modeli (mavi) ve Jiroskopik Düzeltme Modeli (kırmızı) için modelleme başarı grafiği.

Şekil 4.85 ve Şekil 4.86 grafikleri incelendiğinde Klasik GPR metoduna kıyasla GPR/GPS Kombinasyon modelinin derinlikten bağımsız olarak artan eğimle birlikte daha başarılı bir eğri çizdiği, Jiroskopik düzeltme modelinin ise artan derinlik ve eğim parametrelerine duyarlı olarak depo sınırlarını ifade etmekte en başarılı yöntem olduğu, yüksek eğim koşullarında hesaplanan konumsal hatanın %56 civarında küçüldüğü anlaşılmaktadır. 16 derece ile 22 derece arasında GPR/GPS kombinasyon

modeli için başarı grafiğinin artan eğimle birlikte yükselmesi gerekirken azaldığı görülmektedir. İlk bakışta bir hata gibi görülen bu eğrinin oluşma nedeni Şekil 3.8’de gösterildiği gibi GPS anteninin eğimli arazi koşullarında çekül doğrultusunda tutulmamasıdır. Başka bir ifadeyle GPR anteni ile GPS anten konumlarının birbirinden farklı olmasından kaynaklanmaktadır. Aynı eğim aralığı için Jiroskopik Düzeltme Modelini ifade eden kırmızı eğri incelendiğinde Jiroskopik Düzeltme Modelinin Denklem 3.8 ve Denklem 3.9 da anten yüksekliği ile arazi eğim değerlerini göz önünde bulundurarak dikyayak ve dikboy ölçülerine getirilen düzeltme sayesinde bu hatadan etkilenmediği görülmektedir.

#### Sayısal Analiz 2:

Önceki 3 örnekte de GPR/GPS Kombinasyon Modelinin daha başarılı olduğu görülmüştür. Bu bölümde 44 ölçüm profili ve her iki modele ait detay noktalarının tamamı kullanarak gömülü objenin bilinen boyutları ile karşılaştırılmıştır. Araştırmaya konu olan su depoları 20 m uzunluğunda ve 10 m genişliğindedir. Temel kot seviyesi -0,20 m iken betonarme duvar üst kotu 3,45 m’dir. Temel ampartmanı duvar sınırlarından itibaren 0,5 m çalışma payı ile imal edilmiş ampartman seviyesi ve onun altında yer alan beton kırmataş kesiti ise 0,5 m’dir. Dolayısıyla 1 depo için hacim hesabı yapılacak olursa;

$20 \text{ m (uzunluk)} \times 10 \text{ m (genişlik)} \times (3,45+0,2=3,65) \text{ (yükseklik)} = 730 \text{ m}^3$

$(20+0,5+0,5=21) \text{ m Ampartman uzunluğu} \times (10+0,5+0,5=11) \text{ metre Ampartman Genişliği} \times 0,5 \text{ m temel derinliği (Temel Beton + Kırmataş Kesiti)} = 115,5 \text{ m}^3$

yani 1 depo için toplam hacim = 845,5 m<sup>3</sup> tür.

Bilinen hacim değerinin farklı eğim gruplarında her iki modelle ne doğrulukla belirlenebileceğini araştırabilmek amacıyla aşağıdaki işlem adımları uygulanmıştır.

- 1) Klasik GPR, GPR/GPS Modeli için yüzey detay noktaları ve zemin detay noktaları için TIN modeller oluşturulmuştur.
- 2) Nokta dosyaları üzerinde üçgenleme (Triangulation) işlemi uygulanarak 0,5 m aralıklarla grid model oluşturulmuştur.
- 3) Grid noktalar kullanılarak yeniden üçgenleme (Triangulation) işlemi yapılmıştır.

- 4) Depo sınırları grid modeller üzerine işaretlenerek enkesit güzergahı her 3 depo için de ayrı ayrı belirlenmiştir.
- 5) Klasik GPR, GPR/GPS Kombinasyon Modelleri kullanılarak her 3 su deposu için yüzey ve zemin enkesitleri 1 metre aralıklarla oluşturulmuştur. NetCAD yazılımı NetSURF modülü yardımıyla enkesitlerden kübaj hesabı yapılmıştır (Çizelge 4.10).

Çizelge 4.10 Klasik GPR ve GPR/GPS Modelleri – Kübaj hesapları özet listesi.

Model	Klasik GPR	GPR/GPS Kombinasyon Modeli	Jiroskopik Düzeltme Modeli	Hata (I <sub>Klasik GPR</sub> )	Hata (I <sub>GPR/GPS</sub> )	Hata (I <sub>JVT</sub> )
DEPO 1	1664,318 m <sup>3</sup>	1575,405 m <sup>3</sup>	1495,325 m <sup>3</sup>	+819 m <sup>3</sup>	+730 m <sup>3</sup>	650 m <sup>3</sup>
DEPO 2	1341,248 m <sup>3</sup>	1271,84 m <sup>3</sup>	1192,141 m <sup>3</sup>	+493m <sup>3</sup>	+427 m <sup>3</sup>	347 m <sup>3</sup>
DEPO 3	1499,946 m <sup>3</sup>	1457,061 m <sup>3</sup>	1374,183 m <sup>3</sup>	+654m <sup>3</sup>	+612 m <sup>3</sup>	529 m <sup>3</sup>

1 ve 3 No'lu depoların 2 cephesi eğimli bir topografya altında gömülü iken 2 No'lu deponun yalnızca 1 cephesi eğimlidir. 1 ve 3 No'lu depoların arasında bulunan ve yatay profillerin düzlemsel olduğu bölgede bulunan 2 no'lu depo için her iki modelde de gömülü su deposunun gerçek hacim değeri olan 845 m<sup>3</sup> değerine en yakın hacim değerleri hesaplanmıştır. Genel olarak Çizelge 4.10'da ki veriler göz önüne alındığında Jiroskopik Düzeltme Modelinin gömülü objenin 3 boyutlu modellemesinde Klasik GPR yöntemine kıyasla daha az hata payına sahip olduğu görülmektedir. Yapılan çalışmanın sonuç verileri ışığında tezin 3 No'lu hipotezi olan "Güncel Jeoradar tekniğinde eğimli arazilerde topografik değişkenlikten kaynaklanan anten oryantasyonunun neden olduğu gömülü objenin konumlandırma ve modellenmesi üzerindeki bozucu etkileri GNSS/GPS ve Dijital İnklinometre kullanılarak geliştirilen "Jiroskopik Düzeltme Metodu" yardımıyla giderilebilir. Gömülü objenin yeraltındaki gerçek konumunu (UTM) koordinat sisteminde belirleyerek güncel uygulamalardan daha doğru konum verisine sahip yer altı haritalarının oluşturulması mümkündür" önermesi doğrulanmıştır.

### SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, askeri ve sivil olmak üzere birçok alanda ihtiyaç duyulan yüzey altı görüntüleme teknolojisi olan GPR konusu araştırılmıştır. Tez çalışması beş anabölümden oluşmaktadır. Çalışmanın ilk kısmında tezin amacı, hipotezleri ve araştırma soruları belirlenerek literatür taraması ile güncel kullanım alanları ve GPR teknolojisinin sağladığı avantajlar hakkında bilgi verilmiştir.

İkinci bölümde konunun tarihsel süreci hakkında kısa bir bilgilendirme yapılırken GPR teknolojisi hakkında saha çalışmasının planlanmasından veri edinim prosedürlerine, GPR verilerinin işlenmeinden ölçümü etkileyen parametrelere kadar literatüre dayanan bilgiler verilmiştir.

Üçüncü bölümde ise konu Harita Mühendisliği açısından değerlendirilmiştir. GPR/GPS kombinasyon modeli her ne kadar yatay ölçeğin düzenlenmesine ve topografik düzeltmeye imkan tanısa da problemin yalnızca ölçülen mesafenin yataya indirgenmesi yada profil eğimi olmadığı anlaşılmıştır. GPR antenlerinin değişken arazi koşullarındaki oryantasyonu özellikle yüksek eğimli arazilerde yapılan ölçüm sonuçları üzerinde bozucu etkilere sahip olduğu ve bu konu GPR araştırmacıları tarafından bilinmekle beraber birkaç münferit araştırmanın dışında ihmal edildiği literatürden yapılan alıntılarla izah edilmiştir. GPR antenlerinin değişen arazi koşullarındaki oryantasyonu ve ölçüm sonuçları üzerindeki bozucu etkilerinin giderilmesi, gömülü obje araştırmasındaki konum doğruluğunun arttırılabilmesi amacıyla GPS entegrasyonlu bir

GPR ünitesine 2 eksenli dijital inklinometre ilave edilerek “Jiroskopik Düzeltme Modeli” geliştirilmiştir. GNSS/GPS, GPR ve İnklinometreden elde edilen verilerin sayısal olarak işlenmesi amacıyla Jiroskopik Jeoradar Veri Tabanı (JJVT) oluşturulmuştur.

Dördüncü bölümde tezin ana hipotezlerinin her birini araştırma soruları üzerinden sorgulayabilmek amacı ile iki ayrı arazi çalışması gerçekleştirilmiştir. Birinci arazi çalışmasında GPR ın yapı denetim sektöründeki en yaygın kullanım alanlarından biri olan “Hasarsız Karot” (NDT) (Non Destructive Testing) metodu ile İstanbul Millet Caddesinde gömülü beton imalatlarının hasarsız karot numuneleri dijital olarak oluşturulmuştur. GNSS/GPS entegrasyonu bir GPR düzeneği kullanılarak gerçekleştirilen bu çalışma ile beton imalatı bulunan alanlar ile beton imalatı içermeyen alanların ayrımı yapılabilmiş ve koordinatlı bir şekilde haritalanmıştır. Bu çalışma sonucunda tezin birinci hipotezi olan “GNSS/GPS entegrasyonu mümkündür” önermesi doğrulanmıştır.

İkinci arazi çalışmasında ise GPR kullanımının en yaygın olduğu alanlardan bir diğeri olan arkeometri konu alınmıştır. İstanbul İli, Maltepe İlçesi, Orhangazi Parkında gömülü vaziyette bulunan su depoları boyutları bilinen referans obje olarak kullanılmıştır. GPR/GPS Kombinasyon Modeli inşaat aşamasından itibaren malzeme detayları, boyutları ve koordinatları ile kayıt altında bulunan gömülü su depoları üzerinde test edildi. Yapılan çalışmanın sonuç verileri “Eğimli arazi koşullarında Klasik GPR tekniğinde odometrenin tekerlek devir sayısı ile ölçülendirilen baz uzunluğu hatası GNSS/GPS teknolojisi yardımıyla planimetrik koordinat farkları kullanılarak yataya indirgenebilir. GPR/GPS Kombinasyonu Modeli ile Klasik GPR tekniğine kıyasla istatistiksel anlamda daha doğru konum verileri üretebilir” hipotezini doğrulamıştır. Hipotezin araştırma soruları yapılan çalışmanın sonuç verileri ile cevaplanacak olursa;

a) GPR/GPS Kombinasyon Modeli Klasik GPR yöntemine kıyasla gömülü obje ya da katman sınırlarını belirlemekte ne ölçüde başarılıdır?

- GPR/GPS Kombinasyon modelinin Klasik GPR yöntemine kıyasla eğimsiz kabul edilebilecek arazi koşullarında modellemeye olan katkısı % 0,89 ve eğimli (7°) arazi koşullarında % 28,20 olarak hesaplanmaktadır. Bu analizle GPR/GPS

Kombinasyon Modelinin Klasik GPR Modeline göre daha başarılı olduğu istatistiksel olarak kanıtlanmıştır.

b) GPR/GPS Kombinasyon modelinin istatistiksel başarısı gömülü obje ya da katman araştırmasının hangi parametrelerine bağlı olarak değişmektedir?

- Çizelge 6 ve Çizelge 7 incelendiğinde eğimli ve eğimsiz arazi koşulları için yapılan hesaplamalarda eğimli arazide Klasik GPR Modelinin standart sapması 0,652 değerinden 0,842' ye yükselmiştir. GPR/GPS kombinasyon Modelinde ise eğimsiz arazi koşullarındaki 0,646 olan standart sapma değeri eğimli arazi koşulları için 0,604 olarak hesaplanmıştır. Bu değer GPR/GPS Kombinasyon modelinin standart sapmasının eğim farklılığından etkilenmediğini ortaya koymaktadır.

Klasik GPR ile GPR/GPS Kombinasyonunun karşılaştırılmasından sonra tezin üçüncü hipotezini doğrulamak amacı ile Jirokopik Düzeltme Modeli oluşturulmuştur. Modellemelerde kullanılan 46 GPR profili içerisinde farklı eğim grupları ve derinlik değerlerinden örneklemeler kullanılarak Klasik GPR Metodu, GPR/GPS Kombinasyon Metodu ve tez kapsamında geliştirilen “Jirokopik Düzeltme Metodu” karşılaştırılmıştır. Çizelge 4.7, 4.8 ve 4.9’da görülen sonuçlara göre Jirokopik Düzeltme Modelinin eğimli arazi koşullarında artan eğim ve derinliğe bağlı olarak gömülü obje sınırlarını daha yüksek doğrulukla ifade ettiği görülmüştür. Özellikle eğimli arazi koşullarında Klasik GPR Modeli ile elde edilen 0,838 (m) standart sapma değerine karşılık GPR/GPS Kombinasyon Modeli ile aynı ortam koşullarında 0,603 (m), Jirokopik Düzeltme Modelinde ise 0,386 (m) değeri hesaplanmıştır. Klasik GPR Metoduna kıyasla GPR/GPS Kombinasyon Modelinde konumsal hata%**28,20** oranında azalırken Jirokopik Düzeltme Modelinde %**53,90** oranında azalmıştır. Bu sonuçlar Jirokopik Düzeltme Modelinin başarısını matematiksel anlamda ispat etmektedir.

Yapılan çalışmanın sonuç verileri ışığında tezin 3 No’lu hipotezi olan “Güncel Jeoradar tekniğinde eğimli arazilerde topografik değişkenlikten kaynaklanan anten oryantasyonunun neden olduğu gömülü objenin konumlandırma ve modellenmesi üzerindeki bozucu etkileri GNSS/GPS ve Dijital İnklinometre kullanılarak geliştirilen

“Jiroskopik Düzeltme Metodu” yardımıyla giderilebilir. Gömülü objenin yeraltındaki gerçek konumunu (UTM) koordinat sisteminde belirleyerek güncel uygulamalardan daha doğru konum verisine sahip yer altı haritalarının oluşturulması mümkündür. “ önermesi doğrulanmıştır. Hipotezin araştırma soruları yapılan çalışmanın sonuç verileri ile cevaplanacak olursa;

a) Jiroskopik Düzeltme Metodu Klasik GPR yöntemine ve GPR/GPS Kombinasyon Modeline kıyasla gömülü obje ya da katman sınırlarını belirlemede ne ölçüde başarılıdır?

- Jiroskopik düzeltme modelinin depo sınırlarını ifade etmekte en başarılı yöntem olduğu, 22° eğimli arazi koşullarında hesaplanan konumsal hatanın %56 civarında küçüldüğü anlaşılmaktadır.

b) Jiroskopik Düzeltme Modelinin istatistiksel başarısı gömülü obje ya da katman araştırmasının hangi parametrelerine bağlı olarak değişmektedir?

- Şekil 4.85 ve Şekil 4.86 daki grafikler incelendiğinde Jiroskopik Düzeltme Modelinin artan derinlik ve artan eğimle birlikte diğer modellere kıyasla daha başarılı bir eğri çizdiği görülmektedir. Önerilen yöntemin başarısı arazi eğimine ve araştırma derinliğine bağlı olarak değişmektedir.

c) Önerilen yöntemin Klasik GPR yöntemine kıyasla avantaj ve dezavantajları nelerdir?

Avantajları:

- Jiroskopik Düzeltme Yöntemi profil mesafesinin ölçümünde Klasik GPR tekniğine kıyasla daha başarılıdır. Çünkü yöntemi oluşturan parçalardan biri olan GNSS/GPS sayesinde planimetrik koordinatlar kullanılarak yataya indirgenmiş mesafe hesaplanabilmektedir.
- Yöntemi oluşturan parçalardan GNSS/GPS sayesinde gömülü obje çalışması bir koordinat sisteminde tanımlanabilmektedir.
- Yöntemi oluşturan parçalardan inklinometre sayesinde anten oryantasyon hatası 22 derece eğimli arazi koşulları için istatistiksel olarak %56 oranında giderilebilmektedir. Bu sayede gömülü obje ya da katman sınırları Klasik GPR tekniğine kıyasla daha doğru belirlenebilmektedir.

- Gömülü obje araştırmasında Klasik GPR yöntemine kıyasla konumsal olarak daha doğru ve ülke koordinat sisteminde (UTM) tanımlanabilir çıktılar üretir. Yer altı haritalarının ve bunları içeren Coğrafi Bilgi Sistemlerinin oluşturulabilmesine imkan tanır.

#### Dezavantajları:

- Yöntem gömülü obje araştırmasına yalnızca eğimli arazi koşullarında, artan eğim ve artan derinliğe bağlı olarak katkı sağlamaktadır. Düzlemsel ya da az eğimli ortamlarda üretilen veriler Klasik GPR tekniği ile farksızdır. (41 No'lu profilden alınan 1° eğimli bulunduğu yüzey örneklemede yöntemin başarısı % 0,54 olarak hesaplanmıştır)
- Jiroskopik Düzeltme Yöntemi inklinometre ya da jiroskop donanımı ile GNSS/GPS içerdiğinden Klasik GPR tekniğine kıyasla daha masraflıdır.
- Jiroskopik Düzeltme Yöntemi, işlenmiş radargramlar üzerinde işaretlenen detay noktaları ya da katman sınırları için laboratuvar ortamında yapılabilen bir iyileştirmedir. Klasik GPR tekniğine kıyasla zahmetli ve zaman alıcıdır.
- Konum doğruluğunun aranmadığı ve ölçüm esnasında ham radargram verilerinin GPR ekranından anlık olarak izlenmesi ile yetinilen basit çalışmalar için uygun değildir.

Çalışmanın gerçekleştirildiği alanda ortalama eğim değeri 14° derecedir. Topografyanın daha değişken ve eğim değerinin daha yüksek olduğu bir arazide yapılacak gömülü obje araştırmasında Jiroskopik Düzeltme Modelinin başarısı daha da artacaktır. Önerilen yöntemin geliştirilmesi, daha duyarlı bir dijital inklinometre veya daha hassas açı ölçer mekanizma kullanılması ile mümkün olabilir. Özellikle Kalman filtrelemesi yapabilen, akselerometre destekli dijital jiroskop kullanılması yöntemin istatistiksel başarısını artırılabilir. Tez çalışması esnasında öncelikli olarak bu tarz bir ürün kullanılmak istense de inklinometreye kıyasla 3 kat maliyetli oluşu nedeniyle vazgeçilmiştir.

Geliştirilen Jiroskopik Düzeltme Modeli için Türk Patent Enstitüsü (TPE) ne 2016/03017 dosya numarası ile kayıtlı biri ulusal olmak üzere birde WIPO kapsamında uluslararası patent başvurusu bulunmaktadır. Yıldız Teknik Üniversitesi Teknopark vasıtası ile Tübitak desteğinde patent ofisi tarafından takip edilmektedir. Patent başvuru



dökümanında tezde kullanılan İnklinometre yerine eğimölçer mekanizma olarak 3 eksenli dijital jiroskop yer almıştır. Odometre, GPS ve Dijital Jiroskoptan algılanan Kappa (K) yönlü dönüklük bilgisi sayesinde Açıklık Açısı ve Profil Mesafesi bilgileri sürekli güncellenmektedir. Dolayısıyla patent başvurusunda önerilen yöntem ve buluş; GPS sinyalinin kesintiye uğradığı zamanlarda da konum verisi üretebilme kabiliyetinde ve sanayiye uygulanabilir yapıdadır.

Jiroskopik Düzeltme Metodu; Arkeolojik araştırmalar, hasarsız karot, yol çalışmalarında gömülü tesisatların belirlenmesi, mayın tespiti gibi araştırma konularında koordinatlı ve daha doğru değerlerle gömülü objeyi tespit etme veya modelleme olanağı sunmaktadır. Gömülü objenin daha doğru konumlandırılması ise önerilen yöntem sayesinde gömülü objeye daha az kazı yapılarak ulaşılabilmesini sağlamaktadır. Daha az iş gücü gerektirmesi ve dolayısıyla daha ekonomik olduğu anlamına gelmektedir. Gömülü objenin Ülke Koordinat Sisteminde (UTM) modellenebilmesi; verilerin Coğrafi Bilgi Sistemlerine aktarılabilmesine, koordinatlı yer altı haritalarının doğru bir geometri ile üretilmesine imkan tanımaktadır.

## KAYNAKLAR

---

- [1] Perciso, R., (2014). Introduction to Ground Penetrating Radar Inverse Scattering and Data Processing, IEEE Press.- ISBN 978-1-118-30500-3, s. Xiii
- [2] 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.
- [3] Koralay, T., Kadioğlu, S., ve Kadioğlu, Y. K., (2007). A New Apprximation in determination of zonation boundries of ignimbrite by ground penetrating radar: Kayseri, Central Anatolia, Turkey. Environmental Geology, 52 (7), 1387-1397.
- [4] 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.
- [5] Green, A., Gross, R., Holliger, K., Horstmeyer, H., ve Baldwin, J., (2003). Results of 3-D georadar surveying and trenching the San Andreas fault near its northern landward limit. Tectonophysics, 368, 7-23.
- [6] Kadioğlu, S., Kadioğlu, Y.K., ve Akyol, A.A.,(2008). Geoarcheological research of the mid-Age Ilyasbey Complex buildingswith ground penetrating radar in Miletus,Aydin, Western Anotolia, Turkey. DonaldHarrington Symposium on the Geologyof the Aegean, 28–30 April 2008, University of Texas at Austin, JacksonSchool of Geosciences, USA, and B CBurchfiel 2008 IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2, published online.
- [7] Harrari, Z., (1996). Ground penetrating radar (GPR) for imaging stratigrafic features and graundwater in sand dunes. Journal of Applied Geophysics, 36, 43-52.
- [8] Dannowski, G., ve Yaramanci, U., (1999). Estimation of water content and porosity using combined radar and geoelectric measurements. European Journal of Environmental and Engineering Geophysics, 4, 71-85.
- [9] Aspiron, U., ve Aigner, T., 1999. Towards realistic aquifer models: Three dimensional georadar surveys of Quaternary gravel deltas (Singen Basin, SW Germany). Sedimentary Geology, 129, 281-297.

- [10] 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.
- [11] Sambuelli, L., Socco, L. V., ve Brecciaroli, L., (1999). Acquisition and processing of electric, magnetic and GPR data on a Roman site (Victimulae, Salussola, Biella). *Journal Applied Geophysics*, 41, 189-204.
- [12] Daniels, J.J., (2000). Ground penetrating radar for imaging archeological objects in the subsurface. *Proceedings of the New Millennium International Forum on Consideration of Cultural Property*, Kongju, Korea, pp.247-265.
- [13] 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.
- [14] Cardelli, E., Maronne, C., ve Orlando, L., (2003). Evaluation of tunnel stability using integrated geophysical methods. *Journal of Applied Geophysics*, 52, 93-102.
- [15] Piro, S. Goodman, D. ve Nishimura, Y., (2003), The study and characterization of Emperor Traiano's villa using high-resolution integrated geophysical surveys. *Archaeological Prospection*, Vol. 10, pp.1-25
- [16] Gaffney, V., Patterson, H. ve Roberts, P., (2004), Forum Novum-Vescovio: Studying urbanism in the Tiber Valley. *Journal of Roman Archaeology*, Vol. 14, pp. 59-79.
- [17] Jol H. M., *Ground Penetrating Radar Theory and Applications*, Elsevier Books, Oxford, UK, (2009).
- [18] Conyers, L.B. *Ground-Penetrating Radar for Archaeology*, 3rd ed.; Rowman and Littlefield Publishers, Alta Mira Press: Latham, MD, USA, ISBN: 9780759123496, (2013).
- [19] Goodman D., Piro S., *GPR remote sensing in Archeology, Geotechnologies and the environment*, Springer Heidelberg New York Dordrecht London, ISBN 978-3-642-31857-3 (eBook), (2013).
- [20] Daniels, David J. (2004) GPR for landmine detection, an invited review paper. In *Proceedings of the Tenth International Conference on Ground Penetrating Radar: June 21-24, Delft, The Netherlands*, Evert Slob, Alex Yarovoy and Jan Rhebergen (editors). Delft University of Technology, The Netherlands and the Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., Piscataway, New Jersey: 7-10.
- [21] Alp, İ. Gelişli, K. Yılmaz, A.O., Kaya, R., Çavuşoğlu, İ., (2003). Mermer İşletmeciliğinde Yer Radarı Uygulamaları.
- [22] Kraus, J. D. (1950) *Antennas*. McGraw-Hill, New York.

- [23] Rojansky, Vladimir (1979). *Electromagnetic Fields and Waves*. Dover, Mineola, N.Y. Saaraenketo, Timo 1998 Electrical properties of water in clay and silty soils. *Journal of Applied Geophysics* 40: 73–88.
- [24] Leckebusch, J. (2000). Two and three-dimensional ground-penetrating radar surveys across a medieval choir: A case study in archaeology. *Archaeological Prospection* 7: 189–200. 2003 Ground-penetrating radar: A modern three-dimensional prospection method. *Archaeological Prospection* 10: 213–240.
- [25] Chignell, Richard J., (2004). The radio licensing of GPR systems in Europe. In *Proceedings of the Tenth International Conference on Ground Penetrating Radar: June 21-24, Delft, The Netherlands*, Evert Slob, Alex Yarovoy and Jan Rhebergen (editors). Delft University of Technology, The Netherlands and the Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., Piscataway, New Jersey: 3-6. Clark, Anthony 1990 *Seeing Beneath the Soil*. Batsford, London.
- [26] Van Dam, R. I., ve W. Schlager (2000). Identifying causes of ground-penetrating radar reflections using time-domain reflectometry and sedimentological analysis. *Sedimentology* 47: 435-449.
- [27] Lehmann, Frank, David E. Boerener, Klaus Holliger, ve Alan G. Green (2000). Multicomponent georadar data: Some important implications for data acquisition and processing. *Geophysics* 65 (5): 1542–1552.
- [28] Davis, J. L., ve A. P. Annan (1989). Ground-penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy. *Geophysics* 37: 531–551. 1992 Applications of ground penetrating radar to mining, groundwater, and geotechnical projects: selected case histories. In Pilon, J. S., Editor, *Ground Penetrating Radar*. Geological Survey of Canada, Paper 90-4: 49–56.
- [29] Shih, S. F., ve J. A. Doolittle (1984). Using radar to investigate organic soil thickness in the Florida Everglades. *Soil Science Society of America Journal* 48: 651–656.
- [30] Jol, Harry M., ve Charlie S. Bristow GPR in sediments: advice on data collection, basic processing and interpretation, a good practice guide. In *Ground Penetrating Radar in Sediments*, C. S. Bristow and H. M. Jol (editors). Geological Society Special Publication No. 211, The Geological Society, London 9-27.
- [31] Doolittle, James A., ve W. Frank Miller (1991). Use of ground-penetrating radar techniques in archaeological investigations. In *Applications of Space-Age Technology in Anthropology*. Conference Proceedings Nov. 28, 1990, 2nd ed. NASA Science and Technology Laboratory, Stennis Space Center, Mississippi.
- [32] Bevan, B.W. 1977 *Ground-penetrating radar at Valley Forge*. Geophysical Survey Systems, North

- [33] Conyers, Lawrence B. (1995) The use of ground-penetrating radar to map the buried structures and landscape of the Ceren site, El Salvador. *Geoarchaeology: An International Journal* 10 (4): 275–299. 2004 Moisture and soil differences as related to the spatial accuracy of GPR amplitude maps at two archaeological test sites. In *Proceedings of the Tenth International Conference on Ground Penetrating Radar: June 21-24, Delft, The Netherlands*, Evert Slob, Alex Yarovoy and Jan Rhebergen (editors). Delft University of Technology, The Netherlands and the Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., Piscataway, New Jersey: 435-438.
- [34] Czarnowski, J., S. Geibler, ve A. F. Kathage (1996). Combined investigation of GPR and high precision real-time differential GPS. In *Proceedings of the Sixth International Conference on Ground Penetrating Radar: 207–209*. Department of Geoscience and Technology, Tohoku University, Sendai, Japan.
- [35] Sun, J., ve R. A. Young (1995). Scattering in ground-penetrating radar data. *Geophysics* 6 (5): 1378–1385.
- [36] Annan, A. P., ve J. L. Davis (1977). Impulse radar applied to ice thickness measurements and freshwater bathymetry. Geological Survey of Canada, Report of Activities paper 77-1B:117–124.
- [37] Fuchs, Michael, Milan Beres, ve Flavio S. Anselmetti (2004). Sedimentological studies of western Swiss lakes with high-resolution reflection seismic and amphibious GPR profiling. In *Proceedings of the Tenth International Conference on Ground Penetrating Radar: June 21-24, Delft, The Netherlands*, Evert Slob, Alex Yarovoy and Jan Rhebergen (editors). Delft University of Technology, The Netherlands and the Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., Piscataway, New Jersey: 577-580.
- [38] Jol, Harry M., ve Arlen Albrecht Searching for submerged lumber with ground penetrating radar: Rib Lake, Wisconsin, USA. In *Proceedings of the Tenth International Conference on Ground Penetrating Radar: June 21-24, Delft, The Netherlands*, Evert Slob, Alex Yarovoy and Jan Rhebergen (editors). Delft University of Technology, The Netherlands and the Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., Piscataway, New Jersey: 601-604.
- [39] Haeni, F. P., Marc L. Buursink, John E. Costa, Nick B. Melcher, Ralph T. Cheng, ve William J. Plant, (2000). Ground-penetrating radar methods used in surface-water discharge measurements. In *Eighth International Conference on Ground-penetrating radar proceedings*. SPIE—The International Society for Optical Engineering, Bellingham, Wash.: 494–500.
- [40] Batey, Richard A. (1987). Subsurface interface radar at Sepphoris, Israel. *Journal of Field Archaeology* 14 (1): 1–8.
- [41] Fischer, Peter M., S. G.W. Follin, P. Ulriksen (1980). Subsurface interface radar survey at Hala Sultan Tekke, Cyprus. In *Applications of Technical Devices in Archaeology*, Peter M. Fischer (editor). *Studies in Mediterranean Archaeology* 63: 48–51.

- [42] Loker, W. M. (1983). Recent geophysical explorations at Ceren. In *Archaeology And Volcanism in Central America*, Payson D. Sheets (editor): 254–274. University of Texas Press, Austin.
- [43] Annan, A. P., ve S.W. Cosway (1992). Simplified GPR beam model for survey design. Extended abstract of 62nd Annual International Meeting of the Society of Exploration Geophysicists, New Orleans, October 25–29, 1992. 1994 GPR frequency selection. In *Proceedings of the Fifth International Conference on Ground Penetrating Radar*: 747–760. Waterloo Centre for Groundwater Research, Waterloo, Canada.
- [44] Huggenberger, Peter, Edi Meier, ve Milan Beres (1994). Three-dimensional geometry of fluvial gravel deposits from GPR reflection patterns; a comparison of results of three different antenna frequencies. In *Proceedings of the Fifth International Conference on Ground Penetrating Radar*: 805–815. Waterloo Centre for Groundwater Research, Waterloo, Canada.
- [45] Smith, Derald G., ve Harry M. Jol (1995). Ground penetrating radar: Antenna frequencies and maximum probable depths of penetration in Quaternary sediments. *Journal of Applied Geophysics* 33: 93–100.
- [46] Fenner, Thomas J. (1992). Recent advances in subsurface interface radar technology. In *Fourth International Conference on Ground-Penetrating Radar*: June 8–13, Rovaniemi, Finland, Pauli Hanninen and Sini Autio (editors). Geological Survey of Finland Special Paper 16: 13–19.
- [47] Olson, C.G., ve J. A. Doolittle (1985). Geophysical techniques for reconnaissance investigation of soils and surficial deposits in mountainous terrain. *Soil Science Society of America Journal* 49:1490–1498.
- [48] Jol, Harry M., ve Charlie S. Bristow GPR in sediments: advice on data collection, basic processing and interpretation, a good practice guide. In *Ground Penetrating Radar in Sediments*, C. S. Bristow and H. M. Jol (editors). Geological Society Special Publication No. 211, The Geological Society, London 9-27.
- [49] Arcone, Steven A. (1995). Numerical studies of the radiation patterns of resistivity loaded dipoles. *Journal of Applied Geophysics* 33: 39–52.
- [50] Lanz, Eva, Laura Jemi, Roger Muller, Alan Green, Andre Pugin ve Peter Huggenberger (1994). Integrated studies of Swiss waste disposal sites: Results from georadar and other geophysical surveys. In *Proceedings of the Fifth International Conference on Ground Penetrating Radar*: 1261–1274. Waterloo Centre for Groundwater Research, Waterloo, Canada.
- [51] Van Dam, R. I., ve W. Schlager (2000). Identifying causes of ground-penetrating radar reflections using time-domain reflectometry and sedimentological analysis. *Sedimentology* 47: 435-449.

- [52] Olhoeft, G. R. 1981 Electrical properties of rocks. In *Physical Properties of Rocks and Minerals*, Y. S. Touloukian, W. R. Judd, and R. F. Roy (editors): 257–330. McGraw-Hill, New York. (1986). Electrical properties from 10<sup>-3</sup> to 10<sup>9</sup> Hz-Physics and chemistry. In *Proceedings of the 2nd International Symposium of Physics and Chemistry of Porous Media*, J. R. Bananvar, J. Koplik, and K.W. Winkler (editors): 281–298.
- [53] ASTM International (2003) *Standard Guide for Using the Surface Ground Penetrating Radar Method for Subsurface Investigation*. D6432-99. <http://www.astm.org>.
- [54] Wensink, W. A., (1993). Dielectric properties of wet soils in the frequency range 1-3000 MHz. *Geophysical Prospecting* 41: 671-696.
- [55] Clarke, M. Clara, E. Utsi ve V. Utsi, (1999). - Ground-penetrating radar investigations at North Ballachulish Moss, Scotland. *Archaeological Prospection* 6:107-121.
- [56] Worsfold, R. D., S. K. Parashar, and T. Perrott Depth profiling of peat deposits with impulse radar. *Canadian Geotechnical Journal* 23: 142-154.
- [57] Dobrin, M. B (1976). *Introduction to Geophysical Prospecting*. McGraw-Hill, New York.
- [58] Dolphin, L. T., R. L. Bollen, ve G. N. Oetzel (1974). An underground electromagnetic sounder experiment. *Geophysics* 39: 49–55.
- [59] Sellman, P. V., S. A. Arcone, ve A. J. Delaney (1983). Radar profiling of buried reflectors and the ground water table. *Cold Regions Research and Engineering Laboratory Report 83-11*: 1–10. *Sensors and Software 1999 Practical Processing of GPR Data*. Sensors and Software, Mississauga, Ontario.
- [60] Walden, A. T., ve J.W. J. Hosken (1985). An investigation of the spectral properties of primary reflection coefficients. *Geophysical Prospecting* 33: 400–435.
- [61] Annan, A. P., W. M. Waller, D.W. Strangway, J. R. Rossiter, J. D. Redman, ve R. D. Watts (1975). The electromagnetic response of a low-loss, 2-layer, dielectric earth for horizontal electric dipole excitation. *Geophysics* 40 (2): 285–298.
- [62] Keller, George V. (1988). *Rock and mineral properties*. In *Applications in Electromagnetic Methods in Applied Geophysics*, edited by M. N. Nabighian: 13–24. Volume 1. Society of Exploration Geophysics. Tulsa, Oklahoma.
- [63] Walker, J.W., H. Hulse, ve D.W. Eckart (1973). Observations of the electrical conductivity of the tropical soils of western Puerto Rico. *Geological Society of America Bulletin* 84: 1743–1752.
- [64] Birkeland, Peter (1999). *Soils and Geomorphology*. 3rd ed. Oxford University Press, New York.

- [65] Gerber, Rolf, Peter Felix-Henningsen, Christina Salat, ve Andreas Junge (2004) Investigation of the GPR reflection pattern for shallow depths on a test site. In Proceedings of the Tenth International Conference on Ground Penetrating Radar: June 21-24, Delft, The Netherlands, Evert Slob, Alex Yarovoy and Jan Rhebergen (editors). Delft University of Technology, The Netherlands and the Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., Piscataway, New Jersey: 275-278.
- [66] Leopold, Matthias, ve Jorg Volkel GPR images of periglacial slope deposits beneath peatbogs in the Central European Highlands, Germany. In Ground Penetrating Radar in Sediments, C. S. Bristow and H.
- [67] Sheriff, R. E. (1984) Encyclopedic Dictionary of Exploration Geophysics. 2nd ed. Society of Exploration Geophysics, Tulsa, Okla.
- [68] Cassidy, N. J., A. J. Russell, J. K. Pringle, ve J. L. Carrivick GPR - derived architecture of large-scale Icelandic Jokulhlaup deposits, north-east Iceland. In Proceedings of the Tenth International Conference on Ground Penetrating Radar: June 21-24, Delft, The Netherlands, Evert Slob, Alex Yarovoy and Jan Rhebergen (editors). Delft University of Technology, The Netherlands and the Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., Piscataway, New Jersey: 581-584.
- [69] Bogorodsky, V. V., C. R. Bentley, ve P. E. Gudmandsen (1985). Radioglaciology. Reidel, Dordrecht.
- [70] Conyers, Lawrence B. (1995). The use of ground-penetrating radar to map the buried structures and landscape of the Ceren site, El Salvador. *Geoarchaeology: An International Journal* 10 (4): 275–299. 2004 Moisture and soil differences as related to the spatial accuracy of GPR amplitude maps at two archaeological test sites. In Proceedings of the Tenth International Conference on Ground Penetrating Radar: June 21-24, Delft, The Netherlands, Evert Slob, Alex Yarovoy and Jan Rhebergen (editors). Delft University of Technology, The Netherlands and the Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., Piscataway, New Jersey: 435-438.
- [71] Sternberg, Ben K., ve James W. McGill (1995). Archaeology studies in southern Arizona using ground penetrating radar. *Journal of Applied Geophysics* 33: 209–225.
- [72] Doolittle, James A., ve W. Frank Miller (1991). Use of ground-penetrating radar techniques in archaeological investigations. In *Applications of Space-Age Technology in Anthropology*. Conference Proceedings Nov. 28, 1990, 2nd ed. NASA Science and Technology Laboratory, Stennis Space Center, Mississippi.
- [73] Conyers, Lawrence B., and Catherine M. Cameron (1998). Finding buried archaeological features in the American Southwest: New ground-penetrating radar techniques and three-dimensional computer mapping. *Journal of Field Archaeology* 25 (4): 417–430



- [74] Kenyon, Jeff L. (1977). Ground-penetrating radar and its application to a historical archaeological site. *Historical Archaeology* 11: 48–55.
- [75] Doolittle, James A., ve W. Frank Miller (1991). Use of ground-penetrating radar techniques in archaeological investigations. In *Applications of Space-Age Technology in Anthropology. Conference Proceedings Nov. 28, 1990*, 2nd ed. NASA Science and Technology Laboratory, Stennis Space Center, Mississippi.
- [76] Waterloo, Canada. (1998) Radar facies of unconsolidated sediments in The Netherlands: A radar stratigraphy interpretation method for hydrogeology. *Journal of Applied Geophysics* 40: 1–18. Vaughan, C. J. 1986 Ground-penetrating radar surveys used in archaeological investigations. *Geophysics* 51 (3): 595–604.
- [77] Conyers, Lawrence B., ve Hartmut Spetzler (2002). Geophysical Exploration at Ceren. In *Before the Volcano Erupted*, Payson Sheets (editor). University of Texas Press, Austin: 24–32.
- [78] Fisher, S. C., R. R. Stewart, ve H. M. Jol (1994). Processing ground penetrating radar data. In *Proceedings of the Fifth International Conference on Ground Penetrating Radar: 661–675*. Waterloo Centre for Groundwater Research, Waterloo, Canada.
- [79] Leckebusch, J. (2003) - Ground Penetrating Radar: A Modern Three - Dimensional Projection Method. *Archeological Prospection* 10 : 213 – 240
- [80] Malagodi, S., L. Orlando, ve S. Piro (1994). Improvement of signal to noise ratio of ground penetrating radar using CMP acquisition and data processing. In *Proceedings of the Fifth International Conference on Ground Penetrating Radar: 689–699*. Waterloo Centre for Groundwater Research, Waterloo, Canada. 1996 Approaches to increase resolution of radar signal. In *Proceedings of the Sixth International Conference on Ground Penetrating Radar: 283–288*. Department of Geoscience and Technology, Tohoku University, Sendai, Japan.
- [81] Milligan, Robert, ve Malcolm Atkin (1993). The use of ground-probing radar within a digital environment on archaeological sites. In *Computing the Past: Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology*, Jens Andresen, Torsten Madsen, and Irwin Scollar (editors): 21–33. Aarhus University Press.
- [82] Sheriff, R. E., ve L. P. Geldart (1985). *Exploration Seismology*. Cambridge University Press, New York.
- [83] Urliksen, C. P. F. (1992). Multistatic radar system-MRS. In *Proceedings of the Fourth International Conference on Ground-Penetrating Radar: June 8–13, Rovaniemi, Finland*, Pauli Hanninen and Sini Autio (editors). Geological Survey of Finland Special Paper 16: 57–63.
- [84] Yilmaz, Oz (2001). Seismic data analysis: Processing, inversion and interpretation of seismic data. *Investigations in Geophysics Number 10*, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, Okla.

- [85] Pedley, H. M. ve I. Hill. (2003). The recognition of barrage and paludal tufa systems by GPR: case studies in the geometry and correlation of hidden Quaternary freshwater carbonate facies. In *Ground Penetrating Radar in Sediments*, C. S. Bristow and H. M. Jol (editors). Geological Society Special Publication No. 211, The Geological Society, London 207-223.
- [86] Woodward, John, Philip J. Ashworth, James L. Best, Gregory H. Sambrook Smith, ve Christopher J. Simpson. The use and application of GPR in sandy fluvial environments: methodological considerations ). In *Ground Penetrating Radar in Sediments*, C. S. Bristow and H. M. Jol (editors). Geological Society Special Publication No. 211, The Geological Society, London 127-142.
- [87] Lehmann, Frank, David E. Boerener, Klaus Holliger, ve Alan G. Green (2000). Multicomponent georadar data: Some important implications for data acquisition and processing. *Geophysics* 65 (5): 1542–1552.
- [88] Shih, S. F., ve J. A. Doolittle (1984). Using radar to investigate organic soil thickness in the Florida Everglades. *SoilScience Society of America Journal* 48: 651–656.
- [89] Lehmann, Frank, Heinrich Hortsmeier, Alan Green, ve John Sexton (1996). Georadar data from the northern Sahara Desert: Problems and processing strategies. In *Proceedings of the Sixth International Conference on GroundPenetrating Radar*: 51–56. Department of Geoscience and Technology, Tohoku University, Sendai, Japan.
- [90] Maijala, P. (1992). Application of some seismic data processing methods to ground penetrating radar data. In *Fourth International Conference on Ground-Penetrating Radar: June 8–13, Rovaniemi, Finland*. Pauli Hanninen and Sini Autio (editors). Geological Survey of Finland Special Paper 16: 103–110.
- [91] Yu, Haizhong, Xiaojian Ying, ve Shi Yuansheng (1996). The use of Fk techniques in GPR processing. In *Proceedings of the Sixth International Conference on Ground Penetrating Radar*: 595–600. Department of Geoscience and Technology, Tohoku University, Sendai, Japan.
- [92] LaFleche, P. T., J. P. Todoeschuck, O. G. Jensen, ve A. S. Judge (1991). Analysis of ground-penetrating radar data: Predictive deconvolution. *Canadian Geotechnical Journal* 28 (1): 134–139.
- [93] Malagodi, S., L. Orlando, ve F. Rosso (1996). Location of archaeological structures using GPR: Three-dimensional data acquisition and radar signal processing. *Archaeological Prospection* 3: 13–23.
- [94] Neves, Fernando A., John A. Miller ve Mark S. Roulston (1996). Source signature deconvolution of ground penetrating radar data. In *Proceedings of the Sixth International Conference on Ground Penetrating Radar*: 573–578. Department of Geoscience and Technology, Tohoku University, Sendai, Japan.

- [95] Beres, Milan, Peter Huggenberger, Alan G. Green, ve Heinrich Horstmeyer (1999). Using two and three-dimensional georadar methods to characterize glaciofluvial architecture. *Sedimentary Geology* 129: 1–24.
- [96] Fisher, E., G. A. McMechan, ve A. P. Annan (1992). Acquisition and processing of wide-aperture ground-penetrating radar data. *Geophysics* 57: 495–504.
- [97] Young, Roger A., ve Sun Jingsheng (1994). Recognition and removal of subsurface scattering in GPR data. In *Proceedings of the 5th International Conference on Ground Penetrating Radar*: 735–746. Waterloo Centre for Groundwater Research, Waterloo, Canada.
- [98] Grasmueck, M., (1996). 3D ground-penetrating radar applied to fracture imaging in gneiss. *Geophysics* 61: 1050–1064.
- [99] Leckebusch, Jurg, ve Ronald Peikert (2001). Investigating the true resolution and three-dimensional capabilities of ground-penetrating radar data in archaeological surveys: Measurements in a sand box. *Archaeological Prospection* 8: 29–40. Lehmann, Frank, and Alan G. Green 1999 Semiautomated georadar data acquisition in three-dimensions. *Geophysics* 64 (3): 719–731. 2000 Topographic migration of georadar data: Implications for acquisition and processing. *Geophysics* 65 (3): 836–848.
- [100] Conyers, Lawrence B., ve Dean Goodman (1997). *Ground-penetrating Radar: An Introduction for Archaeologists*. AltaMira,
- [101] Reynolds, John M. (1998). *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*. Wiley, New York. Rhoades, J. D., P. A. C. Raats, and R. S. Prather 1976 Effects of liquid-phase electrical conductivity: Water content and surface conductivity on bulk soil electrical conductivity. *Soil Science Society of America Journal* 40: 651–665.
- [102] Daniels, David J. (2004). GPR for landmine detection, an invited review paper. In *Proceedings of the Tenth International Conference on Ground Penetrating Radar*: June 21–24, Delft, The Netherlands, Evert Slob, Alex Yarovoy and Jan Rhebergen (editors). Delft University of Technology, The Netherlands and the Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., Piscataway, New Jersey: 7–10.
- [103] Von Hippel, Arthur R. (1954). *Dielectrics and Waves*. MIT Press, Cambridge, Mass.
- [104] Saarenketo, Timo (1998). Electrical properties of water in clay and silty soils. *Journal of Applied Geophysics* 40: 73–88.
- [105] Turner, G. (1992) Propagation deconvolution. In *Proceedings of the Fourth International Conference on Ground-Penetrating Radar* June 8–13, Rovaniemi, Finland. Geological Survey of Finland Special Paper 16.

---

**JİROSKOPİK JEORADAR VERİ TABANI (JJVT) İÇİN SQL VE EXCEL KODLARI**

Trace No:	A
Tarih:	B
Saat:	C
YGPSKoordinatı:	D
XGPS Koordinatı:	F
ZGPS Koordinatı:	H
Anten Yüksekliği:	J
Jiroskopik Phi Açısı:	K
Jiroskopik Omega Açısı:	L
Jiroskopik Kappa Açısı:	M
Seçilen Detay Noktası Derinlik Değeri:	N
Seçilen Detay Noktasının Profil Mesafesi:	O

Çizelge 5.1: Jiroskopik Jeoradar veri gruplarını ifade etmek için Microsoft Excel çizelgesinde karşılık gelen alan adları gösterilmektedir.

**dy (Y Koordinatları Farkının Hesaplanması)**

EXCEL FORMÜLÜ: ALAN\_P = D2-D\$2

ACCESS (SQL) KODU: dy: [GPS].[enlem]-DLookup("[enlem]";"GPS";"[trace] = 2")

### **dx (X Koordinatları Farkının Hesaplanması)**

EXCEL FORMÜLÜ: ALAN\_Q= F3-F\$2

ACCESS (SQL) KODU: dx: [boylam]-DLookup("[boylam]";"GPS";"[trace] = 2")

### **Arctan(dy/dx) Değerinin Hesaplanması (Derece)**

EXCEL: ALAN\_R = ATAN(P2/Q2)\*180/(Pi())

ACCESS (SQL) KODU: dy/dx: Atn([dy]/[dx])\*180/(4\*Atn(1))

EXCEL:ALAN\_S=EĞER(VE(P2<0;Q2>0);R2+360;EĞER(VE(P2>0;Q2<0);R2+180;EĞER(VE(P2>0;Q2>0);R2;EĞER(VE(P2<0;Q2<0);R2+180;""))))

ACCESS (SQL) KODU: semt\_acisi: If([dy]>0 And [dx]<0);[dy/dx]+180;If([dy]>0 And [dx]>0);[dy/dx];If([dy]<0 And [dx]<0);[dy/dx]+180;If([dy]<0 And [dx]>0);[dy/dx]+360))

### **Y<sub>GPS</sub> koordinatının hesaplanması:**

EXCEL FORMÜLÜ: ALAN\_T =EĞER(D1-D2=0;D2+SİN(S2\*Pi()/180)\*(O2-(((P2)^2+(Q2)^2)^0.5));D2)

ACCESS (SQL) KODU: YGPS:If(DLookup("[GPS].[enlem]";"GPS";"[trace]=" & [trace]-1)-DLookup("[enlem]";"GPS";"[trace]=" & [trace])=0;[enlem]+([mesafe]-([dy]^2+[dx]^2)^0.5)\*Sin([semt\_acisi]\*(4\*Atn(1)/180));[enlem])

Dy2/Dx2 Hesabı:

EXCEL FORMÜLÜ: ALAN X=ATAN(V2/W2)\*180/Pi()

ACCESS (SQL) KODU: dy/dx2: Atn([dy2]/[dx2])\*180/(4\*Atn(1))

Dy2 Hesabı:

EXCEL FORMÜLÜ: ALAN V= T2-D\$2

ACCESS (SQL) KODU: dy2: [YGPS]-DLookup("[enlem]";"GPS";"[trace] = 2")

Dx2 Hesabı:

EXCEL FORMÜLÜ: W= U2-F\$2

ACCESS (SQL) KODU: dx2: [XGPS]-DLookup("[boylam]";"GPS";"[trace] = 2")

### **X<sub>GPS</sub> koordinatının hesaplanması:**

EXCEL FORMÜLÜ: ALAN\_U =EĞER(F1-F2=0;F2+COS(S2\*Pi()/180)\*(O2-(((P2)^2+(Q2)^2)^0.5));F2)

ACCESS (SQL) KODU: XGPS: If(DLookup("[GPS].[boylam]";"GPS";"[trace]=" & [trace]-1)-DLookup("[boylam]";"GPS";"[trace]=" & [trace])=0;[boylam]+([mesafe]-([dy]^2+[dx]^2)^0.5)\*Cos([semt\_acısı]\*(4\*Atn(1)/180));[boylam])

## 2.Semt Açısı Hesabı:

EXCEL FORMÜLÜ: ALAN\_Y=EĞER(VE(V2<0;W2>0);X2+360;EĞER(VE(V2>0;W2<0);X2+180;EĞER(VE(V2>0;W2>0);X2;EĞER(VE(V2<0;W2<0);X2+180;""))))

ACCESS (SQL) KODU: semt\_acısı2: If((([dy2]>0 And [dx2]<0);[dy/dx2]+180;If((([dy2]>0 And [dx2]>0);[dy/dx2];If((([dy2]<0 And [dx2]<0);[dy/dx2]+180;If((([dy2]<0 And [dx2]>0);[dy/dx2]+360))))

## Gömülü Objenin X eksenindeki ötelemesi - "Dikayak" hesabı;

EXCEL FORMÜLÜ: Alan\_Z= -SİN(K2)\*COS(L2)\*(-N2-J2)

ACCESS (SQL) KODU: DİKAYAK: -Sin([jiroskop].[Fi])\*Cos([jiroskop].[OMEGA])\*(-[anten]-[secilenpics].[derinlik])

## Gömülü Objenin Y eksenindeki ötelemesi – "Dikboy" hesabı için;

EXCEL FORMÜLÜ: Alan\_AA = -SİN(L2)\*(-N2-J2)

ACCESS (SQL) KODU: DİKBOY: -Sin([jiroskop].[OMEGA])\*(-[secilenpics].[derinlik]-[anten])

## Radargram üzerinde işaretlenen detay noktasının yeryüzeyinden gerçek derinlik değeri, veya Z eksenindeki ötelemesi için;

EXCEL FORMÜLÜ: Alan\_AI = COS(K2)\*COS(L2)\*(-N2)

ACCESS (SQL) KODU:

Gercek\_Derinlik:Cos([jiroskop].[OMEGA])\*Cos([jiroskop].[Fi])\*([secilenpics].[derinlik])

EXCEL FORMÜLÜ: Alan\_AB= ATAN(AA2/Z2)\*180/Pi()

ACCESS (SQL) KODU: dy/dx3: Atn([DİKBOY]/[DİKAYAK])\*180/(4\*Atn(1))

### 3.Semt Açısı Hesabı

$$\text{Denklem (a)= } dy(+), dx(+)\ [0 < \alpha < 90] = \tan^{-1}\left(\frac{180 \times (-\sin(\omega)) \times (-\text{Hobject}_{\text{depth}} - \text{Hantenna})}{\pi \times (-\sin(\varphi)) \times \cos(\omega)) \times (-\text{Hobject}_{\text{depth}} - \text{Hantenna})}\right)$$

$$\text{Denklem (b)= } dy(+), dx(-)\ [90 < \alpha < 180] = 180 - \tan^{-1}\left(\frac{180 \times (-\sin(\omega)) \times (-\text{Hobject}_{\text{depth}} - \text{Hantenna})}{\pi \times (-\sin(\varphi)) \times \cos(\omega)) \times (-\text{Hobject}_{\text{depth}} - \text{Hantenna})}\right)$$

$$\text{Denklem (c)= } dy(-), dx(-)\ [180 < \alpha < 270] = 180 + \tan^{-1}\left(\frac{180 \times (-\sin(\omega)) \times (-\text{Hobject}_{\text{depth}} - \text{Hantenna})}{\pi \times (-\sin(\varphi)) \times \cos(\omega)) \times (-\text{Hobject}_{\text{depth}} - \text{Hantenna})}\right)$$

$$\text{Denklem (d)= } dy(-), dx(+)\ [270 < \alpha < 360] = 360 - \tan^{-1}\left(\frac{180 \times (-\sin(\omega)) \times (-\text{Hobject}_{\text{depth}} - \text{Hantenna})}{\pi \times (-\sin(\varphi)) \times \cos(\omega)) \times (-\text{Hobject}_{\text{depth}} - \text{Hantenna})}\right)$$

EXCEL\_FORMÜLÜ: Alan\_AC=EĞER(VE(AA2<0;Z2>0);AB2+360+Y2;EĞER(VE(AA2>0;Z2<0);AB2+180+Y2;EĞER(VE(AA2>0;Z2>0);AB2+Y2;EĞER(VE(AA2<0;Z2<0);AB2+180+Y2;""))))

ACCESS (SQL) KODU: semt\_acısı3: Ifl([DİKAYAK]>0 And [DİKBOY]<0); [dy/dx3]+360; Ifl([DİKAYAK]>0 And [DİKBOY]>0); [dy/dx3]; Ifl([DİKAYAK]<0 And [DİKBOY]<0); [dy/dx3]+180; Ifl([DİKAYAK]<0 And [DİKBOY]>0); [dy/dx3]+180)))) + [semt\_acısı2]

#### Seçilen detay noktasının Xutm koordinatının hesaplanması;

EXCEL FORMÜLÜ: Alan\_AG = U2+AD2\*COS(AC2\*Pi()/180)

ACCESS (SQL) KODU: Xutm: [XGPS]+[L]\*Cos([semt\_acısı3]\*(4\*Atn(1))/180)

#### Seçilen detay noktasının Yutm koordinatının hesaplanması;

EXCEL FORMÜLÜ: Alan\_AE = T2+AD2\*SIN(AC2\*Pi()/180)

ACCESS (SQL) KODU: Yutm: [YGPS]+[L]\*Sin([semt\_acısı3]\*(4\*Atn(1))/180)

#### Seçilen detay noktasının Z koordinatının (Z-elipsoidal) hesaplanması;

EXCEL FORMÜLÜ: Alan\_AK = H2+(COS(K2)\*COS(L2))\*(N2+J2)

ACCESS (SQL) KODU:

Z\_elipsoidal:[GPS].[yükseklik]+([Gercek\_Derinlik]:Cos([jiroskop].[OMEGA])\*Cos([jiroskop].[Fi])\*( [GPS].[anten]+[secilenpics].[derinlik]))

## ÖZGEÇMİŞ

### KİŞİSEL BİLGİLER

**Adı Soyadı** : Celalettin UÇAR  
**Doğum Tarihi ve Yeri** : 09/02/1983 Erzincan  
**Yabancı Dili** : İngilizce  
**E-posta** : ucar\_c@hotmail.com

### ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y. Lisans	Geomatik	İstanbul Teknik Üniversitesi	2009
Lisans	Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği	İstanbul Teknik Üniversitesi	2006
Lise	Sayısal	Erzincan Fen Lisesi	2001

### İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2006-2017	İstanbul Büyükşehir Belediyesi	Harita Kontrol Mühendisi