

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YER RADARI VERİLERİNİN PYTHON
TEMELLİ MODELLENMESİ**

Safa TÜLEK

Ekim, 2023

İZMİR

YER RADARI VERİLERİNİN PYTHON TEMELLİ MODELLENMESİ

Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Yüksek Lisans Tezi

Jeofizik Mühendisliği, Anabilim Dalı

Safa TÜLEK

Ekim, 2023

İZMİR

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

SAFA TÜLEK tarafından DOÇ.DR. EMRE TİMUR yönetiminde hazırlanan “YER RADARI VERİLERİNİN PYTHON TEMELLİ MODELLENMESİ” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Doç.Dr. Emre TİMUR

Danışman

Doç.Dr. Osman UYANIK

Jüri Üyesi

Doç.Dr. Petek SINDIRGI

Jüri Üyesi

Prof. Dr. Okan FISTIKOĞLU

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım süresince bana yön gösteren, lisans ve yüksek lisans tez çalışmalarım boyunca desteğini hiçbir zaman esirgemeyen, bilgileriyle ışık tutan, öğrencisi olmaktan her zaman gurur duyacağım tez Danışman hocam sayın Doç. Dr. Emre TİMUR'a, çalışkanlığı ve azmi ile her işin üstesinden gelebilen ortağım Fulya VAROL'a, her ne olursa olsun her zaman yanımda olan kıymetli annem Ayşegül TÜLEK'e, disipliniyle hayatım boyunca örnek olmuş sevgili babam Burhan TÜLEK'e, kardeşi olmaktan onur duyduğum ablam Merve TÜLEK'e ve abim Erhan TÜLEK'e teşekkürü bir borç bilirim.

Safa TÜLEK

YER RADARI VERİLERİNİN PYTHON TEMELLİ MODELLENMESİ

ÖZ

Günümüzde arkeolojik alanlarda bulunan gömülü yapıların tahribatsız olarak belirlenmesi önem kazanmıştır. Sığ jeofizik yöntemlerden biri olan yer radarı yöntemi (GPR) lahit, duvar, yol ve benzeri yapıların ortaya çıkarılmasında en etkili yöntemlerden biridir. Özellikle kazı çalışmaları başlamadan önce alanın haritalanması, arama alanının daraltılması ve mevcut nesnelerin yerinin hızlı ve ekonomik bir şekilde tespit edilmesi bütçe ve zaman açısından oldukça önemlidir. Bunun yanı sıra köprüler ve yollar gibi kritik altyapıların değerlendirilmesi, buzulların haritalanması, anti-personel kara mayınlarının bulunması, jeolojik-jeoteknik araştırmalar, maden araştırmaları, mühendislik yapıları araştırması gibi alanlarda da kullanılmaktadır.

Bu çalışmada Python temelli gprMax yazılımı ile zaman ortamında sonlu farklar (FDTD) yöntemi kullanılarak yeraltı modelleri üretilmiştir. İlk aşamada farklı fiziksel ve geometrik özelliklere sahip yapı modelleri için kuramsal radargramlar oluşturulmuş olup sonrasında ise İzmir İli, Bornova ilçesinde bulunan Yassitepe Höyüğünde daha önce araştırılmamış bir alan çalışma sahası olarak belirlenerek 100 m²'lik 2 adet karelej şeklinde 0.5 metre aralıkla ölçümler gerçekleştirilmiştir. Saha çalışmaları Proceq marka GS8000 model 40-3440 MHz modüle edilmiş frekans aralığında ölçü alabilen bir cihaz ile gerçekleştirilmiştir. Ölçümlerin sonucunda 2-boyutlu seviye genlik haritaları, 3-boyutlu görüntüler oluşturulmuştur ve duvar yapıları tespit edilmiştir. Kuramsal olarak üretilen modeller ile sahadan toplanan veriler karşılaştırılmıştır ve kazı yerleri önerilmiştir.

Anahtar kelimeler: Arkeoloji, gprMax, modelleme, Python, yer radarı

PYTHON BASED MODELLING OF GROUND PENETRATING RADAR DATA

ABSTRACT

Nowadays, non-destructive identification of buried structures in archaeological sites has become important. Ground penetrating radar method (GPR), one of the shallow geophysical methods, is one of the most effective methods in revealing sarcophagi, walls, roads and similar structures. Especially before the excavation works begin, mapping the area, narrowing the search area and locating existing objects quickly and economically are very important in terms of budget and time. In addition, it is also used in areas such as evaluation of critical infrastructures such as bridges and roads, mapping of glaciers, detection of anti-personnel land mines, geological-geotechnical research, mining research, and engineering structures research.

In this study, underground models were produced using the finite difference method in the time domain with the Python-based gprMax software. In the first phase of the work, structures with different physical properties were modeled, and then an area of 200 square meters was determined in the Yassitepe Mound located in Bornova district of Izmir Province. In the area determined as the study area, measurements were made in the form of two grids of 10x10 meters and at 0.5 meter intervals. Field studies were carried out with a Proceq GS8000 model ground radar that collects measurements in the 40-3440 MHz modulated frequency range. As a result of the measurements, 2D level amplitude maps, 3D images were created, and wall structures were determined. The theoretically produced models were compared with the data collected from the field, and the excavation sites were suggested.

Keywords: Archaeology, gprMax, modelling, Python, ground penetrating radar

İÇİNDEKİLER

	Page
YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZ	iv
ABSTRACT	v
İÇİNDEKİLER	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ	viii
BÖLÜM BİR - GİRİŞ	1
1.1 Çalışma Alanı	1
1.2 Çalışmanın Amacı	3
1.3 Çalışma Alanının Tanımı	3
BÖLÜM İKİ - YER RADARI YÖNTEMİ	6
2.1 Yer Radarı Yöntemi	6
2.2 Yer Radarı Yönteminin Tarihçesi	7
2.3 Yer Radarı Yönteminin Üstünlük ve Zayıflıkları	8
2.4 Elektromanyetik Dalga Kuramı	9
2.4.1 EM Dalgaların Oluşumu	9
2.4.2 Maxwell Eşitlikleri	10
2.4.3 EM Dalga Yayılımı	11
2.4.4 Elektromanyetik Dalganın Yayınımını Etkileyen Fiziksel Özellikler	13
2.4.5 EM Kutuplanma ve Empedans	23
2.4.6 EM Dalgalar ve Özellikleri	26
2.5 Radar Yönteminin Temel İlkeleri	29
2.5.1 Katkı Eşitlikleri	29
2.5.2 Zaman ortamında EM Dalga Denklemleri	30
2.5.3 Radar İmlerinin Yer İçinde İletim, Kırılması ve Yansıması	34
2.5.4 Yer Radarı Sinyallerinin Oluşturulması ve Yayınımı	38
2.5.5 Yer Radarı Sinyalinin Sönümlenmesi	42

2.5.6 Yer Radarı Sinyalinin Hızı ve Derinlik Belirlemesi	44
2.5.7 Nüfuz Derinliği Kavramı	46
2.5.8 Radar Yönteminin Çözünürlüğü	47
2.5.9 Ölçüm Frekansının Belirlenmesi	49
2.5.10 Saçılma ve Odaklanma Kavramları	52
2.5.11 Radar Yönteminde Yakın Alan Kavramı.....	54
2.6 Yer Radarı Yönteminde Modelleme.....	54
2.6.1 Python Temelli gprMax Yazılımı	56
2.6.2 Önceki Çalışmalar.....	58
2.6.3 Zaman Ortamında Sonlu Farklar Yöntemi	61
BÖLÜM ÜÇ YÖNTEM & VERİ NALİZİ.....	64
3.1 gprMax Yazılımı ile Model Oluşturma	64
3.2 Oluşturulan Modeller.....	65
3.2.1 Bağıl Dielektrik Katsayısının (ϵ_r) Etkisi	65
3.2.2 Bağıl Manyetik Geçirgenlik (μ) Etkisi	67
3.2.3 Elektriksel İletkenlik (σ) Etkisi	69
3.2.4 Yatay Süreksizlikler, Farklı Anten, Derinlik ve Geometrik Modeller 71	
3.2.4.1 Yatay Süreksizlikler ve Farklı Antenler	69
3.2.4.2 Farklı Yapı Derinlikleri.....	69
3.2.4.3 Farklı Geometrik Modeller	69
3.3 Saha Çalışmaları	76
3.3.1 Radargram Analizi	78
3.3.2 Alan 1 ve 2-Boyutlu Seviye Haritaları.....	83
3.3.3 Alan 2 ve 2-Boyutlu Seviye Haritaları.....	85
3.3.4 Alanların Birleşik 3-Boyutlu Seviye Haritaları ve 2-Boyutlu Seviye Haritalarının Uydu Görüntüleri	86
BÖLÜM DÖRT SONUÇLAR VE ÖNERİLER	89
KAYNAKLAR.....	92

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 Yassitepe Höyüğü (Bornova/İzmir) konum haritası	3
Şekil 1.2 Çalışma alanından görüntüler	5
Şekil 2.1 GPR yönteminin ölçüm sistemi (Conyers ve Goodman, 1997).....	7
Şekil 2.2 Elektrik alan ve manyetik alan gösterimi.....	10
Şekil 2.3 Elektromanyetik dalganın basit bir gösterimi (Elektrik ve manyetik alanlar birbirlerine dik sinüs dalgalar şeklinde).....	12
Şekil 2.4 Elektrik alana maruz bırakıldığında serbest elektrik yüklerinin hareketinin gösterimi (Annan, 2001)	16
Şekil 2.5 Elektrik alana maruz bırakıldığında serbest elektrik yüklerin yer değiştirme hareketi (Annan, 2001).....	18
Şekil 2.6 Elektrik dipol moment dağılımının elektrik alan etkisinde ortaya çıkan davranışı (Annan, 2001)..	18
Şekil 2.7 Frekanla değişen toplam elektrik akımı(Annan, 2001).....	20
Şekil 2.8 Yayınım doğrultusuna göre a ve b olarak oluşan EM alan (Annan, 2001).....	24
Şekil 2.9 Elektrik alan ve bileşenleri (Annan, 2001)..	25
Şekil 2.10 Elektrik alan bileşenlerinin aynı faza sahip olması durumu....	25
Şekil 2.11 Elektromanyetik alanların eliptik, dairesel ve doğrusal biçimde kutuplanması (Annan, 2001).....	26
Şekil 2.12 Elektromanyetik dalga cepheleri ve bunun ışınsal gösterimi (Annan,2001)..	28
Şekil 2.13 a) TM modu ve b) TE modu için EM alan bileşenleri..	32

Şekil 2.14 Elektromanyetik dalganın yer içeresinde bulunan ara yüzeylerdeki davranışı (Annan, 2005).....	34
Şekil 2.15 (a) TE modunun ve (d) alana ait bileşenler (c) TM modunun gösterimi ve (b) ona ait olan alan bileşenleri (Balkaya, 2010).....	37
Şekil 2.16 Anten konumları dikkate alındığında TM ve TE modların gösterimi (van der Kruk vd.,2006).....	37
Şekil 2.17 Anten ile yer içerisine gönderilen dalganın yayınıma örnek (Conyers ve Goodman, 1997'den uyarlanmıştır).....	39
Şekil 2.18 300 MHz merkez-frekansa ait anten kullanılarak farklı sayı değerlerine sahip bağıl dielektrik geçirgenlik değerleri ile elde edilebilecek yatay çözünürlük büyüklükleri (Conyers ve Goodman, 1997'den uyarlanmıştır).....	40
Şekil 2.19 Derine inildikçe (a) artan ve (b) azalan bağıl dielektrik geçirgenlik katsayılarının yeraltı modeli için dalgayı kırmasının gösterimi (Conyers ve Goodman, 1997'den uyarlanmıştır).....	41
Şekil 2.20 Elektromanyetik enerjinin etki derinliği ile ortamın elektriksel iletkenliğinin ilişkisi (Moorman, 2001).....	46
Şekil 2.21 a) 3 m ve b) 0.5 m ölçüm aralığı ile 50 MHz ye sahip bir anten kullanılarak elde edilen radargramlar. (Moorman,2001).....	48
Şekil 2.22 Antenlerin farklı lokasyonlarında odaklanma ve saçılmayı ifade eden örtülü yüzeyin basit gösterimi (Conyers ve Goodman, 1997).....	53
Şekil 2.23 Yer radarı dalgasının kara mayını içeren ortamda yayılımı.....	57
Şekil 2.24 Elektrik ve manyetik alan vektör bileşenleri ile hesaplama ağı (Yee, 1966).....	63
Şekil 3.1 2-Boyutlu gprMax simülasyonu.....	65
Şekil 3.2 Model 1'in a) $\epsilon_{r2}=20$ b) $\epsilon_{r2}=30$ c) $\epsilon_{r2}=50$ değerleri ile elde edilen yapay radargramları.....	66

Şekil 3.3 Model 2'in a) $\mu_1=2$ b) $\mu_1=8$ c) $\mu_1=16$ değerleri ile elde edilen yapay radargramları.....	68
Şekil 3.4 Model 3'ün a) $\sigma_1=0.1 \text{ S/m}^{-1}$ b) $\sigma_1=1 \text{ S/m}^{-1}$ c) $\sigma_1=10 \text{ S/m}^{-1}$ değerleri ile elde edilen yapay radargramlar.....	70
Şekil 3.5 Model 4'ün a) 500 MHz b) 800 MHz c) 1.2 GHz anten frekansları kullanılarak 4 adet yatay süreksizliklerden elde edilen yapay radargramlar.....	72
Şekil 3.6 Model 5'in a) 20 cm b) 60 cm c) 100 cm derinliklere sahip yapıdan elde edilen yapay radargramlar.	73
Şekil 3.7 Model 6'nın a) dikey yapı b) yatay yapı c) dik ve yatay yapılar kullanılarak oluşturulan farklı geometrik yapılardan elde edilen yapay radargramlar.....	74
Şekil 3.8 Model 7'nin a) üst üste dik ve yatay yapı b) üst üste yatay ve dik yapı c) üst üste yatay yapılar kullanılarak oluşturulan farklı geometrik yapılardan elde edilen yapay radargramlar.....	75
Şekil 3.9 Çalışma sahasının uydu görüntüsü.....	77
Şekil 3.10 Doğu-batı ve kuzey-güney doğrultulu profillerin kroki üzerinde gösterimi..	77
Şekil 3.11 Alan-1 a) 4. Profile ait radargram b) Eğri çakıştırma işlemi yapılmış radargram.....	78
Şekil 3.12 Alan-2 a) 22. Profile ait radargram b) Eğri çakıştırma işlemi yapılmış radargram.....	79
Şekil 3.13 Alan-2 a) 17. Profile ait radargram b) Eğri çakıştırma işlemi yapılmış radargram.....	80
Şekil 3.14 Alan-2 a) 15. Profile ait radargram b) Eğri çakıştırma işlemi yapılmış radargram.....	81

Şekil 3.15 Alan-2 a) 40. Profile ait radargram b) Eğri çakıştırma işlemi yapılmış radargram.....	82
Şekil 3.16 Alan 1’den elde edilen radargramlardan 3-13 ns zaman aralığında ve derinlik değerleri ile oluşturulan 2-boyutlu seviye haritaları.....	84
Şekil 3.17 Alan 2’den elde edilen radargramlardan 6-39 ns zaman aralığında ve derinlik değerleri ile oluşturulan 2-boyutlu seviye haritaları.....	85
Şekil 3.18 Alanların birleştirilmesinden elde edilen ve 0-1.1 m derinliklere ait 3-boyutlu seviye haritaları (3-29 ns aralığında).....	87
Şekil 3.19 Alanların birleştirilmesinden elde edilen 2-boyutlu seviye haritalarının uydu görüntüsü (0-1.0 m).	88

TABLÖLER LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1 Farklı ortamların sahip olduğu bağıl dielektrik geçirgenlik değerleri (Conyers ve Goodman, 1997).....	15
Tablo 2.2 Hız V , bağıl dielektrik geçirgenlik katsayısı (ϵ_r), elektriksel iletkenlik (σ) ve sönümlenmenin (α) farklı ortamlardaki değerleri (Leckebush, 2003)..	43
Tablo 2.3 100 ile 50 MHz merkez frekansa sahip antenlerin ürettiği darbelere ait genişlikler ve farklı jeolojik birimlerde en büyük kuramsal çözünürlük değerleri (Ulriksen, 1982; Davis ve Annan, 1989; Annan, 1992).....	48
Tablo 2.4 Ortamların farklı dielektrik geçirgenliklere sahip olması durumunda anten frekansı ve dalga boyu ilişkisi (Conyers ve Goodman, 1997).....	50

BÖLÜM BİR

GİRİŞ

1.1 Çalışma Alanı

Özellikle son yıllarda teknolojinin ilerlemesiyle birlikte bilgisayarlardaki hızlı gelişim jeofizik mühendisliğinde modelleme, veri toplama ve değerlendirme tekniklerinin büyük oranda ilerlemesine neden olmuştur. Hızlı ve yüksek hassasiyete sahip cihazlar ile büyük alanların araştırılması hem zamandan hem de maliyet açısından fayda sağlamaktadır. Günümüzde sığ derinliklerde bulunan materyallerin araştırılması ve ortaya çıkartılması uygulamalı jeofiziğin en önemli çalışma alanlarından biridir. Sığ jeofizik araştırmalar başlıca mühendislik ve geoteknik, jeoloji ve hidrojeoloji, arkeolojik araştırmalar ve çevresel problemlerinin araştırılması olmaktadır. Yer radarı yöntemi ise sığ aramacılıkta en çok kullanılan yöntemlerin başında gelmektedir. Arkeolojik alanlarda bulunan karmaşık geometrik, kimyasal ve fiziksel özelliği sahip kalıntıların lokasyonlarını, derinliklerini belirlemede ve haritalamada sıklıkla kullanılmaktadır.

Yüksek frekansa sahip elektromanyetik bir yöntem olan yer radarı yöntemi (GPR), yüzeye yakın sığ derinliklerdeki araştırmalarda sıklıkla kullanılmaktadır. Kayıtcı, verici anten, alıcı anten ve kontrol birimi bir yer radarı sistemini oluşturmaktadır. Üretilen yüksek frekanslı dalgalar yer içine ilerleyerek karşılaştıkları farklı fiziksel özellikli materyallerden yansımakta ve saçılmaktadırlar. Yansıyan ve saçılan sinyaller aynı ve farklı zamanlarda alıcı anten, kayıtcı ve kontrol birimi aracılığı ile zamanın fonksiyonu olarak nanosaniye(ns) cinsinden kaydedilirler. Veri toplama işlemi ise çalışmanın amacına uygun olarak seçilen x yönlü profil olarak 2-boyutlu veya x yönlü profillerin belirli y mesafelerinde toplanmasıyla elde edilerek 3-boyutlu olarak gerçekleştirilebilmektedir. Toplanan ham veriler ise belirli veri işlem teknikleri uygulanarak 2 ve 3-boyutlu olarak görüntülenebilmektedir. Sığ derinliklerde yüksek çözünürlüklü görüntü sağlayabilen yer radarı son yıllarda hem yeraltında hem yerüstünde (mühendislik yapıları) birçok farklı problemin çözülmesinde kullanılmaktadır.

Yer radarı yöntemi kullanılarak yapılan modelleme çalışmaları birçok araştırmacının araştırma konusu olmuştur. 1970'li yıllara gelindiğinde elektromanyetik dalgaların değişkenlik gösteren dielektrik iletkenlik değerlerine sahip yapılarda nasıl ilerlediği modellenmiştir (Annan, 1973). Ayrıca GPR uygulamalarında öncül modelleme çalışmaları Goodman (1994) ile arkeoloji ve mühendislik amaçlı gerçekleştirilmiştir. Cai ve McMachen (1995) ve Zeng vd. (1995) çalışmalarında jeolojik tabaka modeli oluştururken, (Carcione, 1996) ise plastik, fiberglas, pvc ve metalik yapılar için modelleme çalışmaları yapılmıştır. İlk 3-Boyutlu sayısal modelleme örneklerini ise Roberts ve Daniels (1997) ortaya koymuştur.

Sayısal modellemeler yoluyla Elektromanyetik (EM) dalgaların yer içerisindeki yayılımı daha iyi bir biçimde kestirebilmektedir. Buna ek olarak güncel veri işlem tekniklerinin sınanmasında da elverişli bir araç olmaktadır.

gprMax yazılımı kullanılarak bu çalışmada, farklı fiziksel özelliklere sahip modeller üretilmiştir. gprMax, elektromanyetik dalga yayılım simülasyonu yapan açık kaynak kodlu bir yazılımdır. Kullanan kişiler tarafından geliştirilebilme özelliği olan ve sayısal modelleme yapabilen yazılımıdır (Warren, Gianapoulos ve Giannakis, 2016). Python temelli gprMax yazılımı bu tür modelleri oluşturmak için kullanılan elektromanyetik dalgayı simule bir yazılım olmaktadır. Bu yazılım ile 2B ve 3B modeller geliştirebilmektedir. gprMax yazılımının temeli ise zaman ortamında sonlu farklar yöntemini kullanarak 3-boyutlu bir Yee hücresinde x, y ve z yönlerinde elektrik ve manyetik alanları tanımlayarak modelleme yapmaktır. Hesaplama ağında hücrenin konumları ise i, j ve k yönleriyle tanımlanmaktadır.

Arkeolojik alanların ortaya çıkartılmasında araştırma yapılacak alandaki yapıların çalışma yapılmadan önce özelliklerinin modellenmesi ve elde edilebilecek olası radargramların analizinin yapılması yorumlama ve ölçüm toplama esnasından oldukça yararlı olmaktadır. Aynı zamanda farklı frekanslarda antenlerin radar yanıtları, farklı fiziksel ve geometrik özelliklere sahip yapıların yanıtlarının ayırt edilmesini sağlamaktadır.

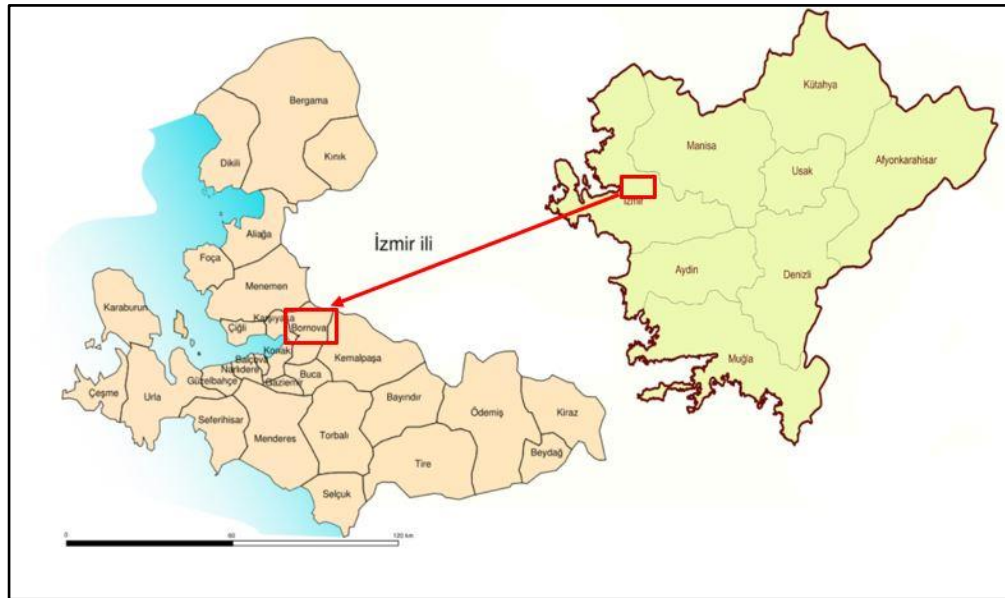
1.2 Çalışmanın Amacı

Tez çalışması kapsamında teorik olarak farklı fiziksel ve geometrik özelliklere sahip gömülü yapılara benzeyen modeller üretilerek yapay radargramlar elde edilmiştir ve sonrasında İzmir ili, Bornova ilçesinden bulunan Yassitepe höyüğünde yer radarı yöntemi uygulanmıştır. Çalışma alanında 2 adet 10x10 metrelik karelaj şeklinde alanlar oluşturulup x ve y yönlerinde ölçü toplanmıştır. Uygulama İsveç menşeli, basamaklı frekans sürekli elektromanyetik dalga üreten teknolojiye sahip 40-3440 MHz aralığında frekans modülasyonlu Proceq marka GS8000 modeli yer radarı ile gerçekleştirilmiştir.

Bu amaca yönelik olarak oluşturulan modellerden elde edilen yapay radargramlar ile sahadan toplanan verilerin karşılaştırılmıştır. Sahadan toplanan verilerle, 2-boyutlu ve 3-boyutlu görüntüler oluşturularak sahada bulunan arkeolojik kalıntıların lokasyonları, derinlikleri ve fiziksel özellikleri yorumlanmıştır.

1.3 Çalışma Alanının Tanımı

Yassitepe Höyüğü, Yeşilova Höyüğü'nün kültürel yayılımını saptayabilmek amacıyla Yeşilova Höyük kazılarıyla birlikte 2010 yılından itibaren kazılan bir yerleşimdir. Kazı çalışmalarında Yassitepe Höyüğü'nde 4 kültür katına ait 14 mimari tabaka ortaya çıkarılmıştır (Derin, 2020).

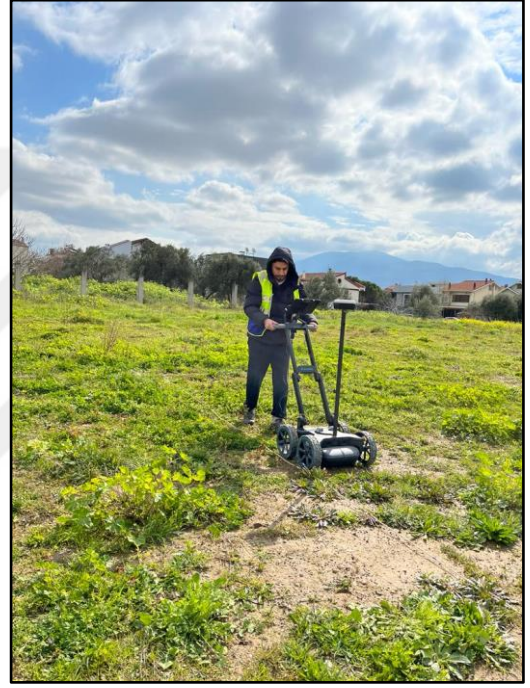


Şekil 1.1 Yassitepe Höyüğü (Bornova/İzmir) konum haritası

M.Ö. 3000 yıllarında tarihlenen Erken Tunç Çağı yerleşimi uzun ve ince dikdörtgen planlı yüksek taş duvarlı yapılardan oluşmaktadır. Taş duvarlar ile inşa edilmiş mekanlar çok sığda yer almaktadır ve yaklaşık 2 metre yüksekliğindedir. Taş duvarlar ile inşa edilen mekanların, inşa edilen bu uzun evler kuzeydoğu-güneybatı doğrultusundadır, çalışmalar sonucunda yapıların içlerinde platformların ve ocak yerlerinin bulunduğu anlaşılmaktadır. İnşa edilen mekanların duvarları ortak duvar olarak yapılmıştır. Yerleşim alanının içerisinde onarım ve yeniden kullanım evreleri bulunmaktadır. Yerleşim yerinde yer alan yapıların uzun duvarlarının yıkım şekli S şeklindedir. Yıkım şekli, beş bin yıl önce bir deprem ile yerleşimin son bulduğunu göstermektedir. Depremden sonra burada yaşayan toplulukların yapılarını onarıp bir süre daha yaşadıkları tespit edilmiştir (Derin, Erdem, Çelik ve Mamikoğlu, 2020).

Bornova Ovası'nın ortasında, Yeşilova Höyüğü kazı çalışmalarıyla birlikte; İpeklikuyu ve Yassitepe Höyüğü'nü kapsayan, yaklaşık 500 dönümlük bir alanda "İzmir'in Prehistorik Yerleşim Alanı" ortasında Yassitepe Höyüğü yer almaktadır. Manda Deresi'nin kuzeyinde bulunan, höyük yüksekliği yaklaşık 6 metreyi bulan, höyük ve çevresi akarsuların getirdiği tortulların etkisi 1-2 metre kadar yükselmiştir. Höyüğün denizden yüksekliği 19 metre, doğu-batı yönünde 150 metre, kuzey-güney yönünde ise yaklaşık 200 metre uzunluğundadır (Derin, 2006).

Yassitepe'de Yeşilova Höyüğü kazılarına bağlı olarak 2010 yılında başlanmış olan kazı çalışmalarında üzerine yapılan yol ve tarımsal faaliyetleri sebebi ile altta bulunan kalıntıların tahribatı görülürken höyüğün merkezinde yüzeyin yaklaşık 10 cm altında kültür tabakaları başlamıştır. Yassitepe'de yapılan çalışmalar sonucunda dört farklı kültür sürecini içeren 14 tabaka ortaya çıkarılmıştır (Derin, 2019). Höyükteki ilk ve son yerleşime ait Neolitik ve Roma Dönemi tabakaları, keramik buluntular ile temsil edilmesine rağmen bu dönemlere ait mimari kalıntılara rastlanmamıştır (Derin vd., 2020).



Şekil 1.2 Çalışma alanından görüntüler

BÖLÜM İKİ

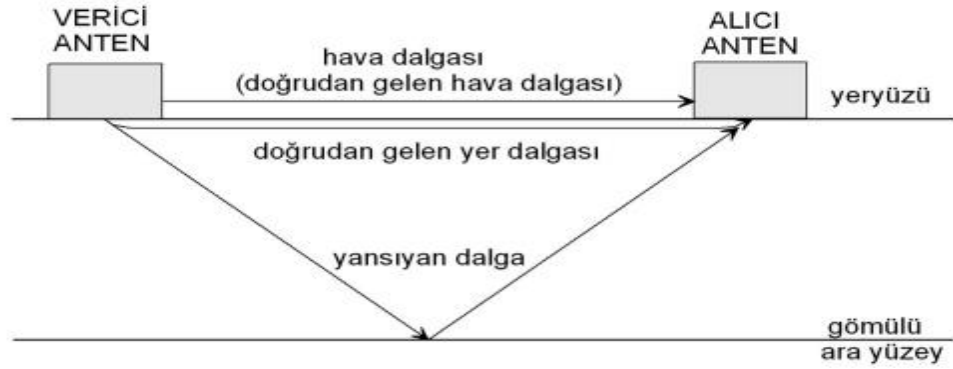
YER RADARI YÖNTEMİ

Havzadaki kirlilik, kentsel ve endüstriyel atık su tesisleri, foseptik, doğrudan deşarj vb., kaynağı noktasal olan, kirleticilerden kaynaklanmaktadır. Fakat söz konusu kirletici kaynak arazi kullanımı, tarım ve hayvancılık, zirai ilaçlar ve katı atık depolama alanları gibi yayılı ise, alınacak tedbirler konusunda kritik bölge belirlenmemektedir.

2.1 Yer Radarı Yöntemi

Yer radarı bir jeolojik ortamdaki toprak ve malzemelerin elektromanyetik özelliklerinde değişiklikler (dielektrik sabiti, iletkenlik, manyetik geçirgenlik), su içeriği ve yoğunluğu algılamaktadır. Yer içerisine darbe şeklinde gönderilen yüksek frekanslı elektromanyetik dalganın bağıl dielektrik geçirgenlik sabiti farklı arayüzeylerden kırılarak ve yansyarak alıcıda kaydedilmesi yer radarı yönteminin esasını oluşturmaktadır. Elektromanyetik dalganın puls frekansı saha çalışmaları uygulamalarında 10 MHz – 2 GHz arasındadır. Daha ziyade iletkenliği yüksek olan kütlelerin yüzeyinden EM alanının yansıyan sinyalleri kaydedilir (Keçeli, 2012). Bu sinyallerin seyahat zamanının (ns) süresinin ölçülmesine dayanmaktadır. Böylelikle, EM dalgalarının seyahat zamanları kullanılarak, yer altı yapılarının geometrisi ve derinliği belirlenebilmektedir (Milsom, 2003).

Gidiş-geliş süresinin fonksiyonu olarak kayıt edilen sinyallere “radar izi” ya da yer radarında “EM dalga alanı” adı verilir. Tüm ölçüm noktalarındaki kayıtlar birleştirilerek “radargram” olarak isimlendirilen 2-boyutlu radar kesitleri oluşturulabilir (Annan, 2001). İnceleme alanında ortama nüfuz eden elektromanyetik dalgalar, merkez frekans içermekte olup harmonik yapıdadır. Sözü edilen frekans değeri; saçılma derecesini, soğrulma miktarını ve etki derinliğini belirlemektedir. (Annan, 2001).



Şekil 2.1 GPR yönteminin ölçüm sistemi (Conyers ve Goodman, 1997)

Sinyaller yer içerisinde sediman ortamlarda ya da jeolojik birimlerdeki değişikliklerden ve ara yüzeylerden, boşluklar ve benzeri yeraltı özelliklere sahip ortamlar içerisindeki elektriksel özelliklerdeki malzemelerden yansımaktadır. Mevcut ortam içerisindeki bu değişimin ana etmenlerinden biri de nem ve su oranıdır.

2.2 Yer Radarı Yönteminin Tarihçesi

Radar sinyalinin ilk bulunması 1886'da Alman fizikçi Heinrich R. Hertz tarafından atılan ilk adımla başlamıştır. Hertz elektromanyetik dalgaların ışığa benzer şekilde yayıldığını ve yansıdığını ortaya koymuştur (Kurt, 2009). 1904 yılında, gemilerin birbirleriyle çarpışmalarını önlemek amacıyla Christian Hülsmayer, EM dalgaları kullanarak gemilerin yerlerini saptamak amacıyla sistemi bulmuştur.

1925 yılına gelindiğinde ise darbe şeklindeki elektromanyetik dalgalar Merle A. Tuve, Amerika 'da üretilmiştir ve günümüzdeki manasında radar kavramına dönüşüm gerçekleşmiştir (Kurt, 2009). Alman, Fransız, İngiliz ve Amerikan fizikçiler 1939 yılında İkinci Dünya Savaşı sırasında çalışmalarını arttırmışlardır. 1940 yılında 180 km uzaklıktaki hedefleri tespit edilebilecek radarlar yapılmıştır. Yine aynı yıllarda İngiliz fizikçiler radar sinyalinin gücünü birkaç bin kat yükseltilmiş ve bu buluşlar Almanların savaşta yenik düşmelerinde önemli olmuştur. Bu dönemlerde ilk olarak yeraltında bulunan materyallerin tespit edilmesi amacı ile gerçekleştirilmiştir. Bahsedilen dönemlerde uzay çalışmalarında ve kutuplarda bulunan buzul tabakanın kalınlığının tespitinde kullanılmıştır (Davis and Annan 1989). Yer altı özelliklerinin

devamlılığının tespiti, örtülü nesnelerin derinliğinin, konumunun araştırılmasında radar yöntemi 1970'ten günümüze kadar devam etmektedir (Kurt, 2009).

2.3 Yer Radarı Yönteminin Üstünlük ve Zayıflıkları

Günümüze gelindiğinde, GPR yöntemi sığ derinliklerdeki farklı sorunların çözülmesinde etkili rol oynamaktadır. Yer radarı yönteminin diğer jeofizik yöntemlerle kıyaslandığında üstün ve zayıf olduğu koşullar bulunmaktadır. Yöntemin üstün olduğu durumlar;

- ✓ Yüksek frekanslı elektromanyetik dalga kaynağı kullanıldığı için yığma yapılmaktadır ve yüksek çözünürlüklü görüntü sunmaktadır.
- ✓ Uygulamaya yönelik farklı frekansta antenler ile daha sağlıklı yorumlar yapılabilmektedir.
- ✓ Mevcut verideki gürültüler genellikle veriden atılabilmektedir.
- ✓ Hedeflenen obje/materyal/arayüz derinliği ve konumu yüksek hassasiyetle bulunabilmektedir.
- ✓ Arazide uygulama açısından en basit yöntemlerden biridir.
- ✓ Araştırılan malzemenin tek bir fiziksel özelliğine bağlı kalmayıp elektriksel iletkenlik (σ), dielektrik geçirgenlik (ϵ) ve manyetik geçirgenlik (μ) özelliklerdeki değişimlerden etkilenir
- ✓ Birden fazla fiziksel özellik değişimine duyarlı olduğu için uygulama alanları oldukça geniştir.

Yer radarı yönteminin dezavantajları;

- ✓ Mevcut sahadaki jeolojik birimlerin fiziksel özellikleri sebebiyle derine doğru penetrasyonu zorlaşmaktadır.
- ✓ Çevrede bulunan radyo vericilerinin ürettiği sinyaller gürültü kaynağıdır ve ölçülen izleri kayıtçının ölçüm aralığı sınırının dışına taşıabilir.
- ✓ Eğer çalışma sahasındaki jeolojik birimlerin iletkenliği çok yüksek ise yer-hava arayüzeyinde keskin yansıma izleri yaratabilir ve derinden bilgi alınması zorlaşabilir.

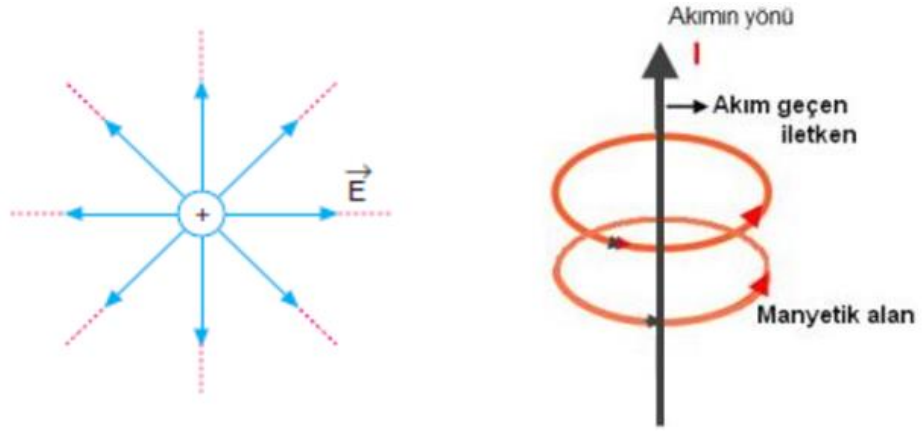
2.4 Elektromanyetik Dalga Kuramı

2.4.1 EM Dalgaların Oluşumu

Yer radarı yönteminin temeli elektromanyetik teoriye dayanmaktadır. Elektromanyetik alan, zaman içerisinde değişime uğrayan manyetik ve elektrik alanların bir arada olmasından dolayı oluşmaktadır. Bu alanların birinin uğradığı değişim diğer alanda da farklılık yaratmaktadır ve bunun doğrultusunda elektromanyetizma terimi ortaya çıkmaktadır. Elektromanyetizma temelinde, mevcut elektromanyetik alanın fiziğidir ve iletken malzemelerdeki elektrik yük akışından kaynaklanmaktadır.

Normalde oluşan harmonik dalgalarda olduğu gibi elektromanyetik dalgaların karakteristiği birbirlerine benzemektedir. Bu dalgaları tanımlamak için periyot, frekans ve dalga boyu parametreleri kullanılmaktadır. Frekans ise bir saniye içerisinde oluşan tekrar sayısıdır ve birimi Hertz (Hz)'dir. Dalga boyu bir dalga'nın tekrarlanan birimleri arasındaki mesafe, periyot ise kendini tekrar eden dalga'nın süresidir. Frekans ile dalga boyunun çarpımı ise elektromanyetik dalga'nın yayılım hızını vermektedir.

Yükün ivmelenmesi elektromanyetik dalga'nın oluşmasını sağlamaktadır. Hareketsiz bir elektrik yükün etrafında manyetik alan hareket başlayana kadar oluşmayacaktır bu sebeple yükler hareket ettikten sonra bu alanın civarındaki manyetik özellik taşıyan herhangi bir nesne tarafından itme veya çekme kuvveti oluşacaktır. Durgun durumda olan bir elektrik yükü yalnızca elektrik alan oluşmasına sebep olurken hareket halinde bulunan bir elektrik yükü manyetik alan oluşturmaktadır. Mevcut elektrik alan ise etrafındaki bir elektrik yüke kuvvet uygulamaktadır. Değişken manyetik oluşması için alternatif akımın iletkenin geçmesi gerekmektedir. Alternatif akım geçen bir iletkenin çevresinde de manyetik alan oluşur (Şekil 2.2) ve etrafa elektromanyetik dalga'nın yayılmasına neden olur.



Şekil 2.2 Elektrik alan ve manyetik alan gösterimi

Elektromanyetik alan kaynağı elektrik alan ile manyetik alanın bir arada bulunmasından dolayı elektromanyetik dalga'nın yönü iki alan yardımıyla bulunabilmektedir. Manyetik alan (H) ile elektrik alan (E) birbirlerine dik olmaktadır. Elektromanyetik alan (P) ise bu iki alanın ortaya çıkardığı düzleme dik olmaktadır. Sonuç olarak bu üç alan birbirlerine dik üç vektör ile gösterilebilmektedir. Elektromanyetik dalgaların uzaydaki hızı neredeyse 3×10^8 m/s'dir. Işık bir elektromanyetik dalga olduğu için bu değer ışık hızına eşittir. Işık hızı ise aşağıdaki bağıntıda (2.1) gösterildiği gibidir;

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \quad (2.1)$$

Burada ϵ_0 boşluğa ait dielektrik sabiti, μ_0 ise boşluğa ait manyetik geçirgenlik c ise ışık hızı olarak tanımlanmaktadır.

2.4.2 Maxwell Eşitlikleri

Elektrik ve manyetik alan vektörleriyle ilişkili olan Maxwell denklemlerini kullanarak elektromanyetik dalgaların yayılımı ve sönümlenmesi anlaşılmaktadır.

$$\nabla \times \vec{E} = - \frac{\partial B}{\partial t} \quad (2.2)$$

Bağıntı (2.2) Faraday kanunun matematiksel ifadesidir. Bir manyetik alanın zamanla değişimi ortamda bulunan elektrik yüklerin hareketine neden olmaktadır ve mevcut yükün hareket etmesiyle döngüsel kapalı bir elektrik alan oluşmaktadır.

Elektrik alan vektörel bir büyüklük olmakla birlikte, indüklenen elektromanyetik alanın manyetik akı değişiminin negatif işaretlisi (-) olmaktadır.

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2.3)$$

Uzayda bulunan bir elektrik akımı ile manyetik alanın vektörel kaynağı oluşturması ve ortaya çıkan bu manyetik alanın mevcut bölgede bulunan yük akışı ve zamanla yer değiştiren elektrik yüklerinin hareketlerinden kaynaklı olarak ortamdaki toplam akımla doğru orantı içerdiğini ortaya koyan Ampere Kanununun tanımıdır ve (2.3) bağıntısıyla verilmiştir.

Doğada elektrik alanın iki kaynağı bulunur. Bunlardan birincisi; Skaler kaynak, ya elektrik alanların noktasal yükte son bulmasıyla meydana çıkar ve bu Gauss Kanunu adı ile bilinmektedir ya da maddeler içerisindeki serbest elektrik yük yoğunluğudur. İndüklenme meydana geldiğinde, elektrik yükleri salınım yaparak kapalı döngü şeklinde oluşan ve zamanla değişim gösteren elektrik alanları oluşturur. Elektrik alanın toplamı ise, genelde bu zamanla değişime uğrayan sinyallerin farklı kaynaklardan meydana gelen elektrik alanlardan oluşmaktadır.

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = q \quad (2.4)$$

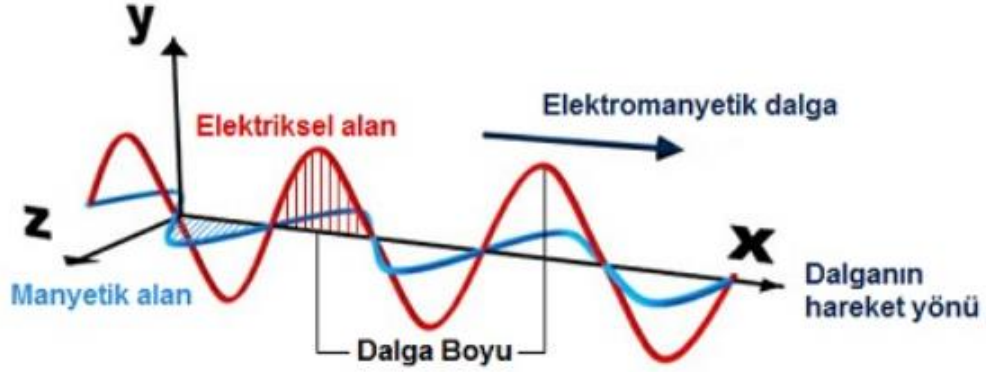
Akım akışının elektrik yüklerinin hareketlenmesi sonucunda oluşmasının ardından bir manyetik alan oluşmaktadır. Bu sebeple, manyetik alanın oluşması sadece eşitlik 2.5'te gösterilen kapalı döngüde oluşacak başka bir deyişle kendi üzerinde sonlanmaktadır. Dolayısıyla kapalı bir yüzeyde mevcut manyetik akı sıfır olmaktadır.

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.5)$$

2.4.3 EM Dalga Yayılımı

Daha önce de anlatıldığı üzere elektromanyetik dalga, elektrik alan ve manyetik alanın bileşkesinden oluşmaktadır. Dışarıdan herhangi bir etki olmadığı sürece elektrik ve manyetik alan aynı fazdadırlar ve birbirlerine dik olan sinüs dalgaları şeklindedir. Bu neden ile birlikte eğer elektrik alan maksimum noktasında ise manyetik alan minimum noktasına gelir, manyetik alan maksimum noktasında ise elektrik alan minimum noktadadır. Bir elektromanyetik dalganın yayılım yönü $\vec{E} \times \vec{B}$ vektörü

yönünde ve z eksenine doğrultusunda olup, boşlukta ışık hızında hareket ederler (Şekil 2.3).



Şekil 2.3 Elektromanyetik dalganın basit bir gösterimi (Elektrik ve manyetik alanlar birbirlerine dik sinüs dalgalar şeklinde)

Yer içerisine gönderilen elektromanyetik dalga, içinden geçtiği maddelerin ve ortamların yayınım sabiti tarafından yönlendirilmektedir. Boşlukta elektromanyetik dalganın yayınım sabiti (K_0), (2.6) bağıntısıyla verilmektedir. Denklemden ϵ_0 boşluğun dielektrik geçirgenliği, ω radyan cinsinden frekansı ve μ_0 ise boşluğun manyetik geçirgenliğini ifade etmektedir.

$$K_0 = (\omega^2 \mu_0 \epsilon_0)^{0.5} \quad (2.6)$$

Yer arzında elektromanyetik dalganın ilerleyişi, bulunduğu ortamın elektriksel özelliklerine bağlıdır ve elektromanyetik dalga yüksek iletkenliğe sahip ortamlarda çok hızlı bir şekilde sönümlenmektedir. Bu sebeple yayınım katsayısının hesap edilmesi (2.7) denklemi ile mümkün olmaktadır. Burada σ_{DC} doğru akım elektrik iletkenliği, ϵ ortamın elektrik geçirgenliği, μ ortamın manyetik geçirgenliği ve $i = (-1)^{0.5}$ dir.

$$K = (\omega^2 \mu \epsilon + i \omega \sigma_{DC})^{0.5} \quad (2.7)$$

Elektrik geçirgenlik özellikleri yer radarı uygulamalarını ciddi oranda etkilemektedir ve genel olarak bağıl dielektrik katsayısı biçiminde açıklanmaktadır ve (2.8) bağıntısı ile gösterilmektedir. Mevcut bağıntıdaki K^* karmaşık(kompleks) dielektrik parametresi olup, K' dielektrik sabiti ve K'' ise kayıp faktör olarak

adlandırılmaktadır. Yeraltına nüfuz etmiş elektromanyetik dalganın yayılım faktörü, (2.9) bağıntısıyla tanımlanmaktadır. $i\sigma_{DC}$ DC iletkenlik kayıp faktörünü, $\omega K'$ dielektrik katsayısı faktörünü $i\omega K''$ ise dielektrik kayıp faktörünü ifade etmektedir.

$$\varepsilon/\varepsilon_0 = K^* = K'\varepsilon_0 + iK''\varepsilon_0 \quad (2.8)$$

$$K = [\omega\mu_0\varepsilon_0(\omega K' + i\omega K'' + i\sigma_{DC})]^{0.5} \quad (2.9)$$

(2.9) bağıntısı hem karmaşık dielektrik katsayılarının değerinin hem de doğru akım iletkenlik değerinin belirlendiğini ve söz konusu madde içerisinde yayılan enerji miktarının göstermektedir.

2.4.4 Elektromanyetik Dalganın Yayılımını Etkileyen Fiziksel Özellikler

Elektrik (E) ve manyetik (H) alan bileşenlerinden oluşan elektromanyetik alanlar zamanla değişmektedir ve bu bileşenler hareket ettikleri ortamların birbirlerinden farklı fiziksel özelliklerinden dolayı değişime uğramaktadırlar. Elektromanyetik alanlardaki bu tür değişimler, farklı ortamlarda yayılması ve sönümlenmesinin farklı olacağı gibi, yansıyan elektromanyetik dalgalarında farklı karakterlerde yansımalarına sebep olmaktadır.

Elektromanyetik dalgaların ortamda yayılması mevcut ortamın elektriksel özelliklerine bağlı olmaktadır ve yer radarı en çok elektriksel özelliklerden etkilenmektedir. Manyetik değişimlerin etkisi elektriksel değişimlere etkisi sönük kalmaktadır ancak yer radarı uygulamasını etkileyecek manyetik özelliklere sahip ortamlarda bulunmaktadır. Elektromanyetik alanları etkileyen fiziksel özellikler yukarıda da bahsedildiği üzere, dielektrik geçirgenlik (ε), bağlı manyetik geçirgenlik (μ) ve elektriksel iletkenliktir (σ).

2.4.4.1 Dielektrik Geçirgenlik

Dielektrik ifade edildiğinde elektriksel yalıtkanlık ile aynı anlama sahip olmakla birlikte, dielektrik malzemeler, elektrik akımının hareketine direnç gösteren bir malzeme ile tanımlanabilmektedir. EM enerjisinin çoğunluğunun saçılmasına ve ortamdan ortama geçmesine dielektrik ortam sayesinde olmaktadır. Elektromanyetik alanın söz konusu olduğu dielektrik bir ortamda, mevcut yükler elektrik alan tarafından

zorlanmaktadır. Söz konusu olan zorlamaya yer değiştirerek tepki verirler. Dielektrik geçirgenlik birim elektrik alanda bulunan elektriksel yer değiştirmenin miktarı olarak tanımlanmaktadır. Birimi coloumb/volt.metre veya farad/metre'dir.

$$\bar{D} = \epsilon \cdot \bar{E} \quad (2.10)$$

(2.10) bağıntısı ile matematiksel olarak ifade edilmektedir.

Dielektrik bir ortamın elektrik alanı şiddetlendiğinde, elektriksel yer değiştirme hareketi mevcut ortamda depo edilmektedir. Elektrik alan azalım gösterdiğinde ise biriktirilen enerji ortama aktarılır. Bu durum ise yer değiştirme akımlarını oluşturmaktadır. Bir madde elektromanyetik enerji etkisinde olduğunda, mevcut enerjiyi depolama ve sonrasında da EM enerjisinin hareketi o maddenin bağlı dielektrik geçirgenliği (ϵ_r) ile tanımlanmaktadır (von Hippel, 1954).

Boşluğun sahip olduğu elektriksel geçirgenliğin bir maddenin sahip olduğu elektriksel geçirgenliği oranı ile bağlı dielektrik geçirgenlik hesaplanabilmektedir. Yapıların sahip oldukları dielektrik geçirgenlikler; nem içeriği, bileşimleri, gözeneklilik, fiziksel yapıları, sıcaklık ve hacim yoğunluğuna bağlıdır (Olhoeft, 1981).

Bir ortamın bağlı dielektrik geçirgenliği (2.11), o ortam boyunca bir V hızında seyahat eden yer radarı dalgaları ile hesaplanabilmektedir. Burada C ışık hızını göstermektedir ve yaklaşık olarak değeri $0,2998 \text{ m/ns}$ 'dir.

$$\sqrt{\epsilon_r} = \frac{c}{v} \quad (2.11)$$

Arazide bağlı dielektrik geçirgenlik katsayısının hesaplanması oldukça zordur. Bazı hız analizi teknikleri ile bu katsayının kestirimi yapılabilir. Sediman birimlere ait ortamlarda laboratuvar ölçümleri gerçekleştirilerek dielektrik geçirgenlik ölçülebilmektedir. Bazı materyeller için ifade edilen dielektrik geçirgenlik katsayıları Tablo 1.1 'de verilmektedir.

Mevcut ortamlar arasında dielektrik geçirgenlik farkının yüksek olması ve ortamın göreceli olarak dirençli olması yer radar yönteminde maksimum elektromanyetik enerji penetrasyonunu sağlamaktadır. Eğer ortamda nem ve su içeriği fazla ise bir zıtlık oluşmayacak ve elektromanyetik dalganın enerji penetrasyonu dirençli ortama göre

çok daha düşük olacaktır. Saha çalışmalarında ortamın iyi tanımlanması yer radar sinyalinin derine penetrasyonu için bilgi sağlaması olasıdır.

Tablo 2.1 Farklı ortamların sahip olduğu bağıl dielektrik geçirgenlik değerleri (Conyers ve Goodman, 1997)

Malzeme	ϵ_r	Malzeme	ϵ_r
Hava	1	Donmuş toprak	6
Kar	1,5	Islak kumtaşı	6
Kuru toprak	2,5	Islak granit	6,5
Kuru kil	4	Islak kireçtaşı	8
Kuru kum	4-6	Islak bazalt	8,5
Buz	4	Volkanik kül	13
Kömür	4,5	Islak kum	15-25
Asfalt	5	Islak kumlu toprak	23,5
Kuru granit	5	Doygun kum	25
Donmuş kum ve granit	5,5	Islak kil	27
Beton	5,5	Turba	61,5
Kuru kireçtaşı	5,5	Organik toprak	64
Donmuş kum ve çakıl	5,5	Tatlı su	80
Kuru kumlu toprak	6	Tuzlu su	81-88

2.4.4.2 Elektriksel İletkenlik

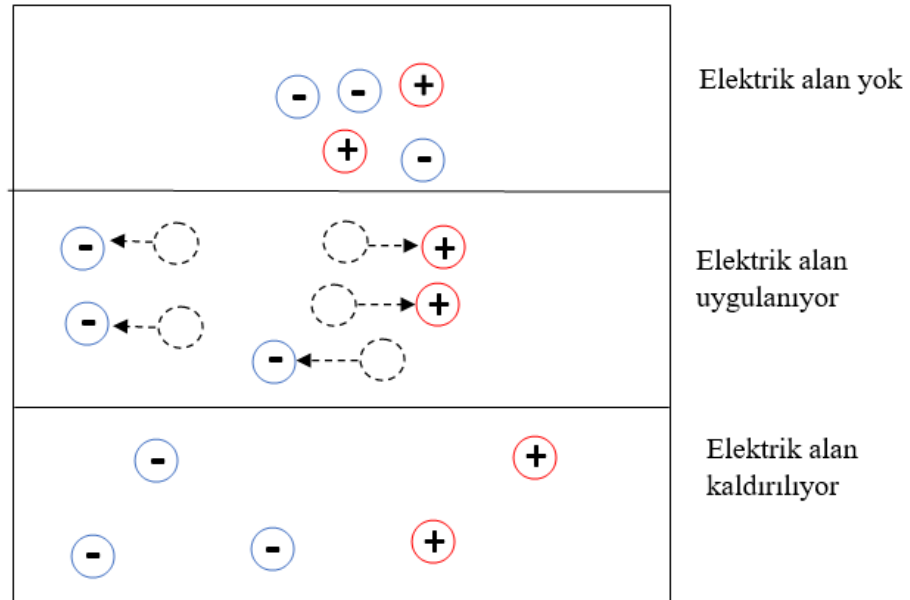
Elektrik yükleri bir ortamda bulunuyorlarsa o ortamda elektrik alan (E) mevcuttur. Ortama özgü olan ve iki farklı şekilde meydana gelen elektrik alan vektörel bir büyüklüktür. Bunlardan ilki bir maddeye bağlı yükler, ikincisi ise serbest yüklerdir. Bunlar iletim ve yer değiştirme akımları olarak isimlendirilen akım dolaşımına sebep olmaktadır.

2.4.4.2.a Akım Kavramı

Ortamların elektriksel iletkenlik sahibi olması demek serbest yani herhangi bir bağı bulunmayan elektrik yüklerinin olduğu ortamlardır. Bu yükler dışarıdan bir elektrik kuvvete maruz kaldıklarında aniden ivmelenmeye başlar ve bir tür maksimum hıza ulaşırlar. Yükler bu hıza ulaştığında ise mevcut ortamda bir akım akışı gerçekleşir. Bu

kuvvet devam ettikçe yüklerin hareketleri devam eder ve bu hareket esnasında aldıkları enerjiyi ısı enerjisine dönüştürerek transfer ederler. Isı enerjisi ise ortamdaki hareketsiz yükleri de harekete geçirir ve mekanik enerjiye dönüşür. Elektrik alan kalktığı anda ise bu yükler önce yavaşlar sonrasında durağan hale gelirler. Ancak önce ısı enerjisine sonra da mekanik enerjiye dönüşen elektrik enerjisi, geri dönülemez şekilde dönüşmektedir. Elektroların hareketli olduğu metal bir çubukta ise iletim akımlarına örnek olabilmektedir. Metaller cisimlerde, mevcut elektronların yüklerini bir noktadan bir noktaya iletmek için yapının metalik bağları içerisinde hareket etmektedirler. İyon hareketleri ise sulu çözeltide oluşan, yaygın bir iletim mekanizması olmakla birlikte genel olarak radar uygulamalarında en çok önem taşıyan iletim biçimidir (Annan, 2001). Şekil 2.4 'de akımları oluşturan elektrik yüklerin hareketleri gösterilmektedir.

İletim Akımları



Şekil 2.4 Elektrik alana maruz bırakıldığında serbest elektrik yüklerinin hareketinin gösterimi (Annan, 2001)

$$\bar{J} = \sigma \bar{E} \quad (2.12)$$

(2.12) eşitliği, elektrik alana uygulanan iletim akımları arasındaki bağlantıyı tanımlamaktadır. Bir elektrik alanlar oluştuğunda, akımın oluşması için serbest yüklerin hareketlerini tanımlamaktadır. Burada σ , elektrik iletkenliktir.

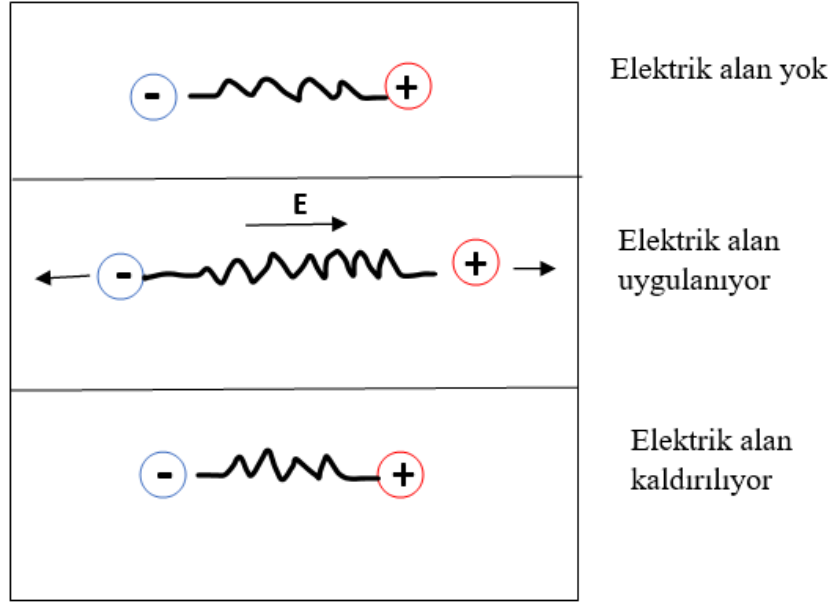
Matematiksel anlamda çözümlmeyi basitleştirmek için, bir ortamın elektriksel iletkenlik bakımından tek düze, frekans ve yönden bağımsız olduğu düşünülmektedir. Bundan dolayı, ortamda mevcut bulunan elektrik akımı ile elektrik alan arasındaki oran iletkenlik değerini vermektedir. Elektrik alanlardaki farklılık miktarı kadar basınç, sıcaklık ve diğer fiziksel ve geometrik etkenlerinde bir fonksiyonu olarak tanımlanabilen iletkenlik, GPR ölçümlerinden edinilen sonuçlarda genellikle ikincil derece öneme sahip olmaktadır.

Elektromanyetik enerji elektrik iletkenliğe sahip ortama nüfuz ettiğinde, elektromanyetik alana ait olan elektrik alanının bileşeninin bulunduğu ortam içerisinde mevcut olan manyetik alan bileşeninden koparak enerji dönüşümüne uğraması sebebi ile saçılarak çok hızlı bir biçimde sönmeye uğramaktadır. Sonuç olarak, enerjinin yitilmesi durumu mevcuttur ve buna benzer ortamlarda radar dalgalarının yol kat edemeyeceği anlamına gelmektedir. Bu sebeple, ulaşılacak en büyük enerji nüfuzunun olabilmesi amacı ile ortamın düşük elektriksel iletkenlik değerlerine ve yüksek dielektrik değerlerinde olması gerekmektedir.

2.4.4.2.b Yer Değiştirme Akımı

Malzemelerin yapılarında yer alan bağlı yüklerin dışarıdan maruz bırakılan bir elektrik alan etkisinde olarak hareket etmeye zorlanması sonucu yer değiştirme akımları oluşmaktadır. Atomun çekirdeğinin çevresinde bulunan elektron bulutu bağlı yüklere örnektir. Başlangıçta hareketsiz(durağan) halde bulunan bağlı yüklere elektrik alan uygulandığında, başka bir hareketsiz yere ilerlerler. Yer değiştirme hareketlerinin sonlanmasının akabinde, elektromanyetik enerji elektrik alandan ortama geçer ve ortamda depo edilmektedir. Maruz kalınan elektrik alan kalktığında, yük başlangıçta olduğu gibi denge haline dönmektedir ve bu süre zarfında depo edilen enerji ortama geri salınır (Şekil 2.5).

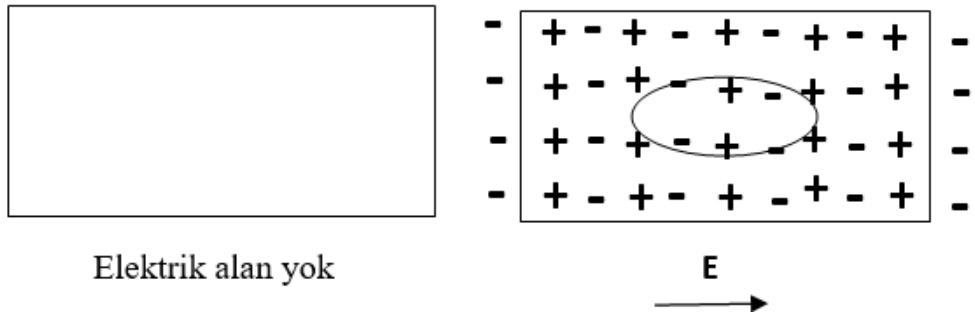
Yer Değiştirme Akımları



Şekil 2.5 Elektrik alana maruz bırakıldığında serbest elektrik yüklerin yer değiştirme hareketi (Annan, 2001)

Dışarıdan elektrik alan etkisi olduğunda, belli hacimde olan maddedeki yük hareketlenmesi, malzemede dipol moment dağılımına benzer bir dağılıma sebep olmaktadır (Şekil 2.6). Bağlı yük hareketleri (yer değiştirme akımları), bu dipol moment dağılımının oluşmasının ile ilgili olmaktadır.

Dipol Moment Yoğunluğu



Şekil 2.6 Elektrik dipol moment dağılımının elektrik alan etkisinde ortaya çıkan davranışı (Annan, 2001)

Yük dağılımı ise dipol moment yoğunluğu (D) ile tanımlanmaktadır. Elektrik yer değiştirme literatürde dipol moment dağılımı olarak da adlandırılmaktadır. Matematiksel olarak yer değiştirme akımı (J_D) dipol moment yoğunluğunun zamanla değişimini tanımlamaktadır.

$$J_D = \frac{\partial D}{\partial t} = \varepsilon \frac{\partial E}{\partial t} \quad (2.13)$$

(2.13) bağıntısı yer değiştirme akımıyla uygulanan elektrik alan arasındaki ilişkiyi ortaya koymaktadır. Çözümü basite indirmek adına, iletim akımlarında da olduğu gibi, mevcut ortamların yer değiştirme akımları bakımından izotrop (yönden bağımsız), homojen ve frekanstan bağımsız olduğu ifade edilmektedir.

2.4.4.3 Akım Dolaşımı Kavramı

Bir materyalde, iletim ve yer değiştirme akımlarının toplamı, bir elektrik alan uygulanması neticesine oluşan elektrik akımından oluşmaktadır. Ortamda bulunan maddelerin elektriksel özellikleriyle birlikte, toplam akım, elektrik alanda zamanla oluşan değişiminden ve elektrik alanın kendisinden oluşmaktadır. Bu kavram, sinusoidal biçimde zaman içerisinde değişmekte olan elektrik alanlar için (2.14) ve (2.15) bağıntılarıyla gösterilmektedir.

$$J = J_c + J_D \quad (2.14)$$

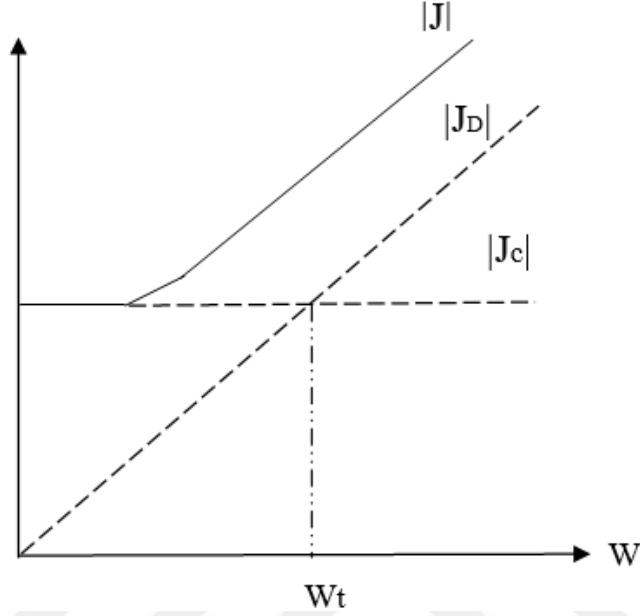
$$J = \sigma E + \varepsilon \frac{\partial E}{\partial t} \quad (2.15)$$

Yukarıdaki (2.14), (2.15) bağıntılarından, ω açısal frekansın yer değiştirme akımlarının açısal frekansıyla orantılı olduğu bulunmaktadır.

$$J = (\sigma + i\omega\varepsilon)E \quad (2.16)$$

İletim akımları ve yer değiştirme akımları arasındaki faz farkı 90° 'dir. Bu durumda yer değiştirme akımlarının sanal bileşeni etkilidir. Frekansa göre değişen toplam elektrik akımını gösteren basitleştirilmiş grafik Şekil 2.7'de verilmektedir. Yer radarı için tanımlanmış ve basit olarak ifade edildiği yerlerde, tüm fiziksel parametrelerin eşit olduğu geçiş frekansı (f_t) kavramı bulunmaktadır. Genel olarak, ortamların sahip olduğu yer değiştirme akımları, iletim akımlarını bir miktar aşma eğilimine sahip

olmaktadır. Yer değiştirme akımlarının baskın olduğu geçiş frekansı değeri üzerine çıkıldığında yer değiştirme akımları daha baskın olması ile birlikte, bu frekans değerinin altına inildiği durumlarda ise akım iletim biçiminde daha baskın olmaktadır.



şekil 2.7 Frekansla değişen toplam elektrik akımı (Annan, 2001)

Geçiş frekansı eğer açısal bir büyüklük olduğu düşünülürse, (2.17) eşitliğine ulaşılmaktadır.

$$\omega_t = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (2.17)$$

Geçiş frekansı ise yer radarı uygulamalarında düşük kayba sahip ortamların tanımlanmasında büyük önem arz etmektedir. Denklem (2.18), kaybın tanjantı şeklinde adlandırılmaktadır.

$$\tan \delta = \frac{|J_c|}{|J_d|} = \frac{\sigma}{\omega \varepsilon} \quad (2.18)$$

2.4.4.4. Bağıl Manyetik Geçirgenlik

Hareket halindeki bir elektriksel yük manyetik alan oluşturmaktadır (Von Hippel, 1954). Atomlarda bulunan elektronlar bir dönüş hareketi yapmaktadır ve bu, maddelerin içerisinde akım döngüleri meydana getirir. rnek olarak bir elektronun

atomik bir çekirdeğin etrafında hareketi gerçekleştiğinde, yükün hareketli olması bir manyetik moment yaratmaktadır (Annan, 2001).

Ortamda bulunan ve dönme eksenlerine sahip yönelme hareketine sahip olan ilgili parçacıklar, belirli bir düzende ya da rastgele sıralanabilmektedir ve parçacıkların etrafında bulunan manyetik kuvvet tarafından değiştirilebilmektedir. Ancak molekülün yapısı rastgele dönme (spin) hareketine müsaade etmez ve yapısal olarak kristal mimarisine ihtiyacı durumunda, madde mütemadi olarak mıknatıslanabilme özelliğine sahip olmaktadır.

Manyetik dipol moment yoğunluğu maddelerin manyetik özelliklerini ortaya koymaktadır. Dışarıdan maruz bırakıldığı bir manyetik alanın yöneliminden değişik bir biçimde hareket etme seviyesi ya da manyetik dipol momentlerinin dizilebilme seviyesinin ölçüsü atom ve moleküllerde manyetik geçirgenlik(μ) olarak tanımlanır.

Genel anlamda manyetik alan bu tür cevaplar zayıf kalmakla birlikte manyetik geçirgenliğin çok mühim farklılıklara neden olmamaktadır. Bu sebeple, yer radarı uygulamalarında, elektriksel özellikler manyetik özelliklere kıyasa daha fazla etkileri bulunmaktadır.

Herhangi elektrik akımı kapalı olan döngünün içinde hareketini gerçekleştirdiğinde manyetik momenti (2.19) bağıntısı ile gösterilmektedir.

$$\vec{M} = IA\hat{n} \quad (2.19)$$

Burada I elektrik akımını, $\vec{M}$ manyetik dipol momentini, A harfi ise akımın geçmiş olduğu telde kapladığı kapalı döngünün alanı ve $\hat{n}$ normal vektörü işaret etmektedir.

Hacimsel durumlarda, ortamda bulunan momentin yoğunluğu (2.20)'de ifade edildiği biçimde tanımlanmaktadır. Birimi A/m 'dir.

$$\vec{m} = \frac{\vec{M}}{V} \quad (2.20)$$

k boyuta sahip olmayan, boyutsuz, manyetik duyarlılığı işaret ediyorken, (H) ise manyetik alandan indüklenmiş olan manyetik momentin miktarı (2.21)'deki eşitlikte tanımlanmaktadır.

$$\bar{m} = k\bar{H} \quad (2.21)$$

İndüklenmiş elektrik dipolün momenti ile indüklenmiş manyetik moment arasında önemli bir benzerlik bulunmaktadır. Maddedeki manyetik akı;

$$\bar{B} = \mu_0(\bar{H} + \bar{M}) \quad (2.22)$$

olarak tanımlanmaktadır. Manyetik geçirgenlik ise (2.23) bağıntısıyla verilmektedir. Burada μ_0 boşluğun manyetik geçirgenliğini göstermektedir ve $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/M}$ ’dır.

$$\mu = \mu_0(1 + k) \quad (2.23)$$

Manyetik geçirgenlik (K_m) parametresi (2.24) eşitliği ile aşağıda tanımlanmıştır.

$$K_m = \frac{\mu}{\mu_0} = (1 + k) \quad (2.24)$$

Bir manyetik alana ait olan manyetik dipol momenti, etkisinde bulunduğu manyetik alanın yönünde dizilmek ve dizilimi farklılaştırmak için indüklemektedir. Bazı materyallerde dizilime maruz bırakılmış olan alan ile benzer yönde olmasına karşın, diğer materyallerde dizilime maruz bırakılan manyetik alana paralel olmayacak bir biçimde gerçekleşmektedir. Bu iki hareket sıra ile, *paramanyetizma* ve *diamanyetizma* olarak adlandırılmaktadır.

Uygulanan alan ile kristal bir yapıyı ifade eden domenlerin sahip olduğu moment aynı doğrultuda bulunmakta olan kristal yapısına sahip moleküller ile değişebilmektedir ve bir domenler arası hareket etmektedirler. Bu çeşit maddeler ise *ferromanyetik maddeler* olarak adlandırılmaktadır. Ferromanyetik maddelerde, bağlı manyetik geçirgenlik değerleri çok yüksek olabilmekte ve kutuplanma çok büyük olabilmektedir. Kalıcı olarak sıralanabilen ferromanyetik maddelerdeki manyetik dipol momentleri böylesi mıknatıslanmada kalıcı mıknatıslanma olarak ifade edilmektedirler. Manyetik geçirgenlik bu çeşit ortamlarda epeyce yüksek olmakta ve maddeye ait olan dinamik hareketi karışık olmaktadır. Böylesi maddeler nadiren kayaçların içerisinde ya da toprak içerisinde yüksek oranlarda mevcut bulunabilmesine karşın, bunların ortamdaki az miktarda bulunmaları durumunda dahi büyük bir etkisi olmaktadır (Annan, 2001).

Yoğun olan manyetik momentinin göstermiş olduğu davranış fazla karışabilmekte ve domenlerin hareketi ve gelişebilmesi, alan, sıcaklık ve ile kontrol edilebilmektedir. Farklı kayaç ve toprak ortamlarında, manyetik özellikli maghemit, ilmanit ve magnetit gibi manyetik kuvvetce yüksek mineral miktarıyla belirlenebilmektedir. Mevcut ortamdaki manyetik minarellerin hacimsel artışı manyetik duyarlılığı arttırmaktadır. Bu değerin yaklaşık olarak hesaplanabilmesi adına ampirik bağıntı geliştirilmiştir. Burada θ maddenin içerisinde bulunan ve manyetik özelliğe sahip olan minerale ait hacimsel miktarı göstermektedir.

$$k = 3.8 \theta \quad (2.25)$$

2.4.5 EM Kutuplanma ve Empedans

Önceki bölümlerde de anlatıldığı üzere, elektromanyetik alanı oluşturan manyetik ve elektrik alanlar birbirlerine dik olacak şekilde oluşmakta ve her iki alana da dik yönde bulunan doğrultuda hareketlerini gerçekleştirmektedirler. Oluşacak olan manyetik alanın genliği, uygulanan elektrik alanın genliği ile doğrudan ilişkilidir. Bu kavram EM empedans parametresi ile açıklanmaktadır. EM empedans (Z),

$$Z = \frac{E}{H} \quad (2.26)$$

ile verilmektedir. Formülde, dalga denklemlerinin kullanımının ilerlemesi ile (2.26) bağıntısı bulunmaktadır. EM dalga denklemlerinin çözümlemelerinde manyetik ve elektrik alanların bağıl genliklerinin ortamın sahip olduğu özellikleri tarafından belirlendiği (2.27) bağıntısıyla ifade edilmektedir.

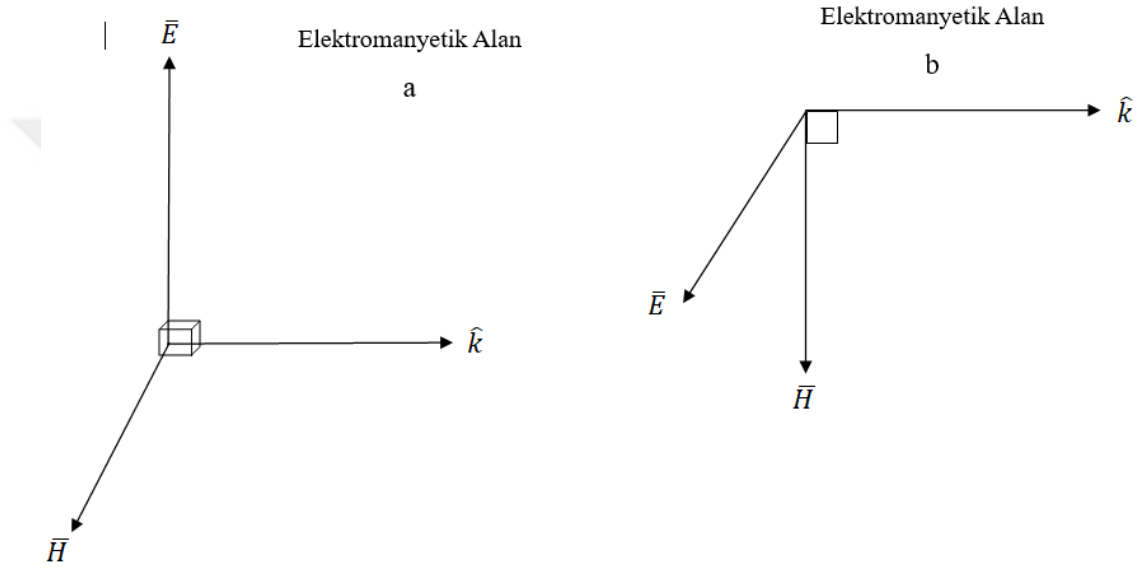
$$Z = \mu v = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad (2.27)$$

Ortamdaki elektromanyetik dalga yayınının sinusoidal dalga şeklinde düşünülmesi, EM dalgalarının yol katettiği ortamlarda iletkenlik özelliklerinin önem arz ettiği durumlarda çözümü kolaylaştırmaktadır. Düşük kayıplı ortamlar için ise elektromanyetik empedans olgusu (2.28),(2.29) bağıntıları ile açıklanmaktadır.

$$Z = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon + i\frac{\sigma}{\omega}}} \quad (2.28)$$

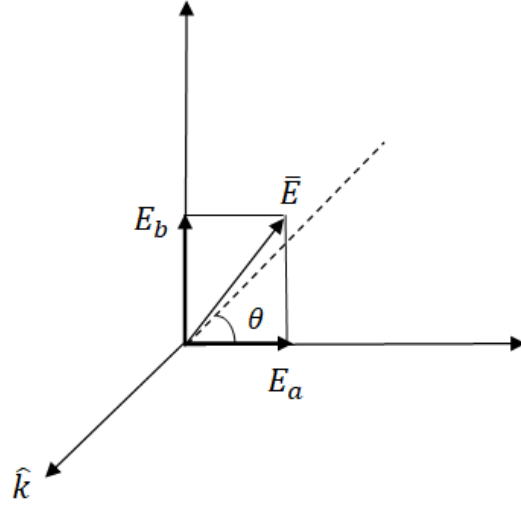
$$Z = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \left(1 - i \frac{\sigma}{2\omega\varepsilon}\right) \quad (2.29)$$

Elektromanyetik alanlar manyetik ve elektrik alan vektörlerinin yer değiştirme yönüne ve dik birbirlerine dik olmasından dolayı, belirlenen yayının doğrultusu için iki tane bağımsız EM alan oluşabilmektedir. Sözü edilen kavram Şekil 2.8’de açıklamaktadır.



Şekil 2.8 Yayının doğrultusuna göre a ve b olarak oluşan EM alan (Annan, 2001)

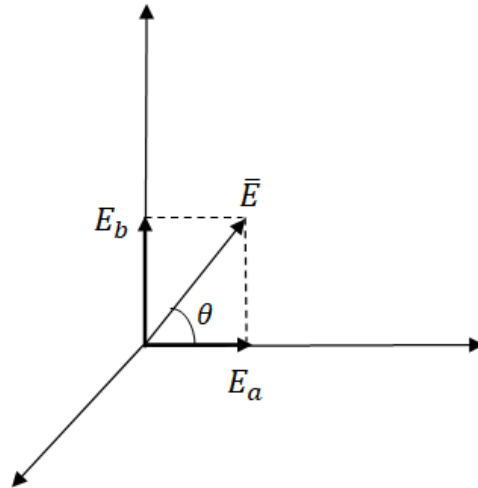
Buradan, EM alanların çözümlenmesi elektrik alan yöneyinin doğrultusu ile belirlenmektedir. $\hat{k}$ ’ya dik olan bir düzlemde gösterilmektedir Şekil (2.9). Dairesel, doğrusal ve eliptik kutuplama kavramları, alanların zamanla değişimi sinusoidal olduğunda ortaya çıkmaktadır. Elektrik alan vektörü (2.30) bağıntısıyla açıklanmıştır.



Şekil 2.9 Elektrik alan ve bileşenleri (Annan, 2001)

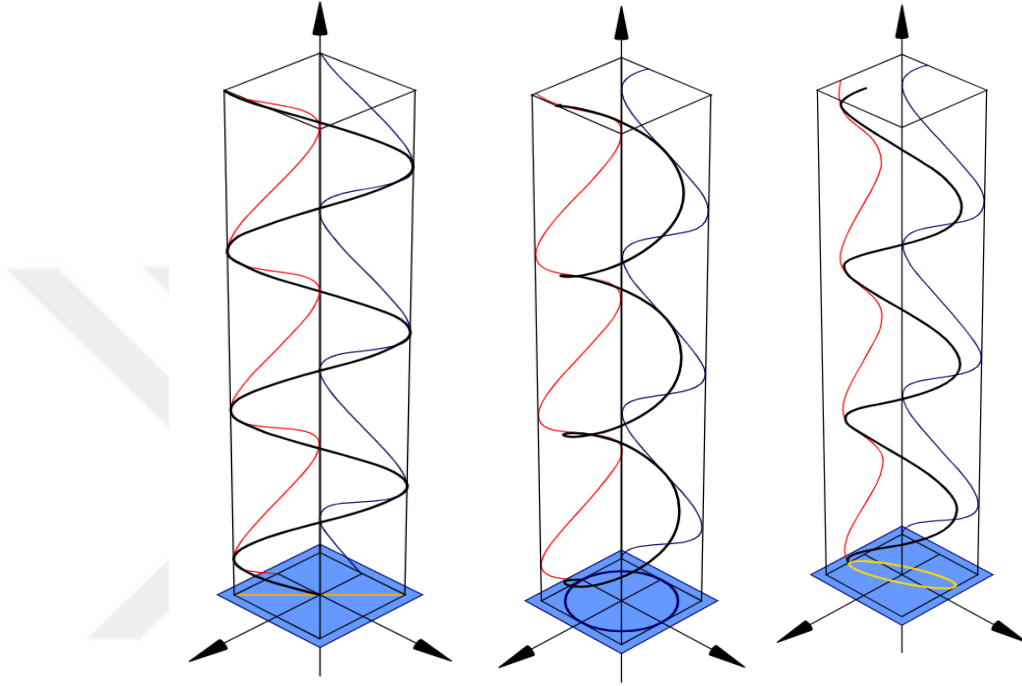
$$\bar{E} = E_a e^{i\phi_a} e^{i\omega t} \hat{a} + E_b e^{i\phi_b} e^{i\omega t} \hat{b} \quad (2.30)$$

E_a ve E_b E-alan bileşenleridir ve skalerdir. ϕ_a ve ϕ_b birbirlerine ortogonal ve $\hat{a}$ ile $\hat{b}$ yöneylerine göre E-alanın bileşenlerini ve faz açılarını tanımlamaktadır. E-alanın doğrusal kutuplanması, $\phi_a = \phi_b$ koşuluyla olmaktadır. Elektrik alan vektörü sabit yönlü olmaktadır. Elektrik alan genliği ise Şekil 2.10 'de gösterilmektedir.



Şekil 2.10 Elektrik alan bileşenlerinin aynı faza sahip olması durumu

Eliptik kutuplanmada, alan ve genlik doğrultusu zamanla değişen bir elips biçiminde oluşmaktadır (Şekil 2.11). Alan vektörleri genel olarak doğada sinusoidal şekillerde kısa süreli olarak ilerleyebilmektedir. Hareket nispeten dağınık bir biçimde olmaktadır. Bu sebeple, geçici(transient) alanlar için doğrusal, dairesel ve eliptik kutuplaşma geçerli olmaktadır.



Şekil 2.11 Elektromanyetik alanların eliptik, dairesel ve doğrusal biçimde kutuplanması (Annan, 2001)

2.4.6 EM Dalgalar ve Özellikleri

Sönümlenme (α), faz hızı (v) ve elektromanyetik empedans (Z) EM dalgalarının yer içerisine doğru hareketlerini tanımlayabilmek için en önemli parametrelerdir. Basit ortamlar elektromanyetik teoride, sabit dielektrik geçirgenlik, manyetik geçirgenlik ve elektriksel iletkenliğe sahip olan ortamlarda dalga özelliklerinin tümü benzer davranış göstermekte ve frekanslarına bağlı olarak değişmektedirler. Tüm dalga özellikleri düşük frekanslarda açısal frekansa ($\sqrt{\omega}$) bağlı olmaktadır. Eğer ϵ, μ, σ yüksek frekanslarda sabit ise, dalga özellikleri frekanstan bağımsız olmaktadır. Yer radarının en karakteristik özelliği yüksek frekanslarda elektromanyetik dalgaların bu davranışdır.

Elektromanyetik alanlar, düşük frekanslarda ortamın içine yayılmakta ve elektromanyetik dalga enerjisi kendi enerjisini ortama ısı olarak aktarmaktadır. Ortamda bulunan bir sinyale ait frekans bileşenleri farklı oranlarda sönümlenmektedir ve farklılığa uğrayan faz hızları seyahat sürelerinin değişmesi sebebiyle saçılmaya başlarlar. Mevcut ortamdaki EM empedans, faz hızı ve sönümlenme matematiksel olarak (2.31), (2.32) ve (2.33) bağıntıları ile tanımlanmaktadır.

$$v = \sqrt{\frac{2\omega}{\mu\sigma}} \quad (2.31)$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}} \quad (2.32)$$

$$Z = (1 + i) \sqrt{\frac{\omega\mu}{2\sigma}} \quad (2.33)$$

Elektromanyetik alanlar yüksek frekanslarda, ortam içerisine doğru dalgalar biçiminde yayılmaktadırlar. Bütün frekans bileşenlerinin aynı hızlara sahip olması ise aynı sönümlenmeden etkilenmeleri anlamına gelmektedir. Bir dürtü sinyali bozulmadan hareket edecektir. Bu durumda ise EM dalga saçılmaya uğramadan yayınma gerçekleşmektedir (Annan, 1996). Frekansı yüksek olan EM dalgalar, ortamda elektromanyetik empedans, sönümlenme ile hız değerleri (2.34), (2.35) ve (2.36) bağıntılarıyla bulunabilmektedir. Burada (2.37) bağıntısıyla verilen Z_0 boşluğun empedansıdır ve mevcut ortamın manyetik özellikleri ihmal edilmektedir.

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}} = \frac{c}{\sqrt{K}} \quad (2.34)$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \frac{\sigma}{2} = Z_0 \frac{\sigma}{2\sqrt{K}} \quad (2.35)$$

$$Z = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} = \frac{Z_0}{\sqrt{K}} \quad (2.36)$$

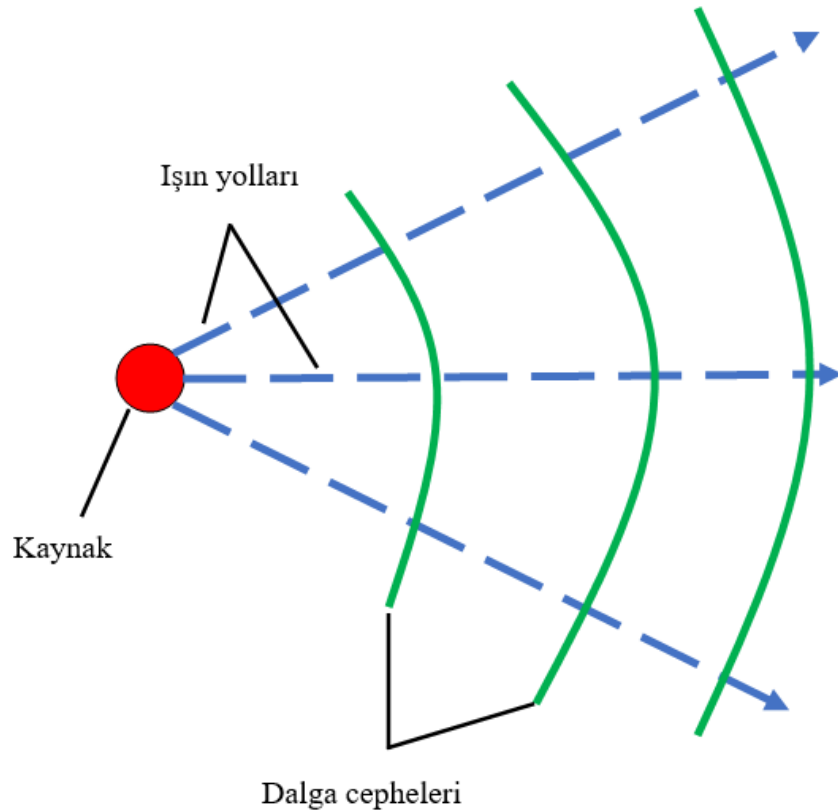
$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 377 \text{ ohms} \quad (2.37)$$

Yer içerisinde farklı elektrik iletkenliğe sahip ortamlara yayılan elektromanyetik dalgalar, elektrik akımları iletme durumundan yer değiştirme durumuna

geçebilmektedir. Sözü edilen durumda ise EM dalgaların yayılım durumundaki geçişi ortaya çıkmaktadır. Ortam içerisindeki bulunan geçiş frekansı ise (2.38) bağıntısıyla tanımlanmaktadır.

$$f = \frac{\sigma}{2\pi\epsilon} \quad (2.38)$$

Elektromanyetik dalganın yayılımı dalga cepheleri ve ışın yolları ile temelde karakterize olabilmektedir. Şekil 3.2 bu iki kavramda örnek olmaktadır. Aynı fazda bulunan bütün sinyaller benzer fazda olduğunu uzamsal yüzeyi bir dalga cephesi gösteriyorken, geçici sinyal süresini ya da ışın yolu dalga boyunun bir ifadesi olmaktadır. Dalga cephesini herhangi bir kaynaktan yola çıkan geçici bir sinyal için uzamsal yüzeyin eş seyahat süresi belirlemektedir.



Şekil 2.12 Elektromanyetik dalga cepheleri ve bunun ışınsal gösterimi (Annan,2001)

Dalga cephesi ve ortam içerisindeki manyetik ve elektrik alanlar, ışın yollarına dik bir konumda bulunmaktadır. Geçici sinyal süresini ya da dalga boyunun kısa olması,

ışın yolları için en ideal durum olmaktadır. Elektromanyetik bir dalganın ortam içerisindeki yayılımı esnasında ortamın koşulları önem arz etmekle birlikte, dalganın nitelikleri de önem taşımaktadır. Bu sebeple, çözümün olası olması için elektromanyetik dalga yayılımının doğasının iyi kavranması gerekmektedir. Kavramsal olarak, ışınlar olarak davranan elektromanyetik alanlar ışın tarafından tanımlanan yol boyunca seyahat etmektedir.

2.5 Radar Yönteminin Temel İlkeleri

Radar yönteminin temeli EM teori ile açıklanmaktadır. Ortamın fiziksel özellikleri ile ilişkili ve yayılmakta olan EM alanlar, geçmişleri iki yüzyıldan daha da fazla süreden beri gelmekte ve Smythe (1989) ile Jackson (1962)'nin çalışmalarına benzeyen çalışmalar yapan araştırmacıların araştırma konusu olmaktadır.

Radar dalgalarının anlaşılması açısından EM alanlar ile materyalin fiziksel özellikleriyle ilişkilendirebilmesi önemli olmakta, esas önceki bölümlerde anlatılan Maxwell denklemlerine dayandırılmaktadır. Bu eşitlikler; maddenin fiziksel özellikleri ile EM alanları ilişkilendirmektedir ve bu alanların sahip olduğu fiziki matematiksel olarak tanımlanmaktadır.

2.5.1 Katkı Eşitlikleri

İzotropik ve homojen ortamda bulunan alanların arasında bulunan ilişkiyi katkı eşitlikleri tanımlamaktadır. EM alanı uygulamalarında elektronun, atomun ve moleküler tepkinin nasıl tanımlandığını (2.39), (2.40) ve (2.41) bağıntılarıyla açıklanmaktadır.

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (2.39)$$

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (2.40)$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (2.41)$$

$\vec{H}$ Manyetik Alan (A/m)

$\vec{E}$ Elektrik Alan (mV/v)

$\vec{B}$ Manyetik Akı Yoğunluğu ($Weber/m^2 = Tesla$)

$\vec{J}$ Elektrik Akımının Yoğunluğu (A/m^2)

$\vec{D}$ Yerdeğiştirme Akımları ($Coloumb/m^2$)

$\vec{q}$ Hacim Başına Düşen Birim Yük Yoğunluk (A/m^2)

μ Manyetik Geçirgenlik ($Henry/m$)

ε Dielektrik Sabit ($Farad/m$)

σ Elektriksel İletkenlik ($Siemens/m$)

Serbest uzaydaki dielektrik sabiti ve manyetik geçirgenliğin değerleri; $\varepsilon_0; 8,854 \times 10^{-12} Farad/m, \mu_0; 4\pi \times 10^{-7} Henry/m$ 'dir.

Bütün uygulanabilir yer radarı uygulamaları için, ε, μ ve σ nicelikleri, tensör olup doğrusal olamayabilmektedirler.

2.5.2 Zaman ortamında EM Dalga Denklemleri

Manyetik ve elektrik alana ait dalga denklemlerini zaman ortamında bulabilmek için katkı eşitlikleri ve maxwell eşitliklerinin birlikte kullanılması gerekmektedir.

2.5.2.1 Elektrik alan dalga denklemi

(2.42) denklemine sıra ile (2.43)-(2.44) denklemleri yerleştirilerek aşağıdaki (2.45) elektrik alan denklemi;

$$\nabla \times \vec{E} = -\left(\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}\right) \xrightarrow{\vec{B}=\mu\vec{H}} \nabla \times \vec{E} = -\left(\frac{\partial \mu\vec{H}}{\partial t}\right) \xrightarrow{\mu \rightarrow sbt} \nabla \times \vec{E} = -\mu\left(\frac{\partial \vec{H}}{\partial t}\right) \quad (2.42)$$

Bu denklemde her iki tarafında rotasyoneli alındığında;

$$\nabla \times \nabla \times \vec{E} = -\mu\left(\frac{\partial(\nabla \times \vec{H})}{\partial t}\right) \xrightarrow{\nabla \times \vec{H}=\vec{J}(\frac{\partial \vec{D}}{\partial t})} \nabla \times \nabla \times \vec{E} = -\mu\left(\frac{\partial(\vec{J}+(\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}))}{\partial t}\right) \xrightarrow{\vec{J}=\sigma\vec{E}} \nabla \times \nabla \times \vec{E} = -\mu\left(\frac{\partial(\sigma\vec{E}+(\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}))}{\partial t}\right) \xrightarrow{\vec{D}=\varepsilon\vec{E}} \quad (2.43)$$

$$\begin{aligned}\nabla \times \nabla \times \vec{E} &= -\mu \left(\frac{\partial \left(\sigma \vec{E} + \left(\frac{\partial \varepsilon \vec{E}}{\partial t} \right) \right)}{\partial t} \right) \xrightarrow{\sigma \text{ ve } \varepsilon \rightarrow s b t} \nabla \times \nabla \times \vec{E} \\ &= -\mu \sigma \left(\frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right) - \mu \varepsilon \left(\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \right)\end{aligned}\quad (2.44)$$

ve

$$\nabla \times \nabla \times A = \nabla(\nabla A) - \nabla^2 A \quad (2.45)$$

(2.46) bağıntısının özelliği kullanılarak, elektrik alanın zaman ortamındaki dalga denklemi aşağıdaki gibi elde edilmektedir (Sadiku, 1992).

$$\nabla^2 \vec{E} = \mu \sigma \left(\frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right) + \mu \varepsilon \left(\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \right) \quad (2.46)$$

2.5.2.2 Manyetik alan dalga denklemi

(2.47) eşitliği için yapılan işlemler (2.48) manyetik alan eşitliği içinde yapılmaktadır. Buna göre;

$$\nabla \times \vec{H} = J + \left(\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) \xrightarrow{\vec{D} = \varepsilon \vec{E}} \nabla \times \vec{H} = \sigma \vec{E} + \left(\frac{\partial \varepsilon \vec{E}}{\partial t} \right) \xrightarrow{\varepsilon \text{ s b t}} \nabla \times \vec{H} = \sigma \vec{E} + \varepsilon \left(\frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right) \quad (2.47)$$

Bu denklemde her iki tarafında rotasyoneli alındığında;

$$\begin{aligned}\nabla \times \nabla \times \vec{H} &= \sigma \left(\frac{-\partial(\mu \vec{H})}{\partial t} \right) + \varepsilon \left(\frac{\partial \left(\frac{-\partial(\mu \vec{H})}{\partial t} \right)}{\partial t} \right) \xrightarrow{\mu \text{ s b t}} \nabla \times \nabla \times \vec{H} = \\ &\sigma \mu \left(\frac{-\partial \vec{H}}{\partial t} \right) + \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \left(-\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \right)\end{aligned}\quad (2.48)$$

$$\nabla \times \nabla \times \vec{H} = \sigma \mu \left(\frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \right) + \frac{\varepsilon \mu \sigma}{\partial t} \left(-\frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \right) \quad (2.49)$$

(2.49) bağıntısı ile zaman ortamındaki manyetik alanın dalga denklemi aşağıdaki eşitlik ile gösterilebilmektedir (Kurt, 2009).

$$\nabla^2 \vec{H} = \mu \sigma \left(\frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \right) + \mu \varepsilon \left(\frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} \right) \quad (2.50)$$

Elektrik alanın dalga denklemi, yüksek frekanslara ait elde edilen elektrik alan denklemi;

$$\nabla^2 \vec{E} = \mu\epsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \quad (2.51)$$

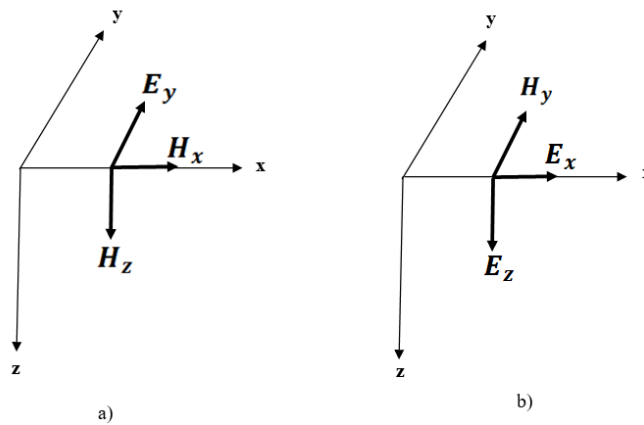
ve manyetik alan denklemi;

$$\nabla^2 \vec{H} = \mu\epsilon \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} \quad (2.52)$$

olarak yazılmaktadır. Yüksek frekanslarda bu denklemlerin yaklaşık 100 kHz'i aştığı durumlarda kullanılan denklemlerdir (Kaplanvural, 2011).

2.5.2.3 TM ve TE Ölçüm Biçimleri için Manyetik ve Elektrik alan eşitlikleri

Elektromanyetik dalganın yayılım doğrultusuna bağlı olarak TM ve TE modlarına ayrılarak detaylı bir şekilde incelenmek durumundadır. Birbirinden bağımsız iki farklı elektromanyetik alan düzlemsel tabaka sınırlarında bulunmaktadır. Tabaka düzleminde manyetik alan vektörü olduğu durumlarda TM modu, tabaka düzleminde elektrik alan vektörü bulunması durumunda ise TE modu söz konusu olmaktadır (Balkaya, 2010). TM modu birbirine dik bulunan iki elektrik alan bileşeni ve bu iki alana dik olan manyetik alan bileşenini bulundurmaktadır. TE modu ise birbirine dik bulunan iki manyetik alan bileşeni ve bu iki alana dik olarak bulunan elektrik alan bileşenini bulundurmaktadır.



Şekil 2.13 a) TM modu ve b) TE modu için EM alan bileşenleri

2.5.2.3.a TM modu eşitlikleri

TM modu, z ve x yönünde zamanla değişen manyetik alan ve manyetik alana bağımlı oluşan elektrik alan vardır (Şekil 2.12). Y yönündeki manyetik alan bileşeni ve x ve z yönündeki elektrik alan bileşenleri sıfır kabul edilmektedir. Bu duruma göre;

$$H_z \neq H_x \neq E_y \neq 0 \quad (2.53)$$

$$H_y = E_x = E_z = 0 \quad (2.54)$$

olarak ifade edilmektedir (Irving ve Knight, 2006). TM modu için alan denklemleri ise;

$$\frac{\partial E_y}{\partial x} = \mu \frac{\partial H_z}{\partial t} \quad (2.55)$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial z} = -\mu \frac{\partial H_x}{\partial t} \quad (2.56)$$

ve manyetik alan denklemleri (2.57)' de görüldüğü şekilde yazılır;

$$\sigma E_y + \varepsilon \frac{\partial E_y}{\partial t} = \frac{\partial H_z}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial z} \quad (2.57)$$

2.5.2.3.b TE modu eşitlikleri

TE modu, z ve x yönünde zamanla değişmekte olan elektrik alan ve elektrik alana bağlı olarak değişen manyetik alan bulunmaktadır (Şekil 2.12). Y doğrultusundaki elektrik alan bileşeni ile x ve z doğrultusundaki manyetik alanın bileşenleri sıfır olarak kabul edilmektedir. Bu duruma göre;

$$H_y \neq E_x \neq E_z \neq 0 \quad (2.58)$$

$$H_z = H_x = E_y = 0 \quad (2.59)$$

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

$$\frac{\partial H_y}{\partial x} = -\varepsilon \frac{\partial E_z}{\partial t} - \sigma E_z \quad (2.60)$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial x} = \varepsilon \frac{\partial E_x}{\partial t} + \sigma E_x \quad (2.61)$$

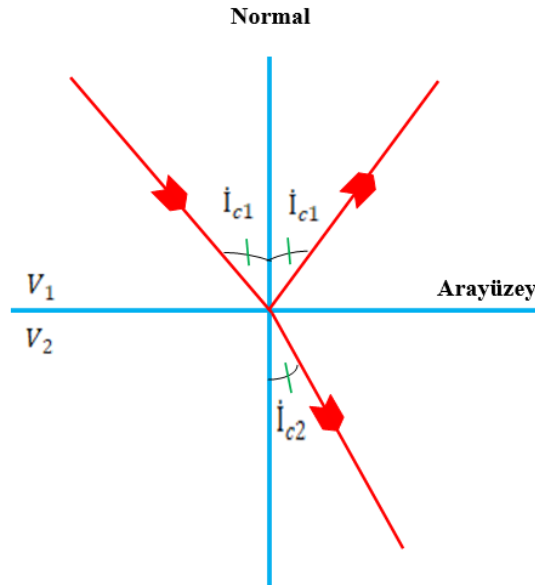
$$\mu \frac{\partial H_y}{\partial t} = \frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x} \quad (2.62)$$

olarak yazılmaktadır.

2.5.3 Radar İmlerinin Yer İçinde İletim, Kırılması ve Yansıması

Tıpkı sismik yöntemde olduğu gibi, yer radarı yönteminin temelleri, yeraltına iletilen darbe biçiminde elektromanyetik EM sinyallerin bir bölümünün yeraltındaki farklı arayüzlerden yansımasına dayanmaktadır. Elektromanyetik enerji olan yer radarı enerjisi ortamdaki arayüzlerin dielektrik farklılıklarına göre oluşmaktadır. Snell kanunu, elektromanyetik dalgaların herhangi bir arayüzde davranışını açıklamaktadır. Dalga ortamların ayrıldığı bir sınırdan geçtiği zaman ortaya kırılan ve yansıyan dalgaların çıkması Snell kanunu ile açıklanmaktadır. Kırılan ve yansıyan ışınların normalle olan doğrultularını gösterir (2.63) ancak yansıyan ve kırılan ışınların genliği konusunda bilgi vermemektedir.

$$\frac{\sin i_{c1}}{V_1} = \frac{\sin i_{c2}}{V_2} \quad (2.63)$$



Şekil 2.14 Elektromanyetik dalganın yer içresinde bulunan ara yüzeylerdeki davranışı (Annan, 2005)

GPR uygulamalarında, yeryüzündeki alıcıya ilk gelen dalgalar doğrudan gelen hava dalgasıdır. Işık hızına çok yakın bir hıza sahip olan radar dalgaları hava ortamında hareket ettiklerinde ilk ulaşmaktadırlar. Seyahat süresi kolayca hesaplanabilen doğrudan gelen hava dalgası oranla sabit bir değere sahiptir. Sözü edilen dalgaların varış zamanları veri işlem tekniklerinde statik düzeltmede kullanılmaktadır. Doğrudan gelen yer dalgası ise hava dalgasından sonra gelen ilk dalgadır. Yeraltının en üst yüzeyi boyunca bu radar dalgaları seyahat ederler. Sonrasında gelen dalgalar ise dielektrik arayüzlerden geri gelen yansımalar olmaktadır. Yüzeye yakın olan arayüzlerden gelen radar dalgaları, derinde bulunan arayüzlerden gelen radar dalgalarından daha önce alıcıya ulaşmaktadırlar.

Radar dalgaları yansydıkları gibi kırılabilirler ancak bunlar 2-boyutlu radargramlarda epeyce karmaşık görüntü oluşturmaktadırlar ve henüz ayrıntılı olarak analiz edilememektedirler.

2-Boyutlu yer radarı kesitlerinde geri dönüşlerin varış zamanları ve şiddetleri, dalgaların yayılma hızları ve sinyalin sönümlenme oranından etkilenmektedirler. İletim ve yansıma katsayılarıyla elektromanyetik dalgaların genliklerinin herhangi bir arayüzde ne şekilde değiştiği açıklanabilmektedir. Yer radarı sinyali tabakalı bir ortamda, verici anten ile gönderilmekte ve bu sinyal yeraltında bulunan farklı dielektrik özellikteki ortamlara ulaşınca kadar ilerlemektedir. Bu sınırda ise dalganın bir bölümü geliş açısıyla aynı açıda yansırken, kalan enerji başka ortamlara iletilmektedir. İletilen sinyalin genliği azalmaktadır ancak iletilen sinyal daha derinlerde uygun olan arayüzlerden yansıma olasılığına da sahip olmaktadır. İki farklı özelliğe sahip ortamların bağıl dielektrik geçirgenlik değerlerinin arasındaki farkla yansıyan enerjinin miktarı orantılı bulunmaktadır. Yeraltında bulunan ortamların bağıl dielektrik geçirgenlikleri az miktarlarda değiştiğinde ise yansıtma özelliklerinde küçük farklılıklar oluşacak ve bu esnada yalnızca zayıf yansımalar oluşacaktır. Bağıl dielektrik değerlerindeki zıtlık miktarının artması ise oluşacak olan yansımaların genliğinin artmasına sebep olacaktır.

Yansıma ve iletim katsayıları, daha önce anlatıldığı gibi, ortamın dielektrik özelliğine bağlı olarak değişmektedir ve elektromanyetik dalganın genliğinin herhangi bir arayüzde nasıl değiştiğini açıklamaktadır. Yansıyan dalga genliğinin gelen

dalganın genliğine oranı yansımaya katsayısını vermektedir. İletilen dalganın genliğinin gelen dalganın genliğine oranı ise iletim katsayısını vermektedir.

Ara yüzeyin altında ve üstünde bulunan zeminin dielektrik sabiti kullanılarak bu iki katsayı hesaplanabilmektedir (Wilchek, 2000). Aynı anda EM dalganın doğasına detaylı bir şekilde bakıldığında yayılım yönünde birbirlerinden bağımsız olarak bulunan iki ayrı bileşen bulunmaktadır (Annan, 2005).

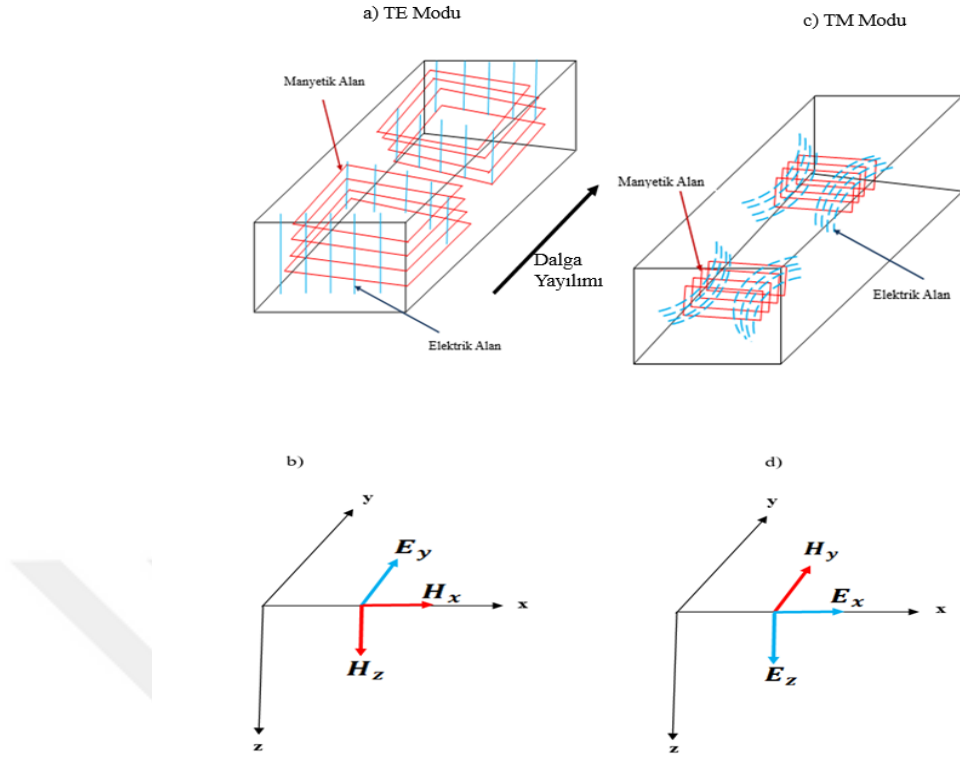
ϵ_{r1} ilk ortama ait geçirgenlik, ϵ_{r2} ise ikinci ortama ait dielektrik geçirgenlik değerini ifade ettiğinde, yansımaya iletim katsayısı (R: Yansımaya katsayıları, T: İletim katsayıları);

$$R = \frac{\sqrt{\epsilon_{r1}} - \sqrt{\epsilon_{r2}}}{\sqrt{\epsilon_{r1}} + \sqrt{\epsilon_{r2}}} \quad (2.64)$$

$$T = \frac{2\sqrt{\epsilon_{r2}}}{\sqrt{\epsilon_{r1}} + \sqrt{\epsilon_{r2}}} \quad (2.65)$$

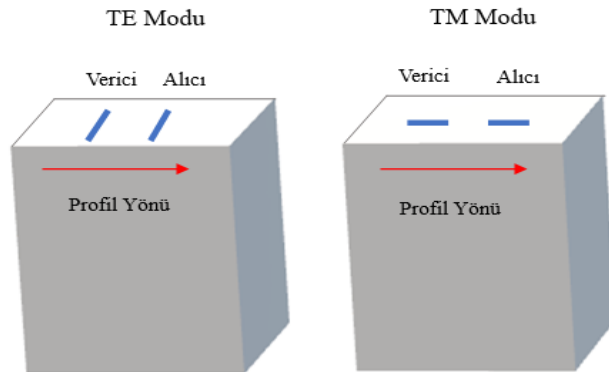
bağıntılarıyla ifade edilmektedir. Enine dalga alanları olan EM dalgalar düzlemsel bir sınır ile karşılaştıklarında, karşılaşılan arayüzeye göre yönelime sahip iki bileşene ayrılmaktadır. Sözü edilen dalga modlarında ise TM ve TE olarak adlandırılmaktadırlar. TM modunda manyetik alan bileşeni ara yüzeye paralelken TE modunda ise elektrik alan bileşeni ara yüzeye paraleldir.

Manyetik alanın TM modunda yayılma doğrultusunda herhangi bir bileşeni yoktur ve yayılım doğrultusuna diktir (Şekil 2.14). Elektrik alana ait bileşenler her doğrultuda bulunabilmektedirler çünkü bu alanın boyuna olan bileşeni, ortamda bulunan bütün sınırlarına teğet olmaktadır. TE modunda bulunan bir elektrik alan, TM modunun aksine, yayılım yönüne dik olarak bulunmaktadır. Manyetik alana ait bileşenler tüm yönlerde olmaktadır (Guru ve Hızıroğlu, 2004) (Şekil 2.15a).



Şekil 2.15 (a) TE modunun ve (d) alana ait bileşenler (c) TM modunun gösterimi ve (b) ona ait olan alan bileşenleri (Balkaya, 2010)

TE ve TM modları olarak ikiye ayrılarak incelenen elektromanyetik dalganın alanı, anten geometrisi ile ilişkili olmaktadır. Eğer verici ve alıcı antenlerinin yönü profil yönü ile aynıysa TM modunda profile dik bulunması TE modundan bahsedilmektedir (Şekil 2.15).



Şekil 2.16 Anten konumları dikkate alındığında TM ve TE modların gösterimi (van der Kruk, Streich ve Green, 2006)

TM ve TE bileşenlerinin ayrılmış olan elektromanyetik alanın kırılma ve yansımaya katsayıları TE modu özelinde;

$$T = \frac{E_r}{E_i} = \frac{Z_2 \cos \vartheta_i - Z_1 \cos \vartheta_t}{Z_2 \cos \vartheta_i + Z_1 \cos \vartheta_t} \quad (2.67)$$

$$R = \frac{E_t}{E_i} = \frac{2Z_2 \cos \vartheta_i}{Z_2 \cos \vartheta_i + Z_1 \cos \vartheta_t} \quad (2.68)$$

$$1 + T = R$$

TM modu için;

$$T = \frac{E_r}{E_i} = \frac{Z_2 \cos \vartheta_t - Z_1 \cos \vartheta_i}{Z_2 \cos \vartheta_t + Z_1 \cos \vartheta_i} \quad (2.69)$$

$$R = \frac{E_t}{E_i} = \frac{2Z_2 \cos \vartheta_i}{Z_2 \cos \vartheta_i + Z_1 \cos \vartheta_i} \quad (2.70)$$

$$1 + T = R \frac{\cos \vartheta_t}{\cos \vartheta_i} \quad (2.80)$$

olarak verilmektedir (Balanis, 1989).

2.5.4 Yer Radarı Sinyallerinin Oluşturulması ve Yayınımı

Genelde iki oktav bant genişliğine sahip dipol antenler mevcut yer radarı sistemlerinde kullanılmaktadır. Bu durum, antenin ürettiği frekansların merkez frekansının yarısıyla iki katı arasında çeşitlilik göstermesidir. Örnek olarak, frekansı 150-600 MHz arasında değişen dalga boylu sinyaller, 300 MHz'lik merkez-frekansa sahip bir bir antenden üretilmiştir (Conyers ve Goodman, 1997).

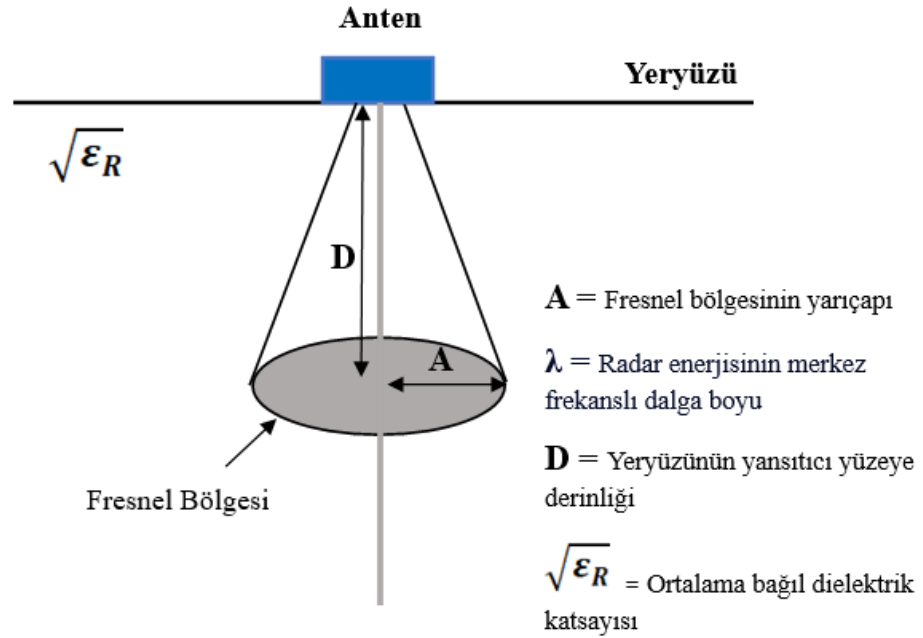
Radar anteni yalnızca bir darbeye değil, her biri aynı süreye sahip ve aynı biçimde genel olarak 2'den 50 μ s'ye değişiklik gösteren belirli aralıklar ile yol kat eden darbeler kümesi oluşturmaktadır. Tekrarlanma frekansı olan f_r ; dizisinde peş peşe gelen iki darbe arasında bulunan aralığın tersidir. Karakteristik f_r ; 20-500 kHz aralığına sahip olmaktadır. Sadece bir darbeye ait süre genellikle 1 ve 100 ns aralığında değişiklik göstermektedir (Parasnis, 1997).

Yer radarı dalgası yer içerisine Şekil 2.16'da görülen elips şeklindeki bir koni biçiminde yayınmaktadır ve mevcut yayılım doğrusal bir hatta sahip olamamaktadır

(Annan ve Cosway, 1992, 1994; Arcone, 1995 Davis ve Annan, 1989). Genelde iletim konisi elipse benzer biçime sahip, ya antenin uzun eksenine paralel yönde ya da ilerleme doğrultusunda uzanmaktadır.

Bir antene ait ışıınım gücü, aç ı ile konumuna bağlı dağılımının ölçüsü ışıınım örüntüsüdür. Korumas ız veya korumalı yatay durumda elektrik dipol anten tarafından üretilmektedir. Korumalı antenlerde ışıınım örüntüsüne ait yukarı yönde yay ın ıma durumunu azaltmaktadır. Bu özelli kte sisteme sahip antenin yay ın ım enerjisi anten üzerinden bulunan düzeneklerle (metal plaka ve türevi) sınırda geri yans ıt ılmaktadır.

Radar enerjisinin sahip olduğu en yüksek değerinin anten dipolüne dik bir biçimde yay ınd ıė ını teorik ve pratik çalışmalar ortaya koymuştur. Bu ise yapılması planlanan gpr uygulamas ında mümkün olduğu kadar doğrultusu kestirilebilen veya bilinen yapılara dik bir şekilde yapılması anlamına gelmektedir. (Leckebush, 2003).



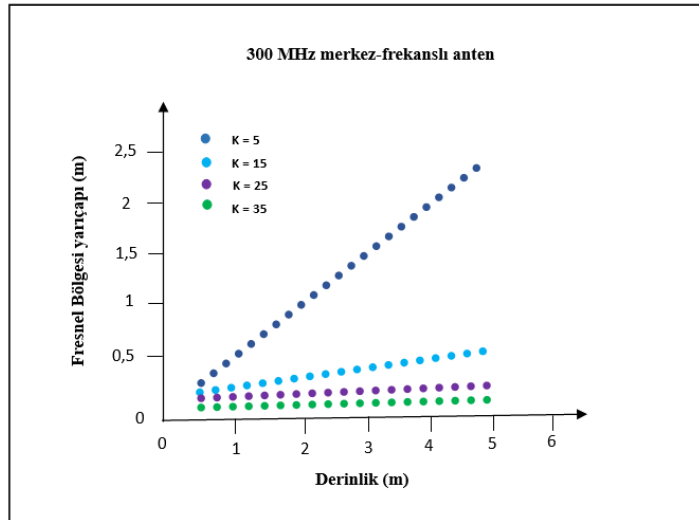
şekil 2.17 Anten ile yer içerisine gönderilen dalgan ın yay ın ıma rnek (Conyers ve Goodman, 1997'den uyarlanmıştır)

Gpr uygulamalarında radar sinyalinin yansıdığı zonun Fresnel zonu tanımlanmaktadır. Yatay çözünürlük olarak da ifade edilebilmektedir. Fresnel zonuna ait boyut, dalga boyu, derinlik ve ışınlam örüntüsü belirlemektedir. Conyers ve Goodman (1997) Şekil 2.17’de ifade edilen yayılım konisine ait farklı derinliklerde bulunan genişlikleri hesaplayabilmek adına (2.81), Annan (1992) (2.82) denklemini kullanmıştır.

$$A = \frac{\lambda}{4} + \frac{d}{\sqrt{\epsilon_r + 1}} \quad (2.81)$$

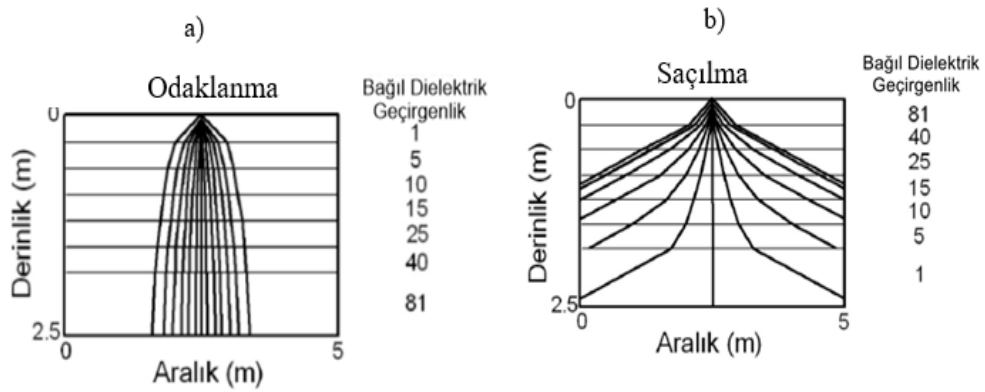
$$A = \frac{\lambda}{2} + \frac{d}{\sqrt{\epsilon_r - 1}} \quad (2.82)$$

Oval Fresnel zonunun uzun ekseninin yarıçapı A ile, ϵ_r ortamın dielektrik katsayısını ve d derinlik değerini göstermektedir. Kabaca uzun eksen boyunun yarısı, oval Fresnel zonunun kısa eksenini vermektedir. İki denklemde de yer radarı dalgalarının nüfuz ettiği ortamın bağıl dielektrik geçirgenlik değerinin tek değer ve sabit olması sebebi ile buradaki unutulmaması gereken durum, gerçekte olan yer durumlarına kabaca bir yaklaşım olmasıdır. Kontrolü gerçekleştirilebilen laboratuvar koşulları için geçerli olan bir durum olmaktadır. 300 MHz merkez frekansına sahip bir antenin yaydığı radar sinyallerinin farklı bağıl dielektrik geçirgenlik değerlerinin olduğu ortamlarda oluşan çözünürlükler Şekil 2.17’de gösterilmektedir.



Şekil 2.18 300 MHz merkez-frekansa ait anten kullanılarak farklı sayı değerlerine sahip bağıl dielektrik geçirgenlik değerleri ile elde edilebilecek yatay çözünürlük büyüklükleri (Conyers ve Goodman, 1997’den uyarlanmıştır)

Artan derinlikle iletim konisinin genişlediği başka bir anlamda Fresnel zonunun genişlediği elde edilen grafikten yararlanılarak açıklanabilmektedir. Yer radarı dalgalarının arayüzeylerde farklı açılarda kırılmasına yeraltının dielektrik özelliğindeki değişimler sebebiyet vermektedir ve bu vaziyet yansımış olan radar dalgalarına doğrudan etkisi bulunmaktadır. Yeryüzünden yer içine doğru bağlı dielektrik geçirgenlik katsayısında artması durumunda, dalgaların arayüzeylerde dar bir açı ile kırıldıktan sonra, konik şekle sahip yer radarı dalgalarının yer içine daha da fazla odaklanmasına izin vermektedir (Goodman, 1994). Ancak bu etki artarak oluşmaya devam ederse radar dalgalarının daha yüksek bağlı dielektrik geçirgenlikli ortam yönünde hareket etmesi olarak yorumlanabilmektedir (Şekil 2.19a).



Şekil 2.19 Derine inildikçe (a) artan ve (b) azalan bağlı dielektrik geçirgenlik katsayılarının yeraltı modeli için dalgayı kırmasının gösterimi (Conyers ve Goodman, 1997'den uyarlanmıştır)

Derine inildikçe ortaya çıkan kırılma ve bundan dolayı oluşan odaklanma miktarını Snell Yasası açıklayabilmektedir (Sheriff, 1984). Snell yasası, ortamlar arası sınırdaki meydana gelebilecek kırılma veya yansıma miktarını, radar dalgasının bu arayüzeye geliş hızına ve açısına bağlı olmaktadır. Derinlik arttıkça, bağlı dielektrik geçirgenlik katsayısının artması ile yer radarı dalgalarının mevcut ortamda yol kat etme hızının düşmesine ve geliş açısı azalarak, iletim konisinin öncesinden daha da fazla odaklanmasına sebep olmaktadır. Eğer yeraltına ait bağlı dielektrik geçirgenlik değerindeki azalma az ise, iletim konisi her geçtiği sınırdaki genişleyen açı ile kırıldıktan sonra genişlemekte ve saçılmaktadır (Şekil 2.18b).

Yeraltındaki tabakalarda bağlı dielektrik geçirgenlik değerleri artıyorsa, yer radarı dalgaları odaklanabilmektedir. Bu sebeple, yüksek bağlı dielektrik geçirgenlik değeri

olan ortamlarda yer radarı uygulanıyorken, yeraltındaki yapıların tespit edilebilmesi için radar profil aralıklarının sıklaştırılması gerekmektedir.

2.5.5 Yer Radarı Sinyalinin Sönümlenmesi

Radar hüzmeleri yer içine doğru hareketleri esnasında derinliğinde artmasıyla birlikte içinden geçtiği ortamın elektrik iletkenlik ve manyetik geçirgenlik özelliklerine hemde bağıl dielektrik geçirgenlik katsayısına ilişkili olarak sönüme uğramaktadır (Doolittle ve Miller, 1991; Duke, 1990; Shih ve Doolittle, 1984). Leckebush (2003), yer radarı dalgalarının, derinliğinde artması durumunda hızlı bir şekilde sönümlendiğini ve genliklerinin çok çok kısa bir sürede azaldığını göstermiştir. Bu ise dalgaların küresel yayınmanın uzaklığıyla ters orantılı azalması ile açıklanabilmektedir. Leckebush (2003)'a göre yer radarı dalgasının sönümlenmesi; yer iletkenliğinin bir göstere midir. Herhangi bir x mesafesindeki sönümlenme (α) (2.83) bağıntısı yardımıyla hesaplanabilmesi için ortamın bağıl dielektrik katsayısı ve iletkenlik değerinin bilinmesi durumunda;

$$e^{-\alpha x}, \alpha = 1.69 \frac{\sigma}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.83)$$

Sönümlenme katsayısını (α) Moorman (2001), (2.84) eşitliği ile vermiştir.

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

$$\alpha = \omega c^{-1} \{ [K' ((1 + \tan^2 \delta)^{0.5} + 1)] / 2 \}^{0.5} \quad (2.84)$$

Moorman (2001)'a göre, elektrik iletkenlik ve dielektrik etkisi baskın olan bir ortamdaki sönümlenme katsayısı ise, (2.85) ya da (2.86) bağıntısıyla elde edilebilir. Çeşitli yeraltı ortamlarının sönümlenme oranı Tablo 2.1'de verilmektedir.

$$\alpha \approx (60\pi\sigma_{DC}) / (K')^{0.5} (m^{-1}) \quad (2.85)$$

$$\alpha \approx 1.64\delta / (K')^{0.5} (dBm^{-1}) \quad (2.86)$$

Tablo 2.2 Hız V, bağıl dielektrik geçirgenlik katsayısı (ϵ_r), elektriksel iletkenlik (σ) ve sönümlenmenin (α) farklı ortamlardaki değerleri (Leckebush, 2003)

Madde	ϵ_r	V (mns ⁻¹)	σ (mSm ⁻¹)	α (dBm ⁻¹)
Hava	1	0,3	0	0
Tuzlu su	81-88	0,033	3000	600
Tatlı su	80	0,033	0,5	0,1
Granit (kuru)	5	0,13	0,01	0,01
Kum (kuru)	5	0,13	0,01	0,01
Kil (ıslak)	10	0,095	500	300
Kumlu toprak (kuru)	2,6	0,19	1,4	1
Kumlu toprak (ıslak)	25	0,06	69	23
Killi toprak (kuru)	2,5	0,19	2,7	3
Killi toprak (ıslak)	19	0,07	500	200
Gölsel çökel	50	0,04	-	-
Sualtında bulunan kültürel tabaka	70	0,04	-	-

EM enerjinin artış gösteren derinlik ile yer altında bulunan daha büyük bir yüzeyin alanı üzerinde yayılıyor olması ile yer içerisindeki iletkenliklerin kaybolması nedeni ile, enerjideki soğurulma ile oluşan elektromanyetik enerjinin yeraltında sönümlenebilmesidir (Balanis, 1989). Soğurulma kayıpları elektromanyetik enerjinin, toprakta bulunan su içeriğinin artmasına ek olarak ortamda bulunan farklı tuz türleri ve miktarları farklılık neden olmaktadır. Yüzey yer alan toprak tabaka içerisinde bulunan fazla miktarda çözünmemiş olan karbonat konsantrasyonu yüksek miktarda yer radarı sinyalin sönümlenmesine yol açabilmektedir (Batey, 1987).

Daha fazla elektromanyetik enerjinin yeraltında yayılabilmesi için ortamın genelde düşük elektrik iletkenlikte olması gerekmektedir. Böylesi ortamlar düşük bağıl dielektrik geçirgenlik değerlerine sahip olmaktadır. Yüksek elektrik iletkenliğe sahip olan ortamlar, yüksek kil içeriğine ve suya doymun özelliğe sahip ortamlar, elektromanyetik dalgaların yayınımına yüksek oranda engel olmaktadır. Bu gibi özelliklere sahip ortamlarda, radar enerjisi artan derinlikle beraber hızlıca sönümlenmekte ve anten frekansı bakılmaksızın yaklaşık penetrasyon derinliği bir metreden az olmaktadır.

2.5.6 Yer Radarı Sinyalinin Hızı ve Derinlik Belirlemesi

Yeriçerisine seyahat eden yer radarı dalga hızlarının belirlenebilmesi, araştırılan yapıların derinliklerinin doğru bir şekilde hesaplanabilmesi için en çok önem arz eden parametredir. Çalışmalar sonucunda elde edilmiş olan radargrama ait bir derinlik skalasının oluşturulması için hızın belirlenmesi gerekmektedir. Hat içerisindeki farklı jeolojik birimlere derinlik skalasının elle oluşturulması için derinlikle ya da hat boyunca hız farklılıklarının olduğu yerlerin belirlenmesi gerekmektedir.

Hava ya da boşluk içerisinde EM enerji ışık hızı düzeyinde (yaklaşık olarak 0.3 mns^{-1}) ilerlemektedir. Havada ışık hızıyla aynı hızda ortaya çıkan enerjinin bir bölümü kırılarak yer içerisinde genel olarak 0.01-0.16 m/ns aralığında farklılık gösteren hız değerlerinde ilerleyişini sürdürmektedir. Elektrik iletkenlik ve dielektrik katsayı buna benzer ortamlarda yayılmakta olan radar dalgalarının hızlarını yüksek miktarda etkilemektedir (Moorman, 2001). Yayınım hızının kestirimi aşağıdaki bağıntılarla verilmektedir.

$$v = c\{[K'((1 + \tan^2 \delta)^{0.5} + 1)]/2\}^{-1} \quad (2.87)$$

$$v = 0.3(\epsilon_r)^{-0.5}(\text{mns}^{-1}) \quad (2.88)$$

Farklı ortamlardaki radar enerjisinin tipik yayınım hızları Tablo 2.1'de verilmektedir. Elektromanyetik dalgaların, su içerisinde yayınım hızı çoğunlukla sabit olarak kabul edilmektedir ve tabloda görülmekte olan fiziksel parametrelerin kullanılması, özellikle gölsel olarak ifade edilen alanlarda yapılan yer radarı uygulamalarında suyun bulunduğu derinlik hesap edilebilmektedir. Ancak farklı su miktarı ile gözenekliliğe olduğu tortul tabakalara benzer ortamlarda yayınım hızları farklılık göstermektedir. Bu gibi ortamlarda, kalınlığın saptanmasında hızın belirlenmesi büyük önem taşımaktadır. Yayınım hızı doğrudan, eğer arazide yapılan sondaj çalışmaları var ise, belirlenebilmektedir. Sondaj çalışmasının olmaması durumunda, hız değerleri gelen varışlar ile yatay sınırlardan ortaya çıkan yansımaların işleme alındığı CMP (Common Mid-Point) yani Ortak Orta Nokta ölçüm tekniğinden faydalanılarak veya sabit ofsete sahip ölçümler gerçekleştirilerek oluşturulmuş radargramlardan nokta kaynakların yansımalarının analiz edilmesiyle belirlenebilmektedir. Göreceli olarak güçlü ve basit ortamlarda bulunan yansımalar üst

tabakalara ait olan hızların tespit edilebilmesi için daha uygun olmaktadır (Moorman, 2001).

Yapılan hız hesaplama çalışmalarında sabit offsetli radargram kullanılarak radargramlardaki nokta-kaynağın yatay arayüzeyi ve yansıtıcı için benzer eşitlik uygulanmaktadır. Böylesi durumlarda seyahat boyunca geçen süreyi hesaplamak için (2.89) bağıntısı yazılmaktadır.

$$t^2 = \frac{x^2}{v^2} + t_0^2 \quad (2.89)$$

Hız çalışmalarında antenlerin arasında bulunan mesafe veya bir profildeki nokta-kaynak yansıtıcıyla arasındaki yanal ofset mesafesi x ile, t_0 ise ofsetteki tek yönlü seyahat süresini, v ise yayının hızını göstermektedir (Telford, Geldart, Sheriff ve Keys, 1976). Hız hesabı için (2.89) bağıntısı tekrardan düzenlenirse, (2.90) bağıntısına ulaşılmaktadır.

$$v = \frac{x}{\sqrt{t^2 - t_0^2}} \quad (2.90)$$

Yer radarı uygulamalarında, hız hesaplaması yapılırken hatırlanması gereken durum, radar dalgasının kesin derinlik değerleri ve seyahat süresi o derinliğe kadar yer alan tabakaların hepsini hızıyla ilişkili olmaktadır. Bu sebeple radargramlardaki yansımalar yorumlanırken bu etki mutlaka göz önüne alınmalıdır.

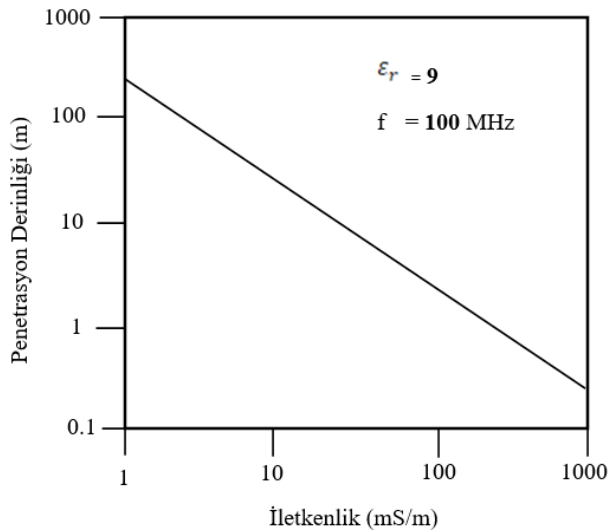
Migrasyon yazılımları kullanılarak yeraltına ait yapıyı anlaşılabilir bir geometriye sahip olduğu noktalarda hız değişimleri için düzeltmeler yapılabilmektedir. Aynı zamanda mevcut yapıların geometrilerinde oluşan hatalar içinde bu düzeltme işlemleri uygulanabilmektedir. Bahsedilen işlem uzun zaman almakta ve fazla emek harcanması gereken bir işlem olmasına karşın, temel problemler için bu yazılımlar uygulanabilmektedir. Ek olarak böylesi işlemin bir yer radarı uygulamasında gerçekleştirilebilmesi için daha çok ayrıntı içeren hız değerlerine gereksinim duyulabilmektedir (Conyers ve Goodman, 1997).

2.5.7 Nüfuz Derinliği Kavramı

Yer içerisinde kullanılan antenin merkez frekansı ve seyahat eden sinyalin sönümlenme oranı, her arayüzdeki dielektrik farklılık ve radar yansımalarına sebep olan arayüzlerin sayısı ile yer radarı uygulamalarının yeraltını görüntülenebilme özelliğinin yanı sıra, yer içerisine doğru harekete sahip radar dalgalarının nüfuz derinliğini de etkilemektedir.

Radar dalgaları arayüzlere eriştiğinde, dalgaların belli miktarı yüzeye geri yansırken, geriye kalan kısımda ise daha derinlerdeki katman veya katmanlara doğru ilerlemeyi sürdürmektedir. Arayüz sayıları artması, derine doğru yayılımı sergileyen enerji miktarında azaltmaktadır. Özellikle sediman ortamlarda alansal dielektrik zıtlıklar, kompleks yansımalar ortaya çıkarabilmektedir. Araştırılan yansımalar bu komplekslikler sebebiyle görünmez hale gelebilir. Bunun neticesinde araştırma derinliğinde azalma meydana gelebilir (Moorman, 2001).

Elektrik iletkenliğinin arttığı ortamda elektromanyetik enerji hız bir biçimde sönüme uğramaktadır. Bu sebeple, elektromanyetik enerjinin nüfuz derinliğinde azalma meydana gelir. Radar sinyali içerisinden geçtiği malzemenin iletkenliği sinyalin etki derinliği anlamında ciddi oranda etkiye sahip olmaktadır (Moorman, 2001). Elektrik iletkenlik ile enerji penetrasyonu arasındaki ilişki Şekil 2.20’de gösterilmektedir.



Şekil 2.20 Elektromanyetik enerjinin etki derinliği ile ortamın elektriksel iletkenliğinin ilişkisi (Moorman, 2001)

Nüfuz derinliğini etkileyen bir diğer parametre ise anten frekansı olmaktadır. Yüksek merkez frekansa sahip antenler daha kısa boylu dalga üretmelerine rağmen, düşük merkez frekansa sahip anten uzun boylu dalga üretmektedirler. Bu durumun neticesinde iletkenlik kayıplar ve ortamda mevcut küçük boyuta sahip nesnelerden ortaya çıkan saçılmaların azalış göstermesi sebebiyle az oranda sönümlenme gerçekleşmektedir. Bunun sonucunda ise radar dalgaları yerin daha derinde bulunan bölümlerine ulaşabilmektedir. Ancak düşük frekanslı dalga boyları ile uygulama gerçekleştirmenin olumsuzlukları, yer içerisinde bulunan küçük materyallerin tespit edilememesi ve ince olan tabakaların kalınlıklarının belirlenememesine ek olarak, uygulamada kullanılan anten boyutlarındaki artıştır. Bahsedilen durum, yeraltını görüntülerken çözünürlüğünü azaltmaktadır ve pratiklik anlamında çalışmayı güçleştirmektedir (Conyers ve Goodman, 1997).

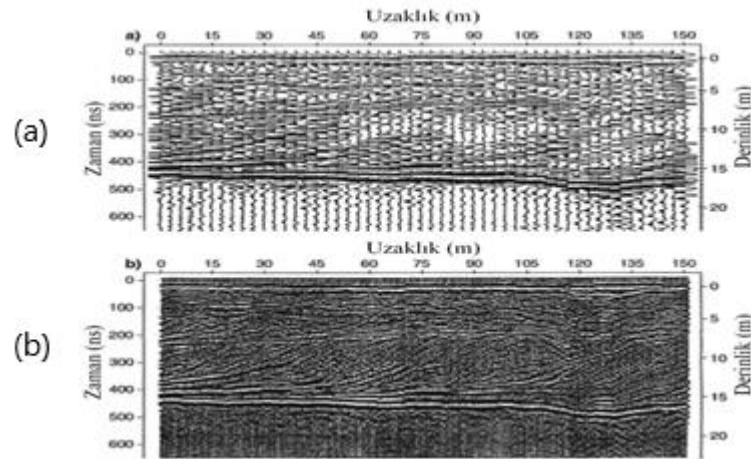
2.5.8 Radar Yönteminin Çözünürlüğü

Araştırma yapılacak materyalin boyutu ya da tabaka kalınlığının doğru bir şekilde tespit edilebilmesi için, bir yer radarı sisteminde ortamın yayılım hızı ve frekansı önemlidir. Maksimum çözünürlük elde edebilmek için kısa dalga boylu radar dalgaları üreten daha yüksek frekanslı antenler kullanılmaktadır ve küçük boyutlu nesnelerin tespit edilmesine olanak sağlamaktadır. Farklı fizik karakterde olan ortamların radar darbelerinin mevcut ortamlar içerisindeki hızlarını etkilemektedir. Bir radar darbesi ortam tarafından düşük hızda harekete zorlanıyorsa, daha düşük bir yayılım hızına sahip ortamda ilerliyor denilebilmektedir. Yeraltı yapılarının boyut ve derinliklerinin doğru bir şekilde tespit edilebilmesi ortamın hız bilgisinin doğru bir şekilde belirlenmesinden geçmektedir. Bir dalgacık boyutunun çeyreği en yüksek düşey çözünürlüğü dalga teorisi ile belirlemektedir (Sheriff ve Geldart, 1982). Bundan yola çıkarak, Sheriff (1985) mutlak düşey çözünürlük düşük miktarda açı ile kesişmekte olan yansıtıcıların incelenmesi ile tespit edilebileceğini söylemektedir. Yer radarı uygulamasında kaydedilmiş olan dalgacıkların boyutları yer içerisinde iletilmiş olan orijinal darbe genişliğinin bir fonksiyonu olmaktadır. 100 ve 50 MHz merkez frekansına sahip antenlerin darbe genişliği ve bunların sonucunda çeşitli jeolojik tabakalarda olabilecek en büyük kuramsal çözünürlükleri Tablo 2.2’de gösterilmektedir.

Tablo 2.3 100 ile 50 MHz merkez frekansa sahip antenlerin ürettiği darbelere ait genişlikler ve farklı jeolojik birimlerde en büyük kuramsal çözünürlük değerleri (Ulriksen, 1982; Davis ve Annan, 1989; Annan, 1992)

Madde	100 MHz		50 MHz	
	Darbe genişliği (m)	Teorik çözünürlük (m)	Darbe genişliği (m)	Teorik çözünürlük (m)
Su	0,33	0,08	0,66	0,16
Buz	1,6	0,4	3,2	0,8
Doygun kum	0,6	0,15	1,2	0,3
Doygun kil	1,0	0,25	2,0	0,5
Kireçtaşı	1,2	0,3	2,4	0,6
Şeyl	1,0	0,25	2,0	0,5
Granit	1,3	0,33	2,6	0,66

Leckebush (2003), bir Fresnel zonunun ait olduğu antenin yatay çözünürlükte sınırlı olduğunu ifade etmektedir. Yer radarı uygulamalarında Fresnel zonu radar dalgasının yansıdığı alan Fresnel zonunu tanımlamaktadır. Işınım örüntüsü, dalga boyu ve derinlik Fresnel zonunun boyutunu belirlemektedir. İzler arasın yer alan aralık ve radar dalgasının yansımış olduğu alanın fonksiyonu yatay çözünürlüğü vermektedir (Moorman, 2001). Şekil 2.20’de 50 MHz frekansa sahip antenle uygulama yapılması aynı hat üzerindeki farklı istasyonlara ait uzaklıkları seçilerek elde edilmiş olan iki adet radargram gösterilmektedir. Şekil 2.20a’da ise istasyon uzaklığı 3 m tercih edilirken, 2.20b’de ortamdan alınacak görüntüyü detaylandırabilmek amacı ile 0,5 m seçilmiştir.



Şekil 2.21 a) 3 m ve b) 0.5 m ölçüm aralığı ile 50 MHz ye sahip bir anten kullanılarak elde edilen radargramlar. (Moorman, 2001)

2.5.9 Ölçüm Frekansının Belirlenmesi

Yer radarı uygulamalarında anten frekansının doğru bir şekilde tercih edilmesi, aranılacak olan yapıların çözünürlüğü ve araştırılacak derinliğinin tespit edilebilmesi hususunda en önemli karar olmaktadır (Huggenberger, Meier ve Beres, 1994; Smith ve Jol, 1995).

Çözünürlüğü kontrol altına alan dalga boyu ve dalga boyunun büyümesi, başka deyişle anten frekansı değerinin azalması gerekli araştırma derinliğini artırırken, yeraltı çözünürlüğünü azaltmaktadır. Uygulama yapılacak antene ait merkez frekansı (f), yeraltında ilerleyen radar sinyalinin hâkim dalga boyunu (λ) doğrudan belirlemektedir. Sözü edilen kavram, yer etkisinden kaynaklı geri gelen sinyalin merkez frekansı ile karıştırılmamalıdır. Yere yayılan enerjinin miktarı, yayılım hızı, yeraltındaki dalganın yayılım frekansının yanı sıra sediman ve toprakta bulunan özelliklere bağlı bir durumda farklılık göstermektedir. Bu frekans değerinin yer içerisindeki materyalin ne olduğunu kestirmek oldukça güçtür (Leckebush, 2003).

$$\lambda = \frac{c}{f\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.91)$$

Nüfuz derinliği ve yeraltına ait çözünürlük karşılıklı farklılık ortaya çıkmaktadır. Antenler farklı merkez frekanslı değerlerinde olması için hakim dalga boyu ile antenler ve farklı bağıl dielektrik geçirgenliklere sahip ortamlarda bulunan dalga boylarındaki farklılıklar Tablo 2.3’de gösterilmektedir. Yeraltı çözünürlüğü ve etki derinliği yer içerisinde sıklıkla farklılık göstermektedir. Ortamın sahip olduğu gözeneklilik, farklı gömülü yapıların bileşimleri ve nem içeriği bu farklılığı etkilemektedir. Bu sebep ile Tablo 2.4 ile ifade edilen değerler yalnızca genel hesaplamayı kapsamaktadır (Conyers ve Goodman, 1997).

Boyutları ve yüzeyden uzaklığı tahmin edilen veya bilinmekte olan yapıların hangi anten frekansının belirleyebileceği (2.92) ve (2.93) bağıntıları kullanılarak araştırılabilir. Temelde, hedeflenen yapıya ait kesit alanı mevcut hedef derinliğinde bulunan Fresnel zonuna yaklaşmak durumundandır. Bu eşitlik kullanılarak hedef derinlikte bulunan Fresnel zonunun hesaplanabilmesi için ortamın bağıl dielektrik geçirgenlik değerinin bilinmesi gerekmektedir. Tablo 2.3 kullanılarak

eğer ortamın bağıl dielektrik geçirgenlik değerinin belirlemek için ölçüm yapılamıyor ise ortalama değerler bulunabilmektedir.

Tablo 2.4 Ortamların farklı dielektrik geçirgenliklere sahip olması durumunda anten frekansı ve dalga boyu ilişkisi (Conyers ve Goodman, 1997)

Anten merkez frekansı	$\epsilon_r=1$ (Hava içinde)	$\epsilon_r=5$ Merkez frekansının dalga boyu	$\epsilon_r=15$	$\epsilon_r=25$
(MHz)	(metre)			
1000	0,30	0,13	0,08	0,06
900	0,33	0,15	0,09	0,07
500	0,60	0,27	0,15	0,12
300	1,00	0,45	0,26	0,20
120	2,50	1,12	0,65	0,50
100	3,00	1,34	0,77	0,60
80	3,75	1,68	0,97	0,75
40	7,50	3,35	1,94	1,50
32	9,38	4,19	2,42	1,88
20	15,0	6,71	3,87	3,00
10	30,0	13,42	7,75	6,00

Eğer hedeflenen yapı Fresnel zonundan çok küçük olması durumunda gömülü yapı yüzeyde bulunan alıcıya sadece yansıyan bir enerjinin küçük bir parçası iletilecektir. Böylesi durumlarda, gömülü yapının oluşturacağı yansımalar mevcut ortamda bulunan diğer istenmeyen yansımalar tarafından gölgelenmesi nedeniyle farkına varılmayıp yansıma kayıtlarında görünmeyebilmektedir. Bu tür ufak boyutlardaki yapılar, ancak elde edilen radargramlarda uygulanacak olan genlik kazanımı gibi veri-işlem teknikleri kullanılarak ve genlik dilim haritaları hazırlanarak ortaya çıkartılabilmektedir.

Yerіçerisindeki aranan materyaller genelde maden ocaklarının tabanlarına veya jeolojik tabakalara benzeyen ve bu aranan materyaller büyük arkeolojik kalıntılar gibi düzlemsel yüzeyler olabilmelerine karşın, yeraltındaki boşluklar, depolama alanları ve tüneller gibi noktasal hedefler de olabilmektedir (Conyers ve Goodman, 1997).

Düzlemsel yapılar ortam koşullarının neden olduğu limitlerin dışında, düzlemsel yapının yansıtma özelliği, kalınlığı, uzanımı ve yer içerisindeki derinliğine bağlı olarak belirlenecek merkez-frekansa sahip anten ile görüntülenebilmektedir. Nokta

kaynaklar ise düzlemsel yansıtıcıların tersine daha ufak yüzeylere sahip olmaları nedeni ile yüzeylerden yansımış olan radar enerjisi daha az olmaktadır. Böylesi yapıları düşük frekanslı antenlerle belirleyebilmek dahada güçleşmektedir. Düşük çözünürlüklü sistemlerin bu yapıların etrafındaki ortamlardan fark edilememelerinin ana sebebi budur. Yüksek merkez frekansa sahip antenler ile böylesi yapılar çok derinlerde örtülü olmadıkları müddetçe belirlenebilmektedir (Conyers ve Goodman, 1997).

İki sınır birbirlerine radarın dalga boyundan daha da yakın konumda ise, üstünde ve altında bulunan yüzeylerden yansıyan radar dalgalarının girişimleri sebebiyle ya fark edilmeyecekler ya da yok olacaklardır. Aksi durumda ise, bu arayüzeylerden iki ayrı yansıma elde edilmektedir ve hedeflenen yapı saptanabilmektedir.

Gömülü bir yüzeyin haritalanması durumunda, bu yüzeyin ortamdaki başka materyallerle karıştırılamayacak kadar bir yansımasa var ise o yüzeyin yansıyan dalgalar, ortamın içerisine nüfuz eden radar dalga boyu ne olursa olsun görünür olabilmektedir. Eğer yüzeyde engebe yüksek ya da düzensiz ise doğru bir şekilde ölçülebilmesi için daha yüksek yeraltı çözünürlüğü gerekmektedir.

Radar dalgalarının enerjisini dağıtan bozucu birçok küçük süreksizlik içeren çoğu jeolojik ortamlar ve arkeolojik yerleşimler gibi yer radarının uygulandığı ortamlarda eğer aranılan yapı veya yapılar etraftaki bozucu etkiler ile aynı dalga boyunda iseler yorumlama aşamasında ayırım yapılması oldukça güçleşmektedir.

Bozucu etkiye sahip olan ortamlar veya materyaller sadece küçük yapılardan değil aynı zamanda kaya ve kaldırım taşları gibi büyük süreksizliklerde olabilmektedir.

Böylesi durumlarda ise uzun dalga boyu üretebilen düşük frekansa sahip bir anten kullanılıyor ise yine de hedeflenen yapı ile istenmeyen bozucu etkileri birbirinden ayırt edilmesi zorlaşacaktır.

Yeraltında bulunan nesnelerin boyutlarının radar dalga boyuna oranıyla gömülü bir yapıdan elde edilecek yansıma miktarı hesaplanabilmektedir. Çok küçük boyutlardaki yapıları yine küçük dalga boylu radar dalgaları görüntüleyebilmelerine karşın penetrasyon derinliği açısından çok sığda kalmaktadır. Daha uzun dalga boyuna sahip

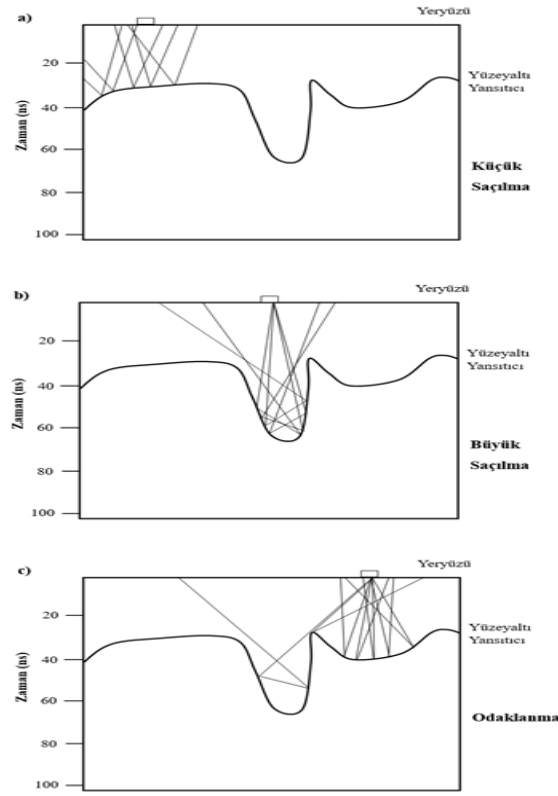
olan radar enerjisi ancak büyük boyutlardaki yapıları saptayabilmesine karşın, penetrasyon derinliği dahada artabilmektedir.

Düşük frekansa sahip antenler (10 ile 120 MHz) belli şartlarda yaklaşık 50 metre derinliğe kadar nüfuz edebilen uzun dalga boylu radar sinyali üretebilmektedir. Mevcut antenlerin yalnızca büyük boyutlarda olan yerîçerisinin niteliklerini ortaya koyma yeteneğine sahip olmaktadırlar. Kristal bir yapıya sahip olan buzun elektromanyetik enerjinin ilerlemesine müsaade etmesi sebebiyle, saf buzun düşük frekanslı antenlere ait radar sinyalinin kilometre mertebesinde iletilebildikleri bilinebilmektedir (Olhoeft, 1998). Toprakta buza kadar farklılık gösteren ortamlarda yüksek frekansları antenler ancak birkaç metre penetrasyon derinliğine sahip olabilmektedir ve üretilen yansımalar ancak yüzeye çok yakın yaklaşık birkaç cm derinlikten elde edilebilmektedir.

Çözömlenmek istenen yapıların boyutları ve konumları onların etrafındaki ortamların fiziksel ve kimyasal bileşimi kullanılacak antenin frekansını belirlemektedir. Genellikle, aranılan yapı geniş ve büyük bir düzlemsel yüzeye sahip olmaması durumunda ve mevcut ortamın herhangi bir bozucu etkiye sahip olmaması durumunda hedeflenen yapının saptanabilmesi adına iletilmiş olan radar dalgasının dalga boyu bozucu etkisi olan yapının en büyük boyutundan daha fazla olmalıdır. Derine gömülmüş ve çok küçük boyutlara sahip olan noktasal kaynak ya da düzlemsel yapıların belirlenmesi zor olmaktadır.

2.5.10 Saçılma ve Odaklanma Kavramları

Yeraltında bulunan düzlemin yüzeyde bulunan antenden uzaklaşacak biçimde eğimli olması veya yukarı doğru bombeli bir yapıya sahip olması durumunda, radar sinyalinin çoğu yüzeyde bulunan antenden dışarı doğru yansıyacak şekilde çok düşük genliğe sahip yansıma kesitlerinin saptanması radar enerjisinin saçılmasından kaynaklanmaktadır (Şekil 2.22). Antene doğru eğimli olan arayüzeylerde ise ve yukarı doğru bakan bir çukur şeklindeyse, yüzeyden geri yansıyan enerji odaklanarak gömülü yüzeyin sebep olduğu genliği yüksek yansımalar elde edilmektedir.



Şekil 2.22 Antenlerin farklı lokasyonlarında odaklanma ve saçılmayı ifade eden örtülü yüzeyin basit gösterimi (Conyers ve Goodman, 1997)

Odaklanma ve saçılma etkilerini açığa çıkarmak amacı ile bir tarafta bir taş yığınının ait veya benzeyen bir yapı diğer tarafında ise gömülü bir hendeye ait olan ortamı Şekil 2.22 ile açıklamıştır (Conyers ve Goodman, 1997).

Hem iç bükey hem dış bükey yüzeyler yeryüzündeki antenden yer içerisine yayılan radar hüzmeleri tarafından aydınlanmaktadır. İlk şekilde mevcut hendeğin solunda, buradaki yansıyan radar dalgalarının bir bölümü antene doğru yöneliyor olmasına rağmen enerjinin bir kısmı saçılmakta geriye kalan yansımalar ise zayıf bir yansıma olarak kaydedilmektedirler.

Sonrasında, antenler hendek şeklinde yeraltı yapısının üzerine konumlandırılmakta ve çok yüksek derecede saçılmalar oluşmaktadır. Özellikle hendek yapısının kenarlarından yansıyan kısımlar büyük oranda alıcı anten uzaklaşıp kaybolacaktır. Bu durum ise hendek yapısını görünmez kılmaktadır. Sonuncusunda ise, anten geniş bir çukurun yüzeyinde olduğunda yansıyan radar enerjilerinin çoğu odaklanmaktadır ve daha yüksek genlikli radar kesitleri elde edilmektedir.

2.5.11 Radar Yönteminde Yakın Alan Kavramı

Yeryüzeyinde konumlanan verici antenden ortama yayılan EM enerji anten çevresinde sahip olduğu merkez frekans değerinin yaklaşık olarak 1,5 katı kadar dalga boyu kadar yarıçaplı bir EM alan üretmektedir (Balanis, 1989; Engheta, Papas ve Elachi, 1982; Sheriff, 1984). Bu etki sırasıyla yaklaşık olarak 30 m, 3 m, 30 cm ve sırasıyla 10, 100, 1000 merkez frekansına sahip antenler içindir. Yeraltının bu alan içerisindeki bölgesinde antene ait bir parçaymış gibi davranıyor olması sebebiyle bu alan içerisinde herhangi bir ışınlam olmamaktadır. Teknik anlamda yer radar dalgası yayılımı olmamaktadır. Bu tesir bölgesi ise genel olarak radagramlarda herhangi bir yansımanın bulunmadığı bölge olarak ortaya çıkmaktadır. Fisher, McMechan ve Annan (1992) bu alanı girişimin yakın-yüzey bölgesi olarak adlandırmaktadırlar.

2.6 Yer Radarı Yönteminde Modelleme

Yer Radarı yönteminde de diğer yöntemlerde olduğu gibi model oluşturulmasının ana sebebi araştırılan ortamın veya ortamın içerisinde bulunan maddenin şeklini, büyüklüğünü, cinsini ve uzanımını doğru yorumlamaktır. Yer radarı yöntemi çalışmalarındaki en önemli problemlerden biri olmaktadır ve çalışmalar sonucunda elde edilen radagramlara ait karmaşıklıklar ve bu karmaşıklığa sebep olan ortamın özelliklerini tam anlamıyla yansıtamamasıdır. Bu sorunun çözümü için uygulanacak yollardan birisi modelleme olmaktadır. Muhtemel gömülü yapıların ve farklı stratigrafik özellikler taşımakta olan ortamların bilgisayar çalışmalarında benzerlerinin üretilmesi ve amaçlar doğrultusunda sentetik modellerin kullanımı fayda sağlamaktadır. Özellikle son yıllarda kullanımı yaygın olan bu tür çalışmaların daha doğru radar yorumlamasının yapılmasına olanak sağlamaktadır.

Yer radarı uygulaması sonucunda modellerin oluşturulması, yeraltı özelliklerine benzer şekilde oluşturulan sentetik modeller yardımı ile radagramlarda hangi tür sonuçların elde edilebileceğinin anlamlandırılmasının yanında, yeraltında aranılan muhtemel yapı ve/veya yapılar ile olası yapıların bulunduğu ortam hakkında da saha çalışmalarına başlanmadan önce ön bilgi sağlamaktadır. Bahsedilenin dışında anten frekanslarında farklılıklar oluşturularak oluşturulan yapar radagramlardan destekleyici bilgiler alınarak çalışma kapsamına uygun anten özellikleri

seçilebilmektedir (Annan ve Chua, 1992; Cai ve McMechan, 1994; Conyers ve Goodman, 1997; Goodman, 1994; Goodman ve Nishimura, 1993).

İnceleme alanına ait çalışma koşullarını daha sağlıklı veriler ile ortaya çıkabilmenin diğer yolu da bilgisayar ortamında oluşturulmuş olan sentetik radargramlar ile saha çalışmalarından elde edilmiş olan verileri karşılaştırıp, parametre değişimlerini dikkate alarak sentetik veriler ile gerçek veriler arasındaki uyum sağlanmış olan parametrelerin tekrarlı işlemlerden yararlanarak modeli oluşturmaktır. Ters çözüm tekniği jeofizikte gerçek saha verileri ile olan farkın en aza indirgenmesidir. Jeofizikte düz çözüm ve ters çözüm teknikleri kullanılmaktadır ve düz çözüm ters çözümün ilk adımıdır. Belirtilen özellikler dikkate alındığında yapılacak olan yaklaşım yer altı yapısının en doğru şekilde yorumlanmasına olanak sağlamaktadır. (Conyers ve Goodman, 1997).

Bir boyutlu model yapılarının analitik çözümlerinin yapılması yer radarı yönteminin ilk modelleme çalışmasıdır (Annan, Waller, Strangway, Rossiter, Redman ve Watts, 1975; Annan, Cosway ve Redman, 1991; Arcone, 1984). Sonrasında ise, alıcı ve verici arasında gidiş-geliş yapmakta olan yer radarı dalgalarının en küçük seyahat sürelerini hesaplamakta olan ışın izleme yöntemi ile, iki-boyutlu yapıların çözümlenmesi yapılmaktadır (Cai ve McMechan, 1995; Goodman, 1994; Powers ve Olhoeft, 1996). Bilindiği üzere, ışın izleme tekniği her bir tanesi kendi içerisinde sönümlenme ve sabit elektrik özelliklerin bulunduğu, karmaşık geometrik özellikli tabakalar kullanılmaktadır. Teknik ile arayüzeylerde meydana gelen yansımaların genliklerinin doğru bir şekilde tespit edilebilmesine karşın, uzaysal anlamda bağlı dielektrik geçirgenlikte ve sönümlenmede değişiklik ortaya çıkaran ortamların meydana getirdiği kırılmalarda modellenememektedir (Zeng, McMechan, Cai ve Chen, 1995).

Bahsedilen zamanda modelleme şeması frekans ortamında hesaplanmakta olup, hesaplamalardan tespit edilen sonuçlar Fourier dönüşümüyle zaman ortamına aktarılarak Fourier yöntemiyle kullanılarak hesaplanmıştır (Carcione, 1996; Powers ve Olhoeft, 1994, 1995; Zeng vd., 1995). Bilindiği gibi, Fourier yöntemi elde edilen yansımalarındaki sönümlenme özelliğine ve sabit bağlı dielektrik geçirgenliğine sahip ortamdaki kırılmaların üst üste eklenmesi ile oluşturulmakta olan ve gridlenerek parametreleştirme işlemi ile yapılmaktadır. Bahsedilen teknik, kırılma ve yansıma gibi

bütün dalga tesirlerini içerlerine karşın, anten doğrultularının etkilerini içermemektedir (Zeng vd., 1995).

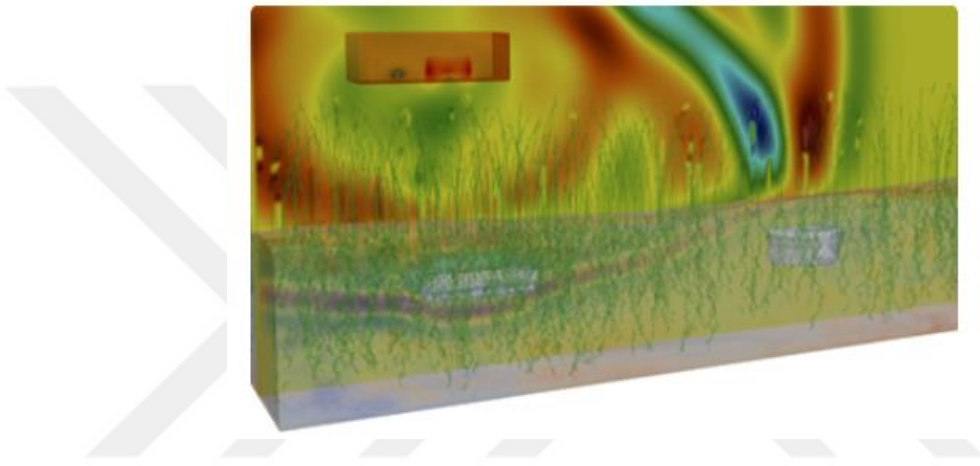
Sonlu farklar ağının kullanılmakta olan hücre yapısı nedeniyle, yöntem ile yalnızca kolay çözümlenebilir yeraltı şekillerini değil, bunların dışında karmaşık yapıya sahip yeraltı özelliklerinin de hesaplama sürelerinin arttırmadan modelleme yapılabilmektedir. Zaman ortamında sonlu farklar yöntemini uygulanması radar antenin özellikleri, yüksekliği, biçimi, yerin elektriksel özellikleri, yeraltında gömülü olarak yer alan muhtemel yapıların geometrisi gibi bunların dışında önemli birçok radar parametrelerinin direkt olarak modelin içerisine dahil edilmesiyle gerçekleştirilmektedir (Roberts ve Daniels, 1997).

Saha çalışmaları dışında bilgisayar çalışmalarında modellerin, ortamda yer alan olası yapılan geometrileri, fiziksel özellikleri, yansıma katsayıları derinlikle birlikte ortaya çıkmakta olan sinyal sönümlmeleri, enerji hızları ve oluşturulacak yansımaların genlik hesaplamaları yapılmaktadır (Goodman, 1994). Hesaplanmış olan bu yansımalar yeraltının karmaşık yapısının basite indirgenerek hacimsel ve dilimlere ayrılmış bir şekilde çizdirilebilmektedir. Elde edilen yansımaların genlik özelliklerini vurgulamak amacı ile birçok renk paleti mevcuttur ve bu renk paletleri kullanılabilmektedir (Conyers ve Goodman, 1997).

2.6.1 Python Temelli gprMax Yazılımı

gprMax, elektromanyetik dalga yayılımını simüle eden açık kaynaklı bir yazılımdır. Zaman Ortamında Sonlu Farklar (FDTD) yöntemini kullanarak Maxwell denklemlerini 3-boyutlu olarak çözmek için Yee'nin algoritmasını kullanmaktadır. Doğası gereği, uzaysal ve zamansal türevler için sonlu fark ifadeleri merkezi fark olmaktadır ve ikinci dereceden doğru olmaktadır. Elektromanyetik dalga yayılımını mühendislik, jeofizik, arkeoloji ve tıp gibi alanlarda simule etmek için tasarlanmıştır. Köprüler ve yollar gibi kritik öneme sahip altyapıların değerlendirilmesi, gömülü yapıların lokasyonlarının tespiti, buzulların haritalanması, anti-personel kara mayınlarının yerlerinin belirlenmesi ve insan vücudundaki tümörlerin tespitini kadar birçok uygulaması bulunmaktadır.

gprMax başlangıçta GprMax2D enine manyetik alan modunu çözen ve GprMax3D FDTD'nin tamamını çözen 3-boyutlu algoritmaya sahip iki simülatörden oluşmaktaydı. Aralarında pek çok farklılık olmamasına rağmen bu iki simülatör pekte verimli olmayan iki ayrı kod tabanını ile sürdürülmekteydi. Özellikle teknolojiyle birlikte artan bu hesaplama gücü ile bu 3-boyutlu simülasyonlar daha erişilebilir hale gelmekteydi ancak halen basit 2-boyutlu simülasyonların özellikle eğitim amaçlı olarak çalıştırılmasına ihtiyaç duyulmaktaydı. Bu nedenle 2-boyut ve 3-boyut simülasyonları çalıştırabilen kod tabanı geliştirilmiştir.



Şekil 2.23 Yer radarı dalgasının kara mayını içeren ortamda yayılımı

FDTD yöntemi yani Zaman Ortamında Sonlu Farklar yöntemi ile elektromanyetik dalga yayılım simülasyonu yapan birçok yazılım bulunmaktadır (Giannopoulos, 2005; Irving ve Knight, 2006). Tez çalışması kapsamında, sayısal modelleme benzetimleri yapılması amacı ile gprMax yazılımı kullanılmıştır. gprMax, elektromanyetik dalga yayılımı simülasyonu yapmakta olan açık kaynak kodlu ve kullanıcılar tarafından geliştirilmeye açık modelleme yazılımıdır (Warren vd., 2016). İki ve üç-boyutlu sayısal modellemeler gprMax yazılımı ile gerçekleştirilebilmektedir. Bu çalışma kapsamında gprMax yazılımının tercih edilmesinde en önemli nedenlerden bir tanesi yüksek çözünürlükte 2B ve 3B sayısal modellemeye olanak sağlamasıdır ve yaygın olarak kullanılmakta olan işletim sistemlerine uygun olarak çalışması (Windows, Linux, Mac OS) ise kullanım açısından önemli ölçüde kolaylık sağlamaktadır. Bahsedilen yazılımın seçilmesinde diğer etkenler ise; anizotropik ve heterojen model tasarımlarına olanak sağlaması, ücretsiz bir yazılım olması ve arayüz kolaylığı açısından kullanıcıya kullanım kolaylığı sağlaması, yüksek hızda modelleme

yapılabilmesi (CPU ve GPU entegrasyonu), akademik çalışmalarda ve özel sektörde kullanılmakta olan farklı antenleri kütüphanesinde modellenmiş olarak bulundurması (GSSI 400MHz, 1,5GHz ve MALA 1,2GHz) gibi etkenler sayılabilir.

2.6.2 Önceki Çalışmalar

İstatiksel bir süzgeç geliştirmeyi öneren Sinha ve Fieguth (2006) örtülü borularda bulunan çatlakların belirlenmesini amaçlamışlardır. Çalışmanın ilk kısmında örtülü borularda bulunan çatlakların niteliklerini ortaya koymaktadır. İkinci aşamada ise özellikleri belirlenen çatlakların sınıflamak ve onarmak için gerek duyulan işlemleri tanımlamaktadır. Fiziksel parametrelerin çatlakları belirlemedeki işlevselliği araştırılıp model görüntüleri önermişlerdir.

Modüle edilmiş frekans aralığında ölçü alan yer radarı ile mayınların belirlenmesi için Abujarad ve Omar (2006) radar uygulamalarında sıklıkla karşılaşın sinyal/gürültüyü azaltmayı amaçlamışlardır. Sahadan elde edilen verilere çift alt uzaya ait izdüşümü yöntemi olarak bilinen Temel Bileşen Analizi (TBA) ile Bağımsız bileşen analizi kullanarak verideki gürültüyü azaltmayı hedeflemişlerdir. 1 GHz ile 20 GHz frekans bandına ölçü alan modüle edilmiş yer radarı ile veriler elde edilmiştir. Sinyal gürültü miktarları mukayese edilmiştir. Bu iki teknik uygulanan verilerde metalik özellik gösteren kara mayınları ile ilgili verimli netice alınmıştır.

Ayrık Dalgacık Dönüşümü'nün yer radarı sinyallerindeki etkinliğini araştırmak için Baili, Lahouar, Hergli, Amimi ve Besbes (2006) çalışma gerçekleştirmişlerdir. Farklı dalgacık dönüşümleri ile yer radarı sinyallerini belirginleştirmeye çalışmışlardır. Benzer işlem düzeyinde Çift Yoğunluklu Dalgacık Dönüşümünün 6. seviyeden Haar ile Daubechies Dalgacık Dönüşümleri açısından radar sinyallerindeki gürültüyü veriden atma işleminde daha az etkin olduğu gözlemlenmiştir ve 2 gürültüsü azaltılmış radargramlar elde edilmiştir.

Örtülü materyallerin görüntülenebilmesi için Lum, Tang ve Lyall (2008) yer radarı uygulamasında kırılma tomografisi yöntemi gerçekleştirmişlerdir. İşlevsel bir amaç fonksiyonu edinmek için KT ters çözümlemesinde en büyük frekans bandı gerekmektedir. Araştırma kapsamında, Fourier Dönüşümü uygulanan saçılmaların frekansı aralığını saptamak için teknik önermişlerdir. FD uygulanan dağınık ortamda

bulunan fazın çeşitliliğini tespit ederek belirlenebilmektedir. FD fazının sıfır geçiş sayısına sahip olduğu uzamsal eksende ve orantılı bant genişliği belirlenmesi için kayan ortalamalı filtre uygulanmıştır. Yapay verilerde denenmiş ve olumlu sonuçlar bulunmuştur.

Ayrık dalgacık dönüşüm olarak isimlendirilen sinyali işleme tekniğini kullanan Ni, Huang, Lo ve Lin (2010) yaptıkları araştırmalarda yüksek çözünürlüklü görüntüler edinmeyi ve yer radarının ham verilerini süzgeçlemeyi amaçlamışlardır. Örtülü boruların çözümleme işlemleri laboratuvar ortamında yapılan deneylerle araştırmalarını tamamlamışlardır. ADD tekniği kullanılan veriler ham verilere nazaran daha fazla bilgi sağladığı belirlenmiştir. Örtülü boruların lokasyonları ile çaplarının belirlenmesinde ADD tekniğinin olumlu olduğu sonucuna varılmıştır.

Temel bileşen analizi (TBA) ve yapay sinir ağlarının entegre kullanımının yer radarı verilerinin incelenmesinde Pantoja, Rodriguez, Bretones, de Jong, Garcia, Martin ve Vieira (2011) araştırmalarında özelliklerin belirlenmesi ve sinyal işleme için etkili bir teknik önermiştir. TBA analizi ve yer radarı verilerinin görüntülerin nitelik saptama uygulaması gerçekleştirilmiştir. Üretilmiş yapay sinir ağının test ve eğitilmesi aşamalarında belirlenmiş nitelikler uygulanmıştır.

Yer radarı verilerinde görülen hiperbolik yansımaların yorumlanmasını kolaylaştırma, eğri çakıştırma ve sinir ağları yöntemlerini uygulayarak yeraltında bulunan materyallerin lokasyonun kestirimi için Singh ve Manisha (2013) araştırma yapmışlardır. Gerçek zamanlı uygulanıp elde edilen neticeler gerçek veriler üzerinde sınanmıştır.

Yansıma katsayılarının belirlenmesi için En Küçük Kareler (EKK) tekniğini yer radarı uygulamalarında Ndoeye, Anderson ve Greene (2013) denemişlerdir. Regüle edilerek EKK aracılığıyla sorunu etkili ve basit bir biçimde çözümlemek adına tekrarlı algoritma geliştirmişlerdir. Bu algoritma ile benzetim yapılmış yer radarı veri kümeleri üzerinde denenmiştir.

Yer radarı verilerinde gömülü yapıları belirlemek adına Jing, Su-Ping ve Fenga (2014) yeni bir yaklaşım sunmuşlardır. Kenar kavrama doğruluğu bağlı olan hedefi tanımlama performansı, doğruluğun artması için ayrılmış hedef ve arka plan

sinyallerine çapraz korelasyon hesaplanması yapılmıştır. Gürültünün kaynaklanan aranan yapının gölgelenmesi durumunu minimize etmek amacıyla çapraz korelasyon profillerine dalgacık modülasyonuna dayanan tasarlanmış kenar saptama uygulanmıştır. İki boyutlu dalgacık dönüşü ile TDA tabanlı yeni bir süzgeçleme önerilerek hedefi açığa çıkarmak amaçlanmıştır. Dönüşüm, yalnızca Sinyal/Gürültü oranını yükseltmesiyle ve aynı zamanda arka plandaki yansıma sinyallerini tespit ederek hedef yapıdan kaynaklanan yansıma tespit edilebilir. Benzetim ve saha çalışmasının sonuçları önerilen teknikle uyumludur.

Yer radarı ve EMG (elektromanyetik girişim) yöntemlerinin bir plâş ortamında yüzeye yakın birimlerin özelliklerini ayrı bir şekilde belirleme kabiliyetini Haynie ve Khan (2016) araştırmışlardır. Yeraltında bulunan zıtlıkların varlığı iki yapı arasında oluşturulan korelasyon ile daha kuvvetlenmekte ve elektriksel özellikleri ile alakalı bilgi sağlamaktadır. Kirli kumların ve zift içeren toprakların var olduğunu belirleyen saha çalışmaları yer radarı ve EMG verilerinde bulunan anomaliler petrolün orada bulunup bulunmadığı ile bilgiler olduğunu kanıtlamaktadır. Bu sebeple, EMG ve yüksek frekanslı yer radarları yüzeye yakın bulunan petrolün lokasyonlarını haritalanması ve sızıntıların engellenmesine katkı sağlayabilir.

Merkez frekansı 250 MHz ve 800 Mhz antenleri kullanarak sığ çalışmalardaki örtülü nesneler üzerindeki görüntüleme sonuçlarını belirleme amacı ile Toksöz, Yılmaz, Seren ve Mataracı (2016) yılında araştırma yapmışlardır. Çalışma kapsamında farklı özelliklere sahip örtülü nesneleri tespit etmek amacıyla RAMAC CU II sistemi ile uygun anten sistemi kullanılmıştır. Saha çalışmalarından elde edilen radargramlar Reflexw yazılımı kullanılarak yorumlanmıştır ve olası örtülü nesnelerin lokasyonlarını ve derinliklerini belirlemişlerdir.

Qu, Yin, Sun ve Zang (2016) bitki örtüleri ile kaplanmış alanlarda ve tehlikeli olabilecek çalışma sahalarında yerin altında örtülü nesneleri belirleyebilmek amacı ile radar uygulamaları gerçekleştirmişlerdir. Yer radarı yönteminin kolay ve hızlı bir yöntem görüntüleme uygulaması olmasının sebebi ise Back Projeksiyon (BP) görüntüleme yöntemi kullanılmasından kaynaklanıyor olabilir. Sözü edilen yöntem fazla derecede hesaplama yükü gerektirmektedir. Kompleksliği ve hesaplama yükünü azaltabilmek amacı GPR-BP algoritması önerilmiştir. Öneriye sunulan GPR-BP

yöntemi ile Non-Uniform Fast Fourier Transform (NUFFT) yöntemine dayanmaktadır. Bu işleme tekniğinin iyileştirilmesi ve hesaplama verimliliğinin etkin bir şekilde kullanılabilmesi FDTD yöntemi ile meydana getirilmiş olan tam dalgalı yapay verilerin işlenmesi ile kontrolü sağlanmaktadır.

Hoarau, Ginolhac, Atto ve Nicolas (2017) örtülü yapıların sağlıklı bir şekilde belirlenebilmesi amacı ile araştırma yapmışlardır. Çalışmalar kapsamında kullanılacak veriler içerisinde gürültüler yer almaktadır ve bu gürültülerin ayıklanması gerekmektedir. Verilerden gürültülerin ayıklanması dışında bağıl geçirgenlik değerinin elde edilebilmesi amacı ile çalışma gerçekleştirilmiştir. Çalışmalar esnasında adaptif dedektör kullanılmıştır ve elde edilen radar sonuçlarında karşılaştırmaları analizler yapılmıştır. Bahsi geçen çalışma boruların konumlarının bulunabilmesine yönelik gerçekleştirilmiştir.

Arkeolojik alanlarda yüzeyin altında yer alan bulguları belirleyebilmek amacı ile Imposa, Grassi, Patti ve Boso (2018) yılında çok büyük olmayan bir alanda Sicilya’da radar uygulaması gerçekleştirmişlerdir. İnceleme alanı çalışmaları sonucunda elde edilen yansımalar küçük buluntulardan kaynaklanmaktadır. Yansımaların yanal yönde devamlılığını yalnızca bitişik profillerde yapılan analizler sonucunda gözlemleyebilmişlerdir. Saha çalışmalarından sonra çeşitli analizler ile elde edilen radar sonuçlarını çalışma alanının etrafında yer alan arkeolojik bilgiler ile bağlantılarını kurmuşlar ve Helenistik döneme ait olan duvar kalıntıları olduğuna yönelik yorumlamalar yapmışlardır.

Guo, Zhao ve Ke (2018) inceleme alanı olarak bir tarım arazisi seçmişler ve arazi içerisinde olası örtülü nesneleri tespit etmek amacı ile radar yöntemini uygulamışlardır. Çalışmalar kapsamında kompleks arazilerde ölçümleri yapmışlar ve elde edilen veriler yorumlandığında birbirlerinden farklı birçok örtülü malzeme tespit etmişlerdir. Çalışmalar sonucunda ise inceleme alanı için temizleme işlemleri gerçekleştirmişlerdir.

2.6.3 Zaman Ortamında Sonlu Farklar Yöntemi

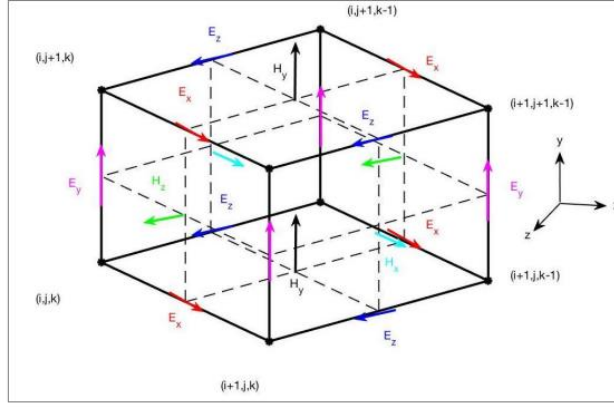
Geçmiş yıllardan günümüze kadar olan süreçte bilgisayar teknolojisinin hızla ilerlemesi ile birlikte yer radarı yönteminde yapılan modelleme çalışmaları da oldukça

gelişmiştir. Birçok araştırmacı yer radarı yönteminde 2-Boyutlu modellemeyi FDTD yani Zaman ortamında sonlu farklar yöntemi incelenmişlerdir (Yee 1966; Lee ve Teixeira 2006; Wang ve Tripp 1996; Bourgeois ve Smith 1996; Bergmann, Blanch ve Robertsson 1999; Teixeira, Chew, Straka, Oristaglio ve Wang 1998; Holliger ve Bergmann 2002; Carcione 1998; Irving 2006). Kano Yee (1966) ilk kez zaman ortamında Maxwell eşitliklerini ilk kez kullanmıştır. Bu yöntem, Maxwell eşitliklerindeki diferansiyel yaklaşımların konum ile zamanda ayrıklaştırılmasına dayanmaktadır. Sonlu farklar yönteminde ilerleme eşitliklerin zaman ortamında EM dalga denklemlerinin yazılması ile ortaya çıkarılmıştır (Yee 1966). Dalga boyundan daha küçük boydaki hücrelerin ayrılarak modelin içerisinde bulunan 2-Boyutlu farkların ağı oluşturulmaktadır. Sonlu farklar ağı, antene ait merkez-frekansının büyüklüğü ve geometrisiyle ilişkili olarak yüzlerce küçük hücreden oluşabilmektedir (2.23). Elektrik ile manyetik alanlara ait bileşenlerin hücrelerinin farklı noktalarındaki ard arda gelen zaman adımlarında hesaplanmaktadır (Gürel ve Oğuz 2000; Sevgi 1999). Bu yöntemin 3 boyuta ait modellemelerde elektrik ve manyetik alana ait üç doğrultudaki bileşenler (x, y, z) hesaplanmaktayken, 2-Boyutlu modellemelerde ise yalnızca iki yöndeki bileşenler hesaplanmaktadır. 2-Boyutlu modelleme yapılırken, hangi bileşenlere göre hesaplanacağı seçilecek olan EM mod açısından değişiklik göstermektedir. Kullanılacak olan mod enine elektrik alan ile enine manyetik alan (Transverse Manyetic, TM) veya (Transverse Electric, TE) olabilir. TM-modu yüzeyde yapılan yer radarı uygulamalarında, TE-modunda genellikle kuyu yer radarı için kullanılmaktadır (Irving ve Knight 2006).

Hesaplama ağı üzerinde bulunan (Şekil 2.24) bir alanın noktasına ait üç manyetik (H) ve üç elektrik (E) bileşenlerinin hesap uzayındaki lokasyonları (ijk) ile belirlenen 3-Boyutlu FDTD yönteminde aşağıdaki eşitlikle;

$$(i, j, k) = (i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z) \quad (2.92)$$

ile ifade edilebilir. Burada sıra ile x, y ve z yönündeki ağ alan artış miktarları ve ise tamsayılardır (Taflove ve Hagness, 2005).



Şekil 2.24 Elektrik ve manyetik alan vektör bileşenleri ile hesaplama ağı (Yee, 1966)

FDTD yönteminin sayısal modelleme çalışmalarında sıkça tercih edilmesinde yöntem konusunda birçok avantaj etkili olmaktadır. Bunlardan birkaçı ise; verimliliği yüksek bir yöntem olması, anlaşılabilir ve sade olması, kısmi diferansiyel denklem çözümünde kullanılan sayısal yöntemlerin en etkililerinden biri olmasıdır (Giannopoulos, 2005).

Söz konusu olan yöntemde, elektromanyetik alanlar mekan ve zaman ortamında ayrıklaştırılarak örneklenmektedir. Çözümü kararlı kılabilmek için örnekleme aralığı uygun bir şekilde seçilmelidir. Bahsedilen koşul ise Courant-Friedrichs-Lewy (CFL) koşulu olarak bilinmektedir (Elsherbeni ve Demir, 2016). Bu koşula göre, hesaplama alanı yeterli sayıda örneklenmesi gerekmektedir, hassas sonuçlar elde etmek için hesaplama aralıklarını (Δx , Δy , Δz) problemdeki en küçük dalga boyunu ($\lambda_{\min}$) aşmayacak şekilde seçmek gerekmektedir. Seçilecek olan maksimum zaman aralığı (Δt) sistemini kararlı kılabilmek amacı ile Δt ile Δx , Δy , Δz arasındaki ilişkiyi tanımlayan CFL koşuluna göre belirlenmektedir (Çiğdem ve Koç, 2014). Bu koşul

$$\Delta t \leq \frac{1}{c \sqrt{\frac{1}{(\Delta x)^2} + \frac{1}{(\Delta y)^2} + \frac{1}{(\Delta z)^2}}} \quad (2.93)$$

Burada c ; ışık hızını ifade etmektedir. Bu yöntemde, CFL koşulu en önemli kısıtlamalardan bir tanesidir. Boyut olarak küçük veya ince materyallerin çözümlenebilmesi amacı ile hücre ve zaman aralıklarının aynı oranda küçük seçilmesi gerekmektedir.

BÖLÜM ÜÇ

YÖNTEM & VERİ ANALİZİ

3.1 gprMax Yazılımı ile Model Oluşturma

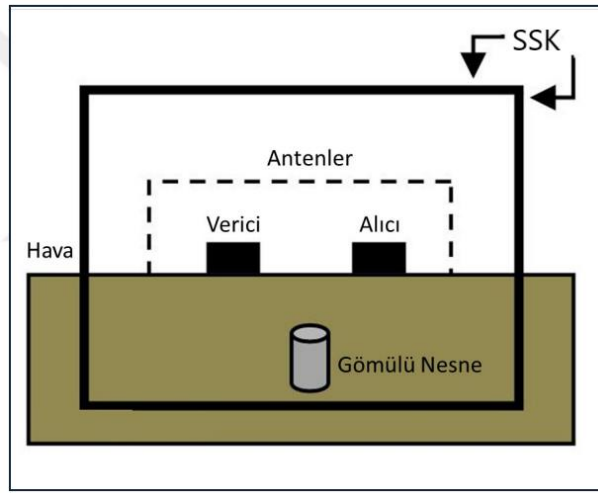
Çalışma kapsamında zaman ortamında sonlu farklar yöntemi kullanılarak elektromanyetik dalga yayılımının benzeri oluşturulmuştur bir diğer anlamda simule edilmiştir. Oluşturulacak olan modelde fiziksel parametrelerin değişimin sayısal olarak modellerden elde edilen yapay radargramlarda nasıl farklılıklar oluşturduğunu gösterilmesi amaçlanmıştır. Hem ortamın hem materyalin elektriksel iletkenlik, dielektrik farklılıkları ve manyetik geçirgenlik farklılığının hemde mevcut ortamdaki arkeolojik olarak farklı geometrik özelliklere sahip olan yapılardan oluşturacağı yansımaların genliklerinin, seyahat sürelerinin ve farklı frekanslara ait yapay radargramlar elde edilmiştir. Modelleme çalışmaları saha çalışmalarından önce yapılarak hem ortamın hem materyalin fiziksel özelliklerinin benzetiminin yapılması yorumlama açısından büyük katkı sağlamaktadır.

gprMax ile yeraltında bulunan materyalin radar yanıtı geometrisine ve fiziksel özelliklerine bağlı olmanın yanı sıra antenin frekansına da bağlı olmaktadır. Yüksek frekanslı antenler küçük dalga boyu üretirken düşük frekanslı antenler daha büyük dalga boyu ürettikleri için aranılacak materyalin boyutları ve anten frekansının ilişkisi irdelenmelidir. Bununla birlikte araştırma yapılacak alanda aranılacak olan materyalin boyutları, elektriksel iletkenliği, dielektrik geçirgenliği ve manyetik geçirgenliğindeki değişimler farklı radar yanıtları vermektedir.

Genelde FDTD'nin maxwell denklemlerinde sayısal olarak çözüme yaklaşması hem mevcut alanı hemde zamanı ayrıştırabilmektedir. Bu nedenle uzamsal olarak $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ ve Δt adımlarının küçük seçilebilmesi ile FDTD modelinin gerçek bir benzerine ulaşabilmesi olası olmaktadır. Bilgisayarda depolama ve işlem hızlarının sınırlı olması sebebiyle her aşamanın değerleri zamanla sınır olmaktadır. Gerçek bir sorunun ve sınıra sahip bir boyutun FDTD modelinin ayrıklaştırılmış bir versiyonunu temsil etmektedir.

Modelin sınırlarını oluşturulmasında ise soğurucu sınır koşulları(SSK) uygulanmıştır. Bir süreksizlik olması model sınırlarındaki kararsızlıkları ortaya

çıkarmamasına rağmen, yansıtıcı sınırlara nazaran genliklikleri yansıtmada çok daha az etkilidir. Sonlu farklar yöntemiyle elektromanyetik dalga yayılımı, model sınırları soğurucu kenar olarak genişletilmektedir. Mevcut soğrulma alanı içerisinde bulunan iletkenlik değeri ortamdaki mevcut değerden başlayarak devamlı bir şekilde en yüksek değere doğru artma gösterdiği düşünülmektedir. Böylelikle hem modelin sınırlarında (Şekil 3.1) gerçekleşebilecek gerçekte var olmayan yansımalar engellenmiş olacak hem de sonsuz alanın benzeri yapılmış olmaktadır.



Şekil 3.1 2-Boyutlu gprMax simülasyonu (Giannopoulos, 2005)

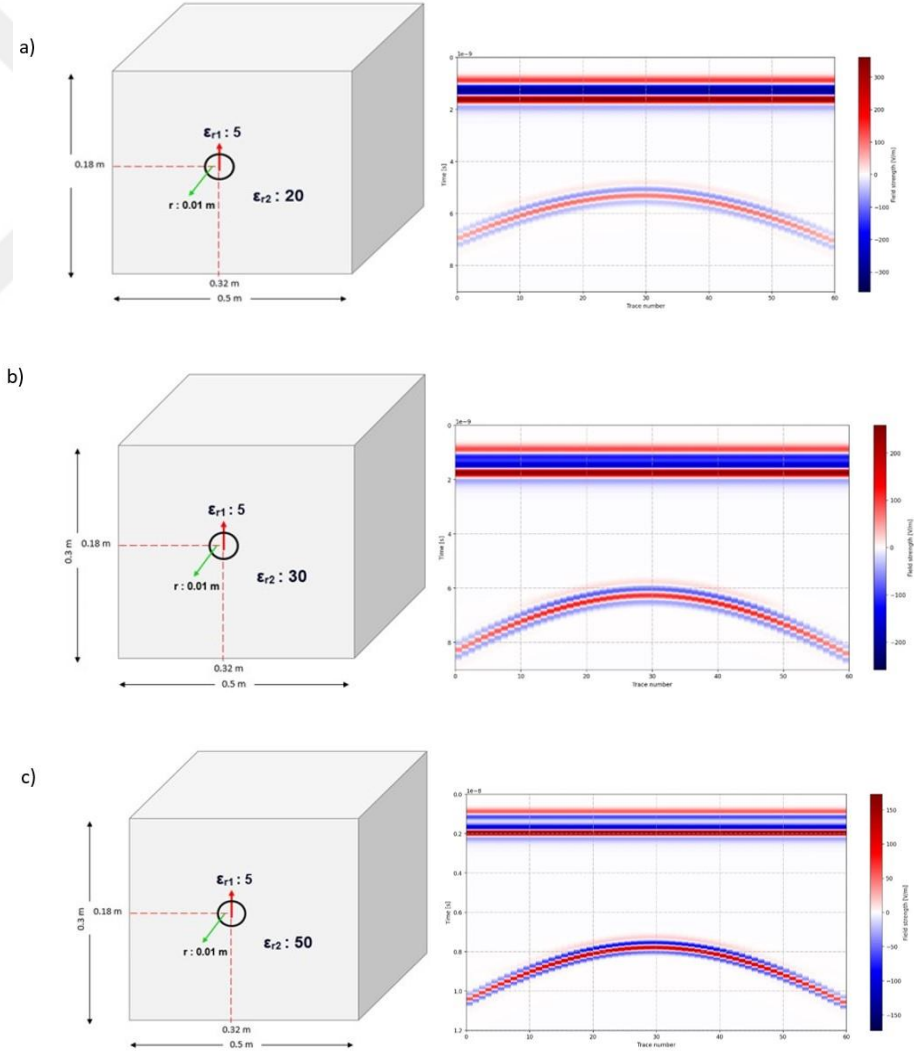
3.2 Oluşturulan Modeller

3.2.1 Bağlı Dielektrik Katsayısının (ϵ_r) Etkisi

Bağlı dielektrik geçirgenlik yer radarı dalgalarının iletiminde rol oynayan en önemli parametre olmasına ek olarak yerin elektrik özellikleri başlıca radar yanıtlarını etkileyen birinci etkindir. Bir materyalin bağlı dielektrik geçirgenliğinin o maddeye elektromanyetik enerji yüklendiği esnada enerjiyi depolayabilme ve sonrasında EM enerjinin iletimine izin verme kabiliyeti olarak tanımlanmaktadır. Bir maddeye ait dielektrik geçirgenliğin boşluğun dielektrik geçirgenliğine oranlanması ile o maddenin bağlı dielektrik geçirgenliği hesaplanabilmektedir.

Yer radarı uygulamalarında bir yansıma oluşabilmesi için yeraltındaki ortamların ve materyallerin elektriksel özellikleri arasında büyük bir zıtlık olması gerekmektedir. Arayüzeylerden yansıyan dalga'nın genliğinin büyümesi için bağlı dielektrik değerleri

arasında zıtlığın büyük olması gerekmektedir ancak zıtlığın düşük olması durumunda ise yansımaların genliği düşük olmaktadır. Bu modelde (Model-1) ise ortamın bağıl dielektrik geçirgenliği artırılmış olup belirlenen yapıların ise bağıl dielektrik geçirgenlik değerleri sabit tutulmuştur. Amaç ise hedeflenen yapının görünürlüğünü arttırılarak belirgin yansımaların elde edilmesidir. Bu sebeple ortamın dielektrik katsayıları sırayla ϵ_{r2} 20,30 ve 50 olarak seçilmiştir ve yapıların bağıl dielektrik geçirgenlik katsayısı ϵ_{r1} ise 3 olarak sabit tutulmuştur. Her üç durumda da iletkenlik değerleri $\sigma_1 = \sigma_2 = 0 \text{ Sm}^{-1}$, manyetik geçirgenlik değerleri ise $\mu_1 = \mu_2 = 1$ 'dir. 0.5 x 0.3 x 0.1 metre olarak seçilen x, y ve z boyutları seçilerek her bir hücrenin boyutu sırasıyla 0.01 x 0.01 x 0.01 olarak seçilmiştir ve modellerde 1.5 GHz'lik anten kullanılmıştır.



Şekil 3.2 Model 1'in a) $\epsilon_{r2}=20$ b) $\epsilon_{r2}=30$ c) $\epsilon_{r2}=50$ değerleri ile elde edilen yapay radargramları

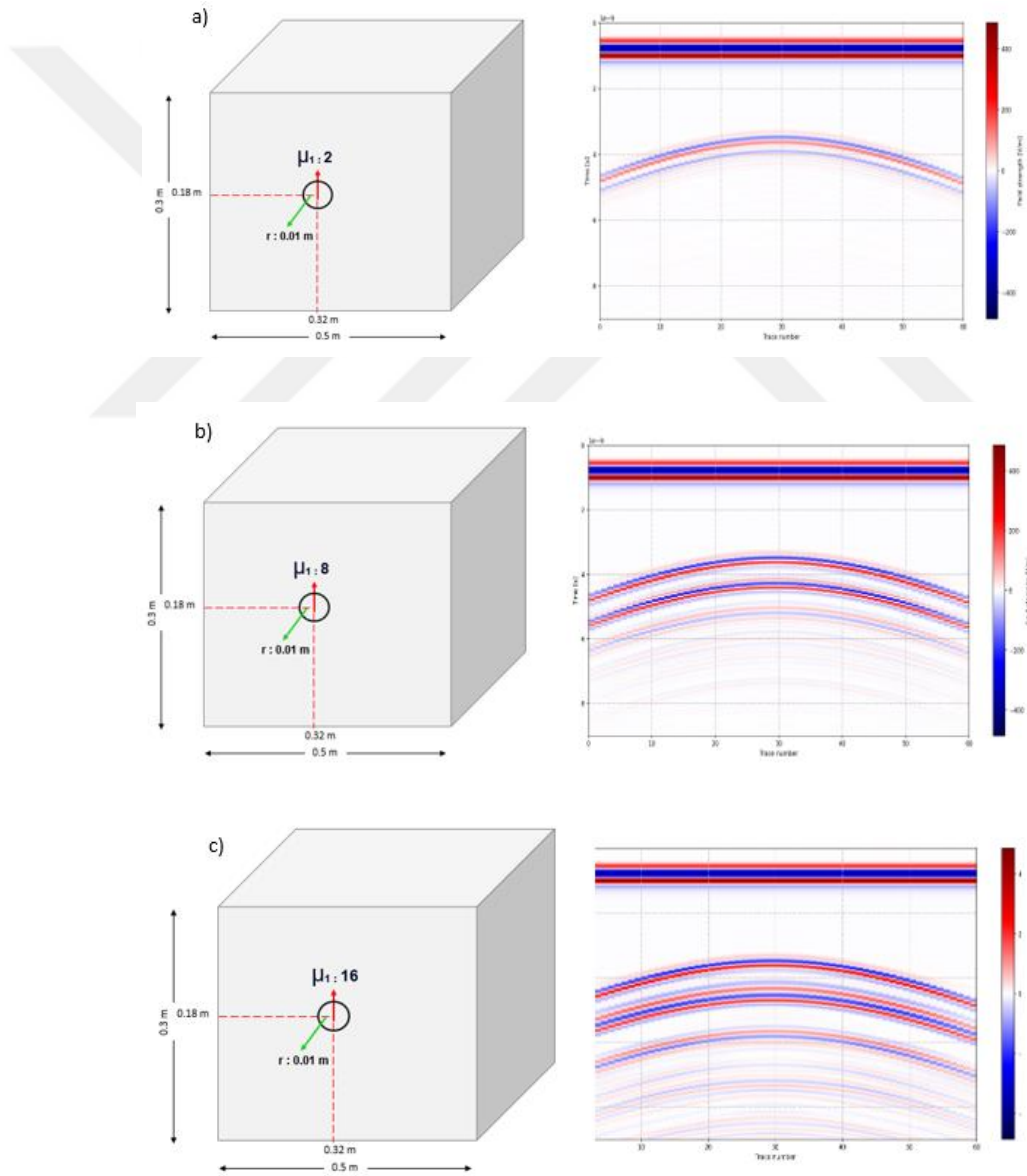
Yapıdan kaynaklı yansımaların yüzeye daha geç ulaşması, ortamın dielektrik geçirgenlik değerinin artması ile yer radarı dalgalarının ortamda daha yavaş bir hızda hareket etmesi ile açıklanabilmektedir. Yapının çevresini saran ortama ait bağıl dielektrik geçirgenlik katsayısından artış elde edilen hiperbollerdeki kolların daraldığı görülmektedir ve aynı zamanda bu artış ile radar dalgalarının ortam içerisinde daha fazla odaklandığı olarak yorumlanabilmektedir. Yüksek dielektrik geçirgenliğe sahip ortamda bulunan düşük dielektrik geçirgenliğe sahip model yapının üst sınırları daha belirgin olmaktadır. Çoklu yansımaları, yer radarı dalgalarının yüzeyde bulunan alıcı antende kaydedilmesinin öncesinde yeraltında bulunan aynı süreksizlikten bir defadan fazla yansımalarının meydana gelmesi ile oluşur. Bahsedilen yansıma genellikle gerçek yansımadan iki kat daha derinde olmaktadır. Yer radarı dalgalarının geometrik yayılımı, enerjisinin sönümlenmesi ve başka yansıtıcıların bozucu etkileri neden olması ile gerçek yansımalara göre zayıf genliktedirler (Conyers ve Goodman, 1997).

3.2.2 Bağıl Manyetik Geçirgenlik (μ) Etkisi

Elektrik yüklerin kapalı bir yol çevresindeki hareketi manyetik özellikleri oluşturur (von Hippel, 1954). Atomların yapı taşları spin adı verilen yörünge şeklinde bir dönüşe sahiptirler. Söz konusu hareket maddede bulunan moleküllerde ve atomlarında oluştuğunda, yükün dönüş hareketinin sonucunda dairesel şekle sahip bir akım döngüsü ortaya çıkmaktadır. Böylesi bir döngü manyetik dipol momentinin oluşmasına sebep olur (Annan, 2001).

Moleküllerin ve atomların manyetik dipol momentlerinin dizilebilme veya dışarıdan maruz bırakılan manyetik alandan etkilenmesinden başka biçimde hareket seviyesinin miktarı manyetik geçirgenlik olarak tanımlanmaktadır. Maddenin dielektrik geçirgenliğinde de olduğu gibi, maddeye ait manyetik geçirgenliğin boşluğa ait manyetik geçirgenliğe oranı bağıl manyetik geçirgenliği (μ) ifade etmektedir. Manyetik dipol momentinin diziliminin değiştirilmesi ve uygulanan manyetik alanın yönünde sıralanması için ortamda bulunan bir manyetik alan tarafından indüklenmesi gerekmektedir. Genel olarak, mevcut manyetik alana verilen bu cevaplar zayıf kalmaktadır ve çok fazla etkiye sahip olmamaktadırlar. Elektriksel özellikler manyetik özelliklere göre daha fazla etkiye sahiptir.

Bu bölümde ise ortama ait manyetik geçirgenlik değerleri sabit tutulmuş olup model olarak kullanılan yapının dört adet farklı manyetik geçirgenlik değerleri kullanılmıştır. Modeldeki yapının bağıl manyetik geçirgenlik değerinin artması ve ortamın bağıl manyetik geçirgenlik değerinin sabit kalması başka bir anlamda aralarında zıtlığın artışı ile yapıların saptanabilirliği üzerindeki etkisi görülmektedir. Model 2’ de ortam için $\mu_2=1$ ve model yapı için (μ_1) sırasıyla 2, 8 ve 16 değerleri ile 3 farklı yapay radargram elde edilmiştir (Şekil 3.3). Ortamın bağıl dielektrik geçirgenliği ϵ_{r2} 10, modelin ise (ϵ_{r1}) 4 ve ortam ve yapının elektrik iletkenlik değerleri $\sigma_1 = \sigma_2 = 0 \text{ Sm}^{-1}$ seçilmiştir.



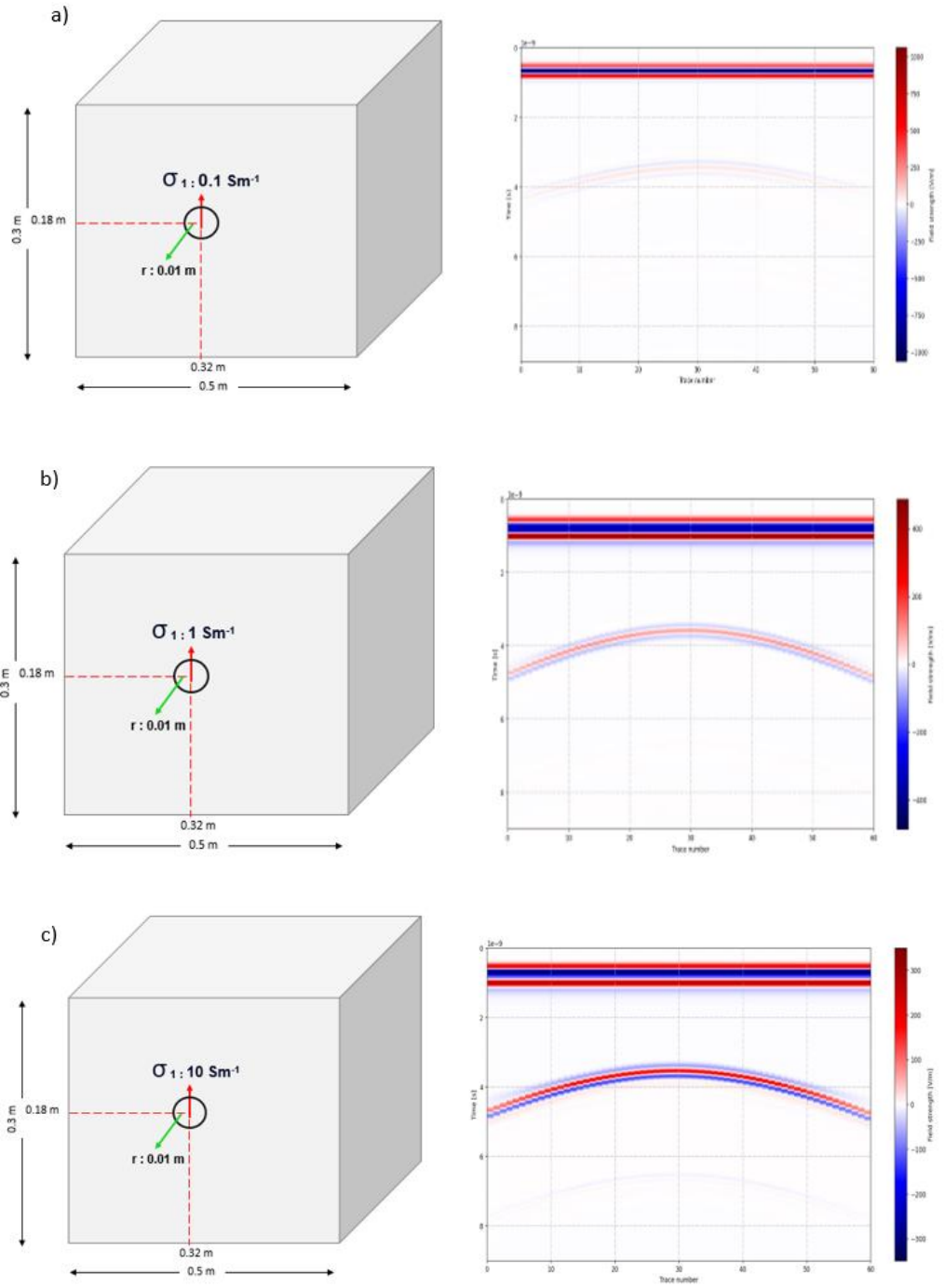
Şekil 3.3 Model 2’ in a) $\mu_1 = 2$ b) $\mu_1 = 8$ c) $\mu_1 = 16$ değerleri ile elde edilen yapay radargramları

Yapının üst kısmından kaynaklandığı düşünülen belirgin yansımalar elde edilen yapay radargramlarda ortaya çıkmaktadır. Yapay radargramda oluşan hiperbollerin kanatlarının bağıl manyetik geçirgenlik değeri arttıkça daha da ortaya çıktığı görülmektedir. Özellikle $\mu_1 = 8$ ve $\mu_1 = 16$ için oluşturulan yapay radargramlarda yapının sınırından kaynaklanan yansımalar diğer modellere göre daha yüksek genlikle ortaya çıktığı görülmektedir. Ancak bağıl manyetik geçirgenliğin artması radargramlarda çoklu yansıma sayısında artışa sebep olmaktadır.

3.2.3 Elektriksel İletkenlik (σ) Etkisi

EM enerjiyi saçan ortamlar elektriksel iletkenliği olan ortamların içerisindeki serbest yüklü parçacıkların varlığı ile açıklanır. Bahsedilen ortamlara nüfuz eden EM enerji, EM alanın elektrik alan bileşeninin ortamdaki manyetik alan bileşeninden kopup enerjisinde farklılık olması nedeni ile, saçılarak daha hızlı bir biçimde sönmelenmektedir. Elektromanyetik dalgalar bu ortamlarda fazla ilerleyemezler. En büyük EM enerjinin daha derine inmesi için ortamın düşük elektrik iletkenlik değerine sahip olmalıdır. Ortamın ve yapının dielektrik geçirgenlik değerleri farkı ise büyük olmalıdır (Annan, 2001).

Bir önceki modelde olduğu gibi küre modelinin lokasyonu ve boyutu değişmeden yalnızca elektrik iletkenlik değeri artırılarak, yapının iletkenliğinin bu artış doğrultusunda yapay radargram üzerinde nasıl bir etki yarattığı gözlemlenmek istenmiştir. σ_1 sırasıyla 0.1, 1 ve 10 değerleri seçilerek modeller oluşturulmuştur. Ortamın ve modelin bağıl manyetik geçirgenlik değerleri $\mu_1=\mu_2=1$ seçilmiştir. Ortamın bağıl dielektrik geçirgenliği (ϵ_{r1}) 10, modelin ise (ϵ_{r2}) 4' dür.



Şekil 3.4 Model 3'ün a) $\sigma_1=0.1 \text{ S/m}^{-1}$ b) $\sigma_1=1 \text{ S/m}^{-1}$ c) $\sigma_1=10 \text{ S/m}^{-1}$ değerleri ile elde edilen yapay radargramlar

Model yapının sentetik radargramlarda görünür hale gelmesinin başlıca nedeni elektrik iletkenlik değerindeki artış olmaktadır ve yapı sınırı daha belirgin ortaya

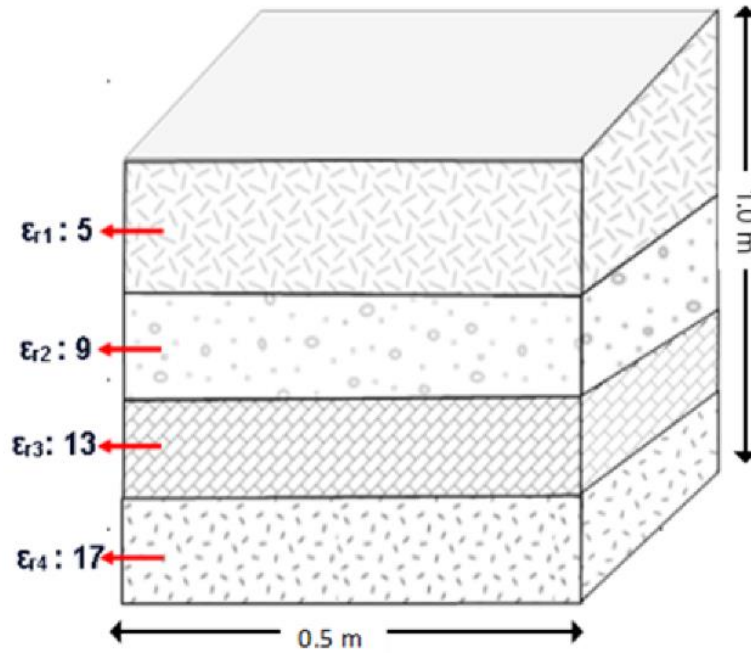
çıkmaktadır. Ortamlar arası iletkenlik zıtlığının artışı ile tekrarlı yansımalarda görünür hale gelmektedir (Şekil 3.4).

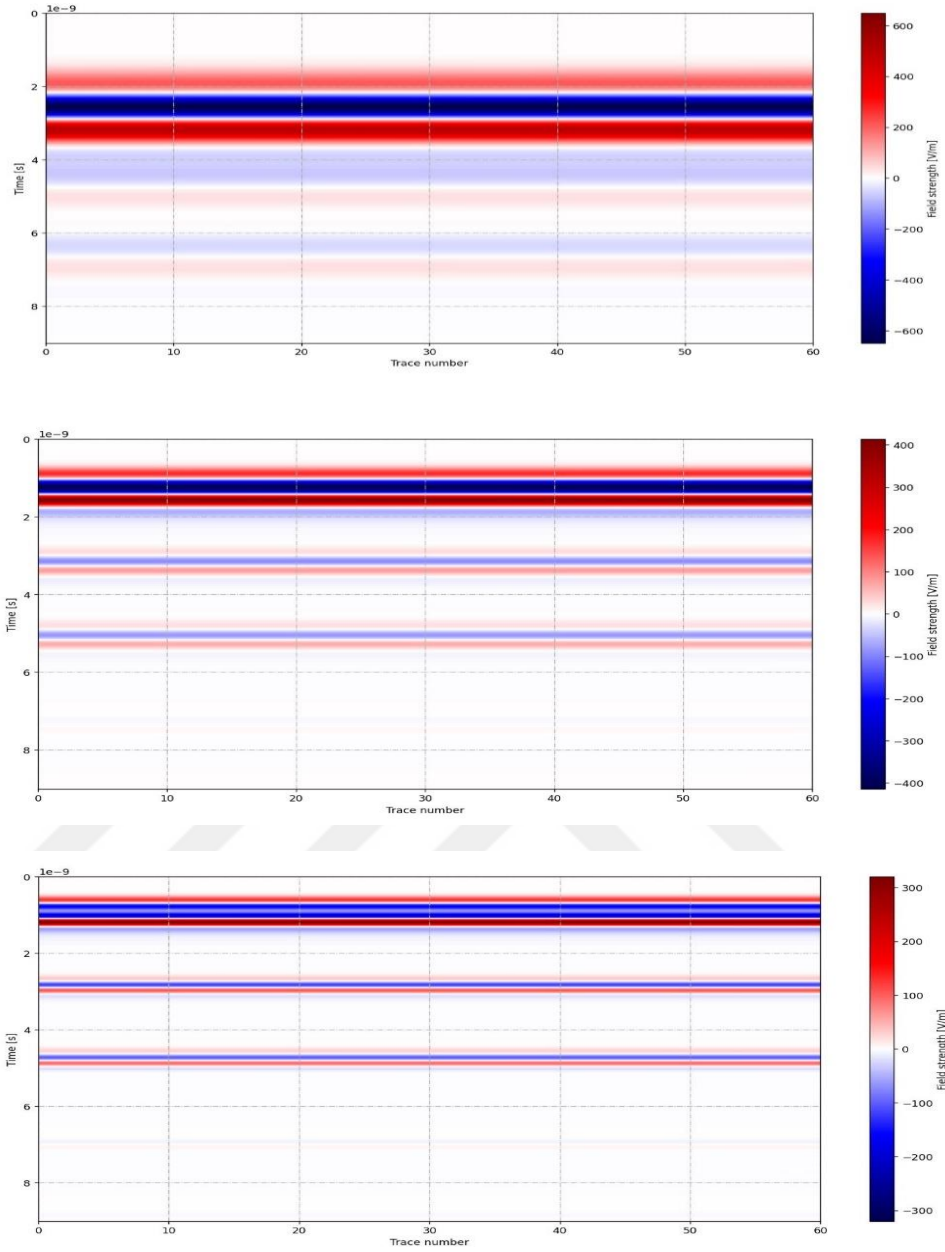
3.2.4 Yatay Süreksizlikler, Farklı Anten, Derinlik ve Geometrik Modeller

Bu kısımda yer radarı uygulamalarında karşılaşılan farklı dielektrik özelliklere sahip yatay süreksizlikleri saptayabilme durumuna ortaya çıkarmak için modeller oluşturulmuştur. Benzer şekilde arkeolojik alanlarda aranılacak olan yapı ile etrafını çevreleyen ortamın fiziksel özellik farklılıkları yer radarı uygulamalarında saptanabilmesi olanaklı olmasının yanı sıra elde edilecek yansımaların özellikleri anten frekansı ile ilişkilidir.

3.2.4.1 Yatay Süreksizlikler ve Farklı Antenler

Seçilen modelde dört adet yatay süreksizliklerin sahip olduğu bağıl dielektrik geçirgenlik değerlerinin derinlikle artmasının yapay radargramlarda nasıl yanıt verdiği elde edilmek istenmektedir. Bu sebeple 500 MHz, 800 Mhz ve 1.2 GHz frekansa sahip antenlerle üç farklı model üretilmiştir. Her bir modeldeki yatay süreksizliklerin sahip olduğu dielektrik değerleri ilk tabakadan başlayarak sırasıyla 5, 9, 13 ve 17 (ϵ_r) değerleri girilmiştir. Modeldeki yatay süreksizliklerin bağıl manyetik geçirgenlik değeri 1 ve iletkenlik değeri 0 Sm^{-1} olarak belirlenmiştir (Şekil 3.5).





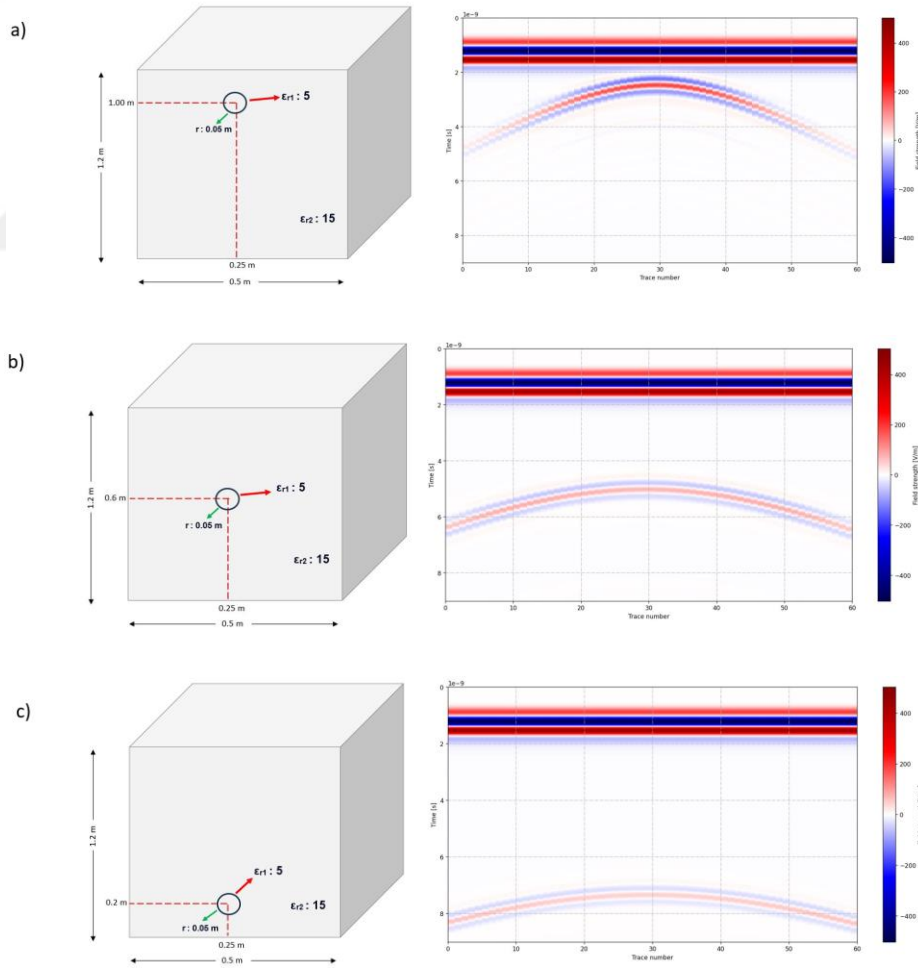
Şekil 3.5 Model 4'ün a) 500 MHz b) 800 MHz c) 1.2 GHz anten frekansları kullanarak 4 adet yatay süreksizliklerden elde edilen yapay radargramlar

Yapay olarak elde edilen radargramlar incelendiğinde anten frekansı arttığında çözünürlüğün arttığı ancak dalga boyundan kaynaklı olarak penetrasyon derinliğinin azaldığı gözükmemektedir. Aynı şekilde anten frekansı azaldıkça penetrasyon derinliği artmakla birlikte küçük boyutları sahip materyallerin saptanabilmesi olası olmamaktadır. Yatay süreksizlikler düşük frekanslı anten kullanımında Şekil 3.5'te görüleceği üzere sığ derinliklerde belirginliği azalmaktadır.

3.2.4.2 Farklı Yapı Derinlikleri

GPR uygulamalarında yapıların fiziksel özelliklerinin dışında yeraltından yüzeye olan uzaklıkları da büyük önem taşımaktadır. Uygulamalarda kullanılan yüksek frekansa sahip antenler ile yüksek çözünürlüğe sahip görüntüler elde edilebilmektedir ve santimetre mertebesinde bilgi alınabilmektedir. Farklı derinliklerdeki yapılara ait bilgilerin alınmasında ise aranacak olan yapının boyutu ve derinliği ile kullanılacak anten doğrudan ilişkili olmaktadır.

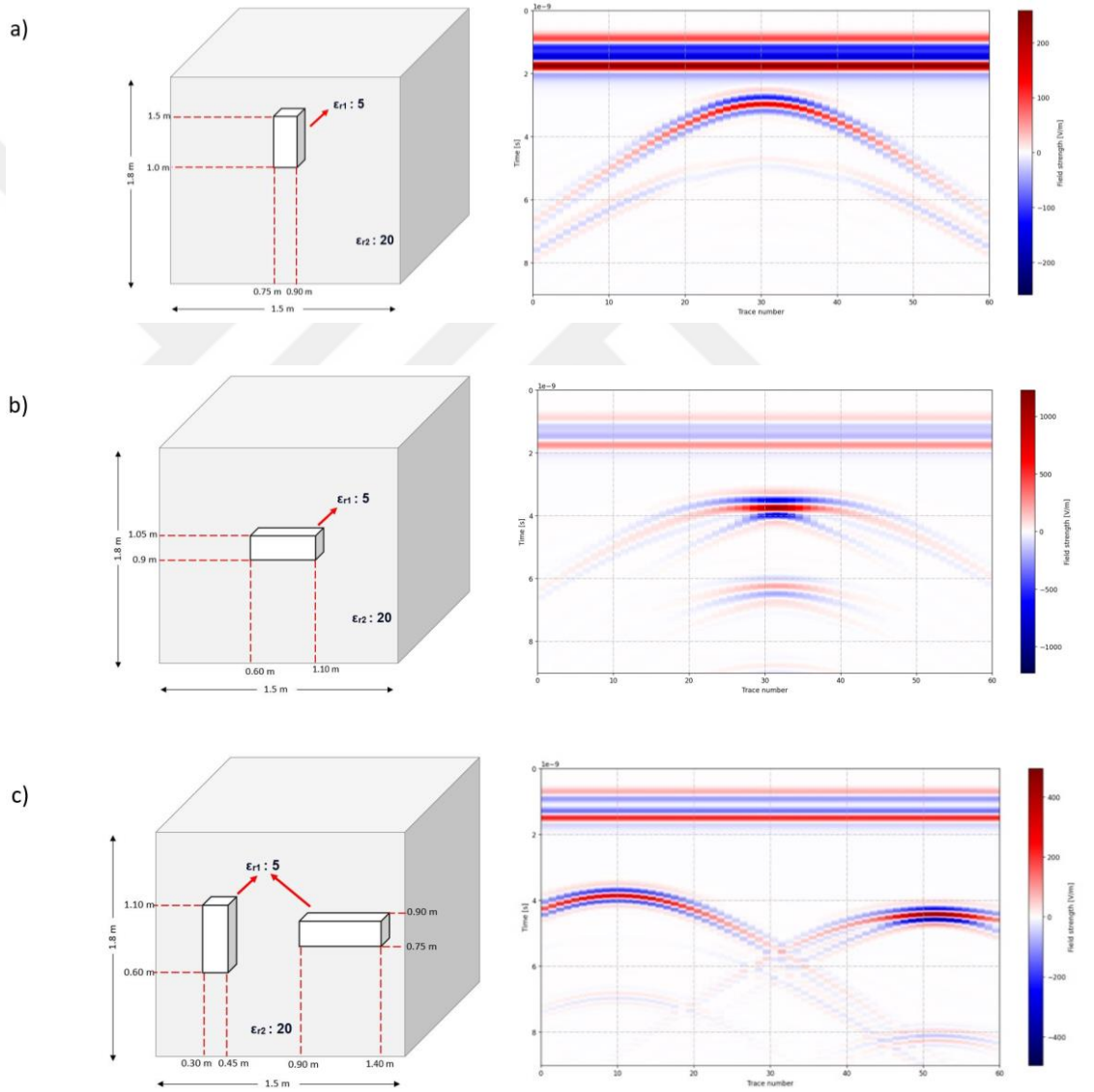
Bu bölümde ise; ortamın ve küre yapının fiziksel özellikleri değiştirilmeyip yer yüzeyine olan mesafesi değiştirilmiştir. Yapının bulunduğu derinlik sırası ile; 8-18 ve 28 cm'dir. Yapının fiziksel özellikleri sabit iken, derinlik değişiminin yapay radargram üzerindeki değişimlerinin gözlemlenmesi amaçlanmıştır.



Şekil 3.6 Model 5'in a) 20 cm b) 60 cm c) 100 cm derinliklere sahip yapıdan elde edilen yapay radargramlar

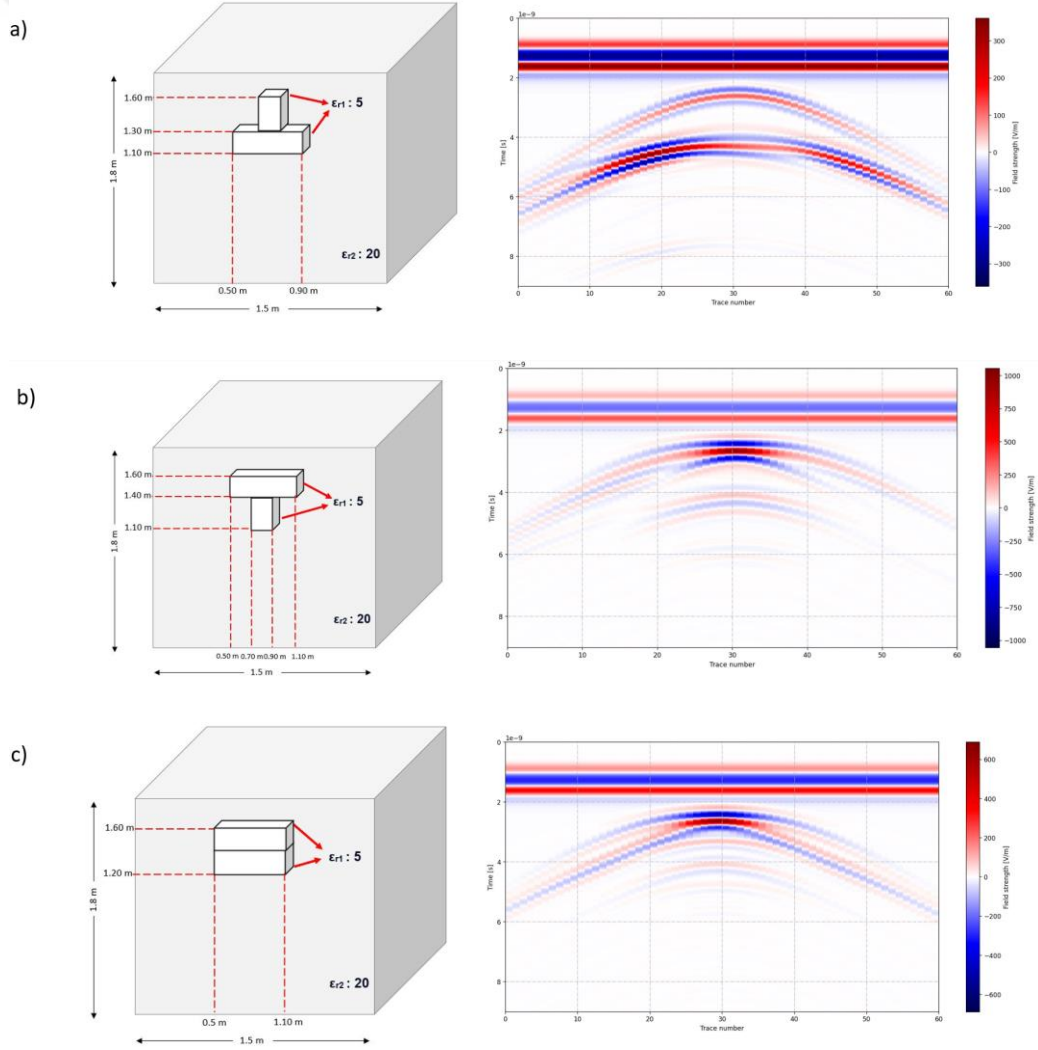
3 farklı derinlik değeri için oluşturulan yapay radargramlar Şekil 3.6’da gösterilmiştir. Radargramlar incelendiğinde ise; en belirgin hiperbolün Şekil 3.6a’da olduğu gözlenmektedir. Yapının yüzeye olan uzaklığı arttıkça üst sınırdan kaynaklanan anomalinin genliği azalmaktadır. Derinliğin artması ile birlikte hiperbolün kanatları yataya doğru yaklaşmaktadır. Sonuç olarak yapının derinlik ile değişimi anomalinin genliğinde azalmaya ve zor tanımlanmasına neden olmaktadır.

3.2.4.3 Farklı Geometrik Modeller



Şekil 3.7 Model 6’nın a) dikey yapı b) yatay yapı c) dik ve yatay yapılar kullanılarak oluşturulan farklı geometrik yapılardan elde edilen yapay radargramlar

Seçilen modellerde genellikle arkeolojik alanlarda karşılaşılan farklı geometrik yapıların benzetimleri yapılmıştır. şekil 3.7'nin a şıkkında dik yapının üç ve alt sınırından yansıyan dalgalar açıkça görülmektedir. Bu model dik bir sütun veya bir duvar kalıntısı olarak düşünölebilir. B şıkkında ise olası yatay bir yapı oluşturulmuştur. Yapının üç sınırı a şıkkındaki modelden daha geniş olduğundan hiperbolün kanatları daha da açılmaktadır ve alt sınırdan yansıyan dalgalar görülmektedir. C şıkkında ise hem dik hem yatay yapının yan yana bulunması düşünölererek bir model oluşturulmuştur. Dik yapı bir sütun ya da duvar yapısı olarak yatay yapı yıkılmış bir duvar ya da devrilmiş bir sütun olarak düşünölebilir. Bahsedilen modelde yapılardan kaynaklanan hiperbollerin kanatları birbirine geçmekte ve yapıların birbirlerinden uzaklıkları böylesi durumlarda belirleyici olmaktadır.



şekil 3.8 Model 7'nin a) üç üşte dik ve yatay yapı b) üç üşte yatay ve dik yapı c) üç üşte iki yatay yapılar kullanılarak oluşturulan farklı geometrik yapılardan elde edilen yapay radargramlar

Bu modelde ise üst üste duran yapılar farklı geometrik şekillerdeki yapılar kullanılarak yapay radagramlar elde edilmiştir. Şekil 3.8 a şikkında üst üste duran dik ve yatay yapıların oluşturdukları hiperboller görünmektedir. Yapıların genişliklerinin farklılıkları sebebi ile oluşan hiperbollerin karakterleri farklıdır. Buna göre dik yapının hiperbolünün kanatları yatay yapıdan daha dar olduğu görünmektedir. B şikkında ise üst üste bir yatay ve dik yapı kullanılarak elde edilen yapay radagram incelendiğinde ise yapıların üst sınırları belirgin olarak görünmektedir. A şikkı ile b şikkında yer alan yapay radagramlar karşılaştırıldığında ise yatay olan yapının kanatlarının daha geniş dikey olan yapının hiperbolünün kanatlarının daha dar olduğu her iki şekilde de görünmektedir. C şikkında ise üst üste yatay yapı kullanılarak elde edilen yapay radagramlar incelendiğinde aynı boyutta yapılar olmasından dolayı hiperbollerin karakterleri birbirine benzemekte ve bu nedenle üst yapı alt yapıdan gelen yansımaları bastırmıştır. Elde edilen yapay radagramlarda yapı sınırlarında oluşan yansımalar farklı şekilli yapıların geometrik özelliklerini taşıdığını göstermektedir. Yapıların birbirlerine olan konumları, fiziksel özellikleri ve uzanımları oluşan hiperbollerin karakterlerinin yorumlanmasında oldukça önemlidir. Bu durumlara bakılarak birbirlerini baskılaması ve görünürlüklerini azaltmaları mümkün olmaktadır.

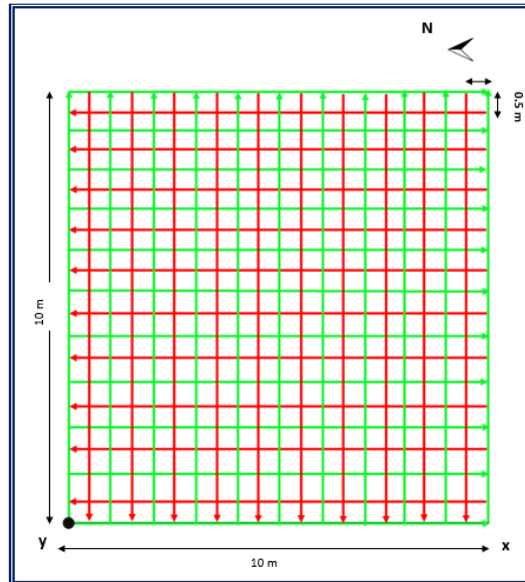
3.3 Saha Çalışmaları

Yassitepe’de çağlar boyunca gelişerek devam eden kültürel sürecin ardında, İzmir’in coğrafi avantajlarının yanı sıra, Anadolu ve Ege toplulukları arasında süren siyasi ve ticari ilişkilerin gelişiminde de önemli bir rolü vardır. 2005 yılındaki ilk keşfin ardından 2010 yılında Yeşilova Höyüğü kazı ekibi tarafından başlatılan ilk kazılarla dört farklı kültür sürecini içeren 14 tabaka ortaya çıkartılmıştır (Derin, 2022). Yassitepe höyüğünde farklı arkeolojik dönemlere ait kalıntılar bulunmaktadır. Höyükte yapılan yer radarı çalışmaları toplam 2 alan olmak üzere 10x10 metrelik karelej şekilde ölçüler alınmıştır (Şekil 3.9).



Şekil 3.9 Çalışma sahasının uydu görüntüsü

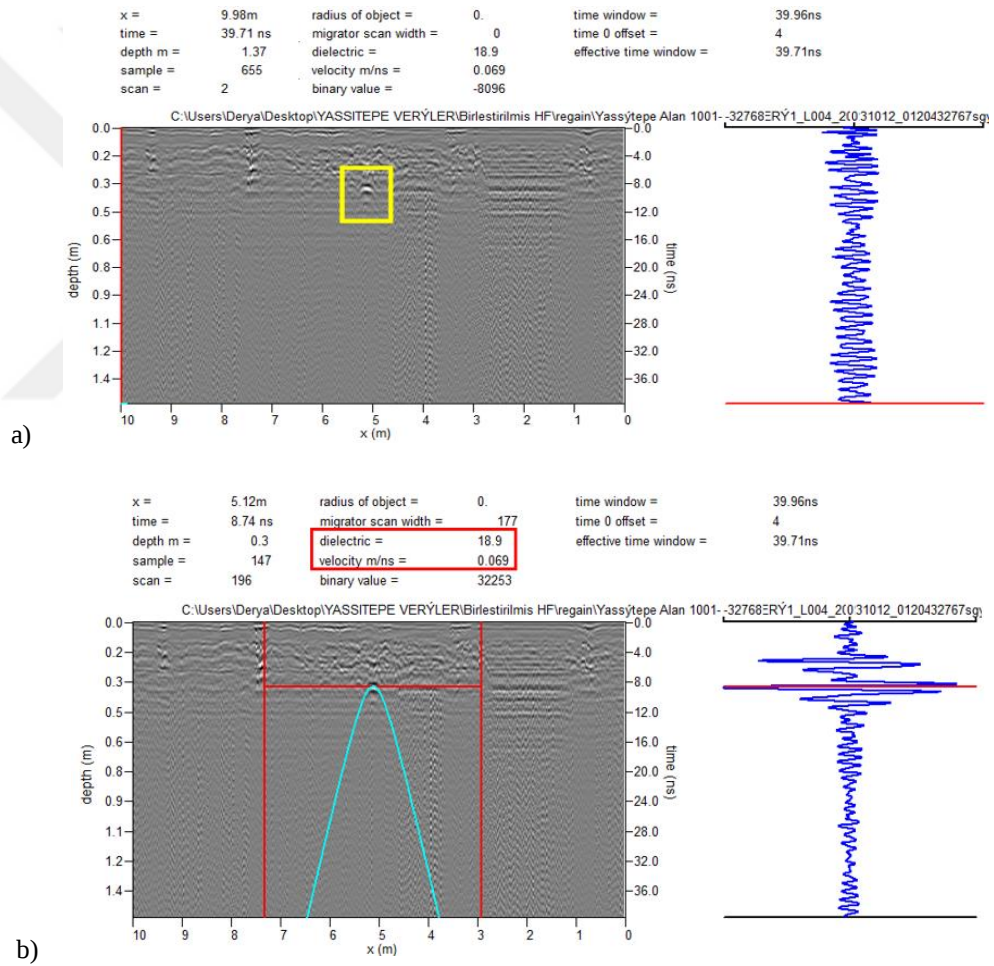
Saha çalışmaları Proceq marka GS8000 model 40-3440 MHz modüle edilmiş frekans aralığında ölçü toplayan yer radarı ile gerçekleştirilmiştir. Ölçüm toplanan her iki alanda da farklı yönlerdeki uzanımları tespit edilebilmek amacı ile x ve y yönlü (kuzey-güney ve doğu-batı) ölçüler toplanmıştır. Toplamda 42 adet kuzey-güney doğrultulu 42 adet ise doğu-batı doğrultulu ölçüler alınmıştır ve iki alanda da x ve y yönlü profil aralığı 0.5 metre olarak seçilmiştir (Şekil 3.10).



Şekil 3.10 Doğu-batı ve kuzey-güney doğrultulu profillerin kroki üzerinde gösterimi

3.3.1 Radargram Analizi

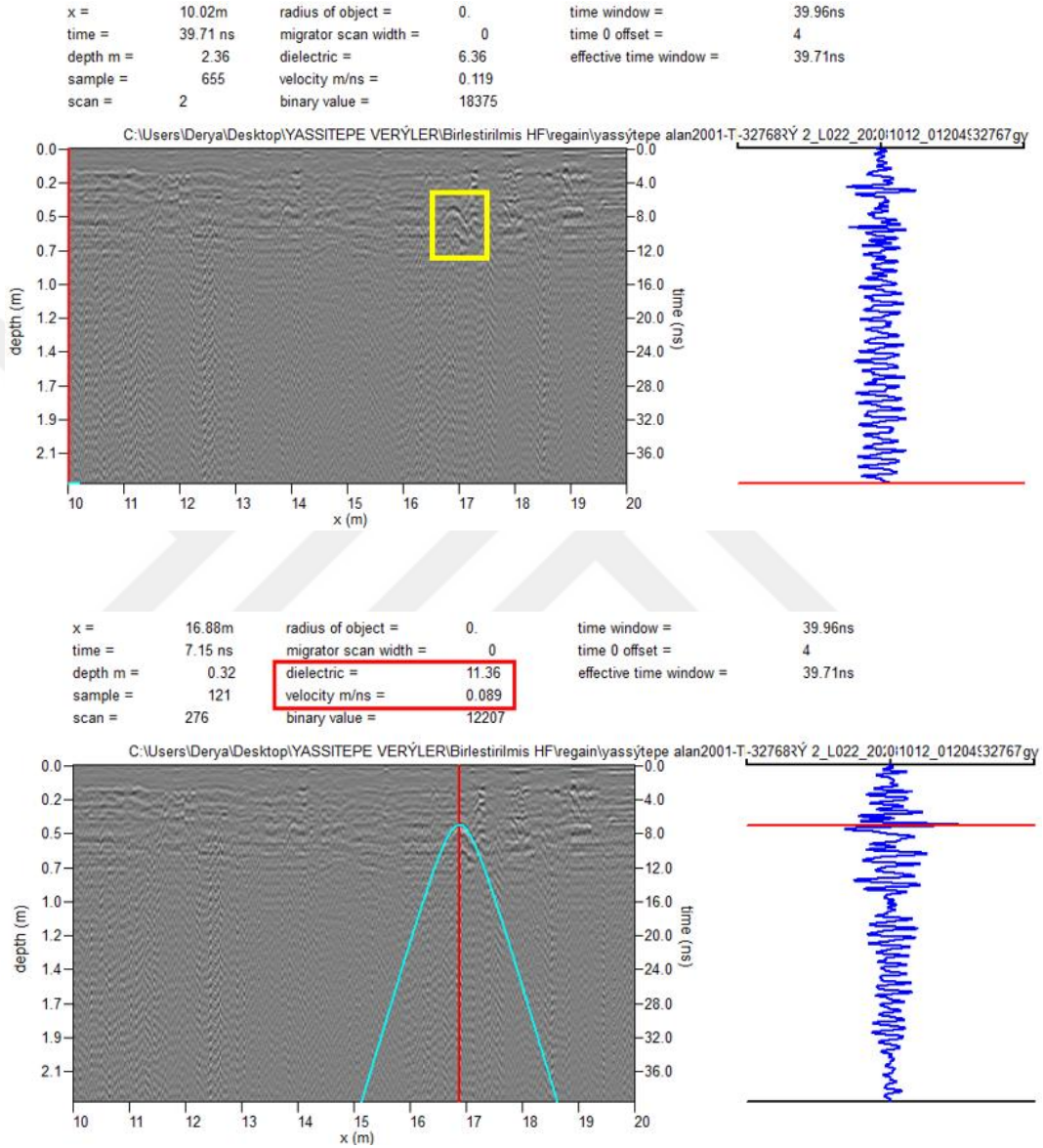
Düşey zaman eksenini derinlik eksenine dönüştürmek için ortamın EM dalga hızının belirlenmesi Hız Analizi işlemidir. Bu amaçla radargramlar üzerindeki hiperbollerden yararlanılmaktadır. Saçılma hiperbollerini varış zaman denklemindeki hız değerine hız atamaları yapılarak hiperbol çakıştırma işlemi ile gerçekleştirilmektedir. Doğru hız bulunduğunda oluşturulmuş olan yapay hiperbol ile radargram üzerindeki hiperbol çakışmış olur (Kadioğlu 2006, Koralay ve Kadioğlu, 2007). Tespit edilen anomalilerin tanımlanabilmesi amacı ile EM hız değerlerinden ve dielektrik değerlerinden faydalanılarak radargram analizleri yapılmaktadır.



Şekil 3.11 Alan-1 a) 4. profile ait radargram b) Eğri çakıştırma işlemi yapılmış olan radargram

Saha çalışmaları sonucunda Alan 1'den elde edilen radargramda 4. Profilde ortamdaki farklı özelliğe ait materyalin oluşturduğu hiperbolün yani olası yapının

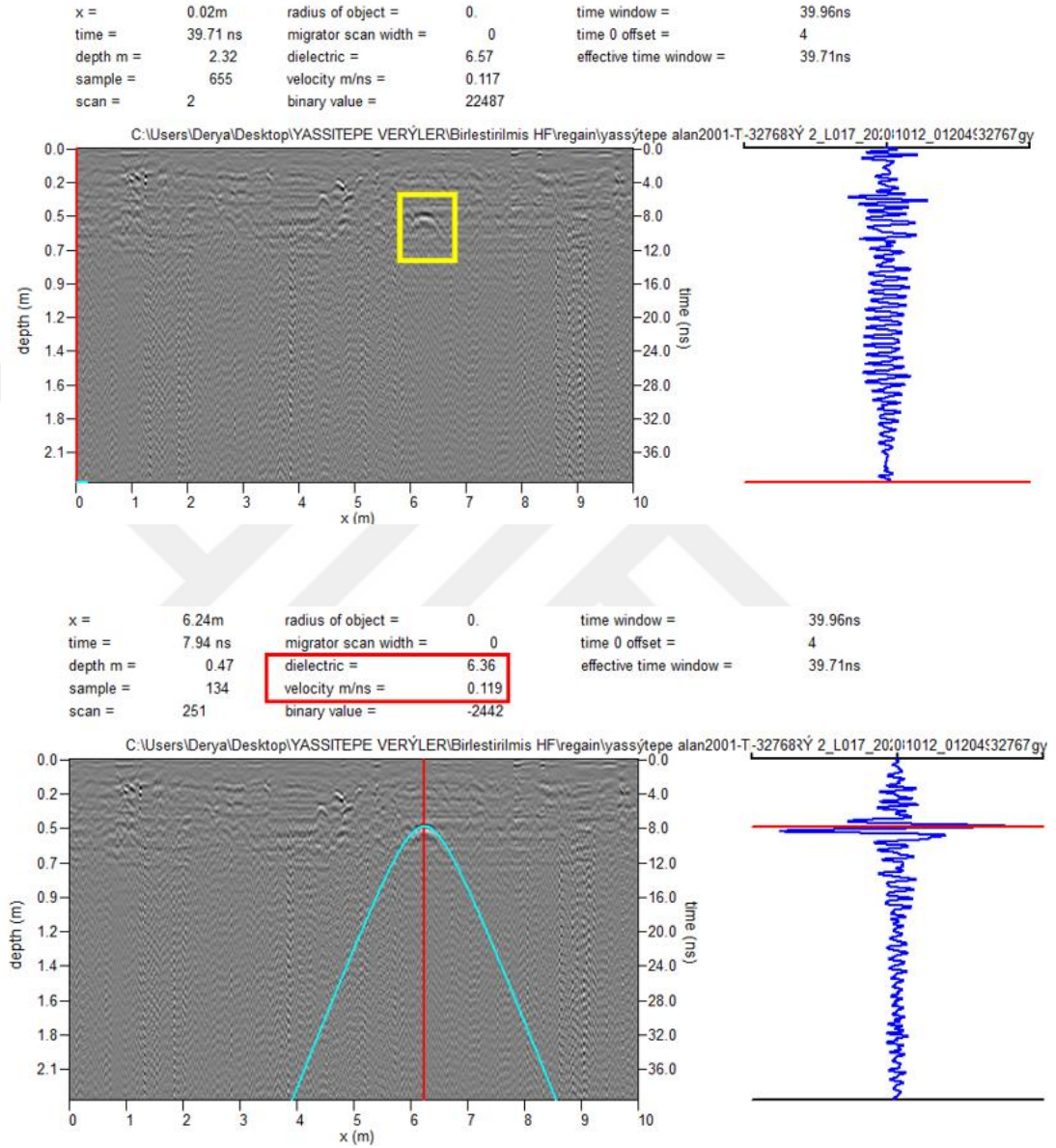
derinliği, hızı ve bağıl dielektrik geçirgenlik değerleri belirlenmek üzere eğri çakıştırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Yapılan analiz sonucunda olası yapının derinliği 0.3 m, EM hız değeri 0.069 m/ns ve bağıl dielektrik geçirgenliği 18.9 olarak saptanmıştır.



Şekil 3.12 Alan-2 a) 22. profile ait radargram b) Eğri çakıştırma işlemi yapılmış olan radargram

Saha çalışmaları sonucunda Alan 2'den elde edilen radargramda 22. Profilde ortamdaki farklı özelliğe ait materyalin oluşturduğu hiperbolün yani olası yapının derinliği, hızı ve bağıl dielektrik geçirgenlik değerleri belirlenmek üzere eğri

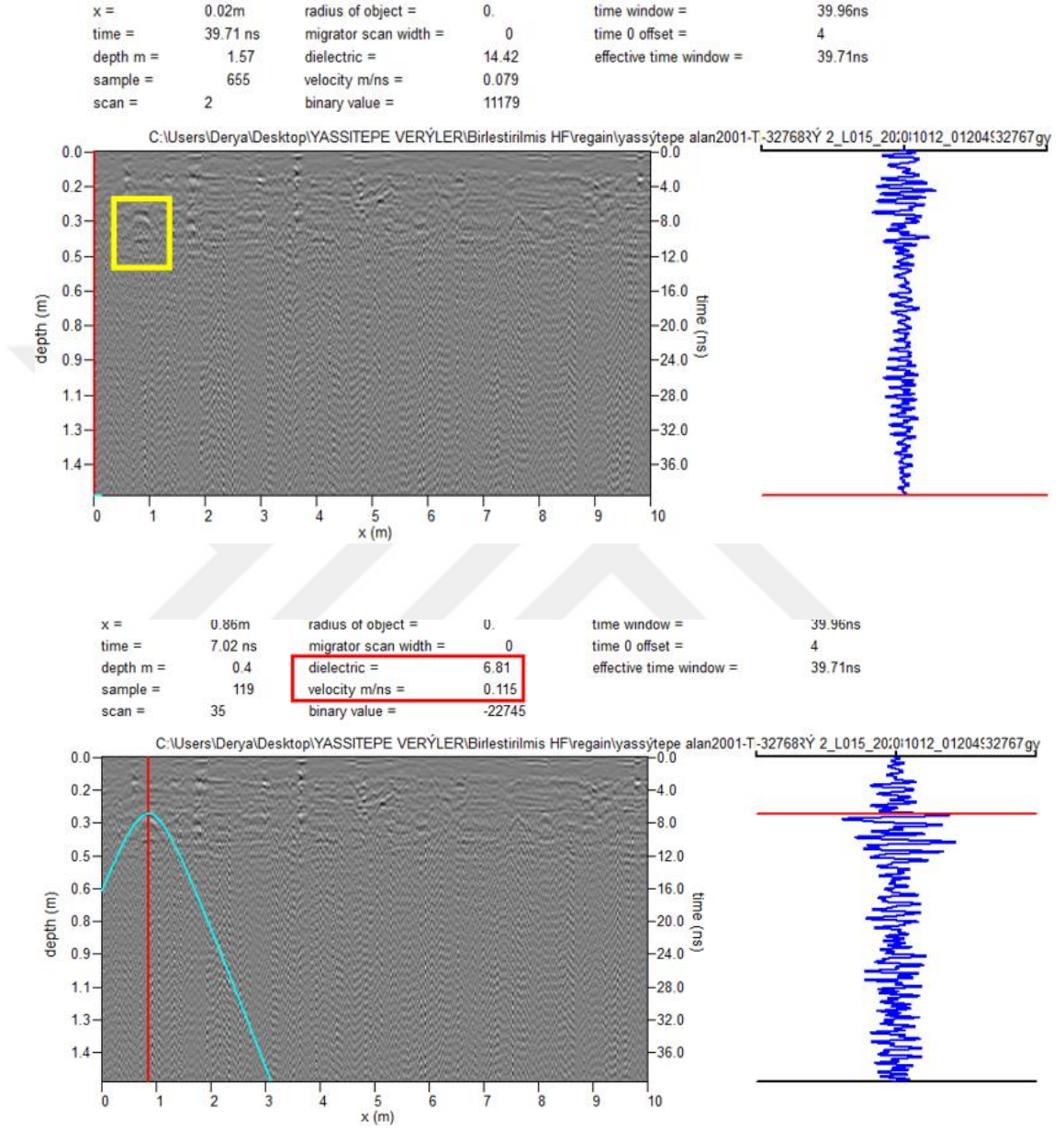
çakıştırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Yapılan analiz sonucunda olası yapının derinliği 0.32 m, EM hız değeri 0.089 m/ns ve bağıl dielektrik geçirgenliği 11.36 olarak saptanmıştır.



Şekil 3.13 Alan-2 a) 17. profile ait radargram b) Eğri çakıştırma işlemi yapılmış olan radargram

Saha çalışmaları sonucunda Alan 2'den elde edilen radargramda 17. Profilde ortamdaki farklı özelliğe ait materyalin oluşturduğu hiperbolün yani olası yapının derinliği, hızı ve bağıl dielektrik geçirgenlik değerleri belirlenmek üzere eğri çakıştırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Yapılan analiz sonucunda olası yapının derinliği

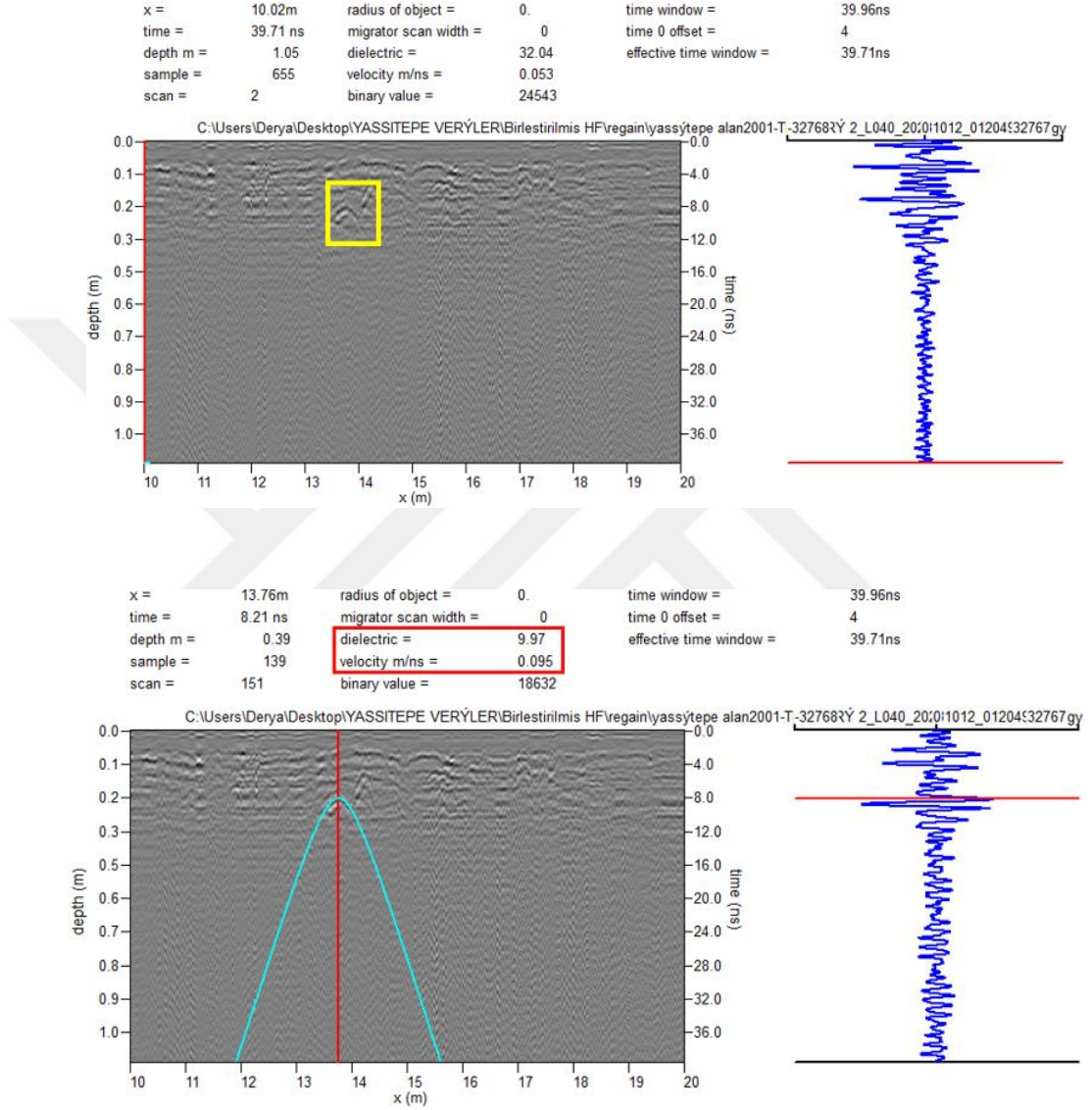
0.47 m, EM hız değeri 0.119 m/ns ve bağıl dielektrik geçirgenliği 6.36 olarak saptanmıştır.



Şekil 3.14 Alan-2 a) 15. profile ait radargram b) Eğri çıkıştırma işlemi yapılmış olan radargram

Saha çalışmaları sonucunda Alan 2'den elde edilen radargramda 15. Profilde ortamdaki farklı özelliğe ait materyalin oluşturduğu hiperbolün yani olası yapının derinliği, hızı ve bağıl dielektrik geçirgenlik değerleri belirlenmek üzere eğri

çakıştırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Yapılan analiz sonucunda olası yapının derinliği 0.4 m, EM hız değeri 0.115 m/ns ve bağıl dielektrik geçirgenliği 6.81 olarak saptanmıştır.



Şekil 3.15 Alan-2 a) 40. profile ait radargram b) Eğri çakıştırma işlemi yapılmış olan radargram

Saha çalışmaları sonucunda Alan 2'den elde edilen radargramda 40. Profilde ortamdaki farklı özelliğe ait materyalin oluşturduğu hiperbolün yani olası yapının derinliği, hızı ve bağıl dielektrik geçirgenlik değerleri belirlenmek üzere eğri çakıştırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Yapılan analiz sonucunda olası yapının derinliği

0.39 m, EM hız değeri 0.095 m/ns ve bağıl dielektrik geçirgenliği 9.97 olarak saptanmıştır.

Elde edilen bağıl dielektrik geçirgenlik değerleri 6.36 - 18.9, EM hız değerleri 0.069 - 0.119 m/ns, derinlikleri ise 0.3 – 0.47 m aralığındadır yani olası yapılar sığ derinliklerdedir. Tablo 2.1 ve 2.2'ye bakılıp elde edilen bağıl dielektrik geçirgenlik ve EM hız değerleri karşılaştırılırsa birçok farklı maddeye ait olduğu görünmektedir. Mevcut arkeolojik alanda önceki çalışmalardan elde edilen buluntuların ocaklar, kerpiçten aletler, fırınlar, çömlekler, testi ve çanaklar, iri küpler, andezit ve bazalttan taşlar vb. gibi farklı materyallere ait olmasından dolayı bu değer aralıklarının elde edilmesi mevcut saha için olasıdır. Saha çalışmaları sonucunda elde edilen radargramlardaki hiperbollerin farklı bağıl dielektrik değerlerine sahip, değişik geometrik şekilli yapıların ve farklı konumlarda bulunan materyallerden elde edildiği gözlemlenmektedir. Bunun doğrultusunda gprMax yazılımı kullanılarak oluşturulan modellerden elde edilen yapay radargramlarda bulunan hiperboller ile saha çalışmaları sonucunda elde edilen radargramlardaki hiperbollerin uyumlu olduğu gözlemlenmektedir.

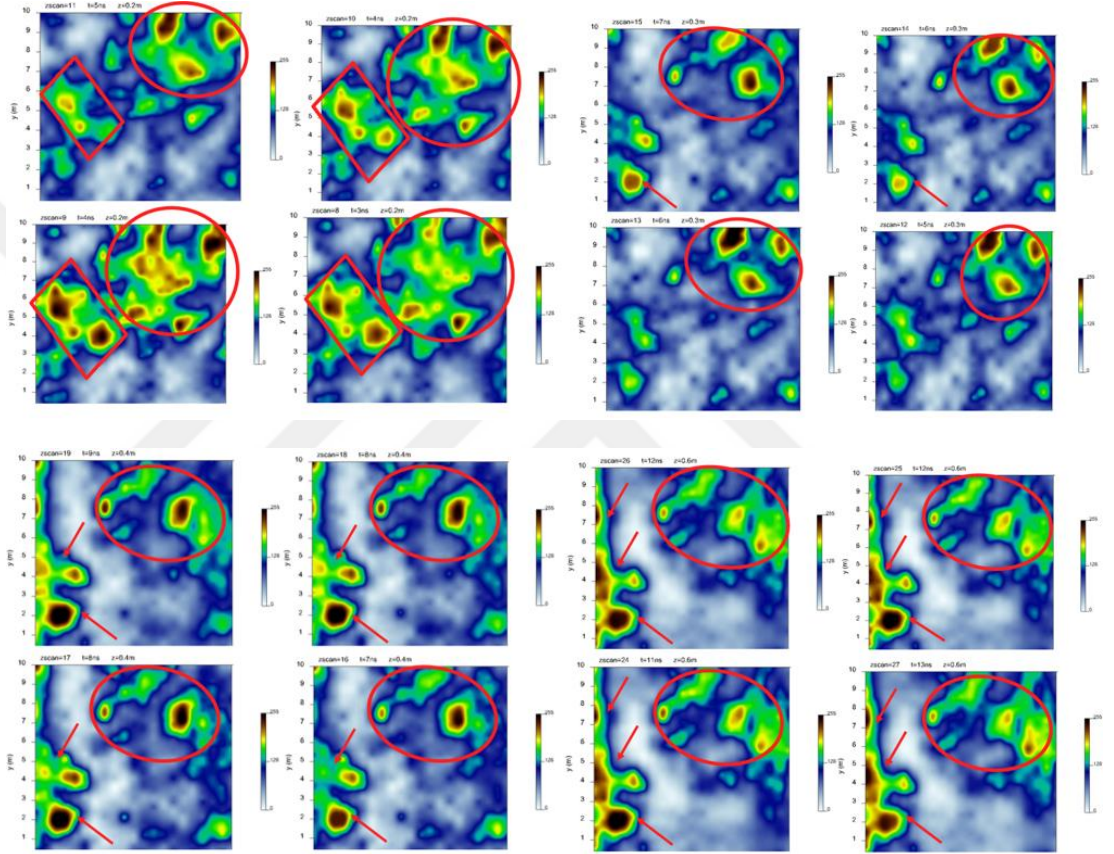
3.3.2 Alan 1 ve 2-Boyutlu Seviye Haritaları

Yassitepe Höyüğü'nde uygulanan yer radarı çalışmasında x ve y yönlü elde edilmiş radargramlar birleştirildikten sonra zaman/derinlik dilimlerine ayrılarak haritalanmıştır. Elde edilen seviye-genlik haritalardan ve bölgede çalışan arkeologların yaptığı çalışmaların sonuçlarından yola çıkılarak bölgede yaşamın sürdüğü dönemlerde insanların barınma ihtiyaçlarını giderdikleri uzun ev yapılarının, sur duvarlarının, farklı yönlerde odaların, sokaklar ve yaşamlarını sürdürmek için kullandıkları araç gereçler (ocaklar, kerpiçten aletler, fırınlar, çömlekler, testi, çanak, iri küpler, tunçtan yapılmış baltalar, andezit ve bazalttan öğütme taşları ve obsidyenden yapılmış aletler) bulunmaktadır.

Mevcut dönemlerde ise duvarlar yanyana çift sıra taş dizilerinden oluşmakta ve bu taşların bazılarının diğerlerine göre daha küçük olduğu görülmektedir. Korunabilen yüksekliği yaklaşık 1 metreyi bulan duvarların bir kısmının eğimli ya da "s"

formunda olduğu gözlenmiştir. Bu durum Erken Tunç Çağında meydana gelen depremle ilişkili olduğu düşünülmektedir (Derin, 2022).

İlk alandan elde edilen radargramlardan oluşturulan seviye kat haritaları Şekil 3.8’de verilmektedir. Oluşturulan haritalarda mevcut arkeolojik alandaki kalıntılara ait olan anomaliler görülmektedir. Mevcut yapılardan kaynaklı anomalilerin uzanımları tespit edilebilmektedir.



Şekil 3.16 Alan 1’den elde edilen radargramlardan 3-13 ns zaman aralığında ve derinlik değerleri ile oluşturulan 2-boyutlu seviye haritaları

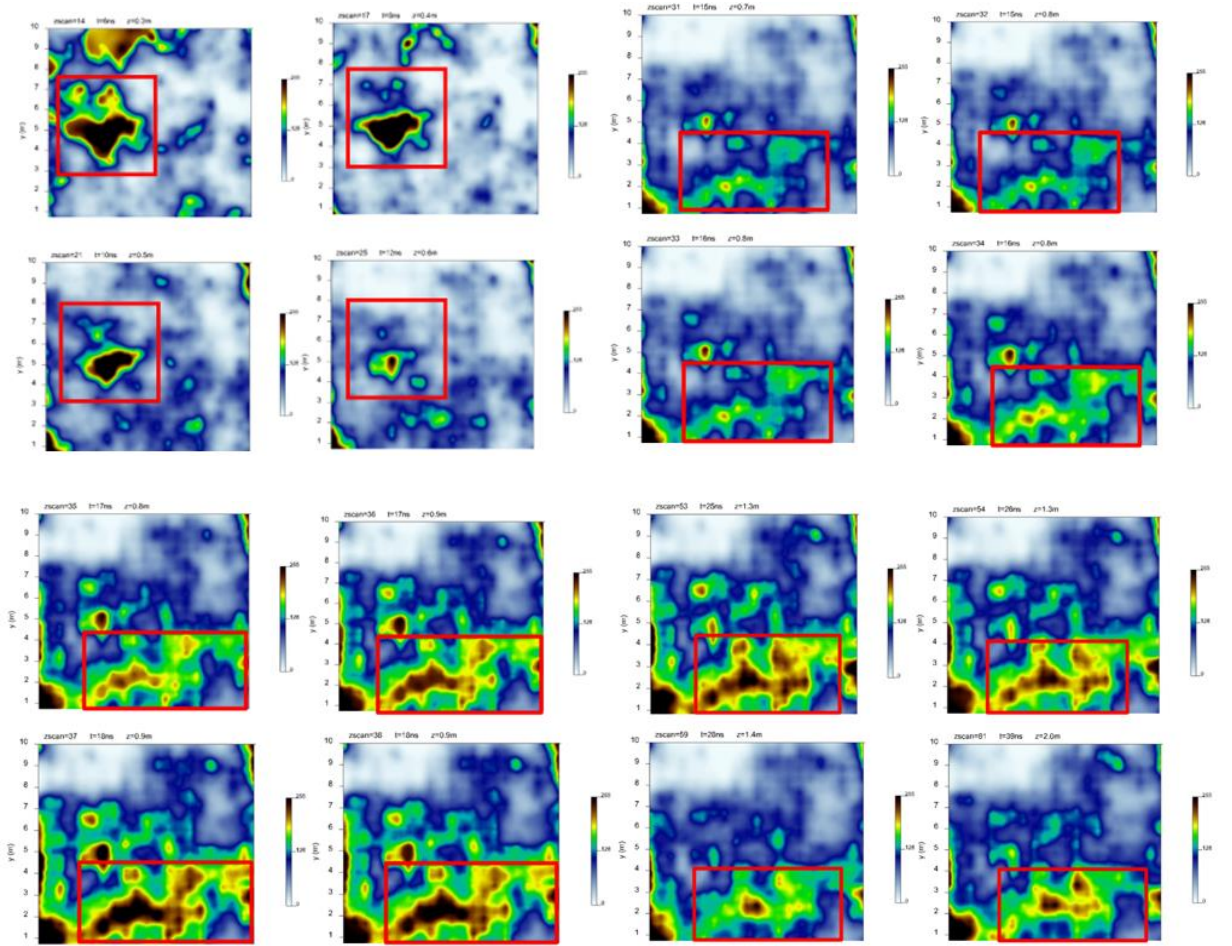
Oluşturulan kat haritalarında belirgin olarak gözlenen anomalilerin ev kalıntılarından olduğu düşünülmektedir. Sığ derinlikte bulunan kırmızı dikkdörtgen içerisindeki anomaliler yapıların içerisinde bulunan küçük araç gereçlerden (ocak, testi, öğütme taşları) elde edilen yansılardan kaynaklandığı düşünülmektedir.

Kırmızı daire içerisine alınmış genliği yüksek yansımaların yaklaşık 0.2 metre derinlikten başlayıp 0.6 metreye kadar devam etmektedir (Şekil 3.16). Daire içerisine

alınmış yüksek genlikli yansımalar taş duvarlardan kaynaklandığı düşünülmektedir. Seviye haritalarının sol alta köşesine doğru yani KB yönündeki oklar ile gösterilmiş yüksek genlikli anomaliler yukarıdan bahsedilen diğer yansımalarından yıkık duvarlardan kaynaklandığı düşünülmektedir.

3.3.3 Alan 2 ve 2-Boyutlu Seviye Haritaları

Alan 1’de 10x10 metrelik oluşturulan karelej ölçümlerinin yanında 10x10 metrelik yapılan Alan 2 karelej ölçümlerinden elde edilen kat haritaları Şekil 3.12 ve Şekil 13’de yorumlanmıştır.



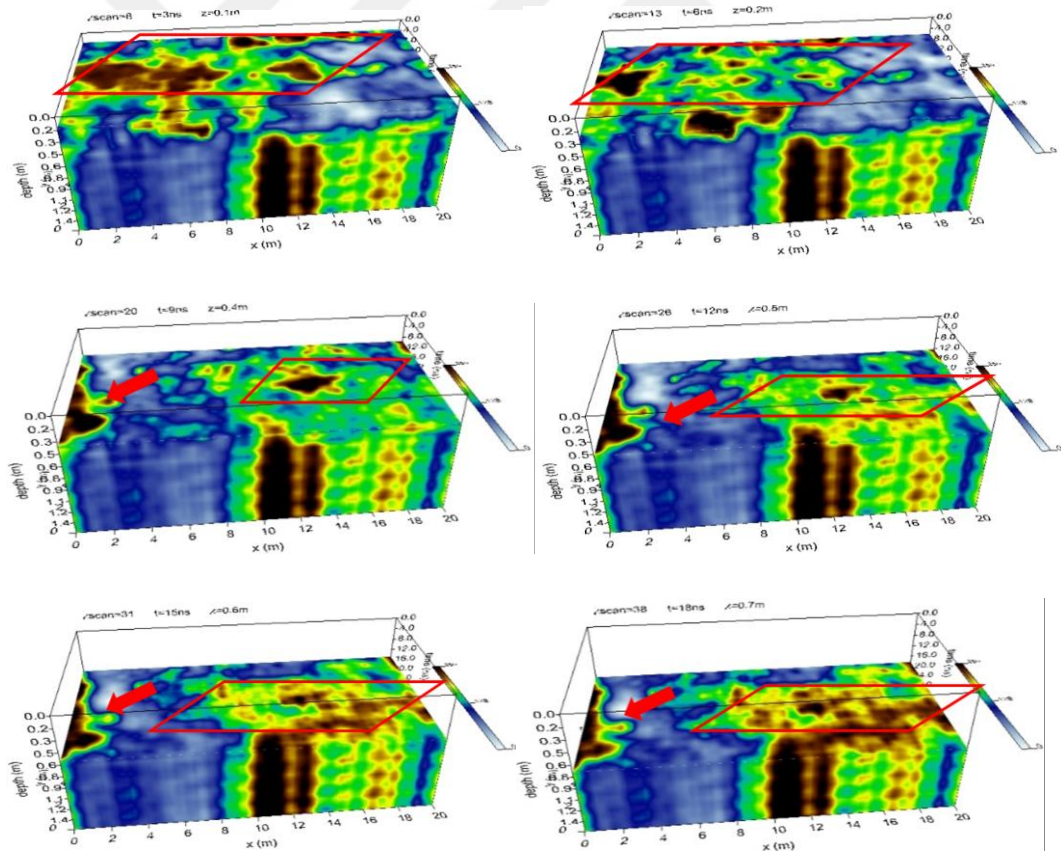
Şekil 3.17 Alan 2’den elde edilen radargramlardan 6-39 ns zaman aralığında ve derinlik değerleri ile oluşturulan 2 boyutlu seviye haritaları

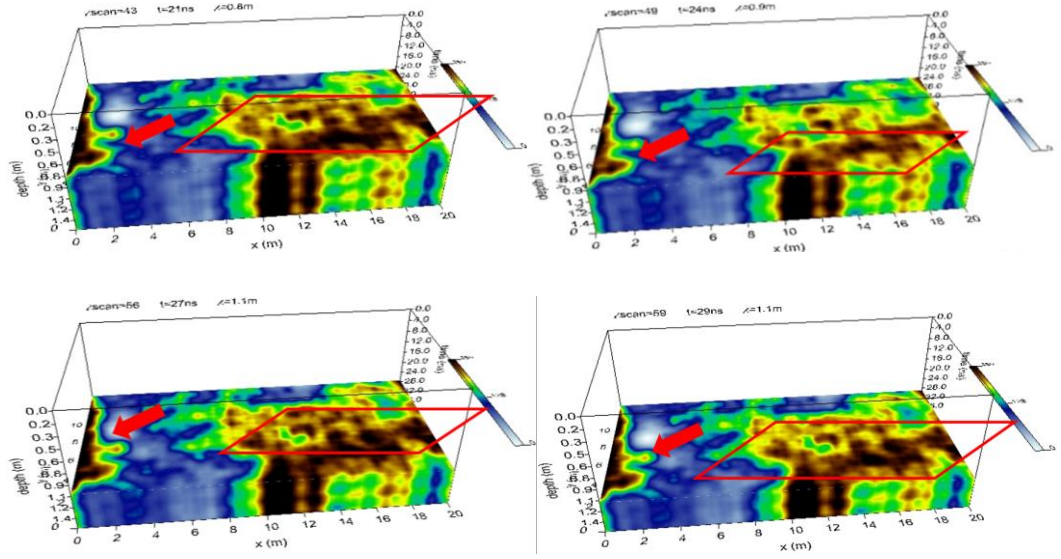
Çalışma sahasında yapılan ölçümler değerlendiriliğinde yaklaşık 0.7 m’den 2.0 m’ye kadar alan yorumlandığında kırmızı olarak işaretlenen bölgede genliklerin yüksek olduğu ve devamlılığı görülmüştür. Uzanım şeklinde görülmekte olan alan daha önce

yapılmış arkeolojik çalışmalardan elde edilen bilgiler ışığında yorumlandığında yapı duvarlardan kaynaklandığı düşünülmektedir. Fakat saçılmalarında olduğu göz önünde bulundurulduğunda ve kümelenmiş şekilde gözlemlendiğinden bazı olası duvarların yıkılmış olabileceği düşünülmektedir.

3.3.4 Alanların Birleşik 3-Boyutlu Seviye Haritaları ve 2-Boyutlu Seviye Haritalarının Uydu Görüntüleri

Çalışma alanından elde edilen radargramlardan oluşturulan Alan-1 ve Alan-2'ye ait 2-Boyutlu zaman-derinlik dilimleri bir önceki bölümde sunulmuştur. Bu bölümde ise GPR yöntemi uygulanan Yassitepe Höyüğünde Alan-1 ve Alan-2'den elde edilen 2-Boyutlu zaman-derinlik dilimleri birleştirilerek 3-Boyutlu seviye haritaları oluşturulmuştur (Şekil 3.18).





Şekil 3.18 Alanların birleştirilmesinden elde edilen ve 0-1.1 m derinliklere ait 3-Boyutlu seviye haritaları (3-29 ns aralığında)

Seviye haritalarında yüksek genlikler olası duvar kalıntılarını, farklı fiziksel özelliğe sahip araç gereçlerden kaynaklandığı düşünülen bölgeler kırmızı ile işaretlenmiştir. Önceki bölümde ayrı ayrı değerlendirilen alanların birleştirilerek tek bir alan olarak irdelenmesi mevcut alanda bulunan kalıntıların yorumlanması açısından oldukça yararlı olmaktadır ve alanlar birleştiğinde arkeolojik kalıntıların devamlılığı ve derinlik ile değişimi daha belirgin şekilde görülmektedir (Şekil 3.18).





Şekil 3.19 Alanların birleştirilmesinden elde edilen 2-Boyutlu seviye haritalarının uydu görüntüsü (0-1.0 m)

Yassitepe Höyüğünde uygulanan GPR yöntemi sonuçlarından elde edilen 0 ile 1.0 metre arasında ki seviye haritaları Şekil 3.19’da gösterilmektedir. Ortamda bulunan yapıların yeraltındaki uzanımları, konumları ve derinliklerinin tespiti açısından seviye haritaları uydu görüntüleri ile birlikte incelendiğinde kırmızı ile işaretli bölgeler arkeolojik alandaki buluntular ile örtüşmektedir.

BÖLÜM DÖRT

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

İlerleyen teknoloji ile birlikte, bilgisayar destekli programların hem kullanımı hem işlevselliği son zamanlarda giderek artmaktadır. Özellikle gerekli kapasiteye sahip bilgisayarlarda 2 ve 3-boyut algoritmalarında kullanımıyla birçok mühendislik disiplininde modelleme çalışmalarına büyük oranda katkı sağlamaktadır.

Tez çalışması kapsamında ilk olarak Python temelli gprMax yazılımı ile zaman ortamında sonlu farklar yöntemini kullanarak basit modeller ve modellerin oluşturduğu yapay radargramlar üretilmiştir. Bu modellerde farklı fiziksel özelliğe sahip ortam ve hedef yapıların fiziksel özelliklerindeki ani zıtlıkların yapay radargramlardaki yansımaların nasıl değişikliğe uğradığı irdelenmiştir. Elektriksel iletkenlik yönünden modelin iletkenliği artırılarak ortamın iletkenliği değiştirilmemiş ve yapının iletkenliği arttıkça yapay radargramlarda daha görünür hale gelmektedir. Ortamın ve hedef yapıların bağıl dielektrik geçirgenlik değerlerindeki zıtlıklar özellikle hedef yapının değerlerinin ortamdaki yüksek olması durumunda hiperbolün kanatlarının daraldığını ve yapının daha görünür hale geldiği yapay radargramlarda gözlemlenmiştir. Bağıl manyetik geçirgenlik değerlerinde oluşan ani zıtlıklar, eğer yapının değerleri yüksek ise tekrarlı yansılarda artış gözlenmiştir. Ancak yer radarı uygulamalarında elektriksel özellikler manyetik özelliklere göre daha fazla etkilidir. Aranılacak yapının ve çevreleyen ortamın fiziksel özellikleri farklı anten seçiminde nasıl yanıtlar oluşturduğu irdelenmiştir. Düşük frekanslı antenlerde büyük dalga boyu üretmesinden dolayı sığ derinliklerde ve küçük boyutlardaki yapıların tespitinde yetersiz kalabilme olasılığı bulunmaktadır. Yer radarı modelleme çalışmalarıyla saha çalışması yapılmadan önce üretilen modellerin saha çalışmalarına büyük oranda katkı sağladığı görülmektedir. Özellikle sığ derinlikte bulunan arkeolojik yapıların farklı fiziksel ve geometrik özellikleri sahip olması ve etrafını çevreleyen ortamdaki ayırt edilmesi bir çok parametreye bağlı olmaktadır. Bahsedilen özellikler göz önüne alınarak dikey ve yatay yapılar, birbirlerine yakın konumlarda farklı geometrik özelliğe sahip yapılar, üst üste bulunan yapıların modelleri oluşturulmuştur. Yapıların geometrik özelliklerindeki değişimler farklı radar yanıtları üretmiştir. Genellikle aynı fiziksel özelliğe sahip üstüste bulunan yapılarda alttaki yapıların

oluşturduğu yansımalar görünürlüğünün azaldığı gözlemlenmiştir fakat altta bulunan yapının yüzeyi üstte bulunan yapıdan daha geniş olması durumunda ise altta bulunan yapıdan kaynaklı yansımaların görünür hale geldiği gözlemlenmiştir. Oluşturulan modellerde farklı geometrik özelliklere sahip ve farklı derinlikteki yapıların oluşturduğu hiperbollerin karakterleri birbirlerinden farklı olmaktadır. Yapının bulunduğu derinlik arttıkça yapının sebep olduğu anomalinin genliği azalmakta ve yapının sınırlardan kaynaklanan yansımaların görünürlüğü azalmaktadır. Bunun yanı sıra anten seçimi ve seçilecek ölçüm profilleri alanda bulunan yapıların görünürlüğünü doğrudan etkilemektedir. Bu bilgiler ışığında, yer radarı uygulamalarını etkileyen en önemli parametrenin yapıların bağıl dielektrik geçirgenlik katsayısı olduğu düşünülmektedir.

Çalışmanın ikinci aşamasında ise İzmir ili, Bornova ilçesinde bulunan Yassitepe Höyüğü'nde 2 adet alan belirlenerek karelej şeklinde ölçümler gerçekleştirilmiştir. 2 alanda x ve y yönlü toplam 84 profil yer radarı ölçüsü alınmıştır. Ölçümler sonucundan sahadan elde edilen verilere veri işlem adımları uygulanmıştır. Yapılan eğri çakıştırma işlemlerinin sonucunda EM hız değerleri, bağıl dielektrik geçirgenlik değerleri ve muhtemel kalıntıların derinlikleri elde edilmiştir. Sahadan elde edilen radargramlar ile gprMax yazılımı kullanılarak oluşturulan yapay radargramlar karşılaştırıldığında uyum gözlemlenmiştir. EM hızları ve bağıl dielektrik geçirgenlik değerleri mevcut arkeolojik alanda önceki çalışmalardan elde edilen buluntuların ocaklar, kerpiçten aletler, fırınlar, çömlekler, testi ve çanaklar, iri küpler, andezit ve bazalttan taşlar vb. gibi farklı materyallere ait olmasından dolayı bu değer aralıklarının elde edilmesi mevcut saha için olasıdır. Doğu-batı ve kuzey-güney yönlü gerçekleştirilen ölçümlerden elde edilen radargramlar yan yana eklenerek Alan 1 ve Alan 2'ye ait 2 boyutlu zaman-derinlik haritaları oluşturulmuş ve sonrasında alanlar birleştirilerek 2 ve 3-boyutlu zaman-derinlik haritaları üretilmiştir. Çalışma sahasından elde edilen zaman-derinlik haritalarında olası kalıntılara ait olduğu düşünülen yüksek genlikli yansımalar işaretlenmiştir ve sonrasında haritalar uydu görüntüleri ile birleştirilmiştir. Bu haritalar yorumlama esnasında aranılan yapıların uzanımları hakkında bilgi sağlamıştır. Uzanım şeklinde görülen anomalilerden yapı duvarları ve küme şeklindeki anomalilerin ise yıkılmış ve bütünlüğünü kaybetmiş yapı duvarlarından kaynaklandığı

düşünülmektedir. Yer radarı uygulamasının sonuçları doğrultusunda yapılacak çalışmalar için kazı yerleri önerilmiştir.

Bu bilgiler ışığında, yer radarı uygulamalarında saha çalışmaları öncesi farklı fiziksel özelliklere sahip ortamların, modellerin oluşturulması ve oluşturulan modellerin farklı frekanslarda antenlerin radar yanıtlarının elde edilmesi yorumlama ve karar aşamasında çok önemli olmaktadır.



KAYNAKLAR

- Abujarad F., Omar A. (29-29 Nisan 2006). *GPR Data Processing Using the Component-Separation Methods PCA and ICA*, Proceedings of the 2006 IEEE International Workshop on Imaging Systems and Techniques, Minory, Italy
- Annan, A. P. (1992). *Ground penetrating radar workshop notes*. Mississauga, Ontario: Sensors and Software Inc.
- Annan, A. P. (1996). Transmission dispersion and GPR. *The Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 2, 125-136.
- Annan, A. P. (2001). *Ground penetrating radar workshop notes*. Mississauga, Ontario: Sensors and Software Inc.
- Annan, A. P., & Chua, L. T. (1992). Ground penetrating radar performance predictions. *The Geological Survey of Canada*, 90(4), 5-13.
- Annan, A. P., & Cosway, S. W. (1992). Simplified GPR beam model for survey design. *62nd Annual International Meeting of the Society of Exploration Geophysicists, Extended Abstract*.
- Annan, A. P., & Cosway, S. W. (1994). GPR frequency selection. *Fifth International Conference on Ground-Penetrating Radar, Proceedings*, 747-760.
- Annan, A. P., (1973). Radio interferometry depth sounding: Part I—Theoretical discussion. *Geophysics*, 38(3), 557-580
- Annan, A. P., (2005). GPR Methods for Hydrogeological Studies. In Y. Rubin, & S. S. Hubbard (Eds.). *Hydrogeophysics*, 185-213.
- Annan, A. P., and S. W. Cosway. (26-29 Nisan 1992). *Ground Penetrating Radar Survey Design*. The Annual Meeting of SAGEEP, Chicago
- Annan, A. P., Cosway, S. W., & Redman, J. D. (1991). Water table detection with ground-penetrating radar. *61st Annual International Meeting of Society of Exploration Geophysicists, Expanded Abstracts*, 494-496.

- Annan, A. P., Waller, W. M., Strangway, D. W., Rossiter, J. R., Redman, J. D., & Watts, R. D. (1975). The electromagnetic response of a low-loss, 2-layer dielectric earth for horizontal electric dipole excitation. *Geophysics*, 40, 285-298.
- Arcone, S. A. (1984). Field observations of electromagnetic pulse propagation in dielectric slabs. *Geophysics*, 49, 1763-1773.
- Arcone, S. A. (1995). Numerical studies of the radiation patterns of resistively loaded dipoles. *Journal of Applied Geophysics*, 33, 39-52
- Aspiron, U. ve Aigner, T. (1999). *Towards Realistic Aquifer Models: Three Dimensional Georadar Surveys of Quaternary Gravel Deltas (SingenBasin, SW Germany)*. *Sedimentary Geology*, 129, 281-297.
- Baili J., Lahouar S., Hergli M., Amimi A. ve Besbes K. (13-15 Mart 2006). Application of The Discrete Wavelet Transforms to Denoise GPR Signals, *International Symposium on Communications, Control and Signal Processing (ISCCSP)*, Marrakech, Morocco
- Balanis, C. A. (1989). *Advanced engineering electromagnetics*. NY: John Wiley and Sons.
- Balkaya Ç. (2010). *Karşılıklı Kuyu Yer Radarı Verisinin İki Boyutlu Seyahat Zamanı Tomografisi* [Doktora Tezi]. Dokuz Eylül Üniversitesi.
- Batey, R. A. (1987). Subsurface interface radar at Sepphoris, Israel. *Journal of Field Archaeology*, 14, 1-8.
- Bergmann, T. Blanch, J.O. ve Robertsson, J.O.A. (1999). A Simplified Lax-Wendroff Correction for Staggered-grid FDTD Modeling of Electromagnetic Wave Propagation in Frequency-dependent Media. *Geophysics*, 64, 5, 1369-1377.
- Bourgeois, J.M. ve Smith G.S. (1996). A Fully Three-Dimensional Simulation of a Ground-Penetrating Radar: FDTD Theory Compared with Experiment. *IEEE Transactions on Geosciences And Remote Sensing*, 34, 1.

- Cai, J. ve McMechan, G. A. (1994). Ray-based synthesis of bistatic groundpenetrating radar profiles. *Geophysics*, 60, 87-96.
- Cai, J. ve McMechan, G. A. (1995). Ray-based synthesis of bistatic groundpenetrating radar profiles. *Geophysics*, 60(1), 87-96.
- Carcione, J. M. (1996). Ground-penetrating radar: Wave theory and numerical simulation in lossy anisotropic media. *Geophysics*, 61, 1664-1677.
- Carcione, J. M. (1998). Radiation Patterns for 2-D GPR Forward Modelling. *Geophysics*, 63, 2, 424-430.
- Conyers, L. B., ve Goodman, D. (1997). *Ground-penetrating radar: An Introduction for Archaeologists*. California: Altamira Press
- Çiğdem M., Koç, S. (2014). Zaman-Uzayda Sonlu Farklar Yöntemin Dezavantajları İçin Geometrik Optik Yöntemlerin Kullanımı. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 29(1).
- 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.
- Derin, Z. (2006). İzmir’den İki Yeni Prehistorik Yerleşim Yeri: Yassitepe Höyüğü, Çakallar Tepesi Höyüğü (1-14). *Arkeoloji Dergisi VII*.
- Derin, Z. (2019). İzmir’de 5 Bin Yıllık Yerleşim Alanı Yassitepe’de Yeni Keşifler (1-16). *Smyrna/İzmir Kazı Araştırmaları III*.
- Derin, Z., Erdem M.A., Çelik Ö., Mamikoğlu M. (2020). Erdem M.A(Ed.), Yassitepe Höyüğü (61–74). *İzmir Araştırmaları Dergisi*.
- Doolittle, J. A., & Miller, W. F. (1991). *Use of ground-penetrating techniques in archaeological investigations*. In applications of space-age technology in Anthropology Conference Proceedings, (2nd ed.). NASA Science and Technology Laboratory.

- Duke, S. (1990). *Calbration of ground-penetrating radar and calculation of attenuation and dielectric permittivity versus depth* (Yüksek Lisans Tezi).Colorado School of Mines, Golden, Colorado.
- Elsherbeni A. Z., Demir V. (2016). The finite-difference time-domain method for electromagnetics with MATLAB simulations. ACES Series on Computational Electromagnetics and Engineering
- Engheta, N., Papas, C. H., & Elachi, C. (1982). Radiation patterns of interfacial dipole antennas. *Radio Science*, 17, 1557-1566.
- Fisher, E., McMechan, G. A., & Annan, A. P. (1992). Acquisition and processing of wide-aperture ground penetrating radar data. *Geophysics*, 57, 495-507.
- Giannopoulos, A. (2005). Modelling ground penetrating radar by GprMax, *Construction and Building Materials*, 19, 755-762.
- Goodman, D. (1994). Ground-penetrating radar simulation in engineering and archaeology. *Geophysics*, 59, 224-232.
- Goodman, D., ve Nishimura, Y., (1993). A Ground Radar View of Japanese Burial Mounds. *Antiquity*, 67, 349-354.
- Guru, B., ve Hızıroğlu, H. (2004). *Electromagnetic Field Theory Fundamentals* (2. Baskı). Cambridge University Press.
- Gürel, L. ve Oğuz, U. (2000). *Three- dimensional FDTD modelling of a Ground-Penetrating Radar*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 38, 4.
- Haynie K. L., Khan S. D. (2016). Shallow Subsurface Detection of Buried Weathered Hydrocarbons using GPR and EMI, *Marine and Petroleum Geology*, 77, 116-123.
- Hoarau Q., Ginolhac G., Atto A. M., Nicolas J.M. (2017). Robust Adaptive Detection of Buried Pipes Using GPR., *Signal Processing*, 132, 293–305.
- Holliger, K., ve Bergmann, T. (2002). Numerical modeling of borehole georadar data. *Geophysics*, 67, 4, 1249-1257.

- Huggenberger, P., Meier, E., & Beres, M. (1994). Three-dimensional geometry of fluvial gravel deposits from GPR reflection patterns: A comparison of results of three different antenna frequencies. 5th International Conference on Ground Penetrating Radar (Proceedings), *Waterloo Centre for Groundwater Research*, 3, 805-815.
- Imposa, S., Grassi S., Patti G. ve Boso D. (2018). *New Data on Buried Archaeological Ruins in Messina Area (Sicily-Italy) from a Ground Penetrating Radar Survey. Journal of Archaeological Science: Reports*, vol. 17, 2018, pp. 358–365., doi:10.1016/j.jasrep.2017.11.031.
- Irving, J. ve Knight, R. (2006). Numerical Modelling of Ground-Penetrating Radar in 2D using MATLAB. *Computer and Geosciences*, 35, 1247-1258
- Irving, J. (2006). *Improving Tomographic Estimates of Subsurface Electromagnetic Wave Velocity Obtained from Ground-Penetrating Radar Data* [Doktora Tezi]. Stanford University
- Jackson, J.D. (1962). *Classical Electrodynamics*. John Wiley and Sons. New York
- Jing Z., Su-Ping P., Fenga Y. (2014). A Novel Edge Detection for Buried Target Extraction After SVD-2D Wavelet Processing, *Journal of Applied Geophysics*, 106, 106–113.
- Kadıoğlu, S. ve Kadıoğlu, Y. K. (2006). Yer radarı yöntemi ile bir mermer sahasındaki kırıkların, sağlam ve bozuk alanların belirlenmesi. *Selçuk Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 21(1-2), 127-135.
- Kaplanvural, İ. (2011). *Yer Radarı Verilerinin Modellenmesi ve Yorumlanması*, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Keçeli, A. (2012). *Uygulamalı Jeofizik* (2. Baskı). JFMO Eğitim Yayınları. No:18
- Koralay, T., Kadıoğlu, S. and Kadıoğlu, Y. K. (2007). A New Approximation in determination of zonation boundaries of ignimbrite by ground penetrating radar: Kayseri, Central Anatolia, Turkey. *Environmental Geology*, 52(7), 1387-1397.

- Kurt, B.B., Kadioğlu, S., ve Ekinçioğlu, E.E. (2009). Yer Radarı Yöntemi ile Gömülü Boruların Konum, Büyüklük ve Fiziksel Özellikleri ile Belirlenmesi. *Yerbilimleri*, 30,1.
- Leckebusch, J. (2003). Ground-Penetrating Radar: A Modern Three-Dimensional Prospection Method. *Archaeological Prospection*, 10, 213-240.
- Lee, R. ve Teixeira, F. L. (2006). Finite Difference Time Domain Modelling For GPR Applications. GPR 2006 Conference Short Course Notes
- Lum S. H., Tang T., Lyall J. (2-4 Aralık 2008). Improved GPR Image Quality by Truncating the Bandwidth of the Fourier Transform in 2D Diffraction Tomographic Inversion, *IEEE International Rf And Microwave Conference*, Kuala Lumpur, Malaysia
- Milsom, J. (2003). *Field geophysics*. J Willey (3.Baskı).England.
- Moorman, B. J. (2001). Ground-penetrating radar applications in paleolimnology. In W. M. Last and J. P. Smol, (Ed.). Tracking environmental change using lake sediments: *Physical and chemical techniques* (23-47). Boston: Kluwer Academic Publishers.
- Ndoye M., Anderson J.M., Greene D.J. (2016). An MM-Based Algorithm for L1-Regularized Least-Squares Estimation With an Application to Ground Penetrating Radar Image Reconstruction. *IEEE Transactions on Image Processing*, 25(5), 2206-2221.
- Ni S., Huang Y., Lo K., Lin D. (2010). Buried pipe detection by ground penetrating radar using the discrete wavelet transform, *Computers and Geotechnics*, 37, 440–448
- Olhoeft, G. R. (1981). Electrical properties of rocks. in Y. S. Touloukian, W. R. Judd, and R. F. Roy, (Ed.). *Physical properties of rocks and minerals*.257-330. NY: McGraw-Hill.
- Olhoeft, G. R. (1994). Geophysical observations of geological, hydrological and geochemical heterogeneity. *Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*, EEGS, 129-141.

- Olhoeft, G. R. (1998). Electrical, magnetic and geometric properties that determine ground penetrating radar performance. *7th International Conference on Ground Penetrating Radar (Proceedings)*, 177-182.
- Pantoja M. F., Rodríguez J.B., Bretones A. R., de Jong C. M., García S. G., Martín R.G., Vieira D. A. G. (2-4 Haziran 2011). Application of Neural Network and Principal Component Analysis to GPR Data, *6th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar (IWAGPR)*, Aachen, Germany
- Parasnis, D. S. (1997). *Principles of Applied Geophysics* (5. Baskı.). Chapman and Hall
- Powers, M.H., ve Olhoeft, G.R. (1994). Modeling dispersive Ground Penetrating Radar Data. *Proceedings of the 5th International Conference on Ground-Penetrating Radar*, Waterloo, Ontario, 173-183.
- Powers, M. H. ve Olhoeft, G. R. (1996). Modeling the GPR response of leaking, buried pipes. *9th Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems (SAGEEP'96)*, (Proceedings), 525-534.
- Qu L., Yin Y., Sun Y., Zhang L. (13-16 Haziran 2016). Efficient Back Projection Imaging Approach for Airborne GPR Using NUFFT Technique, *16th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR)*, Hong Kong, China
- Roberts R. L. ve Daniels J. J. (1997). Modeling near-field GPR in three dimensions using the FDTD method. *Geophysics*, 62, 1114-1126.
- Sadiku, M.N.O. (1992). *Numerical techniques in electromagnetics*, second edition, London
- Sevgi, L..(1999). Elektromagnetik problemler ve sayısal yöntemler. Canada
- Sheriff, R. E. (1984). *Encyclopedic dictionary of exploration geophysics* (2. Baskı). Tulsa, Oklahoma: Society of Exploration Geophysics.

- Sheriff, R. E. (1985). Limitations on resolution of seismic reflections and geologic detail derivable from them. Seismic Stratigraphy-Applications to Hydrocarbon Exploration. *American Association of Petroleum Geologists*, 3-14.
- Sheriff, R. E., & Geldart, R. E. (1982). *Exploration seismology, volume 1: History, theory, and data acquisition*. NY: Cambridge University Press.
- Shih, S. F., & Doolittle, J. A. (1984). Using radar to investigate organic soil thickness in the Florida everglades. *Soil Science Society of America Journal*, 48, 651-656.
- Singh N. P., Manisha J. N. (4-6 Haziran 2013). Buried Object Detection and Analysis of GPR Images: Using Neural Network and Curve Fitting, *International Conference on Emerging Research Areas and 2013 International Conference on Microelectronics, Communications and Renewable Energy*, Kanjirapally, India
- Sinha S. K., Fieguth P.W. (2006). Automated detection of cracks in buried concrete pipe images, *Automation in Construction*, 15, 58 – 72.
- Smith, D. G., & Jol, H. M. (1995). Ground penetrating radar: Antenna frequencies and maximum probable depths of penetration in quaternary sediments. *Journal of Applied Geophysics*, 33, 93-100.
- Smythe, W.R., (1989). *Static & Dynamic Electricity*, Taylor & Francis, A SUMMA book.
- Taflove, A., ve Hagness, S. C. (2005). *Computational Electrodynamics: the Finite Difference Time-Domain Method* (3. Baskı). London: Artech House Publishers.
- Teixeira, F.L. Chew, W.C. Straka, M. Oristaglio, M.L. ve Wang, T. (1998). Finite-Difference Time Domain Simulation of Ground Penetrating Radar on Dispersive, Inhomogeneous, and Conductive Soils, *IEEE transactions on geosciences and remote sensing*, 36, 6.
- Telford, W. M., Geldart, L. P., Sheriff, R. E., & Keys, D. A. (1976). *Applied geophysics*. NY: Cambridge University Press.

- Toksoz D., Yilmaz I., Seren A., Mataraci I. (2016). A study on the Performance of GPR for Detection of Different Types of Buried Objects. *Procedia Engineering*, 161, 399 – 406.
- Ulriksen, C. P. (1982). *Application of impulse radar to civil engineering* [Doktora Tezi]. Lund University of Technology, Lund, New Hampshire: Geophysical Survey Systems, Inc.
- van der Kruk, J., Streich, R. ve Green, A.G. (2006). Properties of Surface Wave Guides Derived from Separate and Joint Inversion of Dispersive TE and TM GPR Data, *Geophysics*.
- von Hippel, A. R. (1954). *Dielectric Material and Applications*. NY: John Wiley and Sons.
- Wang, T. ve Tripp, A.C. (1996). FDTD Simulation of EM Wave Propagation in 3-D Media. *Geophysics*, 61, 1110-120.
- Warren C., Giannopoulos A., Giannakis I. (2016). gprMax: Open source software to simulate electromagnetic wave propagation for Ground Penetrating Radar. *Computer Physics Communications*, 209, 163-170.
- Wilchek, L. (2000). *Ground Penetrating Radar for Detection of Rock Structure* [Yüksek Lisans Tezi]. Alberta University, Canada.
- Y. Guo, X. Zhao ve X. Ke. (2018). Exploration of Hard Objects in Superficial Farmland Soil using GPR, *IFAC PapersOnLine* 51-17 (2018), 582-585.
- Yee, K. S. (1966). Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equation of isotropic media. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, AP-14, 302-307.
- Zeng, X., McMechan, G. A., Cai, J., ve Chen, H. W. (1995). Comparison of Ray and Fourier Methods for Modeling Monostatic Ground-Penetrating Radar Profiles. *Geophysics*, 60, 1727-1734.]