



T.C.  
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GÖMÜLÜ VE/VEYA ÖRTÜLÜ NESNELERİN ALGILANMASINDA  
YENİ YAKLAŞIMLAR

Esin KARPAT

DOKTORA TEZİ  
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA-2009



T.C.  
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GÖMÜLÜ VE/VEYA ÖRTÜLÜ NESNELERİN ALGILANMASINDA  
YENİ YAKLAŞIMLAR

Esin KARPAT

Prof.Dr. [Levent SEVGİ](#)  
(Danışman)

DOKTORA TEZİ  
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA-2009

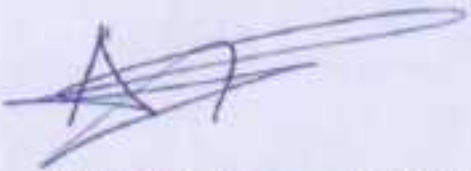
T.C.  
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GÖMÜLÜ VE/VEYA ÖRTÜLÜ NESNELERİN ALGILANMASINDA  
YENİ YAKLAŞIMLAR

Esin KARPAT

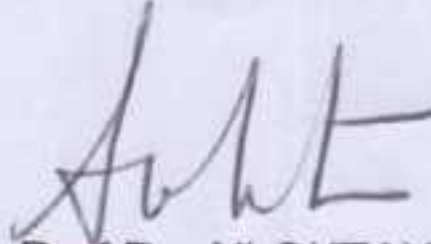
DOKTORA TEZİ  
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Bu Tez 15/06/2009 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği ile kabul edilmiştir.

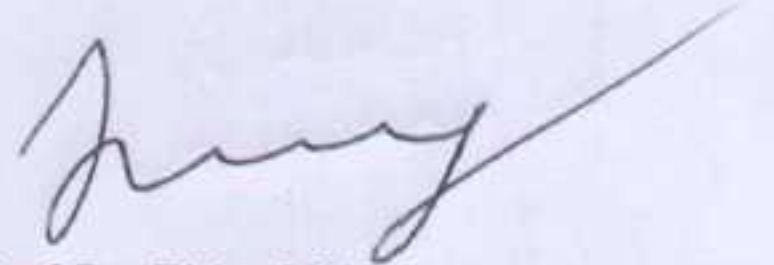


Prof.Dr. Levent SEVGİ

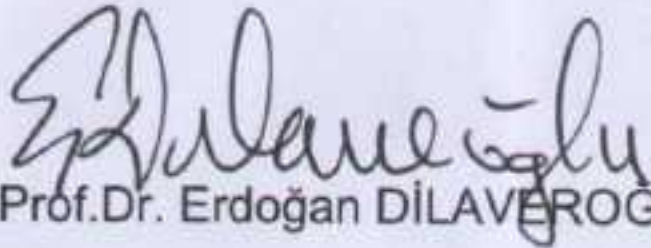
Danışman



Prof.Dr. Ali OKTAY



Prof.Dr. Eldar MUSA



Prof.Dr. Erdoğan DİLAVEROĞLU



Doç. Dr. Funda AKLEMAN YAPAR

## ÖZET

Yüzeyaltı görüntüleme ile algılama, sınıflandırma ve/veya belirleme oldukça ilgi çeken bir konudur. Uygulamalar araç-savar ve insan-savar yer mayınlarının algılanmasından biyolojik dokulardaki urların belirlenmesine kadar çeşitlilik gösterir. Yüzeyaltı görüntülemenin temeli, bir alanın yada nesnenin bir duyar eleman ile (veya bir duyar elemanlar grupları ile) aydınlatılmasına ve ileri ve geri saçılan işaretin işlenmesine dayanır. Görüntüleme bilgisi, ortamın elektromanyetik parametrelerinin (e.g. geçirgenlik) farklılığında saklıdır. Duyar elemanlar EM, akustik, sismik transduserler, kızılötesi kameralar vb. dir. Ancak, halen *güvenilir* bir tek duyar eleman yada karmaşık sistem bulunmamaktadır. Yüzeyaltı görüntülemenin ilgi çekici konuları, duyar eleman geliştirmek, dalga şekli tasarımı, tarama alternatifleri, anten dizi işleme, yazılım geliştirme (gürültü temizleme, eko azaltma, karmaşa filtreleme, düzgünleştirme, etc. ), görüntüleme ve performans değerlendirme sayılabilir.

Yüzeyaltı görüntülemeye en güven verici duyar elemanlardan biri yüzeyaltına nüfuz eden radarlardır (GPR). GPR Yer Biliminden arkeolojiye, ilaç sanayinden savunma sanayine, vb. kadar uygulama alanları vardır. GPR en olumsuz performansı iyi iletken ve heterojen ortamlardaki zayıf performanslıdır. Diğer dezavantajları maliyet, yazılımı, işlem ve görüntü oluşturmak için belirli bir tecrübe gerektirmesidir.

Zaman düzleminde sonlu farklar yöntemi (FDTD) yüzeyaltı görüntüleme ve GPR benzetimlerinde oldukça yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. FDTD yönteminin güzelliği zaman düzleminde iki-ve üç boyutlu (2D/3D) görsel canlandırmasının zaman düzleminde kolay bir şekilde gerçekleştirilebilmesinden kaynaklanmaktadır.

Bu alanlardaki sayısal benzetimler, yalnızca fiziksel yapısının anlaşılmasında değil aynı zaman bu alanda araştırma yapılabilmesinde de büyük olanaklar sağlamaktadır.

Bu çalışmada, yeni ve güçlü bir, iki boyutlu yüzeyaltı görüntüleme aracı GrGPR tasarlanmış ve bu programdan elde edilen yapay verileri kullanarak görüntü oluşturma

amaçlı kullanılan görüntü oluşturma algoritması geliştirilmiştir. GrGPR kullanılarak çeşitli yüzeyaltı görüntüleme algoritmaları modellenebilmekte ve çözümlenebilmektedir. Farklı verici/alıcı anten dizilimlerini gerçekleştirilmek ve senaryo içine çeşitli boyut ve elektriksel özelliklere sahip yüzeyler ve gömülü nesnelere yerleştirmek mümkün olmaktadır.

Tez çalışması kapsamında farklı boyut ve elektriksel özelliklere sahip yüzeyler ve nesnelere oluşan senaryolar, farklı anten konfigürasyonları ile test edilmiş ve elde edilen sonuçlar incelenmiştir. Nesne boyutlarının, elektriksel özelliklerinin, anten dizilim ve sayısının etkileri araştırılmıştır.

**Anahtar Sözcükler:** *yüzeyaltı görüntüleme; yapay açıklıklı radar; yüzeyaltına nüfuz eden radar (GPR); dalga şekli tasarımı; ur algılama; mayın algılama; mikrodalga görüntüleme; görüntü oluşturma; nesne tanımlama; FDTD*

## ABSTRACT

Detection, classification, and/or identification from subsurface imaging (SSI) process is extremely challenging. Applications range from anti-vehicle and anti-personnel land mine detection to early identification of tumors in biological tissues. SSI is based on illuminating an area / object with a sensor (or a group of sensors) and processing forward and/or backward scattered signal. The imaging information is hidden on the difference of electromagnetic (EM) parameters (e.g., permittivity) in the environment. The sensors cover EM, acoustic, seismic transducers, infrared and daytime cameras, etc. Yet, there is neither a single sensor nor a hybrid system fully *reliable*. SSI challenges are sensor development, waveform design, scan alternatives, array processing, software development (noise elimination, echo cancellation, clutter filtering, leveling, smoothing, etc.), imaging, and performance evaluation.

One of the most promising sensors in SSI is the Ground Penetrating Radar (GPR). GPR has many applications ranging from Earth Science to archaeology, medicine to defense, etc. The most significant performance degradation of GPR is its poor performance in highly conductive and heterogeneous media. Other disadvantages include cost, software, operation, and the requirement of a considerable expertise for image interpretation.

The Finite-Difference Time-Domain (FDTD) method has been widely used in SSI and GPR simulations. The beauty of the FDTD method resides on the fact that it is easy to implement and it allows two- and three-dimensional (2D / 3D) visualizations directly in the time domain.

Numerical simulations in these areas offer great possibilities not only in understanding physical background of the problem at hand, but also in doing research in these challenging areas.

In this study a novel and powerful two-dimensional subsurface imaging virtual tool-GrGPR- is designed and an imaging algorithm, which uses the synthetic data generated via GrGPR, is improved. Via GrGPR several subsurface scenarios can be modeled and solved. Different source/receiver array configurations and several surfaces and objects with various dimensions electrical properties can be involved within the scenarios.

In this study, tests with different source/receiver array configurations are performed and results for surfaces and buried objects with various geometrical shapes and electrical properties are discussed.

**Keywords:** *subsurface imaging; synthetic aperture radar; ground penetrating radar (GPR); waveform design; tumor detection; mine detection; microwave imaging; image reconstruction; object identification; FDTD*

## İÇİNDEKİLER

	<b>Sayfa</b>
TEZ ONAY SAYFASI.....	ii
ÖZET.....	iii
ABSTRACT.....	v
İÇİNDEKİLER.....	vii
KISALTMALAR DİZİNİ.....	x
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
SİMGELER DİZİNİ.....	xviii
GİRİŞ.....	1
1. KAYNAK ÖZETLERİ.....	7
2. MATERYAL YÖNTEM.....	26
2.1. Yüzeyaltı Görüntüleme.....	26
2.2. Yüzeyaltına Nüfuz Eden Radarlar-GPR.....	31
2.2.1 GPR'ın genel şeması ve çalışma prensibi.....	36
2.2.2 GPR verilerinin gösterimi.....	37
2.2.3 B-Scan gösterimin yapay açıklıklı radar prensibi ile işlenmesi.....	39
2.3 Sayısal Modelleme Yöntemi.....	42
2.3.1 Zaman Düzlemi Sonlu Farklar Yöntemi (Finite Difference Time Domain-FDTD).....	40
2.3.1.1 İki boyutlu Maxwell denklemleri.....	45
2.3.1.2 FDTD denklemleri ve alan bileşenleri.....	46



2.3.1.3 Courant kararlılık kriteri.....	49
2.4 Geliştirilen FDTD Tabanlı Yüzeyaltı Tarama Simülasyon Programı-GrGPR...	50
2.4.1 Genel görüntü.....	52
2.4.2 Menülerin tanıtımı.....	56
2.4.3 Yüzey şekillerinin ve nesnelerin seçimi.....	64
2.4.4 Kaynak seçimi.....	69
2.4.5 Senaryonun çalıştırılması ve kaydedilmesi.....	71
2.5 Görüntü Oluşturma Algoritması.....	74
2.5.1 Yapay ham verilerin elde edilmesi.....	75
2.5.2 Ham verinin ön işleme.....	75
2.5.2.1 Nesneye ait verilerin ham veriden ayrıştırılması.....	76
2.5.2.2 Kompanzasyon.....	77
2.5.3 İki Boyutlu (2B) Görüntülerin Elde Edilmesi.....	79
2.5.3.1 Her hücreye ait gecikme sürelerinin hesaplanması.....	80
2.5.3.2 Hücrelere ait alan değerlerinin bulunması.....	83
2.5.3.3 Görüntü üzerinde son-işleme.....	84
2.5.3.4 Görüntü oluşturma algoritmasının genel hali ve akış şeması.....	85
2.5.4 Görüntü oluşturma algoritmasından kaynaklanan hayalet görüntüler.....	88
3 ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	90
3.1 Görüntü oluşturmada kullanılacak uygun anten sayısının belirlenmesi.....	92
3.2 Farklı anten dizilimleri ile elde edilen 2B görüntülerin karşılaştırılması.....	95
3.3. Anten yerleşiminin nesneye yakınlık ve uzaklığının görüntü oluşturma üzerine etkileri.....	96
3.4 Homojen/homojen olmayan ortamlarda gömülü olan farklı boyutlardaki nesnelerin A-Scan ve 2B görüntülerinin karşılaştırılması.....	93

3.4.1 Elde edilen verilerin A-Scan gösterimlerinin homojen ve inhomojen ortamlar için karşılaştırılması.....	99
3.4.2 Homojen ortamlarda gömülü olan farklı boyutlardaki PEC nesnelerin görüntülerinin karşılaştırılması.....	101
3.4.3 Homojen ortamlarda gömülü olan farklı boyutlardaki dielektrik nesnelerin karşılaştırılması.....	107
3.4.4 Homojen olmayan ortamlarda gömülü olan farklı boyutlardaki PEC nesnelerin gerçek boyutları ve B-Scan gösterimlerinin elde edilen görüntüler ile karşılaştırılması.....	113
3.4.5 Homojen olmayan ortamlarda gömülü farklı boyutlardaki dielektrik nesnelerin karşılaştırılması.....	116
SONUÇLAR ve YORUMLAR.....	122
KAYNAKLAR.....	122
ÖZGEÇMİŞ.....	127
TEŞEKKÜR.....	128

## KISALTMALAR

FDTD	Zaman Düzleminde Sonlu Farklar
TE	Enine elektrik
TM	Enine manyetik
CMI	Ortak odak mikrodalga görüntüleme
SAR	Yapay Açıklıklı Radar
TLM	Transmisyon Hattı Matrisi

## ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 1.1 Yaşlara göre Göğüs Kanserine Yakalanma Riski.....	9
Çizelge 1.2 Göğüs kanserinin aşamalarına göre bağıl kurtulma şansları.....	10
Çizelge 1.3 Elektriksel özelliklerin ortalama değerleri ( $f = 6\text{GHz}$ ).....	11
Çizelge 2.1 Farklı yüzey malzemelerin dielektrik karakteristiklerinin tipik aralıkları.....	29
Çizelge 2.2 Farklı yüzeylerin ve toprakların dielektrik özellikleri.....	30
Çizelge 2.3 Farklı elektriksel özelliklere sahip yeryüzeyi malzemelerinin deri kalınlıklarının 10-100 kHz frekans aralığında değişimi.....	31
Çizelge 2.4 Fiziksel anten dizileri ile SAR in karşılaştırılması.....	42

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1 Temel Radar Prensibi.....	32
Şekil 2.2 a)Arkeolojik çalışmalar ve b) çevresel incelemelerde kullanılan el tipi, askeri mayın taramalarına ait c) el tipi ve d) araca monteli GPR'lar.....	34
Şekil 2.3 GPR'ın çalışma prensibine ait genel şema.....	36
Şekil 2.4 İki farklı anten için zaman düzleminde verilerin gösterimi.....	37
Şekil 2.5 a) A-Scan verilerinin N sayıda anten konumu için elde edilip ardı ardına gösterimi, b) zaman düzlemi verilerinin B-scan görüntüsü.....	38
Şekil 2.6. a) B-Scan dilimlerinin ardı ardına birleştirilmiş hali, b) C-Scan gösterimi.....	39
Şekil 2.7 a) Anten dizisi ve b) Yapay açıklıklı anten prensibi.....	41
Şekil 2.8 Fiziksel lineer anten dizileri ile yapay açıklıklı radarlara ait anten faktörleri.....	42
Şekil 2.9 $H_x$ , $H_z$ ve $E_y$ bileşenleri için 2-boyutlu FDTD Yee hücresi.....	46
Şekil 2.10 GrGPR programının ekran görüntüsü ve örnek bir senaryo.....	53
Şekil 2.11 Serbest uzayda yayılan bir elektromanyetik dalganın dielektrik katsayısı $\epsilon_r=2$ olan yeryüzeyi ile temas etmesi üzerine hava-yüzey arasında meydana gelen yansıma ve dalga iletiminin gösterimi.....	54
Şekil 2.12 Serbest uzayda bulunan PEC (dikdörtgen) ve dielektrik ( $\epsilon_r=2$ , dikdörtgen) nesne karşısında yayılan elektromanyetik dalganın davranışının incelenmesi.....	54
Şekil 2.13 Serbest uzayda bulunan ve sürekli dalga (Continuous Wave-(CW)) yayılımı yapan iki antenden yayılan işaretler arasında oluşan girişim.....	55
Şekil 2.14 GrGPR programında yer alan menülerin gösterimi.....	55
Şekil 2.15 GrGPR programında senaryolara kaynak yerleştirme penceresi.....	56

Şekil 2.16 Farklı anten yerleşimlerin (Eğimli doğrusal, Eliptik, Düz-doğrusal) ekranda gösterimi.....	57
Şekil 2.17 Dört gruptan oluşan bir senaryoda ikinci (G2) a) ve dördüncü (G4), b) grupların sıra ile aktif olduğu durumların gösterimi.....	58
Şekil 2.18 Kapalı çevrim anten dizilimlerinin oluşturulması için kaynak yerleştirme ( <i>Advanced Source Insertion</i> ) penceresinde bulunan seçenekler.....	60
Şekil 2.19 Bir PEC elips nesnenin etrafına yerleştirilmiş farklı kapalı çevrim anten dizilimlerine ait örnek gösterimler.....	61
Şekil 2.20 İleri Boyut Parametreleri ( <i>Advanced Dimension Parameters</i> ) penceresi.....	62
Şekil 2.21 Farklı boyut parametrelerine bağlı olarak frekans ve hücre boyutu değerlerindeki değişimler.....	62
Şekil 2.22 İleri Boyut Parametreleri penceresinden yararlanarak nesnelere yerleştirilmesi .....	63
Şekil 2.23 Yüzey şekillerinin ve farklı şekillerdeki nesnelere yerleştirilmesi için kullanılan <i>Insert</i> seçeneği.....	64
Şekil 2.24 GrGPR ile oluşturulabilen farklı geometrilerdeki nesnelere.....	65
Şekil 2.25 GrGPR’da yer alan standart nesne geometrilerinin birleştirilmesi ile elde edilen farklı nesne geometrileri.....	65
Şekil 2.26 Düz zemin ve engebeli yüzey şeklinden oluşan bir senaryonun gösterimi.....	66
Şekil 2.27 Senaryoya yerleştirilecek olan nesnelere dielektrik ve iletkenlik katsayılarının belirlendiği pencere.....	66
Şekil 2.28 Dielektrik katsayısı (a) homojen ( $\epsilon_r=2$ ), (b) inhomojen ( $1.9<\epsilon_r<2.1$ ) ve (c) inhomojen ( $1.5<\epsilon_r<2.5$ ) olduğu durumlara sürekli dalga işaretinin yüzeyaltında yayılımı ve zemin karmaşasının işarete etkisini gösteren üç farklı uygulama, (d) üç farklı durumda algılanan işaretlerin zaman düzleminde karşılaştırmalı olarak gösterimi.....	67
Şekil 2.29 Hesap uzayının sınır koşullarının belirlendiği MUR penceresi.....	69

Şekil 2.30 (a) CW, (b) Gauss ve (c) Linear Chirp kaynaklar için seçim pencerelerinin gösterimi.....	70
Şekil 2.31 Farklı kaynak işaretlerinin zaman düzlemindeki grafikleri.....	70
Şekil 2.32 Gerçekleştirilecek olan simülasyonların süresinin belirlenmesi ve simülasyonların başlatılması için kullanılan <i>DURATION</i> ve <i>SIMULATION</i> pencereleri...	71
Şekil 2.33 GrGPR ile oluşturulan dielektrik katsayısı $\epsilon_r=2$ olan homojen olmayan engebeli bir yüzey altında gömülü elips şeklinde bir PEC nesne ve bir alıcı ve bir vericiden oluşan iki anten grubunun yer aldığı senaryo.....	72
Şekil 2.34 a) Yüzeyaltında nesne gömülü olmadığı, b) elips kesitli sonsuz uzun silindirik PEC nesnenin gömülü olduğu durumda gözlenen simülasyon sonuçları.....	73
Şekil 2.35 İki farklı anten tarafından algılanan (a) ham veriye ve (b) saf veriye ait zaman düzlemindeki işaretler.....	74
Şekil 2.36 Nesneye ait verilerin ham veriden ayrıştırılmasına ait zaman düzlemi gösterimi. a) Nesne varken (kesikli çizgi) ve yokken (düz çizgi) elde edilen ham veriler, b) Erken zaman cevabı çıkarıldıktan sonra saçıcı nesneye ait verileri içeren işaret.....	77
Şekil 2.37 Görüntü oluşturma algoritmasının aşamalarının grafiksel gösterimi.....	80
Şekil 2.38 Serbest uzayda bulunan bir nesneye ait senaryoda alıcı-hücre-verici arasında alınan yolun ve senaryonun hücresele gösterimi.....	81
Şekil 2.39. Bir verici anten çıkan dalganın yüzey altında gömülü olan yada boşlukta bulunan bir nesneye ulaşması için izlemesi gereken yollar.....	81
Şekil 2.40 Yüzeyaltında gömülü bir nesne bulunan senaryoya ait şematik gösterim.....	83
Şekil 2.41 2-boyutlu görüntü elde etmek için kullanılan uygunlaştırılmış (matched) filtre yönteminin akış şeması .....	85
Şekil 2.42. MATLAB programı akış şeması (a)her hücrenin testini gösteren akış şeması (b) örnekleme ve toplama modülü akış şeması.....	86

- Şekil 2.43 a) Dairesel kesitli sonsuz uzun bir PEC nesnenin etrafına, üçgen dizilim ile yerleştirilen antenler ile elde edilen görüntüde oluşan hayalet görüntüler, b) oluşan hayalet görüntü yok edildikten sonra elde edilen görüntü.....89
- Şekil 3.1 Farklı çalışma frekanslarının etkisinin test edilebilmesi için oluşturulmuş örnek bir model.....90
- Şekil 3.2 Farklı sayılarda antenler kullanılarak elde edilen nesne görüntüleri a)Dairesel kesitli sonsuz uzun bir PEC silindirin gerçek görüntüsü (sol-üst), dört anten çifti ile elde edilen görüntüsü (sağ-üst), sekiz anten çifti ile elde edilen görüntüsü (sol-alt), yirmi dört anten çifti ile elde edilen görüntüsü (sağ-alt), b) dört anten kullanıldığında nesne üzerinde oluşan kesişim noktalarının ve hayalet görüntülerinin gösterimi, c) sekiz anten kullanıldığında nesne üzerinde oluşan kesişim noktalarının ve hayalet görüntülerinin gösterimi .....94
- Şekil 3.3 Üçgen kesitli sonsuz uzun bir PEC nesnenin (sol-üst) etrafına üçgen (sağ-üst), kare (sol-alt) ve dairesele (sağ-alt) kapalı çevrim anten dizilimlerinin gösterimi.....95
- Şekil 3.4 Üçgen kesitli sonsuz uzun bir PEC silindirin gerçek (sol-üst), üçgen anten dizilimi (sağ-üst), dikdörtgen anten dizilimi (sol-alt) ve dairesele dizilim (sağ-alt) ile elde edilen 2B görüntüler.....96
- Şekil 3.5 Eliptik geometriye sahip sonsuz uzun PEC silindir nesnenin, nesne yüzeyinden farklı uzaklıklardaki anten dizilimleri ile elde edilen görüntüleri a) 12 (üst sıra) ve 24 (alt-sıra) antenin, nesne çevresine küçük (sol sütun, 165 hücrelik çaplı) ve büyük (sağ sütun, 300 hücrelik çaplı) kapalı yollar boyunca yerleştirilip kapalı çevrim yapay açıklıklı radar tekniğinin uygulanması ile elde edilen görüntüler, b) Sekiz anten için, antenler nesneye yakın olduğunda yayılan dalganın nesneye temas ettiği anların gösterimi.....97
- Şekil 3.6 Dielektrik katsayısı 2 ( $\epsilon_r=2$ ) olan homojen (sol-üst) ve/veya dielektrik katsayısı 1.5–2.5 aralığında farklı oranlarda değişen ( $1.5<\epsilon_r<2.5$  (sağ-üst ve sol-alt) ya da  $1.9<\epsilon_r<2.1$  (sağ-alt)) homojen olmayan ortamlarda gömülü olan farklı boyutlarda (50x50 (sol-üst), 25x25 (sağ-üst), 12x12 (sol-alt) ve 2x2 (sağ-alt),) dikdörtgen kesitli sonsuz uzun silindirik



PEC yada dielektrik katsayısı ( $\epsilon_r=4$ ) olan dielektrik nesnelere ilişkin senaryoların gösterimi.....	99
Şekil 3.7 Dielektrik katsayısı 2 olan homojen (düz çizgi) ve 1.5 ve 2.5 arasında değişen inhomojen (kesik çizgili) yüzeylerin altında gömülü olan elips geometriye sahip PEC bir nesneyi tespit etmek için algılanan işaretin zaman düzlemindeki A-Scan gösterimi.....	100
Şekil 3.8 Dielektrik katsayısı 2 olan homojen (düz çizgi) ve 1.9 ve 2.1 arasında değişen inhomojen (kesik çizgili) yüzeylerin altında gömülü olan elips geometriye sahip PEC bir nesneyi tespit etmek için algılanan işaretin zaman düzlemindeki A-Scan gösterimi.....	101
Şekil 3.9 Dielektrik katsayısı 2 olan homojen, düz bir zemin altında gömülü olan dikdörtgen kesitli sonsuz uzun ve enine kesit boyutu 50x50 olan silindirik PEC nesnenin, a) gerçek görüntüsü, b) 2B görüntüsü, c) A-Scan gösterimi.....	102
Şekil 3.10 Dielektrik katsayısı 2 olan homojen, düz bir zemin altında gömülü olan dikdörtgen kesitli sonsuz uzun ve enine kesit boyutu 25x25 olan silindirik PEC nesnenin, a) gerçek görüntüsü, b) 2B görüntüsü, c) A-Scan gösterimi.....	104
Şekil 3.11 Dielektrik katsayısı 2 olan homojen, düz bir zemin altında gömülü olan dikdörtgen kesitli sonsuz uzun ve enine kesit boyutu 2x2 olan silindirik PEC nesnenin, a) gerçek görüntüsü, b) 2B görüntüsü, c) A-Scan gösterimi.....	106
Şekil 3.12 Düşey yüksekliği 30, yatay genişliği 150 hücre ve dielektrik katsayısı 4 olan, elips kesitli sonsuz uzun silindirik nesnenin (a) gerçek görüntüsü, (b) B-Scan görüntüsü, (c) 2B görüntüsü ve (d) üç farklı anten için A-Scan gösterimlerinin karşılaştırılması.....	108
Şekil 3.13 Düşey yüksekliği 30, yatay genişliği 80 hücre ve dielektrik katsayısı 4 olan ve elips kesitli sonsuz uzun silindirik nesnenin (a) gerçek görüntüsü, (b) B-Scan görüntüsü, (c) 2B görüntüsü ve (d) üç farklı anten için A-Scan gösterimlerinin karşılaştırılması.....	110
Şekil 3.14 Dielektrik katsayısı 1.5-2.5 arasında değişen homojen olmayan, düz bir zemin altında gömülü olan dikdörtgen kesitli sonsuz uzun ve enine kesit boyutu 50x50 olan silindirik PEC nesnenin, a) gerçek görüntüsü, b) B-Scan gösterimi, c) 2B görüntüsü.....	113

Şekil 3.15 Dielektrik katsayısı 1.5-2.5 arasında değişen homojen olmayan, düz bir zemin altında gömülü olan dikdörtgen kesitli sonsuz uzun ve enine kesit boyutu 25x25 olan silindirik PEC nesnenin, a) gerçek görüntüsü, b) B-Scan gösterimi, c) 2B görüntüsü.....115

Şekil 3.16 Dielektrik katsayısı 1.5-2.5 arasında değişen homojen olmayan, düz bir zemin altında gömülü, düşey yüksekliği 30, yatay genişliği 150 hücre ve dielektrik katsayısı 4 olan ve elips kesitli sonsuz uzun silindirik nesnenin (a) gerçek görüntüsü, (b) B-Scan görüntüsü, (c) 2B görüntüsü ve (d) üç farklı anten için A-Scan gösterimlerinin karşılaştırılması.....117

Şekil 3.17 Dielektrik katsayısı 1.5-2.5 arasında değişen homojen olmayan, düz bir zemin altında gömülü, düşey yüksekliği 10, yatay genişliği 20 hücre ve dielektrik katsayısı 4 olan ve elips kesitli sonsuz uzun silindirik nesnenin (a) gerçek görüntüsü, (b) B-Scan görüntüsü, (c) 2B görüntüsü ve (d) üç farklı anten için A-Scan gösterimlerinin karşılaştırılması.....119

## SİMGELER DİZİNİ

$\epsilon_0$	Serbest uzayın dielektrik geçirgenliği (F/m)
$\mu_r$	Bağıl manyetik geçirgenlik sabiti
$\mu_0$	Serbest uzayın manyetik geçirgenliği (H/m)
$\mu$	Manyetik geçirgenlik
$\sigma$	İletkenlik (S/m)
$\vec{E}$	Elektrik alan şiddeti (V/m)
$\vec{H}$	Manyetik alan şiddeti (A/m)
$\vec{J}_s$	Yüzeysel akım yoğunluğu (A/m <sup>2</sup> )
$\Gamma$	Yansımaya katsayısı
$\beta$	Dikdörtgen dalga kılavuzu içinde yayılan elektromanyetik dalgaya ilişkin faz sabiti (rad/m)
$k_0$	Serbest uzayın dalga sayısı (rad/m)
$\eta_0$	Serbest uzayın öz empedansı (ohm)
$\lambda_0$	Dalgaboyu (m)
$f$	Frekans (Hz)
$t$	Zaman (sn)
$c$	Işık hızı (m/sn)
$\Delta t$	Zaman Adımı (sn)
$\Delta x$	Yee birim hücre x kenar boyu (m)
$\Delta y$	Yee birim hücre y kenar boyu (m)

## GİRİŞ

Mikrodalga görüntüleme tekniklerinden biri olan ve birçok alanda uygulamaları olan yüzeyaltı tarama problemleri günümüzde oldukça ilgi çeken bir konudur. Yüzeyaltı görüntüleme; su altında, toprak altında, doku altında, hatta insan yapımı yapıların altında bulunan cisimlerin tespitinde kullanılan optik, x-ray, elektromanyetik, elektrik ve ultrasonik metotları içine alan yeni bir disiplindir.

Yüzeyaltı görüntülemenin günümüzde mayın ve gömülü nükleer silah algılama, yeraltı sığınakları ve yeraltı karargâhlarının tespiti, depremlerde çöken binaların altında kalan boşlukların belirlenmesi, insan vücudunda kanserli hücrelerin tespiti gibi hayati önemi olan uygulama alanları bulunmaktadır.

Bu uygulama alanları içerisinde mayın temizleme konusu en ilgi çeken konuların başında gelmektedir. Yapılan araştırmalara göre dünya üzerinde yer alan 60 üçüncü dünya ülkesinde birçok anti-personnel (AP) mayın çevreye zarar vermekte, yaşam alanlarını daraltmakta ve tarım alanlarını kirletmektedir. Mayın temizleme işlemi yerleştirme işlemine göre daha fazla zaman aldığından kirlenme miktarı her geçen gün daha da artmaktadır. [Peichl ve ark. 1999]. Bu nedenle mayın tarama konusunda elde edilebilecek en ufak gelişme bile mayın temizleme işleminin hızlandırılması açısından büyük önem taşımaktadır.

Yüzeyaltı görüntüleme uygulamalarında toprak altı tarama işleminin yapıldığı yüzeyler, elektriksel özellikleri bakımından farklılıklar gösterdiğinden EM dalgalarının yüzeyaltına nüfuz etme derecesi her yüzey için farklı olabilmektedir. EM dalgalarının yüzey içinde yayılımını etkileyen bir değer faktör yayılım yapan dalganın frekansıdır.

Yüzey üzerinde maksimum genliğe sahip olan EM dalgaların genliği yüzey içinde ilerledikçe azalmaktadır. Genliğin  $1/e$  değerine düştüğü derinlik cidar kalınlığı olarak adlandırılmaktadır. Yüzeyin iletkenliği ve dalganın frekansı arttıkça bu değer azalmaktadır. Örneğin, EM dalgalar, ortalama bir zeminde ( $\epsilon_r=10-15$ ,  $\sigma=0.01-0.05$  S/m) 5 MHz frekansta onlarca metre derinliğe ilerlerken mikrodalga frekanslarında (örneğin, 1 GHz) birkaç santimetre derinliğe inebilmektedirler (Sevgi, 2003). Konu ile ilgili detaylı bilgi Materyal Yöntem kısmında verilmektedir.

Yüzey parametrelerinin farklılık göstermesi yüzey tarama işleminde doğru sonuçların elde edilebilmesi için uygun frekans ve uygun detektörlerin kullanılmasını gerektirmektedir. Metal dedektörler, mikrodalga tomografi, kızılötesi kameralar, akustik algılayıcılar, GPR'lar yüzeyaltı görüntülemenin askeri alanlardaki mayın tarama uygulamalarında güvenilerek kullanılan bazı algılayıcılar olarak sıralanabilir. Bu algılayıcıların birbirlerine göre üstün yönlerinin yanı sıra zayıf yönleri de mevcuttur. Zayıf yönlerinin varlığı bu alandaki yeni araştırmaların devamlılığını sağlamaktadır.

Günümüz modern mayınlarının daha az metal içerikli ve daha küçük olması, yüzey üzerinde ya da altında mayından farklı metal parçalarının da yer alması (örneğin şarapnel parçaları) metal detektörlerinin mayın tarama çalışmalarında yetersiz kalmasına neden olmuştur. Bu nedenle alternatif algılayıcı tasarımları üzerine çalışmalar önem kazanmaktadır.

Mikrodalga tomografinin temeli, görüntüsü oluşturulacak nesnenin elektriksel özelliklerinin tespit edilmesine dayanır. Mikrodalga tomografi metodunun matematiksel teorisi, Maxwell denklemlerinin ters çözümlerini gerektirir. Bu da oldukça zaman alan, karmaşık ve zahmetli bir işlemdir. Bu durum mikro dalga tomografinin yaygınlaşmasını kısıtlamaktadır.

Kızılötesi kameraların mayın tarama amaçlı kullanımlarındaki ana çalışma prensibi, mayınlar tarafından oluşturulan ısı farklarının ve ısıl zıtlıkların algılanmasına dayanır.

Ancak toprak yüzeyin sıcaklığı gün içinde belirgin bir döngü içinde olmadığından ve farklılıklar göstermesinden dolayı günün hangi saatinde termal enfraruj kameralar kullanılarak mayın tarama yapılabileceğini belirlemek oldukça zordur. Bununla beraber, termal algılayıcılar, metal dedektörler yada yüzeyaltına nüfuz eden radarlar ile beraber kullanılarak çok algılayıcı birleştirilmiş algılama sisteminin oluşturulmasında kullanılabilirler.

İyonlaşmayan elektromanyetik dalgaların insan vücudundaki kanserli hücreleri tespit etmek için kullanılması hayali ile birlikte minyatür radarlara biyomedikal uygulamalarda da rastlanmaktadır. Özellikle son yıllarda Hagness ve arkadaşları tarafından göğüs içindeki iyi huylu olmayan urların tespiti için UWB radarların kullanıldığı bir yöntem geliştirmişlerdir. [Hagness ve ark. 1998] Mikrodalga frekanslarında diğer kanser türleri ile karşılaştırıldığında göğüs urlarının elektriksel özellikleri normal göğüs dokusuna göre belirgin farklılıklar göstermektedir. Ayrıca bu frekanslarda göğüs dokusunun, beyin ve kas gibi diğer dokulara göre daha geçirgen olması [Fear ve ark.2002], mikrodalga frekansında elektromanyetik dalgaların göğüs urlarının görüntülenmesinde kullanılması fikrini desteklemektedir. Göğüs kanseri teşhisinde kullanılan ve bir x-ray görüntüleme tekniği olan mamaogramın, kötü huylu urların tespitinde yetersiz kalması, MRI (Magnetic Resonance Imaging) in çok maliyetli oluşu ve henüz yeterli bir görüntüleme yöntemi olup olmadığının bilinmeyişi kanser araştırmasında yeni arayışlara neden olmuştur.

Yüzeyaltına nüfuz eden radarlar (GPR), bir verici antenden yüzeye elektromanyetik dalga yayarlar. Yayılan bu elektromanyetik dalga, yüzeyaltında gömülü olan çeşitli nesnelere, yeryüzeyinin farklı zıt dielektrik özelliklere sahip yeryüzeyi yapılarından, örneğin toprak ve kaya gibi sınırlardan saçılırlar. Bu yansımalar yüzeydeki ani dielektrik değişimlerinden kaynaklanır. Geri saçılarak alıcıya ulaşan dalgalar saklanarak, doğrudan ya da işaret işleme teknikleri uygulanarak söz konusu ortamın değerlendirilmesini sağlarlar. Yüzeyaltına nüfuz eden radarlar günümüzde yüzeyaltı tarama amaçlı yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Ancak her uygulama için yeterli olmadıklarından halen bu alanda yeniliklere ihtiyaç duyulmaktadır.

Çok kapsamlı olan yüzeyaltı görüntüleme probleminin gerçekçi bir şekilde modellenebilmesi, doğru anten tasarımlarının işaret işleme tekniklerinin denenmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Bu tez çalışmasının amacı, yüzeyaltı görüntüleme daha iyi sonuçlar elde edebilmek ve yeni yaklaşımların denenebilmesi için, farklı yüzeyaltı problemlerini gerçekçi bir şekilde modelleyip çözebilecek ve farklı anten dizilimlerinin etkilerini incelemeye imkan verecek bir bilgisayar paket programının geliştirilmesidir. Geliştirilen program sayesinde farklı anten dizilimlerin görüntülemeye etkileri incelenmiştir.

Bu tez çalışması iki aşamadan oluşmaktadır:

- Gerçekçi yüzeyaltı problemlerinin modellenip sentetik veri elde edilmesini sağlayan paket programın –GrGPR- geliştirilmesi
- Sentetik verilerin işleneceği görüntü oluşturma algoritmanın geliştirilmesi

İlk aşama, yüzeyaltı tarama senaryolarının modellenebilmesi ve sentetik verilerin oluşturulabilmesi için kullanıcı arayüze sahip GrGPR programı geliştirilmesinden oluşmaktadır. C++ ortamında geliştirilen bu program sayesinde, istenilen her türlü yüzeyaltı problemi modellenebilmektedir. Bu program, kullanıcıya karşılaştığı bir yüzeyaltı problemini modelleyip ve çözebilmesi için farklı frekans, ortam ve anten dizilimleri kullanmasına imkan tanımaktadır. Örneğin programda, MHz mertebelerinde GHz mertebesindeki frekans aralıklarına kadar yayılım sağlanabilmektedir. Böylece MHz'ler mertebesinde çalışılarak sanki alçaktan uçan bir uçak tarafından geniş bölgelerin taranması için gerekli modellemeler gerçekleştirilebilmektedir. GHz'ler mertebesindeki frekanslar seçildiğinde ise santimetre boyutlarındaki alanlarda milimetrik nesnelere, (örneğin göğüs kanserindeki tümörlü hücreler gibi), modellenebilmektedir.

Homojen olmayan ortamlar GrGPR ile modellenebilmektedir. Böylece gerçekte elektriksel özellikleri homojen olmayan ortamlar için senaryolar oluşturularak zemin karmaşası etkilerini de incelemek mümkün olmaktadır.

Farklı senaryolar için farklı anten konfigürasyonları gerçekleştirilebilmektedir. Düz bir zemin altındaki nesnelerin tarandığı problemler için antenler doğrusal olarak yerleştirilebildiği gibi, engebeli yüzeylerde kullanılabilmesi için eğimli ve eliptik anten dizilimleri program içine yerleştirilmiştir.

İnsan vücudunun dairesel olarak taranması ya da bir yapının etrafının taranması gibi uygulamalar için yararlanılabilecek kapalı çevrim anten dizilimleri programa ilave edilmiştir. Kapalı çevrim dizilimler, dairesel, karesel veya üçgen olarak tercih edilebilmektedir.

Tez çalışmasının ikinci aşaması GPR'dan elde edilen sentetik veriler kullanılarak iki boyutlu görüntülerin oluşturulabilmesini sağlayan bir görüntü oluşturma algoritmasının geliştirilmesinden oluşmaktadır. Bu algoritma için yapay açıklıklı radar prensibinden yararlanılmıştır. Geliştirilen program sayesinde yüzeyaltındaki anormalliklerin (gömülü nesnelere) varlığının tespitinin yanı sıra nesnenin geometrik şeklinin de belirlenmesi mümkün olmaktadır. Algoritma, hem antenlerin yüzeye tam temas ettiği durumu ve ya antenlerin yüzeyden belli bir miktar yukarıda olduğu durum için hesaplama yapabilmektedir. Antenlerin yüzeyden yukarıda olması durumu için hava-yüzey arasındaki geçişten kaynaklanan kırılma etkileri Snell yasası kullanılarak hesaplanmaktadır.

Tezin Materyal ve Yöntem bölümünde geliştirilen GrGPR programı ve görüntü oluşturma kodu ve gelişim aşamaları ekran görüntüleri yardımıyla detaylı olarak anlatılmıştır. Ayrıca GrGPR programına temel oluşturan yüzeyaltı tarama radarlarının teorisi ve FDTD metodu konularından bahsedilmektedir. Görüntü oluşturma kodunun oluşturulmasında temel alınan yapay açıklıklı radarlar Materyal ve Yöntem bölümünde incelenmiş ve geleneksel anten dizilerine göre avantajları açıklanmaktadır.

Farklı anten konfigürasyonlarının GrGPR ile gerçekleştirilebilmesi, gömülü nesnelerin görüntülerinin oluşturulmasında hangi konfigürasyonun daha verimli sonuçlar verdiğini karşılaştırmaya imkan vermektedir. Bu tez çalışması kapsamında anten



konfigürasyonlarının verimliliğini etkileyen faktörlerden ikisi olan anten sayısı ve antenlerin kapalı çevrim yerleştirilmesi hali için antenlerin nesneye yakınlık ve uzaklığının, görüntü oluşturma üzerine etkileri incelenmektedir. Ayrıca homojen olmayan bir ortamın yayılım ve görüntüler üzerindeki etkileri homojen ortamlarla karşılaştırılarak araştırılmıştır.

Bu tez çalışması içerisinde yukarıda bahsedilen inceleme konularına ait elde edilen tüm sayısal sonuçlar karşılaştırmalı olarak grafikler ile birlikte Araştırma Sonuçları bölümünde sunulmaktadır.

## 1. KAYNAK ÖZETLERİ

Yapılan araştırmalara göre dünya üzerinde yer alan 60 üçüncü dünya ülkesinde birçok insan-savar (anti-personnel-AP) mayın çevreye zarar vermekte, yaşama alanlarını daraltmakta ve tarım alanlarını kirletmektedir. Mayın temizleme işlemi yerleştirme işlemine göre daha fazla zaman aldığından kirlenme miktarı her geçen gün daha da artmaktadır. [Peichl ve ark. 1999]. Mayın tarama konusunda elde edilebilecek en ufak bir gelişme bile mayın temizleme işleminin hızlandırılması açısından büyük önem taşımaktadır.

II. Dünya Savaşı'ndan günümüze, ABD Ordusu yer mayınlarını tespit etmek amacı ile birçok teknolojileri araştırmışlardır [Bourgeois ve Smith, 1998]-[Convers 2004]. Bu alışmalar, elektromanyetik yayılımın geniş bir yelpazede kullanılmasını içermektedir: düşük frekanslar (metal algılayıcılar), radyo ve mikrodalga frekansları, kızılötesi ve optik frekanslar. Radyo ve mikrodalga frekanslarında çalışan algılayıcılar genellikle GPR yapısındadırlar.

Yeraltına yerleştirilen mayınlar, belli bir miktar metal içerdiği (metal kap içinde patlayıcı madde) gibi tamamen dielektrik (dielektrik kap içerisinde patlayıcı madde) olabilmektedirler. Metal algılayıcılar ilk belirtilen mayınları algılayabilirken diğerini algılayamazlar. Dolayısı ile yüzeyaltı algılayıcılarında aranan özellik dielektrik özelliğe sahip yapıları etrafında dielektrik ortama rağmen algılayabilmeleridir [Daniels 2004].

Günümüz modern mayınlarının daha az metal içerikli ve daha küçük olması, yüzey üzerinde ya da altında mayından farklı metal parçalarının da yer alması (rneğin şarapnel parçaları) metal detektörlerinin yetersiz kalmasına ve yeni arayışlar içine girilmesine neden

olmuştur. Bu amaçla yüzeyaltı tarama radarları geliştirilerek daha etkin çözümler üretilmeye çalışılmaktadır.

İyonlaşmayan elektromanyetik dalgaların insan vücudundaki kanserli hücreleri tespit etmek için kullanılması hayali ile birlikte minyatür radarlara biyomedikal uygulamalarda da rastlanmaktadır.

Özellikle son yıllarda göğüs içindeki iyi huylu olmayan urların tespiti için UWB radarların kullanıldığı bir yöntem geliştirilmiştir. [Hagness ve ark. 1998]. Mikrodalga frekanslarında diğer kanser türleri ile karşılaştırıldığında göğüs urlarının elektriksel özellikleri normal göğüs dokusuna göre belirgin farklılıklar göstermektedir. Ayrıca bu frekanslarda göğüs dokusunun, beyin ve kas gibi diğer dokulara göre daha geçirgen olması [Fear ve ark. 2002], mikrodalga frekansında elektromanyetik dalgaların göğüs urlarının görüntülenmesinde kullanılması fikrini desteklemektedir. Göğüs kanseri teşhisinde kullanılan ve bir x-ray görüntüleme tekniği olan mamaogramın, kötü huylu urların tespitinde yetersiz kalması, MRI (Magnetic Resonance Imaging) in çok maliyetli oluşu ve henüz yeterli bir görüntüleme yöntemi olup olmadığının bilinmeyişi kanser araştırmasında yeni arayışlara neden olmuştur.

U.S. Institute of Medicine tarafından hazırlanan bir rapora göre iyi bir göğüs görüntüleme aracı

- Düşük sağlık riski taşımalı
- Mevcut urlara karşı hassas olmalı ve kötü huylu olanları ayırt edebilmeli
- Tedavi edilebilir aşamada iken teşhis koyabilmeli
- Rahat uygulanabilir ve
- Düşük maliyetli olmalıdır

*“Erken teşhis hayat kurtarır”*

Göğüs kanseri dünya üzerindeki gelişmiş ülkelerin hepsinde kadınlarda akciğer kanserinden sonra en yaygın olarak rastlanan ve erken teşhis edildiği takdirde kurtulma şansı en yüksek olan bir kanser türüdür. İleriki yaşlarda bu kanser türünün görülme ihtimali genç yaşlardakine göre daha da fazladır [Tablo 1.1]. Bunun dışında ailenin geçmişinde daha önce görülmüş olması, stres faktörü, bağışıklık sisteminin zayıflığı vb. nedenler risk faktörünü daha da arttırmaktadır.

Çizelge 1.1 Yaşlara göre Göğüs Kanserine Yakalanma Riski [Feuer ve ark. 1999]

<b>Yaşlara göre Göğüs Kanserine Yakalanma Riski</b>	
30 lu yaşlar	2212 de bir kadın
40 lı yaşlar	235 de bir kadın
50 li yaşlar	54 de bir kadın
60 lı yaşlar	23 de bir kadın
70 li yaşlar	14 de bir kadın
80 li yaşlar	10 de bir kadın
Üzeri	8 de bir kadın

Göğüs kanseri safhaları 0 (en erken asama)-IV (en ileri aşama) olmak üzere 7 safhada verilmektedir (Tablo 1.2). (American Cancer Society Breast Cancer Facts & Figures: <http://www.cancer.org/> ).

Yüzeyaltı radar teknikleri, yer yüzeyinin üst kısımlarında yer alan tarihi eşyaların ve yapıların algılanması ve yerlerinin belirlenmesinde artan bir şekilde kullanılmaktadır. Daniels ve arkadaşlarının 1988 yılında hazırladıkları bu makale, bu alanda yapılan çalışmaları incelemekte, uygulama alanlarının ve planlanan çalışmalara uygun sistem tasarımı için duyulan ihtiyacın önemini vurgulamaktadır. Tüm tasarım stratejisi, etkili yüzeyaltı radar uygulamaları için gerekli olan tüm başlıklarla birlikte detaylı olarak verilmektedir. Bunlar, yer yüzeyinin dielektrik özellikleri, işaret modülasyon yöntemi ve

uygun antenlerin kurulması ve işaret işleme metotlarıdır. Son olarak, radar teknolojisinin gelişen bu alanı için gelecekteki teknik ve ticari beklentiler üzerine bir değerlendirme yapılmaktadır.

Çizelge 1.2 Göğüs kanserinin aşamalarına göre bağıl kurtulma şansları [American Cancer Society]

SAFHA	5-yıl Bağıl Kurtulma Şansı
0	% 100
I	% 100
IIA	% 92
IIB	% 81
IIIA	% 67
IIIB	% 54
IV	% 27

Tablo 1.1 ve Tablo 1.2 göğüs kanserinden kurtulmanın anahtarının erken teşhis olduğunu göstermektedir. Bu da çok küçük tümörlerin dahi tespit edebilecek yeni yöntemlerin geliştirilmesinin önemini arttırmaktadır.

Günümüzde göğüs kanseri teşhisinde kullanılan en yaygın yöntem X-ray mamografidir. Ancak yoğun dokularda hatalı sonuçlar vermesi, hastaya olcum sırasında rahatsızlık vermesi ve az da olsa X-ray e maruz kalması gibi dezavantajları bulunmaktadır.

Mikrodalga frekanslarında diğer kanser türleri ile karşılaştırıldığında göğüs urlarının elektriksel özellikleri normal göğüs dokusuna göre belirgin farklılıklar göstermektedir. Ayrıca bu frekanslarda göğüs dokusunun, beyin ve kas gibi diğer dokulara göre daha geçirgen olması [Fear ve ark. 2002], mikrodalga frekansında elektromanyetik dalgaların göğüs urlarının görüntülenmesinde kullanılması fikrini desteklemektedir.

Kötü huylu tümörler ile normal göğüs dokusunun dielektrik katsayıları arasındaki 5:1 oranındaki fark ve mikrodalga frekansındaki dalgaların normal göğüs dokusu içinde

çok az zayıflaması ve doku içine nüfuz edebilmesi mikrodalga görüntüleme yöntemlerinin kanser teşhisinde kullanılmasına olanak vermektedir. Dielektrik özelliklerdeki farklılıklar Tablo 1.3 de yer almaktadır.

Çizelge 1.3 Elektriksel özelliklerin ortalama değerleri ( $f = 6\text{GHz}$ ) [Li ve ark.2001]

	<b>Dielektrik katsayısı</b>	<b>İletkenlik [S/m]</b>
<b>Deri</b>	36	4
<b>Doku</b>	9	0.4
<b>Tümör</b>	50	7

Peters ve arkadaşları, 1994 yılında yeraltına nüfuz eden radarları (GPR) tanıttıkları makalede, bu radarları çevresel bir araç olarak ele almakta, temel özelliklerinden ve kullanım alanlarından bahsetmektedirler. Bu makalede bahsedildiği üzere, GPR içinde yer alan temel kavramlar, antenler, yayılım, hedeften saçılma ve haritalandırmadır. GPR, oldukça geniş çeşitliliğe sahip yüzeyaltı özelliklerinin algılanmasında kullanılan bir araç olarak düşünülmektedir. Bu çalışmada GPR bazı uygulamalarının açıklamaları yer almaktadır. Çevresel algılama aracı olarak düşünüldüğünde GPR, gömülü tankların, yer altı su seviyelerinin ve atık suların algılanmasında kullanılmaktadır. Çeşitli askeri araçların, yer mayınları ve UXO, algılanması da ciddi bir çevresel uygulamadır. Ayrıca mezarlıkların ve arkeolojik alanların algılanmasında da kullanılmaktadır. Sayılan bu alanlar GPR'ın oldukça geniş uygulama alanlarının tamamından oldukça uzaktır. Bu çalışmada da bu GPR'ın uygulama alanları üzerinde durulmaktadır.

FDTD metodu kullanılarak mayın deteksiyonu için kullanılan algılayıcıların sayısal simülasyonları 1998 yılında Bourgeois ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilmiştir. Ayrık açıklıklı algılayıcılar yıllardır US ordusu tarafından toprak-mayın tarama uygulamalarında kullanılabilirliği incelenmektedir. Bu antenler metalik bölmelerle ayrılmış köşe yansıtıcı

içine yerleştirilmiş iki paralel dipol antenden oluşmaktadır. Algılayıcı boş zemin üzerine geldiğinde antenler arasındaki girişim minimum olmakta gömülü bir mayına denk geldiğinde girişim artmaktadır. Bu çalışmada ayırık-açıklıklı algılayıcı, hava, toprak ve gömülü mayından oluşan komple elektromanyetik sistem FDTD metodu kullanılarak modellenmiştir. Sonlu hesaplama uzayı yutucu sınır koşulu, mükemmel uygunlaştırılmış tabaka (PML) ile sonlandırılmıştır. Simülasyon sonuçları USA de Georgia Tech de yapılan deneysel ölçümlerle uyumluluk göstermektedir.

İletkenlik kayıpları olan, homojen olmayan ve dispersif toprak üzerinde üç boyutlu (3D) zaman düzlemi GPR simülasyonları 1998 yılında Teixeira tarafından tanıtılmaktadır. Toprak dispersiyonu çokterimli Lorentz ve Debye modelleri ile modellenip adım adım doğrusal ardışık konvolusyon (PLRC-Piecewise Linear Recursive Convolution) tekniği kullanılarak FDTD ile birleştirilmiştir. Dispersif toprak parametreleri raporlanmış deneysel sonuçlardan alınmıştır.

GPR sisteminde verici ve alıcı saçıcı nesnenin gömülü olduğu dispersif toprağın hemen üzerine yerleştirilmiştir. Verici sabit iken alıcının konumu doğrusal olarak değiştirilerek veriler elde edilmiştir. Saçılan nesne metalik boru alındığında elde edilen verilerin gösterimi sonucunda nem oranı arttıkça saçıcı nesneden gelen yansımalarda gecikmeler ve zayıflamalar olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca non-dispersif ortam için yapılan ölçümlerle arasında farklılıklar oluşmuştur. Plastik boru kullanıldığında ise non-dispersif ortam ile dispersif ortam arasındaki farklılıklar belirginsizleşmiştir.

Verici ve alıcı arasında meydana gelen girişimlerin ortadan kaldırılması için farklı anten konfigürasyonları Gürel ve Oğuz tarafından 2000 yılında gerçekleştirilmiştir. Gerçekçi 3D GPR senaryolarını modellemek için FDTD yöntemi kullanılmıştır. Vericiden çıkıp alıcıya ulaşan direk işareti engellemek için radar ünitesi iki verici ve bir alıcı antenden oluşacak şekilde modellenmiştir. Verici ve alıcı antenler rastgele polarizasyonlara sahiptirler. Tek ya da çoklu gömülü nesnelere dielektrik ve iletken dikdörtgenler prizması ve disk şeklinde modellenmişlerdir. FDTD uzayı PML ile sonlandırılmıştır.

Radar ünitesi alıcı tam ortada olacak şekilde iki verici ve bir alıcıdan (TRT) oluşmaktadır. İlk konfigürasyonda vericiler arasında  $180^\circ$  faz farkı vardır. Böylece vericilerden gelen direk işaretler ve yüzeyden gelen yansımalar birbirini yok eder. Böylece algılanan işaret yalnızca saçıcı nesneden gelmektedir. Farklı polarizasyonlar ve saçıcı nesnelere için simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. C-scan sonuçlar elde edilmiştir.

2001 yılında, Gürel ve Oğuz, homojen olmayan yüzey geometrileri için gerçekçi GPR simülasyonları FDTD ile modellenerek gerçekleştirmişlerdir. Yüzey modeli, kayıplı ve pürüzlü ayrıca rastgele boyut ve konumlarda farklı dielektrik ve iletkenlik özelliklerine sahip homojen olmayan yapıda tanımlanmıştır. Gömülü nesnelere iletken ve prizmalar ve diskler olarak modellenmiştir. GPR işaretlerini işlemek için basit bir algoritma kullanılmıştır. GPR ünitesi alıcı ve verici antenlere ilave olarak alıcıya doğrudan kuplajı azaltılmak için iletken ve yutucu yüzeylerle modellenmiştir. PML yutucu sınır koşulları kullanarak FDTD hesap uzayı içindeki yutucuları tanımlamak ve kayıplı ve katmanlı arka planı sonlandırmak için kullanılmıştır. Bu yöntemle elde edilen işaretler A-Scan ve B-Scan gösterimlerle incelenmiştir.

Arka planda yer alan ortam karakteristikleri sabit olmadığından ve yer mayını izleri birbiri ile uyumlu olmadığından yer mayınlarının GPR ile tespiti zor bir işlemdir. Özellikle elle taşınan ve işaret işleme teknikleri için gerekli olan anten konumu ve hızı gibi bilgilerin bilinmediği durumlarda bu durum daha da zorlaşmaktadır. Ho ve arkadaşları tarafından 2002 yılında hazırlanan bu makale, frekans düzleminde doğrusal tahminin bu tip bir senaryoda kullanımını önermektedir. Bir frekans düzlemi yer etkileri vektörü alt bantlara bölünür. Her bir alt bölüm doğrusal tahmin modeli ile modellenir. Söz konusu vektör örneği önceki birkaç vektör örneği ve rasgele gürültü bileşimi ile ifade edilir. Algılayıcı ilk önce, ML yöntemi ile tahmin katsayılarını hesaplar daha sonra da genelleştirilmiş yöntemi kullanarak yer mayının olup olmadığını belirler. Alt bant işlemenin algılayıcının doğruluğu üzerindeki etkisi incelenmiştir. Algılama sonuçları farklı yer coğrafi özelliklere sahip yerlerden alınmış veriler üzerinde sunulmuştur. Veri tabanı, farklı şekil, boyut ve içerikli 2300 mayın ve yüksek miktarlarda mayınsız yerlerden alınan ölçümlerden oluşmaktadır.



Önerilen algılayıcı temel enerji fark algılayıcısı ile karşılaştırılmıştır. Önerilen yöntem tüm hedefler için %90 algılama olasılığı ile hatalı alarm oranını %60 azaltmakta, derin tanksavarlar için %90 algılama olasılığı ile %70 azaltmaktadır.

Yüzeyaltı görüntüleme yüzeye yakın alanların algılanmasında doğrudan anten girişimi, hava/zemin arasındaki etkileşim, alıcı gürültü zemini gibi etkenler işaretin gencliğinde, mesafe doğruluğunda ve çözünürlüğünde kayıplara neden olmaktadır. Bu çalışma yakın alan algılama yöntemini kullanarak işaret-karmaşa (signal-to-clutter) probleminin deneysel ve sistem analizi ile sayılan bu problemlere değinmektedir. Görüntü işleme kazanımlarını güçlendirmek için, ikili ortam problemlerinde uygulanabilen etkili bir uzay-frekans yapay açıklık tekniği açıklanmaktadır (Morrow ve Van Genderen, 2002).

Mayınların tespit edilmesi amacı ile, yüzeyaltının görüntüleri bistatik adım adım frekans sürekli dalga radar sistemi kullanılarak oluşturulmuştur (Van Dongen ve arkadaşları, 2003). Ölçümler sırasında, sistem yüzey boyunca hareket ederek ve yüzey altında yer alan nesnelere bağlı olarak değişen gerilim değerleri ölçülür. Bu değişimler karmaşık kontrast fonksiyonunun bir duyarlılık fonksiyonu ile konvolüsyonu ile formüle edilir. Bu duyarlılık fonksiyonu doğru dalga ile toplam elektrik dalga alanının vektörel iç çarpımıdır. Born yaklaşıklığı kullanılarak, duyarlılık fonksiyonu vericiden iletilen alan ile iletim modunda çalışan alıcısındaki alanın iç çarpımı ile elde edilir. Görüntüleme amacı ile yüzeyaltındaki alana değerlerinin bilinmesine ihtiyaç vardır. Yayılım karakteristiklerinin doğru bir şekilde modellenmesi zor olduğundan, antenlerin izleri bir seviyede ölçülür ve Huygens' prensibi kullanılarak iletilen dalganın yayılımı sağlanır. Bu prensibin kullanılabilirliği sağlandıktan sonra, ölçülen paternler kullanılarak yapay veri oluşturulur ve geri yayılım veri üzerinde uygulanarak nesnelere konumları belirlenebilir.

Gürel ve Oğuz, 2000 yılında sundukları makalede kullanılan GPR ünitesinden yararlanarak 2003 yılında, vericiler arasındaki uzaklıkları değiştirerek etkilerini incelenmişlerdir Radar ünitesinin dört farklı uygulaması yapılmıştır. İki radar ünitesinde antenler düşey ve diğer ikisinde yatay polarizasyona tabi tutulmuştur. İki ünite de antenler

GPR ın tarama yönüne dik diğer ikisi tarama yönüne paralel olarak yerleştirilmiştir. Her ünite için farklı C-scan sonuçlar elde edilmiştir. Verici antenler arasındaki uzaklıklar değiştirilerek etkileri farklı GPR üniteleri için incelenmiştir. Ayrıca GPR ünitesinin merkezi (R) hedeften uzaklaştıkça elde edilen sonuçlar gözlemlenmiştir.

Havadan SAR, BP algoritmasının prensibi zamanda öteleme ve toplamaya dayanmaktadır. Ancak, GPR sisteminde geleneksel BP yöntemi hava-toprak arayüzü ve toprağın iletkenlik özelliklerinden dolayı kısıtlanmaktadır. Nesnelerin konumlarının ve yansıtma yoğunluklarının doğru olarak elde edebilmek için BP algoritmasının zamanda öteleme ve genlik hesaplamaları açısından geliştirilmesi gerekmektedir. Lei ve arkadaşları, 2004 yılında gerçekleştirdikleri çalışmada TAM-BP yöntemi tanıtmakta ve performans etkinliğini göstermektedirler. TAM-BP algoritmasında ilk önce antenden hücreye olan uzaklığa ait denklem oluşturulur ve yüzey ile kesişme noktası tespit edilir. Yola bağlı gecikme ve zayıflama miktarları hesaplanır. Bu bilgilerden yararlanarak hücreye ait alan değerleri bulunur.

Bu çalışmada, GPR'nin FDTD ile simülasyonu ve geliştirilmiş Back Projection (BP) görüntüleme algoritması Lei ve arkadaşları tarafından tanıtılmaktadır (2004). FDTD hesap uzayını sonlandırmak için, geliştirilmiş mükemmel uygunlaştırılmış tabaka (GPML-Generalized Perfectly Matched Layer), yutucu sınır koşulları (ABC-Absorbing Boundary Conditions) kullanılmıştır. Geleneksel BP algoritmasının hava-toprak arayüzünden ve toprağın iletkenliğinden kaynaklanan bazı kısıtlamalara sahiptir. Bu çalışmada geliştirilmiş BP algoritması tanıtılmaktadır. GPMLABC tekniğinin performansını gösterebilmek için sayısal sonuçlar ve ölçümler A-scan, B-scan ve C-scan HRGPR-01 sistemi kullanılarak elde edilmiştir.

Güncel veriden bağımsız ötele ve topla (DAS-Delay and Sum) metodundan farklı olarak veriye uygunlaştırılabilir APES (Amplitude and Phase Estimation) ve RCB (Robust Capon Beamforming) metodları kullanılarak FLGPR (Forward Looking GPR) görüntü oluşturma algoritması sunulmaktadır (Wang ve arkadaşları, 2005). Veriye bağlı bir metod

olduğundan DAS'a göre daha yüksek çözünürlük ve girişim etkilerini azaltma özelliğine sahiptir. Deneysel çalışmalarla elde edilen verilerden yararlanılarak görüntüler oluşturulmuştur.

Mayın tespit araştırmalarında deneysel çalışmalara bir örnek 2007'de Joint Research Center (Ispira,İtalya) da yer alan mayın test alanında kullanılan, ve yüzeye yakın yerleştirilmiş olan multistatik GPR ile Fischer ve arkadaşları tarafından gerçekteşirilmiştir. Burada elde edilen verilere FM (Factorization Method) uygulanmıştır. Bu çalışmanın ana amacı, oldukça yeni yöntem olan düşük hesaplama maliyetli doğrusal olmayan görüntü oluşturma algoritmasını, Factorization Method-FM- uygulamaktır. Bu çalışmada, ortak bir taşıyıcıya monte edilmiş bir anten dizisi geliştirilmiştir. Her bir anten alıcı yada verici olarak çalışabilir, ve her dizideki anten/verici kombinasyonu ölçülebilir. Yapılan çalışmalar sonucunda FM in performansının düşük olduğu ancak saçıncının algılanmasında yeterli bilgi sağladığı görölmektedir.

Hagness ve arkadaşları tarafından 1998 yılında gerçekteşirilen çalışmada işaret işilmeye yönelik bir araştırma gerçekteşirilmiştir. Bu çalışmadaki sistemde bir darbe odak tekniği ve zamanda süzölerek (time-gating) metodu kullanılarak, urların algılanması kuvvetlendirilirken dokunun heterojenliğinden ve yutulmalardan kaynaklanan etkileri baskılanmaktadır. FDTD benzetimleri, çevreleyen normal dokunun heterojenliğinden kaynaklanan etkilere rağmen çapı 2mm den küçük urların algılanabildiğini göstermektedir.

Hagness ve Li'nin 1998'deki çalışmalarının devamı olan bu çalışmada yapay bir odak noktası oluşturmaya dayanan "Confocal Microwave Imaging" yöntemi kullanılarak meme kanserinde kötü huylu urların varlığı ve konumu tespit edilmiştir (2001). Bu yöntemde FDTD ile modellenen yapı üzerinde herhangi bir nokta yapay odak noktası olarak seçilir. Monopol antenler yüzey üzerine doğrusal olarak yerleştirilmiştir. Her bir antenin bu odak noktasına olan uzaklığı hesaplanır. Antenlerin farklı konumlarda olmasından dolayı bu uzaklıklar birbirinden farklı olacaktır. Dolayısı ile her bir antenden çıkıp yeniden aynı konumdaki alıcı antene ulaşması için geçen çift yönlü dolaşım süresi her anten için farklı

olacaktır. Herhangi bir anten referans seçilip aralarındaki gecikme farkından yararlanarak işaretlere zamanda öteleme (time-shifting) uygulanır. Böylece odak noktasına ait alan değerleri zamanda aynı konuma gelmiş olur. Seçilen bu odak noktasında eğer saçıcı nesne (kötü huylu ur) bulunuyorsa maksimumlar alt alta gelmiş olur. Bu işaretlerin toplanması ile dizi antenin çıkış işareti elde edilmiş olur ve antenin maksimum hüzmesi bu zaman adımda gözlemlenir. Odak noktasında herhangi bir saçıcı nesnenin bulunmaması halinde toplama sonucunda alan değerleri birbirini zayıflatır. Böylece saçıcı nesneye ait değerler kuvvetlenirken, çevreden gelen gürültü işaretleri zayıflamış olur. Bu odak noktası tüm yapı boyunca  $1\text{mm}^2$  aralıklarla taranır ve zamanda öteleme miktarları her odak noktası için düzenlenir. Elde edilen bu işaretlerden yararlanarak her odak noktasına ait alan değeri okunup karesi alınarak görüntü oluşturulabilir. Her odak noktası için ayrı ayrı öteleme ve toplama işlemi yapıldığından oldukça zaman kaybettiren bir işlemdir.

2001'deki bu çalışmanın devamı olan benzer bir çalışma iç boyutlu olarak 2002 yılında Fear ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada 1cm den küçük urların tespit edilebilmesi için sentetik düzlemsel ve silindirik anten dizileri üzerinde durulmaktadır. Düzlemsel yöntemde hasta sırtüstü, silindirik yöntemde ise yüzüstü yatırılarak veriler alınmıştır. Düzlemsel sistemde direnç yüklü bir bowtie anten, silindirik sistemde ise direnç yüklü dipol anten sıra ile göğüs üzerinde veya etrafında taranarak geri saçılan işaretler kaydedilmiştir. Görüntünün oluşturulması için enine boyuna ve aksenal kesitler ele alınmıştır.

Geri saçılan işaret erken zaman ve geç zaman cevabını içermektedir. Erken zaman cevabı anten çiftleri arasındaki geçişten gelen işareti, yüzeyden gelen yansımaları içermektedir. Geç zaman cevabında ise tümörden ve diğer (gürültü) etkilerden gelen işaretleri içermektedir.

Tumor cevabını kuvvetlendirirken erken ve geç (ileri) zaman gürültü bilgisini zayıflatacak yönde görüntü algoritması geliştirilmiştir. Görüntünün oluşturulması dört adımda gerçekleşmektedir:

### 1. Kalibrasyon

Baskın olan erken zaman cevabının işaretten temizlenebilmemesi için düzlemsel yapı için algılanan işaretlerin ortalaması alınarak bir referans işaret oluşturulmakta ve bu işaret ham işaretten çıkartılmaktadır. Silindirik yapıda ise nesne yokken elde edilen işaretler kaydedilir asıl işaretten çıkartılır. Bu durumda göğüs yüzeyinden gelen işaret baskın olarak kalmaktadır. Antenler yüzeyden az da olsa farklı uzaklıklarda olabileceğinden etkili bir zayıflatma için yüzeyden gelen yansımaları düzenlemek gerekir. Düzenlenen işaretlerden elde edilen ortalama referans işaret asıl işaretten çıkartılarak kalibrasyon işlemi tamamlanmış olur.

### 2. İntegrasyon

Diferansiyel Gaussian işaretinin tam ortasında zamanda bir sıfır geçişi bulunmaktadır. Bu sıfır geçiş geri saçılan işarete de görülmektedir. Bunu ortadan kaldırmak için zaman integralinin alınması gerekir. Böylece orta noktada bir maksimum oluşur ve toplama işleminde maksimumun oluşmasında etkin olur.

### 3. Kompanzasyon

Radyal yayılım ve yol kaybı etkilerini ortadan kaldırmak için işaretler kompanzasyona tabi tutulmaktadır. Radyal yayılım küresel yayımda mesafe ile genliğin azalmasından kaynaklanırken, yol kaybı kayıplı göğüs yapısı içinde meydana gelmektedir. Radyal yayılımı hesaplamak için bir bowtie anten FDTD de modellenen homojen göğüs yapısının içine daldırılarak antene dik gelen ve kaynaktan geçen noktalarda alan değerleri bulunur. Elde edilen değerler doğrusal enterpolasyona tabi tutularak istenen mesafelerdeki toplam yayılım ve kayıp etkisi yaklaşık hesaplanır. Silindirik sistemlerde radyal yayılım  $1/r$  ile orantılıdır ve  $r$  antenden olan uzaklığı göstermektedir. Silindirik sistemde göğüs içinde olmayan gürültü etkisini kuvvetlendirdiğinden yol kaybı ihmal edilmektedir. Her iki sistem için her zaman adımı için yayılım mesafesi hesaplanıp, kayıtlı ve işlenmiş dalga işaretinde ilgili kompanzasyon katsayısı uygulanır.

#### 4. Görüntünün oluşturulması

İşlenmiş işaretler sentetik olarak göğüs içerisinde herhangi bir noktaya odaklanır. Her antenin bu noktaya olan uzaklıkları hesaplanır ve zamanda gecikme miktarlarına çevrilir. Bu gecikme değerleri kullanılarak her antene ait işlenmiş işaretlerin etkisi bulunarak toplanır ve kareleri alınır. Bu işlem her yeni odak noktası için tekrarlanır.

Görüntü analizinde, tumor olan ve olmayan durumlar için görüntüler elde edilmiş ve tumorün varlığı halinde konumunun tespit edildiği görülmüştür. Farklı sayıdaki anten konumları için (tam set 41 veya 45 anten ve 25 anten ) denemeler yapılmıştır.

CMI metodunun performansını değerlendirmek için, göğüs içerisindeki işaret gürültü (SC) oranı, tumorun konumu ve tumor cevabının FWHM (full-width at half-maximum-yarı maksimumdaki tam genişlik) ölçümlerine bakılmıştır.

Uzun zamandır mikrodalga mühendisleri iyonlaşmayan elektromanyetik dalgaları insan vücudundaki tümörlü hücreleri bulmak için kullanabilmenin hayalini kurmaktadırlar. Meme kanserinde bulunan urların diğer kanserli hücrelerle karşılaştırıldığında mikrodalga frekanslarında sağlıklı hücrelere göre farklı elektriksel özellikler göstermesi bu hayalin yakın zamanda gerçekleştirilebileceği yönde işaretler vermektedir. Ayrıca sağlıklı meme dokusu mikrodalga için diğer (beyin ve kas) hücrelerine göre daha geçirgendir.

2002 yılında Fear ve arkadaşları, mikrodalğanın kanser araştırmasında kullanılması ile ilgili genel bilgilerin bulunduğu ve bu konuda çalışmalarda bulunacaklara detaylı bir kaynak oluşturacak bir makale hazırlamışlardır. Bu çalışmada ayrıca kanserli hücrelerin farklı frekanslarda gösterdiği elektriksel özellikler yer almaktadır. Meme kanserinin teşhisinde kullanılan farklı yöntemler (pasif, hibrid ve aktif ) hakkında kısa bilgiler yer almaktadır.

Yine benzer bir çalışma Fear ve arkadaşları tarafından 2003 yılında gerçekleştirilmiştir. Mikrodalga görüntülemenin medikal uygulamaları hakkında bilgi

vermekte ve diğer görüntüleme yöntemlerinden bahsedilmektedir. Mikrodalga görüntülemenin göğüs kanserinin teşhisinde kullanılmasının dayandığı konular (mikrodalga enerjisinin iyonlaşmaması ve daha az zararlı olması, iyi ya da kötü huylu urların erken zamanda teşhis edilebilmesi, kanserli hücrelerin mikrodalga frekanslarında farklı elektriksel özellikler göstermeleri vs) hakkında detaylı bir bilgi vermektedir.

Erken zaman meme kanserinin teşhisi için uzay-zaman hüzme oluşturma yöntemine dayanan bir mikrodalga görüntüleme yöntemi önerilmektedir (Bond ve arkadaşları, 2003). Yüzeye yerleştirilmiş bir anten dizisinde, her eleman sıra ile UWB işareti iletmektedir. Algılanan geri saçılan işaretler uzay zaman hüzme oluşturunca geçirilerek, geri saçılan işaretin enerjisi konumun bir fonksiyonu haline getirilir. Hüzme oluşturunca, frekansa bağlı yayılım etkilerini kompanze ederken bozucu işaretleri ve gürültüyü azaltacak şekilde işaretleri uzaysal olarak odaklar. Sonuç olarak elektriksel özelliklerindeki farklılıklarında dolayı, yüksek enerji seviyelerinin görüldüğü noktalarda kötü huylu tümörler yer almaktadır. Ayrıca deri yüzeyinden gelen etkileri ortadan kaldırmak için bir veriye uyumlu algoritma tanıtılmaktadır.

Zaman uzay hüzme oluşturunca (Space-Time Beamforming) uzaysal odaklamayı gerçekleştirmek için, geri saçılan işaretleri ilk önce zamanda öteleyerek belli bir odakta gelen etkileri alt alta getirir. Düzenlenen işaretler FIR filtreden geçirilir ve hüzme oluşturunca çıkışını oluşturmak için toplanır. FIR filtreye ait ağırlık fonksiyonlarının katsayıları en küçük kareler (LS) yöntemi kullanılarak hesaplanır. Odak noktadan gelen işaretler birim kazançla filtreden geçerken frekansa bağlı yayılım etkileri kompanze edilmiş olur. Hüzme oluşturunca çıkışı yalnızca odak noktasından gelecek işaret geçecek şekilde zamanda süzülerek (time-gated) edilir ve enerji hesaplanır. Kötü huylu tümör olduğu takdirde yüksek enerji değerleri çıkışta elde edilir. Hüzme oluşturunca farklı konumlar tarar ve her konum için zamanda öteleme miktarları, pencereleme ve FIR ağırlık katsayıları hesaplanır. Enerjinin konumun bir fonksiyonu olarak gösterimi geri saçılan işaretin gücünün görüntüsünü oluşturur.

Yakın zamanda önerilen uzay-zaman hüzme oluşturma ile mikrodalga görüntüleme yöntemi kullanılarak küçük urların tespitinin deneysel uygunluğu incelenmektedir (Li ve arkadaşları, 2003). UWB (1-11 GHz) antenlerin oluşturduğu düzlemsel yapay diziyi içeren mikrodalga algılayıcı göğüs doku görüntüsünün üzerine yerleştirilir. 0.5 cm den küçük bir yapay ur bu yapının içine gömülür. Her yeni konumunda antenler sentetik olarak oluşturulmuş oldukça kısa darbeler gönderirler. Veri uyumlu algoritma yüzeyden gelen yansımaları elemek için kullanılır. İşaretler, geri saçılan işaretleri konuma bağlı fonksiyon olarak görüntülemek için tasarlanan 3D uzay-zaman huzme oluşturunandan geçirilmektedir. Oldukça küçük yapay urların başarı ile algılanması ve konumlarının tespit edilmesi sağlanmıştır.

Meme kanserinin tehisinde kullanıllana UWB radar uygulamalarının günümüzdeki durumu incelenmiş ve Li ve grubunun daha önce kullandığı huzme oluşturma metotları yeniden gözden geçirilmiştir. Kullanılan bu metotlara ilave olarak meme geometrisinin oluşturulması için tamamen geometrik çözümlere dayanan bir yöntem önerilerek yüzey hatları belirlenmiştir. Tüm metotlar ile elde edilen sayısal sonuçlar verilmiştir (2005).

Xie ve arkadaşları farklı bir anten dizilimi kullanmanın mikrodalga görüntüleme uygunluğunu incelemişlerdir (2006). Multistatik mikrodalga görüntüleme yönteminde bistatik (bir alıcı ve verici anten çifti yüzey üzerinde tarama yapar) ve monostatik (bir anten alıcı ve verici olarak tarama yapar) sistemlerden farklı olarak anten dizisi kullanılmaktadır. Her anten sıra ile aktif olmakta ve tüm alıcılar aynı anda geri saçılan işaretleri algılamaktadırlar. Çok sayıda algılanan işaret farklı yollardan geçerek yapı hakkında dolayısı ile tumor hakkında daha fazla bilgi taşınmasına imkan vermektedir.

Bu çalışmada, UWB CMI (Confocal Microwave Imaging) 'da kullanılmak üzere bir multistatik uygulanabilir mikrodalga görüntüleme (Multistatik adaptive Microwave Imaging-MAMI) metodu tanıtılmaktadır. MAMI, veriye bağlı uygulanabilir RCB (Robuct Capon Beamforming) algoritmasını iki adımda çalıştırmaktadır. Gerçekçi bir 3D model FDTD ile simüle edilerek MAMI'nin mevcut diğer metotlara göre yüksek



çözünürlülüğü ve girişim ayrıklaştırma yeteneği gösterilmektedir. Bu algoritmada  $M$  adet anten  $P$  sırada  $Q$  anten olacak şekilde yerleştirilmiştir ( $M=PQ$ ).

Veri önışleme kısmında istenmeyen etkileri (ilk darbe, yüzeyden gelen yansımalar, gürültü etkileri vs.) ayrıklaştırmak için mevcut geri saçılan işaretlerin ortalaması alınarak bir kalibrasyon işareti oluşturulmakta ve bu işaret mevcut işaretlerden çıkartılarak baskın olan istenmeyen gürültü etkileri temizlenmektedir.

İkinci adımda, işaretler odak noktasından gelen işaretleri aynı zaman adımına getirmek için zamanda öteleme yapılır. Daha sonra bu işaretler bir pencereleme (windowing) işlemine tabi tutulur. Pencerenin adım sayısı  $N$  bilinen darbe süresinin örnekleme zaman adımına bölünmesi ile bulunur ( $N=T/dt$ ).

Son olarak kayıplı göğüs yapısındaki yayılım zayıflaması göz önüne alınır. Küresel yayılımdan kaynaklanan genlikte bir azalma söz konusu olacaktır. Bu zayıflamayı ortadan kaldırmak için algılanan işaretler bir kompanzasyon katsayısı ile çarpılır. Daha sonra RCB uygulanarak işaret dalga formları vektör kestirimi yapılır. Tekrar RCB uygulanarak skaler dalgaformu kestirilir.

Kanserli hücrelerin tespitinde doku kalınlığının tespit edilebilmesi için bir uygunlaştırılmış bir metot geliştirilmiştir. Elde edilen veriden deri yüzeyine ait verinin urdan gelen veriden ayrıklaştırılması sağlanmaktadır (Williams ve arkadaşları, 2006).

Bu çalışmaya göre algılanan işaret giriş işareti ile bir darbe cevabını konvolüsyonundan oluşmaktadır. Saçıcı nesnenin darbe cevabının keskin bir tepe oluşturması beklenmektedir. Gözlemlenen işaret görüntülenen bölgeden yansımaları göstermektedir ve saçıcı nesnenin olması ve olmaması halinde elde edilen sonuçların farkıdır. Çalışmanın amacı doğrultusunda nesnenin daldırıldığı ortam ile deri yüzeyi ve deri yüzeyi ile iç bölgeler arasında gerçekleşen yansımalar ile ilgilenilmektedir. Bu yansımalar işaret içinde yer alan diğer yansımalara göre daha baskındırlar. Sistem FDTD ile simule edildiğinde sistem çıkışında elde edilen işaret sistemin oluşturan tüm kademelerin (anten,

iletim ortamı, saçıcı ve alıcı) giriş işareti ile konvolusyonundan oluşmaktadır. Antenin darbe cevabı bilindiğine ve ortamda saçıcı nesne yokken elde edilen işaretler de var olduğundan sıra ile dekonvoluyon işlemi uygulanarak saçıcıya ait darbe cevabı bulunmaktadır. Böylece deri yüzeyinin gözlem noktasına uzaklığı ve kalınlığı tespit edilebilmektedir.

Buraya kadar sayılan deneysel ve sayısal yöntemlerin yanı sıra mikrodalga görüntüleme için kullanılan aktif yöntemler de yer almaktadır. Aktif yöntemlerde amaç elde edilen verilerin teorik olarak çözümlenerek yapının elektriksel özelliklerinin tespit edilmesine dayanmaktadır. Ancak bu yöntemler, çoğu zaman doğru sonuç vermesine rağmen oldukça zahmetli ve zaman kaybettiren metotlardır. Devam eden kısımda aktif mikrodalga görüntülemeyi kullanan bazı çalışmalardan bahsedilmektedir.

Normal göğüs dokusu ile ırların elektriksel özellikleri arasındaki yüksek fark ırların tespit edilmesinde mikrodalga görüntülemenin önemini arttırmasına rağmen bu yüksek farklılık meydana gelen aşırı saçılmalar, düzgün görüntünün elde edilmesini zorlaştırmaktadır. Liu ve arkadaşları tarafından 2002 yılında gerçekleştirilen çalışmada, karşılaşılan bu duruma işaret etmek amacı ile hızlı Fourier dönüşümü, konjuge ve bikonjuge-gradyent metodları ile genişletilmiş Born yaklaşımının birleşimine dayanan hızlı ileri metodlar geliştirilmiştir. Mikrodalga göğüs-uru tespitinde karşılaşılan yüksek farklılığa bağlı çözünürlüğü geliştirmek amacı ile iki doğrusal olmayan mikrodalga görüntüleme algoritması önerilmektedir. Elde edilen sonuçlar göğüs dokusunun doğru olarak modellenmesini ve incelenmesine imkan verdiğini göstermektedir.

Bindu ve arkadaşları tarafından ise, aktif mikrodalga görüntüleme, göğüs kanserinin erken teşhisinde bir görüntüleme yöntemi olarak incelenmektedir (2006). Mikrodalgalara maruz kaldıklarında göğüs ırları sağlıklı göğüs dokusuna göre oldukça farklı elektriksel özellikler göstermektedirler. Aktif mikrodalga görüntülemenin iki farklı yaklaşımı-ölçülen yansıyan işaretler kullanılarak ortak odaklı mikrodalga görüntüleme tekniği ve ölçülen saçılan işaretler kullanılarak mikrodalga tomografik görüntüleme bu çalışmada

tanıtılmaktadır. Uygunlaştırıcı ortam olarak, normal göğüs doku örnekleri ile uyumluluk göstermesinden dolayı mısır şurubu kullanılmaktadır. Zaman düzlemi ortak odak mikrodalga görüntüleme antenin bant genişliği çok önemli olduğundan geniş bantlı bowtie antenler iletim ve algılamada kullanılmaktadır. Mikrodalga tomografik görüntüleme için aynı anten 3000MHz frekansta kullanılmıştır. Deneysel olarak elde edilen sonuçlar, FDTD analizi ile karşılaştırılarak doğrulukları kanıtlanmıştır. Toplanan veriler, bozulmuş Born ardışık metodu kullanılarak çözümlenerek 2D tomografik görüntüler oluşturulmaktadır. Göğüs örneklerindeki dielektrik geçirgenliğin değişimleri elde edilen geçirgenlik profillerinden ayırıştırılabilmektedir. Ortak odak mikrodalga tekniği kullanılarak, urun konumu yansıyan işaretin genliği şeklinde, etrafındaki dokunun su içeriğine bağlı olarak, güvenilir bir şekilde zaman düzleminde tespit edilebilir. Sonuç olarak mikrodalga görüntü göğüs urlarının algılanmasında kullanılacak bir yöntem olarak değerlendirilebilir.

Göğüs kanseri teşhisi için kullanılan çok geniş bantlı (UWB-Ultrawideband) mikrodalga radar görüntüleme teknikleri, göğüs dokusunun konuma bağlı ortalama dielektrik özelliklerinin değerlerinin bilinmesini gerektirir. Winters ve arkadaşları bu çalışmada, hastaya bağlı, frekansa bağlı ortalama dielektrik özelliklerinin saçılan UWB mikrodalga işaretlerinden tahmin edilmesini sağlayan bir algoritma önermektedirler (2006). Algoritma, zaman düzlemi ters saçılma probleminin çözülmesi için tekrarlanan bir zamanda sonlu farklar yönteminin (FDTD-Finite Difference Time Domain) bir çeşididir. Göğüs yapısının iki homojen kısımdan- deri ve altında yer alan doku- oluştuğu varsayılmaktadır. Algoritmanın performansı, anatomik olarak gerçekçi olan 2D sayısal göğüs görüntülerinin benzetimleri ile test edilmiştir.

Çakır ve arkadaşları tarafından tasarlanan çok amaçlı, FDTD tabanlı iki boyutlu yeni bir elektromanyetik sanal simülasyon aracı tanıtılmaktadır. Çok çeşitli elektromanyetik problemler, radyo dalgalarının bina içi ve dışındaki yayılımları, şehir içi ve kırsal bölge dalga yayılımları, elektromanyetik uyumluluk, açık/kapalı periyodik yapılar ve doğrusal ve düzlemsel anten dizilerine ait simülasyonlar gerçekleştirilebilmektedir. Bu çalışma bu

yazılımı tanıtmakta ve elektromanyetik kurslarındaki kullanım alanları hakkında örnekler vermektedir.

Karpat ve arkadaşları tarafından 2009 yılında gerçekleştirilen çalışmada, geliştirdikleri yüzeyaltı gömülü nesnelere ait senaryoların modellenebileceği paket programı GrGPR tanıtılmaktadır. Programın yüzeyaltında gömülü nesnelere modellenmesinde kullanılacak güçlü bir yazılım olduğu gösterilmektedir. GrGPR ile farklı anten dizilimlerinin simülasyonları yapılarak en verimli dizilimin dairesel olduğu tespit edilmiştir. Görüntü oluşturmada anten sayısının ve konumunun önemli olduğu verilen örnekler ile ispat edilmiştir.

Bu makalede tanıtılan arayüz programı tez çalışması kapsamında geliştirilerek yüzeyaltı tarama problemlerinde, konuya yeni adapte olmuş genç araştırmacılar tarafından dahi kullanılacak hale getirilmiştir.

## 2.4 Geliştirilen FDTD Tabanlı Yüzeyaltı Tarama Simülasyon Programı-GrGPR

Karmaşık elektromanyetik problemlerinin simülasyonlarının yapılabilmesi için sayısal modelleme yöntemlerine olan ilgi giderek artmaktadır. Bu ilgi ve bilgisayar teknolojilerindeki ilerlemelerle beraber kullanıcı kolay arayüze sahip simülasyon programlarına olan taleplerde de gün geçtikçe artış olmaktadır. İlk olarak, araştırma projelerinin ya da lisans veya doktora tezlerinin hazırlanması için ufak çaplı kodlar geliştirilirken, talebin artması ile birlikte ticari amaçlı paket programlar da markette yer almaya başlamıştır. Endüstride mühendisler tarafından kullanılan bu paketler daha sonra akademisyenler tarafından derslerde öğretim amaçlı, kendi öğretme potansiyellerini attırmak ve öğrencilerin görsel olarak daha iyi anlamalarını sağlamak amacı ile kullanılmaya başlanmıştır. Kullanıcı arayüze (Graphical User Interface-GUI) sahip olmaları bu alanda çalışmaya yeni başlamış ve programla yeni tanışmış kişiler tarafından bile kolayca kullanılabilmelerini sağlamaktadır.

Yüzeyaltı tarama problemi, ortam parametrelerinin homojen olmayışı, yüzeyaltında gömülü farklı şekil ve özelliklerde yapılar içermesi, yüzey geçişlerinde gönderilen işaretler üzerinde yansıma, saçılma, kırılma gibi etkilere neden olmasından dolayı karmaşık bir problemdir.

Yüzeyaltı uygulamalarından biri olan mayın tarama probleminde yüzeyaltında gömülü olan ve asıl algılanmak istenen mayından başka farklı metal yapılar, şarapnel parçacıkları, yüzeye ait farklı özelliklerde toprak ve kaya parçaları bulunabilmektedir.

İnsani bir uygulama olan diğer bir problem ise kanser araştırmalarında mikrodalga görüntülemeyle yararlanarak kötü huylu tümörlerin tespit edilmesidir. İnsan dokusunun ve iç yapısının farklılıklar göstermesi gerçekçi modellerin oluşturulmasını zorlaştırmaktadır.

Yukarıda bahsedilen mayın tarama ve tümör tespit çalışmaları, insan hayatı için önemli yer tutan iki farklı yüzeyaltı tarama problemidir. Bu alanlarda yapılacak her türlü çalışma ve alınan her yeni olumlu sonuç insan hayatını kurtarmada atılacak yeni bir

adıdır. Bu yeni bir anten tasarımı, anten konfigürasyonu ya da işaret işleme uygulaması olabilir. Bu denemelerin yapılabilmesi için ya yüksek maliyetli gerçekçi bir deney ortamının oluşturulup doğru verilerin elde edilmesi ve testlerinin yapılabilmesi, ya gerçek ortamlarda denemelerin gerçekleştirilmesi-ki bu mayın tarama uygulamaları için oldukça tehlikeli olacaktır, ya da üniversite hastaneleri ile ortak çalışmaların gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Tüm araştırmaların sadece deneysel olarak yapılması oldukça maliyetli ve zor hatta hayati tehlike oluşturmaktadır. Bu nedenle, testlerin yapılması hedeflenen ortamların-zemin ve mayın ya da insan dokusu ve iyi ya da kötü huylu tümörler gibi-bizlere gerçekçi sonuçlar verecek sağlıklı sayısal yöntemler kullanarak modellenmesi çok daha hızlı ve az maliyetle sonuç alınmasını sağlayacak, sonuca kısa sürede ulaşılmasına katkıda bulunacaktır.

Karmaşık elektromanyetik problemlerin gerçeğe yakın bir şekilde modellenmesine imkan veren FDTD, günümüzde bilgisayar teknolojisindeki gelişmeler ile birlikte deneysel çalışmaların yerini hızla almaktadır.

FDTD yöntemi kullanılarak, biyomedikal uygulamalarda insan dokusu, organları ve vücut yapısı ya da mayın tarama uygulamalarında farklı elektriksel özelliklere sahip yüzeyler ve gömülü nesnelere gerçek ortam parametreleri ile modellenmektedir.

Yüksek maliyetli test düzeneklerine gerek kalmadan gerçekleştirilen simülasyonlar sayesinde gerçeğe yakın sentetik veriler elde etmek mümkün olacaktır. Elde edilen sentetik verilerin değerlendirilmesi farklı tasarımlar ve analiz yazılımları ile bu yöndeki çalışmalarını ilerletecek gelişmeler elde etmek mümkün olacaktır.

Tüm bu sayılan avantajlarından yola çıkarak hazırlanmış olan MGL-2D programı FDTD tabanlı bir simülasyon programıdır (Çakır ve arkadaşları, 2006). Bu tez çalışmasında MGL-2D programı temel alınarak yeni bir yüzeyaltı tarama simülasyon programı geliştirildi. Farklı yüzeyaltı tarama simülasyonlarında güvenilerek kullanılacak güçlü bir program haline getirilen bu paket program GrGPR olarak adlandırılmaktadır.

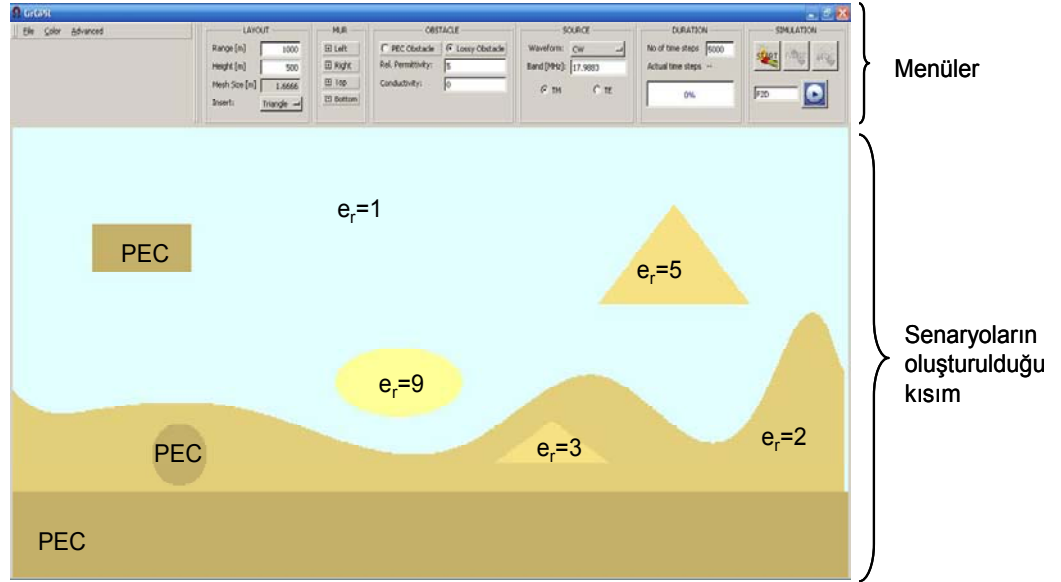
GrGPR'in kolay bir kullanıcı arayüzüne sahip olması programla yeni tanışmış bir kişi tarafından dahi kısa sürede rahatlıkla kullanılabilmesine olanak vermektedir. Farklı elektriksel özelliklere ve şekillere sahip yüzeyler ve nesnelere GrGPR kullanılarak oluşturulabilmektedir. Elli sayıda alıcı ve verici anten yüzey üzerine düz-doğrusal, eğimli-doğrusal, eliptik ya da nesne etrafına karesel, dairesel ve üçgen şekillerde yerleştirilebilmektedir. Her biri ayrı ayrı ya da hepsi aynı anda aktif hale gelecek şekilde seçim yapılabilir. Yüzeylerin dielektriksel özellikleri homojen veya homojen olmayan yapıda seçilebilmektedir. Nesnelere serbest uzayda ya da yüzeyaltında gömülü/örtülü olarak yerleştirilebilmektedir. Verici antenler tarafından iletilen işaretler ve alıcı antenden algılanan işaretlere ait değerler her bir anten için ayrı ayrı dosyalarda saklanmaktadır. Böylece senaryodaki yapıların her anten için davranışları incelenebilmektedir. Farklı kaynak işaretlerinin seçimi sayesinde farklı dalga şekillerinin senaryodaki yayılım davranışları gözlemlenebilmektedir. Senaryolardaki dalga yayılımları GIF dosyası olarak daha sonra incelenmek üzere saklanabilmektedir.

Günümüzde FDTD metodu üç boyutlu uygulamalarda da yer bulmasına rağmen bu çalışmada amacımızın sentetik veri elde edip bu verileri kullanarak yeni algoritmalar sayesinde analizler yapmak olduğundan iki boyutlu modellemeyle çalışmak tercih edilmiştir. Böylece üç boyutlu çalışmanın getireceği zaman kaybından kurtulmak mümkün olmuştur.

Takip eden alt bölümlerde GrGPR programının yetenekleri, nerelerde ve ne amaçla kullanılabileceği hakkında detaylı bilgiler yer almaktadır. Elde edilen verilere ait sonuçlar üçüncü bölümü oluşturan Araştırma Sonuçları ve Tartışma bölümünde farklı örnekler ve farklı görsel sonuçlarla sunulmaktadır.

#### **2.4.1 Genel görüntü**

GrGPR programının ön görünüşü Şekil 2.10'da yer almaktadır. GrGPR programının arayüz görüntüsü yatayda iki bölümden oluşmaktadır: Menülerin yer aldığı kısım ve senaryonun oluşturulduğu kısım.

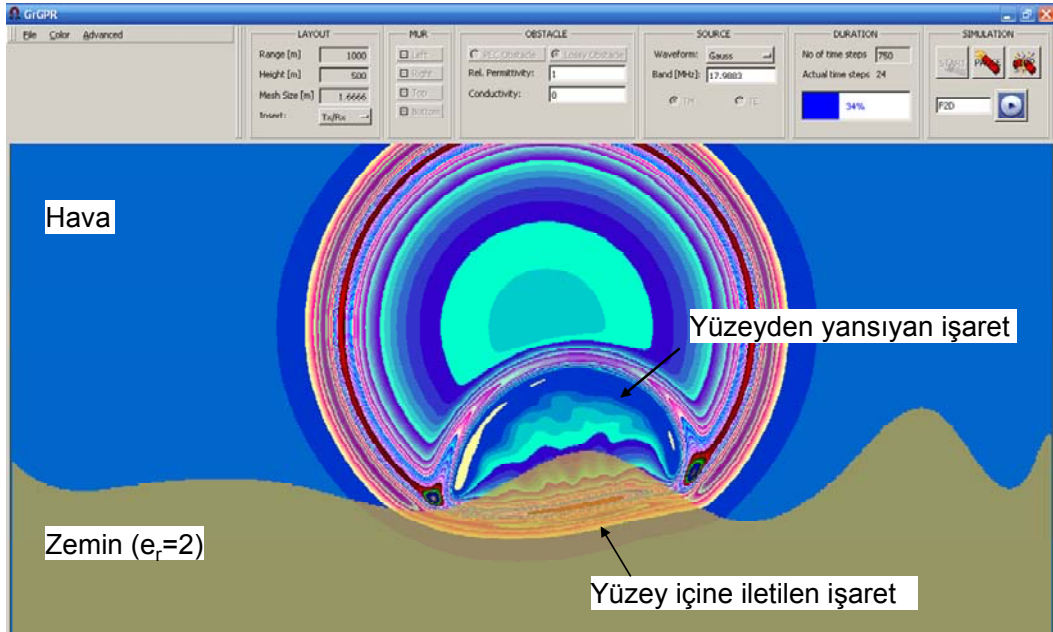


Şekil 2.10 GrGPR programının ekran görüntüsü ve örnek bir senaryo.

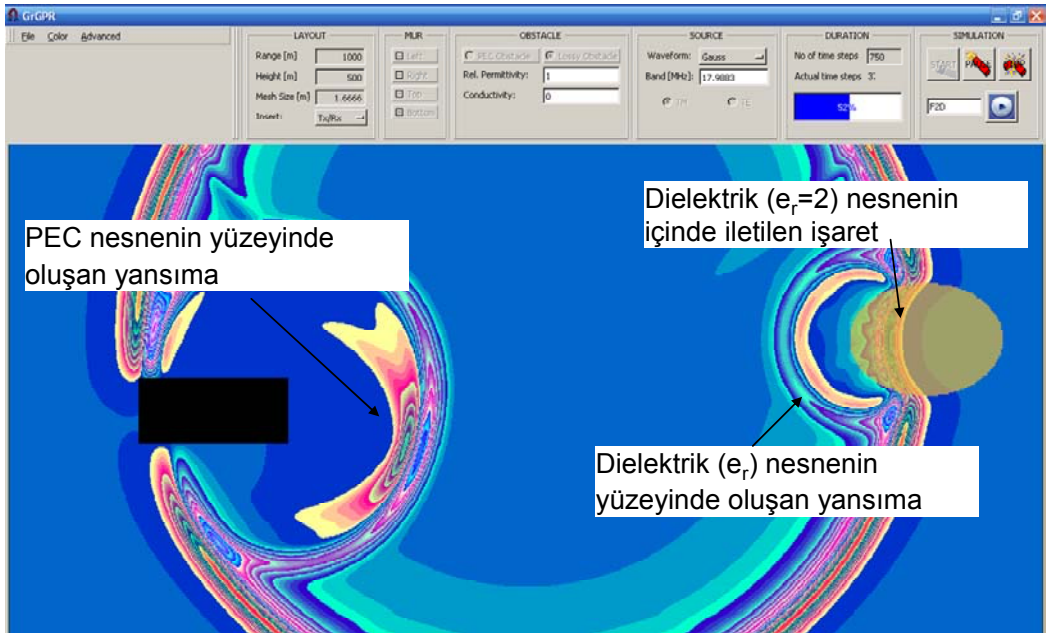
Altta yer alan geniş kısımda, simülasyonları gerçekleştirilecek olan senaryolar oluşturulmaktadır. Bu kısmın başlangıç elektriksel özellikleri serbest uzay olarak belirlenmiştir. Şekil 2.10'dan da görüldüğü gibi farklı elektriksel özelliklere ve biçimlere sahip yüzey şekilleri ve zeminler istenilen şekilde yerleştirilebilmektedir. Farklı kaynak işaretlerine sahip ve istenilen sayıda alıcı ve verici antenler yerleştirilerek testleri yapılacak senaryolar bu pencereden düzenlenmektedir.

Simülasyonlar sırasında yüzey-hava arasında meydana gelen yansımalar ve iletilen işaret (Şekil 2.11), nesnelere meydana gelen yansıma, saçılma ve geçişler (Şekil 2.12), antenler arası girişim (Şekil 2.13) gözlenebilmektedir. Şekillerdeki farklı koyuluklardaki dairesel çizimler yayılım yapan EM dalgaları temsil etmektedir. Renk dağılımları EM dalganın genliği ile orantılı olarak maksimum ve minimum arasında GrGPR programı tarafından otomatik olarak belirlenmektedir.

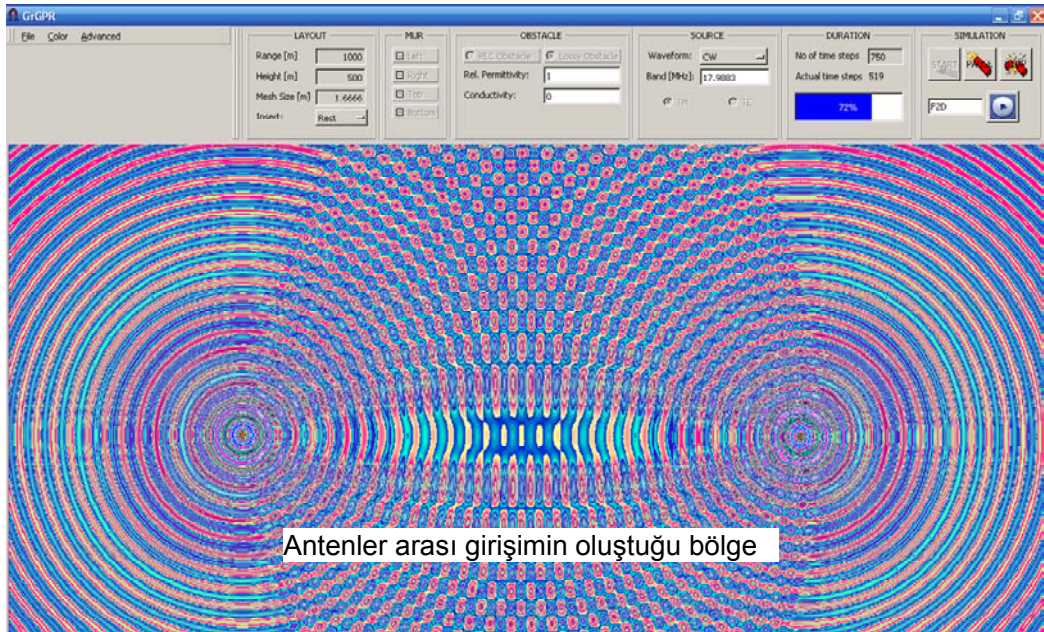




Şekil 2.11 Serbest uzayda yayılan bir elektromanyetik dalganın dielektrik katsayısı  $\epsilon_r=2$  olan yeryüzeyi ile temas etmesi üzerine hava-yüzey arasında meydana gelen yansıma ve dalga iletiminin gösterimi.

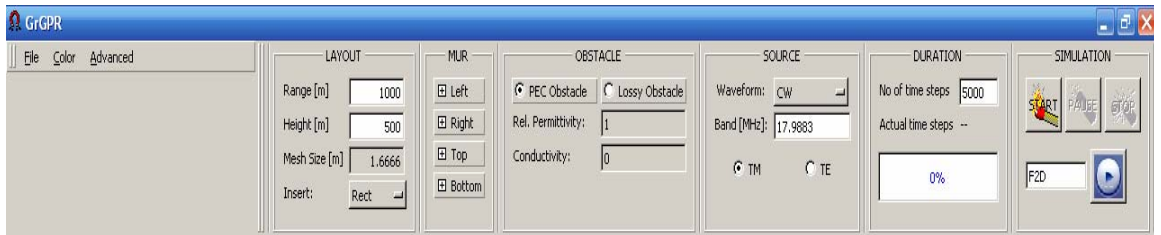


Şekil 2.12 Serbest uzayda bulunan PEC (dikdörtgen) ve dielektrik ( $\epsilon_r=2$ , dikdörtgen) nesne karşısında yayılan elektromanyetik dalganın davranışının incelenmesi.



Şekil 2.13 Serbest uzayda bulunan ve sürekli dalga (Continuous Wave-(CW)) yayılımı yapan iki antenden yayılan işaretler arasında oluşan girişim.

Pencerenin üst kısmında, uygulanacak olan senaryoya ait özelliklerin girilebileceği menüler bulunmaktadır. Şekil 2.14’de GrGPR programında menülerin yer aldığı kısım görülmektedir. Bu menüler ve farklı senaryo uygulamaları takip eden kısımlar da detaylı olarak incelenecektir.



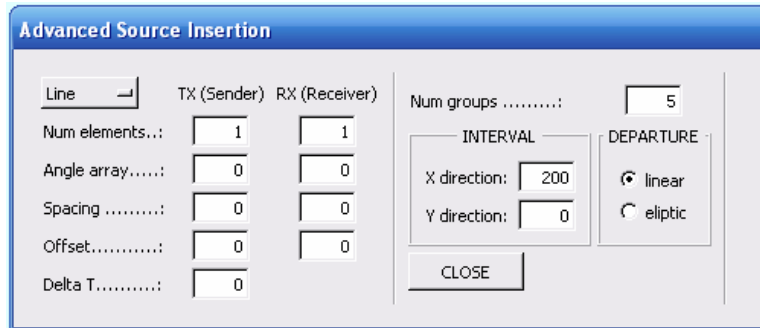
Şekil 2.14 GrGPR programında yer alan menülerin gösterimi.

### 2.4.2 Menülerin tanıtımı

GrGPR programının en üstünde yer alan kısım yedi pencereye bölünmüştür. Sol üst köşede yer alan ilk pencerede üç farklı menü yer almaktadır: *File*, *Color*, *Advanced* menüleri. *File* menüsünde, bir senaryoyu açmak için *Open*, oluşturulan bir senaryoyu kaydetmek için *Save*, başlangıç değerlerine dönmek için *Defaults* seçenekleri yer almaktadır. *Quit*, uygulamayı sonlandırmak için kullanılır.

*Color* menüsünde, simülasyonların gözlemlenebileceği farklı renk seçenekleri bulunmaktadır.

*Advanced* menüsü, *Source*, *Dimension*, *Store* alt menülerinden oluşmaktadır. *Source* alt menüsü seçildiğinde *Advanced Source Insertion* penceresi açılmaktadır (Şekil 2.15). Bu kısımda antenlerin yerleşimi için gereken opsiyonlar yer almaktadır. Genel olarak iki kısma ayrılmıştır.

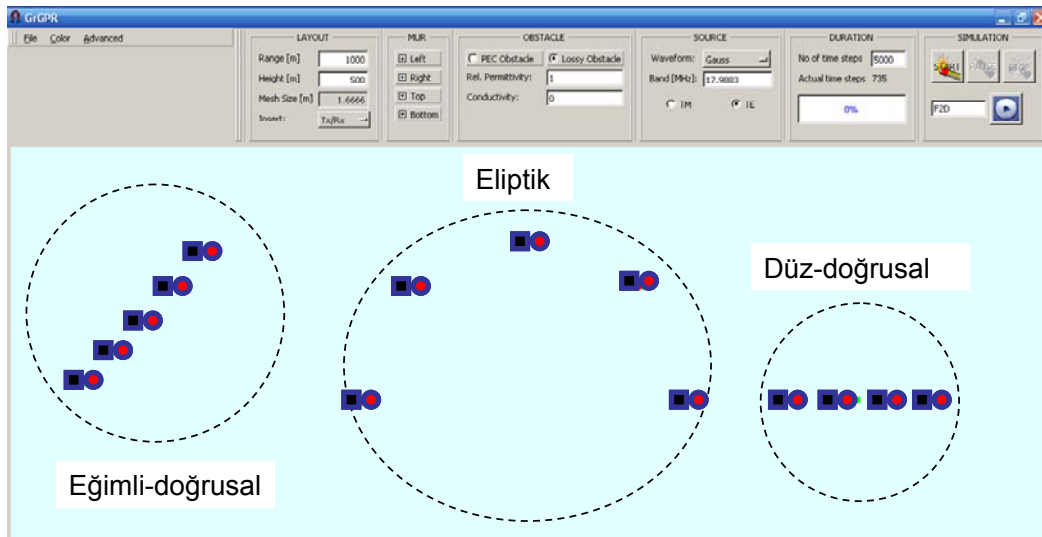


Şekil 2.15 GrGPR programında senaryolara kaynak yerleştirme penceresi.

Sağda yer alan kısımda antenleri gruplar halinde yerleştirmek amacı ile kullanılabilir. Kaç adet grubun (*Num. groups*), ne kadar uzunlukta bir yol boyunca (*X direction*), nasıl yerleştirileceği-doğrusal (*linear*) ya da eliptik (*eliptik*)-seçilebilmektedir. Anten gruplarını düz-doğrusal yerleştirmek istediğimizde sadece ne kadar uzunlukta bir yol boyunca antenlerin yerleştirileceğini (*X direction* değeri) belirtmek yeterlidir. Eğer anten grupları doğrusal ama belirli bir eğimle yerleştirilmek istenirse, bu

durumda bu eğimi sağlamak amacı ile düşeyde ne kadar bir mesafeye yerleştirileceğini (*Y direction*) belirtmek gerekmektedir. Bu iki değer aynı zamanda eliptik anten yerleşiminde de kullanılmaktadır. Şekil 2.16'da bu üç farklı anten yerleşimine ait örnekler yer almaktadır.

Burada antenlerin grup olarak ifade edilmesinin nedeni, grupları oluşturan anten çiftlerinin sıra ile aktif olmasıdır. Yani bir anten çiftinde verici işareti iletilip alıcı geri yansıyan işareti algıladıktan sonra pasif olmakta ve diğer anten grubu aktif hale gelmektedir. Böylece bir gruptaki vericiden yayılan işareti diğer gruplarda bulunan alıcılar algılayamamaktadırlar.



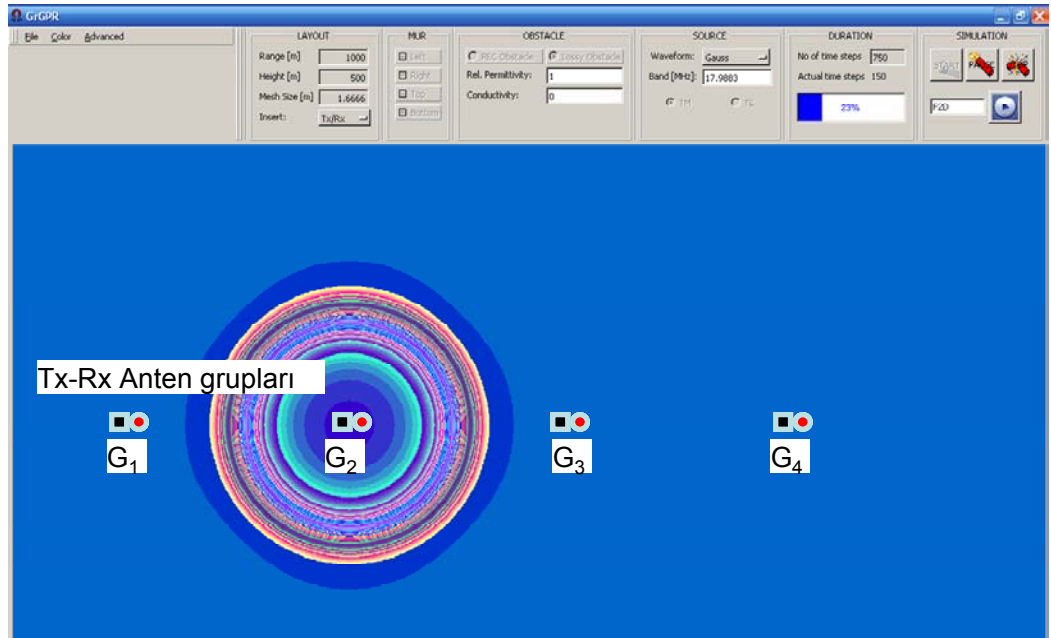
Şekil 2.16 Farklı anten yerleşimlerin (Eğimli doğrusal, Eliptik, Düz-doğrusal) ekranda gösterimi.

Gruplar başlangıç değeri olarak bir alıcı ve bir verici antenden oluşmaktadır. Ancak istenildiği takdirde pencerenin sol tarafında yer alan Tx/Rx sayıları (*Num. elements*) ile istenilen sayıda alıcı ya da vericiden oluşan gruplar oluşturulabilir (ör. 1 verici+2 alıcı gibi). Alıcı ile verici arasındaki mesafeler, *Spacing* ve *Offset* değerleri girilerek belirlenebilir. *Spacing* değeri iki anten (iki verici yada iki alıcı) arasında, *Offset* ise verici ile alıcı arasında

olması istenen uzaklıkları belirtmektedirler. *Offset* değeri negatif olduğu takdirde, alıcı vericiden girilen değer kadar geride pozitif olduğunda ise ileride yerleştirilir.

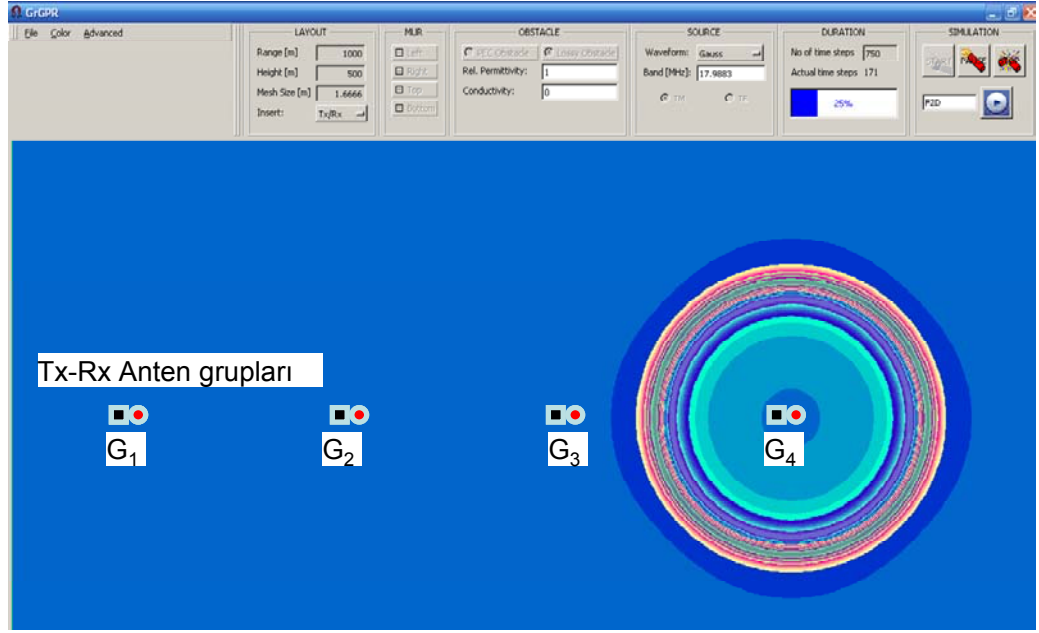
Antenlerin gruplar halinde yerleştirilmesi ve sıra ile aktif olmaları yapay açıklıklı radar prensibinin bu programda gerçekleştirilen senaryolarda kullanılmasına imkan vermektedir.

Şekil 2.17a ve b'de düz doğrusal olarak yerleştirilmiş dört adet anten grubu yer almaktadır. Şekil 2.17a'da ikinci anten grubu aktif ve EM dalgaların dairesel olarak yayılımlarının belirli bir andaki görünümü yer almaktadır. Diğer gruplar pasif haldedir. Şekil 2.17b'de ise dördüncü anten grubu aktif iken diğerleri pasif haldedir. Aslında bu durum aynı zamanda bir anten çiftinin seçilen yol boyunca belirli aralıklarla hareket ettirilmesi olarak da düşünülebilir. Her yeni konumda veri alış verişi tamamlandıktan sonra antenler yeni konumlarına ilerletilmektedirler.



(a)

Şekil 2.17 Dört gruptan oluşan bir senaryoda a) ikinci (G2) grubun aktif olduğu durumun gösterimi.



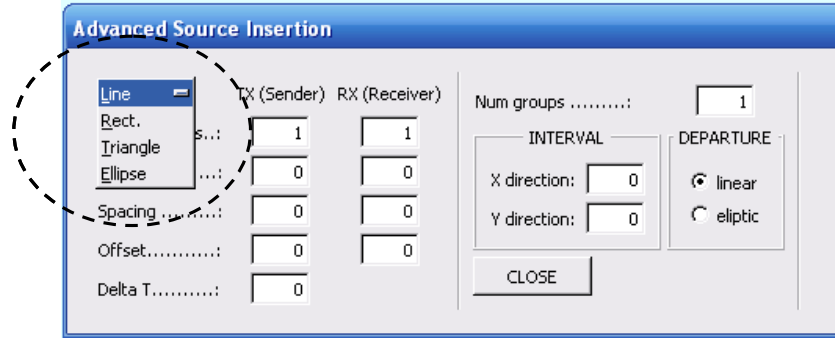
(b)

Şekil 2.17 (devam) Dört gruptan oluşan bir senaryoda a) ikinci (G2) ve b)dördüncü (G4) grupların sıra ile aktif olduğu durumların gösterimi.

*Advanced Source Insertion* pencere sol kısmında yerleştirilecek olan alıcı ve verici anten sayıları belirlenmektedir. Eğer sağ tarafta yer alan *Num. Groups* değeri bir olarak seçilmiş ise tüm antenler aynı anda aktif olacaklardır. Eğer bu değer birden farklı ise bir grup içindeki elemanlar aynı anda aktif olurken diğer gruplardaki elemanlar pasif kalacaklardır. Örneğin senaryoda her biri bir 1 verici ve 2 alıcıdan oluşan 5 grup yer alıyorsa, birinci grup aktif iken o grupta yer alan 1 verici ve 2 alıcı aktif iken diğer 12 eleman pasif olacak, birinci gruptaki vericiden yayılan ve geri yansıyan işaretleri algılamayacaklardır. Ancak sağ taraftaki grup sayısı bir olarak girilmiş ve sol taraftaki alıcı ve verici anten sayıları beşer tane olarak belirlenmiş ise tüm antenler aynı anda aktif olacak ve birbirlerinden yayılan ve yansıyan işaretleri algılayacaklardır. Elde edilen sentetik verilerin değerlendirilmesi sırasında bu durumun göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Yine bu kısımda yer alan *Spacing* ve *Offset* değerleri daha önce de bahsedildiği gibi antenler arası uzaklıkları belirlemek için girilmesi gerek değerlerdir. Pencerenin sol kısmında en altta bulunan *Delta T* değeri sayesinde anten dizisinde yer alan elemanlar arasında zamanda gecikmeler

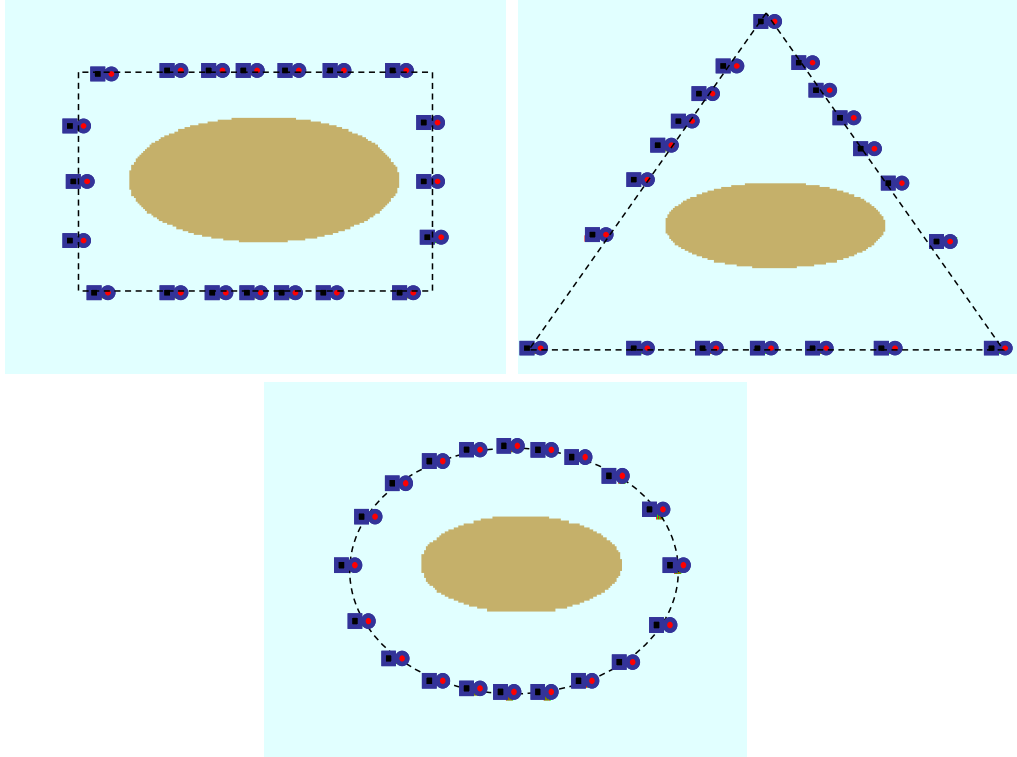
verilebilir. Yani bir elemanın yayılım ve algılama işlem bitmeden diğer çift aktif olabilmektedir.

Şu ana kadar doğrusal bir şekilde sıralanmış anten dizilimlerinden bahsetmiş olmamıza rağmen, bazı uygulamalarda antenleri gözlemlenecek yapının etrafını çevreleyecek şekilde yerleştirmek de gerekebilmektedir. Örneğin, bir insanın çepeçevre tomografisini çekmek istediğimizde antenlerin vücudun etrafında belirli aralıklarla yerleştirilmesi yada tek bir antenin vücudun çevresini tarayacak şekilde kapalı bir yol boyunca hareket ettirilmesi gerekmektedir. Bu tarz uygulamaların da incelenmesine olanak vermek amacı ile GrGPR programına farklı anten yerleşim seçenekleri de ilave edilmiştir. Bu yerleşim şekilleri dairesel, karesel ve üçgen olarak sayılabilir. Anten dizilimlerinin bu üç farklı şekilde yapılabilmesi için *Advanced Source Insertion* penceresinin sol üst köşesinde yer alan *Line*, *Rect.*, *Triangle*, *Ellipse* (Şekil 2.18) seçeneklerinden birini seçtikten sonra bilgisayarın faresini GrGPR programının senaryo oluşturulan alt kısmında istenilen yerleşim konumuna ulaşıncaya kadar sürüklenip bırakılması ile yerleştirilebilir (Şekil 2.19). Böylece antenler sırası ile Doğrusal, Dikdörtgen, Üçgen ve Elips şeklinde yerleştirilebilmektedir.



Şekil 2.18 Kapalı çevrim anten dizilimlerinin oluşturulması için kaynak yerleştirme (*Advanced Source Insertion*) penceresinde bulunan seçenekler.

Bu kapalı çevrimde kaç alıcı kaç verici anten elemanın olacağı *Num. Elements* değerleri girilerek belirlenebilir. Kapalı çevrim anten dizilimleri sayesinde görüntülenmek istenen nesnelerin tüm çevresi hakkında sentetik veri toplamak mümkün olmaktadır.



Şekil 2.19 Bir PEC elips nesnenin etrafına yerleştirilmiş farklı kapalı çevrim anten dizilimlerine ait örnek gösterimler.

*Dimension* menüsü ile yatay ve düşeyde hesap uzayının boyutları ve hücre sayısı değiştirilebilmektedir (Şekil 2.20). Pencerenin üst kısmında yer alan *Range* ve *Height* değerleri, sırası ile enine uzaklık ve derinlik bilgilerini göstermektedirler ve başlangıç değerleri (1000m)x(500m) olarak verilmiştir. *Mesh Size* değeri, hesaplama uzayının boyutlarına bağlı olarak hesaplanan hücre boyutlarını göstermektedir. Tüm bu değerler metre boyutundadır. *Decomposition* değeri, hesaplama uzayının yatayda ve düşeyde kaç hücreye (FDTD-Yee hücresi) bölüneceğini belirtmektedir. Hesaplama kolaylığı açısından düşey hücre sayısı yatay hücre sayısının yarısı olacak şekilde sırası ile 300 ve 600 olarak alınmışlardır ve kullanıcı tarafından da bu şekilde değer verilmesi tercih edilmektedir.



**Advanced Dimension Param...**

Range [m]

Height [m]

Mesh Size [m]

---

X Z:

Decomposition:

Start:

End:

Actual:

Şekil 2.20 İleri Boyut Parametreleri (*Advanced Dimension Parameters*) penceresi.

**Advanced Dimension Param...**

Range [m]

Height [m]

Mesh Size [m]

---

X Z:

Decomposition:

Start:

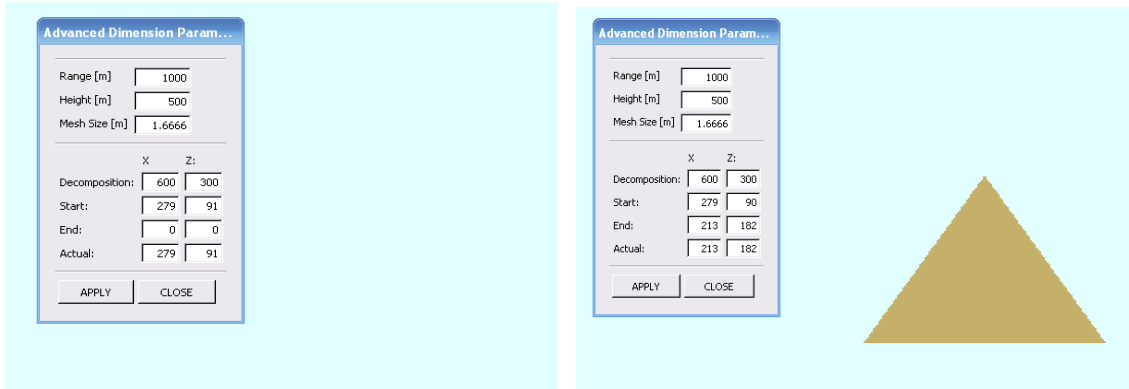
End:

Actual:

Şekil 2.21 Farklı boyut parametrelerine bağlı olarak frekans ve hücre boyutu değerlerindeki değişimler.

Girilen değerlere bağlı olarak hücre boyutları ve bu değerden yararlanarak *Kararlılık (Courant)* koşuluna (Böl. 2.2.1.3) göre sistem frekansı hesaplanmaktadır. Şekil 2.21’de boyut değişimi ile frekans ve hücre boyutu değişimleri gösterilmektedir.

Pencerenin en alt kısmında yer alan *Start* ve *End* değerleri girilerek otomatik olarak simülasyon ekranına girilen koordinatlar arasında istenilen nesne (dikdörtgen, elips yada üçgen) yerleştirilebilir. *Start* ve *End* değerleri yerleştirilecek olan nesnenin başlangıç ve bitiş hücre sayılarını göstermektedir. En alt sıradaki *Actual* değerleri o anda bilgisayar faresi hangi hücreyi gösteriyor ise o değeri alır. Böylece nesnenin yerleştirilmek istendiği hücre konumlarını belirlemek kolaylaşmaktadır. Şekil 2.22’de, yerleştirilmek istenen üçgenin başlangıç değeri solda, bitirildiği son değer ve yerleştirilen üçgen sağda yer alan şekilde görülmektedir.

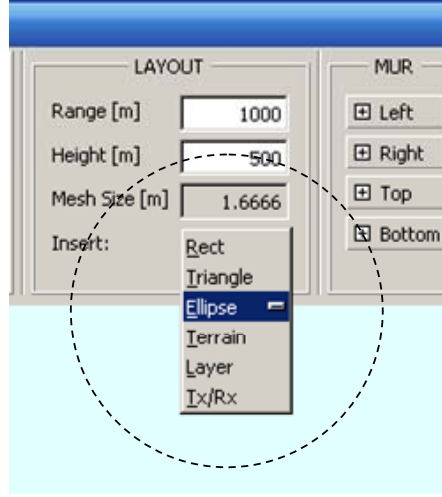


Şekil 2.22 İleri Boyut Parametreleri penceresinden yararlanarak nesnelerin yerleştirilmesi.

Aynı özellik, senaryo içine yerleştirilmek istenen herhangi bir nesnenin, düzlemin ya da antenin konumunu görüntülemek amacı ile de kullanılabilir. Bu özellik daha sonra senaryoların oluşturulması bahsinde tekrar verilecektir.

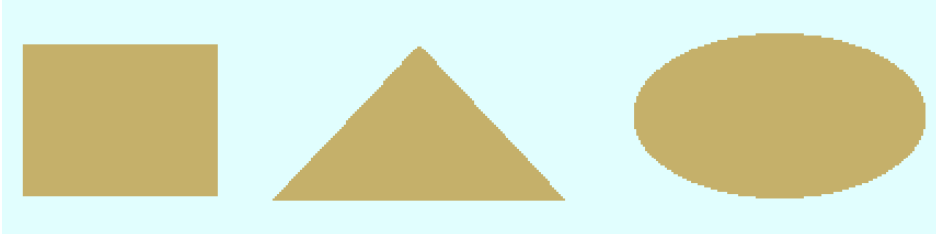
### 2.4.3 Yüzey şekillerinin ve nesnelerin seçimi

Üst panelin ikinci penceresinde oluşturulacak olan senaryonun boyutları ve hücre boyutu yer almaktadır. Bu kısım *LAYOUT* (Şekil 2.23) olarak adlandırılmaktadır ve aynı zamanda *Advanced Dimension Parameters* penceresindeki değerlerle aynıdır. *Insert* butonundan senaryoya eklenecek olan yüzey şekli yada anten (kare (*rect*), üçgen (*triangle*), elips (*ellipse*), engebeli yüzey şekli (*terrain*), düz zemin (*layer*), alıcı/verici (*Tx/Rx*)) seçilebilmektedir. Alıcı/verici (*Tx/Rx*) seçeneği *Advanced Source Insertion* penceresi seçildiğinde otomatik olarak seçilir.

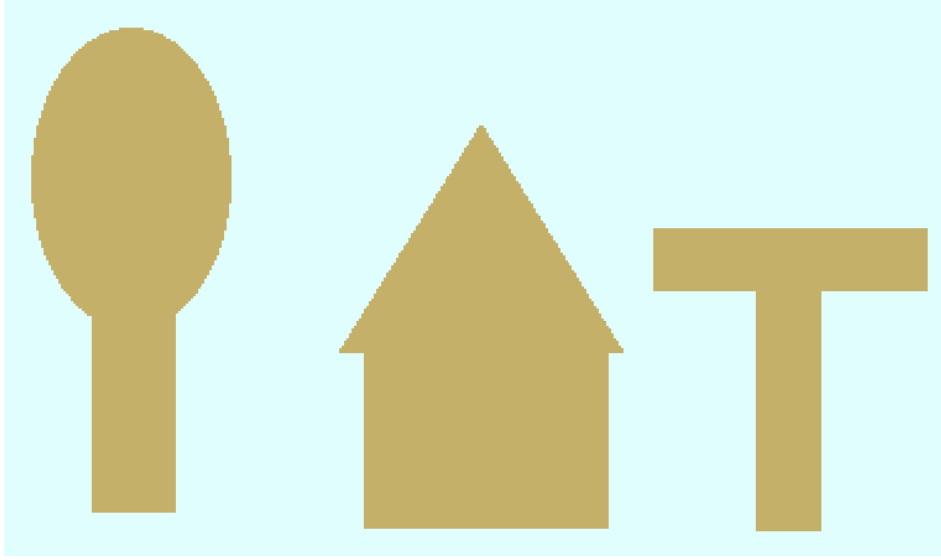


Şekil 2.23 Yüzey şekillerinin ve farklı şekillerdeki nesnelerin yerleştirilmesi için kullanılan *Insert* seçeneği.

Eklenmek istenen nesne seçildikten sonra bilgisayarın faresi senaryo penceresi üzerinde tutup sürüklenerek istenen şekil oluşturulabilmektedir. Dikdörtgen, üçgen ve elips şekillerinin gösterimi Şekil 2.24'de yer almaktadır. Nesnenin boyutu farenin hareketi ile belirlenebilir. Nesneler, rasgele (hücre konumları bilinmeden) yerleştirilebileceği gibi bir önceki bölümde bahsedilen İleri Boyut Parametreleri (*Advanced Dimension Parameters*) penceresinden nesnenin yerleştirileceği hücreler takip edilebilir. Nesneler ayrı bir şekilde yerleştirilebileceği gibi birleştirilerek karmaşık şekillerde nesneler elde etmek de mümkün olmaktadır (Şekil 2.25).



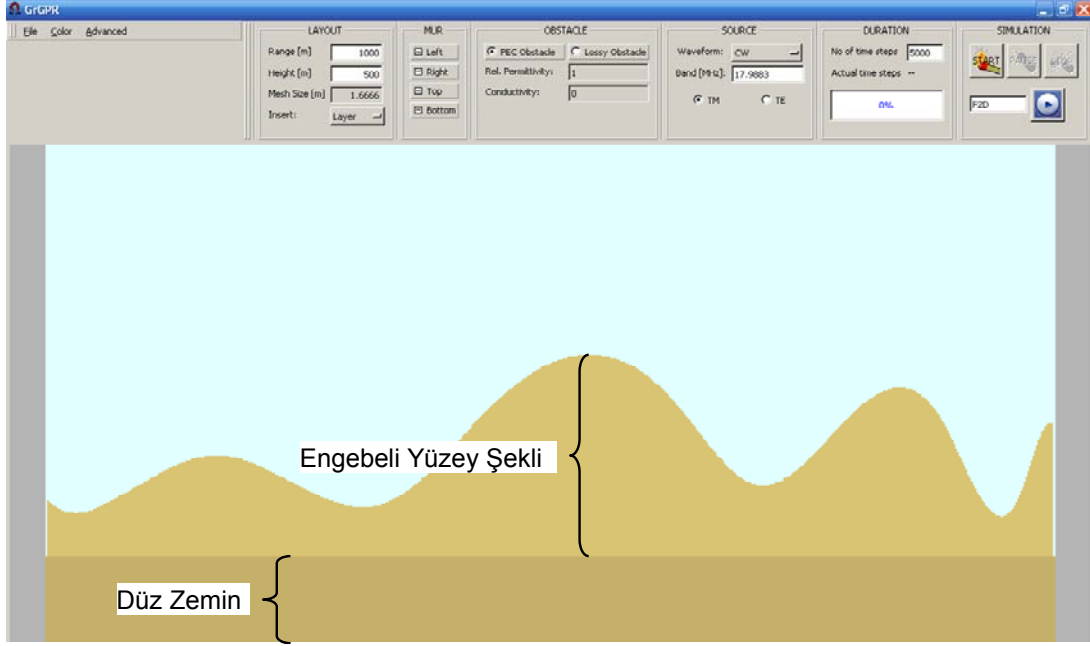
Şekil 2.24 GrGPR ile oluşturulabilen farklı geometrilerdeki nesnelere.



Şekil 2.25 GrGPR'da yer alan standart nesne geometrilerinin birleştirilmesiyle elde edilen farklı nesne geometrileri.

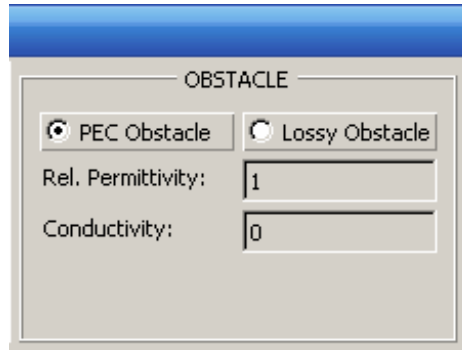
Düz bir zemin yerleştirmek istenildiğinde *Layer* seçeneğini seçmek gerekmektedir. Zemin yüksekliğinin olması istenen hücreye fare ile tıklandığında o hücrenin altında kalan kısım seçilmiş belirlenen elektriksel özelliklere sahip bir yapı ile kaplanacaktır.

İç bükey/dış bükey eğrilerden oluşan engebeli bir yüzey şekli oluşturulmak istendiğinde ise *Terrain* seçeneği seçilip, ekran üzerinde fare ile rasgele hücrelere tıklanır. Hesaplama uzayının sonuna gelindiğinde seçilen hücreler, doğrusal interpolasyon yöntemi hesaplanan bir eğriyi oluşturacak şekilde birleştirilecektir. Eğrinin altında kalan bölüm ise, yüzeyi oluşturmak üzere belirlenen elektriksel özelliğe sahip bir yapı meydana getirecek şekilde doldurulacaktır. Şekil 2.26.'da düz zemin ve engebeli yüzey şekillerine ait görüntüler yer almaktadır.



Şekil 2.26 Düz zemin ve engebeli yüzey şeklinden oluşan bir senaryonun gösterimi.

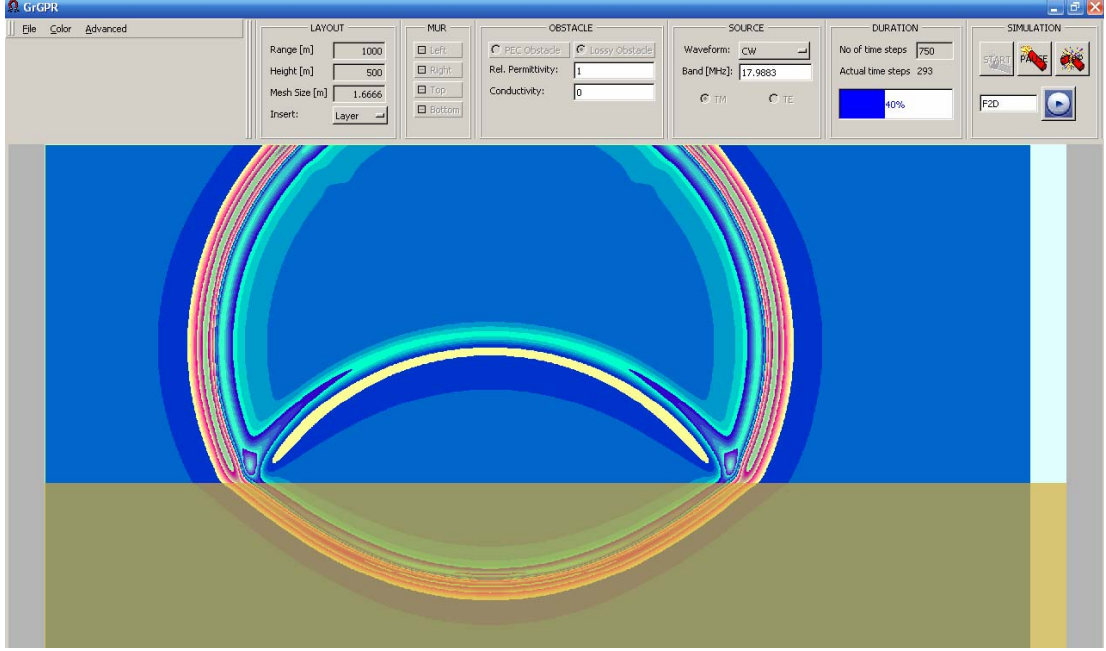
Nesnelerin elektriksel özellikleri *OBSTACLE* olarak adlandırılan dördüncü pencerede yer alan seçeneklerden düzenlenebilir. PEC nesne seçilebildiği gibi, farklı dielektrik ve iletkenlik katsayılarına sahip nesnelere de ilave etmek mümkündür (Şekil 2.27).



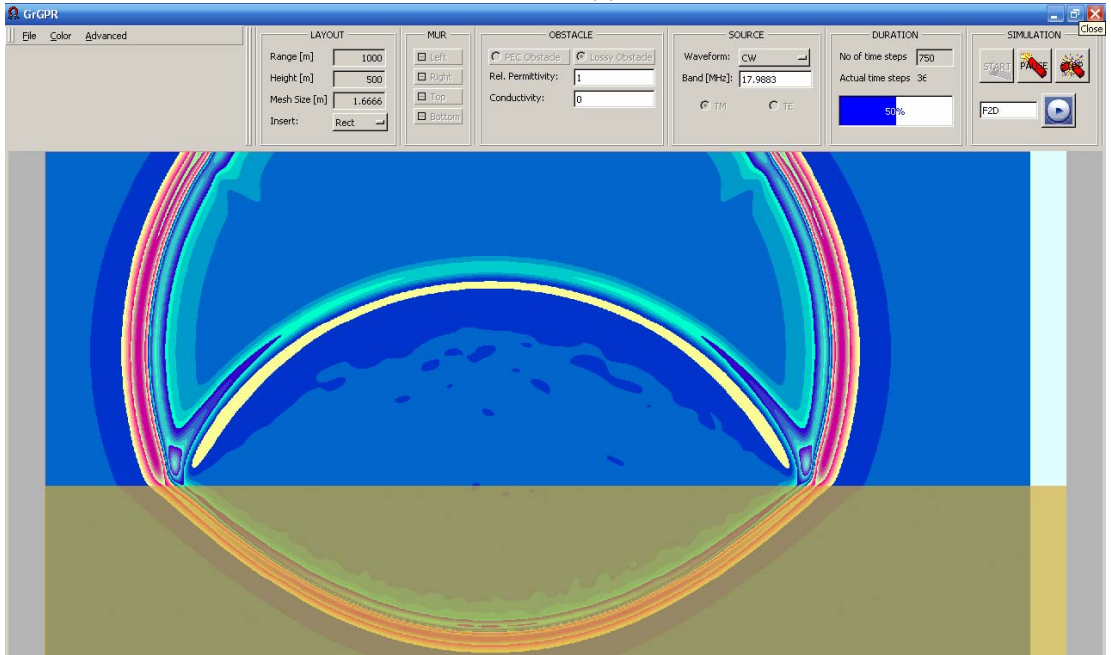
Şekil 2.27 Senaryoya yerleştirilecek olan nesnelere dielektrik ve iletkenlik katsayılarının belirlendiği pencere.

Seçim düz zemin (*Layer*) yada yüzey şekli (*Terrain*) olarak yapıldıysa bu bölgeleri oluşturan hücrelerin dielektrik katsayıları, girilen dielektrik katsayısı her hücre için sabit kabul edilip homojen yada girilen dielektrik katsayısının etrafında  $\pm \Delta\epsilon$  salınım yapacak şekilde rasgele belirlenerek homojen olmayan ortamlar oluşturulabilir. Homojen

olmayan ortamların elde edilmesi ile zemin karmaşasının yansıyan işaret üzerindeki etkileri incelenebilir.

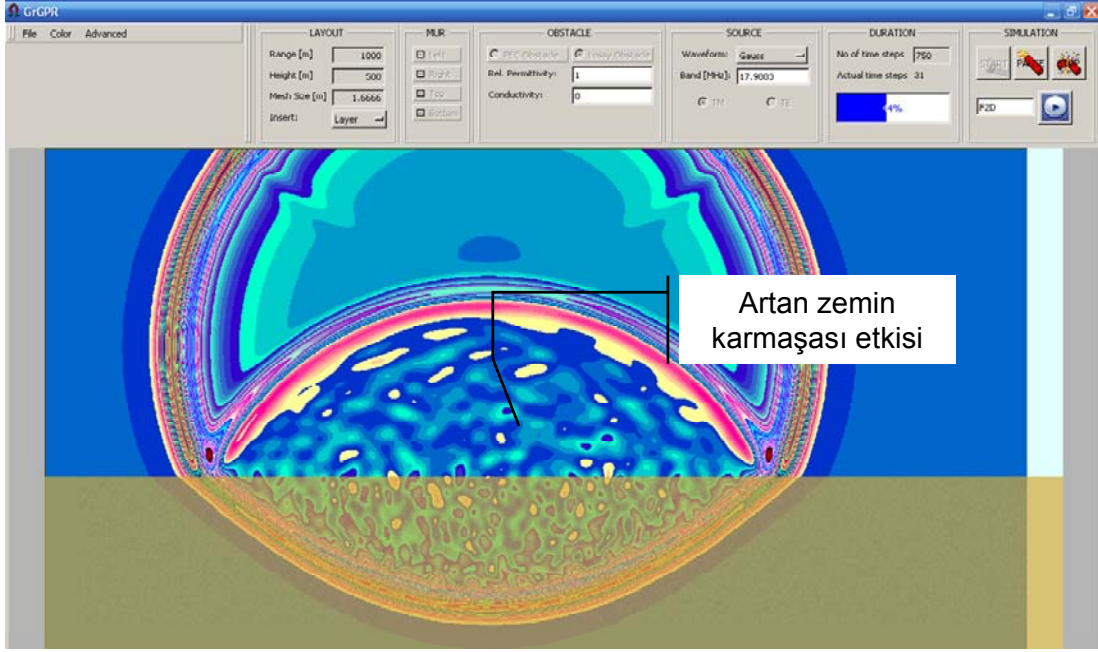


(a)

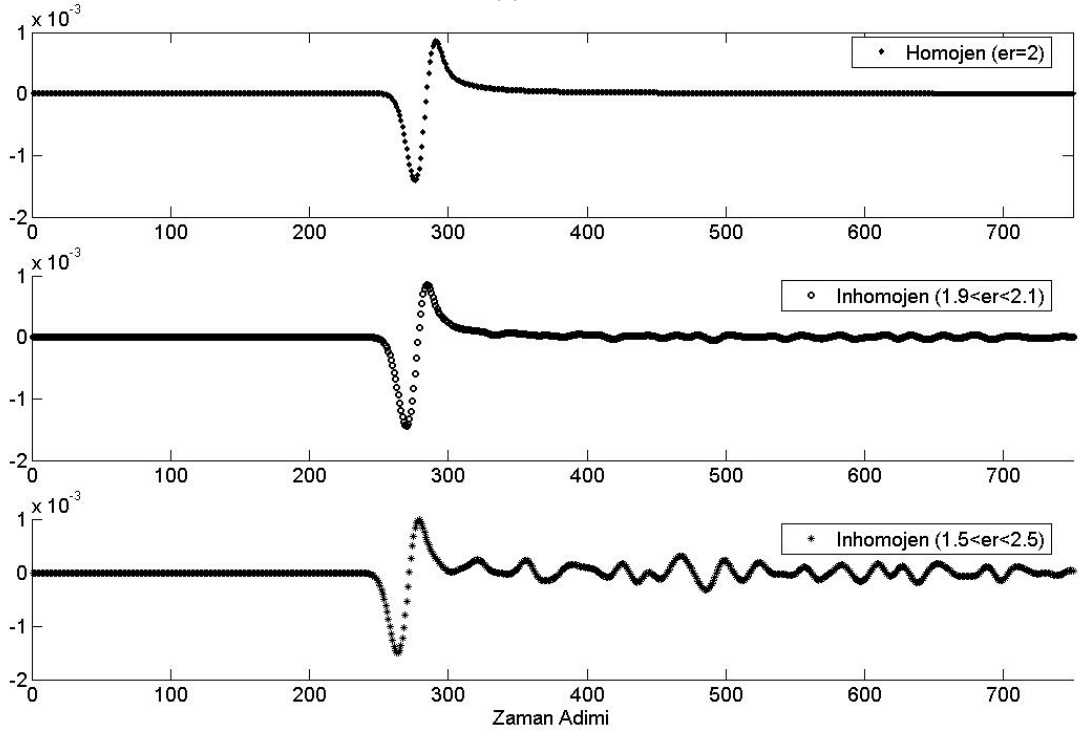


(b)

Şekil 2.28 Dielektrik katsayısı (a) homojen ( $\epsilon_r=2$ ), (b) inhomojen ( $1.9<\epsilon_r<2.1$ ) ve (c) inhomojen ( $1.5<\epsilon_r<2.5$ ) olduğu durumlara sürekli dalga işaretinin yüzeyaltında yayılımı ve zemin karmaşasının işarete etkisini gösteren üç farklı uygulama, (d) üç farklı durumda algılanan işaretlerin zaman düzleminde karşılaştırmalı olarak gösterimi.



(c)

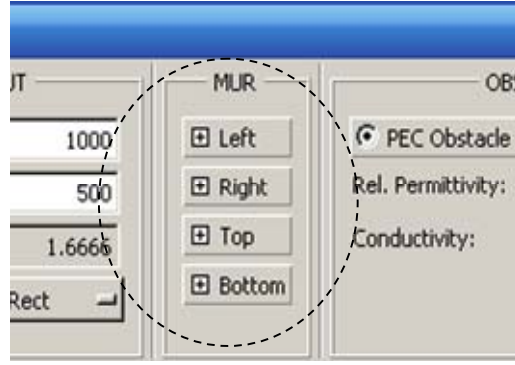


(d)

Şekil 2.28 devam Dielektrik katsayısı (a) homojen ( $\epsilon_r=2$ ), (b) inhomojen ( $1.9 < \epsilon_r < 2.1$ ) ve (c) inhomojen ( $1.5 < \epsilon_r < 2.5$ ) olduğu durumlara sürekli dalga işaretinin yüzeyaltında yayılımı ve zemin karmaşasının işarete etkisini gösteren üç farklı uygulama, (d) üç farklı durumda algılanan işaretlerin zaman düzleminde karşılaştırmalı olarak gösterimi.

Şekil 2.28'den de görüldüğü gibi dielektrik katsayısındaki salınımlar zaman düzleminde algılanan işarette zemin karmaşasının artmasına neden olmaktadır. Bu durum Şekil 2.28 (c) ve (d)'de daha net olarak gözlenmektedir.  $\Delta\epsilon$  değeri, çok fazla zemin karmaşasına neden olmaması açısından simülasyonlarda 0.1 olarak seçilmiştir. Yani zemin inhomojen seçildiğinde, hücreler arası dielektrik dağılımı  $\epsilon_r - 0,1 < \epsilon_r < \epsilon_r + 0,1$  olarak alınmıştır.

Programın üst kısmında yer alan üçüncü kısımdan hesaplama uzayının sınır koşulları MUR sınır koşulları olarak seçilebilmektedir (Şekil 2.29).



Şekil 2.29 Hesap uzayının sınır koşullarının belirlendiği MUR penceresi.

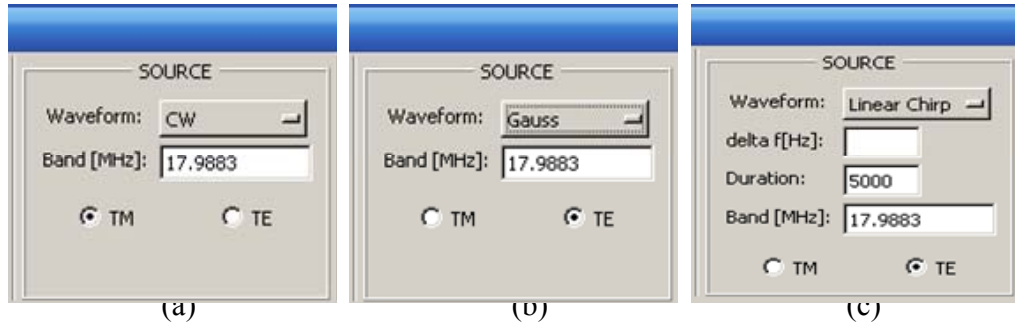
Sınır koşulları MUR seçildiğinde, sınırlar yutucu yüzeylerle kaplıymış gibi davranır ve sınırlardan geri yansıma olmaz. Hesaplama uzayı sonsuz boyutluymuş gibi varsayılır. Aksi takdirde yüzeylerden geri yansımalar olur.

#### 2.4.4 Kaynak seçimi

Beşinci kısmı oluşturan *SOURCE* penceresinde farklı kaynak seçimleri yer almaktadır. Bunlar *CW* (sürekli dalga), *Gauss* ve *Linear Chirp* (Doğrusal Chirp/FM) seçenekleridir.

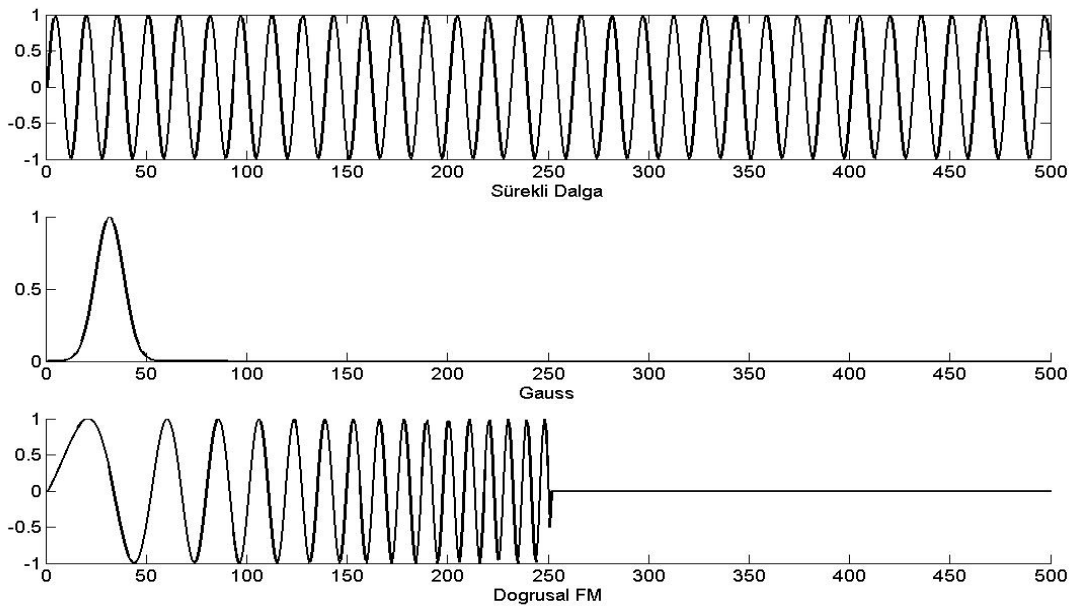
Kaynak olarak *CW* yada *Gauss* seçildiğinde, *Courant* koşuluna bağlı olarak hesaplanan çalışma frekansı kaynak işaretinin frekansı olmaktadır ve program tarafından hesaplanmaktadır (Şekil 2.30).





Şekil 2.30 (a) CW, (b) Gauss ve (c) Linear Chirp kaynaklar için seçim pencerelerinin gösterimi.

*Linear Chirp* kaynak tercih edildiğinde ise çalışma frekansının hangi değere kadar artacağını yada azalacağını belirlemek için bir frekans fark değeri ( $\Delta f$  (Hz)) kullanıcı tarafından belirlenmelidir. Frekansın kaç zaman adımında gerçekleşeceği de kullanıcı tarafından girilmesi gereken diğer bir değerdir ve *Duration* olarak adlandırılmaktadır. *Band* (MHz) değeri çalışma frekansını ifade etmektedir. Şekil 2.31’de farklı kaynak işaretlerine ait zaman düzlemi gösterimleri yer almaktadır. Kaynağın hangi modda çalışacağı (TM/TE) bu kısımdan seçilmektedir.



Şekil 2.31 Farklı kaynak işaretlerinin zaman düzlemindeki grafikleri.

### 2.4.5 Senaryonun çalıştırılması ve kaydedilmesi

En sonda yer alan *SIMULATION* penceresinde (Şekil 2.32) *START* butonuna tıklayarak simülasyon başlatılabilir. *PAUSE* butonu ile simülasyon durdurulabilirken, *STOP* butonu ile sonlandırılabilir. Simülasyonun çalışma süresi bir önceki pencerede yer alan *DURATION* kısmından değiştirilebilmektedir. F2D butonu ile simülasyonlar GIF uzantılı animasyon dosyası olarak saklanabilmektedir.

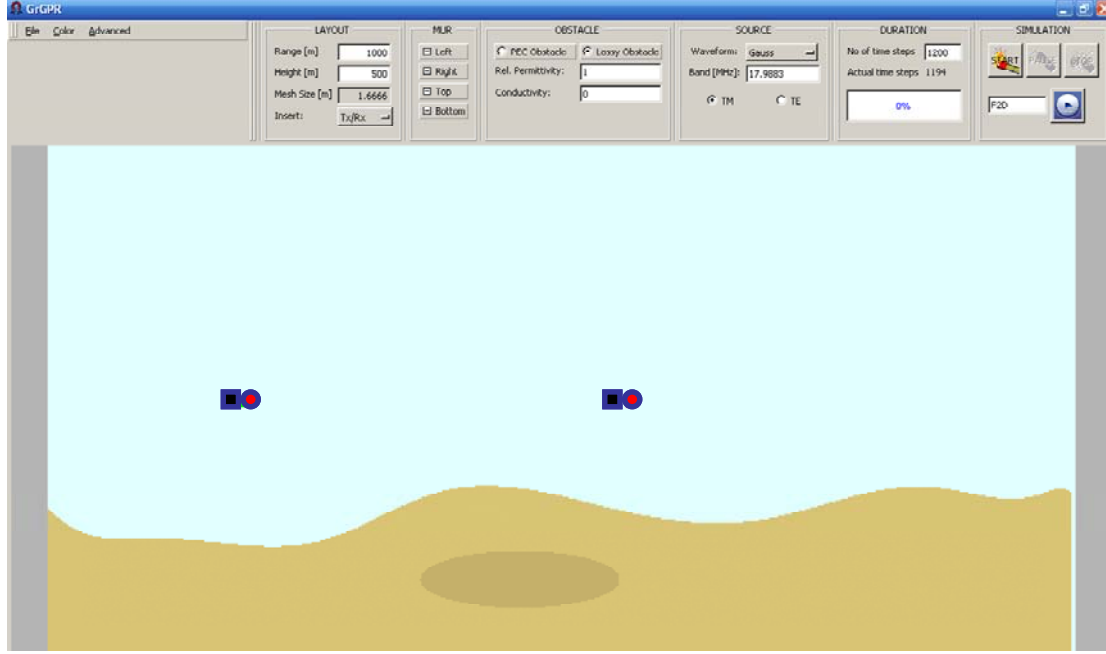


Şekil 2.32 Gerçekleştirilecek olan simülasyonların süresinin belirlenmesi ve simülasyonların başlatılması için kullanılan *DURATION* ve *SIMULATION* pencereleri.

### 2.3.6 GrGPR’da örnek bir senaryonun incelenmesi ve elde edilen sonuçlar

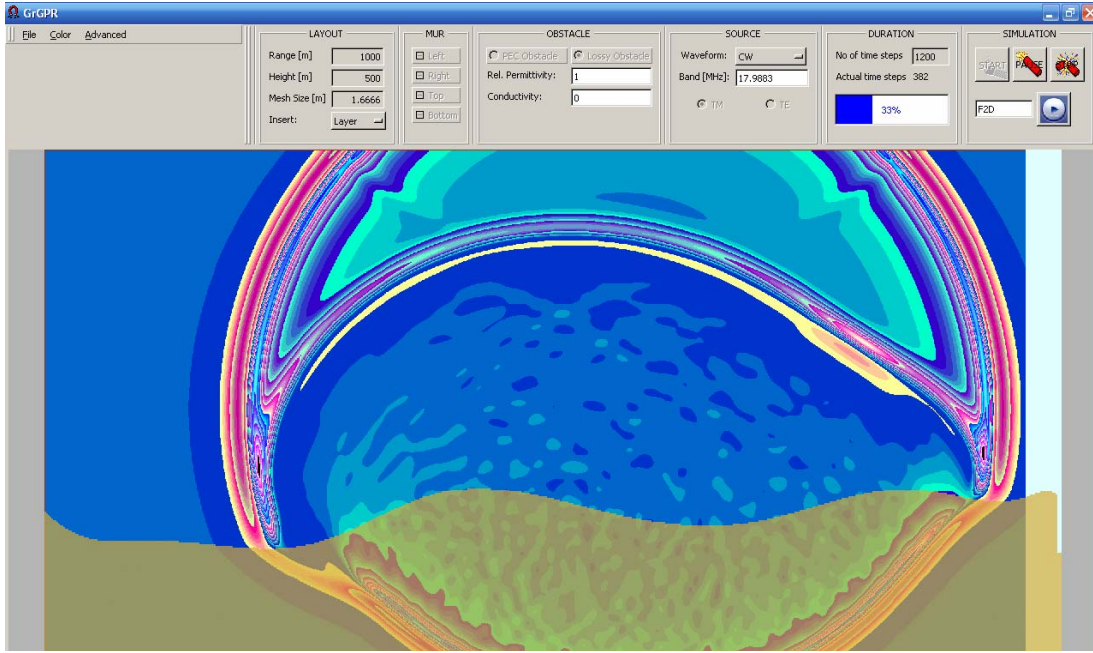
Buraya kadar anlatılan GrGPR programının özelliklerinden yararlanarak oluşturulan ve Şekil 2.33’de gösterilen bir senaryo simülasyonunun çalıştırılması sonucunda elde edilen görsel veriler Şekil 2.34’de yer almaktadır.

Senaryoda dielektrik katsayısı  $\epsilon_r=2$  olan engebeli yüzey şekli yerleştirilmiştir. Yüzey şeklinin yapısı homojen değildir ve dielektrik katsayısı 1.9 ile 2.1 arasında değişmektedir. Yüzeyin altına elips şeklinde bir PEC nesne yerleştirilmiştir. Bir verici ve bir alıcıdan oluşan iki anten grubu farklı konumlara yerleştirilmiştir. Şekil 2.34 (a)’da yüzeyaltında nesne gömülü olmadığı, (b)’de ise elips şeklinde PEC nesnenin gömülü olduğu durumda gözlenen simülasyon pencereleri görülmektedir.

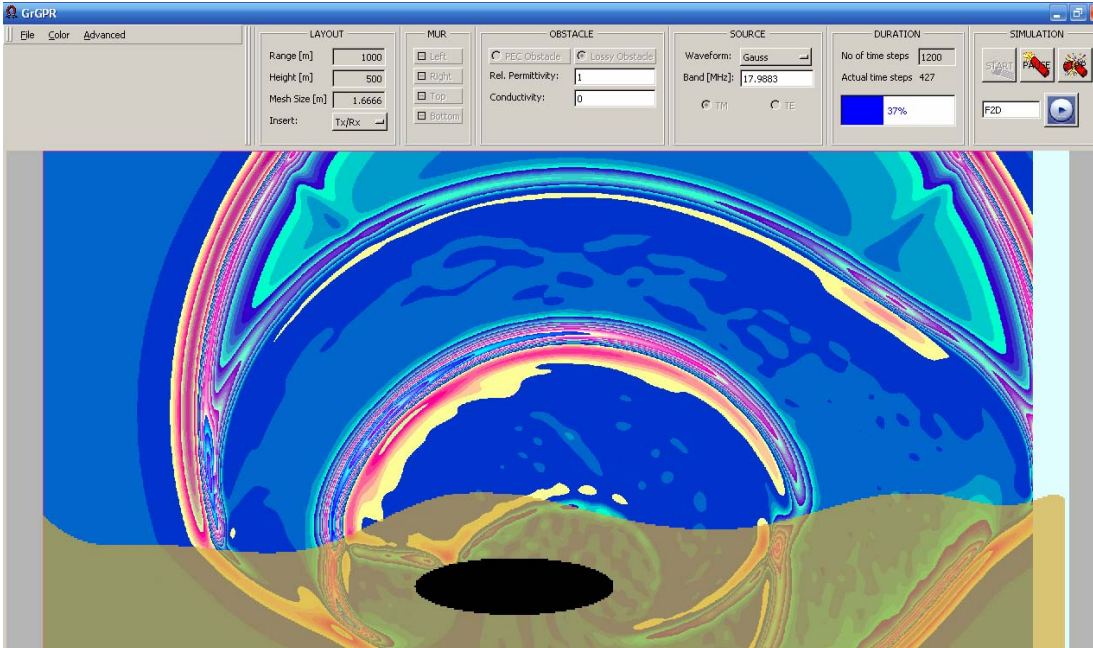


Şekil 2.33 GrGPR ile oluşturulan dielektrik katsayısı  $\epsilon_r=2$  olan homojen olmayan engebeli bir yüzey altında gömülü elips şeklinde bir PEC nesne ve bir alıcı ve bir vericiden oluşan iki anten grubunun yer aldığı senaryo.

Farklı konumlara yerleştirilmiş bir verici ve bir alıcıdan oluşan iki anten grubu ile elde edilen veriler Şekil 2.35’de karşılaştırmalı olarak verilmektedir. Üstte yer alan şekilde, gömülü PEC nesnenin bulunduğu durumda birinci ve ikinci anten grubundan elde edilen ham veri görülmektedir. Kaynaktan alıcıya direk gelen, yüzeyden ve PEC nesneden yansıyor gelen işaretler gösterilmektedir. Alttaki yer alan şekilde ise yalnız nesneden gelen ve zemin karmaşasından kaynaklanan işaretlerin yer alışı saf veri görülmektedir. İlk anten grubundaki alıcı anten nesneden yansıyor gelen işareti algılayabilecek uzaklıkta olmadığı için nesneye ait bilgi bu veride gözlenmemektedir.

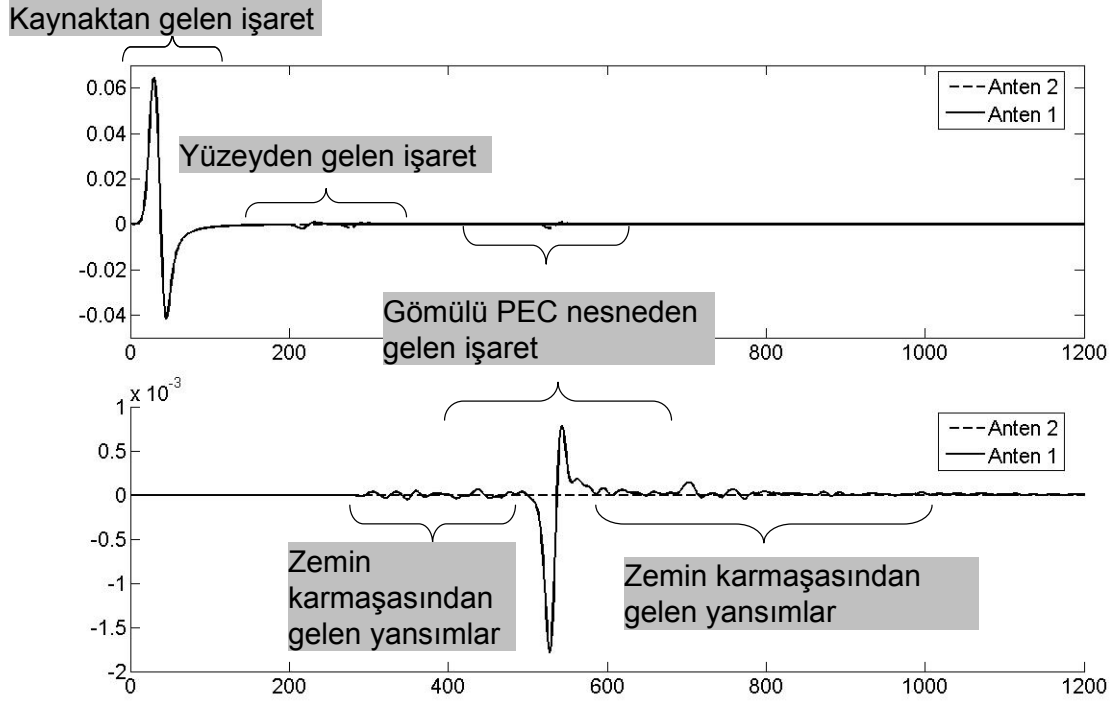


(a)



(b)

Şekil 2.34 a) Yüzeyaltında nesne gömülü olmadığı, b) elips kesitli sonsuz uzun silindirik PEC nesnenin gömülü olduğu durumda gözlenen simülasyon sonuçları.



Şekil 2.35 İki farklı anten tarafından algılanan (a) ham veriye ve (b) saf veriye ait zaman düzlemindeki işaretler.

## 2.5 Görüntü Oluşturma Algoritması

Nesnelerin görüntülerinin oluşturulması dört aşamadan oluşturulmaktadır. Bunlar;

- Yapay ham verilerin elde edilmesi,
- Ham verinin ön-işlemesi (pre-processing),
- Görüntü oluşturma algoritmasının uygulanması,
- Son-işleme (post-processing).

Yapay ham veriler, Bölüm 2.3’de bahsedilen 2-boyutlu GrGPR programı kullanılarak elde edilmişlerdir. Ham verinin işlenerek görüntülerinin oluşturulması için geliştirilen program kodları MATLAB 7.0 programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

### 2.5.1 Yapay ham verilerin elde edilmesi

Görüntüsü oluşturulacak nesnelere ait ham veriler, sayısal modelleme yöntemi FDTD'ye dayanarak hazırlanan GrGPR programı aracılığı ile oluşturulan senaryolardan elde edilmiştir. Verilerin elde edilmesinde yapay açıklıklı radar prensibinden yararlanılmıştır. Yapay açıklıklı radarın çalışma prensibinden ve avantajlarından 2.3.5 bölümünde bahsedilmektedir. Kısaca özetlemek gerekirse, yapay açıklıklı radarlarda N sayıdaki alıcı/verici anten çiftleri sıra ile aktif olurlar. Bir verici antenden yayılan işaretler o çifte ait alıcı anten tarafından algılanırlar. Bir anten çiftinin diğer bir anten çifti ile etkileşimi söz konusu değildir.

### 2.5.2 Ham verinin ön işleme

Yapay ham veri elde edildiğinde içeriğinde, serbest uzayda bir nesne söz konusu ise, alıcı verici antenler arasındaki etkileşimden gelen bileşen ve nesneden yansiyarak gelen etkiler yer almaktadır. Yüzealtı görüntüleme bunlara ilave olarak yüzeyden gelen yansımalar da bulunmaktadır. Saydığımız tüm bu etkiler '*erken zaman cevabı*' olarak adlandırılmaktadır. Saçıcı nesneye ait kısım ise '*Geç zaman cevabı*' olarak adlandırılır. *Erken zaman cevabı* ve buna ilave olarak homojen olmayan ortamlarda gömülü nesnelerin algılanması incelendiğinde çevresel etkilerden kaynaklanan yansıma ve saçılmalar, asıl algılanmak istenen nesneden yansiyarak gelen işaretin ham veri içinde algılanmasını zorlaştırmaktadır.

Algılanan işarete geç zaman cevabını oluşturan kısım erken zaman cevabından birkaç kat daha küçüktür. Bu nedenle ham verinin bir ön işleme tabi tutularak erken zaman cevabının ham veriden temizlenmesi gerekmektedir. Ham verinin ön işleme iki kademededen oluşmaktadır:

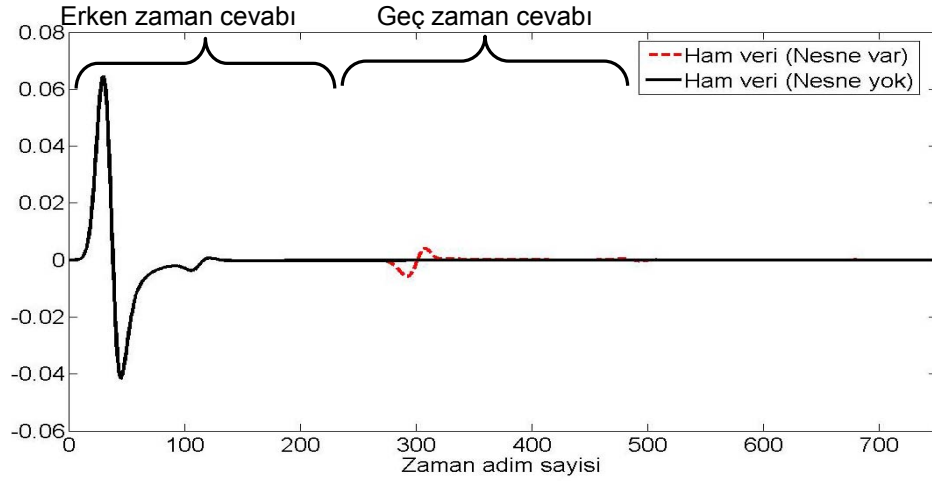
- ✓ Nesneye ait verilerin ham veriden ayrıklaştırılması
- ✓ Kompanzasyon

### 2.5.2.1 Nesneye ait verilerin ham veriden ayrıştırılması

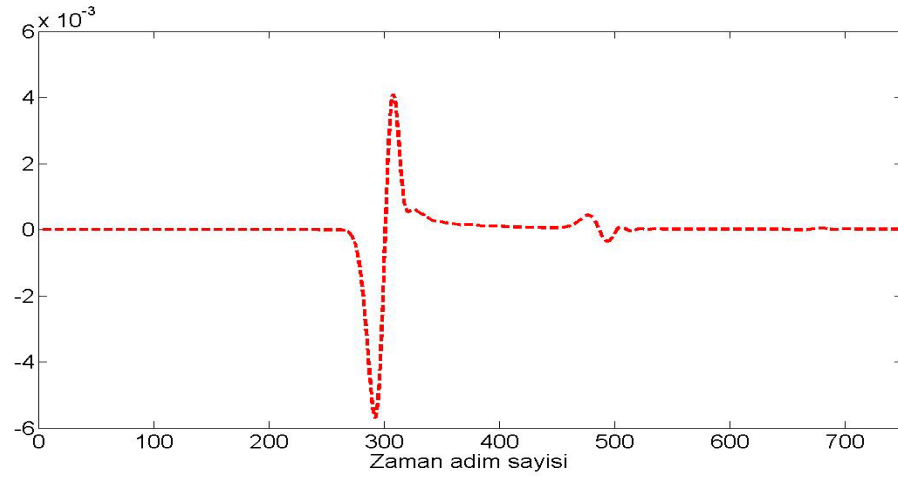
Gömülü yada örtülü nesnelere algılanmasında, nesneye ait verinin ham veriden ayrıştırılması için literatürde farklı yöntemler uygulanmaktadır. Bunlar:

- ✓ Nesnenin bulunmadığı durum için simülasyonları tekrarlayıp iki veri arasındaki farkı almak (Li 2001, Fera 2002, Xie 2006),
- ✓ Alıcı ve verici antenler arasındaki uzaklığın eşit olduğu ve tüm antenlerin nesnenin gömülü olduğu yüzeyden eşit uzaklığa yerleştirildiği durumlarda alıcı antenlerde elde edilen verilerin ortalaması alınarak elde edilen referans işaretleri ham veriden çıkartmak (Xie 2006),
- ✓ Alıcı ve verici antenler arasındaki etkileşimi ortadan kaldırmak için antenler arasında yutucu yüzeyler kullanmak (Gürel 2001),
- ✓ Farklı polarizasyona sahip verici antenler ile antenlerden gelen direk işaretleri ortadan kaldırmak (Gürel 2000),
- ✓ İşaret işleme yöntemleri uygulanarak asıl veriyi ham veriden ayrıştırmak (Li 2005, Bond 2003, Wang 2005, Williams 2006).

Bu çalışmada birinci ve ikinci maddelerde yer alan yöntemler farklı uygulamalar için kullanılmışlardır. Doğrusal yerleştirilen anten dizisi uygulamalarında ortalama bir referans işaret elde edilmesi tercih edilirken, nesnenin çevrelendiği dairesel, karesel ve üçgen yerleşimlerde ikinci maddedeki yöntemin kullanılması daha uygun bulunmuştur. Şekil 2.36.a ve b'de sırası ile ham veriye ve saçıcı nesneye ait işaretlerin zaman düzlemi gösterimleri yer almaktadır.



(a)



(b)

Şekil 2.36 Nesneye ait verilerin ham veriden ayrıştırılmasına ait zaman düzlemi gösterimi. a) Nesne varken (kesikli çizgi) ve yokken (düz çizgi) elde edilen ham veriler, b) Erken zaman cevabı çıkarıldıktan sonra saçıcı nesneye ait verileri içeren işaret.

### 2.5.2.2 Kompanzasyon

Elektromanyetik dalgalar, verici antenden çıkıp herhangi bir noktadan yansıyıp alıcı antene ulaşmaya kadar çeşitli zayıflama faktörlerine tabi olurlar. Bunlar:

- ✓ Silindirik yada küresel yayılmaya bağlı olarak serbest uzayda aldıkları yola bağlı zayıflama



$$L_{hava} = \frac{1}{R_1} \quad (2.17)$$

- ✓ Yüzeyaltına nüfuz eden dalgalarda elektrik alanının yüzeye göre yerleşimine bağlı hava-yüzey iletim kayıpları (elektrik alan bu çalışmada paralel alındığı için bu duruma ait eşitlik (2.18)'de verilmiştir)

$$T_{\parallel} = \frac{\sqrt{\frac{\epsilon_{e2}}{\epsilon_1}} \cos \theta_i}{\frac{\epsilon_{e2}}{\epsilon_1} \cos \theta_i + \sqrt{\frac{\epsilon_{e2}}{\epsilon_1} - \sin^2 \theta_i}} \quad (2.18)$$

- ✓ Yüzeyaltı görüntüleme söz konusu olduğunda ortam parametrelerinden kaynaklanan ve yüzeyaltında alınan yola bağlı zayıflamalar,

$$L_{toprak} = \exp[-\alpha z] \quad (2.19)$$

$z$  : yüzeyaltında alınan yol

$\alpha$  : açılal frekansa ve ortam parametrelerinin ( $\mu_2, \epsilon_2, \sigma_2$ ) fonksiyonudur.

Yukarıda verilen bağıntılardan yola çıkılarak alıcıdan çıkıp herhangi bir nesneden yansıdıktan sonra alıcıya ulaşana kadar alınan çift yönlü yol boyunca oluşan kayıp (2.20) eşitliği ile verilmektedir.

$$L_{toplamlam} = (L_{hava} L_{ilet} L_{toprak})^2 \quad (2.20)$$

Yapay açık radar prensibine göre yapay veriler toplanırken antenler doğrusal olarak konum değiştirmekte dolayısı ile aldıkları yol farklı olmaktadır. Saçıcı nesneye en yakın noktadaki antenin algıladığı işarete nesnenin etkisi, en uzaktaki antene göre çok daha fazla olmaktadır. Görüntü oluşturma işlemi sırasında bu farkı ortadan kaldırmak amacı ile her

antenin her bir hücreye ait değerini (2.20) eşitliği ile hesaplanan kayıp faktörü ile çarpmak gerekmektedir.

Bu çalışmada hesaplama kolaylığı sağlaması amacı ile antenlerin algıladıkları işaretlerin, maksimum genliğe sahip işarete olan oranları bulunarak her antene ait bir kompanzasyon katsayısı bulunur. Her antendeki işaret kendilerine ait kompanzasyon katsayısı ile çarpılarak nesneden gelen etkiler her anten için eşitlenmiş olur.

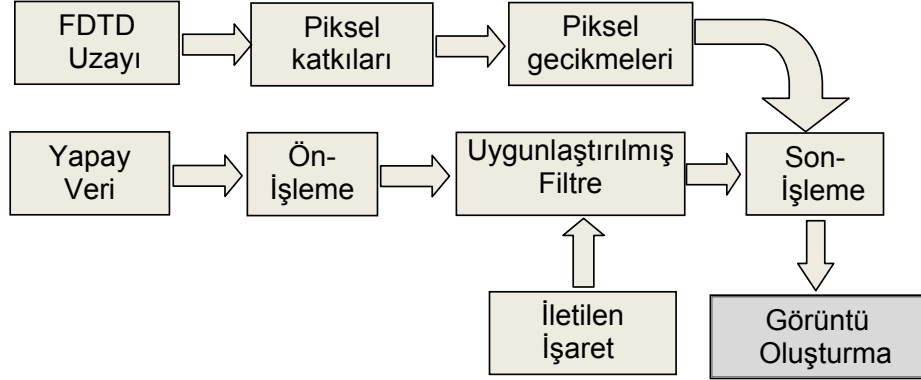
### 2.5.3 İki Boyutlu (2B) Görüntülerin Elde Edilmesi

Ham veriden erken zaman cevabı temizlenip, kompanzasyon işleminden geçirildikten sonra elde edilen saf veriler kullanılarak saçıcı nesnelerin 2-boyutlu görüntüleri elde edilebilir.

Ham verilerin elde edildiği senaryoların oluşturulduğu hesaplama uzayı, hücrelerden oluşmaktadır. Her bir hücrenin antenlere olan katkılarının bulunup süperpozisyonlarının alınması ile hücrenin toplam alan değeri bulunabilmektedir. Bu işlem üç aşamada gerçekleştirilir:

- Alıcı-hücre-verici yollarının bulunması (Serbest uzayda bulunan bir nesne yada gömülü olan bir nesne için bu yolların hesaplanması farklılıklar gösterecektir.)
- Alınan yola bağlı zamanda oluşan gecikmenin hesaplanması ve hangi zaman adımına geldiğinin bulunması
- Her anten çifti için aynı işlemlerin tekrarlanarak katkılarının süperpozisyonlarının alınarak bulunması

Tüm bu aşamalar Şekil 2.37’de yer alan grafik gösterimle özetlenebilir. Her adım alt başlıklar halinde takip eden kısımlarda detaylı olarak verilmektedir.



Şekil 2.37 Görüntü oluşturma algoritmasının aşamalarının grafiksel gösterimi.

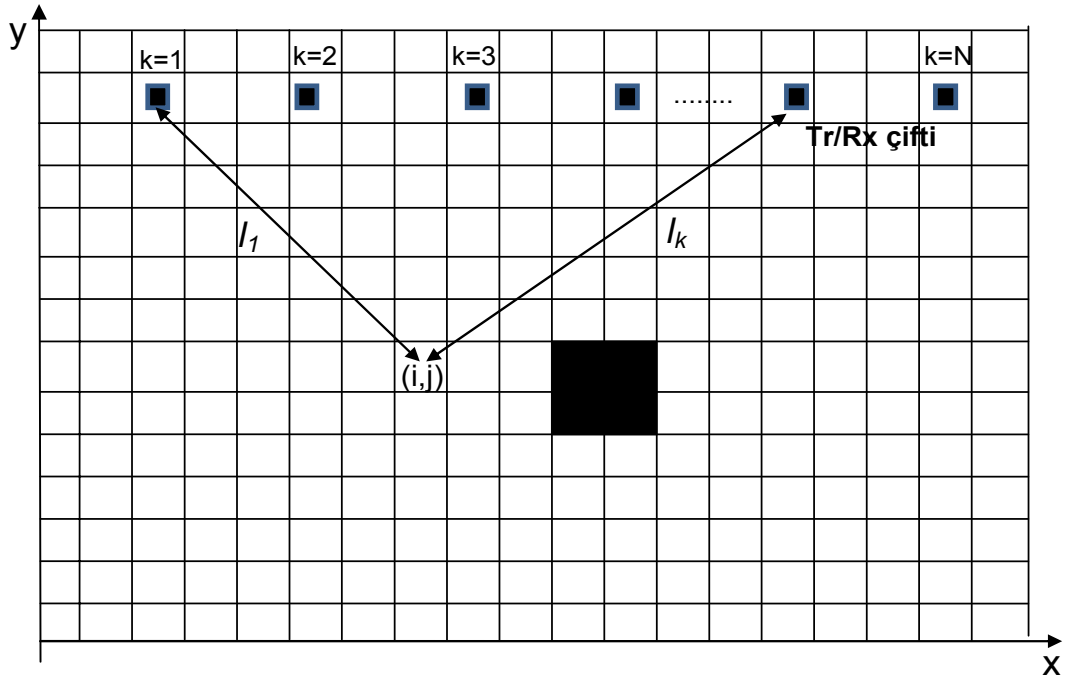
### 2.5.3.1 Her hücreye ait gecikme sürelerinin hesaplanması

Serbest uzayda bulunan bir cismin görüntüsünü elde etmek istendiğinde, verici antenden yayılan dalganın cisme ve tekrar alıcı antene geri dönmesi için gereken süre

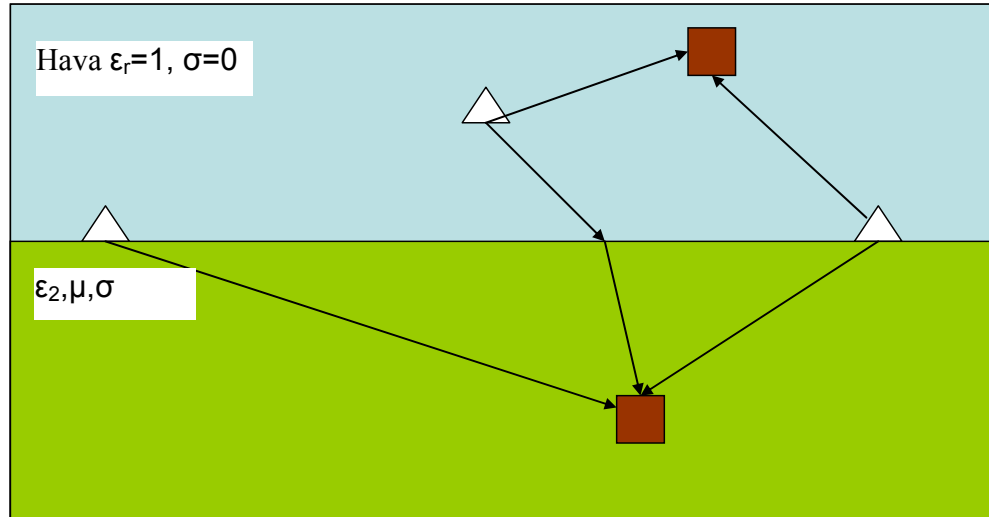
$$\tau = \frac{2 * \sqrt{(x_i - x_{ka})^2 + (y_j - y_{ka})^2}}{c} \quad (2.21)$$

eşitliği ile hesaplanabilmektedir. Şekil 2.38’de serbest uzayda bulunan bir nesneye ait senaryoda alıcı-hücre-verici arasında alınan yolun gösterimi yer almaktadır. Benzer şekilde yüzeyin hemen üzerinde bulunan bir antenden çıkıp yüzeyaltında ilerleyen bir dalga da (yüzeyaltının homojen olduğu varsayımı ile) doğrusal bir yol izleyecek ve hiçbir kırınımına uğramayacaktır. Ancak hızı ışık hızı yerine ortam parametrelerinin bir fonksiyonu olan faz hızı olacaktır.

Elektriksel özellikleri farklı bir katmanın altında gömülü olan cisimler söz konusu olduğunda aynı eşitliği kullanmak doğru sonuçlar vermeyecektir. Cisimlerin gömülü bulunduğu katman ile boşluk arasındaki kırılma indisi farklılıklarından dolayı antenden çıkarak yüzeye ulaşan dalga yüzey içinde aynı doğrultuda ilerlemeyip kırınımına uğrayacaktır. Böyle bir senaryoya ait gösterim Şekil 2.39’da yer almaktadır.



Şekil 2.38 Serbest uzayda bulunan bir nesneye ait senaryoda alıcı-hücre-verici arasında alınan yolun ve senaryonun hüresel gösterimi



Şekil 2.39. Bir verici anten çıkan dalganın yüzey altında gömülü olan yada boşlukta bulunan bir nesneye ulaşması için izlemesi gereken yollar

Şekil 2.39'dan da görüldüğü gibi yüzeyin tam üzerinde yer alan bir antenden çıkan dalga tamamen yüzeyaltında ilerlemekte ve hiçbir kırınımına uğramamaktadır. Ancak yüzeyin biraz üzerinde yer alan bir anten çıkan dalga yüzeyde kırınımına uğrayacaktır. Bu nedenle antenden çıkan dalganın söz konusu hücreye ulaşması için kat etmesi gereken toplam yolun ve dolayısı ile bunun için gerekli olan sürenin doğru bir şekilde bulunabilmesi için, antenden yüzeye, yüzeyden hücreye olan mesafelerin ayrı ayrı hesaplanması gerekir. Bu amaçla dalganın yüzeye temas etmesi gereken hücre, Snell yasasına (2.22a ve 2.22b) dayanarak elde edilen (2.22c) eşitliğinden yararlanılarak hesaplanır (Lei, 2005).

Böyle bir senaryoya ait şematik gösterim Şekil 2.40'da görülmektedir. Burada  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$  sırasıyla birinci (serbest uzay) ve ikinci (yüzeyaltı) ortamlara ait dielektrik sabitleri,  $(x_{ka}, y_{ka})$  ve  $(x_i, y_i)$  ise sırasıyla alıcı/verici anten ile söz konusu hücrenin yüzey geçiş noktasına olan uzaklıklarıdır.

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (2.22a)$$

$$n = \sqrt{\varepsilon\mu} \quad (2.22b)$$

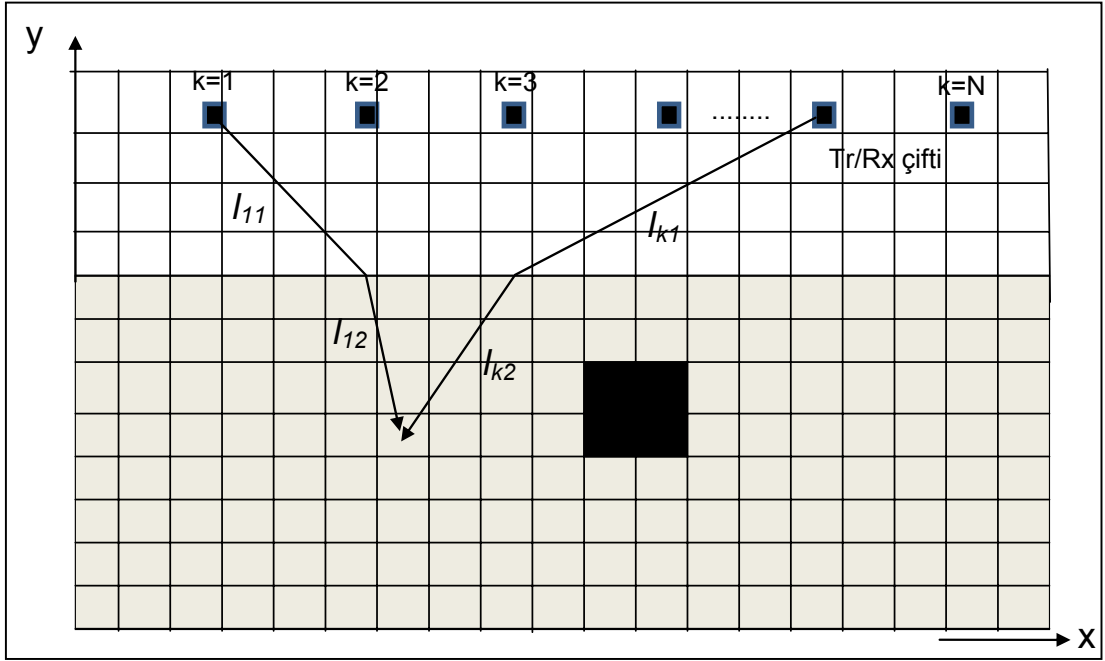
$$\sqrt{\varepsilon_1} \frac{|(x - x_{ka})|}{\sqrt{(x - x_{ka})^2 + (y - y_{ka})^2}} - \sqrt{\varepsilon_2} \frac{|(x - x_i)|}{\sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_j)^2}} = 0 \quad (2.22c)$$

Şekil 2.40'da,  $l$  ve  $k$  antenlerinden çıkıp  $(i, j)$  hücresine ulaşan dalga için aldığı toplam yolun gösterimleri yer almaktadır. Eşitlikleri genelleştirilmek amacı ile  $k$  anteni ele alınarak ifadeler çıkarılmıştır.  $l_{k1}$ , antenden yüzey kesişim noktasına,  $l_{k2}$  ise yüzey kesişim noktasından söz konusu hücreye kadar olan uzaklıklardır. Buna göre dalganın alıcı antenden çıkıp yüzeydeki kesişim noktasına, kesişim noktasından söz konusu hücreye kadar ulaşıp tekrar alıcıya geri dönmesi için geçen sürenin hesaplanmasında kullanılan eşitlikler sırası ile (2.23a) ve (2.23b) eşitlikleri ile verilmektedir. Bu eşitliklere göre, alıcı ve vericinin aynı koordinatlarda olduğu varsayıldığında, işaretin vericiden hücreye, hücreden alıcıya kadar ulaşması için gereken toplam süre (2.23c) eşitliği ile bulunabilir.

$$\tau_1 = \left( \frac{\sqrt{(x - x_{ka})^2 + (y - y_{ka})^2}}{c} \right), c: \text{ışık hızı} \quad (2.23a)$$

$$\tau_2 = \frac{\sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_j)^2}}{v_p}, v_p: \text{faz hızı} \quad (2.23b)$$

$$\tau = 2 * (\tau_1 + \tau_2) \quad (2.23c)$$



Şekil 2.40 Yüzeyaltında gömülü bir nesne bulunan senaryoya ait şematik gösterim.

### 2.5.3.2 Hücelere ait alan değerlerinin bulunması

Her hücreye ait alan değerleri, yapay açıklıklı radar prensibi ile elde edilerek saklanan verilerden, tüm antenlerde söz konusu hücreye ait alan değerlerinin bulunup süper pozisyonlarının alınması ile elde edilebilir. Hücelere ait alan değerleri, senaryoları oluşturan hücre sayısına eşit büyüklükte, yani  $N \times M$  boyutlu bir matriste saklanır.

2.24 eşitliği ile hesaplanan  $P_{ij}^k$ ,  $(i,j)$  hücresinden gelen ve  $k$  anteni tarafından algılanan işaretin hangi zaman adımına geldiğini göstermektedir.,  $(i,j)$  hücresi ile  $k$  anteni

arasında meydana gelen zaman gecikmesi  $\tau_{ij}^k$ 'nin  $dt$ , zaman adımına bölünmesi ile bulunmaktadır.

$$P_{ij}^k = \frac{\tau_{ij}^k}{dt} \quad (2.24)$$

Herhangi bir hücreden yansiyarak gelen ve  $k$  antenin algıladığı alan şiddeti  $a_{ij}^k$  ile ifade edilmektedir. Bu değerler her anten için bulunup, toplanarak söz konusu hücrenin toplam alan şiddeti yoğunluğu, aynı zamanda görüntü skalasındaki eşdeğer görüntü rengi, hesaplanmaktadır ( $I(i,j)$ ).

$$I(i, j) = \sum_{k=1}^K a_{ij}^k (P_{ij}^k) \quad (2.25)$$

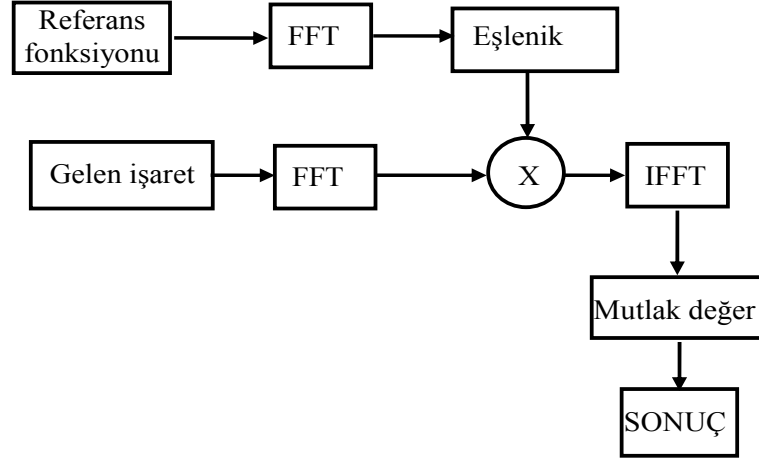
Her hücreye ait sayısal değerlerin bulunması için iki farklı yöntem uygulanmıştır:

- ✓ Anten tarafından algılanan alan değerleri doğrudan toplanarak her hücrenin alan şiddeti yoğunluğunu bulmak,
- ✓ Her anten tarafından algılanan işaretlerin bir referans işaret- ki bu kaynak işareti olarak alınmıştır- ile ilişkilerinin (korelasyonlarının) hesaplamak (Şekil 2.41).

Son maddede bahsedilen uygulama aslında işaretin bir uygunlaştırılmış (matched) filtreden geçirilmesi ile aynı işlemidir.

### 2.5.3.3 Görüntü üzerinde son-işleme

Elde edilen görüntü matrisinde yapay açıklıklı radar prensibinden kaynaklı hayalet şekillerin ve senaryoda yer alan farklı saçılma etkilerinden kaynaklanan bozulmaları ortadan kaldırıp görüntüyü temizlemek amacı ile bir son işleme sürecine tabi tutulmaktadır. Bu çalışmada, bu amaçla elde edilen matris elemanları arasından maksimum değere sahip olan seçilir. Bu değer saçıcı nesneye ait veriden kaynaklanmaktadır. Bu değer belirli bir yüzdesinin (%50 gibi) altında kalan değerler sıfırlanarak asıl şekle ait görüntü temizlenmiş olur.



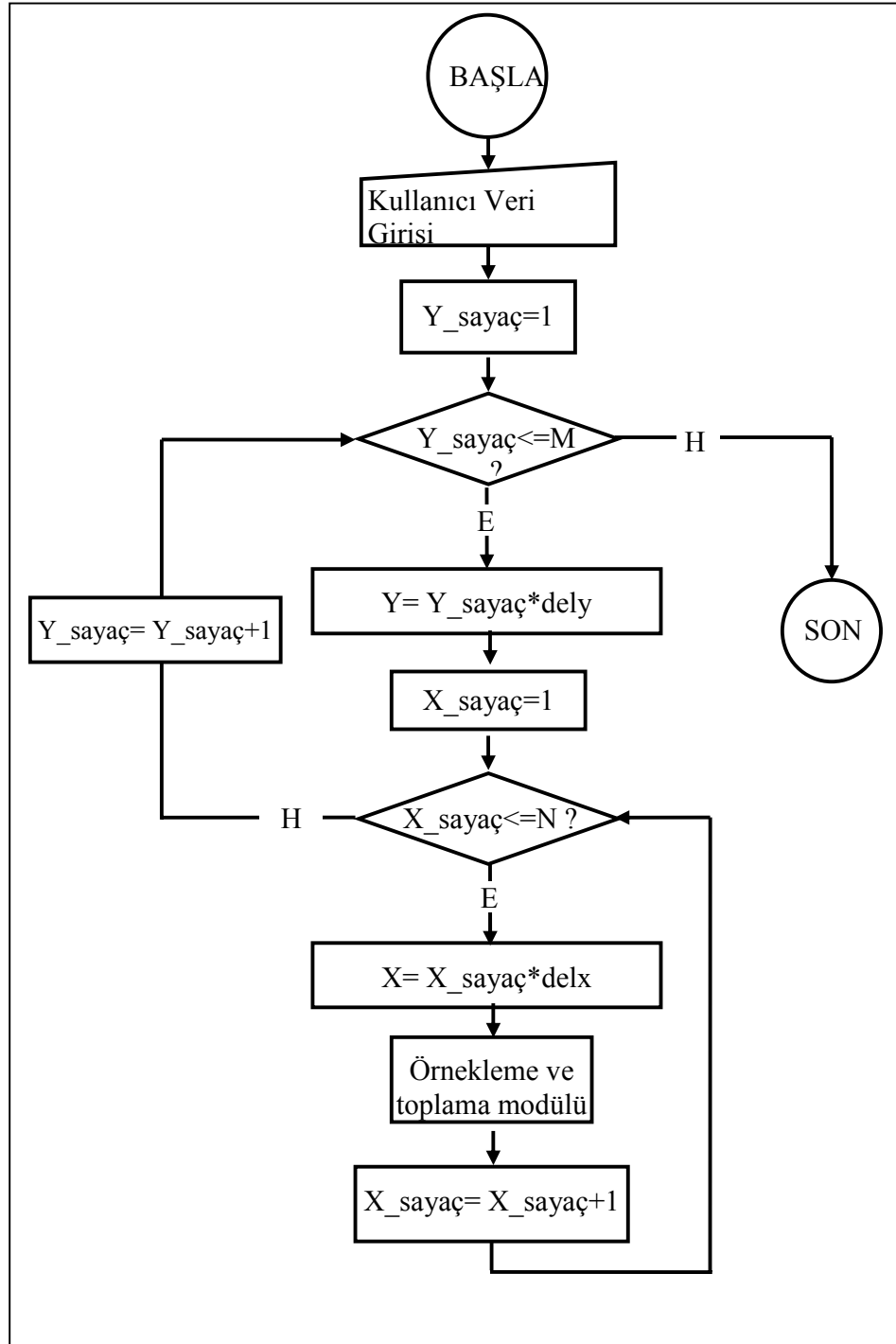
Şekil 2.41 2-boyutlu görüntü elde etmek için kullanılan uygunlaştırılmış (matched) filtre yönteminin akış şeması

#### 2.5.3.4 Görüntü oluşturma algoritmasının genel hali ve akış şeması

İki boyutlu görüntülerin oluşturulması için hazırlanan MATLAB programının akış şeması Şekil 2.42a’da yer almaktadır. Şemada görülen “Kullanıcı Veri Girişi” modülü FDTD tabanlı GrGPR programı ile elde edilen verilerin yeni program tarafından okutulması için gerekli olan bilgilerin dosyalardan okutulması için kullanılır. Bunlar; veri oluşturulması sırasında kaç alıcı kaç verici antenin kullanıldığı, anten konumları, yatayda (NX) ve düşeyde (NY) yer alan hücre sayıları, hücre boyutları (delx=dely), simülasyon süresi (NSTOP) gibi verileridir. Bu bilgiler okutulduktan sonra her bir hücre için örnekleme ve toplama modülü çalıştırılır. Bu döngünün boyutu toplam hücre sayısı (NxM) kadardır.

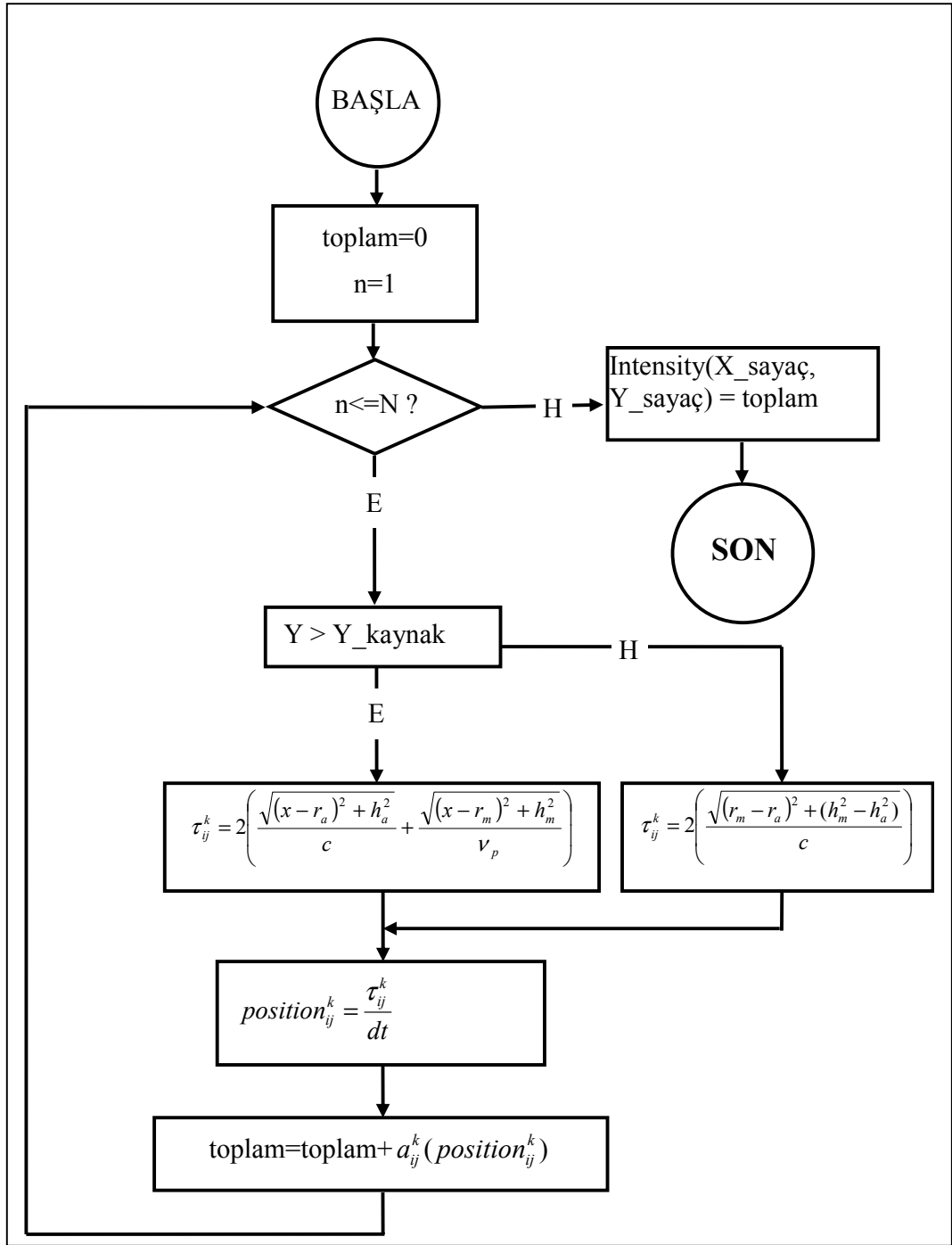
Örnekleme ve toplama modülü (Şekil 2.42b), 2.4.3.1 ve 2.4.3.2 bölümlerinde bahsedilen işlemleri kapsamaktadır. Alıcı antenler tarafından algılanan alan şiddeti değerleri bulunup toplanarak toplam alan şiddeti (görüntü rengi) hesaplanır. Eğer ilgilenilen hücre bir saçıcı cisme ait ise yüksek genlikli (koyu renk) bir değer elde edilirken diğer durumlarda ise zayıf genlikler (açık renk) elde edilecektir. Böylece saçıcı cisme ait konum ve boyut bilgilerini elde etmek mümkün olacaktır. Burada X\_sayaç ve Y\_sayaç, bir hücrenin sırası ile X ve Y koordinat değişkenini verir. N ve M ise, sırası ile X ve Y koordinatları boyunca yer alan toplam hücre sayısıdır.





(a)

Şekil 2.42. MATLAB programı akış şeması (a) her hücrenin testini gösteren akış şeması



(b)

Şekil 2.42. (devam) MATLAB programı akış şeması (a) her hücrenin testini gösteren akış şeması (b) örnekleme ve toplama modülü akış şeması

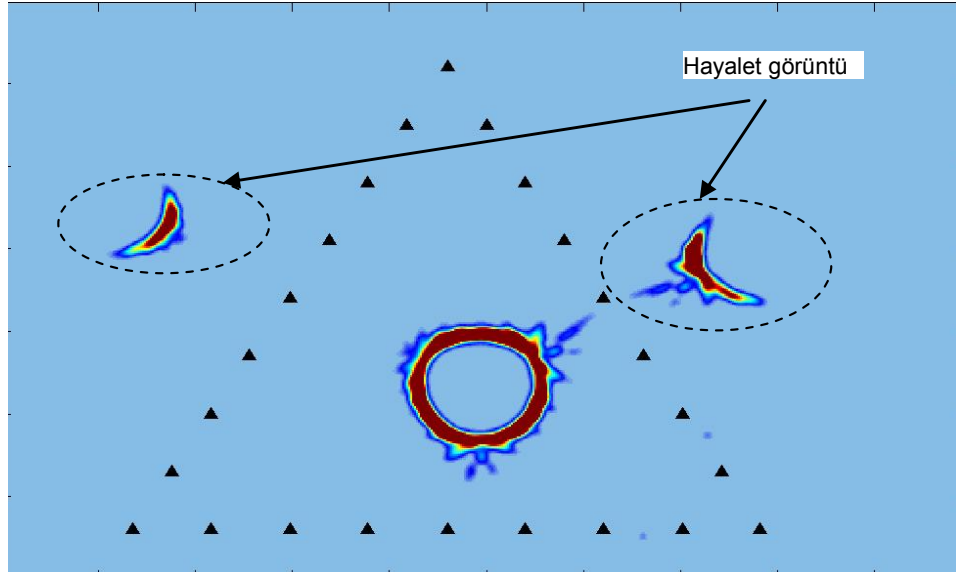
### 2.5.4 Görüntü oluşturma algoritmasından kaynaklanan hayalet görüntüler

Uygulanan görüntü oluşturma algoritmasına göre verici-hücre-alıcı arasında alınan yol için geçen süre hesaplanmakta ve bu süreye göre zaman düzlemi verilerinden hücreye ait alan değeri bulunmaktadır. Bu durumda verici ve alıcının aynı konumda olduğu kabul edildiğinde ve buldukları hücre merkez olarak alındığında anten elemanlarından eşit uzaklıktaki daire boyunca tüm hücreler aynı alan değerine sahip olacaklardır. (Antenlerin TE modunda uyarıldığı ve silindirik yayılım yaptığı varsayılmaktadır). Yeterli sayıda anten kullanılmadığı takdirde yada antenler doğrusal yerleştirildiğinde hayalet görüntüler meydana gelmektedir. Meydana gelen bu görüntüler yanıltıcı sonuçlar verebilmektedir. Bu konuya ait örnekler Bölüm 3’de yer alan Şekil 3.2’de verilmektedir.

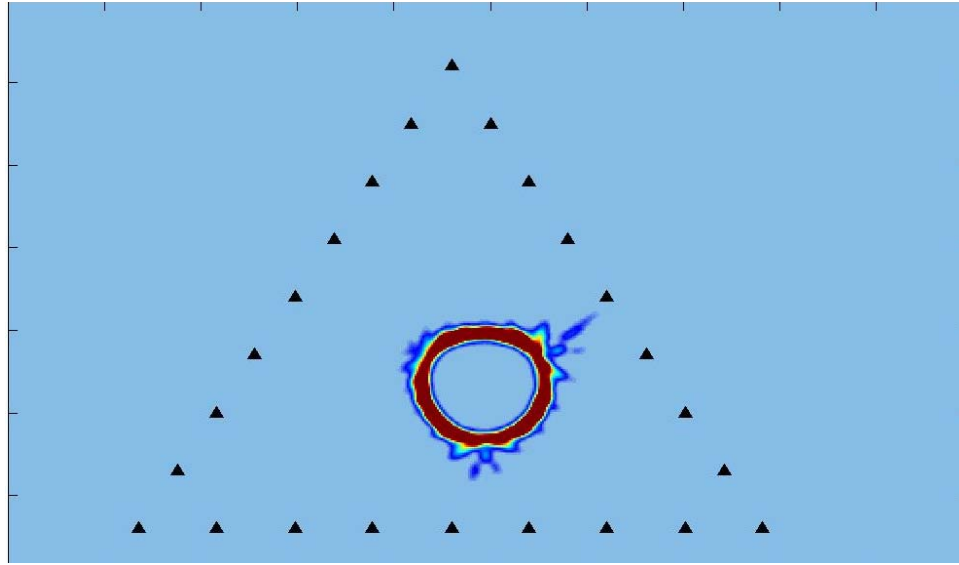
Bir yüzey altında gömülü nesne ele alındığında antenlerin üst kısmında kalan hücreler (nesnenin alt kısmında yer aldığı bilinmektedir) sıfırlanmaktadır. Böylece istenmeyen bu görüntüler temizlenmiş olur. Ancak kapalı çevrim dizilimde farklı bir algoritmaya tabi tutulması gerekir.

Kapalı çevrim boyunca nesne etrafına antenlerin dizilmesi halinde, dairesel yerleşim söz konusu olduğunda ve yeterli sayıda anten kullanıldığında hayalet görüntüler oluşmamakta yada minimum düzeyde olmaktadır.

Karesel yada üçgen yerleşim söz konusu olduğunda ise hayalet görüntüler daha yoğun bir şekilde gözlenmektedir (Şekil 2.43a). Bu durumu ortadan kaldırmak amacı ile, alan değeri tespit edilecek hücrenin kapalı çevrim içinde olup olmadığı kontrol edilerek dışında kalan hücrelerin alan değerleri sıfırlanır. Böylece hayalet görüntüler ortadan kaldırılmış olur (Şekil 2.43b).



(a)



(b)

Şekil 2.43 a) Dairesel kesitli sonsuz uzun bir PEC nesnenin etrafına, üçgen dizilim ile yerleştirilen antenler ile elde edilen görüntüde oluşan hayalet görüntüler, b) oluşan hayalet görüntü yok edildikten sonra elde edilen görüntü.

## **2. MATERYAL YÖNTEM**

Bu bölümde yüzeyaltı taramada geliştirilen ve çözüm için kullanılan paket programın-GrGPR-temel mantığını oluşturan GPR konusunda genel bilgiler verilmektedir. Yüzeyaltı senaryolarının modellenmesinde kullanılan sayısal modelleme yöntemi FDTD metodundan da bahsedilmektedir. Tezin ana kısmını oluşturan yüzeyaltı tarama problemlerinin senaryolarının gerçekleştirilmesi için bu çalışma içinde geliştirilen FDTD tabanlı GrGPR programı ayrıntılı olarak tanıtılmaktadır. Bu bölümün son kısmında GrGPR ile elde edilen sentetik veriler kullanılarak görüntülerin oluşturulabilmesi için geliştirilen görüntü oluşturma algoritması açıklanmaktadır.

### **2.1 Yüzeyaltı Görüntüleme**

HF'ten IR frekanslarına kadar EM dalgalar malzemelerin içine nüfuz edebilmektedirler. EM dalgaların bu özelliği günümüzde gömülü nesnelere algılanmasında ve görüntülenmesinde kullanılmaktadır. Yüzeyaltı görüntüleme; su altında, toprak altında, doku altında, hatta insan yapımı yapıların altında bulunan cisimlerin tespitinde kullanılan optik, x-ray, elektromanyetik, elektrik ve ultrasonik metotların hepsini içine alan yeni bir disiplindir.

Gömülü nesnelere uzaktan algılanması yüzyıllardır insanlığın ilgisini çekmesine ve yapılabilecek çalışmalar üzerine araştırmalar yoğun bir şekilde devam etmesine rağmen, sorunun komple çözümünü verecek tek bir yöntem henüz bulunamamıştır.

Elektromanyetik enerjinin nesne algılamada ilk kullanılması 1904 yılında Hülsmeier tarafından gerçekleştirilmiş ancak gömülü nesnelerin konumlarının tespiti için kullanımı ilk olarak altı yıl sonra Alman bilim adamları Leimbach ve Löwy'e ait patenette yer almıştır. Çalışmalarının ana temelini oluşturan, CW işlemi, yüzeyaltı özelliklerine bağlı olarak ekranlama ve saçılma etkilerinin, saçılmayı meydana getiren iletkenlik özelliklerindeki değişimlerin kullanılması gibi bazı özellikler diğer birçok patenette de yer almaktadır. Ancak darbe tekniklerinin kullanımı ilk olarak 1926 yılında Hülsenbeck tarafından kullanılmıştır. Herhangi bir dielektrik değişimin de yansımalarına neden olacağına dikkati çekmiş ve bu tekniği, yönlendirilebilir kaynakların da anlaşılması ile, sismik uygulamalarına göre avantajlara sahip olduğundan bahsetmiştir.

Darbe teknikleri, 1930'lerden sonra farklı uygulama alanlarının (buz, taze su, tuz kaynakları, çöl kumu ve kaya oluşumları içinde belli derinliğe kadar sondalama gibi) incelenmesi ile birlikte çeşitli gelişmelere tabi olmuştur. GPR'ın ilk uygulamaları ve gelişmeleri 1970'lerin ortalarında Nilsson tarafından verilmiştir. 1970'lerden günümüze GPR'ın kullanımı giderek artmaktadır. [Daniels, 2004].

İyonlaşmayan elektromanyetik dalgaların insan vücudundaki kanserli hücreleri tespit etmek için kullanılması hayali ile birlikte minyatür radarlara biyomedikal uygulamalarda da rastlanmaktadır. Özellikle son yıllarda Hagness ve arkadaşları tarafından göğüs içindeki iyi huylu olmayan ırların tespiti için UWB radarların kullanıldığı bir yöntem geliştirmişlerdir. [Hagness ve ark. 1998]

EM dalgaların yüzeyaltına ne ölçüde nüfuz edebileceği ortamın elektriksel parametrelerine ve yayılan dalganın frekansına bağlıdır. Tarama işleminin yapıldığı yüzeyler, elektriksel özellikleri bakımından farklılıklar gösterdiğinden EM dalgalarının yüzeyaltına nüfuz etme derecesi her yüzey için farklı olabilmektedir.

Malzemenin dielektrik geçirgenliği (2.1) karmaşık olduğunda yayılım katsayısı,  $k$ , (2.2) da karmaşık sayı olur ve gerçel ve sanal kısımlarına (2.3,2.4) ayrılabilir.

$$\varepsilon_c = \varepsilon \left( 1 - j \frac{\sigma}{\omega \varepsilon} \right) \quad (2.1)$$

$$k_c = \omega \sqrt{\mu \varepsilon_c} = \alpha + j\beta = \omega \sqrt{\mu \varepsilon \left( 1 - \frac{j\sigma}{\omega \varepsilon} \right)} \quad (2.2)$$

$$\alpha = \omega \sqrt{\frac{\mu \varepsilon}{2} \left( \sqrt{1 + \left( \frac{\sigma}{\omega \varepsilon} \right)^2} + 1 \right)} \quad (2.3)$$

$$\beta = -\omega \sqrt{\frac{\mu \varepsilon}{2} \left( \sqrt{1 + \left( \frac{\sigma}{\omega \varepsilon} \right)^2} - 1 \right)} \quad (2.4)$$

+z-yönünde yayılan bir düzlemsel dalganın ifadesi ,

$$E_x = E_0 e^{-k_c z} = E_0 e^{-\alpha z} e^{-j\beta z} \quad (2.5)$$

olarak verilir. Bu durumda  $\beta$  dalga yayılımının çözümünü verirken, zayıflama katsayısı  $\alpha$  ise, z arttıkça üstel bir azalmaya neden olur.  $\alpha = 1$  olduğunda birim dalga genliği  $e^{-1}$  Np/m değerine azalır.

İyi bir iletken için tanımdan  $1 \ll \sigma / \varepsilon \omega$  olduğundan 2.2 eşitliğindeki 1 değeri ihmal edilerek 2.6 ifadesi elde edilebilir. Burada  $f$ , dalganın frekansını göstermektedir.

$$k_c = \sqrt{j} \sqrt{\mu \omega \sigma} = \frac{1+j}{\sqrt{2}} \sqrt{\mu 2\pi f \sigma} = (1+j) \sqrt{\pi f \mu \sigma} \quad (2.6)$$

Deri kalınlığı,  $\delta$ , yayılan dalganın genliğinin  $e^{-1}$  değerine düşmesi için ilerlemesi gereken derinliktir ve dolayısı ile

$$\delta = \frac{1}{\alpha} \quad (2.7)$$

ve iyi bir iletken için

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (2.8)$$

olarak verilir.

Çizelge 2.1 Farklı yüzey malzemelerin dielektrik karakteristiklerinin tipik aralıkları (Daniels, 2004)

Malzeme	İletkenlik $\sigma$ , $\text{Sm}^{-1}$	Bağlı geçirgenlik $\epsilon$
Hava	0	1
Kuru kil	$10^{-1}:10^{-0}$	2-6
Islak kil	$10^{-1}:10^{-0}$	5-40
Kuru kireçtaşı	$10^{-8}:10^{-6}$	7
Islak kireçtaşı	$10^{-2}:10^{-1}$	8
Kuru kum	$10^{-7}:10^{-3}$	2-6
Islak kum	$10^{-3}:10^{-2}$	10-30
Kuru humuslu toprak	$10^{-4}:10^{-3}$	4-10
Islak humuslu toprak	$10^{-8}:10^{-6}$	10-30
Kuru killi toprak	$10^{-2}:10^{-1}$	4-10
Islak killi toprak	$10^{-3}:10^{-0}$	10-30

Yüzey üzerinde maksimum genliğe sahip olan EM dalgaların genliği yüzey içinde ilerledikçe azalmaktadır. Genliğin  $1/e$  değerine düştüğü derinlik cidar kalınlığı olarak adlandırılmaktadır. (2.3) ve (2.8) ifadelerinden cidar kalınlığının elektriksel özelliklere, aynı zamanda frekansa bağlı olduğu görülmektedir. Yüzeyin iletkenliği ve dalganın frekansı arttıkça bu değer azalmaktadır. Örneğin, EM dalgalar, ortalama bir zeminde



( $\epsilon_r=10-15$ ,  $\sigma=0.01-0.05$  S/m) 5 MHz frekansta onlarca metre derinliğe ilerlerken mikrodalga frekanslarında (örneğin, 1 GHz) birkaç santimetre derinliğe inebilmektedirler.

Tablo 2.1’de farklı yüzey malzemelerinin ve Tablo 2.2 de ise farklı özelliklerdeki yüzeylerin ve toprakların elektriksel özellikleri yer almaktadır. Tablo 2.1’den malzemenin kuru yada ıslak olmasının elektriksel özelliklerini etkilediği görülmektedir.

Çizelge 2.2 Farklı yüzeylerin ve toprakların dielektrik özellikleri  
(<http://www.smeter.net/grounds/rf-skin-depth-in-soil.php>)

Yüzeyler ve topraklar	İletkenlik $\sigma$ , $S m^{-1}$	Bağıl geçirgenlik $\epsilon$
Nehir ağzından uzak Okyanuslar ve tuzlu denizler	4.54	81
Nemli, verimli, humuslu tarım alanları	0.033	22
Toprağı zengin, ağaçlık, çayır ve bahçelerin bulunduğu alçak tepeler kırsal alanlar	0.0125	15
Ağaçlıklı, çiçekli, kil ve topraklı tepeler	0.005	12
Yoğun killi toprak, yabani ot, çimen ve kara yosunlarının bulunduğu tepeler	0.004	13
Taşlı toprağa ve seyrek bitkisel alana sahip dik tepeler	0.002	14
Kurak kum çölleri	0.2-0.00005	3

Tablo 2.3’de farklı elektriksel özelliklere sahip yeryüzeyi malzemelerinin cidar kalınlıklarının frekansla değişimleri karşılaştırılmaktadır. Frekans ve iletkenlik arttıkça cidar kalınlığının azaldığı gözlenmektedir.

Tablo 2.3 Farklı elektriksel özelliklere sahip yeryüzeyi malzemelerinin deri kalınlıklarının 10-100 kHz frekans aralığında değişimi (<http://www.smeter.net/grounds/rf-skin-depth-in-soil.php>)

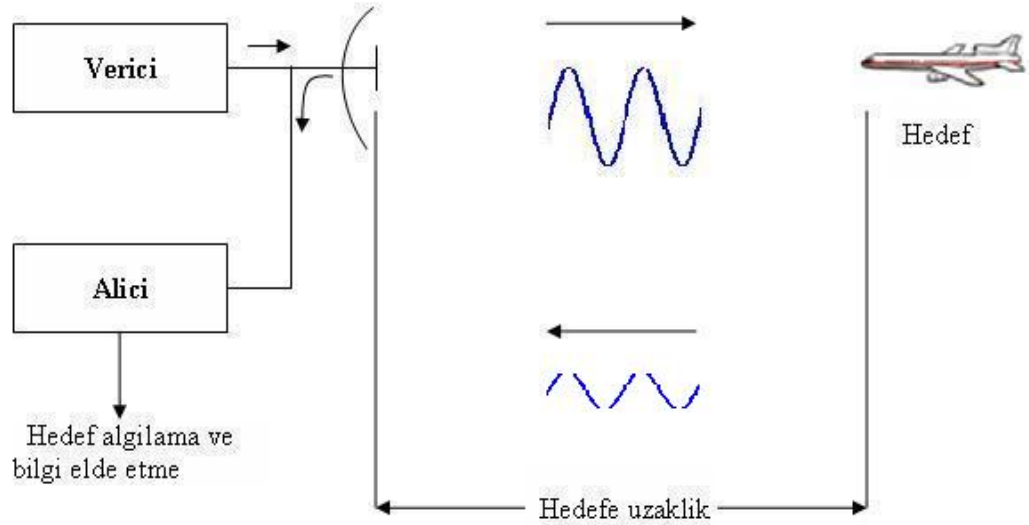
Frekans (kHz)	Kurak kum ( $\sigma=0.2, \epsilon=3$ ) deri kalınlığı (m)	Kurak kum ( $\sigma=5e-5, \epsilon=3$ ) deri kalınlığı (m)	Kuru killi toprak ( $\sigma=0.1, \epsilon=10$ ) deri kalınlığı (m)	Islak killi toprak ( $\sigma=1, \epsilon=30$ ) deri kalınlığı (m)
10	11.267	724.54	15.934	5.039
11.66	10.434	672.867	14.757	4.666
13.59	9.663	625.165	13.667	4.322
15.85	8.949	581.155	12.657	4.002
18.48	8.288	540.579	11.722	3.707
21.54	7.676	503.199	10.856	3.433
25.12	7.109	468.798	10.054	3.179
29.29	6.584	437.177	9.311	2.944
34.15	6.097	408.151	8.624	2.727
39.81	5.647	381.555	7.987	2.525
46.42	5.230	357.237	7.397	2.339
54.12	4.843	335.058	6.850	2.166
63.10	4.485	314.895	6.344	2.006
73.56	4.154	296.633	5.876	1.858
85.77	3.847	280.172	5.442	1.721
100	3.563	265.418	5.040	1.593

## 2.2 Yüzealtına Nüfuz Eden Radar – GPR

İngilizce “**RA**dio **D**etection **A**nd **R**anging-Radyo Algılama ve Mesafe Tayini” kelimelerinin kısaltması olan **RADAR**, hareketli yada sabit bir cismin varlığını tespit

etmede kullanılan bir algılayıcıdır. Radar sistemlerinin temeli elektromanyetik dalga yayılımına dayanmaktadır. Bir verici tarafından yayılan elektromanyetik dalgalar hedeften yansıtılarak geri dönerler ve alıcı anten tarafından algılanırlar (Şekil 2.1). Yansıyan dalgaların İşaret İşleme Teknikleri ile incelenmesi sonucu elde edilen veriler sayesinde uçak, gemi, motorlu araç gibi hareketli nesnelerin konumu, yönü, hızı yada gözlenen arazinin yüzey şekli, bitki örtüsü, hava koşulları vs. hakkında bilgi edinmek mümkün olabilir.

Genellikle radar denildiğinde, akla ilk gelen askeri bir geminin gökyüzünü ya da denizleri diğer askeri uçak yada gemileri algılamak için tarama yapmasıdır. Yada bir hava kontrol kulesinin gelen uçakları görebilmek için gökyüzünü taradığı düşünülmektedir. Diğer bir alternatif, hava durumu bilgileri için kullanılan Doppler radarı düşünülebilir.



Şekil 2.1 Temel Radar Prensipleri

Radarların yüzeyaltındaki yapıları, boşlukları ve diğer anormallikleri tarama amaçlı kullanılabilecekleri çok nadir olarak düşünülmektedir. Oysa gömülü nesnelerin algılanmasında radarların kullanılması giderek artmaktadır. Gömülü nesne problemlerinin

fiziğinin daha iyi anlaşılması ve radar teknolojisinin gelişmesi, bu alandaki kullanım teknolojisinin daha da ilerlemesine neden olmaktadır. Dolayısı ile yüzeyaltına nüfuz eden radarlar, radar teknolojisinin ayrı bir kolu haline gelmiştir. Ancak, halen işaret işleme ve analizi konularında yapılabilecek oldukça fazla çalışma vardır.

Yüzeğe nüfuz eden radar (Ground Penetrating Radar-GPR), yüzeyaltı sondaj radarı (ground-probing radar), yüzeyaltı radarı (sub-surface radar), yüzeyaltına nüfuz eden radar (subsurface penetrating radar) terimleri, yeryüzeyinin altında yada opak bir yapının içinde gömülü olan nesnelere yada arayüzlerin konumlarını algılamada kullanılmaktadır. Ancak GPR literatürde en çok rastlanan terimdir. Bu çalışmada da yeraltına nüfuz eden radar ifadesi yerine GPR kısaltması kullanılacaktır.

GPR farklı alanlarda ve farklı uygulamalar için kullanılmaktadır. Bu kullanım alanlarından bazıları aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Arkeolojik araştırmalar
- Bina durum tespiti
- Gömülü mayınların tespit edilmesi
- Coğrafik araştırmalar
- Medikal görüntüleme
- Yol durum incelemesi
- Uçak veya uydudan uzaktan algılama
- Boru ve kablo incelemesi
- Tanksavar ve anti-personel silahların algılanmasında vb.

Şekil 2.2a ve b'de sırası ile arkeolojik araştırmalar ve çevresel incelemelerde kullanılan el tipi GPR'ların, Şekil 2.2c ve d'de ise sırası ile askeri mayın taramalarına ait el tipi ve araca monteli GPR'ların görüntüleri yer almaktadır.



(a)



(b)

Şekil 2.2 GPR uygulamaları a)Arkeolojik çalışmalar ve b) çevresel incelemelerde kullanılan el tipi, askeri mayın taramalarına ait c) el tipi ve d) araca monteli GPR'lar. (<http://geoint.missouri.edu/CGI2/research10.aspx>)



(c)

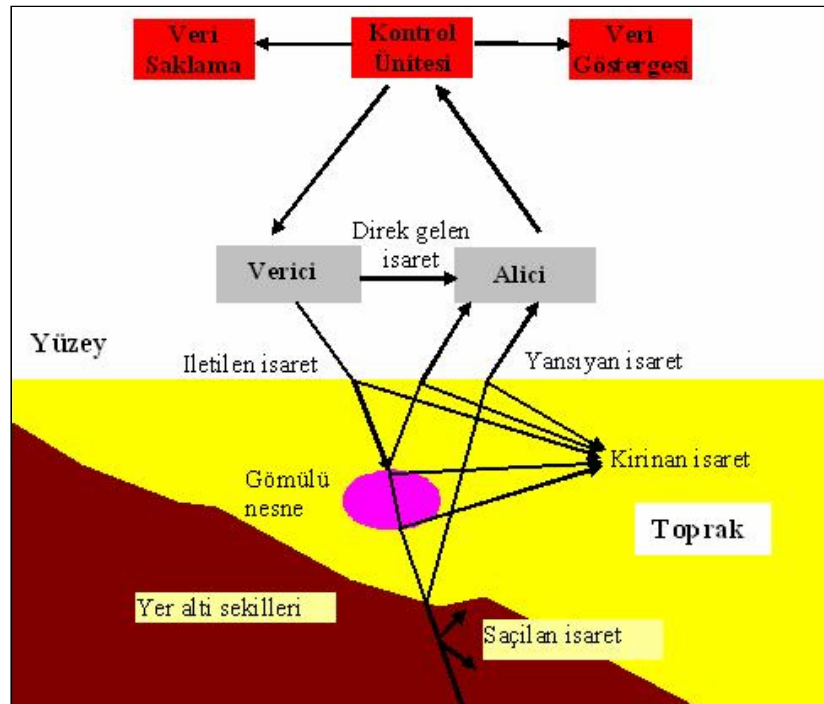


(d)

Şekil 2.2 (devamı)GPR uygulamaları a)Arkeolojik çalışmalar ve b) çevresel incelemelerde kullanılan el tipi, askeri mayın taramalarına ait c) el tipi ve d) araca monteli GPR'lar. (<http://geoint.missouri.edu/CGI2/research10.aspx>)

### 2.2.1 GPR'in çalışma prensibi ve genel şeması

GPR, belirli hedeflerin tespit edilmesini sağlayacak şekilde yüzeyaltının görüntülerinin oluşturulmasına imkan veren zamana bağlı bir tekniktir. GPR, yüzeyaltındaki nesnelerin muhtemel derinliklerinin elde edilmesini sağlar. GPR ünitesi genel olarak, bir kontrol ünitesi, bir (monostatik) yada iki (bistatik) antenlerden ve bir bilgisayardan oluşur. Burada monostatik anten; tek bir antenin hem alıcı hem verici olarak kullanıldığını, bistatik anten ise alıcı ve verici olarak iki farklı antenin kullanıldığını ifade eder. Kontrol ünitesi alıcı ve verici antenlerin işaret göndermek ve almak için tetiklemede kullanılan bir ünedir.



Şekil 2.3 GPR'in çalışma prensibine ait genel şema

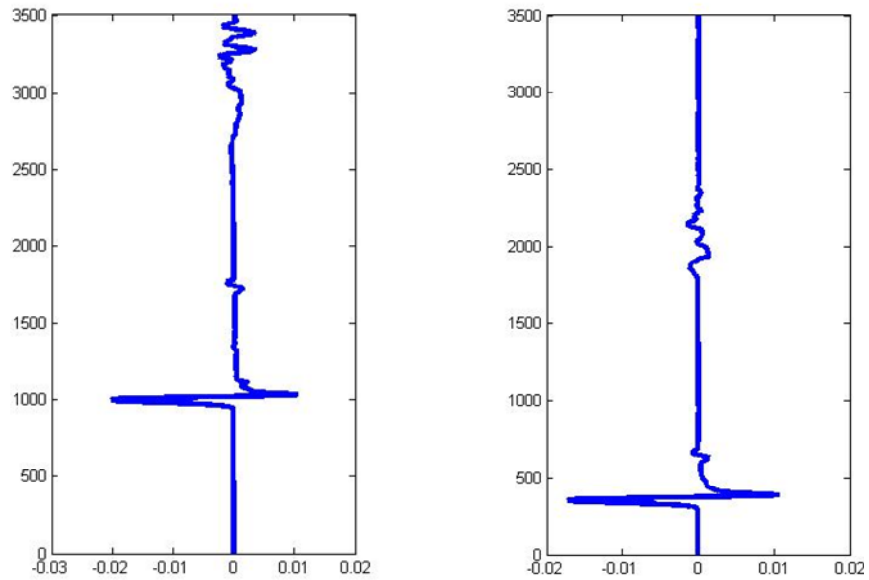
GPR'lar bir verici antenden yüzeye elektromanyetik dalga yayarlar. Yayılan bu elektromanyetik dalga, yüzeyaltında gömülü olan çeşitli nesnelere, yeryüzeyinin farklı zıt dielektrik özelliklere sahip yeryüzeyi yapılarından, örneğin toprak ve kaya gibi

sınırlardan, yansır. Bu yansımalar yüzeydeki ani dielektrik değişimlerinden kaynaklanır. Bu elektriksel özellikler bağlı elektriksel geçirgenlik, bağlı manyetik geçirgenlik ve iletkenliktir. Sonuç olarak farklı nedenlerle yansıyan elektromanyetik dalgalar alıcı antenler tarafından algılanarak sayısal olarak bilgisayarda kayıt edilirler (Şekil 2.3).

### 2.2.2 GPR verilerinin gösterimi

Yüzeyaltı radar verilerinin çoğu üç farklı tarama formunda işlenmiş ve sunulmuştur. Bunlar:

- A-scan : GPR ile elde edilen verilerin zaman düzleminde gösterimidir. Şekil 2.4’de düşey eksen zaman adımını, yatay eksen genliği göstermektedir. Zaman adımı bu senaryoda derinliği göstermektedir. Zaman adımı gecikme miktarına bölünerek konum bilgisi elde edilebilir.

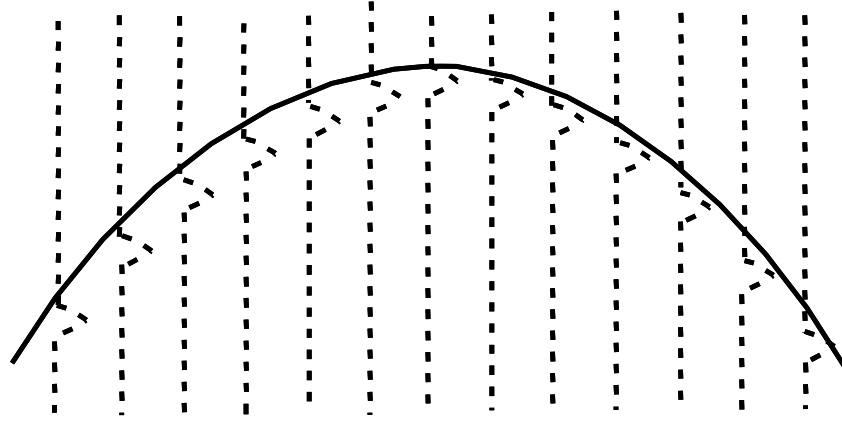


Şekil 2.4 İki farklı anten için zaman düzleminde verilerin gösterimi.

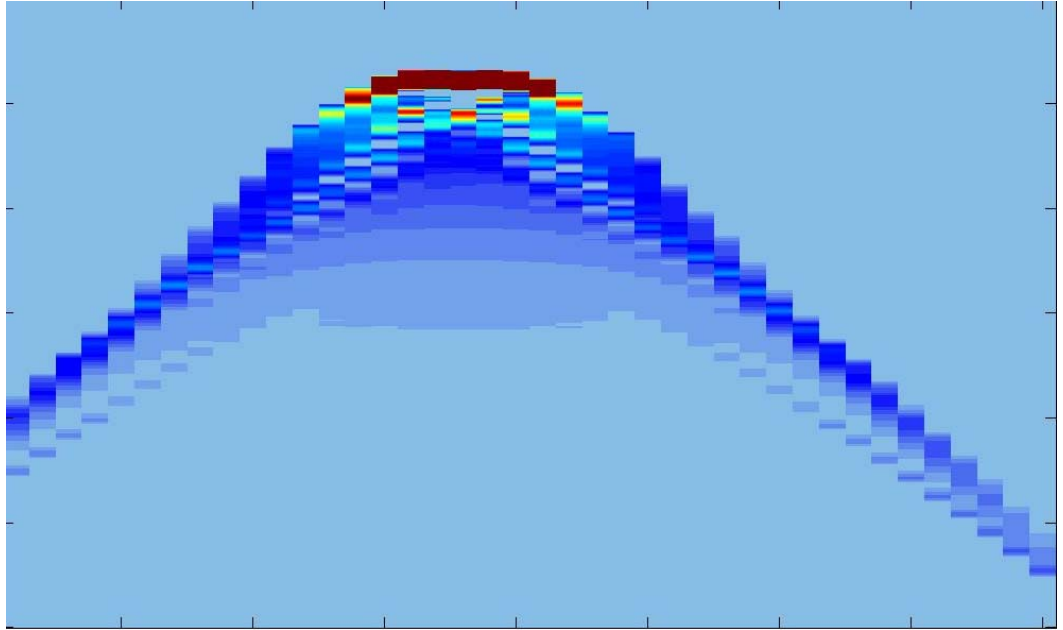
- B-scan: A-Scan verilerinin N sayıda anten konumu için elde edilip ardı ardına matrisel olarak birleştirilmesi ile elde edilir. Şekil 2.5a’da zaman düzlemindeki



verilerin yerleşimi, Şekil 2.5b’de ise bu verilerin iki boyutlu olarak B-Scan gösterimi yer almaktadır.



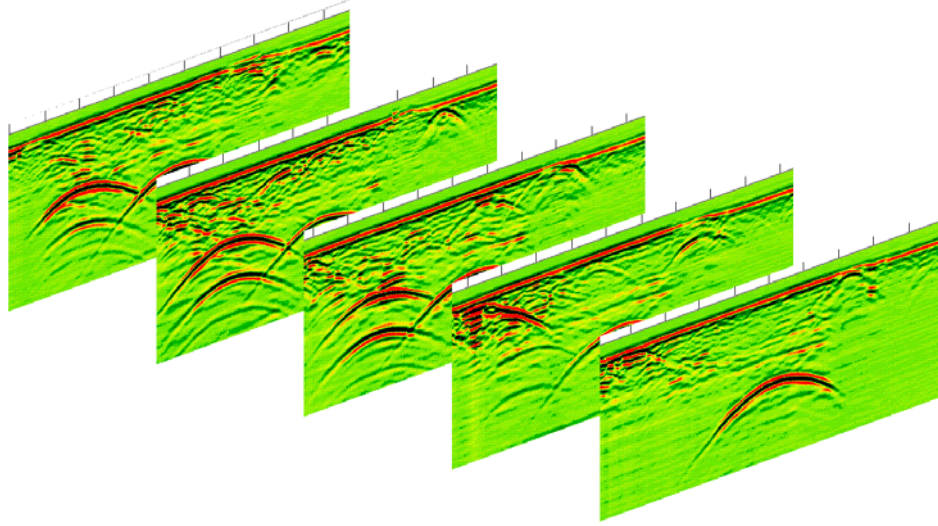
(a)



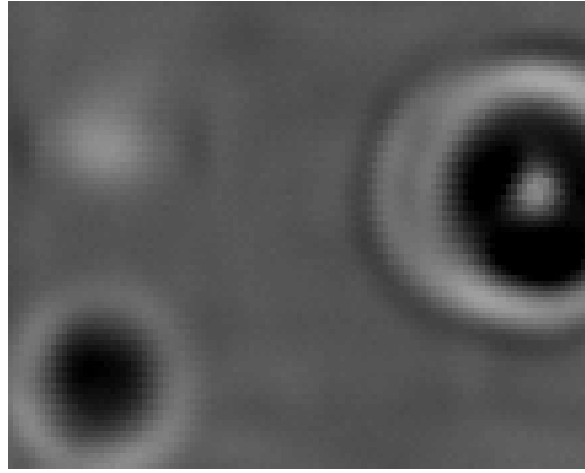
(b)

Şekil 2.5 a) A-Scan verilerinin N sayıda anten konumu için elde edilip ardı ardına gösterimi, b) zaman düzlemi verilerinin B-scan görüntüsü.

- C-Scan: İki boyutlu tarama sonucunda elde edilen B-Scan verilerin dilimler halinde birleştirilmesi ile elde edilen görüntülerdir.



(a)



Şekil 2.6. a) B-Scan dilimlerinin ardı ardına birleştirilmiş hali, b) C-Scan gösterimi.

### 2.2.3 B-Scan gösterimin yapay açıklıklı radar prensibi ile işlenmesi

Uzayda hareket ederek veri toplayan bir anten yapay açıklıklı bir anten oluşturur. Bu bir uçak üzerine yerleştirilmiş bir anten yada herhangi bir mobil haberleşme aracı

olabilir. Yapay açıklıklı radarda, hareket halindeki bir radar, geri yansıyan darbeleri toplar ve geleneksel radarlara göre daha iyi bir çözünürlük elde edilmesine imkan verir.

Yapay açıklıklı radarların temel prensibi lineer anten dizilerine dayanmaktadır. Lineer anten dizilerinde, belli aralıklarla sıralanmış antenler aynı anda iletim yaparlar ve aynı anda veri toplarlar Her bir anten arasındaki uzaklığın  $d$  ve dalga boyunun  $\lambda$  olduğu  $N$  elemanlı bir anten dizisinin (Şekil 2.7a) yayılım pateni (2.1) denklemi ile verilir.

$$AF_{phy} = \left( \frac{\sin\left(\frac{Nkd \sin \theta}{2}\right)}{\sin\left(\frac{kd \sin \theta}{2}\right)} \right) \quad (2.9)$$

Fiziksel bir lineer antenin her bir elemanı arasındaki yol farkı

$$\delta = d \sin \theta \quad (2.10)$$

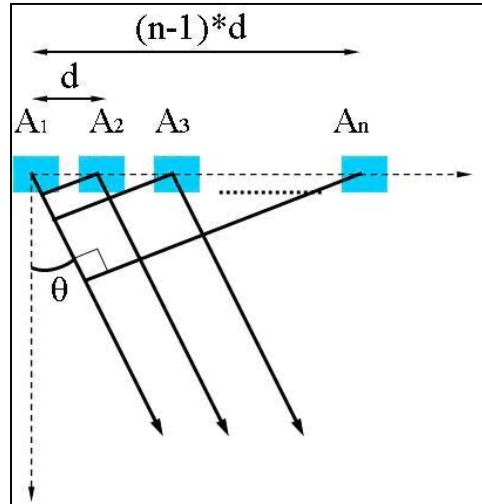
olarak yazılabilir.

Yapay açıklıklı radarlarda genellikle tek bir anten kullanılmaktadır. Bu anten lineer olarak hareket eder ve fiziksel lineer anten dizisindeki her bir anten konumunda ısımaya yapar ve geri yansıyan dalgaları algılar. Bu işlem her bir anten konumu için sıra ile tekrarlanır (Şekil 2.7.b). Bu durumda ardarda iki anten konumu arasında oluşan yol farkı (2.11) denklemi ile verilebilir.

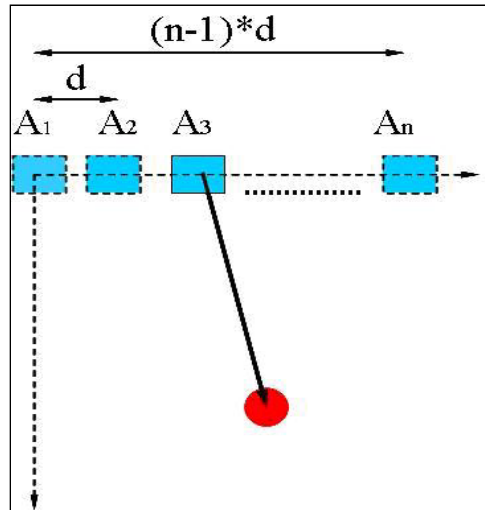
$$\delta = 2d \sin \theta \quad (2.11)$$

Buna bağlı olarak yapay açıklıklı radarlar için yayılım pateni fiziksel anten dizilerinden farklı olarak (2.12) denklemi ile tanımlanır. Şekil 2.8'de fiziksel lineer anten dizileri ile yapay açıklıklı radarlar ait anten faktörlerinin grafikleri yer almaktadır. Denklem 2.12'den ve şekil 2.8'den de görüldüğü gibi yapay açıklıklı radarlarda fiziksel anten

dizilerine göre daha fazla çözünürlük elde edilebilmektedir. Tablo 2.4’de fiziksel doğrusal dizi antenler ile yapay açıklıklı radarların karşılaştırılması yapılmaktadır.



(a)



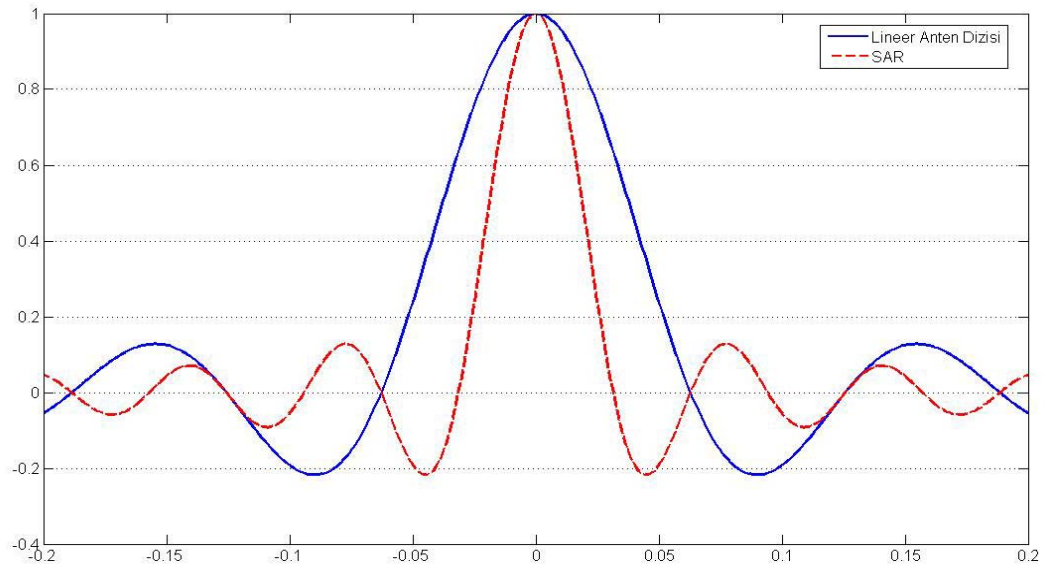
(b)

Şekil 2.7 a) Anten dizisi ve b) Yapay açıklıklı anten prensibi

$$AF_{syn} = \left( \frac{\sin(Nkd \sin \theta)}{\sin(kd \sin \theta)} \right) \quad (2.12)$$

**Tablo 2.4** Fiziksel anten dizileri ile SAR in karşılaştırılması

DOĞRUSAL DİZİ ANTEN	SAR
❖ Belirli sayıda anten kullanılmaktadır	❖ Genellikle tek bir anten ya da anten çifti (alıcı/verici) kullanılmaktadır.
❖ İletilen işaret tüm antende bir kerede oluşturulmaktadır	❖ Her bir anten pozisyonunda tek anten tarafından işaret iletilmektedir.
❖ Geri yansıyan işaret tüm anten açıklığı tarafından algılanmaktadır.	❖ Her bir anten pozisyonunda tek anten tarafından işaret algılanmaktadır.



Şekil 2.8 Fiziksel lineer anten dizileri ile yapay açıklıklı radarlara ait anten faktörleri

### 2.3 Sayısal Modelleme Yöntemi

Karmaşık yapılarda elektromanyetik problemlerin çözümünde analitik çözümler yetersiz kalmakta, bilgisayar teknolojisindeki gelişmeler ile birlikte sayısal çözümlere olan ilgi giderek artmaktadır.

Geçmişte, yer mayını tespit amaçlı kullanılan elektromanyetik algılayıcılar, karmaşık, zaman gerektiren ve pahalı, deneysel testlerle geliştirilmiş ve optimize edilmişlerdir. Deneysel çalışmalara alternatif, teorik yöntemlerle başlangıç teknolojilerini geliştirmektedir. Ancak yüzeyaltı problemleri serbest uzaydaki antenden farklı olarak, algılayıcı, mayın ve yüzeyden oluşan komple bir sistem olarak ele alınması gerektiğinden karmaşık yapılardır. Bu nedenle sayısal yöntemler, esnekliklerinden dolayı bu problemler için en iyi yaklaşımlardır.

Özellikle karmaşık ve homojen olmayan ortamlarda, antenler arasındaki girişim, ortam etkileri ve gürültü gibi etkenlerden dolayı GPR verilerinin elde edilmesi, incelenmesi ve analitik olarak çözümlenmesi oldukça zor olmaktadır. GPR için geliştirilmiş ileri işaret işleme teknikleri, karmaşık ortamlarda yetersiz kalabilmektedir. Bu nedenle FDTD, ışın tarama, integral metotlar (MoM) gibi matematiksel modelleme teknikleri, diğer işaret işleme teknikleri ile birlikte GPR uygulamalarını yorumlamada kullanılabilir bir araç olarak görülmektedir. Bunların içinden FDTD, bilgisayar teknolojisinin de ucuzlaması ile birlikte en tercih edilen yöntem olmuştur. Mevcut bilgisayar teknolojilerindeki gelişmeler ile birlikte bu yöntemlerin kullanımı giderek artmaktadır.

Bu çalışmada C++ ortamında geliştirdiğimiz FDTD tabanlı GrGPR programı kullanıldığından bu yöntemin detayları üzerinde durulacak diğer metotlara değinilmeyecektir.

### **2.3.1 Zaman düzlemi sonlu farklar yöntemi (Finite Difference Time Domain-FDTD)**

İngilizce Finite Difference Time Domain ifadesinin kısaltılması olan FDTD, yani Zaman Düzleminde sonlu Farklar yöntemi, ilk defa 1966 yılında Yee tarafından ortaya atılmıştır. Yaklaşık olarak on sene üzerinde çok az çalışma olmasına rağmen bilgisayar teknolojisindeki gelişmeler ile birlikte, günümüzde hemen her türlü elektromanyetik problemin çözümünde kullanılan bir yöntem haline gelmiştir (Yee, 1966).

Elektromanyetik problemlerin modellenmesinde FDTD yönteminin diğer sayısal yöntemlere göre bazı avantajları bulunmaktadır. Bunlar:

- Green fonksiyonlarının çözümlenmesini gerektirmemesi,
- Elektrik alan ve manyetik alan bileşenlerinin elde edilmesine gerek kalmadan Maxwell denklemlerinin doğrudan kullanılabilmesi,
- Matris yada artan metotları kullanarak açık, kapalı denklemlerle çözülebilmesi,
- Uygulanabilirlik açısından doğru ve güvenilir olması,
- Toplam alan çözümünü vermesi ve hem elektrik hem manyetik alan vektörleri ile çalışabilmesi,
- Genişbant, darbant ve harmonik zaman-düzlemi problemlerine uygulanabilir oluşu,
- Farklı cevapların, saçılma ve/veya yayılan alan, yüzey etkileri, akımlar, güç yoğunluğu vb., modellenmesine imkan vermesi,
- İletken, kayıplı dielektrik ve dispersif manyetik malzemelere uygulanabilirliği,
- Rastgele, iki boyutlu yüzeyaltı geometrilerini, karmaşık malzeme özelliklerini ve detaylı anten tasarımlarını farklı hücre yapıları ile modelleyebilmesi,
- Standart bilgisayar dilleri ile güvenilir bir şekilde kodlanabilmesi ve çeşitli bilgisayar platformlarında geçerli oluşu,
- Elektromanyetik alanların ve dalgaların zaman ve uzay düzlemlerinde görsel olarak gözlemlenmesine imkan vermesi...

olarak sayılabilir (Daniels, 2004). Burada saydıklarımıza daha birçok farklı madde de ilave edilebilir.

### 2.3.1.1 İki boyutlu Maxwell denklemleri

Maxwell denklemleri,

$$\nabla_x \vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}, \quad (2.13a)$$

$$\nabla_x \vec{H} = \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \sigma \vec{E} + \vec{J}, \quad (2.13b)$$

iki boyutlu düzlemde,  $\frac{\partial}{\partial y} \equiv 0$  olduğu varsayımı altında,  $TM_z$  ve  $TE_z$  olmak üzere iki gruba indirgenebilirler.

$TM_z$

$$\frac{\partial H_y}{\partial z} = -J_x - \varepsilon \frac{\partial E_x}{\partial t} + \sigma E_x, \quad (2.14a)$$

$$\frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x} = -\mu \frac{\partial H_y}{\partial t}, \quad (2.14b)$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial x} = J_z + \varepsilon \frac{\partial E_z}{\partial t} + \sigma E_z, \quad (2.14c)$$

$TE_z$

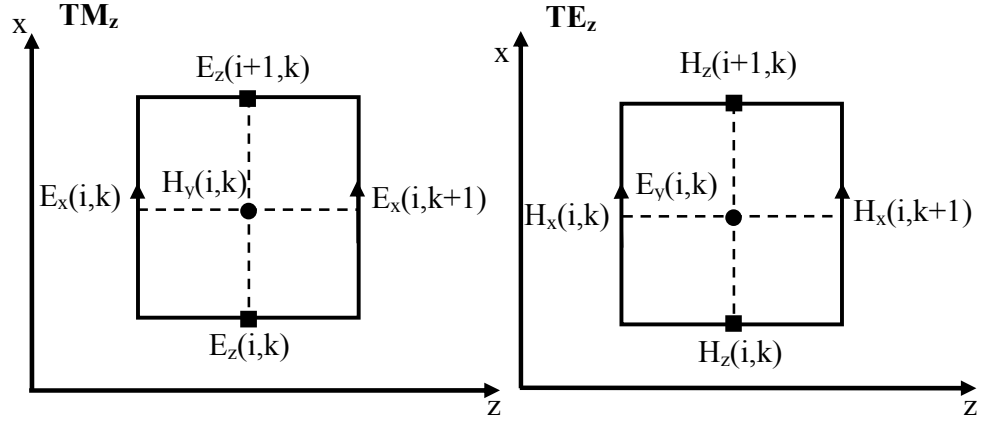
$$\frac{\partial E_y}{\partial z} = \mu \frac{\partial H_x}{\partial t}, \quad (2.15a)$$

$$\frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} = J_y + \varepsilon \frac{\partial E_y}{\partial t} + \sigma E_y, \quad (2.15b)$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial x} = -\mu \frac{\partial H_z}{\partial t}, \quad (2.15c)$$

Denklem gruplarından da görüldüğü gibi,  $TE_z$  modü çözümleri için y-yönünde bir çizgisel kaynak yeterli olmaktadır. Oysa  $TM_z$  modü çözümleri için x- ya da z- yönlü (yada her ikisi) elektrik kaynaklar gerekmektedir. Şekil 2.9'da iki boyutlu FDTD hücrelerini ve alan bileşenlerinin yerleşimlerinin gösterimi yer almaktadır.





Şekil 2.9  $H_x$ ,  $H_z$  ve  $E_y$  bileşenleri için 2-boyutlu FDTD Yee hücresi

### 2.3.1.2 FDTD denklemleri ve alan bileşenleri

İndirgenmiş Maxwell denklemlerindeki kısmi türev operatörlerinin sonlu farklar karşılıkları ile değiştirilip zaman ve konum düzlemlerinde sayısallaştırılması ile ayrık FDTD eşitlikleri elde edilebilir (Yee, 1966).

Sürekli bir  $f(x)$  fonksiyonunun kısmi türevlerinin sayısallaştırılması için kullanılan sonlu farklar, üç ayrı grupta incelenebilir:

- İleri sonlu farklar,
- Geri sonlu farklar,
- Merkezi sonlu farklar.

Sürekli  $f(x)$  fonksiyonunun  $x_0$ 'daki türevi

$$f'(x) = \frac{df}{dx} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{f(x_0 + \Delta x) - f(x_0)}{\Delta x} \quad (2.16)$$

olarak tanımlanmaktadır. (2.16) bağıntısı Taylor serisine açılıp gerekli düzenlemeler yapıldıktan sonra limit operatörü de kaldırıldığında sayısal türev ifadesi

$$f'(x) = \frac{f(x + \Delta x) - f(x)}{\Delta x} + O(\Delta x) \quad (2.17)$$

şeklinde elde edilebilir. Bu ifade İleri Sonlu Farklar olarak adlandırılmaktadır.  $O(\Delta x)$  ifadesi ihmal edilen ve oldukça küçük oldukları varsayılan ifadeleri göstermekte yani yapılan hatayı ifade etmektedir.

Geri Sonlu Farklar ifadesi de aynı yöntemle (2.18)'deki gibi elde edilebilir.

$$f'(x) = \frac{f(x) - f(x - \Delta x)}{\Delta x} + O(\Delta x) \quad (2.18)$$

Merkezi Sonlu farklar yapılan hata miktarını azaltmak için kullanılan üçüncü bir yöntemdir.

$$f'(x) = \frac{f(x + \Delta x) - f(x - \Delta x)}{2\Delta x} + O(\Delta x^2) \quad (2.19)$$

şeklinde ifade edilir. Merkezi farklar denkleminin açılımı

$$f'(x) = \frac{f(x + \frac{1}{2}\Delta x) - f(x - \frac{1}{2}\Delta x)}{\Delta x} + O(\Delta x^2) \quad (2.20)$$

olarak da ifade edilebilmektedir.

(2.20) ifadesinden de görüldüğü gibi Merkezi Sonlu Farklar yönteminde yapılan hata miktarı diğer iki yönetime göre bir derece daha küçüktür.

Sonlu Farklar yöntemi uzun yıllardır bilinmesine rağmen, zaman düzleminde Maxwell denklemlerinin çözümünde kullanılması ilk olarak Kane Yee tarafından 1966 yılında gerçekleştirilmiştir. Böylece, elektromanyetik dalga yayılımını modelleyen

Maxwell denklemlerinin sonlu farklar ile yazılması ve zaman göre türevlerinin sayısallaştırılarak genelleştirilmesi yöntemi FDTD adıyla özel olarak adlandırılmıştır.

Takip eden 2.20 ve 2.21 eşitliklerinde sırası ile  $TE_z$  ve  $TM_z$  modlarına ait alan bileşenlerinin sayısallaştırılmış FDTD ifadeleri yer almaktadır.

$TE_z$  mod eşitlikleri

$$E_y^n(i, k) = \frac{\varepsilon}{\varepsilon + \sigma\Delta t} E_y^{n-1}(i, k) - \frac{\Delta t}{(\varepsilon + \sigma\Delta t)\Delta x} [H_z^{n-1/2}(i+1, k) - H_z^{n-1/2}(i, k)] \\ + \frac{\Delta t}{(\varepsilon + \sigma\Delta t)\Delta z} [H_x^{n-1/2}(i, k+1) - H_x^{n-1/2}(i, k)] \quad (2.21a)$$

$$H_x^{n+1/2}(i, k) = H_x^{n-1/2}(i, k) - \frac{\Delta t}{\mu_0\Delta z} [E_y^n(i, k) - E_y^n(i, k-1)] \quad (2.21b)$$

$$H_z^{n+1/2}(i, k) = H_z^{n-1/2}(i, k) + \frac{\Delta t}{\mu_0\Delta x} [E_y^n(i, k) - E_y^n(i, k-1)] \quad (2.21c)$$

$TM_z$  mod eşitlikleri

$$E_x^n(i, k) = \frac{2\varepsilon - \sigma\Delta t}{2\varepsilon + \sigma\Delta t} E_x^{n-1}(i, k) - \frac{2\Delta t}{(2\varepsilon + \sigma\Delta t)\Delta z} [H_y^{n-1/2}(i, k) - H_y^{n-1/2}(i, k-1)] \quad (2.22a)$$

$$E_z^n(i, k) = \frac{2\varepsilon - \sigma\Delta t}{2\varepsilon + \sigma\Delta t} E_z^{n-1}(i, k) - \frac{2\Delta t}{(2\varepsilon + \sigma\Delta t)\Delta x} [H_y^{n-1/2}(i, k) - H_y^{n-1/2}(i-1, k)] \quad (2.22b)$$

$$H_y^{n+1/2}(i, k) = H_x^{n-1/2}(i, k) - \frac{\Delta t}{\mu_0 \Delta z} [E_x^n(i, k+1) - E_x^n(i, k)] + \frac{\Delta t}{\mu_0 \Delta x} [E_z^n(i+1, k) - E_z^n(i, k)] \quad (2.22c)$$

### 2.2.1.3 Courant kararlılık kriteri

Courant kararlılık kriteri (Taflove, 1995) bağıntısı, zaman ve konum adımları arasında sağlanması gereken ilişkiyi belirler. Courant kararlılık kriteri tek boyutlu FDTD için;

$$c \cdot \Delta t \leq \Delta z ; \quad c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \quad (2.23)$$

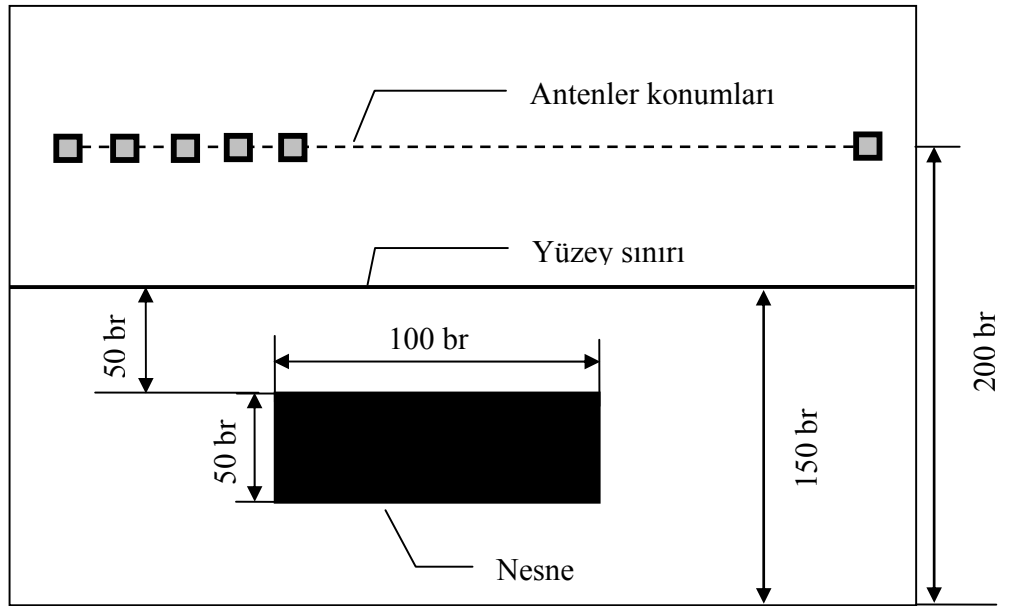
şeklinde tanımlanmaktadır. Bu denklemden birim zaman içinde fiziksel olarak dalganın en fazla bir düğüm kadar ilerlemesi gerektiği anlaşılmaktadır. Homojen olmayan ortamlarda da en kötü hal analizi için ışık hızını kullanmak yeterlidir.

Benzer şekilde 2D-FDTD için de Courant koşulu 2.24 eşitliği verilmektedir. Burada Courant koşulunun sadece kararlılığı sağladığı ancak doğruluğu garanti etmediğini belirtmek gerekmektedir.

$$c \cdot \Delta t \leq \left[ \frac{1}{(\Delta x)^2} + \frac{1}{(\Delta z)^2} \right]^{-1/2} \quad (2.24)$$

### 3 ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Bu bölümde yüzeyaltı görüntülemeye yönelik gerçekleştirilen simülasyonların 2B görüntüleri ve grafiksel sonuçları yer almaktadır. GrGPR programında hücre boyutları (dx,dz) her frekans için farklı değerlere sahip olmaktadır. Çizelge 3.1’de bu değişim görülmektedir. Bu nedenle aynı sayıda hücreden oluşan bir model her frekans için farklı bir senaryoya karşılık gelmektedir.



Şekil 3.1 Farklı çalışma frekanslarının etkisinin test edilebilmesi için oluşturulmuş örnek bir model

Şekil 3.1’de örnek bir senaryo modeli yer almaktadır. Derinliği 150 br (birim) olan bir yüzeyin 50 br altına, 100br x 50br boyutlarındaki PEC nesne yerleştirilmiştir. Alıcı ve verici antenler yüzeyden 50 br yükseklikte yer almaktadır. ‘br’ birim ifadesinin kısaltması

olarak kullanılmıştır ve hücre sayısına karşılık gelmektedir. Bu senaryo farklı frekanslar (30GHz, 3GHz, 300MHz) için çalıştırıldığında farklı senaryoların modellenmesini sağlamaktadır. Farklı frekans uygulamaları için senaryo boyutları Çizelge 3.1’de yer almaktadır. Bu da göstermektedir ki, hücre boyutunda aynı büyüklüğe sahip senaryolar, farklı frekanslar için farklı uygulamalara karşılık gelmektedir. Çizelge 3.1’de yer alan çalışma frekansı 30MHz seçildiğinde, alçaktan uçan bir uçak tarafından geniş bir alanda bulunan büyük boyutlardaki nesnelerin algılanması, örneğin yer altında bulunan sığınakların, yer altı karargahlarının vs. bulunması için kullanılabilecek bir senaryoya karşılık gelmektedir. Çalışma frekansı 30GHz seçildiğinde ise milimetrik boyutlara sahip nesnelerin, örneğin insan vücudunda yer alan milimetrik boyutlardaki tümörlerin tespit edilebilirliğini test etmek için kullanılabilecek bir senaryo modellenmiş olur.

Bu tez çalışmasındaki amaç hangi uygulamanın modellendiğinden çok farklı anten dizilimlerinin ve ortam parametrelerinin görüntü oluşturmadaki etkilerinin incelenmesi olduğundan senaryoların hücre boyutundaki büyüklüklerinden bahsedilmektedir.

Çizelge 3.1 Farklı frekanslara karşılık gelen hücre ve senaryo boyutları

Frekans (MHz)	$\lambda$ (m)	Hücre boyutu dx=dz (m)	Uzaklık (Range) (m)	Yükseklik (Height) (m)	Nesne boyutu (m x m)	Derinlik (m)	Anten yüksekliği (m)
30	10	1	600	300	50 x 100	150	200
300	1	0.1	60	30	5 x 10	15	20
3 000	0.1	0.01	6	3	0.5 x 1	1.5	2
30 000	0.01	0.001	0.6	0.3	0.05 x 0.1	0.15	0.2

Bu tez çalışmasında gerçekleştirilen uygulamalar 5 ayrı kısımdan oluşmaktadır. Bazı bölümler alt bölümlere dallandırılarak incelemeler gerçekleştirilmektedir.

İlk olarak, bölüm 3.1’de yapay açıklı radar prensibinin uygulanmasında kullanılan anten sayısının önemini vurgulamak amacı ile farklı sayılardaki antenler ile gerçekleştirilen uygulamalar yer almaktadır.

3.2 bölümünde geliştirilen görüntü oluşturma algoritmasının etkinliğini gösterebilmek ve farklı anten dizilimlerinin görüntü elde etmedeki verimliliğini incelemek amacı ile farklı geometrik şekillerde yerleştirilen antenler ile elde edilen sentetik verilerden oluşturulan görüntüler karşılaştırılmıştır. Burada amaç görüntü oluşturma algoritmasının test edilmesi olduğundan nesnelere boşlukta kabul edilmektedir. Elde edilen sonuçlar, algoritmanın etkin bir şekilde çalıştığını göstermektedir.

Bölüm 3.3.’de kapalı çevrim anten dizilimlerinin görüntülenecek nesnelere etrafına yakın yada da uzak yerleştirilmesi halinde oluşan görüntülerdeki değişimler araştırılmıştır. Antenler yakın yerleştirildiği takdirde daha düzgün görüntüler elde edildiği görülmektedir.

3.4 bölümünde, homojen/homojen olmayan ortamlarda gömülü olan farklı boyutlardaki PEC/dielektrik nesnelere algılanması incelenmektedir. Homojen olmayan ortamlar için de her iki programında doğru sonuçlar verdiği görülmüştür.

3.5 bölümünde ise yine homojen/homojen olmayan ortamda gömülü farklı dielektrik katsayısına sahip aynı boyuttaki nesnelere algılanma verimliliği incelenmiştir.

### **3.1 Görüntü oluşturmada kullanılacak uygun anten sayısının belirlenmesi**

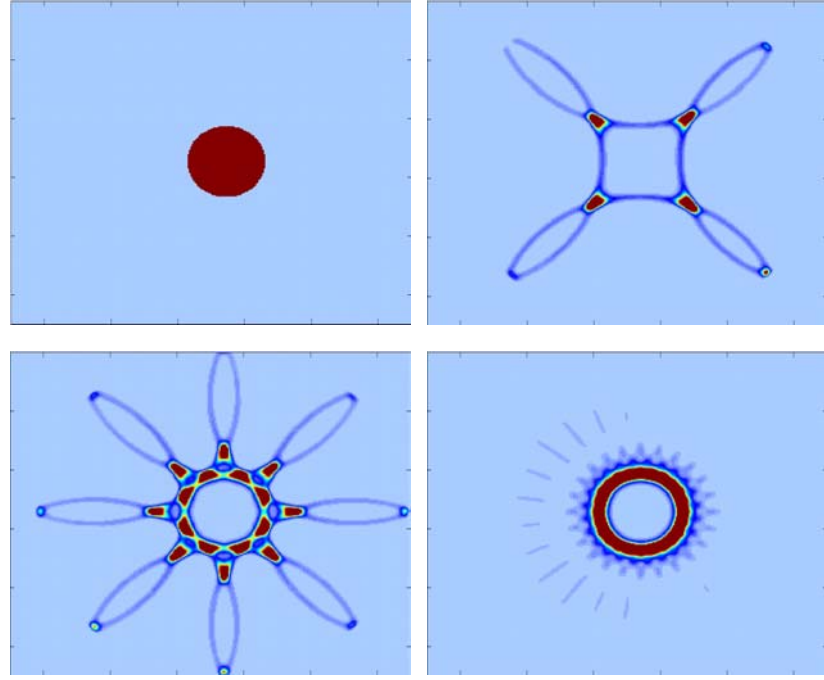
Yapay açıklıklı radar prensibine dayanan görüntü oluşturma algoritması her anten tarafından algılanan verilerin toplanarak sonuç verinin elde edilmesine dayandığından, düzgün bir görüntü oluşabilmesi için kullanılan anten sayısının da uygun bir değer olması

gerekmektedir. Böyle bir değerin olup olmadığını incelemek amacı ile bu bölümde eliptik geometriye sahip PEC bir nesne ele alınmış ve nesnenin etrafına farklı sayılarda (4, 8 ve 24) anten çiftleri yine dairesel kapalı çevrim şeklinde yerleştirilmiştir. Anten çiftleri yapay açıklıklı radar prensibine uygun olarak sıra ile aktif hale getirilerek yapay veriler elde edilmiştir. Elde edilen bu veriler kullandığımız görüntü oluşturma algoritmasına uygulanarak şekil 3.2’de elde edilen görüntüler elde edilmiştir. Şekil 3.2’de nesnenin gerçek görüntüsü (sol-üst) ve sırası ile dört (sağ-üst), sekiz (sol-alt), yirmi dört (sağ-alt) adet anten çifti ile elde edilen görüntüler yer almaktadır.

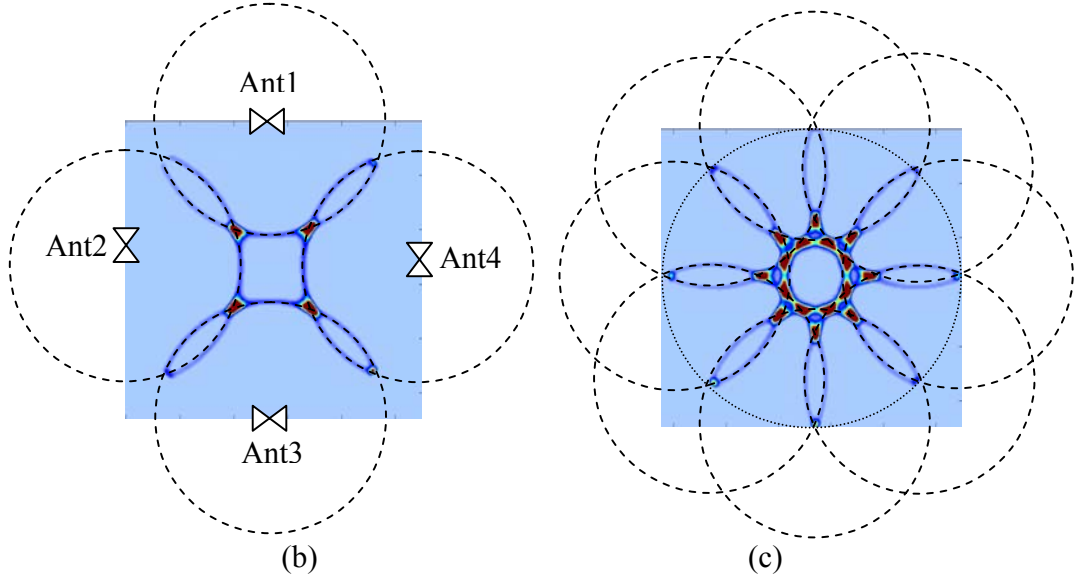
Şekil 3.2 incelendiğinde uygun sayıda anten kullanıldığında -20 ve üzeri- sağ-üst ve sol-alt’ta yer alan görüntülerde yer alan hayalet görüntüler yok olmaktadır. Bu hayalet görüntülerin yok olmasının sebebi, daha fazla anten kullanılması halinde ve bunların süperpozisyonlarının alınması ile nesneden gelen verilerin diğer kesişimler ile oluşan değerlere göre çok daha kuvvetli olmasından kaynaklanmaktadır.

Şekil 3.2b’de Şekil 3.2a’da yer alan 4 anten için elde edilen görüntüler ayrıntılı olarak ele alınmaktadır. Şekil 3.2b’de kesikli çizgi ile gösterilen ve merkezleri anten konumları olan dört daire, dört antenden ayrı ayrı yayılan dalgaların nesne ile bulunduğu andaki konumlarını göstermektedir. Dairelerin kesiştiği noktalarda genliklerin süperpozisyonları alındığı için, kesişim noktalarındaki hücrelerin alan değerleri nesne bulunmayan diğer hücrelere göre daha yüksek olur ve nesnenin görüntüsünün oluşturulmasına imkan verir. Şekil 3.2c’de 8 anten için aynı daireler çizdirilmiştir. Bu şekilde karmaşıklık yaratmamak için antenler gösterilmemiştir. Şekilden nesne yüzeyi üzerindeki kesişim noktalarında artış olduğu görülmektedir. Anten sayısı arttıkça nesne yüzeyine denk gelen hücrelerin genlik değeri, her anten değerinin etkisi ilave edildiğinden artmaktadır. Nesne yüzeyindeki hücrelerdeki genlik değeri arttıkça hayalet görüntüleri belirsizleşmektedir.





(a)



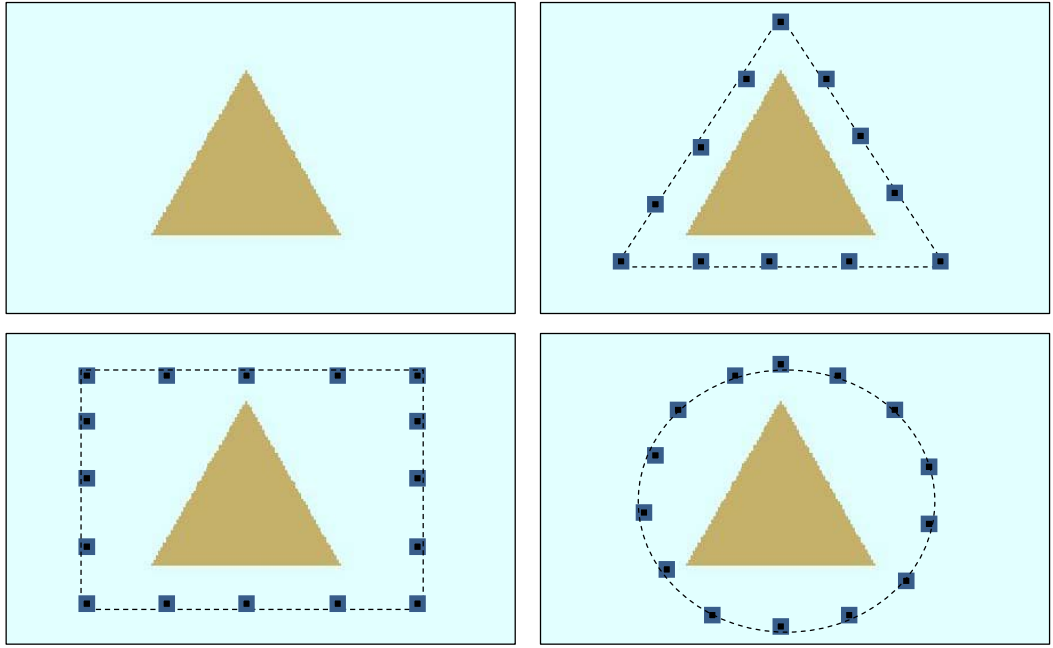
(b)

(c)

Şekil 3.2 Farklı sayılarda antenler kullanılarak elde edilen nesne görüntüleri a) Dairesel kesitli sonsuz uzun bir PEC silindirin gerçek görüntüsü (sol-üst), dört anten çifti ile elde edilen görüntüsü (sağ-üst), sekiz anten çifti ile elde edilen görüntüsü (sol-alt), yirmi dört anten çifti ile elde edilen görüntüsü (sağ-alt), b) dört anten kullanıldığında nesne üzerinde oluşan kesişim noktalarının ve hayalet görüntülerinin gösterimi, c) sekiz anten kullanıldığında nesne üzerinde oluşan kesişim noktalarının ve hayalet görüntülerinin gösterimi

### 3.2 Farklı anten dizimleri ile elde edilen 2B görüntülerin karşılaştırılması

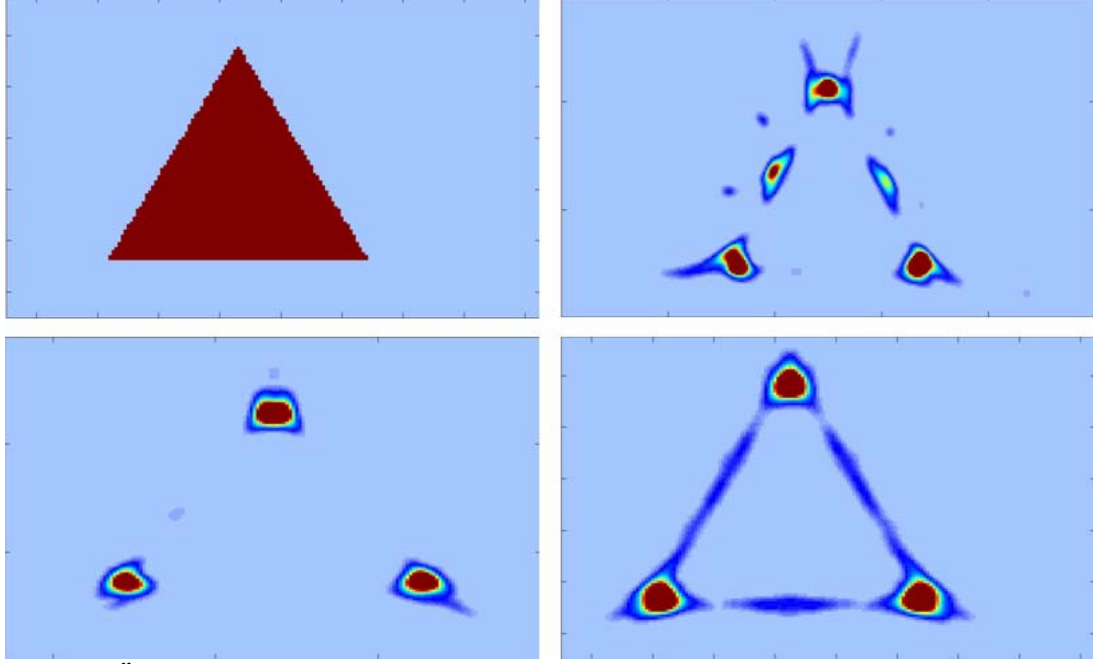
Tez çalışması kapsamında geliştirilen ve tezin birinci kısmını oluşturan GrGPR programı ile antenlerin farklı geometrik şekillerde yerleştirilmesi mümkün olabilmektedir. Şekil 3.3’de üçgen kesitli sonsuz uzun bir PEC nesnenin (sol-üst) etrafına üçgen (sağ-üst), kare (sol-alt) ve dairesel (sağ-alt) anten dizimlerinin gösterimi yer almaktadır.



Şekil 3.3 Üçgen kesitli sonsuz uzun bir PEC nesnenin (sol-üst) etrafına üçgen (sağ-üst), kare (sol-alt) ve dairesel (sağ-alt) kapalı çevrim anten dizimlerinin gösterimi.

Bu bölümde GrGPR ile uygulanabilen anten yerleşimleri ile elde edilen görüntüler karşılaştırılmaktadır. Şekil 3.4’de üçgen kesitli sonsuz uzun bir PEC silindirin gerçek görüntüsü (sol-üst), üçgen anten dizilimi (sağ-üst), dikdörtgen anten dizilimi (sol-alt) ve dairesel dizilim (sağ-alt) ile elde edilen 2B görüntüleri yer almaktadır. Tüm anten dizimleri ile görüntülerin elde edilmesi mümkün olmakla birlikte dairesel dizilimin beklenildiği gibi en verimli olduğu görülmektedir. Bunun nedeni bir önceki bölümde

bahsedildiği gibi kesişim noktalarının etkisinin dairesel dizilimde, üçgen yada kare dizilime göre daha fazla etkin olmasından kaynaklanmaktadır.

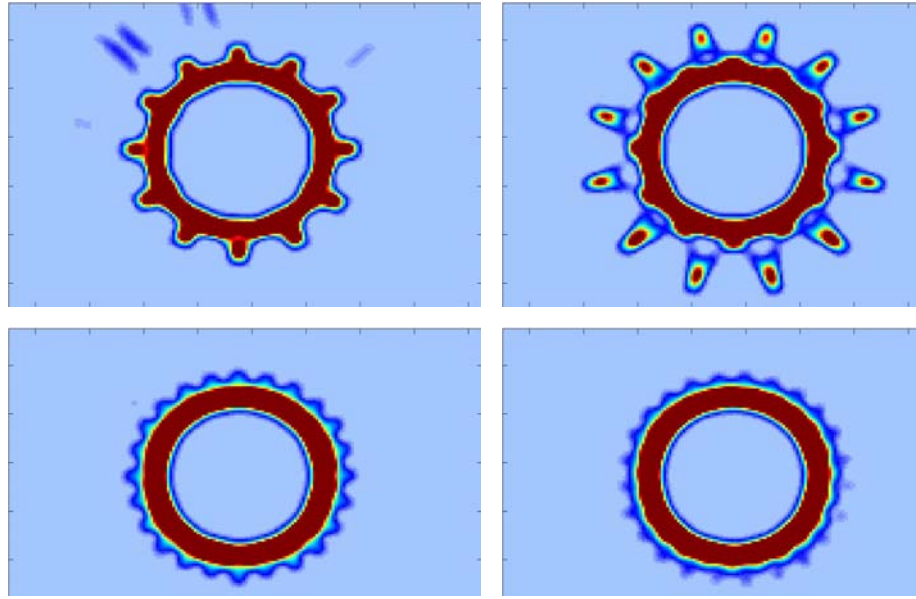


Şekil 3.4 Üçgen kesitli sonsuz uzun bir PEC silindirin gerçek (sol-üst), üçgen anten dizilimi (sağ-üst), dikdörtgen anten dizilimi (sol-alt) ve dairesel dizilim (sağ-alt) ile elde edilen 2B görüntüler.

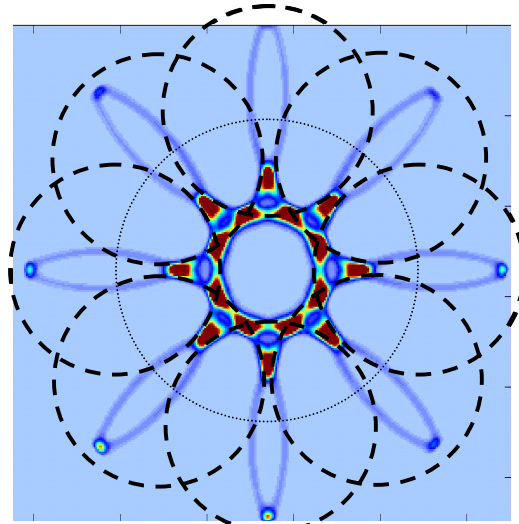
### 3.3. Anten yerleşiminin nesneye yakınlık ve uzaklığının görüntü oluşturma üzerine etkileri

Antenlerin nesnenin etrafına yerleştirilme uzaklıkları da oluşturulan görüntüler üzerinde etkili olmaktadır. Şekil 3.5’de antenlerin görüntülenecek nesneye yakınlığının yada uzaklığının etkisi incelenmektedir.

Şekil 3.5b’de nesneye yakın yerleştirilmiş sekiz anten için, her antenden yayılan dalgaların nesneye temas ettiği andaki görüntüleri görülmektedir. Ortada görülen ince kesikli çizgi antenlerin yerleştirildiği konumları göstermektedir.

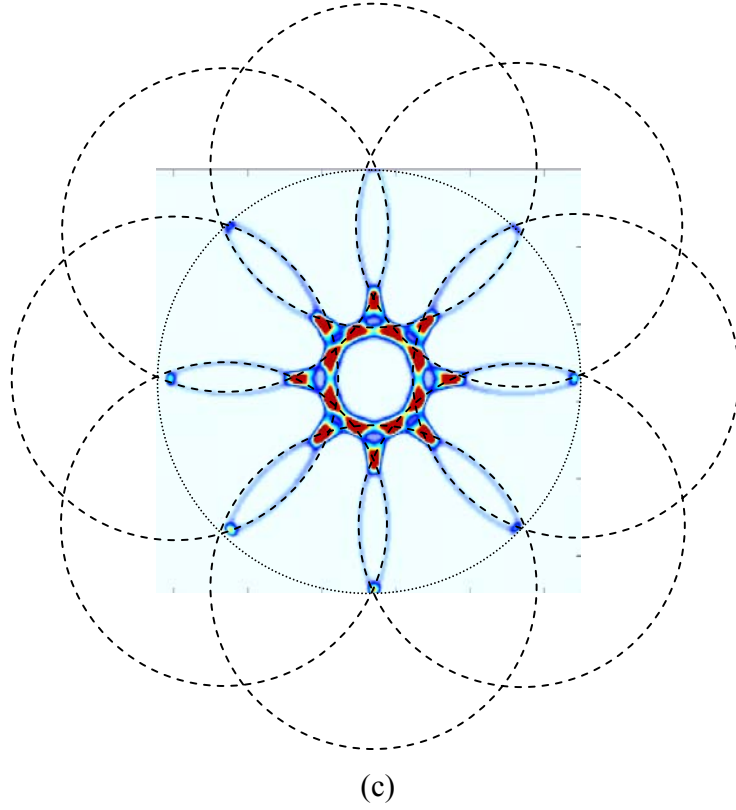


(a)



(b)

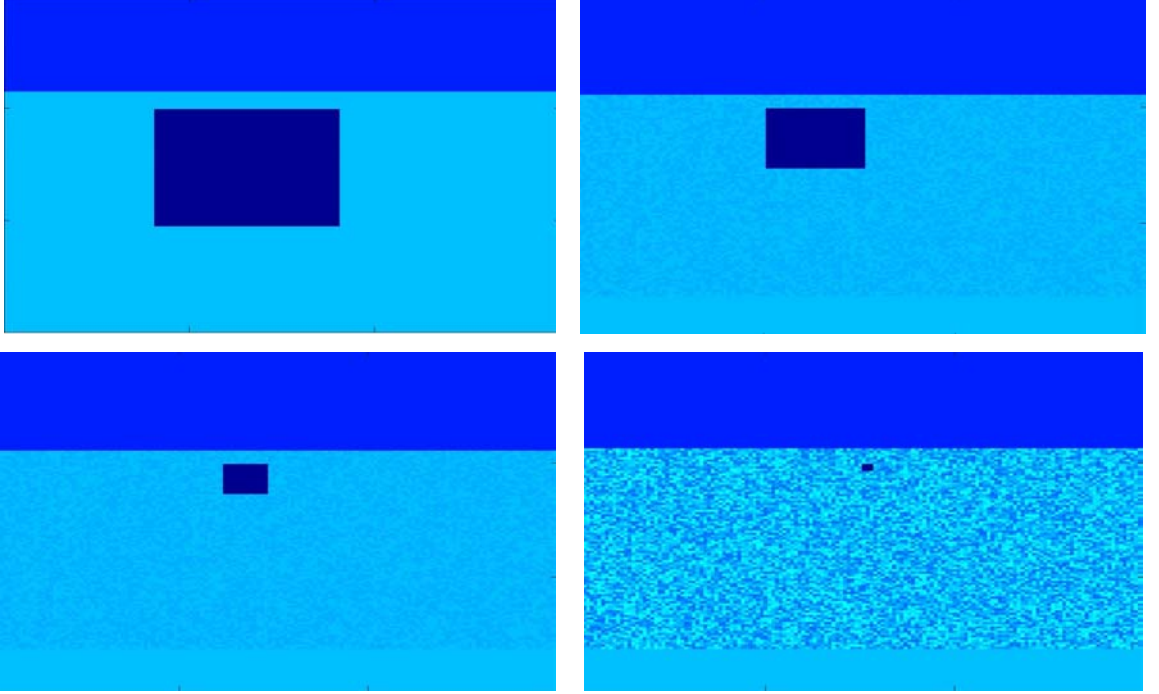
Şekil 3.5 Eliptik geometriye sahip sonsuz uzun PEC silindir nesnenin, nesne yüzeyinden farklı uzaklıklardaki anten dizilimleri ile elde edilen görüntüleri a) 12 (üst sıra) ve 24 (alt-sıra) antenin, nesne çevresine küçük (sol sütun, 165 hücrelik çaplı) ve büyük (sağ sütun, 300 hücrelik çaplı) kapalı yollar boyunca yerleştirilip kapalı çevrim yapay açıklıklı radar tekniğinin uygulanması ile elde edilen görüntüler, b) Sekiz anten için, antenler nesneye yakın olduğunda yayılan dalganın nesneye temas ettiği anların gösterimi.



Şekil 3.5 (devam) Eliptik geometriye sahip sonsuz uzun PEC silindir nesnenin, nesne yüzeyinden farklı uzaklıklardaki anten dizilimleri ile elde edilen görüntüleri, c) uzak olduğunda yayılan dalgaın nesneye temas ettiği anların gösterimi.

### 3.4 Homojen/homojen olmayan ortamlarda gömülü olan farklı boyutlardaki nesnelerin A-Scan ve 2B görüntülerinin karşılaştırılması

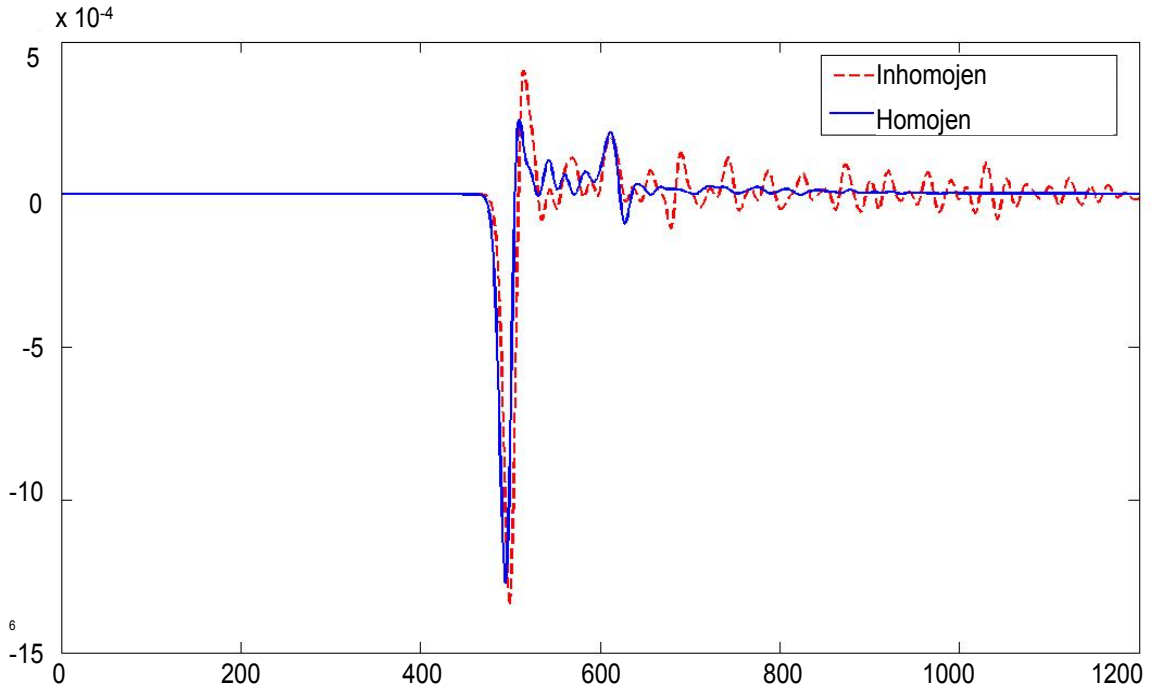
Bu bölümde farklı ortamlarda gömülü olan, farklı elektriksel özelliklere (PEC/dielektrik) ve farklı boyutlara sahip dikdörtgen kesitli sonsuz uzun silindirik nesnelerin iki boyutlu görüntülerinin, geliştirilen görüntü oluşturma algoritma sonucu oluşturulabilirliği incelenmektedir. Dielektrik katsayısı 2 ( $\epsilon_r=2$ ) olan homojen ve/veya dielektrik katsayısı 1.5–2.5 aralığında farklı oranlarda değişen ( $1.5 < \epsilon_r < 2.5$  ya da  $1.9 < \epsilon_r < 2.1$ ) homojen olmayan ortamlarda gömülü olan farklı boyutlarda (50x50, 25x25, 12x12 ve 2x2) PEC yada dielektrik katsayısı ( $\epsilon_r=4$ ) olan dikdörtgen kesitli sonsuz nesneler ele alınmıştır (Şekil 3.6).



Şekil 3.6 Dielektrik katsayısı 2 ( $\epsilon_r=2$ ) olan homojen (sol-üst) ve/veya dielektrik katsayısı 1.5–2.5 aralığında farklı oranlarda değişen ( $1.5<\epsilon_r<2.5$  (sağ-üst ve sol-alt) ya da  $1.9<\epsilon_r<2.1$  (sağ-alt)) homojen olmayan ortamlarda gömülü olan farklı boyutlarda (50x50 (sol-üst), 25x25 (sağ-üst), 12x12 (sol-alt) ve 2x2 (sağ-alt),) dikdörtgen kesitli sonsuz uzun silindirik PEC yada dielektrik katsayısı ( $\epsilon_r=4$ ) olan dielektrik nesnelere oluşan senaryoların gösterimi.

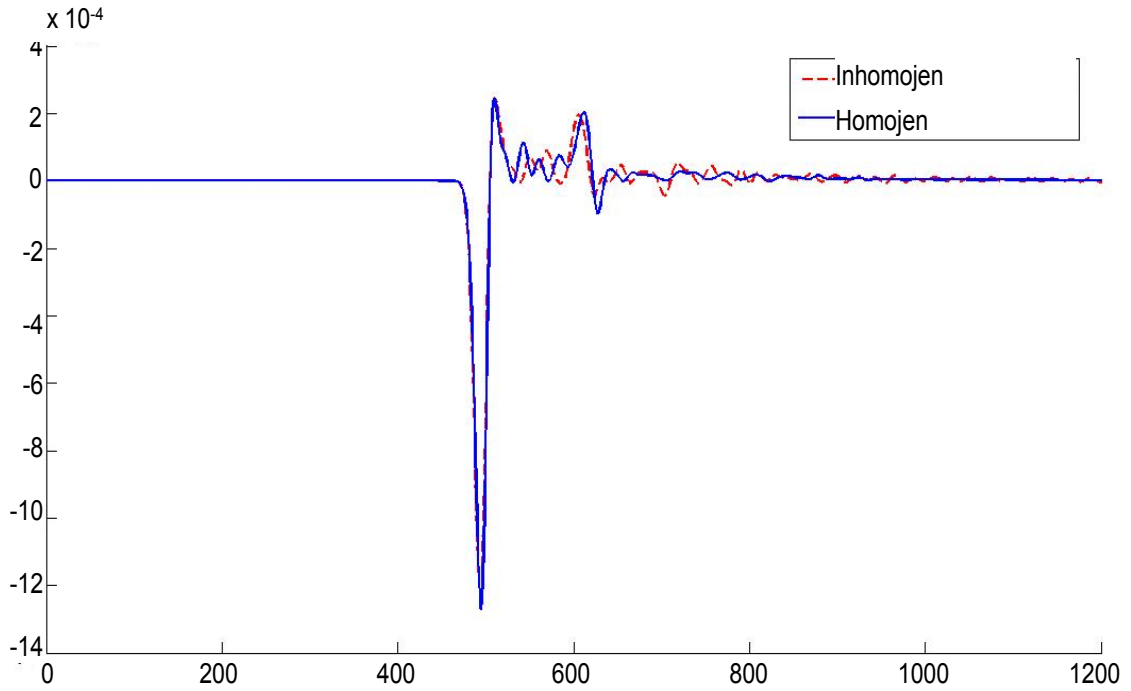
### 3.4.1 Elde edilen verilerin A-Scan gösterimlerinin homojen ve inhomojen ortamlar için karşılaştırılması

Yüzeyaltında gömülü olan nesnelere yansıtılarak alıcıya gelen işaretleri daha önceki bölümlerde de bahsedildiği gibi erken zaman verilerine de sahiptirler. Bunlar, verici ve alıcı antenler arasındaki girişim ve yüzeyden gelen yansımalarıdır. Bu etkiler yüzeyaltında gömülü bir nesne olmadığı durumda elde edilen verilerden ham veriden çıkartılarak ayrıştırılabilir. Homojen ortamlar söz konusu olduğunda nesneden gelen düzgün bir veri algılanırken homojen olmayan ortamlarda zemin karmaşası zaman düzlemindeki A-Scan gösterimlerinde gözlemlenmektedir.



Şekil 3.7 Dielektrik katsayısı 2 olan homojen (düz çizgi) ve 1.5 ve 2.5 arasında değişen inhomojen (kesik çizgili) yüzeylerin altında gömülü olan elips geometriye sahip PEC bir nesneyi tespit etmek için algılanan işaretin zaman düzlemindeki A-Scan gösterimi.

Şekil 3.7’de dielektrik katsayısı 2 olan homojen (düz çizgi) ve 1.5 ve 2.5 arasında değişen inhomojen (kesik çizgili) yüzeylerin altında gömülü olan elips geometriye sahip PEC bir nesneyi tespit etmek için algılanan işaretin zaman düzlemindeki A-Scan gösterimi yer almaktadır. Homojen olmayan ortamdan kaynaklanan zemin karmaşası şekilden açık bir şekilde gözlenebilmektedir. Aynı nesne dielektrik katsayısı 1.9 ve 2.1 arasında değişen bir ortamda gömülü olduğunda elde edilen işaret Şekil 3.8’de yer almaktadır. Zemin karmaşasının ortam inhomojenliği ile doğrudan ilgili olduğu iki şekil karşılaştırıldığında net olarak görülebilmektedir.



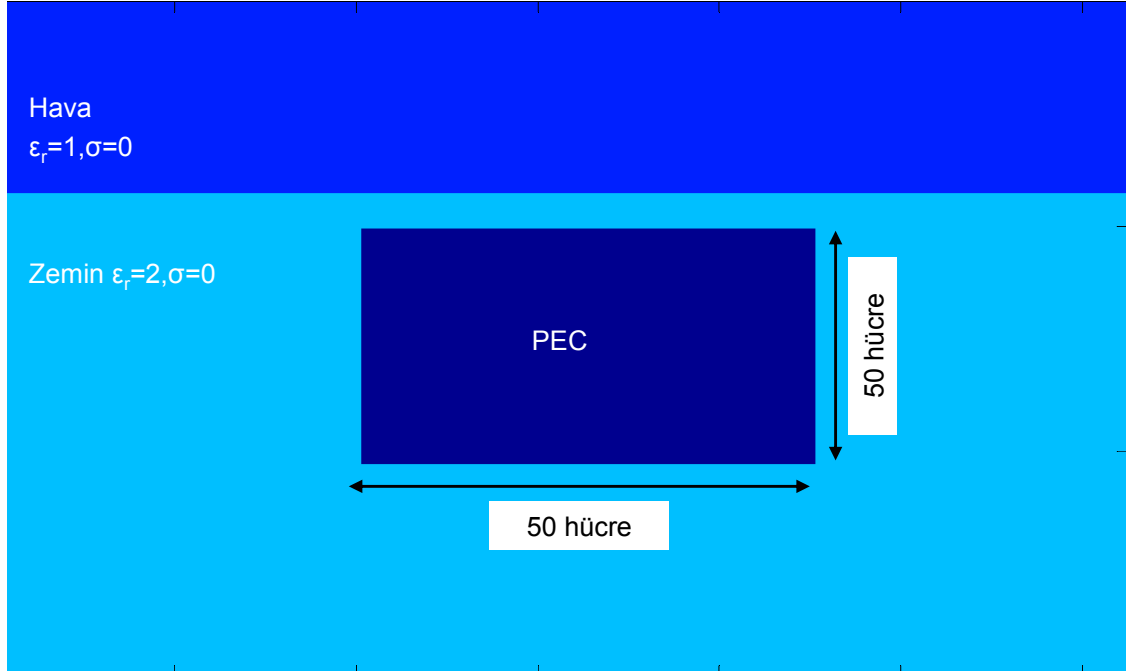
Şekil 3.8 Dielektrik katsayısı 2 olan homojen (düz çizgi) ve 1.9 ve 2.1 arasında değişen inhomojen (kesik çizgili) yüzeylerin altında gömülü olan elips geometriye sahip PEC bir nesneyi tespit etmek için algılanan işaretin zaman düzlemindeki A-Scan gösterimi.

### 3.4.2 Homojen ortamlarda gömülü olan farklı boyutlardaki PEC nesnelerin görüntülerinin karşılaştırılması

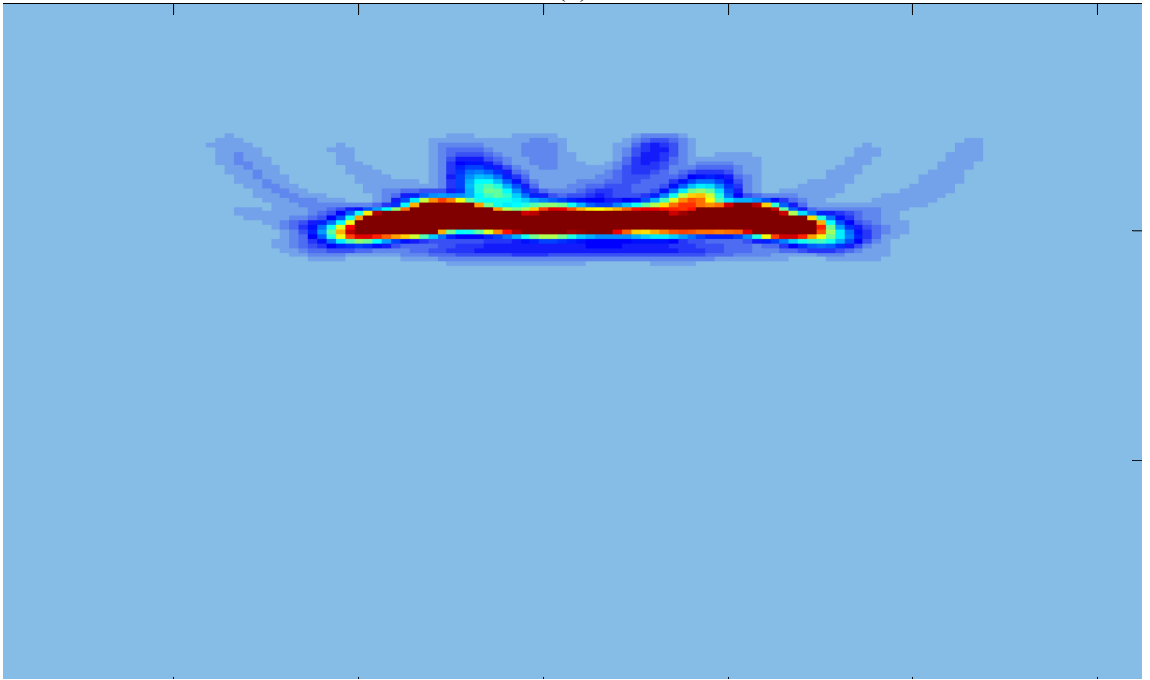
Bu alt bölümde dielektrik katsayısı 2 olan homojen, düz bir zemin altında gömülü olan dikdörtgen kesitli sonsuz uzun silindirik PEC nesnenin, enine kesitte farklı boyutlara sahip olması durumunda elde edilen veriler arasındaki değişimler incelenmektedir.

Şekil 3.9a'da dielektrik katsayısı  $\epsilon_r=2$  olan homojen bir zemin altında gömülü olan  $50 \times 50$  boyutlara sahip PEC bir nesneden oluşan senaryo yer almaktadır. Bu senaryo için elde edilen 2B görüntüler Şekil 3.9b'de verilmektedir. 2B görüntüdeki boyutların nesnenin gerçek boyutları ile uyum içinde olduğunu göstermektedir. A-Scan görüntülerde üç farklı anten için elde edilen değerler Şekil 3.9c'de ayrı ayrı çizdirilmiştir. Antenin nesneden uzak olması halinde algılanan genlikte düşüş grafiklerden görülmektedir.



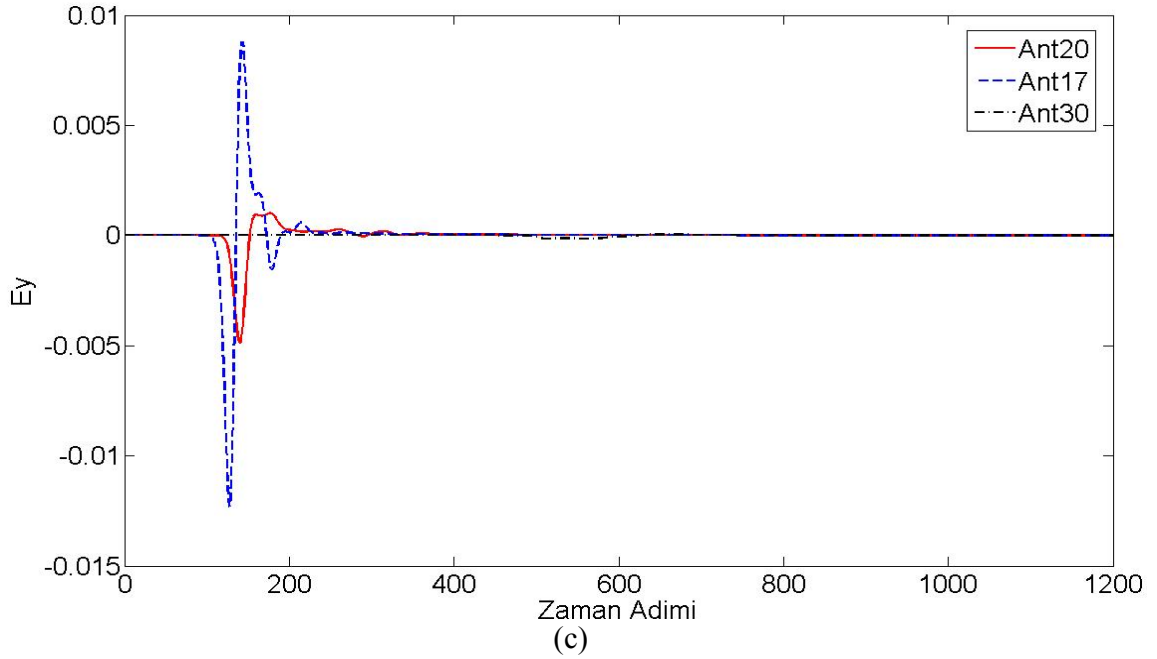


(a)



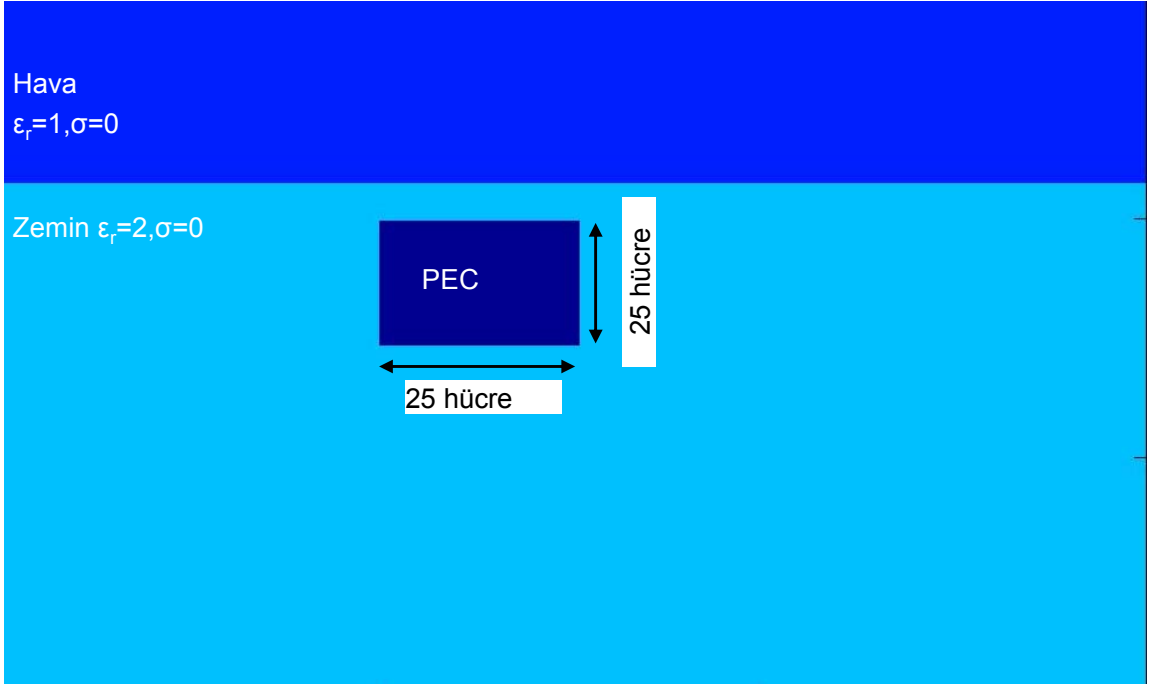
(b)

Şekil 3.9 Dielektrik katsayısı 2 olan homojen, düz bir zemin altında gömülü olan dikdörtgen kesitli sonsuz uzun ve enine kesit boyutu 50x50 olan silindirik PEC nesnenin, a) gerçek görüntüsü, b) 2B görüntüsü.

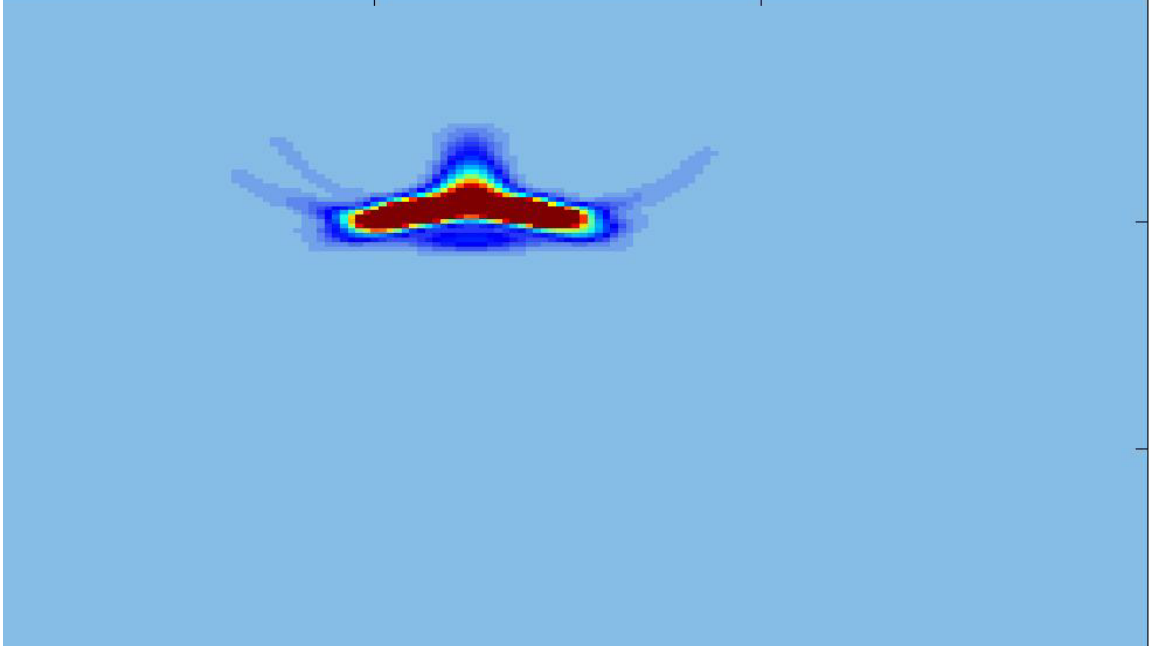


Şekil 3.9 (devam) Dielektrik katsayısı 2 olan homojen, düz bir zemin altında gömülü olan dikdörtgen kesitli sonsuz uzun ve enine kesit boyutu 50x50 olan silindirik PEC nesnenin, c) A-Scan gösterimi.

Şekil 3.10a'da dielektrik katsayısı  $\epsilon_r=2$  olan homojen bir zemin altında gömülü olan 25x25 boyutlara sahip PEC bir nesneden oluşan senaryo yer almaktadır. Bu senaryo için elde edilen 2B görüntüler Şekil 3.10b'de verilmektedir. 2B görüntüdeki boyutların nesnenin gerçek boyutları ile uyum içinde olduğunu göstermektedir. A-Scan görüntülerde üç farklı anten için elde edilen değerler Şekil 3.10c'de ayrı ayrı çizdirilmiştir. Antenin nesneden uzak olması halinde algılanan genlikte düşüş grafiklerden görülmektedir.

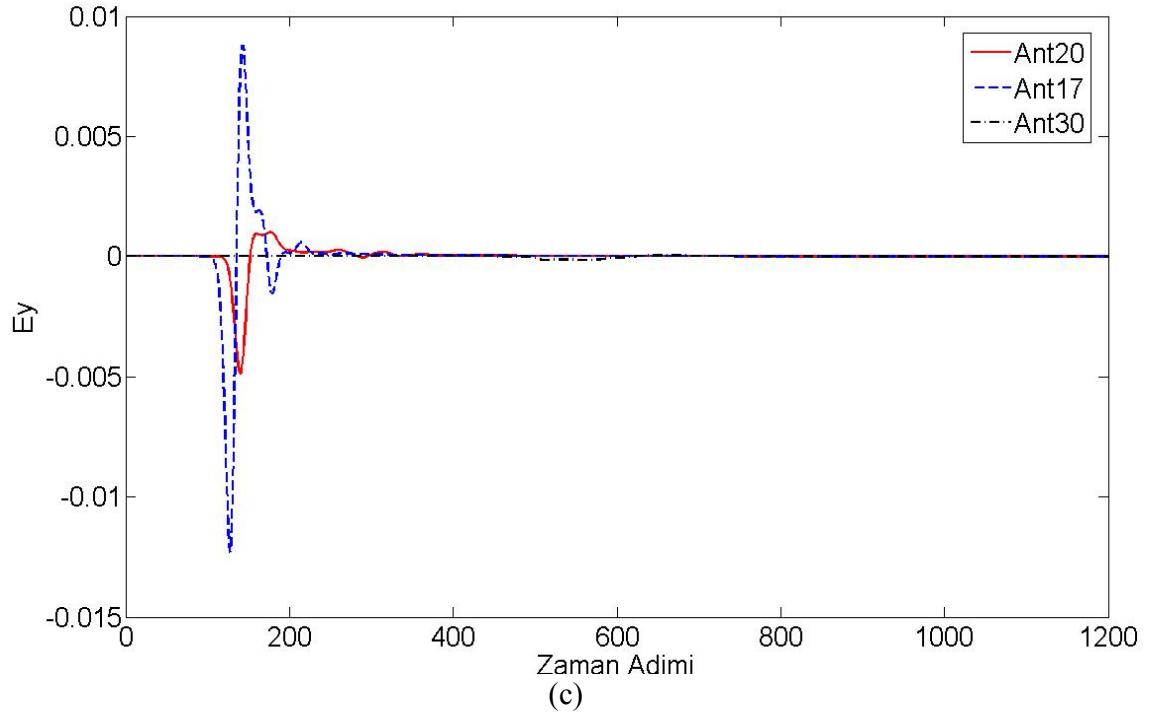


(a)



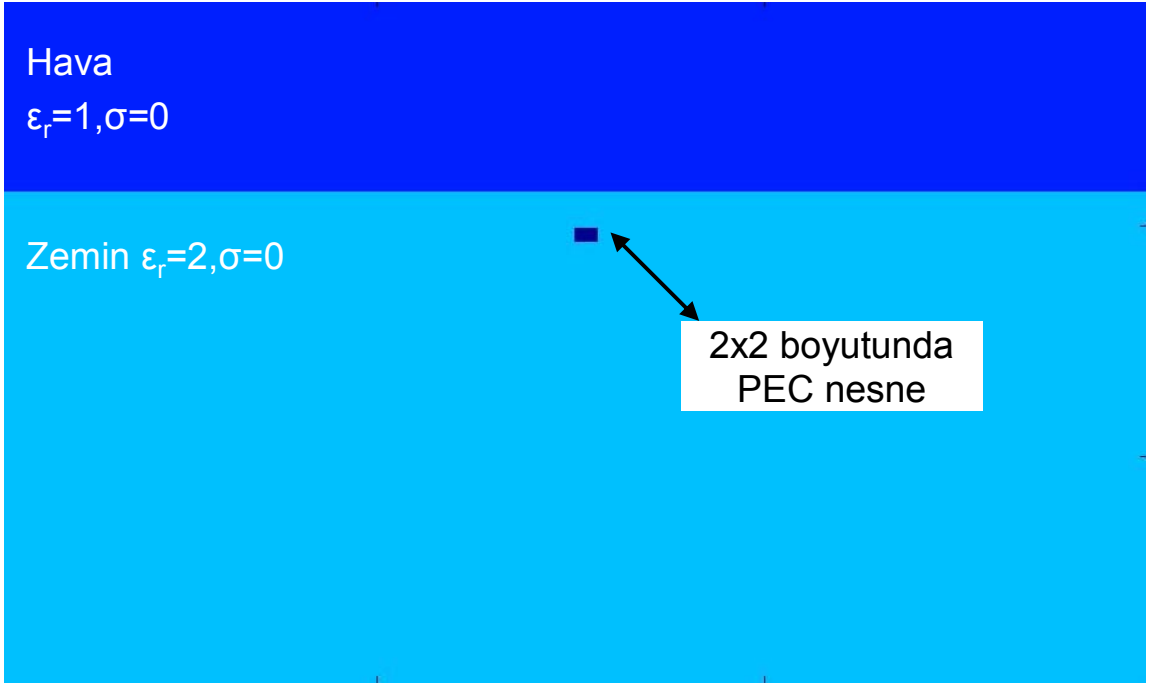
(b)

Şekil 3.10 Dielektrik katsayısı 2 olan homojen, düz bir zemin altında gömülü olan dikdörtgen kesitli sonsuz uzun ve enine kesit boyutu 25x25 olan silindirik PEC nesnenin, a) gerçek görüntüsü, b) 2B görüntüsü

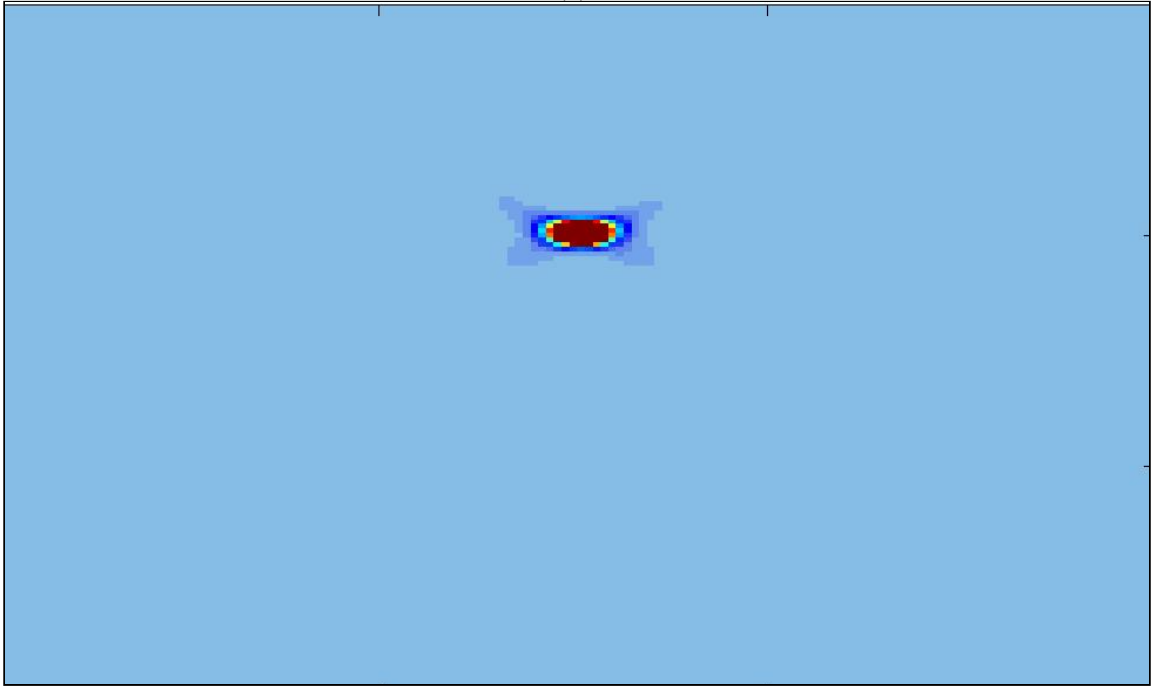


Şekil 3.10 (devam) Dielektrik katsayısı 2 olan homojen, düz bir zemin altında gömülü olan dikdörtgen kesitli sonsuz uzun ve enine kesit boyutu 25x25 olan silindirik PEC nesnenin, c) A-Scan gösterimi.

Şekil 3.11a'da dielektrik katsayısı  $\epsilon_r = 2$  olan homojen bir zemin altında gömülü olan 2x2 boyutlara sahip PEC bir nesneden oluşan senaryo yer almaktadır. Bu senaryo için elde edilen 2B görüntüler Şekil 3.11b'de verilmektedir. 2B görüntüdeki boyutların nesnenin gerçek boyutları ile uyum içinde olduğunu göstermektedir. A-Scan görüntülerde üç farklı anten için elde edilen değerler Şekil 3.11c'de ayrı ayrı çizdirilmiştir. Antenin nesneden uzak olması halinde algılanan genlikte düşüş grafiklerden görülmektedir.

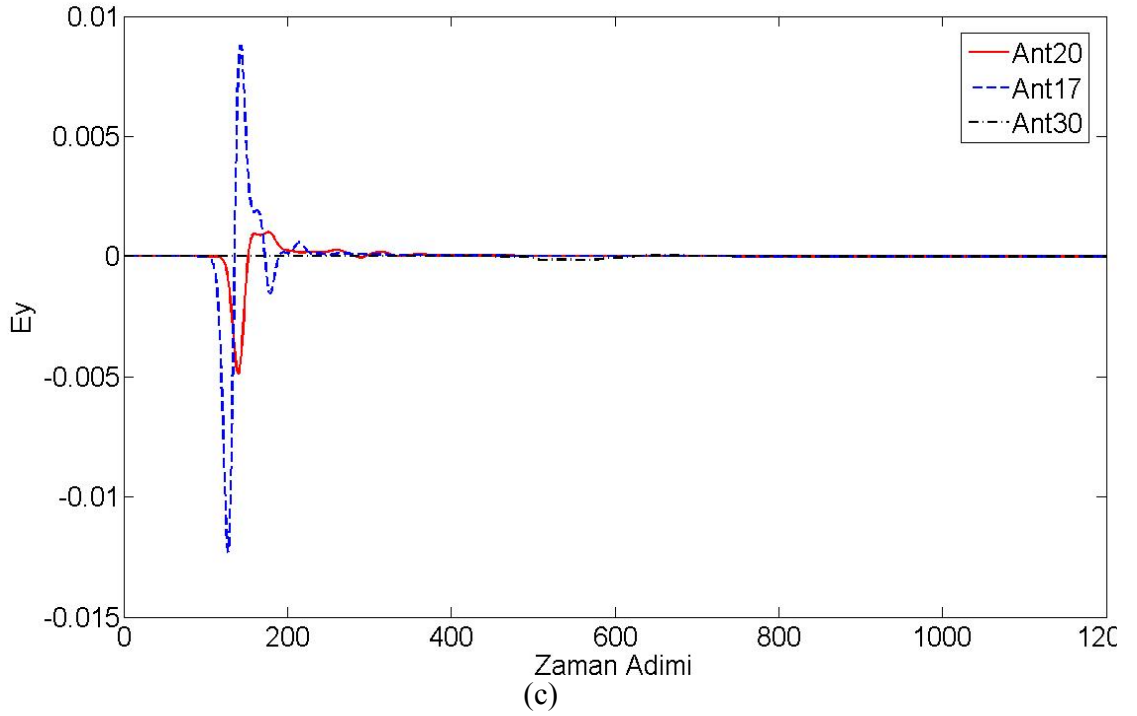


(a)



(b)

Şekil 3.11 Dielektrik katsayısı 2 olan homojen, düz bir zemin altında gömülü olan dikdörtgen kesitli sonsuz uzun ve enine kesit boyutu 2x2 olan silindirik PEC nesnenin, a) gerçek görüntüsü, b) 2B görüntüsü,

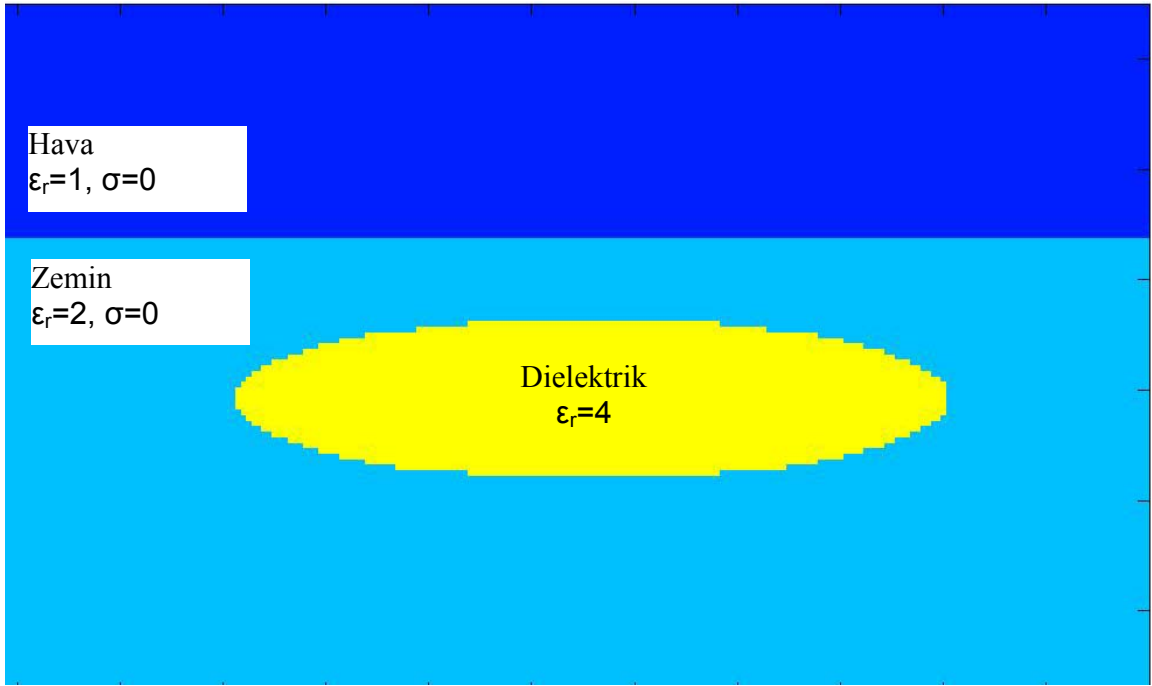


Şekil 3.11 (devam) Dielektrik katsayısı 2 olan homojen, düz bir zemin altında gömülü olan dikdörtgen kesitli sonsuz uzun ve enine kesit boyutu 2x2 olan silindirik PEC nesnenin, c) A-Scan gösterimi.

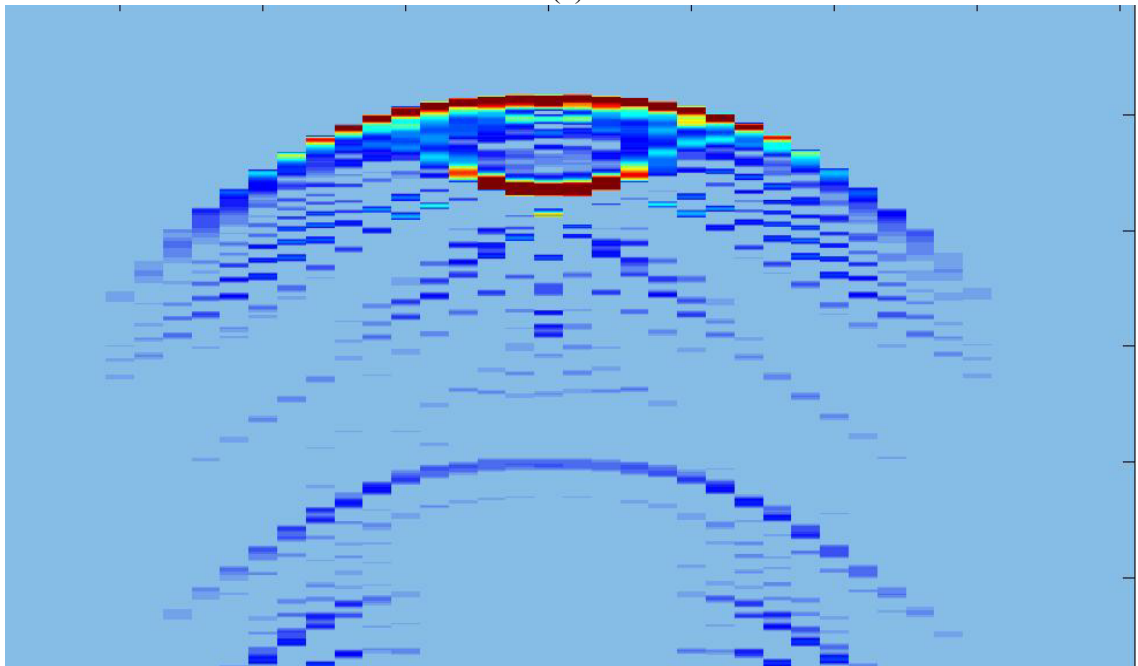
Şekil 3.9, 3.10 ve 3.11’de sırası ile 50x50, 25x25, 2x2 boyutlu nesnelere için elde edilen sonuçlardan 2B görüntülerden nesnenin boyutunun görüntülerin oluşturulmasına bir engel olmadığı görülmektedir.

### 3.4.3 Homojen ortamlarda gömülü olan farklı boyutlardaki dielektrik nesnelere karşılaştırılması

Şekil 3.12’de düşeyde yüksekliği 30, yatayda genişliği 150 hücre ve dielektrik katsayısı 4 olan, elips kesitli sonsuz uzun silindirik nesne ele alınarak farklı metodlarla nesneye ait veriler değerlendirilmiştir. Nesnenin gerçek görüntüsü Şekil 3.12a’da yer almaktadır.

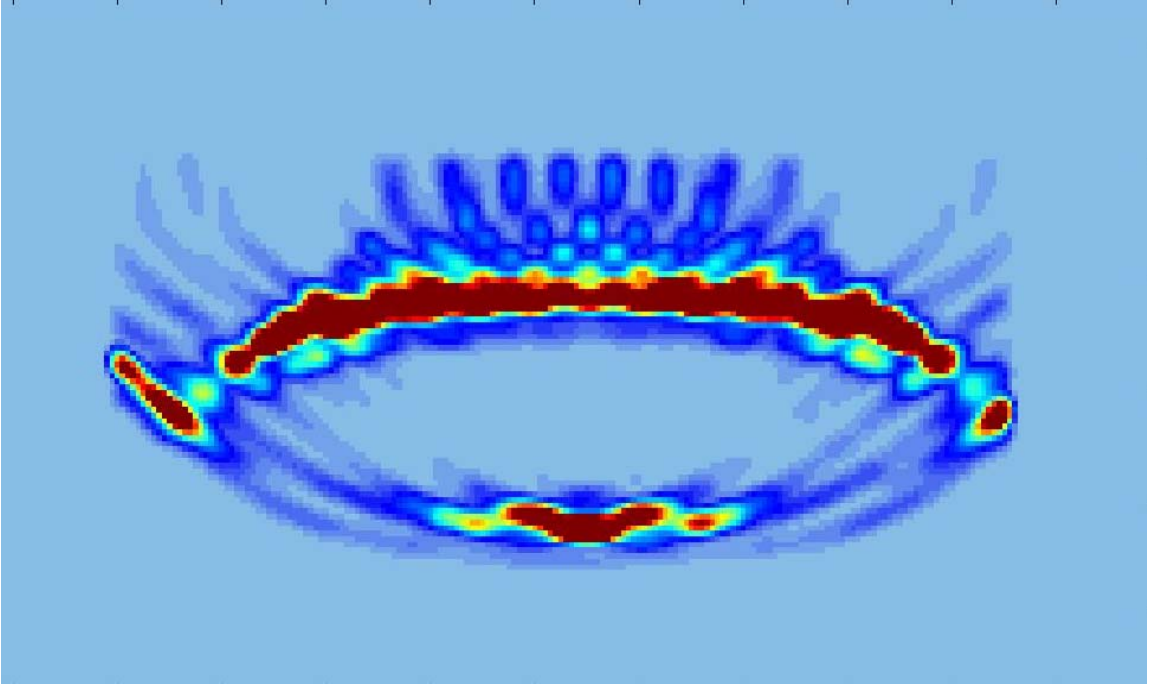


(a)

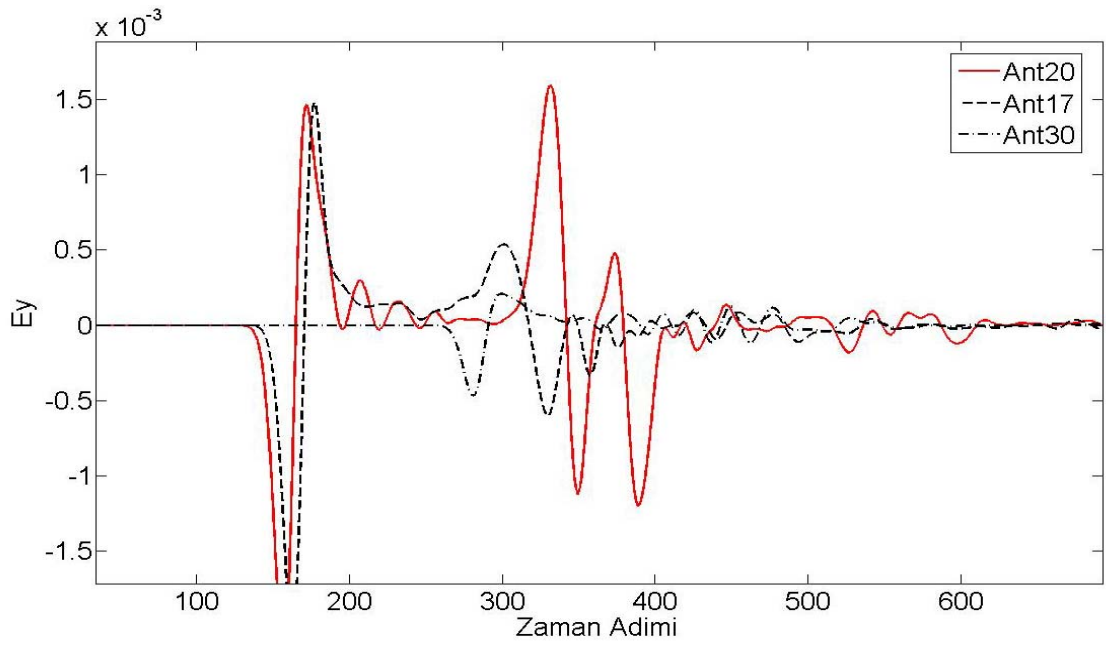


(b)

Şekil 3.12 Düşey yüksekliği 30, yatay genişliği 150 hücre ve dielektrik katsayısı 4 olan, elips kesitli sonsuz uzun silindirik nesnenin (a) gerçek görüntüsü, (b) B-Scan görüntüsü,



(c)



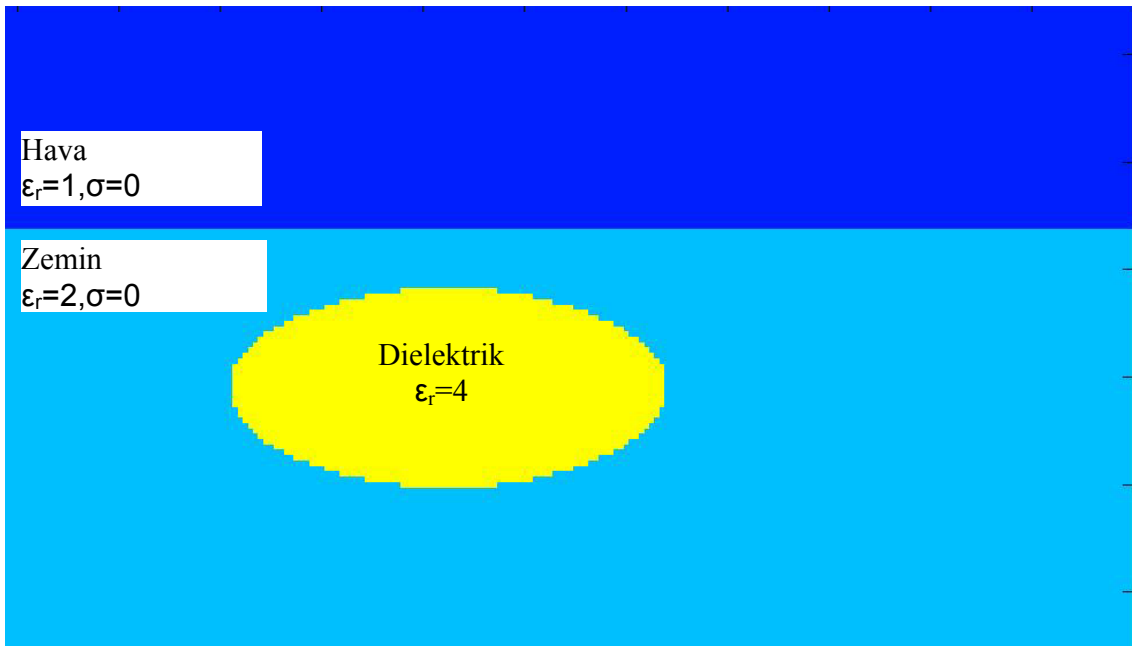
(d)

Şekil 3.12 Düşey yüksekliği 30, yatay genişliği 150 hücre ve dielektrik katsayısı 4 olan, elips kesitli sonsuz uzun silindirik nesnenin, (c) 2B görüntüsü ve (d) üç farklı anten için A-Scan gösterimlerinin karşılaştırılması.



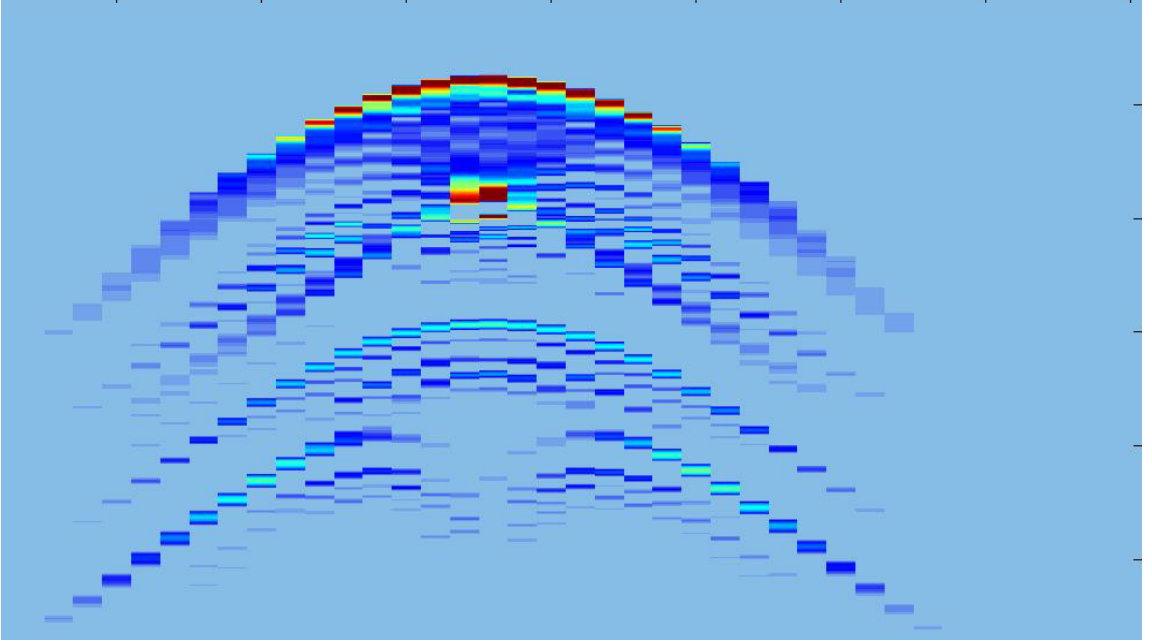
B-Scan ile elde edilen 2B görüntüsü Şekil 3.12b’de görülmektedir. Bu şekilde nesnenin varlığı ayırt edilmesine rağmen nesnenin şekli ve büyüklüğü hakkında bir bilgi edinmek mümkün değildir. Ancak B-Scan verilerin yapay açıklı radar ile işlenerek elde edilen görüntüsünde nesnenin boyutları ve geometrik şekli açık bir şekilde gözlenebilmektedir (Şekil 3.12c). Son olarak B-Scan ve dolayısı ile 2B görüntüyü elde etmek için kullanılan zaman düzlemi verilerin üç farklı anten için A-Scan gösterimleri Şekil 3.12d’de görülmektedir.

Şekil 3.12’de elde edilen sonuçlar düşeyde yüksekliği 30, yatayda genişliği 80 hücre ve dielektrik katsayısı 4 olan, elips kesitli sonsuz uzun silindirik nesne için tekrarlanmıştır (Şekil 3.13a).

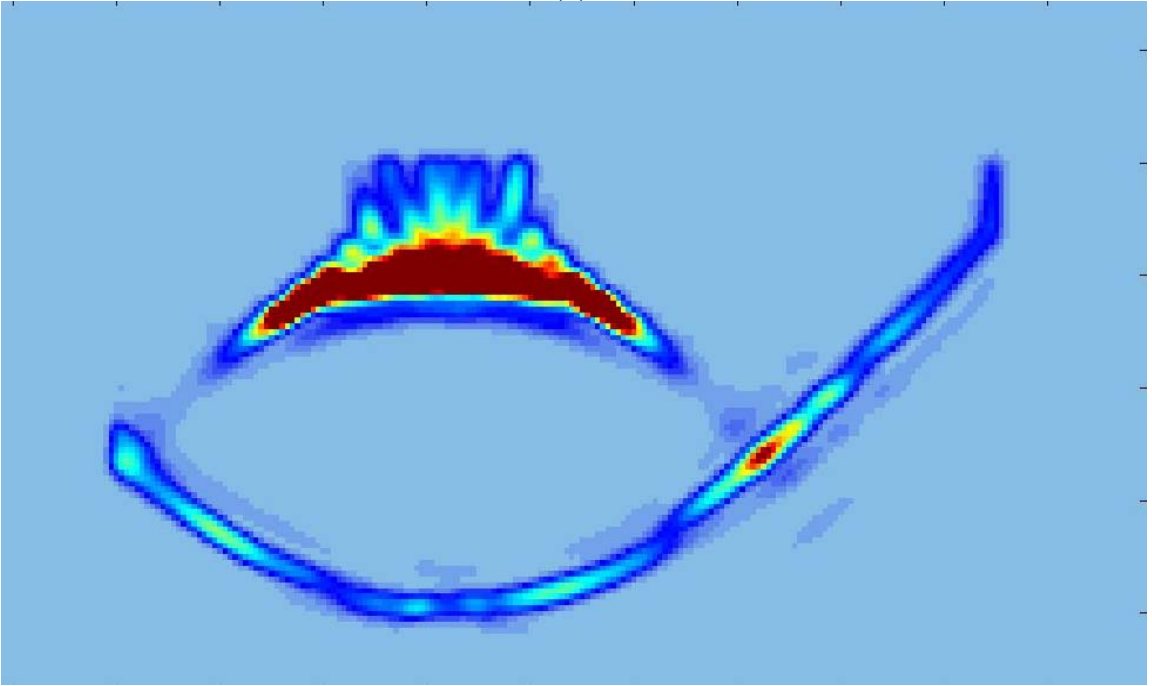


(a)

Şekil 3.13 Düşey yüksekliği 30, yatay genişliği 80 hücre ve dielektrik katsayısı 4 olan ve elips kesitli sonsuz uzun silindirik nesnenin (a) gerçek görüntüsü.

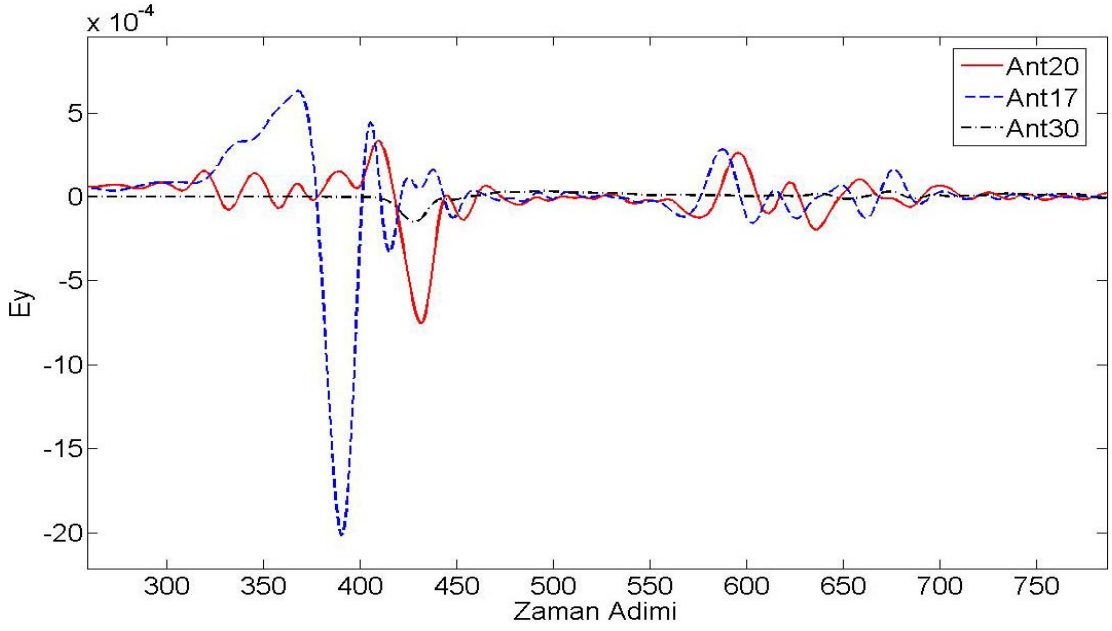


(b)



(c)

Şekil 3.13 (devam) Düşey yüksekliği 30, yatay genişliği 80 hücre ve dielektrik katsayısı 4 olan ve elips kesitli sonsuz uzun silindirik nesnenin, (b) B-Scan görüntüsü, (c) 2B görüntüsü.



(d)

Şekil 3.13 (devam) Düşey yüksekliği 30, yatay genişliği 80 hücre ve dielektrik katsayısı 4 olan ve elips kesitli sonsuz uzun silindirik nesnenin, (d) üç farklı anten için A-Scan gösterimlerinin karşılaştırılması.

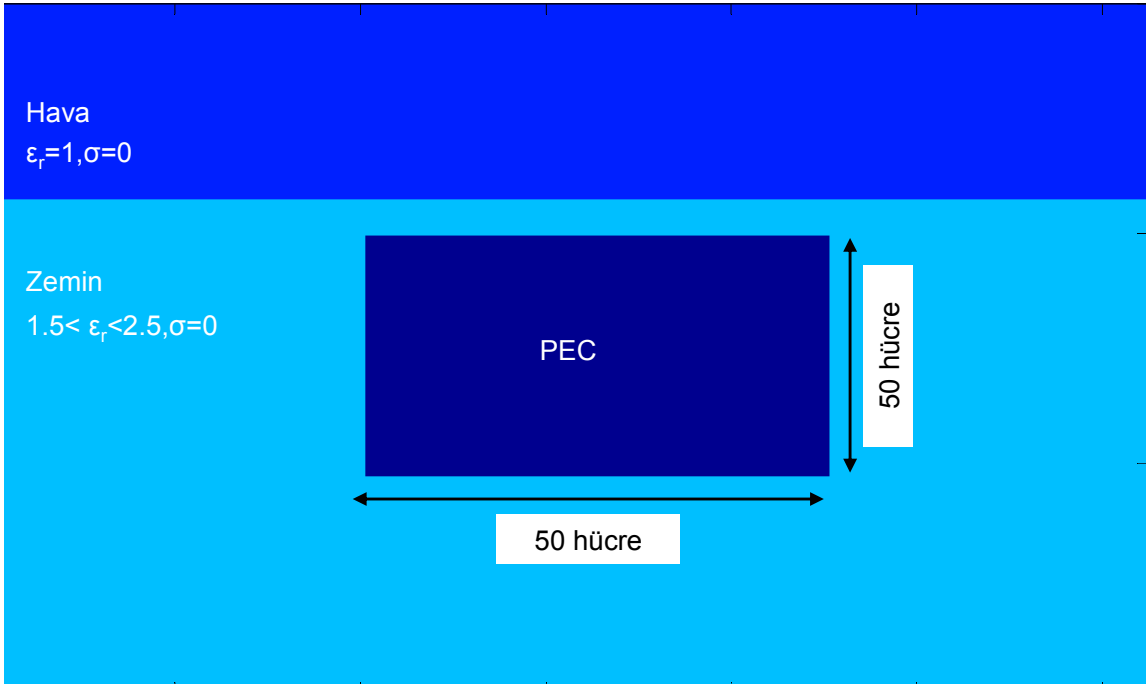
B-Scan ile elde edilen 2B görüntüsü Şekil 3.13b'de görülmektedir. Bu şekilde nesnenin varlığı ayırt edilmesine rağmen nesnenin şekli ve büyüklüğü hakkında bir bilgi edinmek mümkün değildir. Ancak B-Scan verilerin yapay açıklı radar ile işlenerek elde edilen görüntüsünde nesnenin boyutları ve geometrik şekli açık bir şekilde gözlenebilmektedir (Şekil 3.13c). Son olarak B-Scan ve dolayısı ile 2B görüntüyü elde etmek için kullanılan zaman düzlemi verilerin üç farklı anten için A-Scan gösterimleri Şekil 3.13d'de görülmektedir.

Şekil 3.12 ve Şekil 3.13'den görüldüğü gibi PEC nesnelere olduğu gibi dielektrik nesnelere için de farklı boyutlardaki nesnelere görüntüleri gerçek görüntüleri ile uyum göstermektedir.

### 3.4.4 Homojen olmayan ortamlarda gömülü olan farklı boyutlardaki PEC nesnelerin gerçek boyutları ve B-Scan gösterimlerinin elde edilen görüntüler ile karşılaştırılması

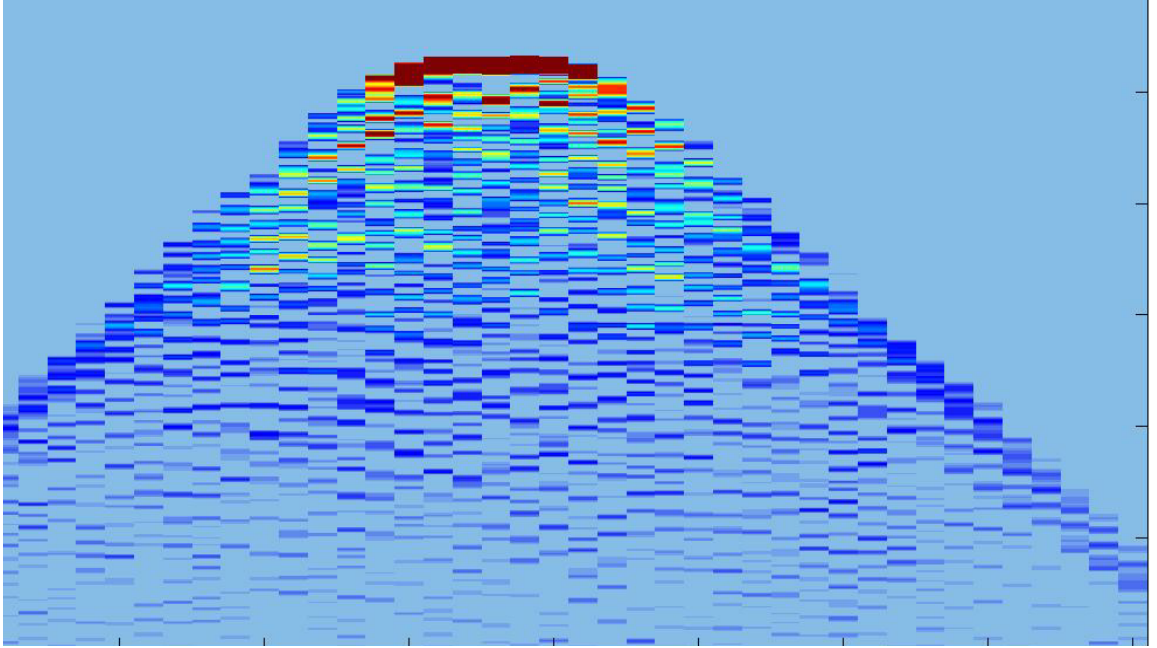
Bölüm 3.3.1’de dielektrik katsayısı 2 olan homojen, düz bir zemin altında gömülü olan dikdörtgen kesitli sonsuz uzun silindirik PEC nesnenin, enine kesitte farklı boyutlara (50x50, 25x25 hücre) sahip olması durumunda elde edilen veriler arasındaki değişimler incelenmiştir. Bu bölümde ise aynı nesnelerin dielektrik katsayısı 1.5-2.5 arasında değişen homojen olmayan, düz bir zemin altında gömülü olması halinde elde edilen sonuçlar incelenmektedir.

50x50 boyutlarındaki PEC nesnenin gerçek görüntüsü Şekil 3.14a’da, B-Scan görüntüsü 3.14b’de ve işlenerek elde edilmiş 2B görüntüsü Şekil 3.14c’de yer almaktadır. 25x25 boyutlarındaki PEC nesnenin gerçek görüntüsü Şekil 3.15a’da, B-Scan görüntüsü 3.15b’de ve işlenerek elde edilmiş 2B görüntüsü Şekil 3.15c’de yer almaktadır.

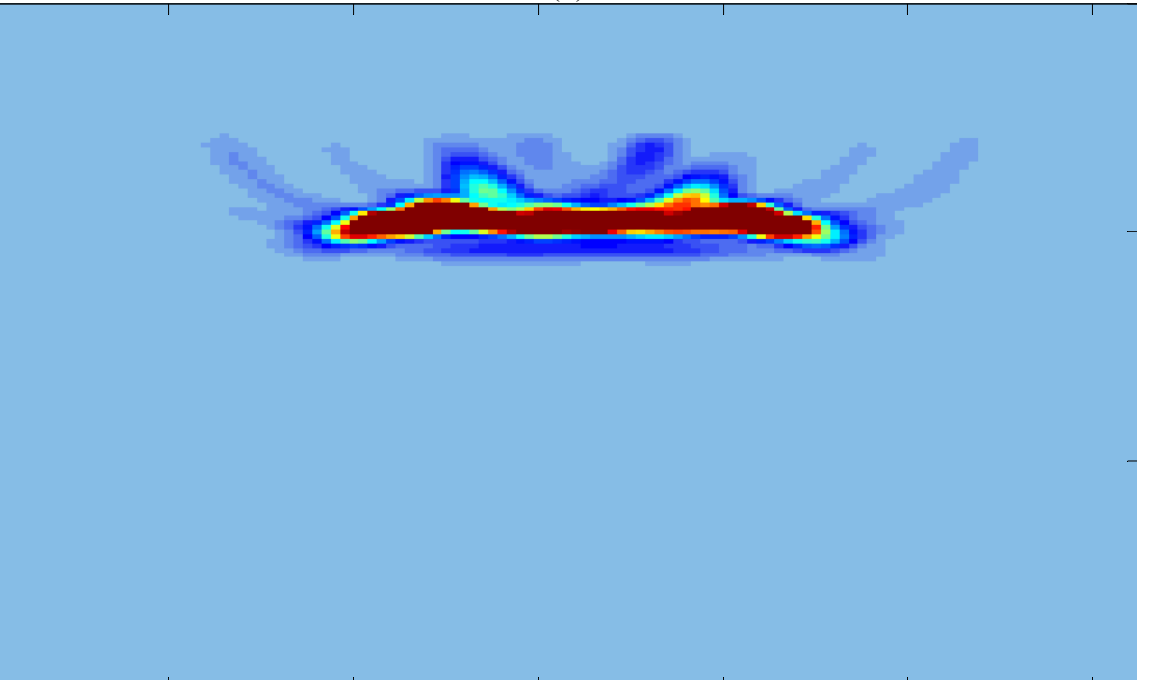


(a)

Şekil 3.14 Dielektrik katsayısı 1.5-2.5 arasında değişen homojen olmayan, düz bir zemin altında gömülü olan dikdörtgen kesitli sonsuz uzun ve enine kesit boyutu 50x50 olan silindirik PEC nesnenin, a) gerçek görüntüsü

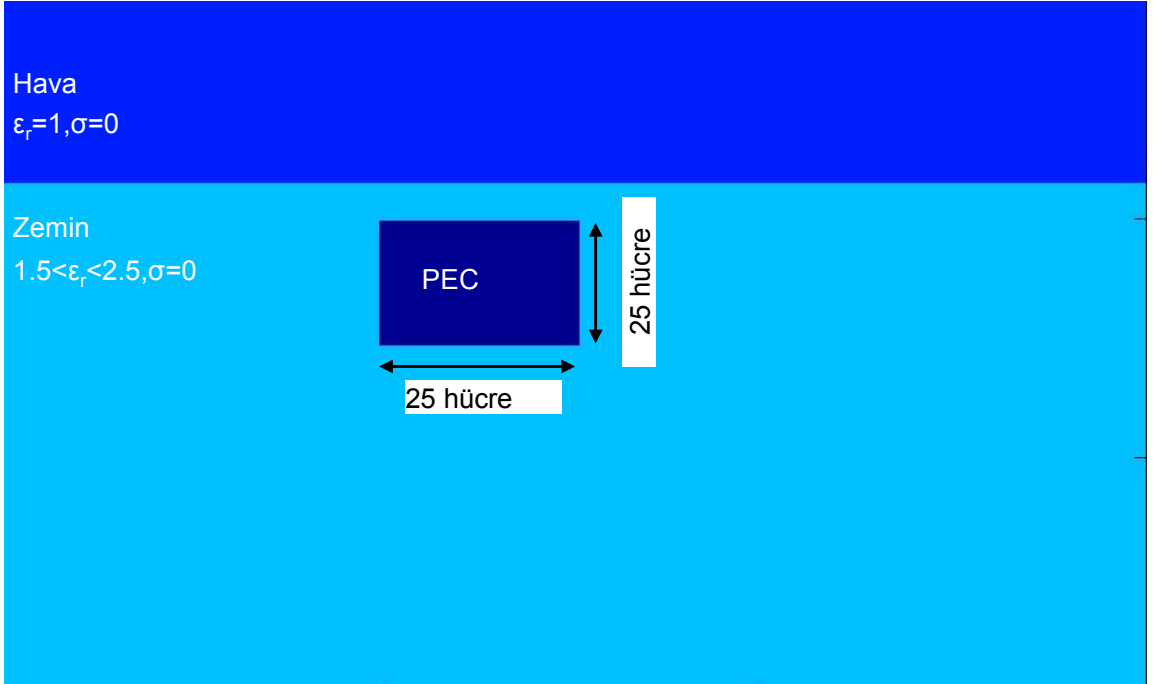


(b)

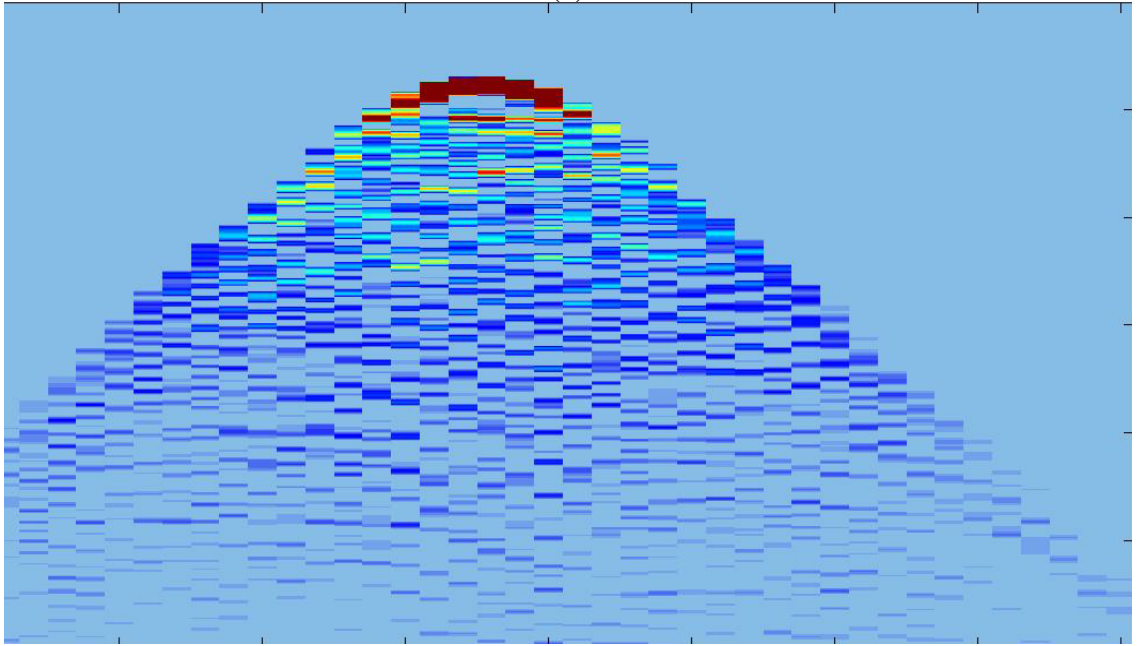


(c)

Şekil 3.14 (devam) Dielektrik katsayısı 1.5-2.5 arasında değişen homojen olmayan, düz bir zemin altında gömülü olan dikdörtgen kesitli sonsuz uzun ve enine kesit boyutu 50x50 olan silindirik PEC nesnenin, b) B-Scan gösterimi, c) 2B görüntüsü.

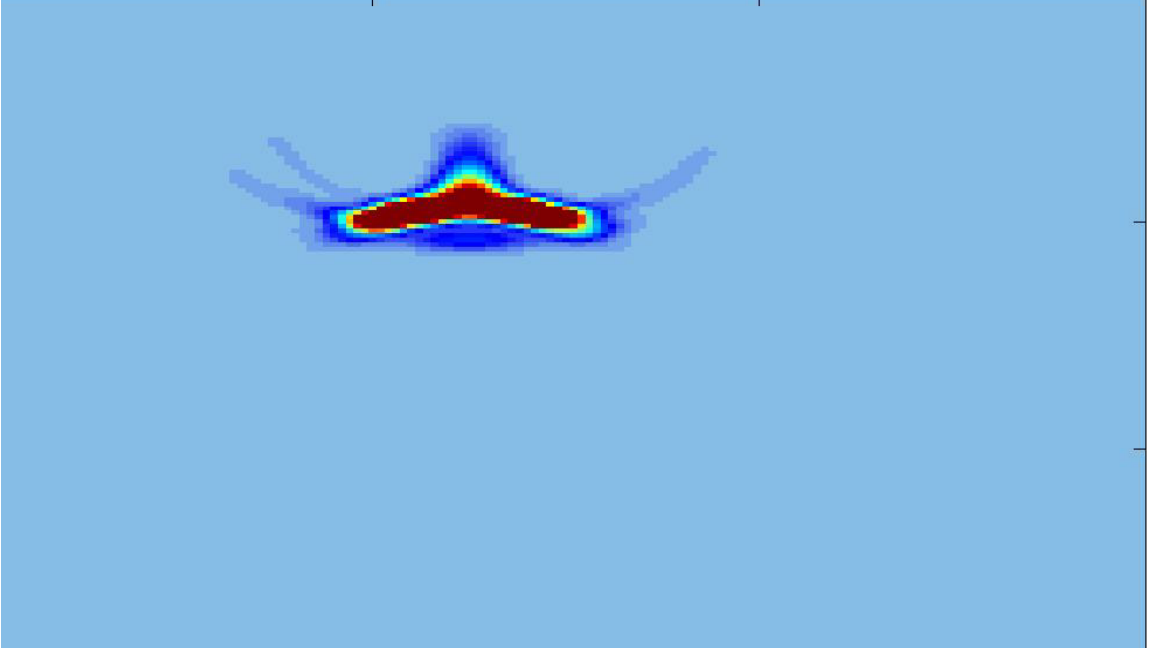


(a)



(b)

Şekil 3.15 (devam) Dielektrik katsayısı 1.5-2.5 arasında değişen homojen olmayan, düz bir zemin altında gömülü olan dikdörtgen kesitli sonsuz uzun ve enine kesit boyutu 25x25 olan silindirik PEC nesnenin, a) gerçek görüntüsü

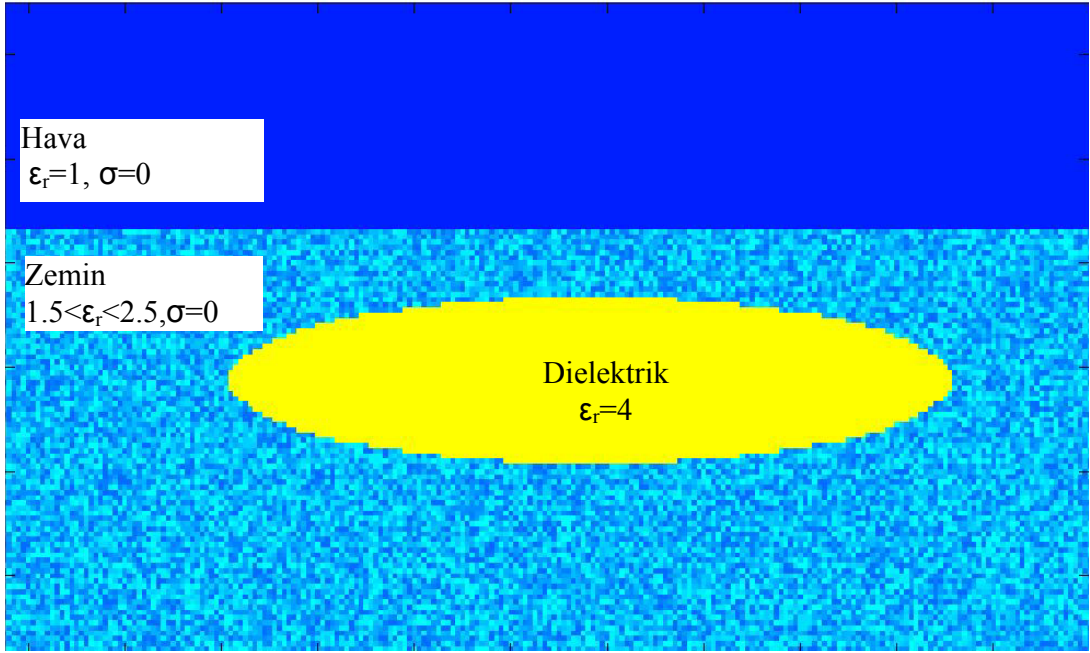


(c)

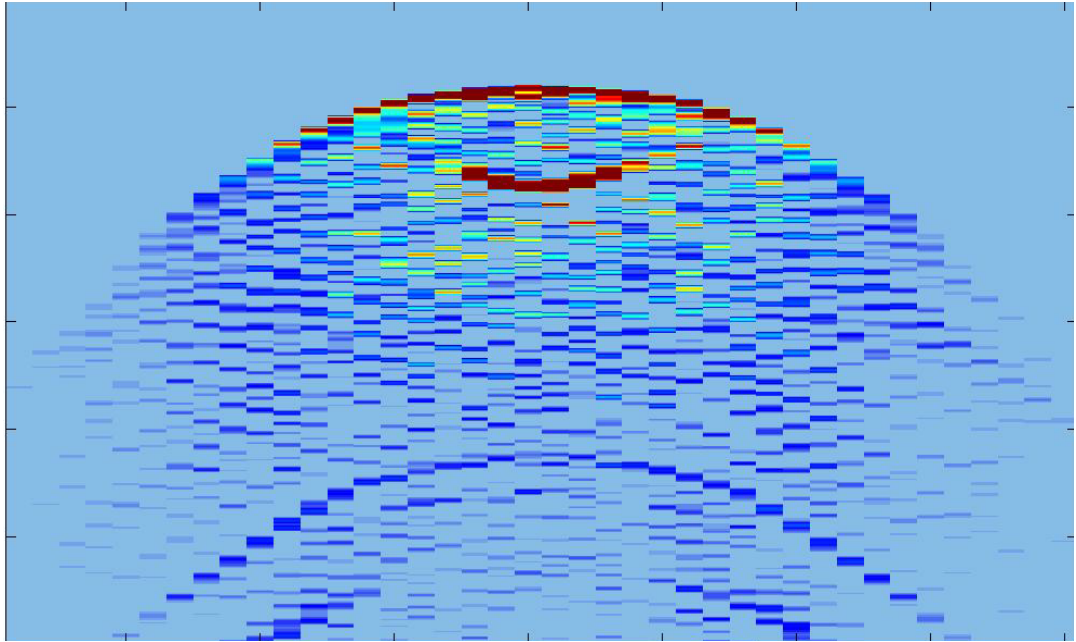
Şekil 3.15 (devam) Dielektrik katsayısı 1.5-2.5 arasında değişen homojen olmayan, düz bir zemin altında gömülü olan dikdörtgen kesitli sonsuz uzun ve enine kesit boyutu 25x25 olan silindirik PEC nesnenin, b) B-Scan gösterimi, c) 2B görüntüsü.

### 3.4.5 Homojen olmayan ortamlarda gömülü farklı boyutlardaki dielektrik nesnelerin karşılaştırılması

Bölüm 3.3.2’de homojen ortamda gömülü olan düşeyde yüksekliği 30, yatayda genişliği 150 hücre ve dielektrik katsayısı 4 olan, elips kesitli sonsuz uzun silindirik nesne bu bölümde dielektrik katsayısı 1.5-2.5 arasında değişen homojen olmayan düz bir zemin altına gömülerek aynı sonuçlar değerlendirilmiştir. Nesnenin gerçek görüntüsü Şekil 3.16a’da yer almaktadır. B-Scan ile elde edilen 2B görüntüsü Şekil 3.16b’de görülmektedir. Bu şekilde nesnenin varlığı ayırt edilmesine rağmen nesnenin şekli ve büyüklüğü hakkında bir bilgi edinmek mümkün değildir. Ancak B-Scan verilerin yapay açıklı radar ile işlenerek elde edilen görüntüsünde nesnenin boyutları ve geometrik şekli açık bir şekilde gözlenebilmektedir (Şekil 3.16c). Son olarak B-Scan ve dolayısı ile 2B görüntüyü elde etmek için kullanılan zaman düzlemi verilerin üç farklı anten için A-Scan gösterimleri Şekil 3.16d’de görülmektedir.



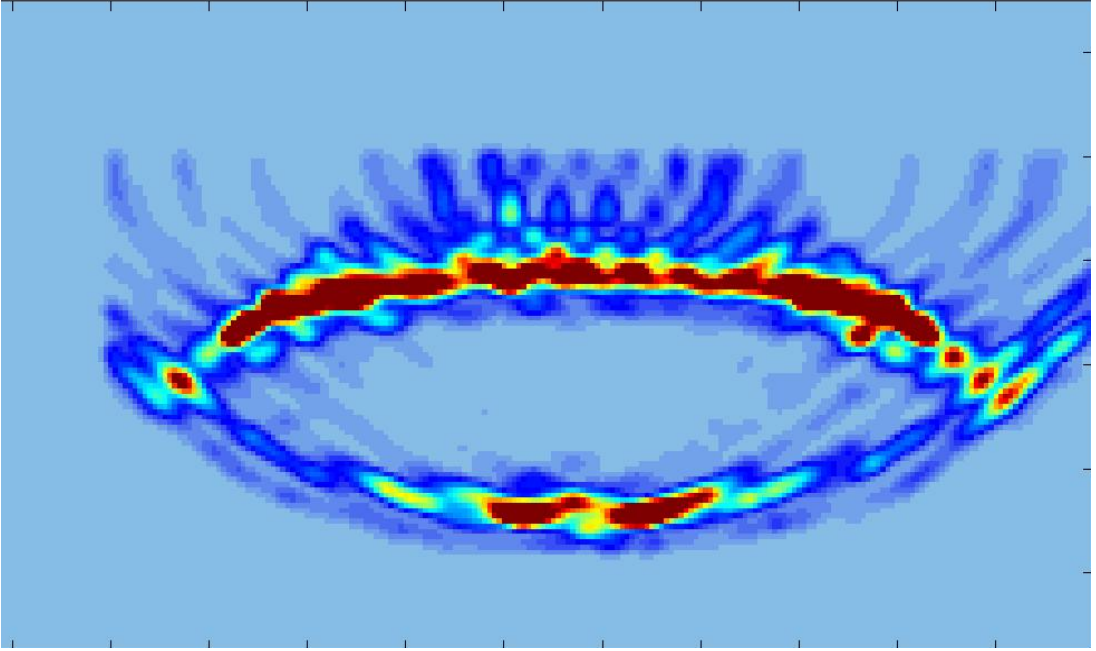
(a)



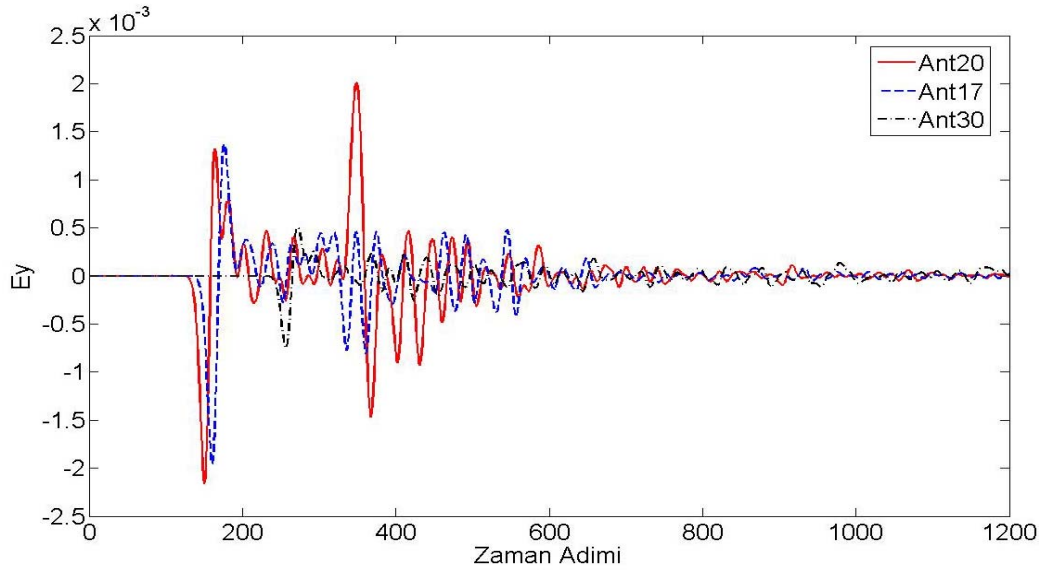
(b)

Şekil 3.16 Dielektrik katsayısı 1.5-2.5 arasında değişen homojen olmayan, düz bir zemin altında gömülü, dikey yüksekliği 30, yatay genişliği 150 hücre ve dielektrik katsayısı 4 olan ve elips kesitli sonsuz uzun silindirik nesnenin (a) gerçek görüntüsü, (b) B-Scan görüntüsü



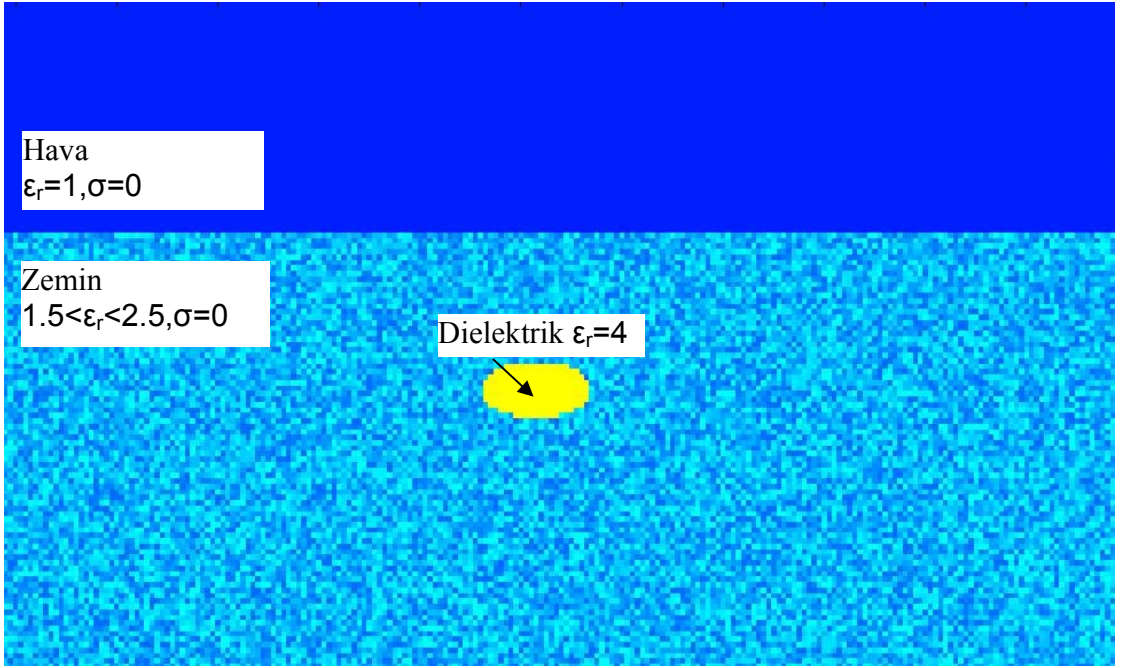


(c)

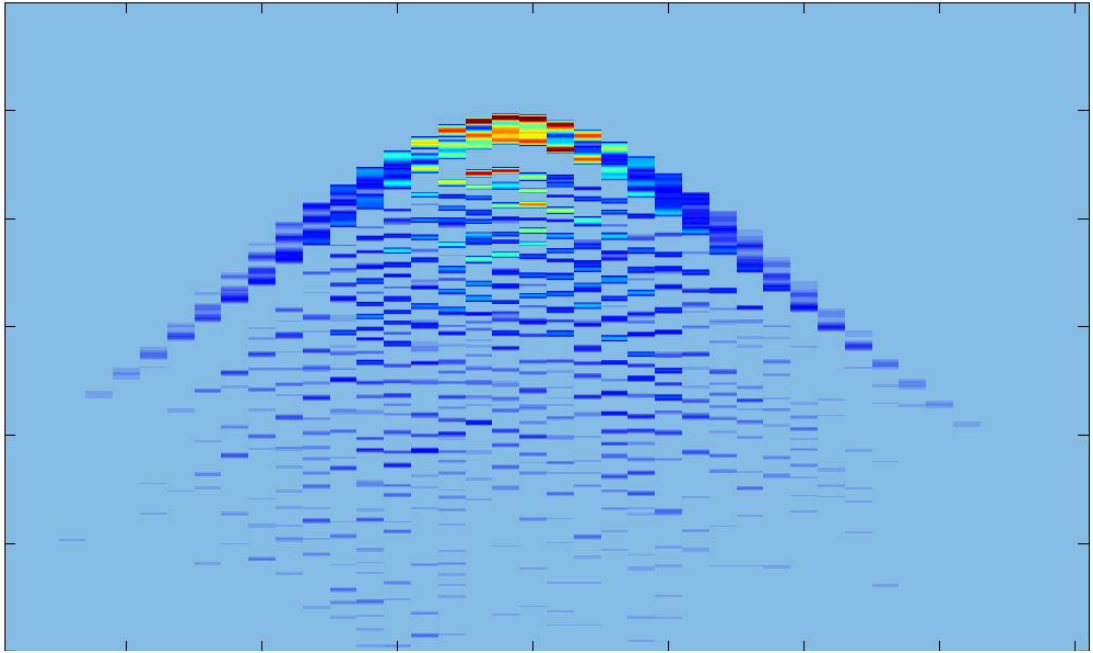


(d)

Şekil 3.16 (devam) Dielektrik katsayısı 1.5-2.5 arasında değişen homojen olmayan, düz bir zemin altında gömülü, düşey yüksekliği 30, yatay genişliği 150 hücre ve dielektrik katsayısı 4 olan ve elips kesitli sonsuz uzun silindirik nesnenin, (c) 2B görüntüsü, (d) üç farklı anten için A-Scan gösterimlerinin karşılaştırılması.

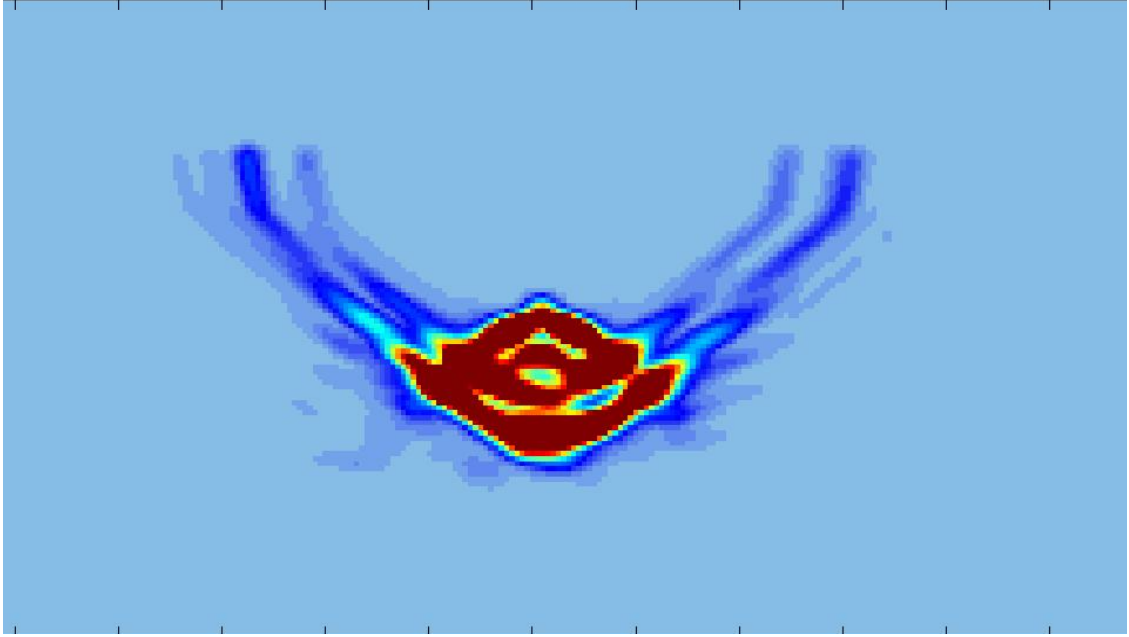


(a)

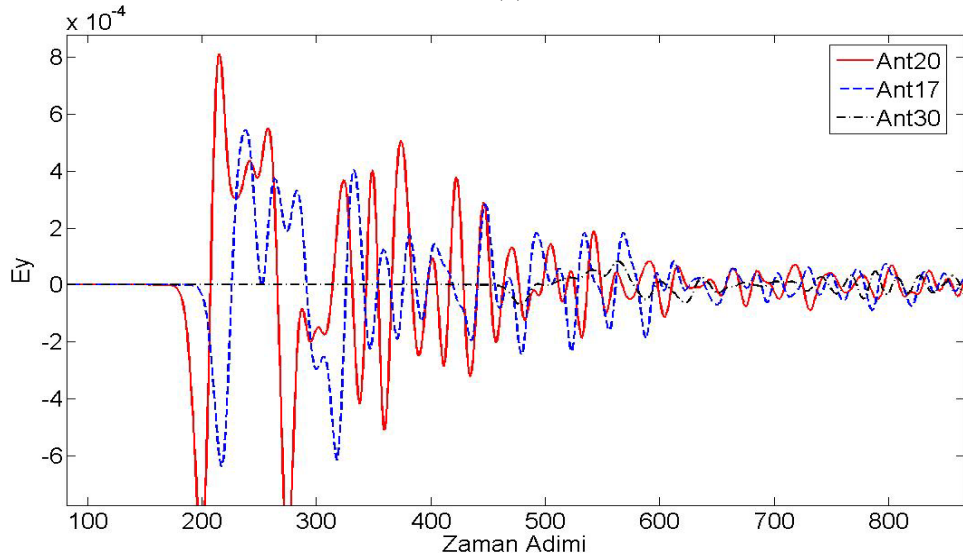


(b)

Şekil 3.17 Dielektrik katsayısı 1.5-2.5 arasında değişen homojen olmayan, düz bir zemin altında gömülü, düşey yüksekliği 10, yatay genişliği 20 hücre ve dielektrik katsayısı 4 olan ve elips kesitli sonsuz uzun silindirik nesnenin (a) gerçek görüntüsü, (b) B-Scan görüntüsü.



(c)



(d)

Şekil 3.17 (devam) Dielektrik katsayısı 1.5-2.5 arasında değişen homojen olmayan, düz bir zemin altında gömülü, düşey yüksekliği 10, yatay genişliği 20 hücre ve dielektrik katsayısı 4 olan ve elips kesitli sonsuz uzun silindirik nesnenin (c) 2B görüntüsü ve (d) üç farklı anten için A-Scan gösterimlerinin karşılaştırılması.

Şekil 3.16'dan büyük boyutlardaki nesnelere için homojen olmayan ortamlarda elde edilen sonuçların homojen ortamlar ile uyumluluk gösterdiği görülmektedir. Şekil 3.16'da elde edilen sonuçlar düşeyde yüksekliği 10, yatayda genişliği 20 hücre ve dielektrik katsayısı 4 olan, elips kesitli sonsuz uzun silindirik nesne için tekrarlanarak elde edilen sonuçlar Şekil 3.17'de verilmiştir. Şekil 3.17'de küçük boyutlardaki dielektrik nesnelere görüntülerinde gürültü etkilerinin daha fazla olduğu görülmektedir. Bu da nesne içindeki yansıma ve saçılmaların boyutların küçülmesiyle artmasından kaynaklanmaktadır.

## SONUÇLAR ve YORUMLAR

Bu çalışmada, özellikle askeri ve biyomedikal gibi hayati önem taşıyan konularda uygulamaları bulunan yüzeyaltı görüntüleme konusu ele alındı. Tez çalışması iki ana kısımdan oluşmaktadır. Çalışmanın ilk kısmında, bu alanda çalışmaya başlayan en tecrübesiz araştırmacıların dahi yararlanabileceği, yalnızca problemin fiziksel yapısının anlaşılması için değil aynı zamanda araştırma amacı ile de kullanılacak kullanıcı kolay arayüze sahip FDTD tabanlı yeni bir program aracı-GrGPR- tasarlandı. İkinci kısımda ise GrGPR kullanılarak elde edilen sentetik verilerden yararlanarak gömülü yapıların görüntülerinin oluşturulmasını sağlayacak görüntü oluşturma algoritmasına ait ayrı bir kod geliştirildi.

Bu tez çalışması çerçevesinde ilk olarak yüzeyaltı görüntüleme üzerine geniş bir literatür araştırması yapıldı. Bu literatür çalışması çerçevesinde yüzeyaltı görüntüleme üzerine yapılabilecek çalışmaların sınırları belirlendi. Tasarlanacak olan GrGPR programında yüzeyaltı programına özel hangi seçeneklerin bulunması gerektiği tespit edildi. Bunlar farklı geometrik şekillerdeki ve elektriksel özelliklerdeki nesnelerin tanımlanıp yerleştirilebilmesi, yerleşimlerinin rasgele yada belirlenen bir konumda gerçekleştirilebilmesi, çeşitli anten dizisi konfigürasyonlarının tasarlanıp kullanılabilmesi, farklı dielektrik katsayılarına sahip, homojen ya da homojen olmayan düz yada engebeli yüzey şekillerinin düzenlenebilmesi için gerekli düzenlemeler yapıldı.

Tezin ikinci kısmını oluşturan görüntü oluşturma algoritması için dizi antenlere göre daha fazla yapay açıklıklı radar prensibi ele alındı. Bu prensibin uygulanabilmesi için alıcı/verici anten dizi elemanları sıra ile aktif olacak şekilde GrGPR programının çalışması

ve sentetik verilerin her bir anten için ayrı dosyalarda kaydedilmesi sağlandı. Her antene ait dosyalar yani sentetik veriler, ayrı ayrı görüntü oluşturma için kullanılan kod tarafından okutularak işlendi. Görüntülerde oluşan gürültü etkilerinin ortadan kaldırılması için sentetik veriler görüntü oluşturma algoritmasını uygulamadan önce ön-işlemeye ve uygulandıktan sonra da son işleme tabi tutuldu. Böylece anlamsız değerlerdeki veriler sıfırlanarak gürültü etkileri temizlenmiş oldu.

Görüntü oluşturma algoritmasının doğruluğunun ve kısıtlarının tespit edilebilmesi için ilk etapta boşlukta bulunan farklı geometrik şekillerdeki nesnelere ele alındı. Antenler nesnelere etrafına daire, üçgen, kare geometrik şekillerinde kapalı çevrim halinde yerleştirildi. Dairesel dizilim halinde en düzgün görüntülerin elde edildiği görüldü. Hayalet görüntülerin de dairesel dizilim ile yok olduğu gözlemlendi.

Yapay açıklık radar prensibine dayanan görüntü oluşturma algoritmasının doğru sonuçlar verebilmesi için gerekli olan anten sayısını belirleyebilmek için farklı sayılarda antenler kullanılarak denemeler yapıldı. Elde edilen sonuçlara göre yapay açıklıklı radar prensibinin doğru sonuçlar verebilmesi için minimum (yaklaşık) 20 anten kullanılması gerektiği gözlemlendi. Bunun nedeninin antenlerden yayılan dalgaların temas noktalarının sayısının anten sayısı ile artmasından ve süperpozisyonları alındığında kesişim noktalarındaki genliklerin maksimum değere ulaşmasından kaynaklandığı gözlemlendi.

Antenlerin silindirik koordinatlarda dalga yayılımı yapmasının yapay açıklık radar prensibinde hayalet görüntülere neden olduğu görüldü. Bunun nedeni de antenlerin merkez kabul edilmesi halinde anten çevresinde anten-hücre arasındaki uzaklık kadar çapa sahip daire boyunca yer alan hücrelerin aynı genliğe sahip olmasından kaynaklandığı gözlemlendi. Oluşan bu hayalet görüntülerin ortadan kaldırılmasında anten sayısının öneminin büyük olduğu belirlendi. Özellikle dairesel anten diziliminde hayalet görüntüler anten sayısının artırılması ile kendiliğinden kaybolduğu tespit edildi. Ancak üçgen, kare ve düz doğrusal dizilimlerde yeni bir kontrol algoritması ile çevrim dışında kalan hücrelerdeki alan

değerleri sıfırlanarak temizlenmesi sağlandı. Böylece yanıltıcı sonuçların oluşması engellenmiş oldu.

Boşlukta bulunan nesnelere için nesne etrafına kapalı çevrim ile yerleştirilerek yapılan çalışmalar aynı zamanda, insan vücudunun tamamının ya da herhangi bir kısmının, bu insan kafası, kolu, bedeni ya da göğüs olabilir, çevresinin taranarak olabilecek herhangi bir ur kitlesinin tespiti için kullanılabilecek çalışmalara örnek bir uygulamadır. Bu nedenle gerçekleştirilebilecek en ufak bir yenilik büyük önem taşımaktadır.

Görüntü oluşturma algoritmasının doğruluğu yapılan testlerle ispat edildikten sonra, nesnelere yüzeyaltında gömülü nesnelere varlıklarının tespiti ve görüntülerinin oluşturulması için gerekli testler yapıldı. Bu amaçla, algoritmaya dalgaların yüzeyaltına geçişleri sırasında yüzey ile temas ettikleri ve kırınımına uğradıkları hücre konumlarının tespit edilebilmesi için gerekli olan bir algoritma ilave edildi. Bunun için Snell yasasından yararlanıldı.

Yüzeyaltında gömülü olan nesne uygulamaları için ilk olarak, homojen bir yüzey altında gömülü olan ve farklı geometrik şekillere (elips, kare) ve boyutlara (50x50, 25x25, 12x12, 2x2) sahip PEC nesnelere ele alındı. Yüzeyin dielektrik katsayısı 2 olarak alındı. Elde edilen sonuçlar A-Scan, B-scan ve yapay açıklı radar 2B görüntüler halinde karşılaştırmalı olarak verildi. Her durum için algoritmanın doğru sonuçlar verdiği gözlemlendi.

Bir sonraki adımda homojen ortamda gömülü dielektrik nesnelere ele alındı. Nesnelere dielektrik katsayıları 4 olarak tercih edildi. Elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak verildi ve tatmin edici sonuçlar elde edildi.

Son olarak, PEC ve dielektrik nesnelere homojen olmayan ortamlarda gömülü olması halinde testler tekrarlandı. A-Scan, B-Scan ve 2B görüntüler karşılaştırmalı olarak verildi. Homojen olmayan ortamlar için de hm GrGPR programının hem de görüntü algoritmasının doğru çalıştığı elde edilen sonuçlardan görüldü.

Yapılan testler sonucunda elde edilen sonuçlar, hem tasarlanıp geliştirilen GrGPR programının hem de yazılan görüntü oluşturma algoritmasının doğru olarak çalıştığı ve farklı uygulamalar için güvenle kullanılabileceğini göstermektedir.

İleriki çalışmalarda ayrı bir kod olan ve MATLAB 7.01 ile geliştirilen görüntü oluşturma algoritmasının GrGPR programının içine gömülmesi ve tam bir paket haline getirilmesi hedeflenmektedir. Böylece GrGPR paketi, hem analizlerin yapılabileceği hem de görsel olarak sonuçların karşılaştırılabileceği güçlü bir araç haline getirilmiş olacaktır. Zemin karmaşasının dışında gürültü etkileri de benzetimlere katılarak etkileri incelenecek, farklı işaret işleme algoritmaları araştırılarak zemin karmaşası ve gürültü etkilerinin temizlenebilmesi için yeni ve hızlı algoritmalar geliştirilecektir.



## KAYNAKLAR

- BINDU G., LONAPPAN A., THOMAS V., AANANDAN C. K., MATHEW K. T. 2006. Active Microwave Imaging for Breast Cancer Detection. Progress in Electromagnetics Research, PIER vol. 58, p. 149–169.
- BOND E. J., LI X., HAGNESS S. C., VAN VEEN B. D. 2003. Microwave Imaging via Space-Time Beamforming for Early Detection of Breast Cancer. IEEE Trans. Antennas and Propagation, Vol. 51, No. 8, p. 1690-1704.
- BOURGEOIS J. M., SMITH G. S. 1998. A Complete Electromagnetic Simulation of the Separated-Aperture Sensor for Detecting Buried Land Mines. IEEE Trans. Antennas Propagation, vol. 46, no. 10, p. 1419–1426.
- CAKIR G., CAKIR M., SEVGI L. 2006. A Multipurpose FDTD-Based Two Dimensional Electromagnetic Virtual Tool. IEEE Antennas and Propagation Magazine. vol. 48, no. 4, p. 142-151.
- CARIN L., GENG N., MCCLURE M., SICHINA J., AND NGUYEN L. 1999. Ultra-Wide-Band Synthetic-Aperture Radar for Mine-Field Detection. IEEE Antennas and Propagation Magazine, vol. 41, no. 1, p. 18-33.
- CHIGNELL R. J. 1996. Ground Penetrating Radar - A Sensor for Mine Detection. Detection of abandoned land mines, Conference Publication no. 431 IEE, p. 103-108.
- CONVERS L. B. 2004. Ground Penetrating Radar for archaeology. (Geophysical Methods for Archaeology), ISBN-10: 0759107734, Altamira Press, Walnut Creek, CA. 201.
- DANIELS D. J. 2004. Ground Penetrating Radar, IEE Radar, Sonar, Navigation and Avionics Series, ISBN 0-86341-360-9, 2<sup>nd</sup> Ed. 726 p.

- DANIELS D.J., GUNTON D.J., SCOTT H.F. 1988. Introduction to Subsurface Radar. IEE PROCEEDINGS, vol. 135, no. 4, p. 278-320.
- FEAR E. C., HAGNESS S. C., MEANEY P. M., OKONIEWSKI M., STUCHLY M. A. Enhancing Breast Tumor Detection with Near Field Imaging. 2002. IEEE Microwave Magazine, p. 48-56.
- FEAR E. C., LI X., HAGNESS S. C., STUCHLY M. A. 2002. Confocal Microwave Imaging for Breast Cancer Detection: Localization of Tumors in Three Dimensions. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, vol. 49, no. 8, p. 812-822.
- FEAR E. C., MEANEY P. M., STUCHLY M. A. 2003. Microwaves for Breast Cancer Detection?. IEEE Potentials, p. 12-18.
- FEUER E.J., DEVCAN WUN L.M. 1999. Probability of Developing or Dying of Cancer. Version 4.0. Bethesda MD. National Cancer Institute.
- FISCHER C., HERSCHLEIN A., YOUNIS M., WIESBECK W. 2007. Detection of Antipersonnel Mines by Using the Factorization Method on Multistatic Ground-Penetrating Radar Measurements. IEEE Transactions on Geoscience And Remote Sensing, vol. 45, no. 1, p. 85-92.
- GÜREL L., OĞUZ U. 2000. "Three-dimensional FDTD Modeling of a Ground Penetrating Radar. IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing, vol. 38, no 4, p. 1513-1521.
- GÜREL L., OĞUZ U. 2001. Simulations of Ground Penetrating Radars over Lossy and Heterogeneous Grounds. IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing, vol. 39, no 6, p. 1190-1197.
- GÜREL L., OĞUZ U. 2003. Optimization of the Transmitter-Receiver Separation in the Ground-Penetrating Radar. IEEE Trans on Antennas and Propagat., vol. 51, no 3, p. 362-370.
- HAGNESS S. C., TAFLOVE A., AND BRIDGES J. E. 1998. Two-Dimensional FDTD Analysis of a Pulsed Microwave Confocal System for Breast CancerDetection: Fixed-

- Focus and Antenna-Array Sensors. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, vol. 45, no. 12, p. 1470-1479.
- HO K. C., GADER P. D., 2002. A Linear Prediction Land Mine Detection Algorithm for Hand Held Ground Penetrating Radar. IEEE Transactions On Geoscience And Remote Sensing, vol. 40, no. 6, p. 1374 – 1384.
- HOOLE P.R.P., OXON P. D. 2001. Smart Antennas And Signal Processing For Communications, Biomedical and Radar Systems, WIT Press, HUA T. P., GOH D., HOOLE P.R.P., ABEYRATNE U. R., Ch 6, 191-220, Ashurst, England.
- KARPAT, E., ÇAKIR M., SEVGİ L., 2009. Subsurface Imaging, FDTD-Based Simulations and Alternative Scan/Processing Approaches, Microwave and Optical Technology Letters, Vol. 51, No 4, pp. 1070-1075.
- LEI, W., L. LIU, C. WUANG, SU Y. 2004. Subsurface imaging of buried objects from FDTD modeled scattered field. 3<sup>rd</sup> International Conference on Computational Electromagnetics and Its Applications Proceedings. p. 516-520.
- LEI W., SUI Y., HUANG C. 2004. A TAM-BP Imaging Algorithm in GPR Application, 2004 4<sup>th</sup> International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology Proceedings.
- LEI W., SUI Y. 2005. A UWB Impulse Subsurface Imaging Radar. IEEE International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications Proceedings. p. 1356- 1360.
- LI X., HAGNESS S. C. 2001. A Confocal Microwave Imaging for Breast Cancer Detection. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, vol. 11, no. 3, p. 130-132.
- LI X., BOND E. J., VAN VEEN B. D., HAGNESS S. 2005. An Overview of UWB Microwave Imaging via Space-Time Beamforming for Early-Stage Breast Cancer Detection. IEEE Antennas and Propagation Magazine, vol. 47, no. 1, p. 19-34.

- LI X., HAGNESS S. C., VAN VEEN B.D., AND VAN DER WEIDE D. 2003. Experimental Investigation of Microwave Imaging via Space-Time Beamforming for Breast Cancer Detection. IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest.
- LIU Q. H., ZHANG Z. Q, WANG T. T., BRYAN J. A., YBARRA G. A., NOLTE L. W., JOINES W. T. 2002. Active Microwave Imaging I—2-D Forward and Inverse Scattering Methods. IEEE Transactions On Microwave Theory and Techniques, vol. 50, no. 1. p. 123-133.
- MORROW I. L., VAN GENDEREN P. 2002. Effective Imaging of Buried Dielectric Objects. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 40, no. 4, p. 943-949.
- PEICHL M., SOELLNER M., SUESS H., MEISS I. 1999. Active and passive microwave multi-sensor system for anti-personal mine detection. IEEE.
- PETERS JR. L., DANIELS J. J., YOUNG J. D. 1994. Ground Penetrating Radar as a Subsurface Environmental Sensing Tool. Proceedings Of The IEEE. vol. 82. no. 12, p. 1802-1822.
- SEVGI, L.2003. IEEE Press - John Wiley and Sons Co., ISBN NO: 0-471-43062-5, New Jersey.
- TEIXEIRA F. L., CHEW W. C., STRAKA M., ORISTAGLIO M. L., WANG T.. 1998. Ground Penetrating Radar on Dispersive, Inhomogeneous, and Conductive Soils. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 36, no. 6, p. 1928-1937.
- VAN DONGEN K.W.A., NICOLAESCU I., VAN DEN BERG P.M.. 2003. Subsurface Imaging Using Measured Antenna Footprints. 2<sup>nd</sup> International Workshop on Advanced GPR, Delft, The Netherlands, p. 195-200.
- WANG Y., LI X., SUN Y., LI J., STOICA P. 2005. Adaptive Imaging for Forward-Looking Ground Penetrating Radar. IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems, vol. 41, no. 3, p. 922-936.

WILLIAMS T. C., FEAR E. C., WESTWICK D. T. 2006. Tissue Sensing Adaptive Radar for Breast Cancer Detection-Investigations of an Improved Skin-Sensing Method. IEEE Transactions on MTT, vol. 54, no. 4, p. 1308-1314.

WINTERS D. W., BOND E. J., VAN VEEN B. D., HAGNESS S. C. 2006. Estimation of the Frequency-Dependent Average Dielectric Properties of Breast Tissue Using a Time-Domain Inverse Scattering Technique. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 54, no. 11, p. 3517-3528.

WU Z., LIU C. 1999. An Image Reconstruction Method Using GPR Data. IEEE Transactions on Geoscience And Remote Sensing, vol. 37, no. 1, p. 327- 334.

XIE Y., GUO B., XU L., LI J., STOICA P. 2006. Multi-Static Adaptive Microwave Imaging for Early Breast Cancer Detection. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, vol. 53, no. 8, p. 1647-1657.

XU X., MILLER E. L., RAPPAPORT C. M., SOWER G. D. 2002. Statistical method to detect subsurface objects using array ground-penetrating radar data. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 40, no. 4, p. 963-976.

ZHANG Z. Q., LIU Q. H. 2001. Microwave Imaging for Breast Tumor: 2D Forward and Inverse Methods. IEEE, Antennas and Propagation Society International Symposium. vol 1. p. 242-245.

<http://geoint.missouri.edu/CGI2/research10.aspx>

## ÖZGEÇMİŞ

Bursa doğumlu Esin KARPAT, ilkokul öğrenimini Altıparmak İlkokulu'nda, ortaokul ve lise öğrenimlerini Bursa Özel Namık Sözeri Lisesi'nde tamamladı. Lisans eğitimini Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Elektronik Mühendisliği Bölümü'nde tamamladıktan sonra özel bir şirkette üç yıl satış sorumlusu olarak çalıştı. 2000 yılında aynı bölümde yüksek lisans ve araştırma görevliliği hakkını kazandı. 2002 yılında doktora çalışmalarına başladı. 2006 yılında doktora çalışmalarına 1 yıl süre ile ara vererek Texas Tech University (USA)'de araştırmalarda bulundu. Halen Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Elektronik Mühendisliği Bölümü'nde araştırma görevlisi olarak devam etmektedir.

## TEŞEKKÜR

Doktora çalıőmalarım boyunca konusundaki engin bilgisi ile beni aydınlatan, yönlendiren ve her zaman motive eden danışman hocam sayın Prof. Dr. Levent SEVGİ'ye, tez izleme jürimde bulunan ve destekleyen sayın hocalarım Prof. Dr. Ali OKTAY'a ve Prof. Dr. Eldar MUSA'ya teşekkürü bir borç bilirim.

Tez çalıőmam kapsamındaki yazılımların geliştirilmesinde desteklerini ve emeklerini esirgemeyen Yrd. Doç Dr. Mustafa ÇAKIR'a ve Yrd. Doç Dr. Gonca ÇAKIR'a sonsuz teşekkürler.

Benden hiçbir zaman sevgisini ve dualarını eksik etmeyen annem Ülfet ÖZAKICILAR'a, yanımda olmasa bile nasihatlarını hiçbir zaman unutmadığım babam merhum Kadri ÖZAKICILAR'a benim için harcadıkları emeklerinden dolayı ve tüm aileme manevi desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

Son olarak benim tüm kahrımı çeken, en umutsuz anımda bile yanımda olan, desteğini hiçbir zaman esirgemeyen eşim Öğr. Gör. Dr. Fatih KARPAT'a ve tez çalıőmalarımın son zamanlarında uslu durarak beni üzmeyen ve çalıőmalarımı aksatmayan kızım Serra'ya teşekkürlerimi iletirim.