

**YERE NÜFUZ EDEN RADAR (YNR) GÖRÜNTÜLERİNİN ELDE
EDİLMESİNDE ZAMAN BÖLGESİNDE SONLU FARKLAR (FDTD)
METODUNUN KULLANILMASI**

Alp ALPER

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ŞUBAT 2011
ANKARA**

**YERE NÜFUZ EDEN RADAR (YNR) GÖRÜNTÜLERİNİN ELDE
EDİLMESİNDE ZAMAN BÖLGESİNDE SONLU FARKLAR (FDTD)
METODUNUN KULLANILMASI**

Alp ALPER

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ŞUBAT 2011
ANKARA**

Alp ALPER tarafından hazırlanan “YERE NÜFUZ EDEN RADAR (YNR) GÖRÜNTÜLERİNİN ELDE EDİLMESİNDE ZAMAN BÖLGESİNDE SONLU FARKLAR (FDTD) METODUNUN KULLANILMASI” adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Yrd.Doç.Dr. Nursel AKÇAM

.....

Tez Danışmanı, Elektrik-Elektronik Müh. Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Doç.Dr. Erkan AFACAN

.....

Elektrik-Elektronik Müh. Anabilim Dalı, G.Ü.

Yrd.Doç.Dr. Nursel AKÇAM

.....

Elektrik-Elektronik Müh. Anabilim Dalı, G.Ü.

Yrd.Doç.Dr. Hasan Şakir BİLGE

.....

Bilgisayar Müh. Anabilim Dalı, G.Ü.

Tarih: 15/02/2011

Bu tez ile G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Bilal TOKLU

.....

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Alp ALPER

**YERE NÜFUZ EDEN RADAR (YNR) GÖRÜNTÜLERİNİN ELDE
EDİLMESİNDE ZAMAN BÖLGESİNDE SONLU FARKLAR METODUNUN
KULLANILMASI
(Yüksek Lisans Tezi)**

Alp ALPER

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Şubat 2011**

ÖZET

Yere Nüfuz Eden Radar (YNR), dalga prensipleri kullanılarak yer altındaki nesnelerin ve tabakaların elektromanyetik teknikler ile görüntülenmesi olarak ifade edilebilir. YNR, gömülü kara mayınları tespit, arkeoloji, adli olaylar, inşaat işleri ve jeofizik gibi geniş uygulama alanlarına sahiptir.

Bu çalışmada, YNR teorisi incelenmiş ve yeraltının görüntülenmesinde kullanılan modelleme tekniklerinden birisi olan Zaman Bölgesinde Sonlu Farklar (Finite Difference Time Domain-FDTD) tekniği çalışılarak tanıtılmıştır. Bu metod kullanılarak geliştirilen yöntem ile elde edilen sonuçlar ve değişik durumlar için yapılan modellemeler sunulmuştur.

Bilim Kodu : 905.1.034

Anahtar Kelimeler : FDTD, YNR, Modelleme, Simülasyon

Sayfa Adedi : 121

Tez Yöneticisi : Yrd. Doç. Dr. Nursel AKÇAM

**USING FINITE DIFFERENCE TIME DOMAIN METHOD IN IMAGING BY
GROUND PENETRATING RADAR**

(M. Sc. Thesis)

Alp ALPER

**GAZİ UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

February 2011

ABSTRACT

Ground Penetrating Radar (GPR) can be defined as an imaging system that utilizes the electromagnetic wave principles through the structures and layers below the ground surfaces. GPR finds a numereos applications; in space, detection of buried land mines, archeology, criminal events, civil engineering and jeophysical problems.

In this thesis, in addition the theory and principles of GPR, one of the modelling techniques which is used in imaging underground, Finite Difference Time Domain (FDTD) method has been investigated and as a result of the investigation has been discussed. Obtained results by using and developping FDTD method has been compared with each other for different conditions and has been discussed.

Science Code : 905.1.034

Key Words : FDTD, GPR, Modelling, Simulation

Page Number: 121

Adviser : Asist.Prof.Dr.Nursel AKÇAM

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren ve her zaman destekleyen hocam Yrd. Doç. Dr. Nursel AKÇAM'a, kıymetli tecrübelerinden faydalandığım Doç. Dr. Gökhan TANYER ve Yrd. Doç. Dr. Gökhan ŞENGÜL'e, yüksek lisans çalışmalarımda beni destekleyen amirim Mühendis Albay Mehmet Fatih TAN'a, mesai arkadaşlarım Mühendis Yüzbaşı Orkun AĞIROĞLU ile Fizik Mühendisi Erol AKIN'a ve manevi desteğiyle yanımda olan eşim Arzu ALPER'e teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	xi
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xv
1. GİRİŞ	1
2. YERE NÜFUZ EDEN RADAR	7
2.1. Tanımı	7
2.1.1. Yol kayıpları	9
2.1.2. Çevre yankısı/kargaşa (clutter)	10
2.1.3. Derinlik çözünürlüğü	10
2.1.4. Plan çözünürlüğü	11
2.2. Modelleme Tekniği	11
2.3. Malzeme Özellikleri	12
2.3.1. Dielektrik malzemelerde elektromanyetik dalganın yayılımı	13
2.3.2. Su ve buzun dielektrik özellikleri	16
2.3.3. Toprak ve kayanın dielektrik özellikleri	17
2.4. Antenler	18

Sayfa

2.4.1. Eleman antenleri.....	19
2.4.2. TEM dalga antenleri.....	19
2.4.3. Darbe yayınlıyıcı antenler (IRA).....	19
2.4.4. Frekansa bağılı antenler.....	20
2.4.5. Horn antenler.....	21
2.4.6. Dizi antenler.....	21
2.4.7. Dielektrik antenler.....	22
2.5. Modülasyon Teknikleri.....	22
2.5.1. Aşırı geniş bant (Ultra wide band-UWB) sinyali.....	23
2.5.2. Genlik modülasyonu.....	24
2.5.3. Frekans modüleli sürekli dalga radarı (FMCW)	26
2.5.4. Diğer modülasyon tipleri.....	28
2.6. Sinyal İşleme.....	28
2.6.1. A Tarama.....	29
2.6.2. B Tarama.....	29
2.6.3. C Tarama.....	30
3. ZAMAN BÖLGESİNDE SONLU FARKLAR (FDTD) METODU.....	32
3.1. FDTD Metoduyla Bir Boyutlu Simülasyon.....	33
3.1.1. Bir boyutlu serbest uzay formülü.....	33
3.1.2. Emici sınır koşulları (Absorbing Boundary Conditions-ABC).....	36
3.1.3. Akım yoğunluğu kullanarak formüllerin yeniden düzenlenmesi.....	36
3.1.4. Frekans bağımlı ortam.....	39

	Sayfa
3.2. İki Boyutta FDTD Simülasyonu.....	41
3.2.1. İletken ve dielektrik ortamlarda 2 boyutlu FDTD.....	42
3.2.2. Mükemmel uyumlu tabaka (PML).....	43
3.3. Üç Boyutlu FDTD Simülasyonu.....	44
4. UYGULAMA VE SİMÜLASYON SONUÇLARI.....	46
4.1. FDTD Yöntemiyle Boş Uzayda EM Dalga Yayılımının Elde Edilmesi.....	46
4.2. Yayılan EM Dalganın Kaynağının Üst Kenara Taşınması.....	50
4.3. Ortama Metal Konması.....	54
4.4. Movie Komutuyla Ortamın Simüle Edilmesi.....	57
4.5. Ortama Yerleştirilen Metalin Görüntülenmesi.....	58
4.6. Dielektrik Katman Altında EM Dalganın Yayılımı.....	61
4.7. Yan Yana İki Metalin Görüntülenmesi.....	68
4.8. Alt Alta İki Metalin Görüntülenmesi.....	73
4.9. İletken ve Dielektrik Ortamlarda EM Dalga Yayılımı.....	78
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	93
KAYNAKLAR.....	96
EKLER.....	99
EK-1. Merkezde EM Dalga Kaynağı Olması İçin Geliştirilen Yazılım.....	100
EK-2. Merkezde EM Dalga Kaynağı Olması İçin Geliştirilen Yazılım.....	104
EK-3. EM Dalga Kaynağının Üst Kenara Taşınması İçin Geliştirilen Yazılım...	105
EK-4. Ortama Metal Konmasını Simüle Etmek İçin Geliştirilen Yazılım.....	106
EK-5. Movie Komutuyla Dalga Yayımını İzlemek İçin Geliştirilen Yazılım.....	107

Sayfa

EK-6. Ortaya Yerleştirilen Metalin Görüntülenmesi İçin Geliştirilen Yazılım...	108
EK-7. Dielektrik Ortam Ortamda Metal Olmadığı Durum İçin Geliştirilen Yazılım.....	109
EK-8. Dielektrik Ortam Ortamda Metal Olduğu Durum İçin Geliştirilen Yazılım.....	110
EK-9. Yan Yana İki Metal Olduğu Durumu Simüle Etmek İçin Geliştirilen Yazılım.....	111
EK-10. Yan Yana İki Metal Olduğu Durumda Bu İki Metali Görüntülemek İçin Geliştirilen Yazılım.....	112
EK-11. Alt Alta İki Metal Olduğu Durumu Simüle Etmek İçin Geliştirilen Yazılım.....	113
EK-12. Alt Alta İki Metal Olduğu Durumda Bu İki Metali Görüntülemek İçin Geliştirilen Yazılım.....	114
EK-13. İletken Toprak Altında ($\sigma=10^{-4}$) Ortamda Metal Olmadığı Durum İçin GeliştirilenYazılım.....	115
EK-14. İletken Toprak Altında ($\sigma=10^{-4}$) Ortamda Metal Olduğu Durum İçin Geliştirilen Yazılım.....	116
EK-15. İletken Toprak Altında ($\sigma=10^{-4}$) Ortamda Metali Görüntülemek İçin Geliştirilen Yazılım.....	117
EK-16. İletken Toprak Altında ($\sigma=10^{-2}$) Ortamda Metal Olmadığı Durum İçin Geliştirilen Yazılım.....	118
EK-17. İletken Toprak Altında ($\sigma=10^{-2}$) Ortamda Metal Olduğu Durum İçin Geliştirilen Yazılım.....	119
EK-18. İletken Toprak Altında ($\sigma=10^{-2}$) Ortamda Metali Görüntülemek İçin Geliştirilen Yazılım.....	120
ÖZGEÇMİŞ.....	121

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Çeşitli malzemelerin 100 MHz'deki tipik dielektrik özellikleri.....	12

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil		Sayfa
Şekil 2.1.	YNR sisteminin blok diagramı.....	7
Şekil 2.2.	Monostatik durum blok diagramı.....	8
Şekil 2.3.	Bistatik durum blok diagramı.....	8
Şekil 2.4.	İki farklı sıcaklıkta dielektrik spektrumu.....	16
Şekil 2.5.	Tipik bir TEM dalga anteni.....	19
Şekil 2.6.	IRA anteninin jenerik yapısı.....	20
Şekil 2.7.	Spiral antenin yapısı.....	21
Şekil 2.8.	Dizi antenlerin (16 Kanallı) blok diyagramı.....	22
Şekil 2.9.	Tipik bir dielektrik anten yapısı.....	22
Şekil 2.10.	UWB ölçüm işleminin diagramı.....	24
Şekil 2.11.	AM modülasyonu alıcı verici yapısı.....	24
Şekil 2.12.	Genlik modülasyonu darbe zamanlama diagramı.....	25
Şekil 2.13.	FMCW radarının blok diagramı.....	26
Şekil 2.14.	FMCW zamanlama diagramı ve ara frekans dalga şekilleri.....	27
Şekil 2.15.	İki adet hedef için A tarama sonrası menzil profili.....	29
Şekil 2.16.	Belirli bir hat boyunca B tarama sonrası elde edilen menzil profili.....	30
Şekil 2.17.	C-tarama grafiksel gösterim.....	31
Şekil 3.1.	Yee hücresi.....	32
Şekil 3.2.	FDTD formülünde E ve H alanlarının uzay ve zamanda ayrıklandırılma (interleave) işlemi.....	34
Şekil 4.1.	Merkezde bir EM dalga kaynağının olması durumu.....	46
Şekil 4.2.	Ek-1'deki yazılımın çalıştırılmasıyla elde edilen sonuçlar.....	47

Şekil	Sayfa
Şekil 4.3.	Ek-2'deki yazılımın çalıştırılmasıyla elde edilen sonuçlar..... 49
Şekil 4.4.	Yayılan EM dalganın kaynağının üst kenara taşınması..... 51
Şekil 4.5.	Kaynağın üst kenara taşınması durumundaki EM dalga yayılımı... 51
Şekil 4.6.	Ortama metal konması durumu..... 54
Şekil 4.7.	Ortamda metal olması durumunda yansıma görüntüleri..... 55
Şekil 4.8.	Movie komutuyla film olarak sinyalin yayılımı..... 57
Şekil 4.9.	Ortaya yerleştirilen metalin görüntülenmesi senaryosu..... 59
Şekil 4.10.	Ortaya yerleştirilen metalin görüntülenmesi..... 60
Şekil 4.11.	Dielektrik ortam (ortamda metal yani yansıma olmadığı durum için)..... 62
Şekil 4.12.	Dielektrik ortam (ortamda metal yani yansıma olduğu durum için)62
Şekil 4.13.	Ortamda metal yani yansıma olmadığı durumda toprak altı görüntüler..... 63
Şekil 4.14.	Ortamda metal yani yansıma olduğu durumda toprak altı görüntüler..... 65
Şekil 4.15.	Yan yana iki metalin olduğu durum..... 68
Şekil 4.16.	Yan yana iki metal olduğu durumda elektrik ve manyetik alan görüntüleri..... 69
Şekil 4.17.	Ortaya yan yana konan iki metalin görüntülenmesi..... 71
Şekil 4.18.	Alt alta iki metalin olduğu durum..... 73
Şekil 4.19.	Alt alta iki metal olması durumunda elektrik ve manyetik alan görüntüleri..... 74
Şekil 4.20.	Ortamda alt alta konan iki metalin görüntülenmesi..... 76
Şekil 4.21.	İletken ortam (ortamda metal, yani yansıma olmadığı durum)..... 78
Şekil 4.22.	İletken ortam (Ortamda metal, yani yansıma olduğu durum)..... 79

Şekil	Sayfa
Şekil 4.23.	İletken toprak altı ($\sigma=10^{-4}$ değerinde) elektrik ve manyetik alan görüntüleri (metal yani yansımanın olmadığı durum) 79
Şekil 4.24.	İletken toprak altı ($\sigma=10^{-4}$ değerinde) elektrik ve manyetik alan görüntüleri (metal yani yansımanın olduğu durum) 82
Şekil 4.25.	İletken ortama ($\sigma=10^{-4}$) yerleştirilen metalin görüntülenmesi..... 85
Şekil 4.26.	İletken toprak altı ($\sigma=10^{-2}$ değerinde) elektrik ve manyetik alan görüntüleri (metal yani yansımanın olmadığı durum)..... 86
Şekil 4.27.	İletken toprak altı ($\sigma=10^{-2}$ değerinde) elektrik ve manyetik alan görüntüleri (metal yani yansımanın olduğu durum)..... 89
Şekil 4.28.	İletken ortama ($\sigma=10^{-2}$) yerleştirilen metalin görüntülenmesi..... 91

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simge	Açıklama
$\vec{D}$	: Elektrik akı yoğunluğu vektörü,
$\vec{E}$	: Elektrik alan şiddeti vektörü
f	: Frekans
$\vec{H}$	: Manyetik alan şiddeti vektörü
$\vec{J}$	: Akım yoğunluğu vektörü
w	: Açısal Frekans
ϵ	: Dielektrik sabiti veya elektriksel geçirgenlik,
ρ	: Elektrik yük yoğunluğu
μ	: Manyetik geçirgenlik
σ	: Ortamın iletkenliği
λ	: Dalga boyu
Kısaltma	Açıklama
1-B	: Bir boyutlu
2-B	: İki boyutlu
3-B	: Üç boyutlu
ABC	: Zayıflatıcı Sınır Koşulları (Absorbing Boundary Conditions)
AM	: Genlik Modülasyonu (Amplitude Modulation)
Bistatik durum	: Alıcı ve verici farklı antenler
EM	: Elektromanyetik
FDTD	: Zaman Bölgesinde Sonlu Farklar (Finite Difference Time Domain)

Kısaltma	Açıklama
FMCW	: Frekans Modüleli Sürekli Dalga (Frequency Modulated Continous Wave)
HM	: Holografik modülasyon (Holographic Modulation)
IF	: Ara Frekans (Intermediate Frequency)
IRA	: Darbe Yayınlayıcı Anten (Impulsive Radiated Antenna)
Monostatik durum	: Tek anten alıcı ve verici
NM	: Gürültü Modülasyonu (Noise Modulation)
PRF	: Darbe Tekrarlama Frekansı (Pulse Repetition Frequency)
RKA	: Radar Kesit Alanı
SAR	: Yapay Açıklıklı Radar (Synthetic Aperture Radar)
SPM	: Sentezörlü Darbe Modülasyonu (Synthesized Pulse Modulation)
TEM	: İlerleyen Elektromanyetik Dalga (Transverse Electromagnetic Wave)
UWB	: Aşırı Geniş Bant (Ultra Wide Band)
YNR	: Yere Nüfuz Eden Radar

1. GİRİŞ

Yer altına uygun özelliklere sahip anten vasıtasıyla elektromanyetik (EM) dalga gönderip, yerin altındaki hedefe çarparak yansıyan dalgayı yine uygun özelliklere sahip diğer veya aynı antenle alan ve algılanan sinyali işlemek suretiyle anlamlı bilgi haline getirerek yerin altındaki nesnelerin görüntülenmesini sağlayan radar sistemine “Yere Nüfuzlu Radar (YNR)” veya Ground Penetrating Radar (GPR) denir [1].

YNR sistemleri, geniş bantlı antenler kullanılarak ölçüm yapılmak istenen yere (toprağa, duvara vs.) kısa darbeli elektromanyetik sinyaller gönderirler. Yerden yansıyan EM sinyaller gerçek zamanlı olarak algılanır ve saklanır. YNR sisteminin ölçüm yapılan zemin üstündeki konumu değiştirilerek bu ölçümler tekrarlandığında ve elde edilen yansıma sinyalleri yan yana konduğunda, ortaya zaman ve konuma bağlı olarak iki boyutlu bir resim çıkar. Böylece ölçüm yapılan yerin altında gizlenen dielektrik sabiti ve/veya iletkenliği, ortamdaki farklı olan bir nesneden kaynaklanan yansımalar bu iki boyutlu resmin içinde algılanabilir. Bu nedenle, YNR özellikle mayın tarama ve tespit sistemlerinde ve diğer benzeri pek çok askeri ve sivil amaçlı uygulamalarda kullanılır [2].

YNR sistemi kullanım alanları,

- a. Arkeoloji,
- b. Adli olaylar,
- c. İnşaat işleri,
- d. Jeofizik uygulamaları,
- e. Mayın tespiti,
- f. Boşaltım (drenaj) tesisleri olarak sıralanabilir [1].

Anılan iki boyutlu resmin içindeki yansımaları ve dolayısıyla yüzeyin altındaki gizlenmiş olan nesneleri algılamak ve hassas şekilde yerlerini belirlemek bazı durumlarda oldukça güç olabilir. Örneğin, kuru toprağın altında gizlenmiş bir plastik mayın senaryosunda, toprağın dielektrik sabitinin içindeki neme bağlı olarak 4 ile

40F/m arasında, muhtelif plastik maddelerin dielektrik sabitlerinin 2 ile 6F/m arasında değiştiği ve YNR sistemi tarafından ölçülen yansıma sinyalinin (elektrik alan V/m) büyüklüğünün toprak ile plastik mayının dielektrik sabitleri arasındaki farka bağlı olduğu düşünülürse, ölçülen sinyalin ne kadar çeşitlilik gösterebileceği ve bu çeşitliliğin içinde mayını algılamamanın ne kadar zor olabileceği anlaşılır [2].

Bu zor senaryolarda bile, yansıma sinyallerinin anlaşılabilmesi gerektiğinden, YNR sisteminin, ölçüm yapılan yerin ve yüzey altına gizlenmiş olan nesne veya nesnelerin elektromanyetik teori kullanılarak modellenmesi ve bilgisayar ortamında simüle edilmesi gerekir. Bu modelleme tekniklerinden en kullanışlı olanlarından birinin de Zaman Bölgesinde Sonlu Farklar (Finite Difference Time Domain-FDTD) yöntemi olduğu kabul edilmektedir [3-6]. Bu yöntemin avantajı bilinmeyen sayısının modellenmek istenen geometrinin karmaşıklığıyla değişmemesi ve sadece modellenen uzayın büyüklüğüyle orantılı şekilde hesaplama yükünün artmasıdır [2].

YNR ile görüntülemeye, etkin performans elde edilmek için uygun antenler ile Hiperbolik Toplama (HT), Yapay Açıklıklı Radar (Synthetic Aperture Radar-SAR) bazlı ve hedeften gelen yansımaların kaydedilerek hiperbol şeklinde dalga şekillerinin oluşturulduğu göç ettirme (migration) algoritmaların geliştirildiği, bunlardan yararlanılarak A tarama, B tarama ve C tarama deneylerinin monostatik ve bistatik durumlar için yapıldığı ve çeşitli derinliklerde kumun içine yerleştirilen cisimlerin görüntülenebildiği ifade edilmiştir [7].

Bu çalışmada Hiperbolik Toplama (HT) bazlı algoritma [8] ve SAR bazlı algoritma ile fiziksel optik kodunun kullanımı [9-13], Adım Frekanslı Sürekli Dalga Radarı (SFCW) ile 3 boyutlu görüntülerin elde edilmesi [14] ve bu algoritmalar kullanılarak yapılan deneylerin sonuçları [15, 16] ifade edilmektedir.

Bu çalışmaların yanı sıra yapılan literatür araştırmasında dünyada da benzer çalışmaların yapıldığı tespit edilmiştir.

Pomposiello tarafından, jeofizik çalışmalarda kullanılmak üzere, çok elektrotlu rezistif çalışmalar gerçekleştirilmiştir ve toprağa yerleştirilen 21 elektrotlu dipol-dipol yöntemi kullanılarak rezistif bilgiler toplanmıştır. Bilgiyi değerlendirmek için algoritma kullanılmış ve 25 m. derinlik için 2 boyutlu model elde edilebilmiştir [17].

Knight, YNR sisteminin kirli sıvılardaki organizmaların varlığını tespit amaçlı kullanımını araştırmıştır. Bu organizmalar dielektrik özellikleri sayesinde tespit edilebilmektedir. YNR görüntüleri alt yüzeyin geniş ölçekli yapısını modellemek ve sıvı içeriği, gözeneklilik ve geçirgenliği tahmin etmek için kullanılmıştır [18].

Langley, C band frekansında, SAR sinyalinin kutup buzlarına nüfuzunu araştırmış ve menzil profillerini çıkarmıştır. Alınan sinyal standart radar eşitliği kullanılarak eşdeğer radar kesit alanına dönüştürülmüştür. Radar kesit alanlarının derinlik üzerinden integrali bir geri saçılma değeri verir ve bu değer işlenmiş SAR'ın geri saçılma katsayısıyla karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma sonucu, YNR bilgisinin SAR sinyaline katkıda bulunan özellikler içerdiği sonucuna varılmıştır [19].

Olhoeft, tren yolunda YNR algılama konusunu araştırmıştır. Tren rayları üzerine yerleştirilecek antenlerin sahip olmak zorunda oldukları özellikler ve bu özelliklerin sağlayacağı avantajlar tespit edilerek raporda sunulmuştur [20].

Witten, geliştirdiği Fourier dönüşüm metodu ile uzak alan metodu esasına dayalı tersleme (inversion) algoritmaları ile görüntüleme ve hedef tespitine yönelik deneyler yapmıştır. Bu iki yöntem karşılaştırıldığında Fourier dönüşüm metodunun üstün olduğu ifade edilmektedir [21].

Chignell, anti personel mayın tespitinin zor bir problem olduğunu ve bunu tespit için pek çok teknolojinin sunulduğunu, yer ölçüm radarının (ground probing radar) bunlardan biri olduğunu, Falkland adaları projesinde bu teknolojinin denendiğini ve araca monteli, elde taşınabilir yer ölçüm sistemi geliştirildiğini ve çeşitli lojistik problemlerin çözümlenmesi gerektiğini ifade etmiştir [22].

Valle, YNR anteninin yönlülük fonksiyonunun kestirimi üzerinde çalışmış ve uzak alan şartlarının çok tatmin edici olmadığını ifade etmiştir. Ayrıca EM integral eşitliklerinin çözümlendiği ve yönlülük fonksiyonunu ölçen yeni bir teknik geliştirildiği, ölçüm sonuçlarının teorik hesaplamalarla bire bir uyuşmadığı belirtilerek yakın alan çözümleme tekniklerinin kullanılması tavsiye edilmiştir [23].

Shresta, yüksek çözünürlüklü, EM darbe kullanan YNR sistemini tanıtmış, geliştirilmiş kestirim yöntemlerinden MUSIC (Çoklu Sinyal Sınıflaması) ve FFT (Hızlı Fourier Dönüşümü) yöntemlerini denemiş, simülasyon ve deney sonuçlarının klasik yöntemlere göre daha yüksek çözünürlüklü olduğunu ifade etmiştir [24].

Kim, Rezistif Vee Anteninin (RVE) rezistif kullanıma sahip olduğunu, çok az kendinden kaynaklanan çevre yankısına (clutter) ve düşük RKA'ya sahip olduğunu ve bu özelliklerin onun YNR anteni olarak kullanılmasında avantaj sağlayacağını belirtmiş, RVE'nin uygulanması ile olumlu sonuçlar alındığını deneylerle göstermiştir [25].

Youn, YNR'nin 100 - 1000 MHz anti tank mayınları ile 6 GHz anti personel mayınları ve 10 -1000 UXO'ların tespitinde kullanıldığını, düşük frekanslı büyük antenlerin daha iyi radyasyon etkinliği sağladığını belirtmiş ve YNR antenleriyle alınan sonuçları göstermiştir [26].

FDTD Metodu ilk olarak Kane S.Yee tarafından 1966 yılında başlatılmıştır. Yee, Maxwell denklemlerini sonlu diferansiyel denklemlere dönüştürerek, uzayın bir noktasındaki elektrik ve manyetik alan bileşenlerinden birinin bilinmek şartıyla, sonlu fark eşitlikleriyle diğerlerinin de hesaplanabileceğini göstermiştir [27].

FDTD konusunda diğer önemli gelişme ise Allen Taflove tarafından gerçekleştirilmiştir. Taflove Yee tarafından geliştirilen algortimayı kullanarak, dielektrik silindir gibi hedeflerden saçılan EM dalgaları sonlu diferansiyel denklemler kullanılarak modellemiştir. Bu metod üç boyutlu dielektrik saçıcı içinde gerçekleştirilmiştir [28].

FDTD metoduyla ilgili olarak ise, Uduwala tarafından Debye modeli ve bow-tie anteni, Emici Sınır Koşulları (Absorbing Boundary Conditions-ABC) ile Yardımcı Diferansiyel Denklem (Auxiliary Differential Equation-ADE) kullanılarak kayıplı ve dağınık (dispersive) YNR ortamı modellenmiştir [29].

Reineix, NETLANDER YNR sisteminin teorik analizini ve FDTD metodunu derin ortamlar için sunmuştur [30].

Levent Gürel, gerçek YNR ortamının 3 boyutlu geometride FDTD metodu kullanarak iki verici ve bir alıcı ile modellemesini sunmuş, gömülü tek veya çoklu dielektrik hedefleri dikdörtgen prizma ve silindirik disk olarak simüle etmiş ve PML sınır koşullarını bu çalışmalara uydurmuştur [31].

Teixeira, FDTD ve Zaman Bölgesinde Sonlu Eleman (Finite Element Time Domain-FEDT) metodunu, PML ve grid tekniklerini ele almıştır [32].

N.Dib, dikdörtgen dalga kılavuzundan, korumalı dalga kılavuzuna geçişi FDTD metoduyla analiz etmiştir. Bu problemin çözümünde FDTD yöntemiyle elde edilen performans, FDTD yönteminin iki farklı ortamdan EM dalganın geçişinde karmaşık yapıları modellemede üstünlüğünü göstermiştir [33].

G.Mur, iki ve üç boyutlu simülasyonlar için emici sınır koşullarının kullanımını göstermiştir. Bu yöntemle daha doğru ve daha gerçekçi sonuç alınabildiğini ifade etmiştir [34].

Bu çalışmada, YNR teorisi incelenmiş ve yeraltının görüntülenmesinde kullanılan modelleme tekniklerinden birisi olan Zaman Bölgesinde Sonlu Farklar (Finite Difference Time Domain-FDTD) tekniği çalışılarak tanıtılmıştır. Bu teknik kullanılarak geliştirilen yazılım ile elde edilen sonuçlar ve değişik durumlar için yapılan modellemeler sunulmuştur.

Bölüm 2’de YNR sistemini etkileyen kayıplar, çevre yankısı/kargaşa (clutter), çözünürlük, modelleme teknikleri, malzeme özellikleri, kullanılan antenler, modülasyon teknikleri ve sinyal işleme özellikleri hakkında genel bilgiler verilmiştir.

Bölüm 3’de YNR sistemlerinin modellenmesinde en çok kullanılan metotlardan biri olan Zaman Bölgesinde Sonlu Farklar metodu incelenmiştir. FDTD metodunda Elektrik Alan (E), Manyetik Alan (H) ve Elektrik Akı Yoğunluğu (D) konum ve zaman değişimleri cinsinden aralarındaki türevsel eşitliklerin ifade edildiği denklemler verilmektedir.

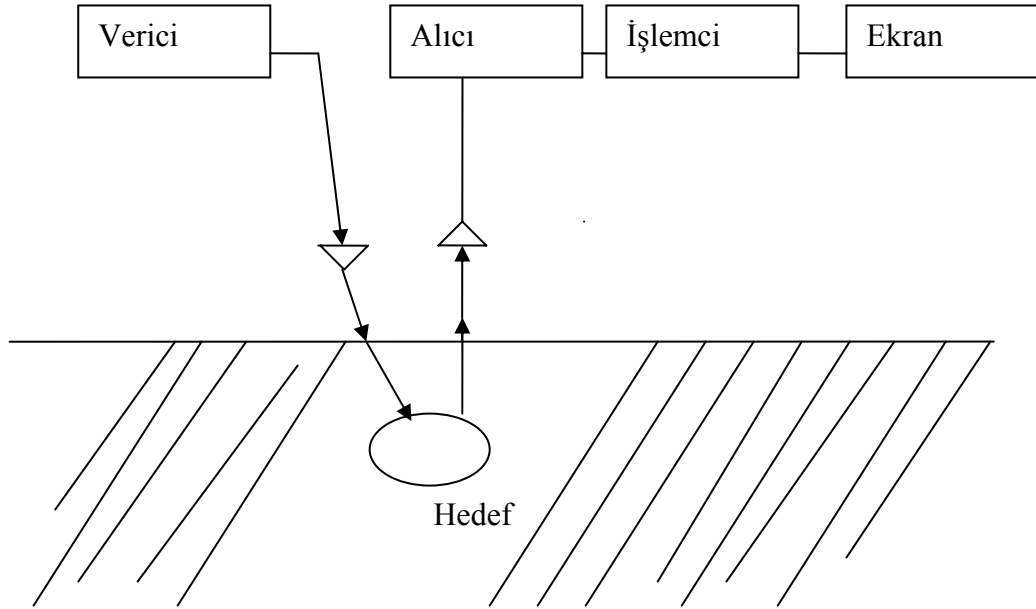
Bölüm 4’de ise bu tez çalışması kapsamında geliştirilen FDTD tabanlı algoritmalar sunulmuş ve alınan sonuçlar karşılaştırılmıştır. FDTD yöntemiyle kaynağın bir Gauss darbesi olması durumu için yapılan çalışmada [3] yer alan yöntemle tez çalışmasına altyapı sağlanmış ve EM dalga denklemi olarak verilen kaynağın boş uzayda yayılımıyla değişimi elde edilmiş, daha sonra kaynak ortamın bir ucuna kaydırılmış ve dalgaının yayılımı incelenmiştir. Daha sonra ortaya bir metal konularak yansıma olduğu görülmüştür. Dielektrik katmanlar oluşturulmuş daha sonra bu katmanlar varken ortama metal ve dielektrikler konularak elde edilen sonuçlar incelenmiştir. En son olarak yansıma sayesinde konulan nesnelerin görüntülenmesi için algoritma geliştirilmiştir. Geliştirilen yöntemler ile elde edilen görüntüler verilerek her bir görüntü yorumlanmıştır.

Bölüm 5’de ise algoritmayla elde edilen sonuçlar yorumlanmış ve tezde FDTD metoduyla geliştirilen yöntemle simülasyon ortamında elde edilen sonuçlar yorumlanmış ve çalışmanın devamı olabilecek faaliyetler ifade edilmiştir.

2. YERE NÜFUZ EDEN RADAR

2.1. Tanımı

YNR'nin gezegen keşfinden gömülü mayınların tespitine kadar geniş kullanım alanları bulunur. YNR'de kullanılacak frekansın modülasyon tipi, anten tipi ve polarizasyonun seçimi, hedefin şekline veya boyutuna, ortamın iletim özelliklerine, çalışma gereksinimlerine, maliyete ve yüzey karakteristiklerine olmak üzere bir çok faktöre bağlı olduğu bilinmektedir [1].

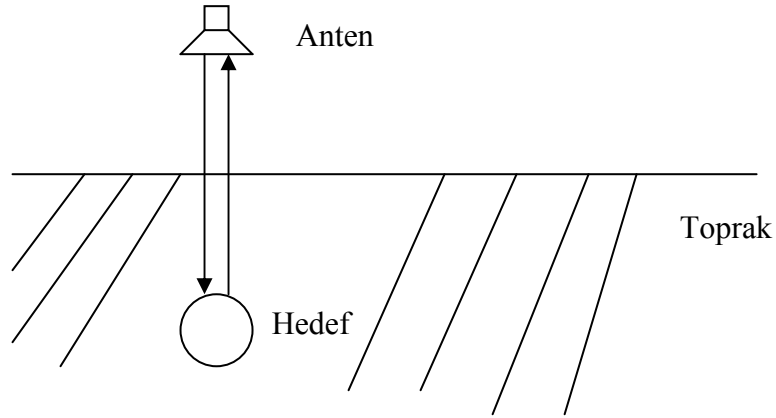


Şekil 2.1. YNR sisteminin blok diagramı

YNR sistemine ait genel blok diagramı Şekil 2.1'de görülmektedir. Enerji kaynağı, genlik veya frekans modüleli dalga şekli veya gürültü sinyali olabilir.

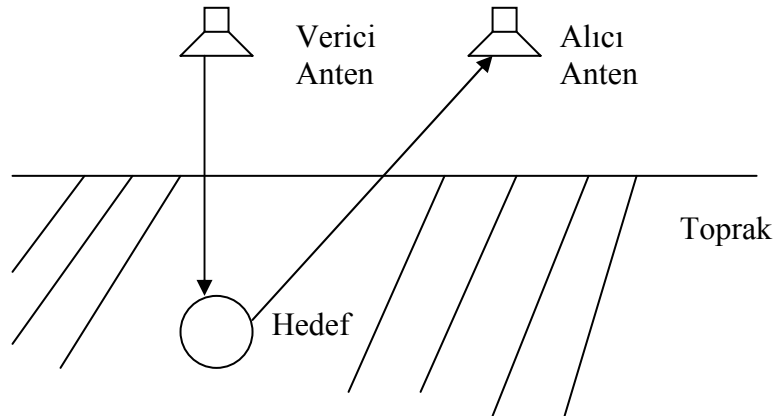
YNR sistemi monostatik durum ve bistatik durum olmak üzere iki şekilde ifade edilir.

Monostatik durum: Verici ve alıcı antenin aynı noktada bulunması durumudur. Sinyal aynı antenle gönderilip, aynı antenle alınır. Genel blok diagramı Şekil 2.2.'de gösterilmektedir [6].



Şekil 2.2. Monostatik durum blok diagramı

Bistatik durum: Verici ve alıcı antenin farklı açısal konumlarda olma durumudur. Sinyal bir antenle gönderilip, diğer konumdaki farklı bir antenle alınmaktadır (Şekil 2.3.) [6].



Şekil 2.3. Bistatik durum blok diagramı

Çalışma esnasında band genişliği, darbe tekrarlama frekansı (Pulse Repetition Frequency- PRF) ve ortalama güç, yol kaybına ve hedefin boyutlarına bağlıdır.

Menzil performansı, yol kaybına, hedefin yansıtıcılığına, çevre yankısı/kargaşaya ve sistemin dinamik aralığına bağlıdır [1].

2.1.1. Yol kayıpları

YNR'nin menzili toplam yol kaybına bağlı olup, malzeme kaybı, yayılma kaybı, hedef yansıtma kaybı ve saçılma kaybına bağlıdır. Bununla ilgili toplam yol kaybı belirli bir mesafe için aşağıdaki eşitlikle verilir;

$$L_T = L_e + L_m + L_{t1} + L_{t2} + L_s + L_a + L_{sc} \quad (2.1)$$

Burada;

L_e = anten etkinlik kayıpları (dB)

L_m = anten uyum kayıpları (dB)

L_{t1} = havadan malzemeye transmisyon kaybı (dB)

L_{t2} = malzemedan havaya geri transmisyon kayıpları (dB)

L_s = anten saçılma kayıpları (dB)

L_a = malzemenin zayıflama kaybı (dB)

L_{sc} = hedef saçılma kaybı (dB)'dir.

Burada iletim kayıpları (L_{t1}) ortam ve havanın karakteristik empedansına (Z_o), ortamın kayıp tanjantına ($\tan \delta$), ortamın dielektrik sabitine (ϵ) ve manyetik geçirgenliğine (μ) bağlıdır.

Anten saçılma kaybı (L_s) ise antenin kazancına (G), radar kesit alanına (RKA), anten açıklığına (A_r) ve mesafeye (R) bağlıdır.

Hedef saçılma kaybı (L_{sc}) tabakaların karakteristik empedanslarına ve RKA değerine bağlıdır.

Malzemenin zayıflatma kaybı (L_a) ise μ , ϵ , δ ve R mesafesine bağlıdır.

2.1.2. Çevre yankısı/kargaşa (clutter)

Hedefin saçılma karakteristiğinden bağımsız olarak YNR görüntüsünü etkileyen sinyallere çevre yankısı/kargaşa (clutter) denir. Klasik radar kargaşasından oldukça farklıdır. Klasik radarlarda, Hareketli Hedef Göstergesi (Moving Target Indicator-MTI) ile filtrelenir. Ancak bu çözüm YNR'ye uygulanabilir değildir.

Antenden gelen sinyalin yer yüzeyindeki kırılmaları çevre yankısına sebep olabilir. Çevre yankısı da anten konfigürasyonuna göre değişir. Kırılma seviyesinin daha sabit olduğu paralel düzlemsel dipol anten çevre yankısına karşı tercih edilir [1].

Yerin karakteristik empedansındaki değişimler de çevre yankısına sebep olabilir. Ayrıca anten yan kulakçıklarındaki hedeften gelen yansımalar da, yer yüzünün üstünde bile problem oluşturabilir. Bu problem antenden gelen yan ve arka kulakçık radyasyonunu zayıflatacak iyi bir anten tasarımı ve radar zayıflatıcı malzeme ile çözülür [1].

2.1.3. Derinlik çözünürlüğü

Yol tabakası kalınlığı ölçümünde kullanılan yüzey altı radarlarında derinliği hassas bir doğrulukla belirlemek için alınan dalganın iki ucu arasında geçen zaman ölçülür ve yayılım hızı doğru olarak bilinmek şartıyla ön yüzey yansımada geçen referans zaman kullanılır. Ancak gömülü boru ve kabloların tespitinde alınan dalganın bant genişliğinin bilinmesi önemlidir. Alınan sinyalin bant genişliğinde yeryüzü yayılan

alanın elektriksel özelliklerine göre alçak geçiren filtre gibi davranır. Bant genişliğini bulmak için alınan sinyalin güç spektrumunu belirlemek önemlidir. Bunun bir yolu otokorelasyon fonksiyonunu bulmaktır. Eğer $f(t)$ bir dalga şekli ise, otokorelasyon fonksiyonu;

$$R_{11} = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) f(t - \tau) d\tau \quad (2.2)$$

denklemleri ile verilir. Bu fonksiyon alınan dalga'nın güç spektrumuyla ilgilidir ve gerekli bant genişliğinin belirlenmesine yardımcı bir parametredir. Bu eşitlikte t zamanı ve τ ise zamandaki kaymayı ifade eder [1].

2.1.4. Plan çözünürlüğü

Aynı derinlikte birden fazla tespit edilecek hedefin olması durumunda ve yeri belirlenmiş hedeflerin araştırıldığı durumlarda kullanılan çözünürlük parametresine plan çözünürlüğü denir. Bölgesel doğruluk hassasiyetinin önemli olduğu topografik keşif çalışmalarında kullanılır. Genel olarak iyi bir plan çözünürlüğü için yüksek kazançlı büyük açıklıklı bir anten gereklidir.

Bir teçhizat seçiminde plan çözünürlüğü, anten boyutu, sinyal işleme özelliği ve malzemeye nüfuz etme özelliği önemlidir [1].

2.2. Modelleme Tekniği

YNR'de kullanılan modelleme teknikleri Moment Metodu (MOM), ışın işleme [1] ve FDTD metodu [3, 4 ve 5] olup, bunlardan FDTD yöntemi Bölüm 3'de özetlenmiştir.

En temel modelleme metodu bile, radar menzil eşitliğini kullanır. Modelleme metotları alınan sinyal seviyesinin dinamik aralığının ve tespit olasılığının

değerlendirilmesine izin verirler. Anten yakın alanda çalışsa bile hesaplamalarda kolaylık olması için uzak alan modelleri kullanılır.

Genel olarak YNR sistemlerinin modellenmesinde kullanılan modelleme metodları aşağıda sunulmuştur;

- Alınan sinyal seviyesi ve tespit olasılığı,
- Temel iletim hattı zaman bölgesi modeli,
- Anten ışınlımı ve gömülü hedef etkileşim modeli,
- FDTD modeli.

2.3. Malzeme Özellikleri

Hedef olabilecek bazı malzemelerin temel dielektrik değerleri Çizelge 2.1’de verilmiştir.

Çizelge 2.1 Çeşitli malzemelerin 100 MHz’deki tipik dielektrik özellikleri

Malzeme	İletkenlik (S/m) (σ)	Geçirgenlik (F/m) (ϵ)
Hava	0	1
Kuru Asfalt	$10^{-2}:10^{-1}$	2-4
Islak Asfalt	$10^{-3}:10^{-1}$	6-12
Kuru Kil	$10^{-1}:10^0$	2-6
Islak Kil	$10^{-1}:10^0$	5-40
Kuru Kömür	$10^{-3}:10^{-2}$	3,5
Islak Kömür	$10^{-3}:10^{-1}$	8
Kuru Beton	$10^{-3}:10^{-2}$	4-10
Islak Beton	$10^{-2}:10^{-1}$	10-20
Taze su	$10^{-6}:10^{-2}$	81
Taze su buz	$10^{-4}:10^{-3}$	4
Kaya tuzu	$10^{-4}:10^{-2}$	4-7
Kuru kum	$10^{-7}:10^{-3}$	2-6
Islak kum	$10^{-3}:10^{-2}$	10-30

2.3.1. Dielektrik malzemelerde elektromanyetik dalganın yayılımı

Elektromanyetik dalga (Helmholtz) denklemi aşağıdaki formülle temsil edilir:

$$\nabla^2 E + k^2 E = 0 \quad (2.3)$$

Ayrıca dalganın yayılım hızı:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}} \quad (2.4)$$

olmaktadır. Işık hızı,

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0\epsilon_0}} \quad (2.5)$$

ile verilir. Burada,

Uzayın manyetik geçirgenliği $\mu_0 = 1.26 \times 10^{-6} \text{ H/m}$

Uzayın dielektrik sabiti $\epsilon_0 = 8.86 \times 10^{-12} \text{ F/m}$

Bağıl manyetik geçirgenlik $\mu = \mu_0 \mu_r$

Bağıl dielektrik sabiti $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$

olmaktadır. Ortamın karakteristik empedansı;

$$\eta = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad (2.6)$$

olur. Boşluk için bu değer;

$$\eta_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 120\pi = 377\Omega. \text{ 'dur.}$$

Kayıpsız bir ortamda z yönünde ilerleyen düzlemsel dalganın elektrik alan ifadesi,

$$E(z) = E_0 e^{-jkz} \quad (2.7)$$

olur. Faz sabiti,

$$k = \frac{\omega}{v} = \omega \sqrt{\mu\epsilon} \quad \text{m}^{-1} \quad (2.8)$$

$$k\lambda = 2\pi$$

olur. Dalga boyu ise,

$$\lambda = \frac{2\pi}{\omega \sqrt{\mu\epsilon}} \quad (2.9)$$

olur. Burada karmaşık geçirgenlik ϵ , ve karmaşık iletkenlik σ 'nın tanımı aşağıdaki şekilde yapılabilir;

$$\epsilon = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (2.10)$$

$$\sigma = \sigma' - j\sigma'' \quad (2.11)$$

Buna göre kayıplı bir ortamda z yönünde ilerleyen bir dalganın zamanla değişimi;

$$E(z,t) = E_0 e^{-\alpha z} e^{j(\omega t - kz)} \quad (2.12)$$

olarak elde edilir. Faz sabiti,

$$k = \omega \sqrt{\mu(\epsilon' - j\epsilon'')} \quad (2.13)$$

$$jk = \alpha + j\beta = j\omega\sqrt{\mu\varepsilon' \left(1 - \frac{j\varepsilon''}{\varepsilon'}\right)} \quad (2.14)$$

olmaktadır.

Burada zayıflama katsayısı,

$$\alpha = \omega\sqrt{\left[\frac{\mu\varepsilon'}{2}\sqrt{1 + \frac{(\varepsilon'')^2}{\varepsilon'}} - 1\right]} \quad (2.15)$$

ve yeni faz sabiti,

$$\beta = \omega\sqrt{\left[\frac{\mu\varepsilon'}{2}\sqrt{1 + \frac{(\varepsilon'')^2}{\varepsilon'}} + 1\right]} \quad (2.16)$$

olur. Ayrıca önemli bir faktörde $\tan \delta$ 'dır. $\tan \delta$ 'ya ortamın kayıp tanjantı denir. Yani,

$\tan \delta$ genel olarak iletkenlik kayıplarından oluşmaktadır ve aşağıdaki denklemlerle ifade edilir.

$$\tan \delta = \frac{\sigma' + \omega\varepsilon''}{\omega\varepsilon' - \sigma''} \quad (2.17)$$

$$= \frac{\sigma_{dc}}{\omega\varepsilon_0\varepsilon_r} + \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \quad (2.18)$$

$$\approx \frac{\sigma'}{\omega\varepsilon''} \quad (2.19)$$

Genel olarak dalganın dielektrik bir ortamda yayılımında bu denklemler kullanılır [1].

2.3.2. Su ve buzun dielektrik özellikleri

500 MHz üzerindeki frekanslarda, kaya ve topraklardaki temel kayıp mekanizması, gözeneklerdeki mevcut su tarafından enerjinin emilmesidir. Bu özellikler Debbye tarafından açıklanmıştır.

$$\varepsilon_e' = \varepsilon' \quad (2.20)$$

ve

$$\sigma_e' = \sigma_{dc} + \omega \varepsilon'' \quad (2.21)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon(\omega) &= \varepsilon' + j\varepsilon'' \\ &= \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + j\omega\tau} \end{aligned} \quad (2.22)$$

(2.22) eşitliği Debbye formülü olarak bilinir. Burada

ε_∞ = yüksek frekans geçirgenliği,

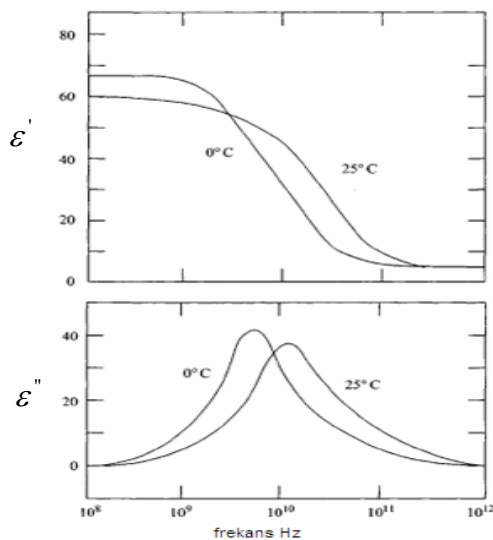
ε_s = düşük frekans geçirgenliği,

τ = suyun yavaşlama zamanı,

ε_e = reel etkin dielektrik sabiti,

σ_e = reel etkin iletkenlik,

değerlerini göstermektedir. Şekil 2.4 ε' ve ε'' dielektrik katsayılarının farklı sıcaklıklarda frekansa göre değişimini gösterir [1].



Şekil 2.4. İki farklı sıcaklıkta dielektrik spektrumu [1]

2.3.3. Toprak ve kayanın dielektrik özellikleri

Kayaları ölçme işlemi çözünürlüğün önemli olmadığı derin mesafelerde önemlidir. Daha düşük frekans kullanımı (0,1-1 MHz) yere nüfuzu arttırır.

Tabakalı malzeme için, elektrik alanın paralel olduğu durumda tabakalı malzemenin geçirgenliği ε_r ;

$$\varepsilon_r = (1 - p)\varepsilon_m + p\varepsilon_\omega \quad (2.23)$$

olarak verilir. Burada,

ε_m = matrisin geçirgenliği

ε_ω = suyun geçirgenliği

p = gözeneklilik (porosity) oranıdır.

Eş. 2.22 elektrik alanın dikey olduğu durum için ise;

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon_m \varepsilon_\omega}{(1 - p)\varepsilon_m + p\varepsilon_\omega} \quad (2.24)$$

olarak verilir. Burada,

$$p = \frac{c}{v^2} = -\frac{\varepsilon_m}{\varepsilon_m - \varepsilon_\omega} \quad (2.25)$$

olmaktadır. Toprak; hava, parçacık ve sudan oluşur. Bu nedenle hesaplama prosedürü çeşitli parametreleri ele almayı gerektirir. Bunlar, frekans, suyun hacmi, havanın hacmi ve iletkenliğidir.

YNR sistemi sayesinde toprağın özellikleri belirlenebilir. Çünkü YNR sürekli bir yüzey altı kaydı sağlar ve böylece toprak sınıflandırılabilir, karakterize edilebilir ve haritalanabilir [1].

2.4. Antenler

YNR radarları sistem tasarımcılarına anten tipiyle ilgili önemli kısıtlamalar getirirler. Dalganın yayılım yolu, genel olarak kayıplı, homojen olmayan, dielektrik, anizotropik ortam içerir ve frekansa bağlı olarak zayıflama sergiler ve alçak geçiren filtre gibi davranır. Bu nedenle sistemin üst çalışma frekansı yani anten ortamın dielektrik özellikleri tarafından sınırlanır. Yüksek menzil çözünürlüğü elde etmek için Aşırı Geniş Bant (Ultra Wide Band-UWB) antene, uyarıcı (impulsive) radar sistemlerine ve doğrusal faz cevabına ihtiyaç vardır. Bu kısıtlamalar çözünürlüğe ve menzile bağlı olarak 10MHz - 5GHz arası frekans aralığında çalışmayı gerektirir. Taşınabilir kullanım için küçük antenler dolayısıyla düşük kazançlar ve geniş 3 boyutlu ışıma örüntüsüne ihtiyaç vardır. Bir anten seçiminde;

Geniş band genişliği,
Düşük zaman yan kulakçıkları (lobe),
Ayrı verici ve alıcı anten,
Düşük çapraz kuplaj seviyeleri,

faktörleri önemlidir.

Radar sistemi zamana bağlı bir sistem olup, antene uyarı sinyali sağlar. Radar sistemi frekans modüleli ise horn veya spiral anten kullanılır.

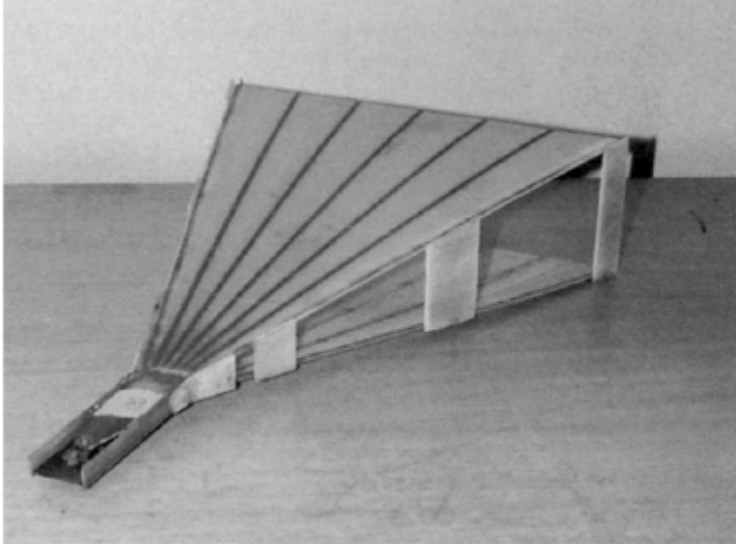
Antenin kayıplı yarı uzay bir ortam veya tam olarak kayıplı bir ortama nüfuzu konusunda genel durumu YNR konusunda çalışanların göz önünde bulundurması gereken bir konudur [1].

2.4.1. Eleman antenleri

Monopol ve dipol antenler, konik ve bow-tie antenler YNR uygulamalarında kullanılır. Genel olarak lineer polarizasyon, düşük yönlülük, sınırlı bant genişliği ile karakterize edilirler [1].

2.4.2. TEM dalga antenleri

Bu tip antenler iletken çifti içerirler ve düz, silindirik, konik ve v-yapılı olabilirler. Dayanıklı (rezistif) sonlandırma kullanılmasına rağmen bu tip antenler, 10-15 dB'lik yönlülüğe sahiptirler ve 3-5 dB civarında sonlandırma kaybıyla bile önemli kazanç sağlarlar. Tipik bir TEM dalga anteni Şekil 2.5'de verilmiştir [1].

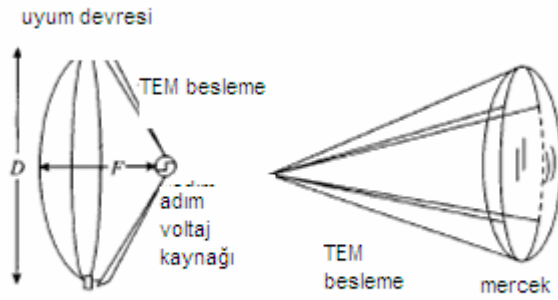


Şekil 2.5. Tipik bir TEM dalga anteni

2.4.3. Darbe yayımlayıcı antenler (Impulsive Radiating Antenna-IRA)

Darbe Yayımlayıcı Antenler (Impulsive Radiating Antenna-IRA) odaklanmış açıklıklı UWB antenler olup, oldukça kısa elektromanyetik darbe yayarlar. Darbe Yayımlayıcı Anten otlu ortama nüfuz edebilir, düşman hedefini tanımlayabilir, gömülü nesneyi

tespit edebilir ve geniş bant karıştırma yapabilir. Tipik bir Darbe Yayınlayıcı Anten bir reflektör anteni olup, odak noktasında paralel bağlı konik transmisyon hatları çifti tarafından beslenir. Geniş çaplı bir reflektör anteni, uyarıcı ışıma üretebilir. Genlik olarak 4-5 kV/m civarında, yaklaşık 300 m. civarında 200 ps darbe süresinde spektrumu 50 MHz'den GHz'ler mertebesine kadar uzanır. Örnek bir Darbe Yayınlayıcı Antenin jenerik gösterimi Şekil 2.6'da verilmiştir [1].



Şekil 2.6. IRA anteninin jenerik yapısı

2.4.4. Frekanstan bağımsız antenler

Geometrik olarak açılarla tanımlanabilen bu tip antenler boydan boya yapısı boyunca frekans setlerinin üzerinde performans gösterirler. Tipik örnekleri bikonik dipol, spiral anten ve konik spiraldir.

Bu tip antenlerin uyarı cevabı büyük değerlerde olup, genellikle cıvıltı (chirp) dalga şekliyle sonuçlanır. Bunun ana sebebi anten yapısı boyunca seyahat eden akımlar için kat edilen zamanın sonucu olarak yüksek frekansların zamanda düşük frekanstan önce yayılması ve ışımanın olduğu bölgeye daha erken varmasıdır.

Tipik bir spiral antenin yapısı Şekil 2.7'de verilmektedir [1].



Şekil 2.7. Spiral antenin yapısı

2.4.5. Horn antenler

Horn anteni Frekans Modüleli Sürekli Dalga yüzey nüfuzlu radarlarda kullanılmakta olup, daha yüksek çalışma ve yavaşlama (relaxation) gereksinimi olduğunda kullanımına başvurulur. Basit bir horn antenin karakteristik empedansı;

$$z = z_0 e^{kx} \quad 0 < x < \frac{1}{2} \quad (2.26)$$

olarak verilir. Burada,

z_0 = dalga kılavuzunun karakteristik empedansı

k = başlangıç ve bitiş noktalarının empedanslarının ortalamasıdır [1].

2.4.6. Dizi antenler

İnşaatlarda, yol keşfi ve mayın tespitinde kullanılmak üzere tasarlanır. İki tasarım yaklaşımı vardır. Birincisi tek sayıda bir kanallı radarı esas alıp diğerlerini ona uydu yapar. Diğer yaklaşım ise SAR işlenmesi ve çoklu görüntüleri birleştirerek sunulan entegre anten dizisi yaklaşımıdır. 16 kanallı dizi antenin blok diagramı Şekil 2.8’de gösterilmektedir [1].

Sentezörlü Darbe Modülasyonu (Synthesized Pulse Modulation-SPM), Holografik Modülasyon (Holographic Modulation-HM) ve Gürültü Modülasyonu (Noise Modulation-NM)dur.

Frekans bölgesi ile zaman bölgesi arasındaki ilişki Fourier dönüşümü ile sağlanır. Bu ilişki;

$$F(f(t)) = F(\omega) \quad (2.27)$$

ve denklem olarak;

$$F(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{j\omega t} dt \quad (2.28)$$

şeklinde verilmiştir [1].

2.5.1. Aşırı geniş bant (Ultra wide band-UWB) sinyalleri

UWB sinyalleri, genel saçılma merkezlerinden gelen cevaplardan veya hedefin büyüklüğünden çok daha küçük hedef özelliklerinden yüksek çözünürlüklü ölçümlere izin vermek için kullanılır. Radar, sonar, ultrason ve diğer aktif ölçüm sistemleri bu sinyalleri kullanır.

Yer Ölçüm Radarı (Ground Probing Radar) sistemi denilen bir tipik ölçüm sistemi, UWB sinyalini yerin altına gönderir ve hedeften gelen zayıf sinyalleri tespit eder. Bu hedef, dielektrik silindir (mayın) olabilir. UWB ölçüm işlemi Şekil 2.10'da verilmiştir.

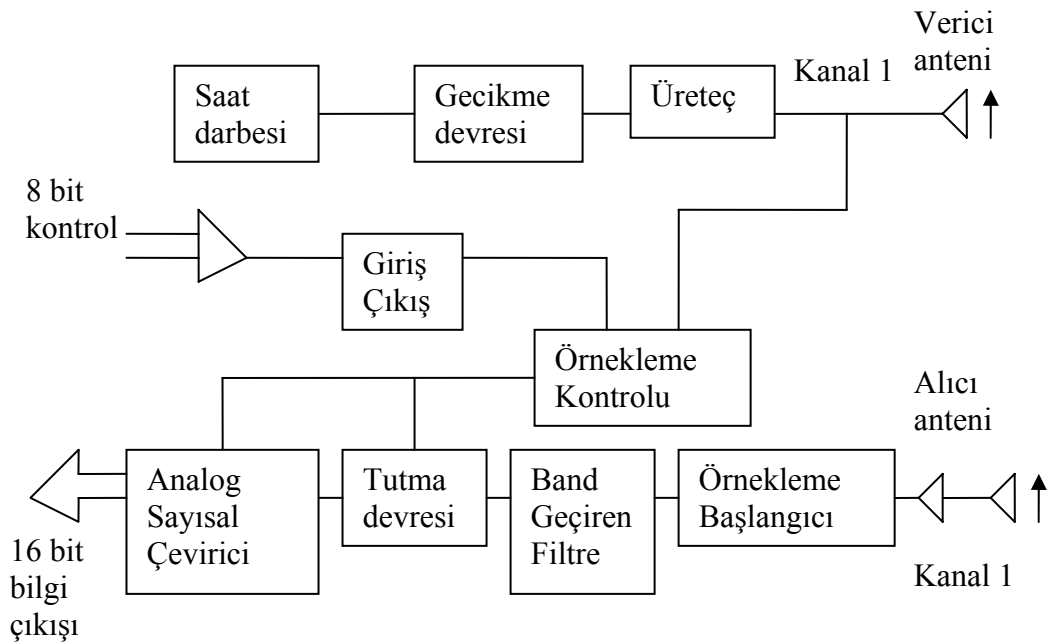


Şekil 2.10. UWB ölçüm işleminin diyagramı

Hedefleri tespit için ölçüm kabiliyeti dalga şeklinin tipine ve alıcının tespit işlemine bağlıdır. Alınan sinyal seviyeleri, kayıplı ortamın zayıflamasına ve hedeflerin RKA değerine bağlıdır. Hedef küçüldükçe yansıyan sinyal seviyesi küçülebilir [1].

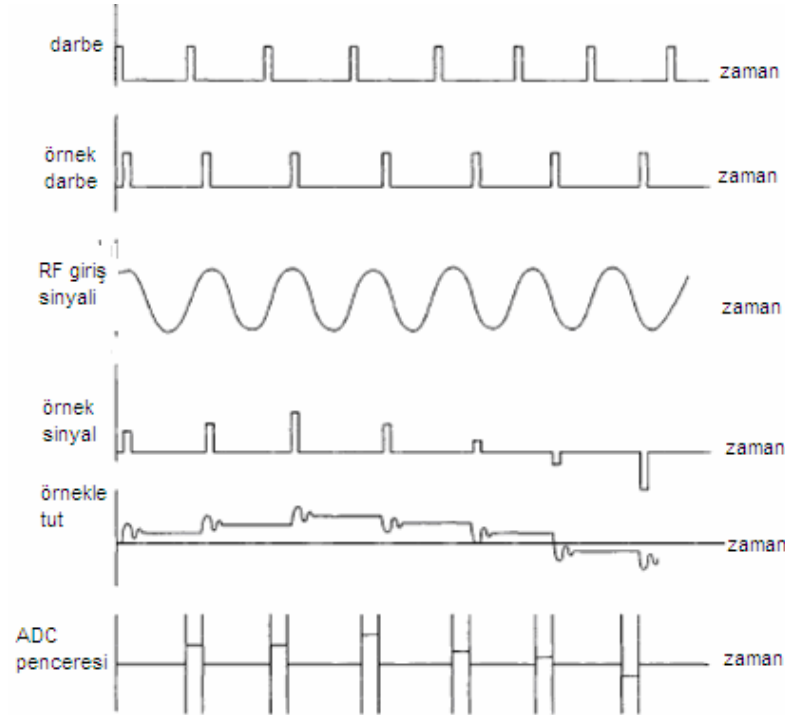
2.5.2. Genlik modülasyonu

YNR radar sistemlerinin çoğunluğu, radyo frekans enerji darbelerini temel band, video olarak taşıyıcısız darbe, tek devir (monocycle) veya çoklu devir (polycycle) olarak kullanır. Genlik modülasyonu alıcı verici basit diagramı Şekil 2.11’de verilmektedir. Burada 20V - 200V genliğinde, 200ps - 50ns darbe genişliğinde bir darbe dizisi verici antene uygulanmaktadır [1].



Şekil 2.11. AM modülasyonu alıcı verici yapısı

Bu modülasyonun darbe zamanlama diagramı Şekil 2.12’de gösterilmektedir.



Şekil 2.12. Genlik modülasyonu darbe zamanlama diagramı

Bu devre çok yüksek hızlı “örnekle-tut” devresidir. Örnekle tut devresi örnekleme zamanını saptar. Bu devrenin kontrol sinyali her darbe tekrarlama aralığında arttırılır. Örnek olarak $t=100$ ps.lik örnekleme artışı önceki darbe tekrarlama aralığına eklenerek alınan sinyalin örneklemesine izin verilir.

Bu denklem;

$$T_s = T + nt' \quad n=1' \text{ den } N' \text{ e kadar} \quad (2.29)$$

T: Darbe Tekrarlama Zamanı

t' : Örnekleme Aralığı

N: Toplam Örnekleme Sayısıdır.

Nyquist teoremine göre örnekleme aralığı,

FMCW'nin temel avantajı daha geniş dinamik aralığa, daha düşük gürültü faktörüne (noise figure) ve daha yüksek ortalama güce sahip olmasıdır. Ayrıca daha çeşitli antenlerde (horn, logaritmik vb.) kullanılabilir.

FMCW radar sistemi sürekli değişen taşıyıcı dalgayı gerilim kontrollü osilatör üzerinden seçilen frekansla gönderir. Alınan sinyal, gönderilen dalga şekliyle karıştırılır ve alınan sinyalin fazıyla ilişkili farklı bir frekansla sonuçlanır.

FMCW radarında verici zamanın bir fonksiyonu olarak değişir. Eğer değişim doğrusal ise ve hedeften T_d zamanında döndüğü kabul edilirse;

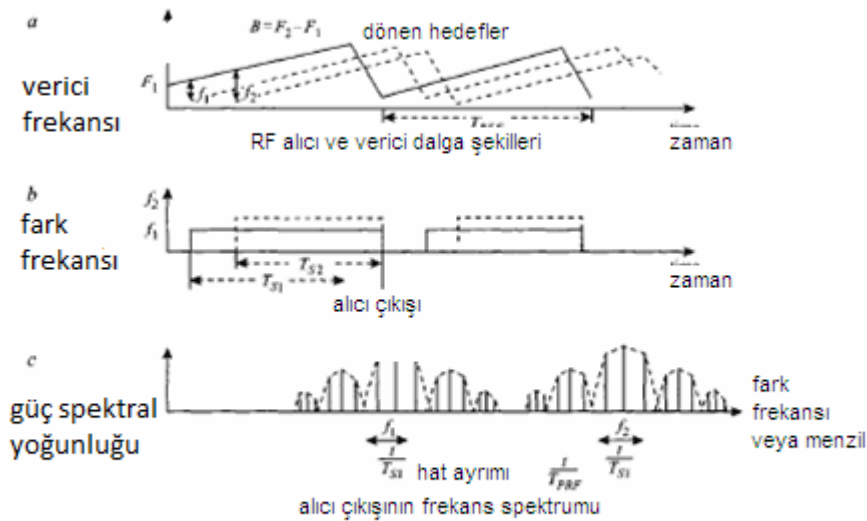
$$T_d = 2R/c \quad (2.32)$$

olarak elde edilir. Burada,

R: menzil

c: ışık hızıdır.

Eğer hedeften dönen sinyal verici sinyali ile karıştırılırsa ara frekans (IF) üretir. Şekil 2.14 FMCW zamanlama diagramını ve ara frekans dalga şekillerini göstermektedir.



Şekil 2.14. FMCW zamanlama diagramı ve ara frekans dalga şekilleri

Burada F_1 ve f_1 giden dalganın frekansının zamanla değişimini ve F_2 ve f_2 dönen dalganın frekansının zamanla değişimini, $B = F_2 - F_1$ bant genişliğini, T_{s1} giden dalganın periyodunu ve T_{s2} dönen dalganın periyodunu ifade etmektedir.

Ara frekans,

$$f = \frac{4Rf_m\Delta f}{c} \quad (2.33)$$

eşitliği ile elde edilir. Eş. 2.33'te,

f_m : Modülasyon frekansı (Hz)

Δf : Frekans sapması

R : Menzil

c : Işık hızıdır [1].

2.5.4. Diğer Modülasyon Tipleri

Bu temel modülasyonlara ilave olarak, YNR uygulamalarında kullanılan diğer modülasyon çeşitleri olarak;

- a. Sentezörlü veya adım frekanslı radar,
- b. Gürültü modüleli radar,
- c. Tek frekans metotları,
- d. Polarizasyon modülasyonu mevcuttur [1].

2.6. Sinyal İşleme

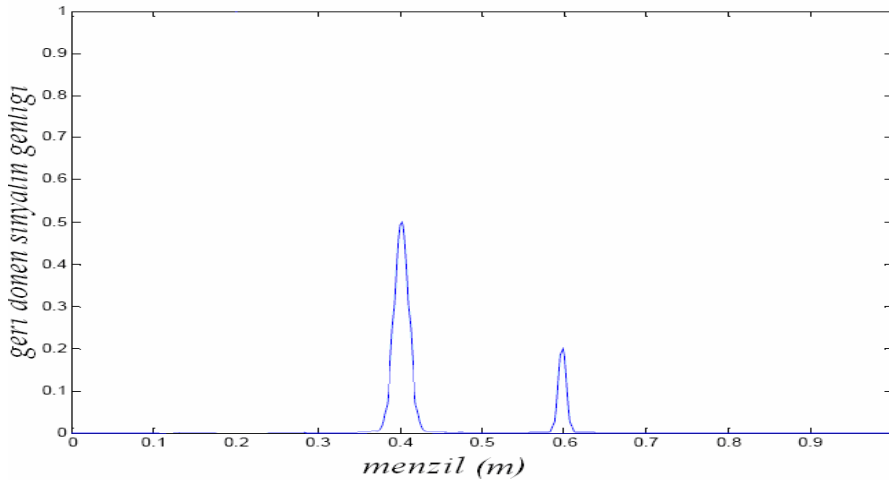
Genel olarak sinyal işleme tekniğiyle hedef tespitinde sinyal-gürültü oranı anahtardır. Çoğu sistemde ortalama alınarak YNR sisteminin gürültüsü azaltılabilir. YNR görüntüsü kargaşa ile bozulmaktadır ve onun azaltılması önemli konudur.

YNR radarı tarafından gömülü hedefin görüntüsü, onun geometrik şeklinin karşılığı değildir. Bunun sebebi hedefin fiziksel boyutu ve radyasyonun dalga boyu oranıyla ilgilidir. Uygulamada köşe yansımaları, görüntüde parlak noktaları oluşturur. Sinyal işleme teknikleriyle bu parlaklıklar giderilir.

Bu bölümde YNR sinyal işleme tekniklerinden A tarama, B tarama ve C tarama yöntemleri tanıtılmaktadır [7].

2.6.1. A tarama

YNR görüntülemeye ilk tarama A taramadır. A tarama; tek bir noktada verici antenden gönderilen darbe sinyalinin, monostatik veya bistatik olarak alınması ve bu sinyalin genliğinin yorumlanmasıdır. Gönderilen bu sinyalin, hareket ortamının özelliği bilindiği sürece, doğru bir şekilde ifade edilmesi mümkün olur. Yatayda 20 cm ve 40 cm'ye yerleştirilmiş iki hedef için elde edilen A tarama menzil profillerinin grafiksel gösterim Şekil 2.15'de gösterilmektedir [7].

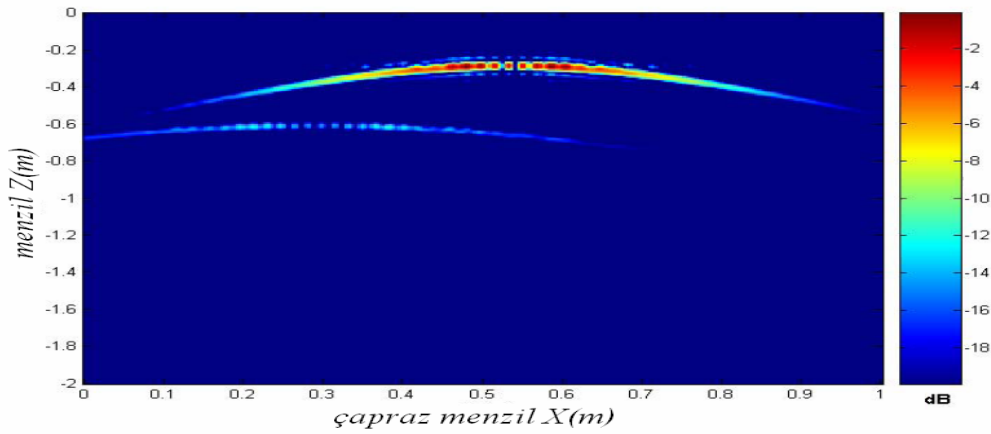


Şekil 2.15. İki adet hedef için A tarama sonrası menzil profili [7]

2.6.2. B tarama

B-tarama kısaca A-taramaların ardı ardına eklenmesi şeklinde ifade edilebilir. B-taramada, bir hat boyunca, her bir yapay aralıkta A-tarama verileri toplanarak, iki

boyutlu (2-B) bir matris elde edilir. Bu iki boyutlu matris 2-B bir görüntü olarak karşımıza çıkar. 2-B bir uzayda yerleştirilmiş iki adet noktasal hedef için, B-tarama sonrası elde edilen görüntü Şekil 2.16'daki gibi çıkacaktır. Burada menzil olarak tanımlanan ifade antenden olan uzaklığı gösterirken, çapraz-menzil olarak tanımlanan da, antenin hareket menzildir. B-taramada, her bir nokta için alınan A-tarama verisinde, hedef menzil mesafesi değiştiğinden 2-B görüntü hiperbolik olarak çıkmaktadır [7].



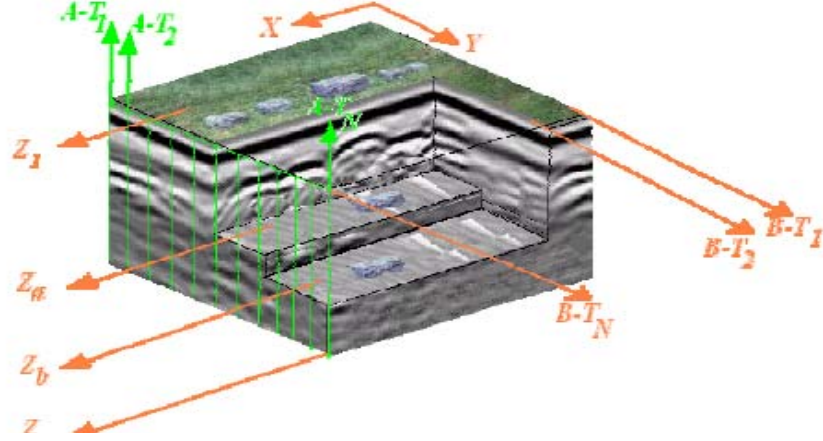
Şekil 2.16. Belirli bir hat boyunca B-tarama sonrası elde edilen menzil profili[7]

2.6.3. C tarama

C-tarama da B-tarama verilerinin ardı ardına toplanması olarak ifade edilebilir. Bir x hattı boyunca her bir noktada A-tarama verilerini toplaması sonrası elde edilen 2-B verinin B-tarama olarak tanımlandığı Bölüm 2.6.2.'de ifade edilmiştir. C-taramada ise bir y hattı boyunca, her bir y noktasında, x hattı boyunca B-tarama verilerinin yan yana toplanması neticesinde elde edilen üç boyutlu (3-B) menzil profilidir.

Yukarıda da bahsedildiği gibi C-tarama sonrası elde edilen veri 3 boyutlu bir veridir. Üç boyutlu bir verinin görüntülenmesi kolay olmadığından, C-tarama verisi genellikle, z derinlik eksenini üzerindeki, ayrık spesifik konumlardaki, yatay x-y dilimlerinin ardışık olarak gösterimi ile görüntülenebilir. Her bir dilim, B-taramanın

dikey eksenine (y) eşdeğer olan belirli bir derinlik seviyesine karşılık gelir. C tarama ile ilgili grafiksel gösterim Şekil 2.17’de sunulmuştur [7].



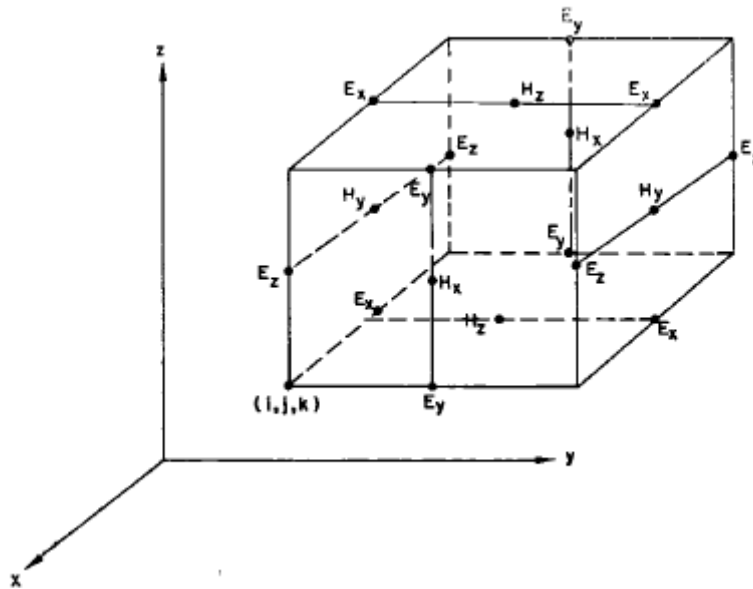
Şekil 2.17. C-tarama grafiksel gösterim [7]

3. ZAMAN BÖLGESİNDE SONLU FARKLAR (FDTD) METODU

Bu bölümde, Zaman Bölgesinde Sonlu Farklar (Finite Difference Time Domain-FDTD) metodu [2-6] tanıtılarak, bir, iki, ve üç boyutta simülasyonlarda kullanılacak olup, ilgili denklemler sunulacaktır. Özel durumlar ve emici sınır koşullarından (Absorbing Boundary Conditions-ABC) da bahsedilecektir.

FDTD Metodu ilk olarak Kane S.Yee tarafından 1966 yılında başlatılmıştır. Yee, Maxwell denklemlerini sonlu diferansiyel denklemlere dönüştürerek, uzayın bir noktasındaki elektrik ve manyetik alan bileşenlerinden birinin bilinmek şartıyla, sonlu fark eşitlikleriyle diğerlerinin de hesaplanabileceğini göstermiştir [27].

FDTD'nin temelini atan Yee, kendi adıyla anılan Yee hücresi kavramıyla üç boyutta zaman ve mesafe adımlarına göre elektrik ve manyetik alan bileşenlerini birbiri cinsinden ifade etmiştir. Yee hücresi Şekil 3.1'de gösterilmektedir. Burada alan bileşenlerinin konumları gösterilmektedir. Buna göre H bileşenleri yüzeylerin merkezinde, E bileşeni ise kenarların ortasında yer almaktadır [27].



Şekil 3.1. Yee hücresi

3.1. FDTD Metoduyla Bir Boyutlu Simülasyon

3.1.1. Bir boyutlu serbest uzay formülü

Zamana bağlı vektörel Maxwell denklemleri aşağıda verilmiştir.

$$\frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = \frac{1}{\epsilon_0} \nabla \times \vec{H} \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = -\frac{1}{\mu_0} \nabla \times \vec{E} \quad (3.2)$$

Yukarıdaki eşitliklerde $\vec{E}$ elektrik alan vektörünü ve $\vec{H}$ manyetik alan vektörünü ifade eder. $\vec{E}$ ve $\vec{H}$ üç boyutlu vektörler olup, genel durumda eşitlik (3.1) ve (3.2) üç eşitliği temsil eder. Burada E_x ve H_y 'yi kullanan basit bir boyutlu durumla başlayacağız, bu durumda;

$$\frac{\partial E_x}{\partial t} = -\frac{1}{\epsilon_0} \frac{\partial H_y}{\partial z} \quad (3.3)$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial t} = -\frac{1}{\mu_0} \frac{\partial E_x}{\partial z} \quad (3.4)$$

olarak elektrik ve manyetik alanın türevsel ifadeleri elde edilir. Burada E_x elektrik alanının x bileşeni, H_y manyetik alanın y bileşeni ve z ise dalga yayılım yönüdür.

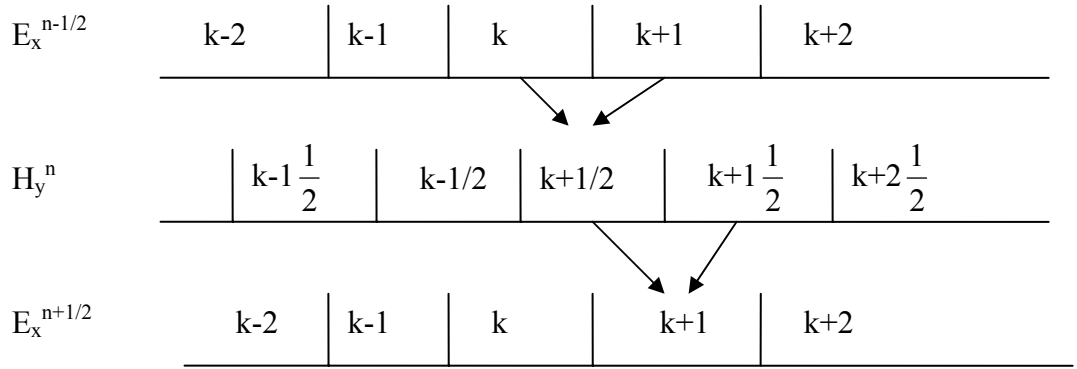
Yukarıdaki eşitliklere merkezi farklar yaklaşımı uygulanırsa,

$$\frac{E_x^{n+1/2}(k) - E_x^{n-1/2}(k)}{\Delta t} = \frac{-1}{\epsilon_0} \frac{H_y^n(k+1/2) - H_y^n(k-1/2)}{\Delta x} \quad (3.5)$$

$$\frac{H_y^{n+1}(k+1/2) - H_y^n(k+1/2)}{\Delta t} = \frac{-1}{\mu_0} \frac{E_x^{n+1/2}(k+1) - E_x^{n+1/2}(k)}{\Delta x} \quad (3.6)$$

eşitlikleri yazılabilir.

Bu eşitliklerde, zaman belirlidir ve n gerçekte her bir zaman adımını gösterir. Yani $t=\Delta t.n$ 'dir. Formülasyon için ayrıklandırılma işlemi neticesinde, n+1 bir zaman adımı sonrası anlamına gelir. Parantez içindeki terim olan k mesafeyi gösterir. Yani $z=\Delta x.k$ 'dır. Eşitlik (3.5) ve (3.6)'da E ve H'nin uzay ve zamanda ayrıklandırıldığı (interleave) kabul edilir. H, k+1/2 ve k-1/2 argümanları H alan değerlerinin E alan değerleri arasında konumlandırıldığını gösterir. Bu durum Şekil 3.2'de gösterilmektedir.



Şekil 3.2. FDTD formülünde E ve H alanlarının uzay ve zamanda ayrıklandırılma (interleave) işlemi.

Eş.3.5'ten

$$E_x^{n+1/2}(k) = E_x^{n-1/2}(k) - \frac{\Delta t}{\epsilon_0 \Delta_x} \left[H_y^n(k+1/2) - H_y^n(k-1/2) \right] \quad (3.7)$$

ve Eş. 3.6'dan

$$H_y^{n+1}(k+1/2) = H_y^n(k+1/2) - \frac{\Delta t}{\mu_0 \Delta_x} \left[E_x^{n+1/2}(k+1) - E_x^{n+1/2}(k) \right] \quad (3.8)$$

ifadeleri elde edilir. Ayrıca elektrik alan şiddeti $\tilde{E}$ olarak normalize edilirse ,

$$\tilde{E} = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \vec{E} \quad (3.9)$$

olarak elde edilir.

Hücre boyutu Δx seçilirse, zaman adımı Δt

$$\Delta t = \frac{\Delta x}{2c_0} \quad (3.10)$$

olarak tanımlanır.

Burada c_0 serbest uzaydaki ışık hızıdır. Böylece;

$$\frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \frac{\Delta t}{\Delta x} = \frac{c_0 \Delta x / 2c_0}{\Delta x} = \frac{1}{2} \quad (3.11)$$

Eş.3.9, Eş. 3.10 ve Eş. 3.11 denklemleri, Eş. 3.7 ve Eş. 3.8’de kullanılırsa, ϵ_r kayıplı bir ortamda elektrik ve manyetik alana ait ifadeler

$$\tilde{E}_x^{n+1/2}(k) = \tilde{E}_x^{n+1/2}(k) + \frac{1/2}{\epsilon_r} [H_y^n(k-1/2) - H_y^n(k+1/2)] \quad (3.12)$$

$$H_y^{n+1}(k+1/2) = H_y^n(k+1/2) - \frac{1}{2} [\tilde{E}_x^{n+1/2}(k+1) - \tilde{E}_x^{n+1/2}(k)] \quad (3.13)$$

olarak elde edilirler [3].

3.1.2. Emici sınır koşulları (Absorbing Boundary Conditions-ABC)

ABC problem olarak seçilen uzaydan yansıyan $\vec{E}$ ve $\vec{H}$ alanları için gereklidir. Normalde $\vec{E}$ alanını hesaplarken $\vec{H}$ 'ı çevreleyen değerlerin bilinmesi gerekir. Bu FDTD metodunun temel kabulüdür. Ancak problem uzayının uç noktasından sonra, bu değerimiz olmayacaktır. Bununla birlikte problem uzayının dışında kaynak olmaması bizim için avantajdır. Bu nedenle problem uzayının ucundaki alanlar dışa doğru yayılmalıdır. Bu iki gerçek kullanılarak uçtaki değer bir sonraki değer kullanılarak tahmin edilmeye çalışılır.

$k=0$ olduğu yerde, uçta sınır koşulu ararken, eğer dalga serbest uzayda ise hızı c_0 ışık hızıdır. Bu nedenle FDTD algoritması adımı;

$$\text{mesafe} = c_0 \Delta t = \frac{c_0 \Delta x}{2c_0} = \frac{\Delta x}{2} \quad (3.14)$$

olur.

Bu eşitlik basitçe, bir dalganın diğer bir hücreye geçmesi için iki zaman adımı gerektiğini gösterir. Kabul edilebilir sınır koşulu,

$$E_x^n(0) = E_x^{n-2}(1) \quad (3.15)$$

şeklindedir [3].

3.1.3. Akım yoğunluğu kullanarak formüllerin yeniden düzenlenmesi

Daha genel şekilde;

$$\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \nabla \times \vec{H} \quad (3.16)$$

$$\vec{D}(\omega) = \varepsilon_0 \varepsilon_r^*(\omega) \vec{E}(\omega) \quad (3.17)$$

$$\frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = \frac{-1}{\mu_0} \nabla \times \vec{E} \quad (3.18)$$

şeklinde yazılabilir. Burada $\vec{D}$ elektrik akı yoğunluğu vektörü ve $\varepsilon_r^*(\omega)$ bağlı dielektriktir. Bu eşitlikler normalize olarak;

$$\tilde{E} = \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}} E \quad (3.19)$$

$$\tilde{D} = \sqrt{\frac{1}{\varepsilon_0 \mu_0}} D \quad (3.20)$$

şeklinde yazılırsa;

$$\frac{\partial \tilde{D}}{\partial t} = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} \nabla \times \tilde{H} \quad (3.21)$$

$$\tilde{D}(\omega) = \varepsilon_r^*(\omega) \tilde{E}(\omega) \quad (3.22)$$

$$\frac{\partial \tilde{H}}{\partial t} = \frac{-1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} \nabla \times \tilde{E} \quad (3.23)$$

denklemlerine ulaşılır. Burada kayıplı dielektrik ortam kabul edersek,

$$\varepsilon_r^*(\omega) = \varepsilon_r + \frac{\sigma}{j\omega\varepsilon_0} \quad (3.24)$$

ve bu denklemi Eş. 3.22’de yerine koyarsak;

$$\vec{D}(\omega) = \varepsilon_r \vec{E}(\omega) + \frac{\sigma}{j\omega\varepsilon_0} \vec{E}(\omega) \quad (3.25)$$

denklemini elde edilir. Burada σ iletkenliği göstermektedir. 1'inci terimi zaman bölgesinde düşünmek kolaydır, çünkü basit bir çarpım olduğundan kolayca zaman bölgesine aktarılabilir. İkinci terimde $1/j\omega$ frekans bölgesi, zaman bölgesinde integrale eşit olduğundan Eş. 3.25 zaman bölgesinde;

$$\vec{D}(t) = \varepsilon_r \vec{E}(t) + \frac{\sigma}{\varepsilon_0} \int_0^t \vec{E}(t') dt' \quad (3.26)$$

olarak elde edilir.

Örnekleştirilmiş zaman bölgesinde integral Δt zaman adımlarının toplamı olup,

$$\vec{D}^n = \varepsilon_r \vec{E}^n + \frac{\sigma\Delta t}{\varepsilon_0} \sum_{i=0}^n \vec{E}^i \quad (3.27)$$

şeklinde yazılabilir. Bu denklem, $\vec{E}$ ve $\vec{D}$, $t = n\Delta t$ zaman sürecinde belirlenmiştir demektir.

$$\vec{D}^n = \varepsilon_r \vec{E}^n + \frac{\sigma\Delta t}{\varepsilon_0} \vec{E}^n + \frac{\sigma\Delta t}{\varepsilon_0} \sum_{i=0}^{n-1} \vec{E}^i \quad (3.28)$$

denkleminde $\vec{E}^n$ yalnız bırakılırsa;

$$\vec{E}^n = \frac{\vec{D}^n - \frac{\sigma\Delta t}{\varepsilon_0} \sum_{i=0}^{n-1} \vec{E}^i}{\varepsilon_r + \frac{\sigma\Delta t}{\varepsilon_0}} \quad (3.29)$$

olarak elde edilir. Bunun anlamı; $\vec{E}^n$ 'in bulunulan zamandaki değeri $\vec{D}$ 'nin değerinden ve $\vec{E}$ 'nin önceki değerlerinden hesaplanabilir demektir. Ayrıca, akım ifadesi

$$I^n = \frac{\sigma \Delta t}{\epsilon_0} \sum_{i=0}^n E^i \quad (3.30)$$

olmaktadır. Bu durumda elektrik alanın değeri

$$E^n = \frac{D^n - I^{n-1}}{\epsilon_r + \frac{\sigma \Delta t}{\epsilon_0}} \quad (3.31)$$

olarak elde edilir. Akımın bir sonraki değeri ise

$$I^n = I^{n-1} + \frac{\sigma \Delta t}{\epsilon_0} E^n \quad (3.32)$$

biçiminde ifade edilir [3].

3.1.4. Frekans bağımlı ortam

Çoğu ortamda, dielektrik sabiti ve iletkenlik frekansla değişir. Darbelerin frekans spektrumu içerdiğine dikkat edilmelidir. FDTD metodunda önemli gelişmelerden birisi de, frekansa bağımlı malzemelerin simüle edilmesidir.

Dielektrik sabiti ve iletkenliği 10-1000 MHz frekans arasında değişen bir ortamı ele alalım. Böyle bir ortam için;

$$\epsilon_r^*(\omega) = \epsilon_r + \frac{\sigma}{j\omega\epsilon_0} + \frac{X_1}{1 + j\omega t_0} \quad (3.33)$$

formülü Debbye formülü olarak adlandırılır.

Eş. 3.33'deki son terimi E alanıyla çarparsak;

$$S(\omega) = \frac{X_1}{1 + j\omega t_0} E(\omega) \quad (3.34)$$

biçiminde olur. Bu terim Debbye terimi olup, zaman bölgesine geçmek için ters Fourier dönüşümü alınır,

$$S(t) = \frac{X_1}{t_0} \int_0^t e^{-(t'-t)/t_0} E(t') dt' \quad (3.35)$$

ve örneklenmiş zamanda gerekli işlemler yapılırsa;

$$S^n = X_1 \frac{\Delta t}{t_0} E^n + e^{-\Delta t/t_0} S^{n-1} \quad (3.36)$$

denklemini elde edilir.

Kayıplı dielektrik için,

$$D^n = \varepsilon_r E^n + I^n + S^n$$

ifadesi açık biçimiyle yazılırsa;

$$D^n = \varepsilon_r E^n + \left[\frac{\sigma \Delta t}{\varepsilon_0} E^n + I^{n-1} \right] + \left[X_1 \frac{\Delta t}{t_0} E^n + e^{-\Delta t/t_0} S^{n-1} \right] \quad (3.37)$$

$$E^n = \frac{D^n - I^{n-1} - e^{-\Delta t/t_0} S^{n-1}}{\varepsilon_r + \frac{\sigma \Delta t}{\varepsilon_0} + X_1 \frac{\Delta t}{t_0}} \quad (3.38)$$

$$I^n = I^{n-1} + \frac{\sigma \Delta t}{\varepsilon_0} E^n \quad (3.39)$$

$$S^n = e^{-\Delta t / t_0} S^{n-1} + X_1 \frac{\Delta t}{t_0} E^n \quad (3.40)$$

formülleri elde edilir [3].

3.2. İki Boyutta FDTD Simülasyonu

Bir boyutta düşünülen Maxwell denklemleri iki boyut için aşağıdaki şekli alır.

$$\frac{\partial \vec{D}_z}{\partial t} = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} \left[\frac{\partial \vec{H}_y}{\partial x} - \frac{\partial \vec{H}_x}{\partial y} \right] \quad (3.41)$$

$$\vec{D}_z(\omega) = \varepsilon^*_r(\omega) \vec{E}_z(\omega) \quad (3.42)$$

$$\frac{\partial \vec{H}_x}{\partial t} = -\frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} \frac{\partial \vec{E}_z}{\partial y} \quad (3.43)$$

$$\frac{\partial \vec{H}_y}{\partial t} = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} \frac{\partial \vec{E}_z}{\partial x} \quad (3.44)$$

Bu denklemler FDTD içinde aşağıdaki formüllerle düzenlenirse;

$$\begin{aligned} \frac{D_z^{n+1/2}(i, j) - D_z^{n-1/2}(i, j)}{\Delta t} &= \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} \left(\frac{H_y^n(i+1/2, j) - H_y^n(i-1/2, j)}{\Delta x} \right) \\ &\quad - \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} \left(\frac{H_x^n(i, j+1/2) - H_x^n(i, j-1/2)}{\Delta x} \right) \end{aligned} \quad (3.45)$$

$$\frac{H_x^{n+1}(i, j+1/2) - H_x^n(i, j+1/2)}{\Delta t} = -\frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} \frac{E_z^{n+1/2}(i, j+1) - E_z^{n+1/2}(i, j)}{\Delta x} \quad (3.46)$$

$$\frac{H_y^{n+1}(i+1/2, j) - H_y^n(i+1/2, j)}{\Delta t} = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} \frac{E_z^{n+1/2}(i+1, j) - E_z^{n+1/2}(i, j)}{\Delta x} \quad (3.47)$$

denklemleri elde edilir [3].

3.2.1. İletken ve dielektrik ortamlarda 2 boyutlu FDTD:

Dielektrik ortamlarda ortamın dielektrik sabitinin ε_r olduğunu kabul edersek Eş.

3.45, 3.46 ve 3.47 denklemlerinin sağ tarafı $\frac{1}{\sqrt{\varepsilon_r}}$ katsayısı ile çarpılır ve denklem bu şekilde yeniden düzenlenebilir.

İletkenliğinde olduğu dielektrik ortamlarda ise Eş. 3.45 aşağıdaki şekli alır;

$$\begin{aligned} D_z^{n+1/2}(i, j) = & \left[\frac{1 - \frac{\sigma \Delta t}{2\varepsilon_0 \varepsilon_r}}{1 + \frac{\sigma \Delta t}{2\varepsilon_0 \varepsilon_r}} \right] D_z^{n-1/2}(i, j) + \frac{\Delta t}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0 \varepsilon_r} \left(1 + \frac{\sigma \Delta t}{2\varepsilon_0 \varepsilon_r} \right)} \\ & \left(\frac{H_y^n(i+1/2, j) - H_y^n(i-1/2, j)}{\Delta x} \right) \\ & - \frac{\Delta t}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0 \varepsilon_r} \left(1 + \frac{\sigma \Delta t}{2\varepsilon_0 \varepsilon_r} \right)} \left(\frac{H_x^n(i, j+1/2) - H_x^n(i, j-1/2)}{\Delta x} \right) \end{aligned} \quad (3.48)$$

Manyetik alan denklemlerine iletkenlik katsayısı yansımamaktadır. Bu denklemden anlaşılacağı iletkenlik parametresi zayıflatıcı bir katsayı olarak EM dalga yayılımını olumsuz etkileyecektir [6].

3.2.2. Mükemmel uyumlu tabaka (Perfect Matched Layer-PML)

Dalga iki boyutta dışa doğru yayılırken, izin verilen uzayın sınırına gelir. Eğer hiçbir şey yapılmazsa yansımalar olur. Bu yansımaların hangisinin gerçek dalga, hangisinin ise işe yaramaz olduğu anlaşılamaz. Bu nedenle ABC, FDTD kullanılırken önemli olup, bu yöntemlerden en esnek ve etkin olanlardan birisi PML metodudur. A ortamında yayılan ve B ortamına geçen bir dalgada yansıma miktarı (Γ) ortamların karakteristik empedansı ile aşağıdaki formülle verilebilir.

$$\Gamma = \frac{\eta_A - \eta_B}{\eta_A + \eta_B} \quad (3.49)$$

Burada η_A ; A ortamının karakteristik empedansı, η_B ; B ortamının karakteristik empedansıdır. Karakteristik empedansın genel ifadesi ise Eş. 3.49'da verilmektedir.

$$\eta = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \quad (3.50)$$

Burada gerekli matematiksel işlemler yapıldıktan sonra elde edilen formüller aşağıda verilmiştir. Öncelikle $\vec{E}$ elektrik alanının zaman ve boyuttaki farkı curl_e olarak tanımlanmış ve

$$\nabla \times \vec{E} = [E_z^{n+1/2}(i, j) - E_z^{n+1/2}(i, j+1)] \quad (3.51)$$

olarak ifade edilmiştir.

$$\begin{aligned} H_x^{n+1}(i, j+1/2) = & H_x^n(i, j+1/2) + \frac{c_0 \cdot \Delta t}{\Delta x} \nabla \times \vec{E} \\ & + \frac{\sigma_D(x) \cdot \Delta t}{2\varepsilon_0} I_{Hx}^{n+1/2}(i, j+1/2) \end{aligned} \quad (3.52)$$

$$I_{Hx}^{n+1/2}(i, j+1/2) = I_{Hx}^{n-1/2}(i, j+1/2) + \nabla X \vec{E} \quad (3.53)$$

$$H_x^{n+1}(i, j+1/2) = H_x^n(i, j+1/2) + 0.5 \nabla X \vec{E} + fil(i).I_{Hx}^{n+1/2}(i, j+1/2) \quad (3.54)$$

$$fil(i) = \frac{\sigma(i).\Delta t}{2\varepsilon_0} \quad (3.55)$$

sonucuna ulaşılır [3].

3.3. Üç Boyutlu FDTD Simülasyonu

Bu simülasyon Yee hücresi olarak adlandırılır. Konumunun orijini i, j ve k olan bir hücrenin etrafında $\vec{E}$ ve $\vec{H}$ alanlarının ayırklarıldığı (interleave) kabul edilir. Maxwell denklemleri aşağıdaki 6 denklemleri üretir [3].

$$\frac{\partial \vec{D}_x}{\partial t} = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} \left(\frac{\partial \vec{H}_z}{\partial y} - \frac{\partial \vec{H}_y}{\partial z} \right) \quad (3.56)$$

$$\frac{\partial \vec{D}_y}{\partial t} = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} \left(\frac{\partial \vec{H}_x}{\partial z} - \frac{\partial \vec{H}_z}{\partial x} \right) \quad (3.57)$$

$$\frac{\partial \vec{D}_z}{\partial t} = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} \left(\frac{\partial \vec{H}_y}{\partial x} - \frac{\partial \vec{H}_x}{\partial y} \right) \quad (3.58)$$

$$\frac{\partial \vec{H}_x}{\partial t} = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} \left(\frac{\partial \vec{E}_y}{\partial z} - \frac{\partial \vec{E}_z}{\partial y} \right) \quad (3.59)$$

$$\frac{\partial \vec{H}_y}{\partial t} = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} \left(\frac{\partial \vec{E}_z}{\partial x} - \frac{\partial \vec{E}_x}{\partial z} \right) \quad (3.60)$$

$$\frac{\partial \vec{H}_z}{\partial t} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \left(\frac{\partial \vec{E}_x}{\partial y} - \frac{\partial \vec{E}_y}{\partial x} \right) \quad (3.61)$$

Bu denklemlerden aşağıdaki FDTD yaklaşımları elde edilir.

$$\begin{aligned} D_z^{n+1/2}(i, j, k+1/2) &= D_z^{n-1/2}(i, j, k+1/2) \\ &+ \frac{\Delta t}{\Delta x \sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} (H_y^n(i+1/2, j, k+1/2) - H_y^n(i-1/2, j, k+1/2) \\ &- H_x^n(i, j+1/2, k+1/2) + H_x^n(i, j-1/2, k+1/2)) \end{aligned} \quad (3.62)$$

$$\begin{aligned} H_z^{n+1}(i+1/2, j+1/2, k) &= H_z^n(i+1/2, j+1/2, k) \\ &- \frac{\Delta t}{\Delta x \sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} (E_y^{n+1/2}(i+1, j+1/2, k) - E_y^{n+1/2}(i, j+1/2, k) \\ &- E_x^{n+1/2}(i+1/2, j+1, k) + E_x^{n+1/2}(i+1/2, j, k)) \end{aligned} \quad (3.63)$$

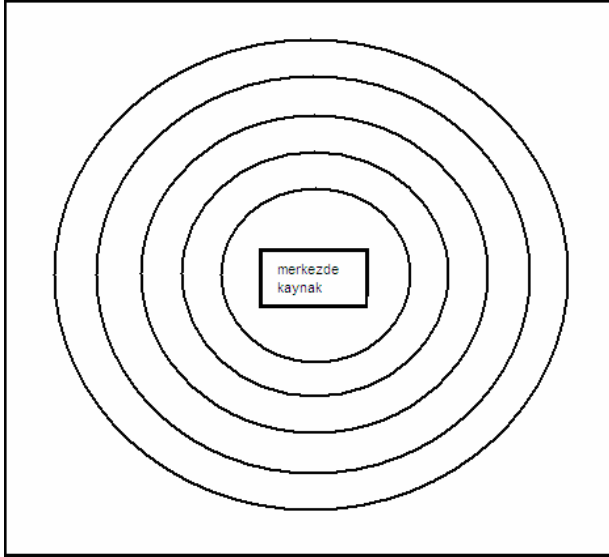
4. UYGULAMA VE SİMÜLASYON SONUÇLARI

Bu tez çalışmasında yapılan simülasyonda MATLAB kullanılmıştır.

Bu bölümde değişik senaryolar tanımlanmış ve tanımlanan bu durumlar için geliştirilen yazılımlar EK-1-EK-12’de sunulmuştur. Burada geliştirilen yazılımların sonuçları yorumlanmıştır. Çalışmada bütün senaryolar için frekans 300 MHz olarak alınmıştır.

4.1. FDTD Yöntemiyle Boş Uzayda EM Dalga Yayılımının Elde Edilmesi

Bu senaryo Şekil 4.1’de verilmiştir. Burada kare şeklinde düşünülen boş bir uzayın tam orta noktasına yerleştirilmiş bir kaynak ve kaynağın yaydığı EM dalgalar simüle edilmektedir.



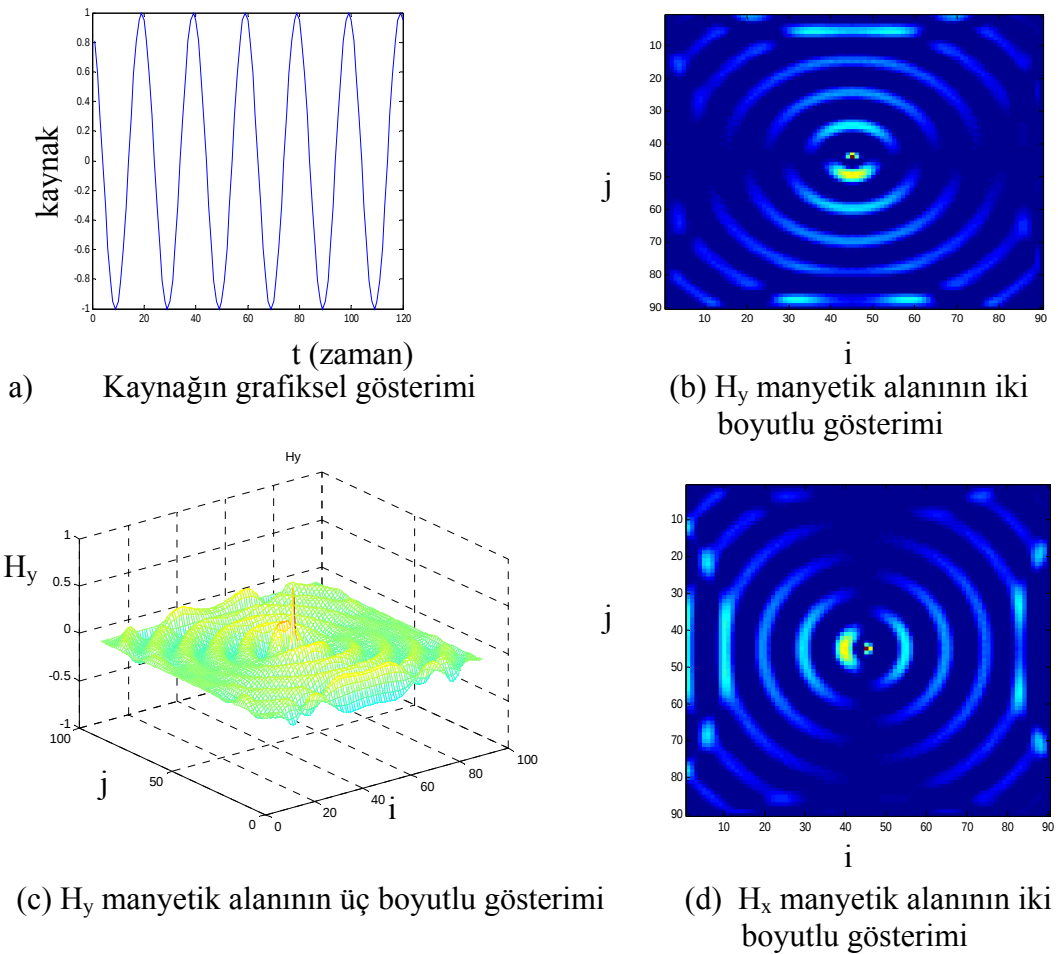
Şekil 4.1. Merkezde bir EM dalga kaynağının olması durumu

Bu algoritmaların geliştirilmesinde referans olarak [3]’de yer alan ve C⁺⁺ dilinde yazılmış olan programdan (fd2d_3.1.c) yararlanılmış ve bu programda Gauss darbesi olan EM dalga kaynağı frekans ve zamana bağlı bir fonksiyon olarak değiştirilerek

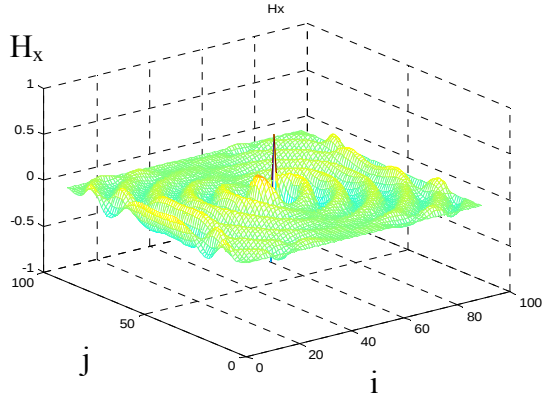
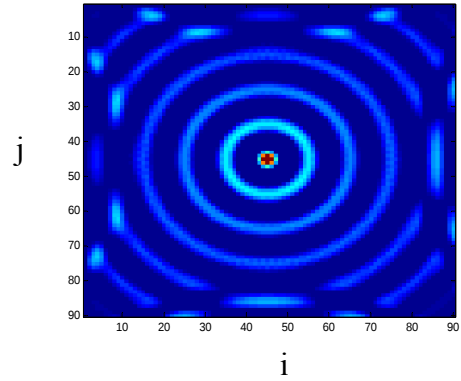
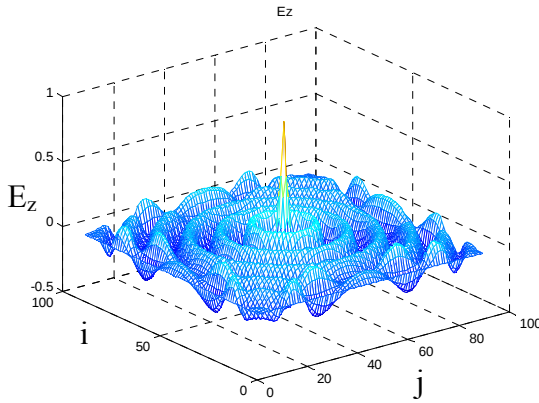
MATLAB'a çevrilerek geliştirilmiştir. Merkezde kaynak olması durumu için geliştirilen yazılım EK-1'de sunulmuştur. Bu durumda elde edilen sonuçlar Şekil 4.2'de sunulmuştur.

Karenin boyutlarını arttırmak için ise EK-1'deki yazılım geliştirilerek farkı EK-2'de verilen yeni bir yazılım elde edilmiştir. Burada işlem adımı $t_0=500$ ve karenin boyutları 500X500 olacak şekilde yeniden düzenlenmiştir. Bu durumda elde edilen sonuçlar ise Şekil 4.3'de gösterilmektedir.

EK-1'deki yazılımın çalıştırılması sonucu elde edilen sırasıyla manyetik alan şiddetinin y bileşeni, manyetik alan şiddetinin x bileşeni ve elektrik alan şiddetinin z bileşeni iki boyutta ve üç boyutta Şekil 4.2. 'de gösterilmiştir. Ayrıca Şekil 4.2.a'da tepe genlikli sinüs sinyaline sahip kaynağın dalga biçimi gösterilmiştir.



Şekil 4.2. EK-1'deki yazılımın çalıştırılmasıyla elde edilen sonuçlar

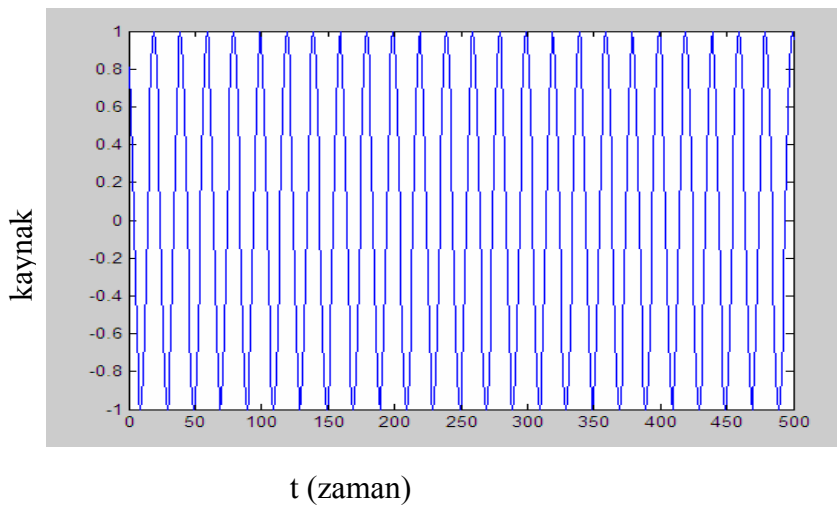
(e) H_x manyetik alanının üç boyutlu gösterimi(f) E_z Elektrik alan yayılımının iki boyutlu gösterimi(g) E_z Elektrik alanının üç boyutlu gösterimi

Şekil 4.2. (Devam) EK-1'deki yazılımın çalıştırılmasıyla elde edilen sonuçlar

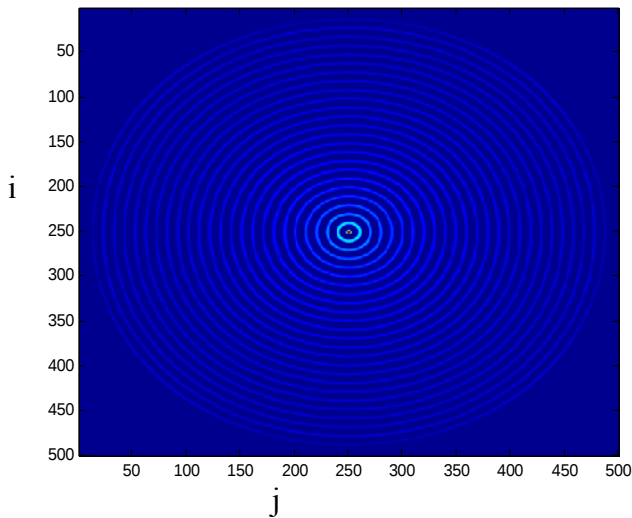
Şekil 4.2. (a)' da kaynağın işlem süresi $t_0=120$ 'ye kadar Δt işlem adımı cinsinden değişimi gösterilmektedir. Kaynak sinüzoidal bir eğri olarak görülmektedir. (b)'de ise H_y manyetik alanının i ve j boyutlarındaki bir düzlemde değişimi iki boyutlu, (c)'de ise üç boyutlu olarak gösterilmektedir. Bu değişimlere benzer olarak, (d) ve (e) H_x manyetik alanının, (f) ve (g) ise E_z elektrik alanının i ve j boyutlarına göre sırasıyla iki ve üç boyutlu gösterimlerini ifade etmektedir.

Boyutların yeterli olmaması nedeniyle sinyaller kenarlarda bozulmaktadır. Yazılım EK-2’de boyutlar 500X500 ve işlem süresi 500 olacak şekilde yeniden düzenlenmiş olup, elde edilen sonuçlar Şekil 4.3’de verilmektedir.

Elektrik alan şiddetinin z bileşeni iki boyutta ve üç boyutta Şekil 4.3 ‘de gösterilmiştir. Ayrıca Şekil 4.3 (a)’da tepe genlikli sinüs sinyaline sahip kaynağın dalga biçimi gösterilmiştir.

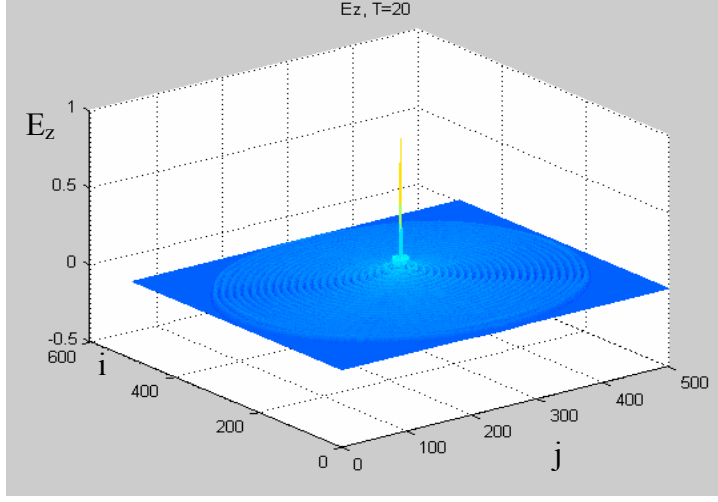


(a) Kaynağın grafiksel gösterimi



(b) E_z elektrik alanının iki boyutlu gösterimi

Şekil 4.3. EK-2’deki yazılımın çalıştırılmasıyla elde edilen sonuçlar



(c) E_z elektrik alanının üç boyutlu gösterimi

Şekil 4.3. (Devam) EK-2'deki yazılımın çalıştırılmasıyla elde edilen sonuçlar

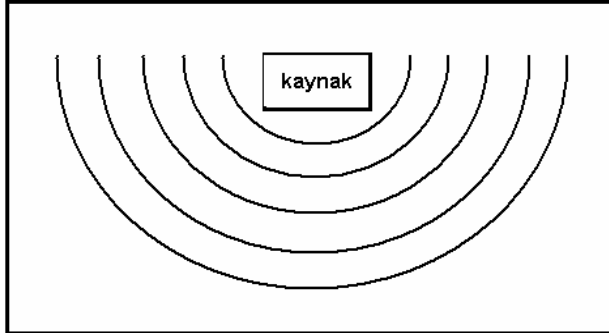
Şekil 4.3 (a)'da kaynağın işlem süresi $t_0=500$ 'e kadar Δt işlem adımı cinsinden değişimi gösterilmektedir. Kaynak sinüzoidal bir eğri olarak görülmektedir. (b)'de ise E_z elektrik alanının i ve j boyutlarına göre iki ve (c)'de ise E_z elektrik alanının i ve j boyutlarına göre üç boyutlu gösterimlerini ifade etmektedir.

Boyutlar 500X500 ve işlem süresi $t_0=500$ seçildiği takdirde daha iyi bir dalga yayılımı elde edildiği görülmektedir. Burada boyutlar çok büyük seçilerek sınır koşulları ihmal edilmiştir. Dolayısıyla kenar yansımalarının olmadığı kabul edilmektedir.

4.2. Yayılan EM Dalganın Kaynağının Üst Kenara Taşınması

Bu senaryoda ise, ilk senaryoda boş uzayın orta noktasında olan EM Dalga kaynağı üst kenarın orta noktasına taşınmıştır. Burada amaç kaynağın üstten aşağıya doğru yayılımını sağlamak ve hedef tespiti için uygun ortamı simüle etmektir. Bu durum

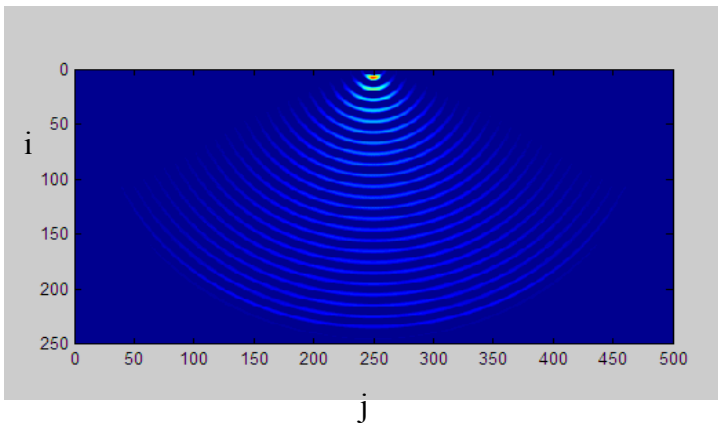
için senaryonun resmi Şekil 4.4'te ve yeni yazılımın EK-2'den farkı EK-3'de sunulmaktadır.



Şekil 4.4. Yayılan EM dalganın kaynağının üst kenara taşınması

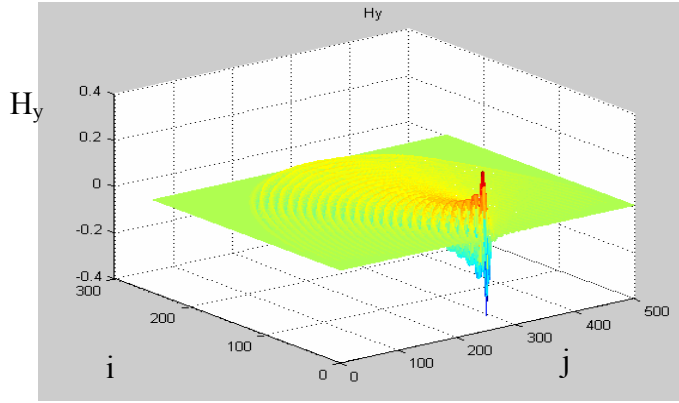
Bu işlem adımında algorithmada küçük bir değişiklik yapılarak kaynak üst kenara taşınmış ve sinyalin üstten alta doğru yayılması sağlanmıştır. Boyutlar ise 250X500 olacak şekilde düzenlenmiş ve bu yazılımdan sonra hep bu boyutlar kullanılmıştır. Kaynağın altındaki boş uzay EM dalganın yayılım ortamıdır. Burada ortamın boyutlarının çok büyük olması yüzünden sınır koşulları hesaba katılmamıştır.

EK-3'deki yazılımın çalıştırılması sonucu elde edilen sırasıyla manyetik alan şiddetinin y bileşeni, manyetik alan şiddetinin x bileşeni ve elektrik alan şiddetinin z bileşeni iki boyutta ve üç boyutta Şekil 4.5'de gösterilmiştir.

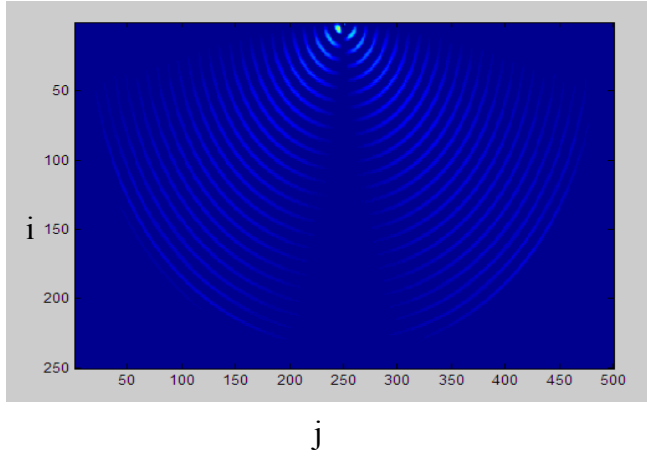


(a) H_y manyetik alanının iki boyutlu gösterimi

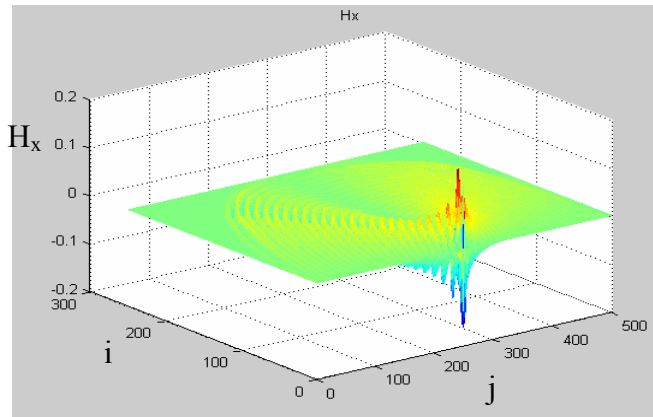
Şekil 4.5. Kaynağın üst kenarın ortasına taşınması durumundaki EM dalga yayılımı



(b) H_y manyetik alanının üç boyutlu gösterimi

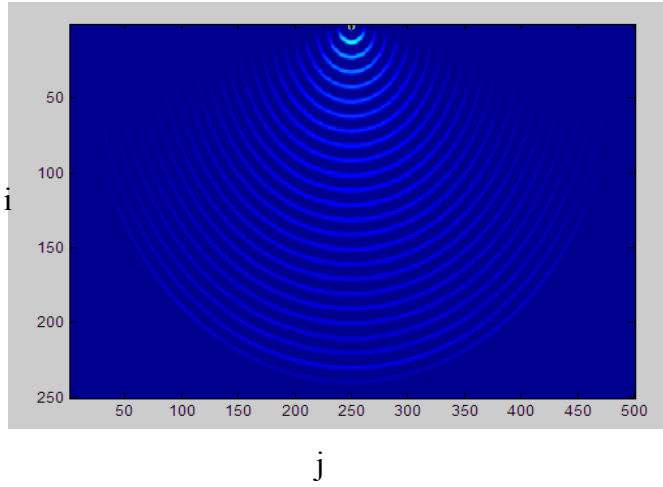


(c) H_x manyetik alanının iki boyutlu gösterimi

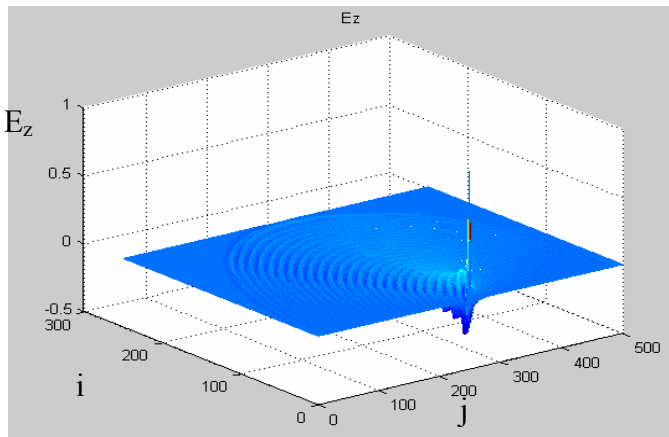


(d) H_x manyetik alanının üç boyutlu gösterimi

Şekil 4.5. (Devam) Kaynağın üst kenarın ortasına taşınması durumundaki EM dalga yayılımı



(e) E_z elektrik alanının iki boyutlu gösterimi



(f) E_z elektrik alanının üç boyutlu gösterimi

Şekil 4.5. (Devam) Kaynağın üst kenarın ortasına taşınması durumundaki EM dalga yayılımı

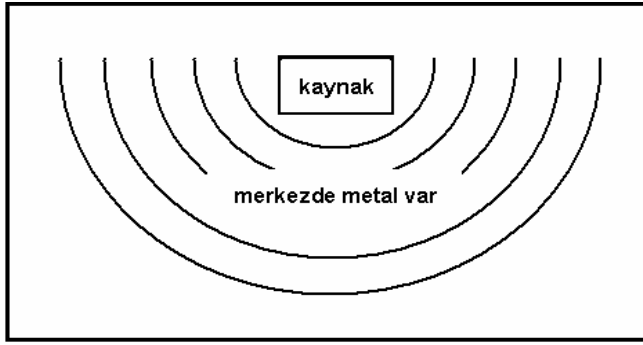
Şekil 4.5 (a)'da H_y manyetik alanının i ve j boyutlarındaki bir düzlemde değişimi iki boyutlu (b)'de ise üç boyutlu olarak gösterilmektedir. Bu değişimlere benzer olarak, (c) ve (d) H_x manyetik alanının, (e) ve (f) ise E_z elektrik alanının i ve j boyutlarına göre sırasıyla iki ve üç boyutlu gösterimlerini ifade etmektedir.

Burada kaynağın üst kenarda olması halindeki elektrik alan ve manyetik alan yayılımları gösterilmektedir. Gerek manyetik alan ve gerekse elektrik alan üst kenarın ortasından kaynağın alt yüzeyinde kabul edilen ortama doğru yayılmaktadır.

Manyetik alanlar H_x ve H_y sadece gösterim amacıyla sunulmaktadır. Burada referans olarak alınan ve simülasyonda kullanılan unsur elektrik alanıdır.

4.3. Ortama Metal Konması

Burada senaryo olarak dikdörtgen olarak düşünülen boş uzayın orta noktasına metal yerleştirilmiştir. Bu durum için düşünülen senaryo Şekil 4.6'da sunulmuştur.

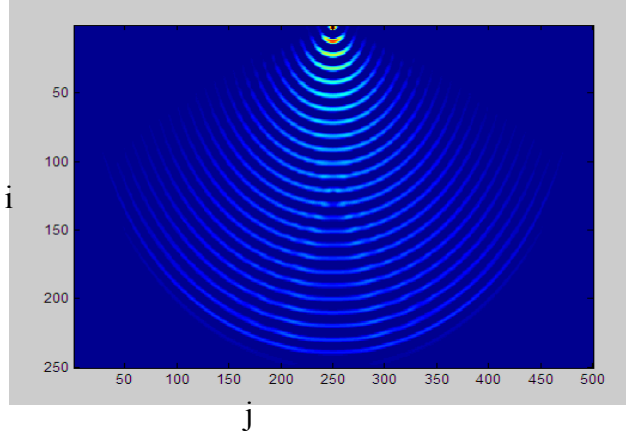


Şekil 4.6. Ortama metal konması durumu

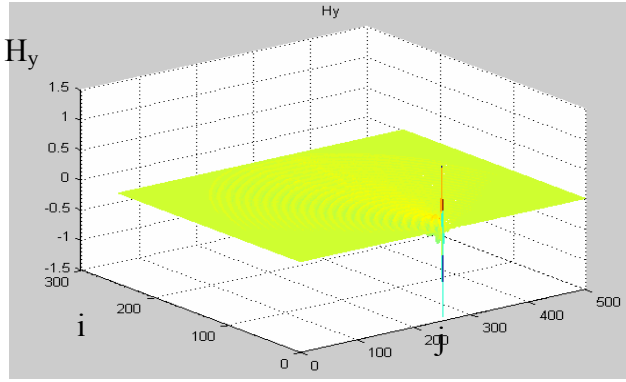
Bu durumu simüle etmek için geliştirilen yazılımın EK-3'den farkı EK-4'de sunulmuştur. Bu durumda EM dalganın yansıması beklenmektedir.

Bu işlem adımında algoritmaya metal eklenmiştir. Bunu yapmak için elektrik alan sıfıra eşitlenmiştir. Bu ekleme sadece bir (i,j) noktası için yapılırken sonuç alınamamıştır. Ancak (i,j) , $(i+1,j)$, $(i,j+1)$, $(i+1,j+1)$ olarak tam ortaya 2X2 boyutunda küçük bir metal yerleştirilmiştir. Burada elde edilen sonuç metal nedeniyle yansıma olmasıdır.

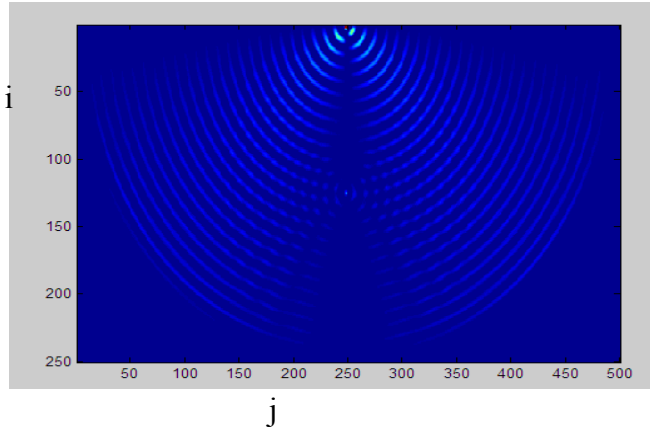
EK-4'deki yazılımın çalıştırılması sonucu elde edilen sırasıyla manyetik alan şiddetinin y bileşeni, manyetik alan şiddetinin x bileşeni ve elektrik alan şiddetinin z bileşeni iki boyutta ve üç boyutta Şekil 4.7'de gösterilmiştir.



(a) H_y manyetik alanındaki yansıma (iki boyutlu gösterim)

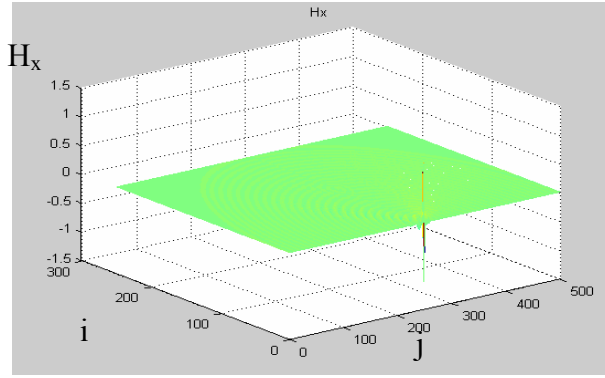


(b) H_y manyetik alanındaki yansıma (üç boyutlu gösterim)

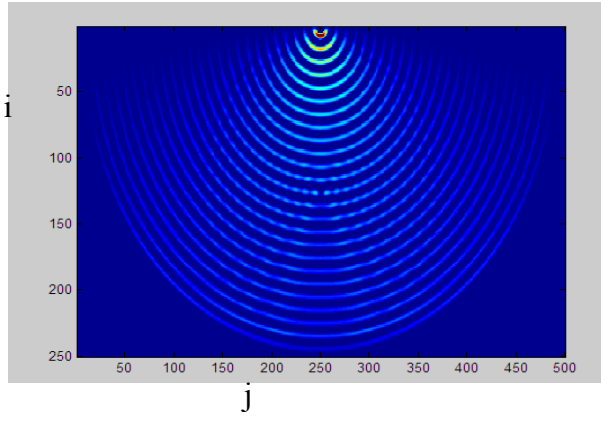


(c) H_x manyetik alanındaki yansıma (iki boyutlu gösterim)

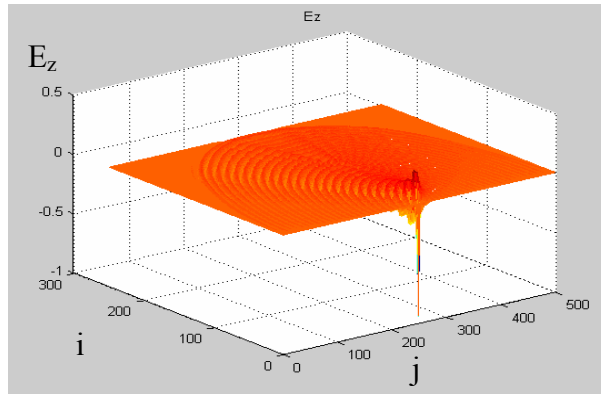
Şekil 4.7. Ortamda metal olması durumunda yansıma görüntüleri



(d) H_x manyetik alanındaki yansıma (üç boyutlu gösterim)



(e) E_z elektrik alanındaki yansıma (iki boyutlu gösterim)



(f) E_z elektrik alanındaki yansıma (üç boyutlu gösterim)

Şekil 4.7. (Devam) Ortamda metal olması durumunda yansıma görüntüleri

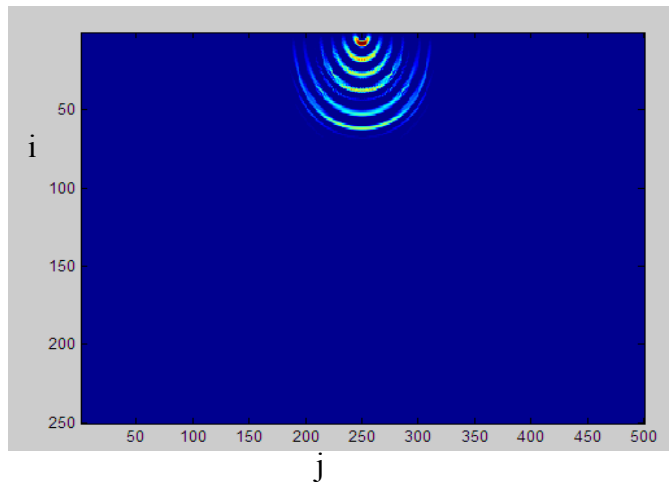
Şekil 4.7 (a)'da H_y manyetik alanının i ve j boyutlarındaki bir düzlemde değişimi iki boyutlu (b)'de ise üç boyutlu olarak gösterilmektedir. Bu değişimlere benzer olarak, (c) ve (d) H_x manyetik alanının, (e) ve (f) ise E_z elektrik alanının i ve j boyutlarına göre sırasıyla iki ve üç boyutlu gösterimlerini ifade etmektedir.

Burada ortada metal olması durumunda elektrik alan ve manyetik alanda yansıma olduğu görülmekte olup, beklenen sonuçtur. Bu yansımanın toprak altına konmuş cisimleri tespit için kullanılabilirliği düşünülebilir. Ancak öncelikle EM dalga yayılımı bir sonraki yazılımda (EK-5) movie komutuyla film olarak oynatılmıştır.

4.4. Movie Komutuyla Ortamın Simüle Edilmesi

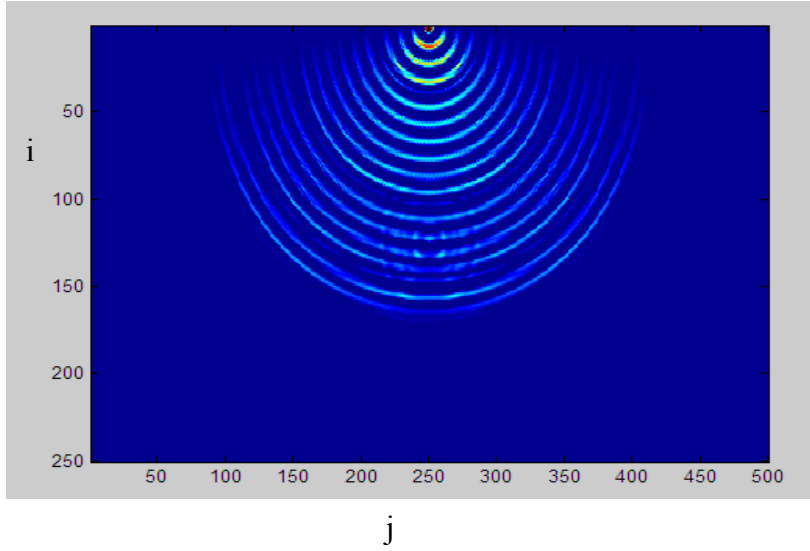
Burada geliştirilen algorithmada ise Movie komutu kullanılmış ve dalga yayılımı ortada metal (yani yansıma olması) durumu için simüle edilmek amacıyla EK-4'den farklı EK-5'de sunulan yazılım geliştirilmiştir.

Burada elektrik alan yayılımı movie komutuyla adım adım izlenebilmektedir. Bu amaçla EK-5'de verilen matlab yazılımı sonucu elde edilen görüntülerin bir kesiti sinyal yukarıda ortada ve sonda iken Şekil 4.8 olarak aşağıda sunulmuştur.

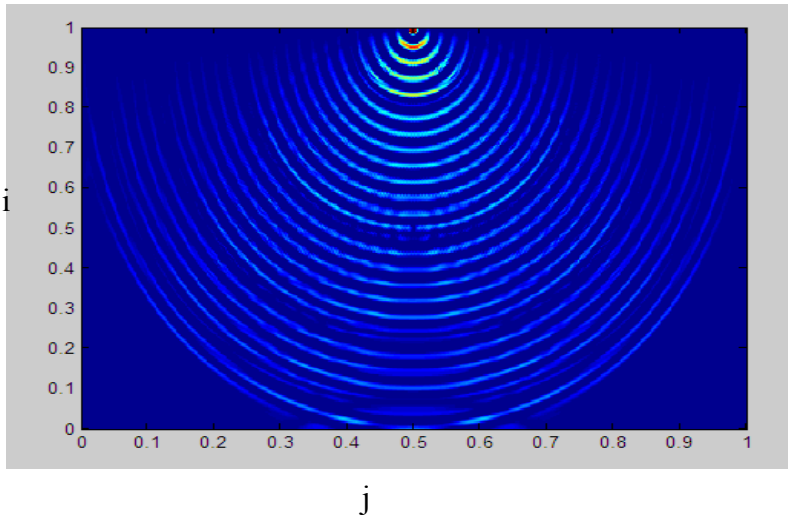


(a) Movie komutuyla film olarak sinyalin yayılımı (sinyal yukarı bölgede)

Şekil 4.8. Movie komutuyla film olarak sinyalin yayılımı



(b) Movie komutuyla film olarak sinyalin yayılımı (sinyal orta bölgede)



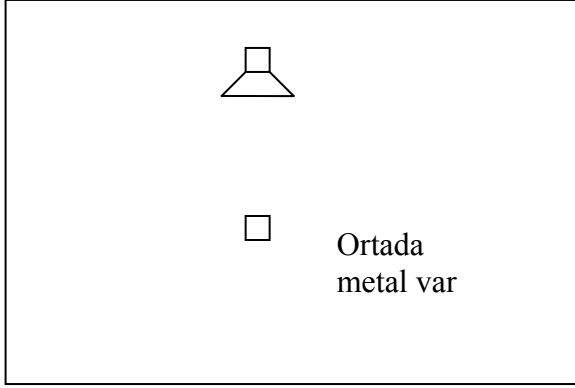
(c) Movie komutuyla film olarak sinyalin yayılımı (sinyal yansıdıktan sonra)

Şekil 4.8. (Devam) Movie komutuyla film olarak sinyalin yayılımı

4.5. Ortama Yerleştirilen Metalin Görüntülenmesi

Bu bölümde ortaya konan metalin görüntülenmesi hedeflenmiştir. Bunu yapmak için elektrik alan yansımasının olması ve olmaması arasındaki farktan yararlanılarak

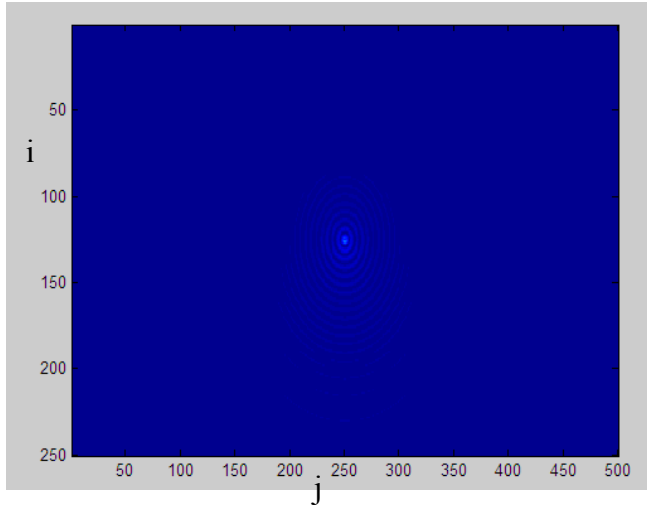
ortada metal olduğunu gösterecek bir algoritma geliştirilmiştir. Bu senaryo sonrası hedeflenen Şekil 4.9’da gösterilmiştir.



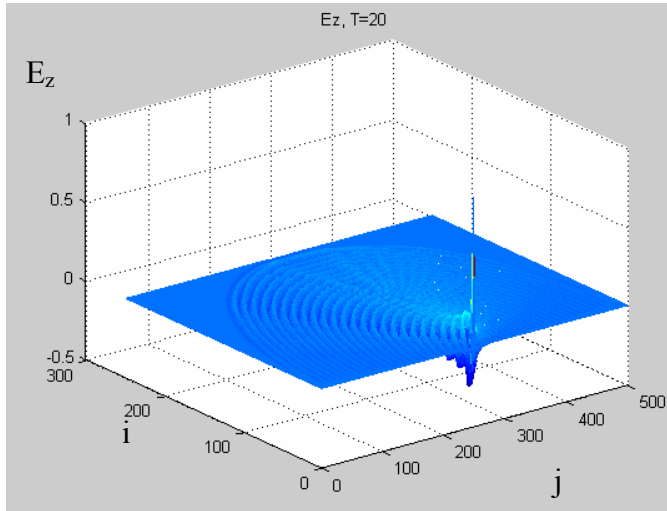
Şekil 4.9. Ortaya yerleştirilen metalin görüntülenmesi senaryosu

Bu durum için geliştirilen yazılımın EK-4’den farkı EK-6’da sunulmuştur. Bu işlem adımında EK-4’de geliştirilen yazılımda ortamın orta noktasına konan 2X2 boyutundaki cismin görüntülenmesi hedeflenmiştir. Bunu yaparken elektrik alan değerinin yansımanın olmadığı ve yansımanın olduğu durumlardaki farkı alınmıştır. Bu iki değer farkı alındığında ortaya konan cisim görüntülenebilmektedir. Bu bilgi sayesinde toprak altında mayının olmadığı durumdaki elektrik alan yansımasının olmadığı, metal yani yansıma varken ise elektrik alanın farkından yararlanılarak metalin yerinin tespit edilebileceği değerlendirilmektedir. Bu nedenle yapılan çalışmanın pratik uygulamalara yönelik fayda sağlayacağı değerlendirilmektedir.

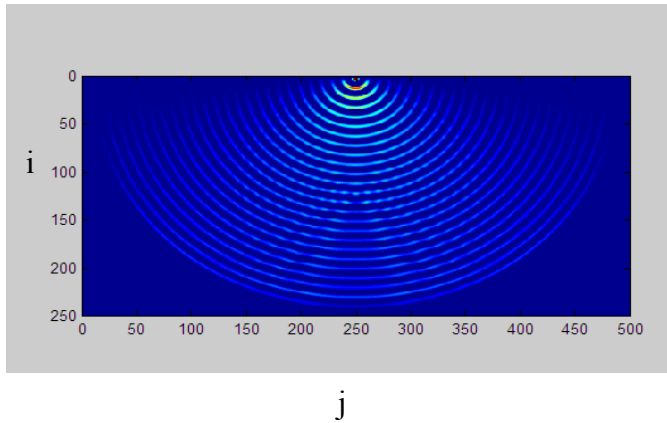
EK-6’daki yazılımın çalıştırılması sonucu elde edilen görüntü elektrik alan şiddetinin z bileşeninin iki boyutta ve üç boyutta yansıma olması durumunda ve üç boyutta yansıma olmaması durumunda görüntüsü ve bu iki elektrik alanın farkı sonucunda ortama konan metalin görüntülenmesi Şekil 4.10’da gösterilmiştir.



(a) Ortaya konan metalin görüntülenmesi

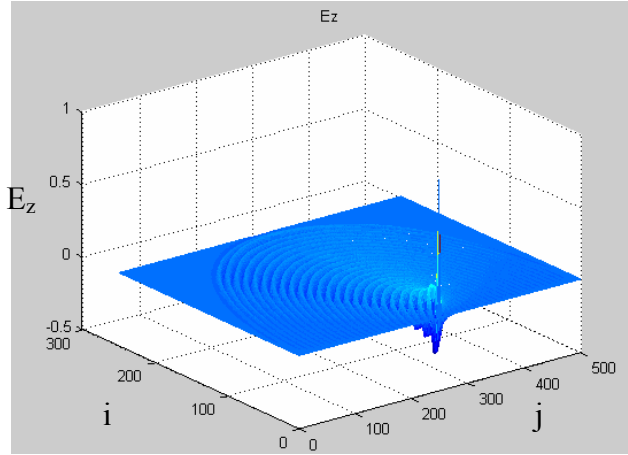


(b) Yansıma olması durumunda E_z elektrik alanının üç boyutlu görüntülenmesi



(c) Yansıma olması durumunda E_z elektrik alanının iki boyutlu görüntülenmesi

Şekil 4.10. Ortaya yerleştirilen metalin görüntüsü



(d) Yansıma olmaması durumunda elektrik alanın üç boyutlu gösterimi

Şekil 4.10. (Devam) Ortaya yerleştirilen metalin görüntüsü

Şekil 4.10 (a)'da ortaya konan metalin görüntüsü (b)'de ve (c)'de ise üç boyutlu olarak yansıma olması durumunda E_z elektrik alanının i ve j boyutlarına göre gösterimleri (d) ise yansıma olmaması durumunda elektrik alanının i ve j boyutlarına göre üç boyutlu gösterimi ifade edilmektedir.

Burada elektrik alan farkından yararlanılarak ortaya konan metal görüntülenmiştir. Burada FDTD ve YNR teknikleri birleştirilmiş ve pratik çalışmalara esas olacak bir yaklaşım geliştirilmiştir. Bu çalışmanın mayın tespit ve benzeri pratik uygulamalara fayda sağlayacağı değerlendirilmektedir.

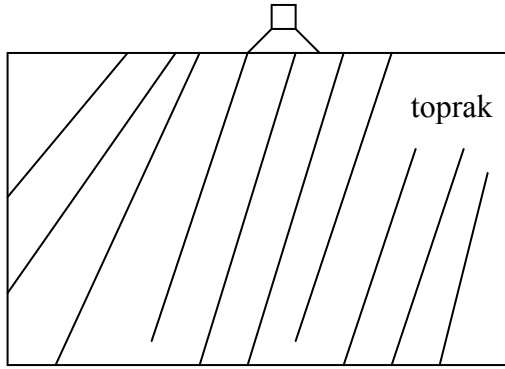
4.6. Dielektrik Katman Altında EM Dalganın Yayılımı

Buraya kadar elde edilen sonuçlar boş uzayda dielektrik sabitinin $\epsilon_r=1$ olduğu durumlar için geçerli olduğundan dielektrik sabitinin 1'den fazla olduğu durumlar örneğin toprak altı veya kum altı durumları simülasyonu bu bölümde incelenmiştir. $\epsilon_r=4$ seçilmiştir. Eş. 4.1 'deki katsayı 0.5 iken;

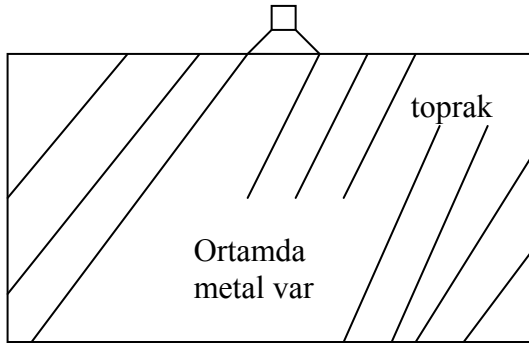
$$\frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \frac{\Delta t}{\Delta x} = \frac{c_0 \Delta x / 2c_0}{\Delta x} = \frac{1}{2} \quad (4.1)$$

ϵ_r 'nin karekökü yani 4'ün karekökü 2 olacak ve terimle $\frac{1}{2}$ 'nin yarısı 0.25 katsayısı ile çarpılacaktır.

Dielektrik ortam, toprak veya kum altı için, ortamda metal olmadığı durum Şekil 4.11 ve metal yani (yansıma olduğu) durum Şekil 4.12 olarak aşağıda sunulmuştur.



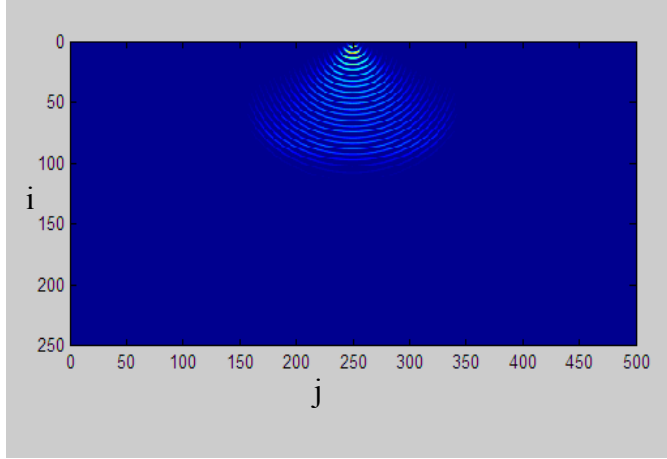
Şekil 4.11. Dielektrik ortam (ortamda metal, yani yansıma olmadığı durum)



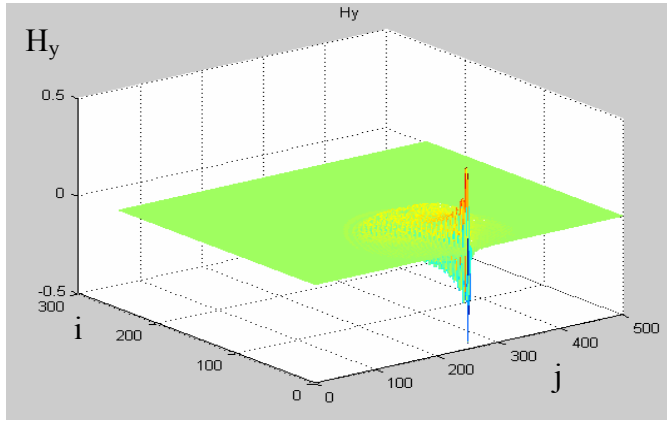
Şekil 4.12. Dielektrik ortam (Ortamda metal, yani yansıma olduğu durum)

Metal yani yansıma olmadığı durum için EK-3'den farkı EK-7'deki ve ortamda metal yani yansıma olması durumu için EK-3'den farkı EK-8'deki yazılım sunulmuştur.

EK-7'deki yazılımın çalıştırılması sonucu elde edilen sırasıyla manyetik alan şiddetinin y bileşeni, manyetik alan şiddetinin x bileşeni ve elektrik alan şiddetinin z bileşeni iki boyutta ve üç boyutta Şekil 4.13'de gösterilmiştir.

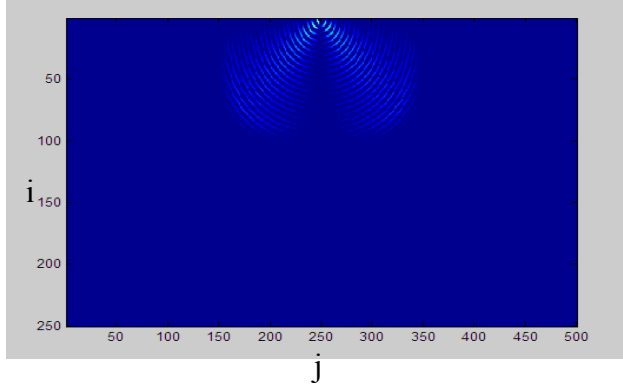


(a) Ortamda metal yani yansıma olmaması durumunda toprak altı H_y manyetik alanın iki boyutlu görüntüsü

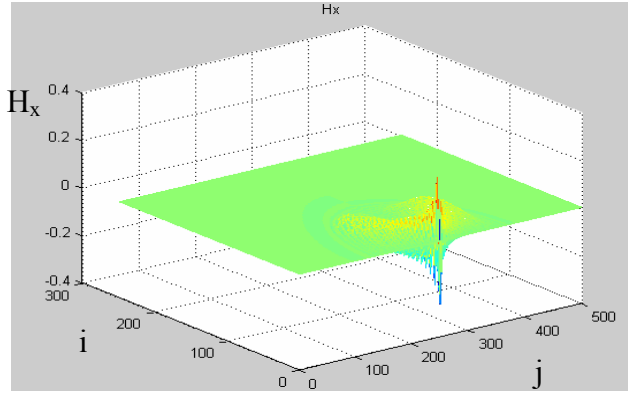


(b) Ortamda metal yani yansıma olmaması durumunda toprak altı H_y manyetik alanın üç boyutlu görüntüsü

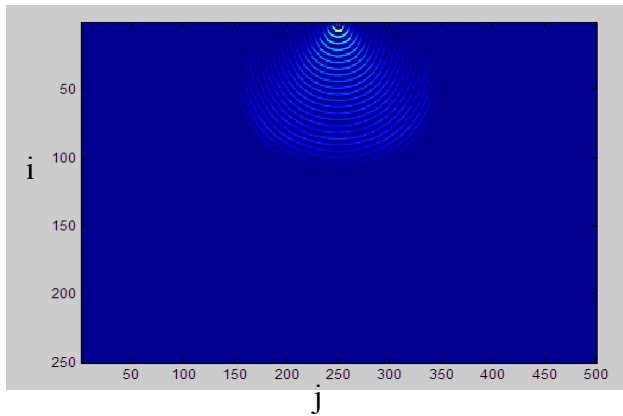
Şekil 4.13. Ortamda metal yani yansıma olmadığı durumda toprak altı görüntüleri



(c) Ortamda metal yani yansıma olmaması durumunda toprak altı H_x manyetik alanın iki boyutlu görüntüsü

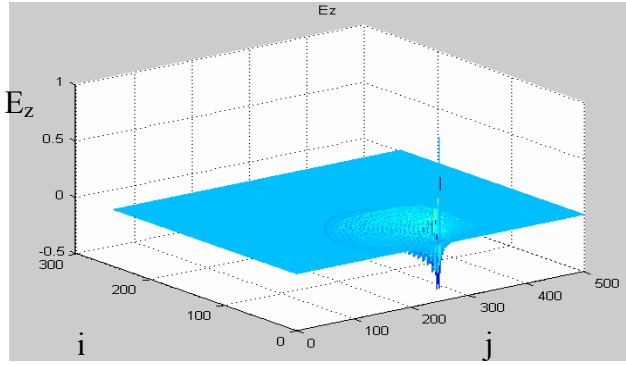


(d) Ortamda metal yani yansıma olmaması durumunda toprak altı H_x manyetik alanın üç boyutlu görüntüsü



(e) Ortamda metal yani yansıma olmaması durumunda toprak altı E_z elektrik alanının iki boyutlu görüntüsü

Şekil 4.13. (Devam) Ortamda metal yani yansıma olmadığı durumda toprak altı görüntüleri

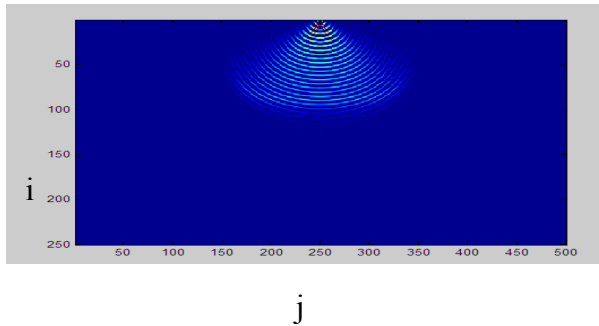


(f) Ortamda metal yani yansıma olmaması durumunda toprak altı E_z elektrik alanının üç boyutlu görüntüsü

Şekil 4.13. (Devam) Ortamda metal yani yansıma olmadığı durumda toprak altı görüntüleri

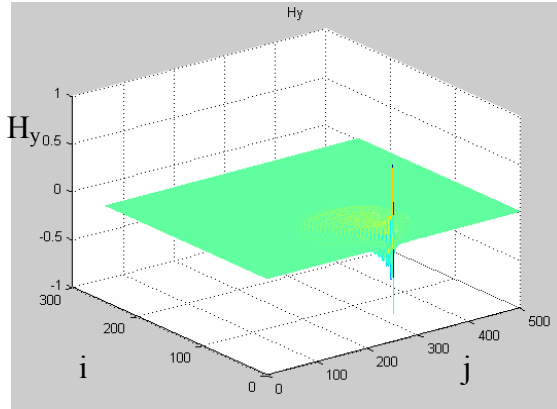
Şekil 4.13 (a)'da H_y manyetik alanının i ve j boyutlarındaki bir düzlemde değişimi iki boyutlu (b)'de ise üç boyutlu olarak gösterilmektedir. Bu değişimlere benzer olarak, (c) ve (d) H_x manyetik alanının, (e) ve (f) ise E_z elektrik alanının i ve j boyutlarına göre sırasıyla iki ve üç boyutlu gösterimlerini ifade etmektedir.

Burada ortamın toprak olması nedeniyle sinyalin zayıflaması beklenmektedir. Sinyaldeki ikinci terimler 0.5 yerine 0.25 katsayısı ile çarpıldığından sinyal zayıflamıştır. Ortamda metal olması durumu için geliştirilen EK-8'deki yazılımın çalıştırılması sonucu elde edilen sırasıyla manyetik alan şiddetinin y bileşeni, manyetik alan şiddetinin x bileşeni ve elektrik alan şiddetinin z bileşeni iki boyutta ve üç boyutta Şekil 4.14'te gösterilmiştir.

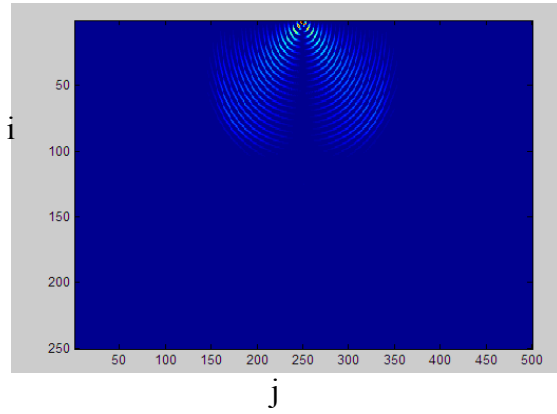


(a) Ortamda metal olması halinde H_y manyetik alanının iki boyutlu görüntüsü

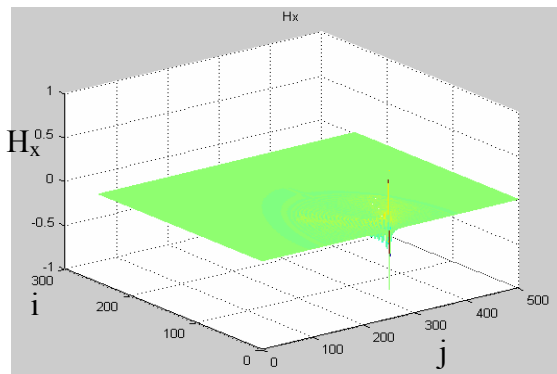
Şekil 4.14. Ortamda metal yani yansıma olması durumunda toprak altı görüntüleri



(b) Ortamda metal olması halinde H_y manyetik alanının üç boyutlu görüntüsü

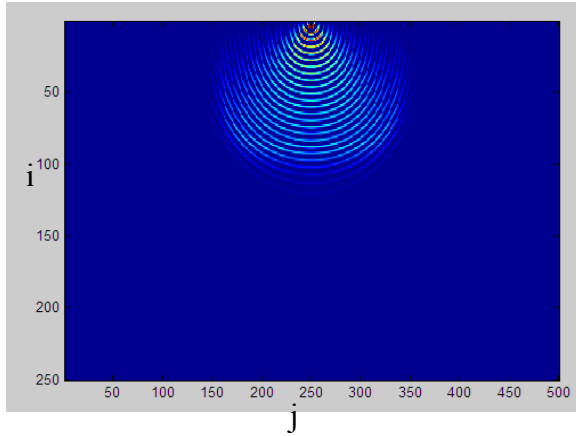


(c) Ortamda metal olması halinde H_x manyetik alanının iki boyutlu görüntüsü

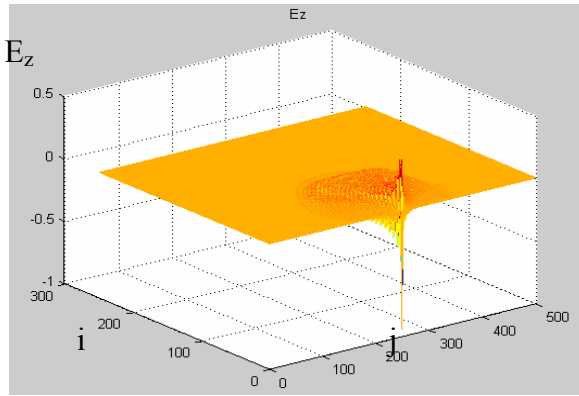


(d) Ortamda metal olması halinde H_x manyetik alanının üç boyutlu görüntüsü

Şekil 4.14. (Devam) Ortamda metal yani yansıma olması durumunda toprak altı görüntüleri



(e) Ortamda metal olması halinde E_z elektrik alanının iki boyutlu görüntüsü



(f) Ortamda metal olması halinde E_z elektrik alanının üç boyutlu görüntüsü

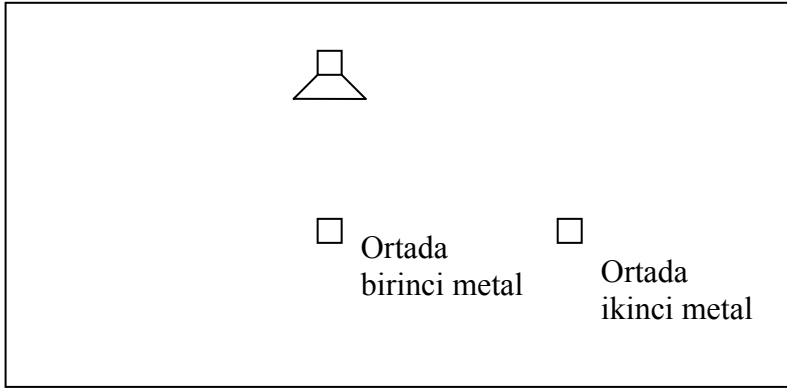
Şekil 4.14. (Devam) Ortamda metal yani yansıma olması durumunda toprak altı görüntüleri

Şekil 4.14'te ortama metal konan yazılım olan EK-4'dekinden farkı, toprak için elektrik alan ve manyetik alan bileşenlerinin formülündeki 0.5 katsayısının 0.25 ile değiştirilmesidir. EK-8'de yer alan yazılımın çalıştırılmasıyla (a)'de H_y manyetik alanının i ve j boyutlarındaki bir düzlemde değişimi iki boyutlu, (b)'de ise üç boyutlu olarak gösterilmektedir. Bu değişimlere benzer olarak, (c) ve (d) H_x manyetik alanının, (e) ve (f) ise E_z elektrik alanının i ve j boyutlarına göre sırasıyla iki ve üç boyutlu gösterimlerini ifade etmektedir.

Toprak altında metal olması halinde de zayıflamalar görülmektedir. Metal derinlerde olduğu için burada yansıma görülmemektedir.

4.7. Yan Yana İki Metalin Görüntülenmesi

Bu durum için iki metal boş uzayın orta bölgesine konmuştur (Şekil 4.15).

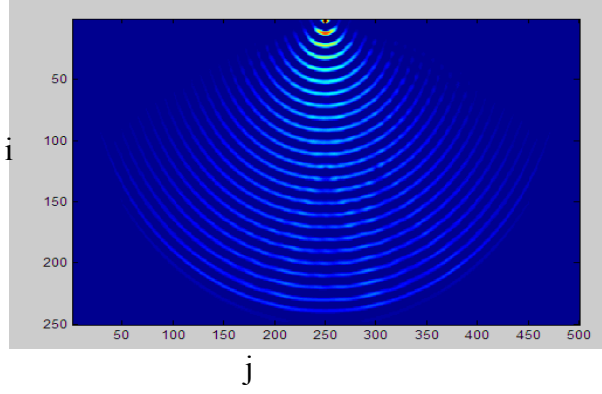


Şekil 4.15. Yan yana iki metalin olduğu durum

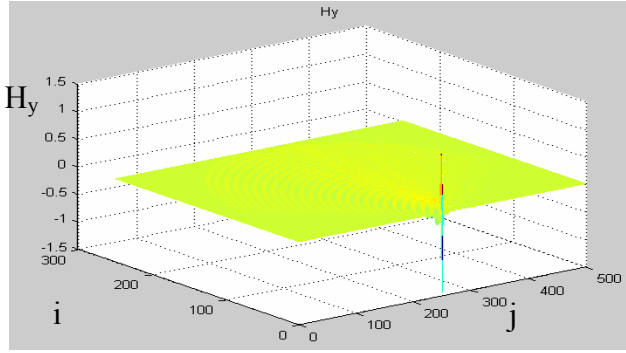
Bu durumu simüle etmek amacıyla önce sadece ikinci metal konmuş ve ikinci metalden de yansıma olup, olmadığının gözlemlenmesi amaçlanmıştır. Sadece bu durum için geliştirilen yazılımın EK-3'den farkı EK-9'da sunulmuştur.

Bu durumdaki iki metali yansıma olduğu durumda ve yansıma olmadığı durumda elektrik alanların farkını hesaplatarak görüntüleyen yazılımın EK-9'dan farkı EK-10'da sunulmuştur.

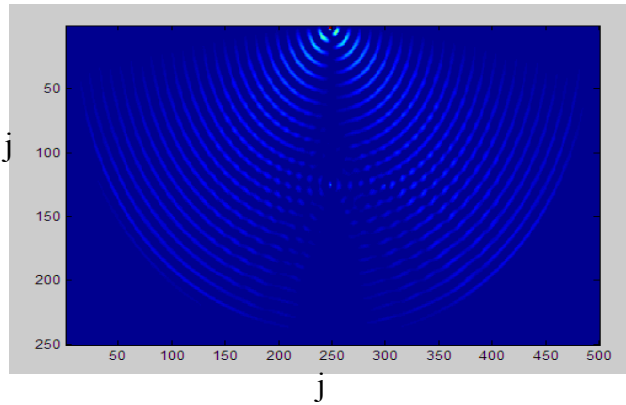
Burada boş uzay ortamında iki metal yan yana konularak sonuçları gözlemlenmiştir. EK-9'daki yazılımın çalıştırılması sonucu elde edilen sırasıyla manyetik alan şiddetinin y bileşeni, manyetik alan şiddetinin x bileşeni ve elektrik alan şiddetinin z bileşeni iki boyutta ve üç boyutta Şekil 4.16'da gösterilmiştir.



(a) Ortamda iki metal olduğu durumda H_y manyetik alanının iki boyutlu görüntüsü

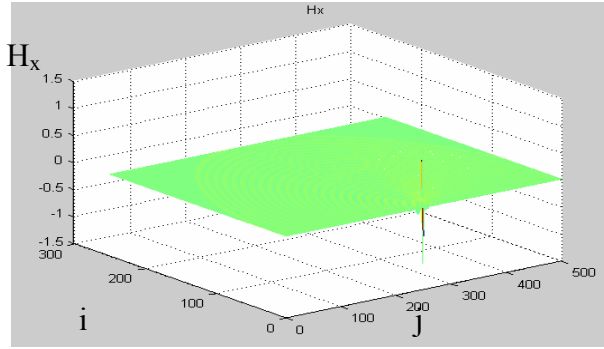


(b) Ortamda iki metal olduğu durumda H_y manyetik alanının üç boyutlu görüntüsü

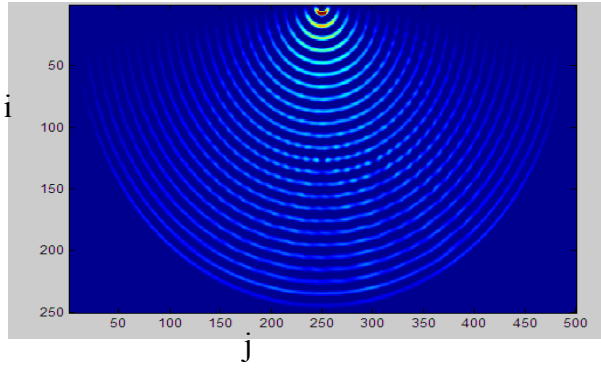


(c) Ortamda iki metal olduğu durumda H_x manyetik alanının iki boyutlu görüntüsü

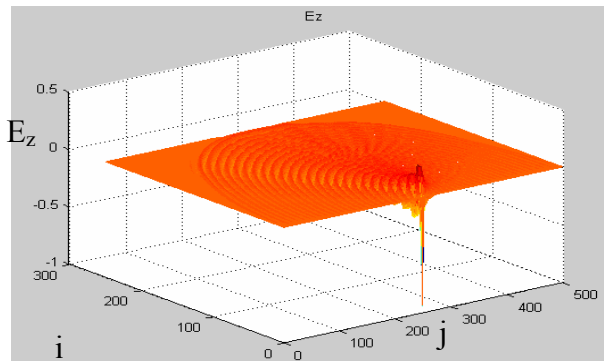
Şekil 4.16. Yan yana iki metal olduğu durumda elektrik ve manyetik alan görüntüleri



(d) Ortamda iki metal olduğu durumda H_x manyetik alanının üç boyutlu görüntüsü



(e) Ortamda iki metal olduğu durumda E_z elektrik alanının iki boyutlu görüntüsü

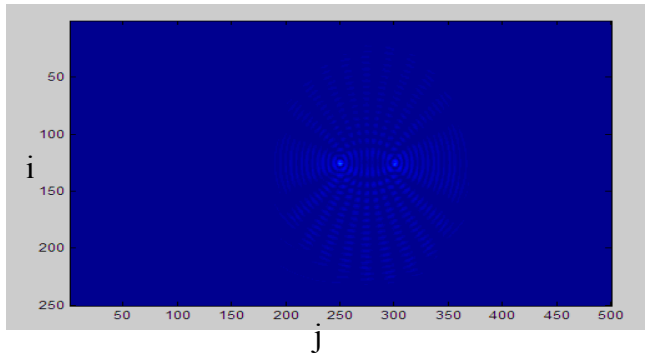


(f) Ortamda iki metal olduğu durumda E_z elektrik alanının üç boyutlu görüntüsü

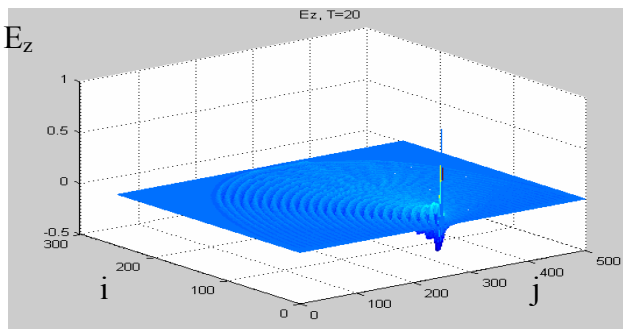
Şekil 4.16. (Devam) Yan yana iki metal olduğu durumda elektrik ve manyetik alan görüntüleri

EK-9'daki yazılımın çalıştırılmasıyla elde edilen sonuçlar Şekil 4.16'da gösterilmektedir. Şekil 4.16 (a)'da H_y manyetik alanının i ve j boyutlarındaki bir düzlemde değişimi iki boyutlu (b)'de ise üç boyutlu olarak gösterilmektedir. Bu değişimlere benzer olarak, (c) ve (d) H_x manyetik alanının, (e) ve (f) ise E_z elektrik alanının i ve j boyutlarına göre sırasıyla iki ve üç boyutlu gösterimlerini ifade etmektedir.

Ortama orta noktanın hemen yanına iki metal konmuş ve yansımanın iki bölgeden kaynaklandığı tespit edilmiştir. Bu yansıma bilgisi kullanılarak ortaya yan yana konan iki metalin konumlarının görüntülenmesi amacıyla hazırlanan EK-10'daki yazılımın çalıştırılması sonucu elde edilen görüntü elektrik alan şiddetinin z bileşeninin iki boyutta ve üç boyutta yansıma olduğu ve üç boyutta yansımanın olmadığı görüntüleri ve bu iki elektrik alanın farkı sonucunda ortama konan yan yana iki metalin görüntülenmesi sonuçları Şekil 4.17'de sunulmaktadır.

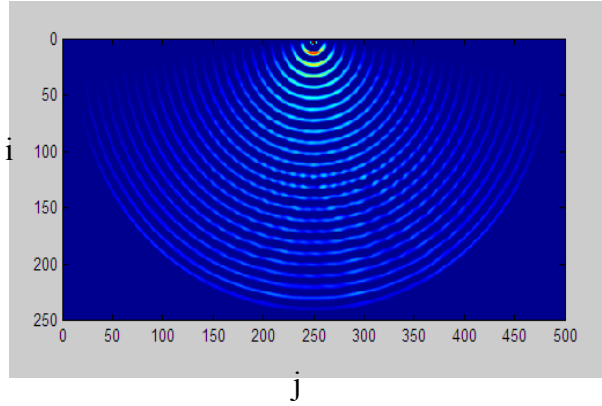


(a) Ortaya yan yana konan iki metalin konumlarının görüntülenmesi

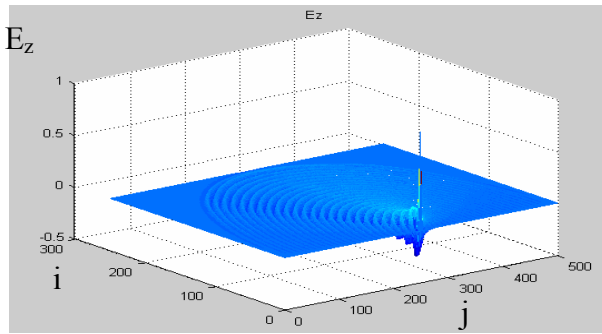


(b) Ortaya yan yana konan iki metalden yansıyan E_z elektrik alan üç boyutlu görüntüsü

Şekil 4.17. Ortada yan yana konan iki metalin görüntülenmesi



(c) Ortaya yan yana konan iki metalden yansıyan E_z elektrik alan iki boyutlu görüntüsü



(d) Ortaya yan yana konan iki metalden yansımasız E_z elektrik alanının üç boyutlu görüntüsü

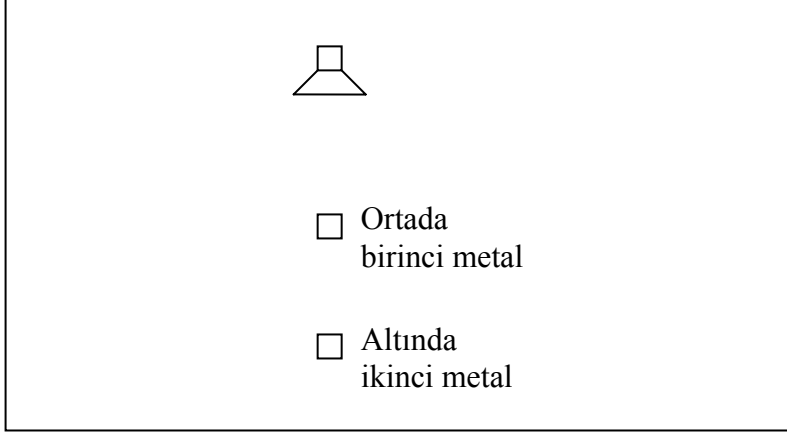
Şekil 4.17. (Devam) Ortada yan yana konan iki metalin görüntülenmesi

Şekil 4.17 (a)'da ortaya konan metalin görüntüsü (b)'de ve (c)'de ise üç boyutlu olarak yansıma olması durumu E_z elektrik alanının i ve j boyutlarına göre gösterimleri (d) ise yansıma olmama durumu elektrik alanının i ve j boyutlarına göre üç boyutlu gösterimi ifade edilmektedir.

Bu işlem adımı, ortaya yan yana konan iki metalin görüntülenmesi sağlanmıştır. Burada yan yana iki metalin görüntülenmesi pratik hayatta toprak altına konan iki mayının yerinin tespit edilmesine katkıda bulunacağı değerlendirilmektedir.

4.8. Alt Alta İki Metalin Görüntülenmesi

Burada iki metal boş uzayın orta bölgesine alt alta konmuştur. Bu durumun senaryosu Şekil 4.18’de sunulmuştur.

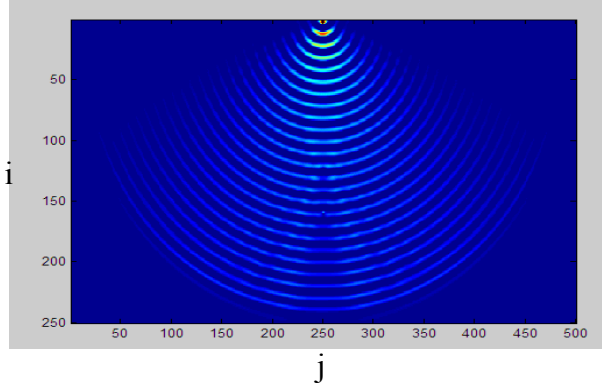


Şekil 4.18. Alt alta iki metalin olduğu durum

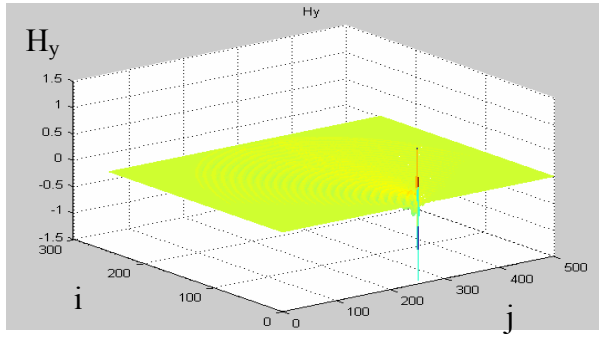
Bu durumu simüle etmek amacıyla önce sadece alta ikinci metal konmuş ve ikinci metalden de yansıma olup, olmadığının gözlemlenmesi amaçlanmıştır. Sadece bu durum için geliştirilen yazılımın EK-3’den farkı EK-11’de sunulmuştur.

Bu durumdaki iki metali yansıma olduğu durumda ve yansıma olmadığı durumda elektrik alanların farkını hesaplatarak görüntüleyen yazılımın EK-11’den farkı EK-12’de sunulmuştur.

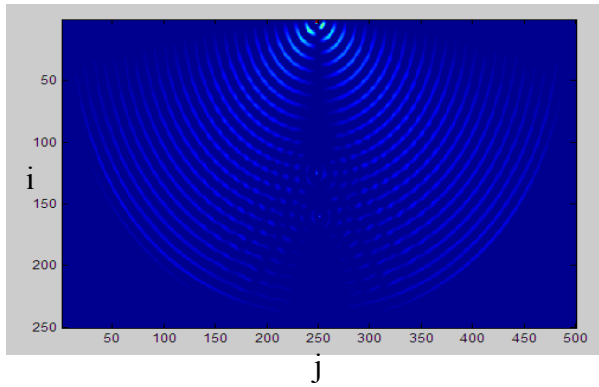
Boş uzay ortamında iki metal bu sefer alt alta konularak sonuçları gözlemlenmiştir. EK-11’deki yazılımın çalıştırılması sonucu elde edilen manyetik alan şiddetinin y bileşeni, manyetik alan şiddetinin x bileşeni ve elektrik alan şiddetinin z bileşeni sırasıyla iki boyutta ve üç boyutta Şekil 4.19’da gösterilmektedir.



(a) Ortamda alt alta iki metal olduğu durumda H_y manyetik alanının iki boyutlu görüntüsü

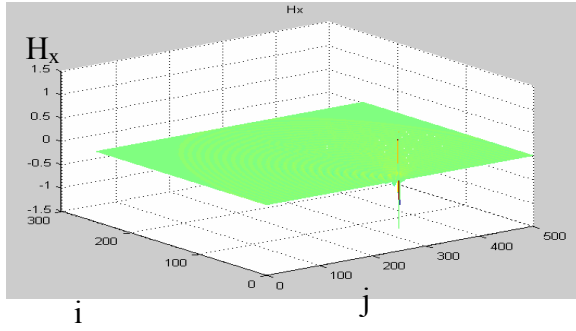


(b) Ortamda alt alta iki metal olduğu durumda H_y manyetik alanının üç boyutlu görüntüsü

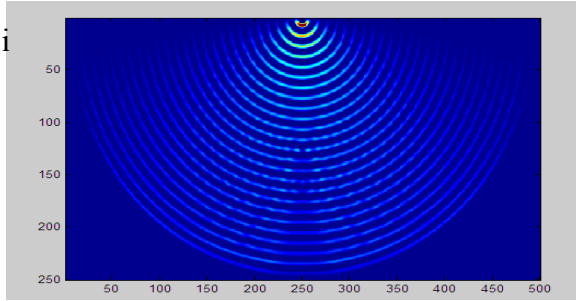


(c) Ortamda alt alta iki metal olduğu durumda H_x manyetik alanının iki boyutlu görüntüsü

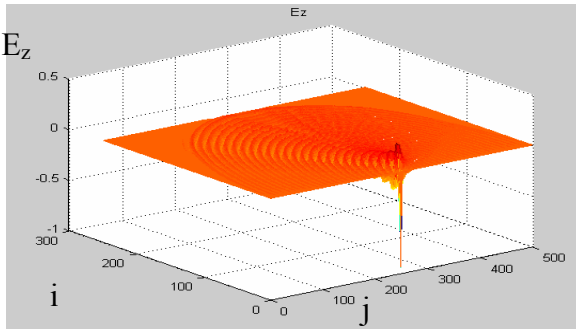
Şekil 4.19. Alt alta iki metal olması durumunda elektrik ve manyetik alan görüntüleri



(d) Ortamda alt alta iki metal olduğu durumda H_x manyetik alanının üç boyutlu görüntüsü



(e) Ortamda alt alta iki metal olduğu durumda E_z elektrik alanının iki boyutlu görüntüsü



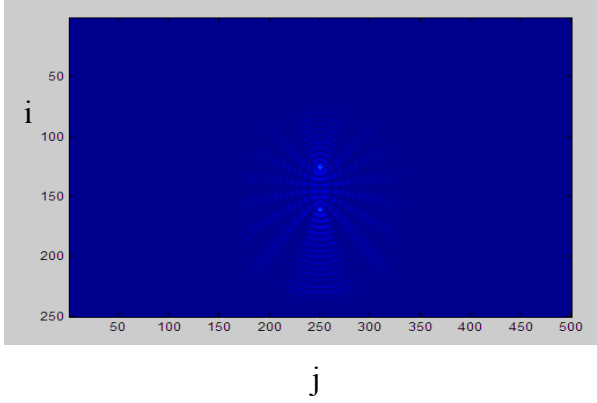
(f) Ortamda alt alta iki metal olduğu durumda E_z elektrik alanının üç boyutlu görüntüsü

Şekil 4.19. (Devam) Alt alta iki metal olması durumunda elektrik ve manyetik alan görüntüleri

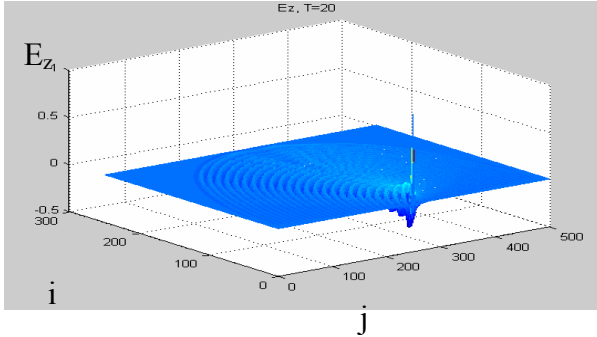
Ortama alt alta metal konması için gerekli yazılımın EK-3'dekinden farkı EK-11'de yer almaktadır. EK-11'deki yazılımın sonuçları Şekil 4.19'da gösterilmektedir. Şekil

4.19 (a)'de H_y manyetik alanının i ve j boyutlarındaki bir düzlemde değişimi iki boyutlu (b)'de ise üç boyutlu olarak gösterilmektedir. Bu değişimlere benzer olarak, (c) ve (d) H_x manyetik alanının, (e) ve (f) ise E_z elektrik alanının i ve j boyutlarına göre sırasıyla iki ve üç boyutlu gösterimlerini ifade etmektedir.

Ortamda orta noktaya ve biraz altına iki metal konmuş ve sonuçta bu sefer yansımanın alt alta iki bölgeden kaynaklandığı tespit edilmiştir. Bu yansıma bilgisi kullanılarak ortaya alt alta konan iki metalin konumlarının görüntülenmesi amacıyla hazırlanan EK-12'deki yazılımın çalıştırılması sonucu elde edilen görüntü elektrik alan şiddetinin z bileşeninin iki boyutta ve üç boyutta yansıma olması durumunda ve üç boyutta yansıma olmaması durumunda görüntüsü ve bu iki elektrik alanın farkı sonucunda ortama konan alt alta iki metalin görüntülenmesi Şekil 4.20'de görülmektedir.

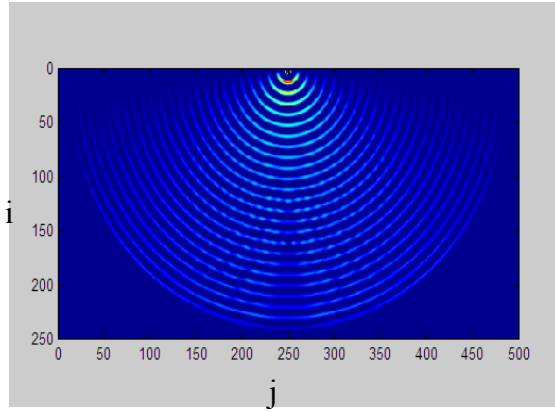


(a) Ortaya alt alta konan iki metalin konumlarının görüntülenmesi

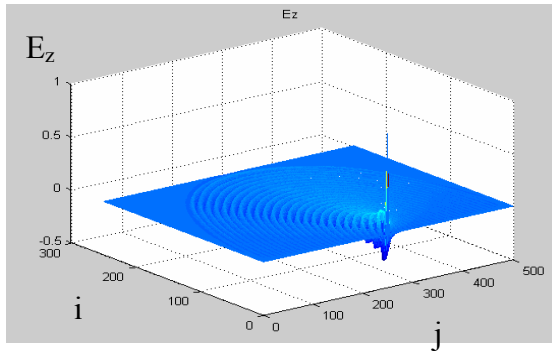


(b) Ortaya alt alta konan iki metalden yansıyan E_z elektrik alan üç boyutlu görüntüsü

Şekil 4.20. Ortada alt alta konan iki metalin görüntülenmesi



(c) Ortaya alt alta konan iki metalden yansıyan E_z elektrik alan iki boyutlu görüntüsü



(d) Ortaya alt alta konan iki metalden yansımasız E_z elektrik alanının üç boyutlu görüntüsü

Şekil 4.20. (Devam) Ortada alt alta konan iki metalin görüntülenmesi

Şekil 4.20.'de EK-3'deki ve EK-11'deki yazılımlar birleştirilmiş ve elektrik alanların farkı alınıp görüntülendiğinde ortaya alt alta yerleştirilen iki metalin görüntülenebildiği EK-3'den farkı EK-12'de yer alan yazılımda gösterilmektedir. Şekil 4.20 (a)'da ortaya konan metalin görüntüsü (b)'de ve (c)'de ise üç boyutlu olarak yansıma olması durumu E_z elektrik alanının i ve j boyutlarına göre gösterimleri (d) ise yansıma olmaması durumu elektrik alanının i ve j boyutlarına göre üç boyutlu gösterimi ifade edilmektedir.

Bu işlem adımıyla ortama alt alta konan iki metalin görüntülenmesi sağlanmıştır. Burada alt alta yerleştirilen iki metalin görüntülenmesinin pratik hayatta toprak altına

konan iki mayının yerinin tespit edilmesine katkıda bulunacağı değerlendirilmektedir.

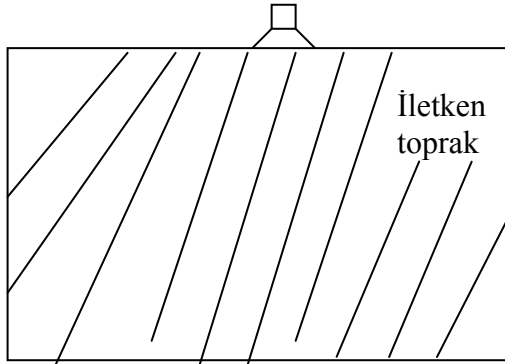
4.9 İletken ve Dielektrik Ortamlarda EM Dalga Yayılmı

İletken ve dielektrik ortamlarda simülasyon için Eş.3.48’de verilen ifade $\varepsilon_r=4$ ve

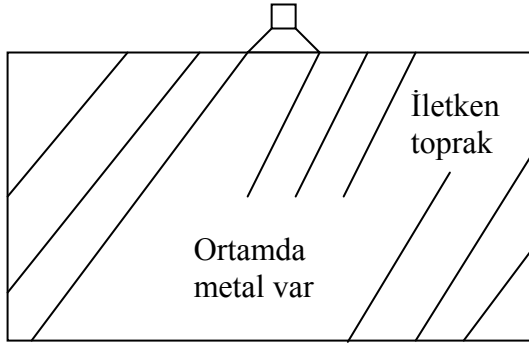
$$\frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0 \varepsilon_r}} \frac{\Delta t}{\Delta x} = \frac{c_0 \Delta x / 2c_0}{\Delta x} = \frac{1}{4} = 0.25 \text{ kabulleri için aşağıdaki şekli dönüşür;}$$

$$D_z^{n+1/2}(i, j) = \left[\frac{1 - \frac{\sigma \Delta t}{2\varepsilon_0 \varepsilon_r}}{1 + \frac{\sigma \Delta t}{2\varepsilon_0 \varepsilon_r}} \right] D_z^{n-1/2}(i, j) + \frac{0.25}{\left(1 + \frac{\sigma \Delta t}{2\varepsilon_0 \varepsilon_r}\right)} \left(H_y^n(i+1/2, j) - H_y^n(i-1/2, j) \right) - \frac{0.25}{\left(1 + \frac{\sigma \Delta t}{2\varepsilon_0 \varepsilon_r}\right)} \left(H_x^n(i, j+1/2) - H_x^n(i, j-1/2) \right) \quad (4.2)$$

Dielektrik ve iletken ortam, toprak veya kum altı için, ortamda metal olmadığı durum Şekil 4.21 ve metal yani (yansıma olduğu) durum Şekil 4.22 olarak aşağıda sunulmuştur.



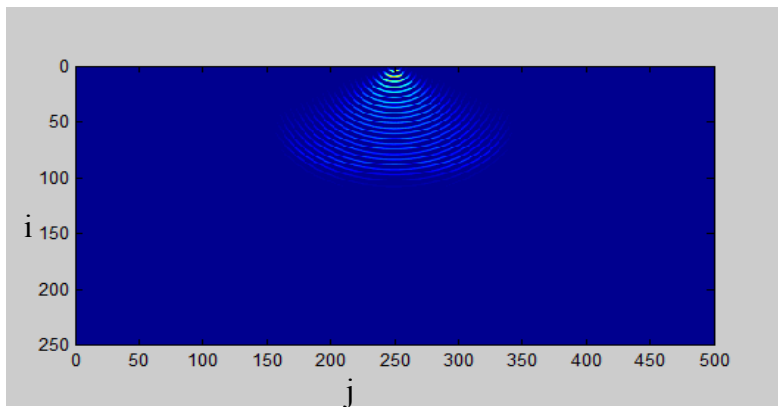
Şekil 4.21. İletken ortam (ortamda metal, yani yansıma olmadığı durum)



Şekil 4.22. İletken ortam (Ortamda metal, yani yansıma olduğu durum)

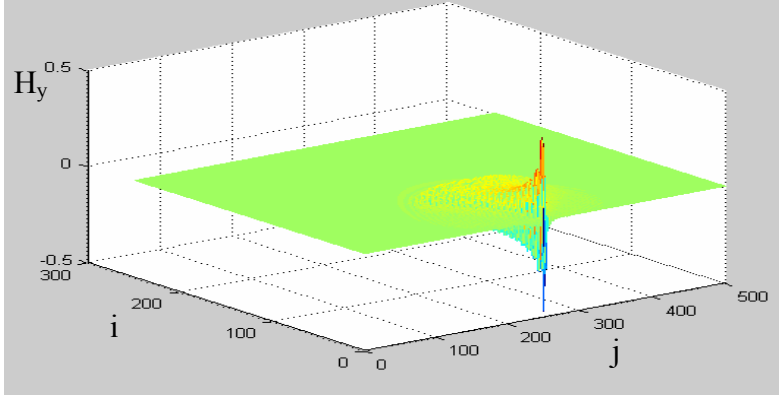
Burada $\sigma=10^{-4}$ iletkenlik değerinde metal yani yansıma olmadığı durum için EK-3'den farkı EK-13, metal yani yansıma olduğu durum için EK-13'den farkı EK-14'de metalin görüntülenmesi için EK-13 ve EK-14'dün birleşiminden farkı EK-15'de verilen yazılım sunulmuştur.

EK-13'deki yazılımın çalıştırılması sonucu elde edilen sırasıyla manyetik alan şiddetinin y bileşeni, manyetik alan şiddetinin x bileşeni ve elektrik alan şiddetinin z bileşeni iki boyutta ve üç boyutta Şekil 4.23'de gösterilmiştir.

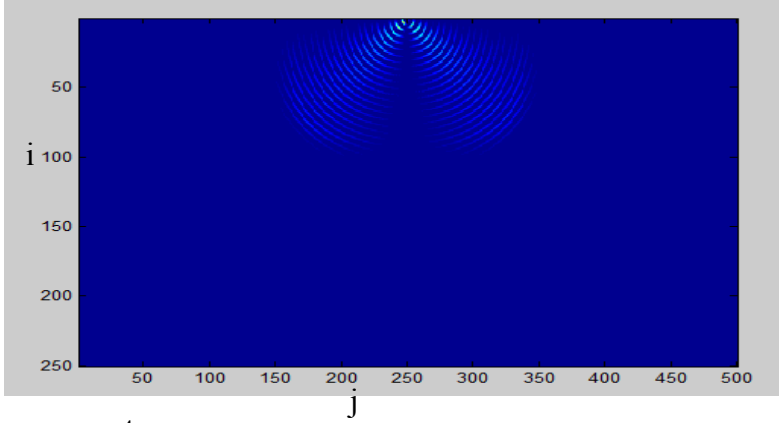


(a) $\sigma=10^{-4}$ iletkenlik değerinde H_y manyetik alanının metal yani yansıma olmadığı durum için iki boyutlu görüntüsü

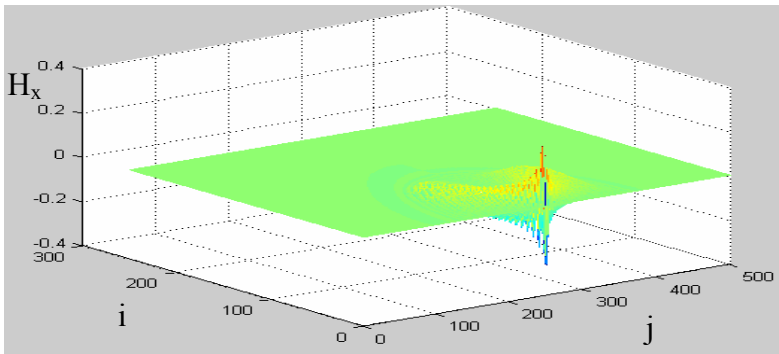
Şekil 4.23 İletken toprak altı ($\sigma=10^{-4}$ değerinde) elektrik ve manyetik alan görüntüleri (metal yani yansımanın olmadığı durum)



(b) $\sigma=10^{-4}$ iletkenlik değeriinde H_y manyetik alanının metal yani yansıma olmadığı durum için üç boyutlu görüntüsü

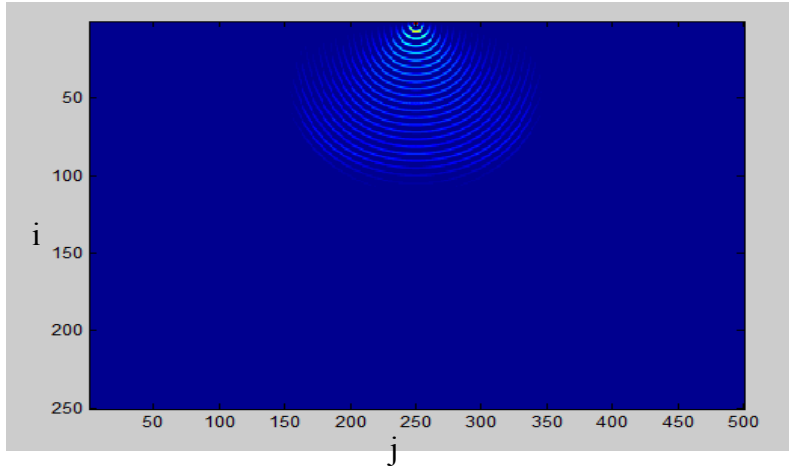


(c) $\sigma=10^{-4}$ iletkenlik değeriinde H_x manyetik alanının metal yani yansıma olmadığı durum için iki boyutlu görüntüsü

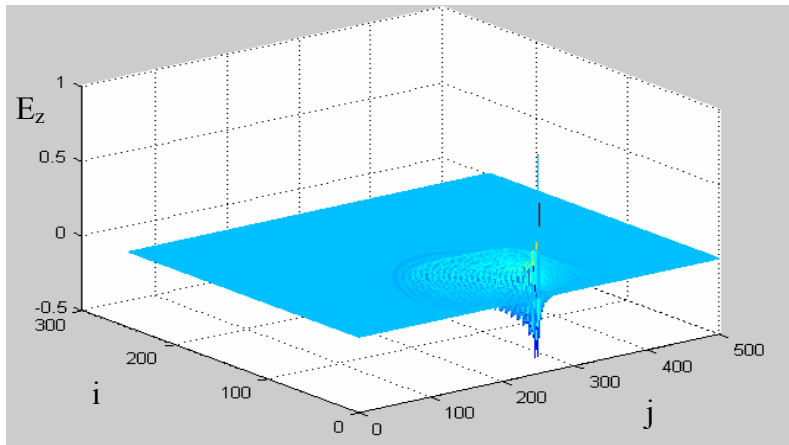


(d) $\sigma=10^{-4}$ iletkenlik değeriinde H_x manyetik alanının metal yani yansıma olmadığı durum için üç boyutlu görüntüsü

Şekil 4.23 (Devam) İletken toprak altı ($\sigma=10^{-4}$ değeriinde) elektrik ve manyetik alan görüntüleri (metal yani yansımanın olmadığı durum)



(e) $\sigma=10^{-4}$ iletkenlik değeriinde E_z elektrik alanının metal yani yansıma olmadığı durum için iki boyutlu görüntüsü



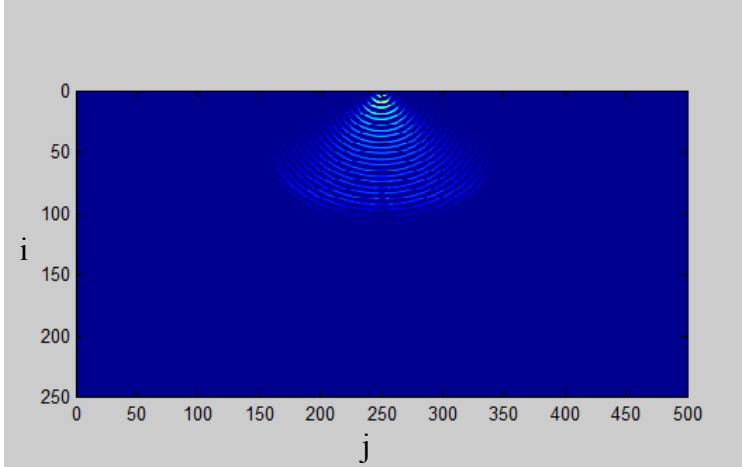
(f) $\sigma=10^{-4}$ iletkenlik değeriinde E_z elektrik alanının metal yani yansıma olmadığı durum için üç boyutlu görüntüsü

Şekil 4.23 (Devam) İletken toprak altı ($\sigma=10^{-4}$ değeriinde) elektrik ve manyetik alan görüntüleri (metal yani yansımanın olmadığı durum)

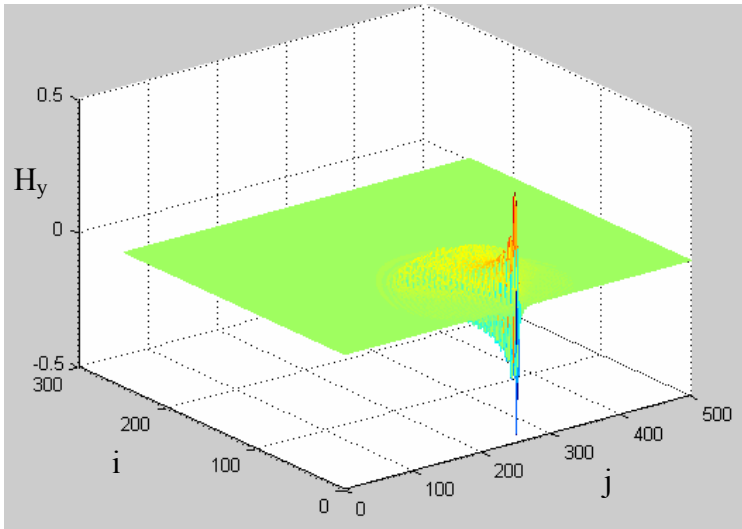
Şekil 4.23 (a)'de H_y manyetik alanının i ve j boyutlarındaki bir düzlemde değişimi iki boyutlu (b)'de ise üç boyutlu olarak gösterilmektedir. Bu değişimlere benzer olarak, (c) ve (d) H_x manyetik alanının, (e) ve (f) ise E_z elektrik alanının i ve j boyutlarına göre sırasıyla iki ve üç boyutlu gösterimlerini ifade etmektedir.

Bu duruma ilave olarak ortama metal yerleştirilmesi için EK-13'den farklı EK-14'de verilen yazılım geliştirilmiştir. EK-14'deki yazılımın çalıştırılması sonucu elde

edilen sırasıyla manyetik alan şiddetinin y bileşeni, manyetik alan şiddetinin x bileşeni ve elektrik alan şiddetinin z bileşeni iki boyutta ve üç boyutta Şekil 4.24’de gösterilmiştir.

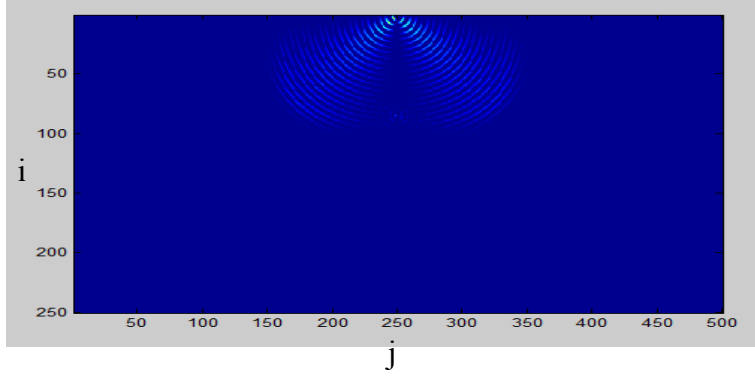


(a) $\sigma=10^{-4}$ iletkenlik değerinde H_y manyetik alanının metal yani yansıma olduğu durum için iki boyutlu görüntüsü

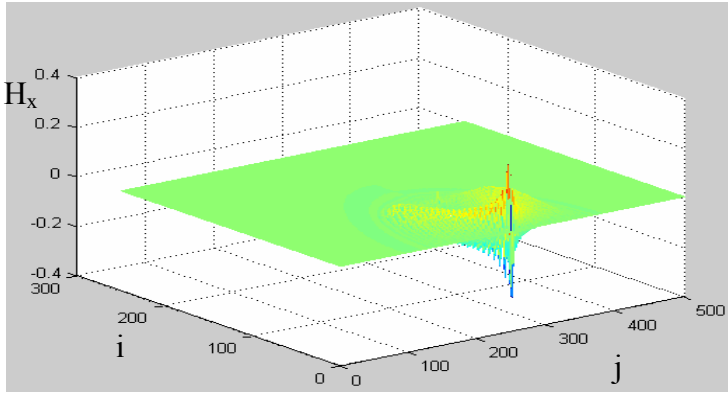


(b) $\sigma=10^{-4}$ iletkenlik değerinde H_y manyetik alanının metal yani yansıma olduğu durum için üç boyutlu görüntüsü

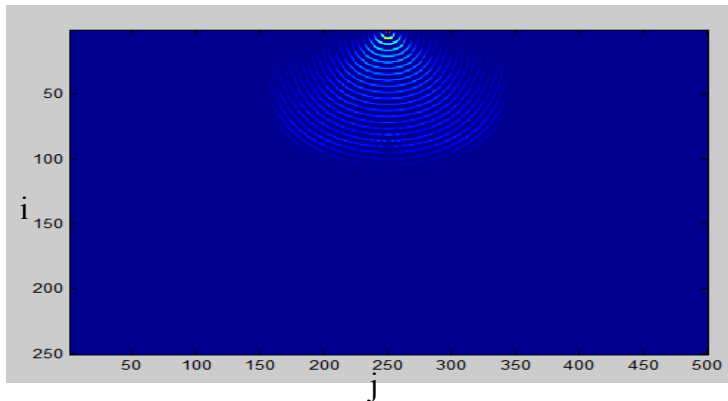
Şekil 4.24 İletken toprak altı ($\sigma=10^{-4}$ değerinde) elektrik ve manyetik alan görüntüleri (metal yani yansımanın olduğu durum)



(c) $\sigma=10^{-4}$ iletkenlik değeriinde H_x manyetik alanının metal yani yansıma olduğu durum için iki boyutlu görüntüsü

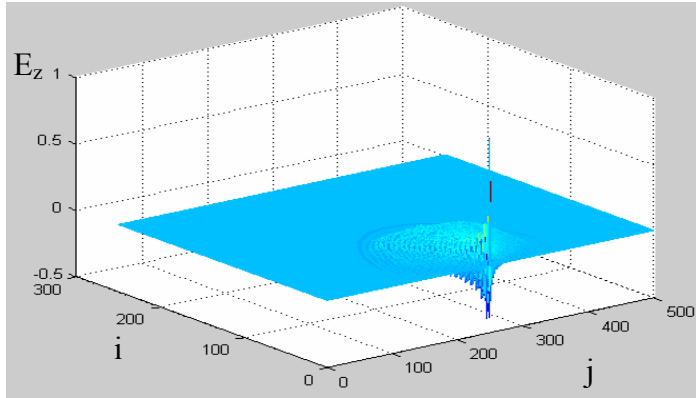


(d) $\sigma=10^{-4}$ iletkenlik değeriinde H_x manyetik alanının metal yani yansıma olduğu durum için üç boyutlu görüntüsü



(e) $\sigma=10^{-4}$ iletkenlik değeriinde E_z elektrik alanının metal yani yansıma olduğu durum için iki boyutlu görüntüsü

Şekil 4.24 (Devam) İletken toprak altı ($\sigma=10^{-4}$ değeriinde) elektrik ve manyetik alan görüntüleri (metal yani yansımanın olduğu durum)

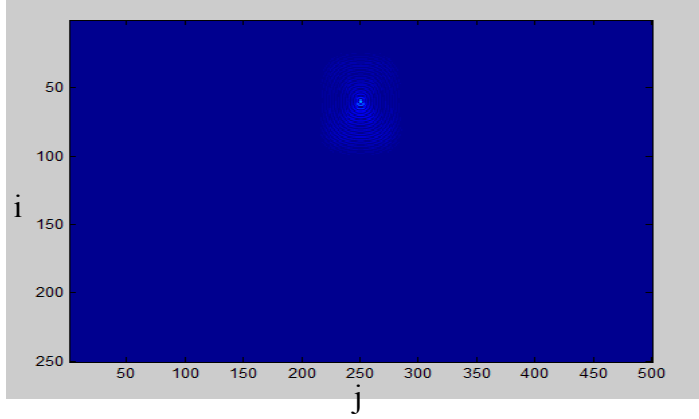


(f) $\sigma=10^{-4}$ iletkenlik değeriinde E_z elektrik alanının metal yani yansıma olduğu durum için üç boyutlu görüntüsü

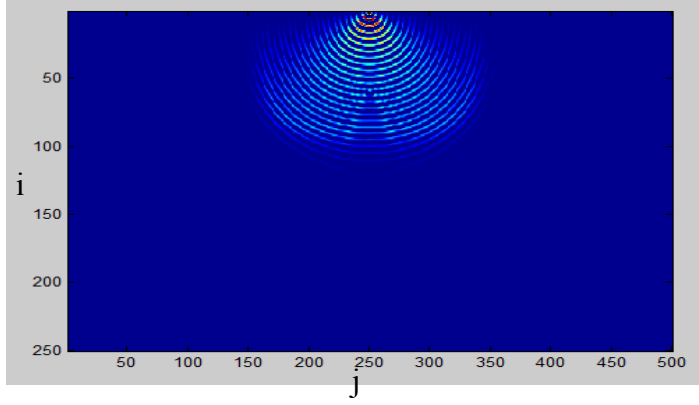
Şekil 4.24 (Devam) İletken toprak altı ($\sigma=10^{-4}$ değeriinde) elektrik ve manyetik alan görüntüleri (metal yani yansımanın olduğu durum)

Şekil 4.24 (a)'de H_y manyetik alanının i ve j boyutlarındaki bir düzlemde değişimi iki boyutlu (b)'de ise üç boyutlu olarak gösterilmektedir. Bu değişimlere benzer olarak, (c) ve (d) H_x manyetik alanının, (e) ve (f) ise E_z elektrik alanının i ve j boyutlarına göre sırasıyla iki ve üç boyutlu gösterimlerini ifade etmektedir.

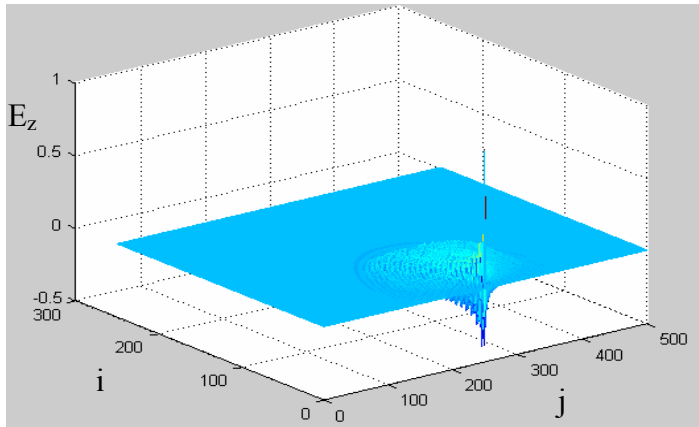
Ortama yerleştirilen metalden yansımanın olduğu tespit edilmiştir. Bu yansıma bilgisi kullanılarak ortama yerleştirilen metalin konumunun görüntülemesi amacıyla hazırlanan ve EK-13 ile EK-14'ün birleşiminden farkı EK-15'de verilen yazılımın çalıştırılması sonucu elde edilen elektrik alan şiddetinin z bileşeninin iki boyutta ve üç boyutta görüntüsü ve bu iki elektrik alanın farkı sonucunda ortama konan metalin görüntüsü Şekil 4.25'de görülmektedir.



(a) İletken ortama yerleştirilen metalin görüntülenmesi



(b) $\sigma=10^{-4}$ iletkenlik değeriinde E_z elektrik alanının metal yani yansıma olduğu durum için iki boyutlu görüntüsü

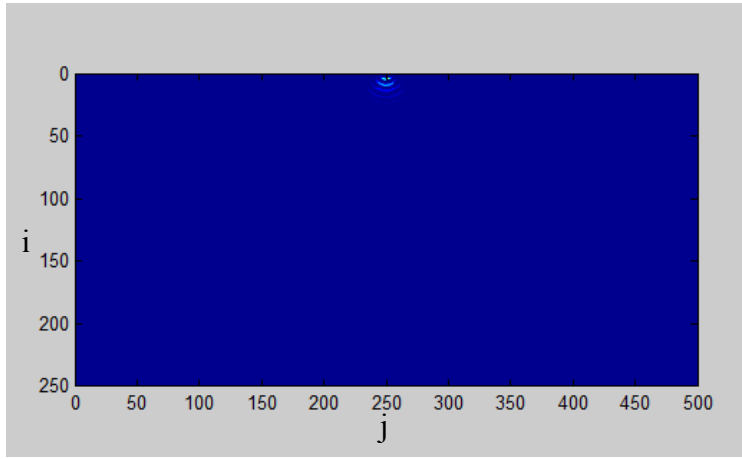


(c) $\sigma=10^{-4}$ iletkenlik değeriinde E_z elektrik alanının metal yani yansıma olduğu durum için üç boyutlu görüntüsü

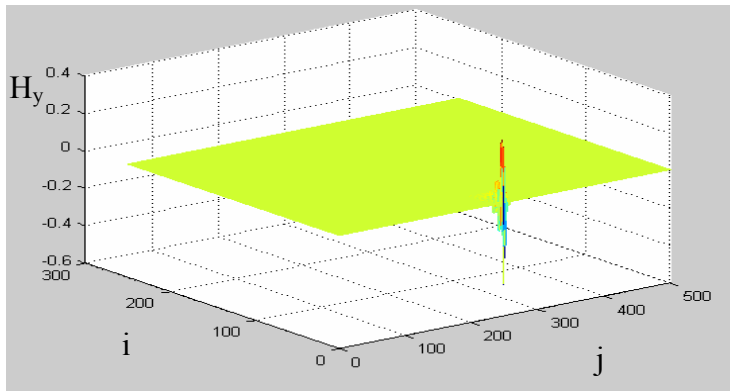
Şekil 4.25 İletken ortama ($\sigma=10^{-4}$) yerleştirilen metalin görüntülenmesi

Aynı şekilde $\sigma=10^{-2}$ iletkenlik değerinde metal yani yansıma olmadığı durum için EK-3'den farkı EK-16, metal yani yansıma olduğu durum için EK-16'dan farkı EK-17'de metalin görüntülenmesi için ise EK-16 ve EK-17'nin birleşiminden farkı EK-18'de verilen yazılımlar sunulmuştur.

EK-16'daki yazılımın çalıştırılması sonucu elde edilen sırasıyla manyetik alan şiddetinin y bileşeni, manyetik alan şiddetinin x bileşeni ve elektrik alan şiddetinin z bileşeni iki boyutta ve üç boyutta Şekil 4.26'da gösterilmiştir.

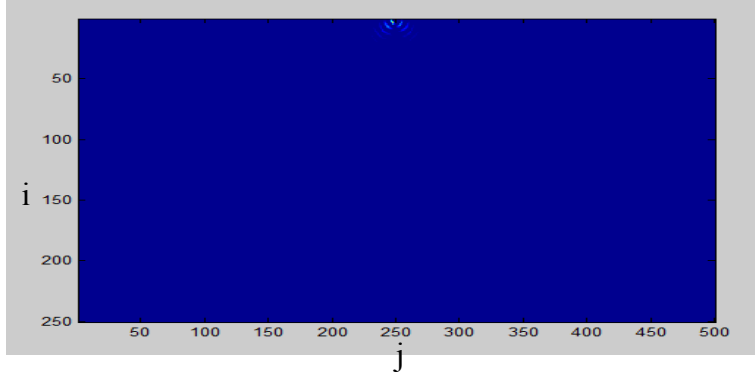


(a) $\sigma=10^{-2}$ iletkenlik değerinde H_y manyetik alanının metal yani yansıma olmadığı durum için iki boyutlu görüntüsü

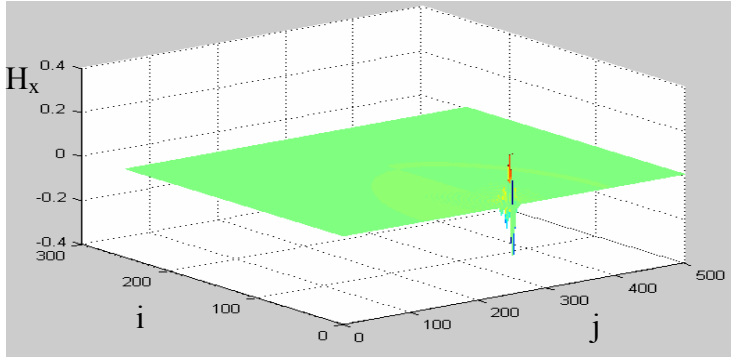


(b) $\sigma=10^{-2}$ iletkenlik değerinde H_y manyetik alanının metal yani yansıma olmadığı durum için üç boyutlu görüntüsü

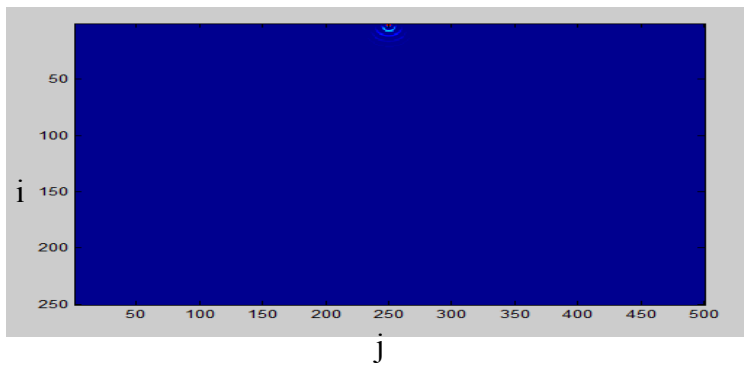
Şekil 4.26 İletken toprak altı ($\sigma=10^{-2}$ değerinde) elektrik ve manyetik alan görüntüleri (metal yani yansımanın olmadığı durum)



(c) $\sigma=10^{-2}$ iletkenlik değerinde H_x manyetik alanının metal yani yansıma olmadığı durum için iki boyutlu görüntüsü

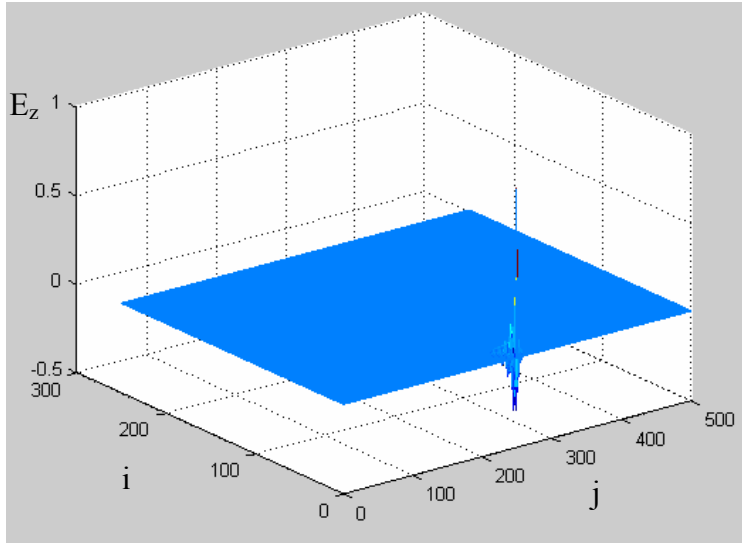


(d) $\sigma=10^{-2}$ iletkenlik değerinde H_x manyetik alanının metal yani yansıma olmadığı durum için üç boyutlu görüntüsü



(e) $\sigma=10^{-2}$ iletkenlik değerinde E_z elektrik alanının metal yani yansıma olmadığı durum için iki boyutlu görüntüsü

Şekil 4.26 (Devam) İletken toprak altı ($\sigma=10^{-2}$ değerinde) elektrik ve manyetik alan görüntüleri (metal yani yansımanın olmadığı durum)

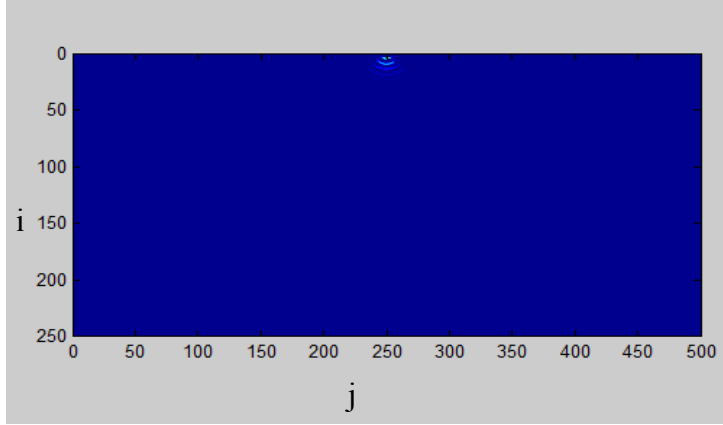


(f) $\sigma=10^{-2}$ iletkenlik değerinde E_z elektrik alanının metal yani yansıma olmadığı durum için üç boyutlu görüntüsü

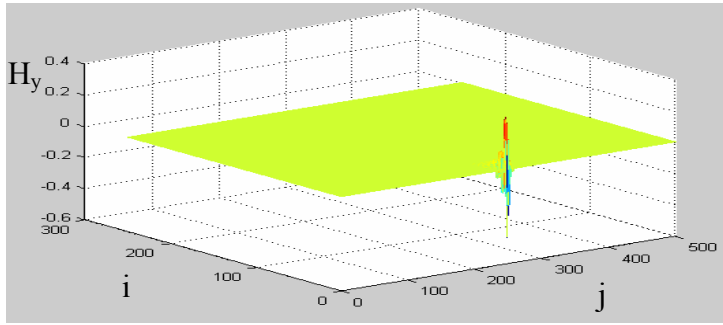
Şekil 4.26 (Devam) İletken toprak altı ($\sigma=10^{-2}$ değerinde) elektrik ve manyetik alan görüntüleri (metal yani yansımanın olmadığı durum)

Şekil 4.26 (a)'de H_y manyetik alanının i ve j boyutlarındaki bir düzlemde değişimi iki boyutlu (b)'de ise üç boyutlu olarak gösterilmektedir. Bu değişimlere benzer olarak, (c) ve (d) H_x manyetik alanının, (e) ve (f) ise E_z elektrik alanının i ve j boyutlarına göre sırasıyla iki ve üç boyutlu gösterimlerini ifade etmektedir.

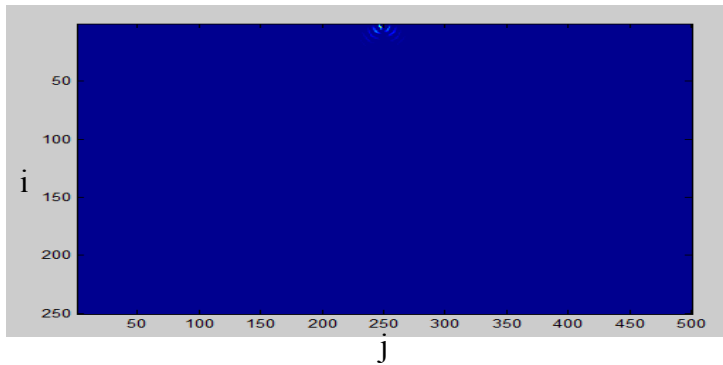
Bu duruma ilave olarak ortama metal yerleştirmesi için EK-16'dan farkı EK-17'de verilen yazılım geliştirilmiştir. EK-17'deki yazılımın çalıştırılması sonucu elde edilen sırasıyla manyetik alan şiddetinin y bileşeni, manyetik alan şiddetinin x bileşeni ve elektrik alan şiddetinin z bileşeni iki boyutta ve üç boyutta Şekil 4.27'de gösterilmiştir.



(a) $\sigma=10^{-2}$ iletkenlik değeriinde H_y manyetik alanının metal yani yansıma olduğu durum için iki boyutlu görüntüsü

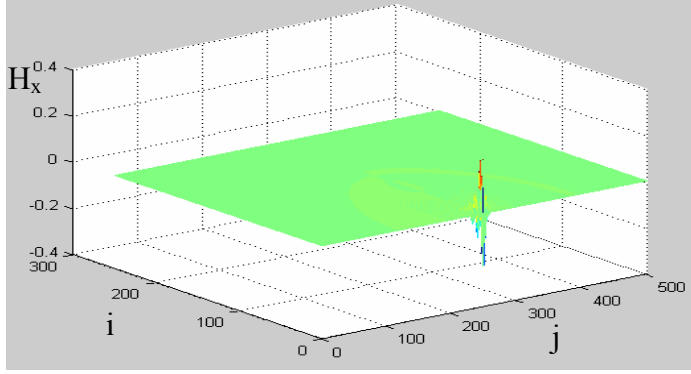


(b) $\sigma=10^{-2}$ iletkenlik değeriinde H_y manyetik alanının metal yani yansıma olduğu durum için üç boyutlu görüntüsü

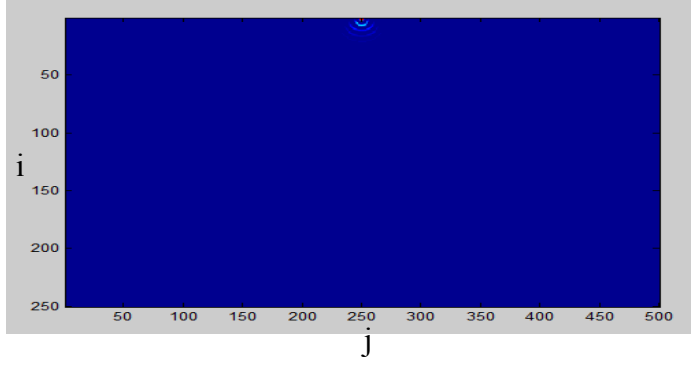


(c) $\sigma=10^{-2}$ iletkenlik değeriinde H_x manyetik alanının metal yani yansıma olduğu durum için iki boyutlu görüntüsü

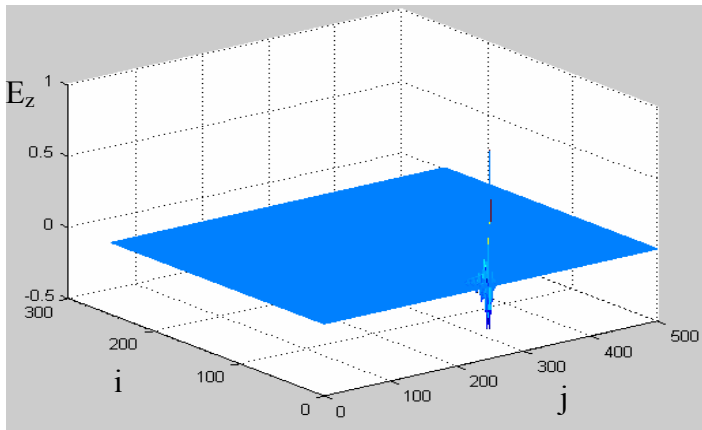
Şekil 4.27 İletken toprak altı ($\sigma=10^{-2}$ değeriinde) elektrik ve manyetik alan görüntüleri (metal yani yansımanın olduğu durum)



(d) $\sigma=10^{-2}$ iletkenlik değeriinde H_x manyetik alanının metal yani yansıma olduğu durum için üç boyutlu görüntüsü



(e) $\sigma=10^{-2}$ iletkenlik değeriinde E_z elektrik alanının metal yani yansıma olduğu durum için iki boyutlu görüntüsü

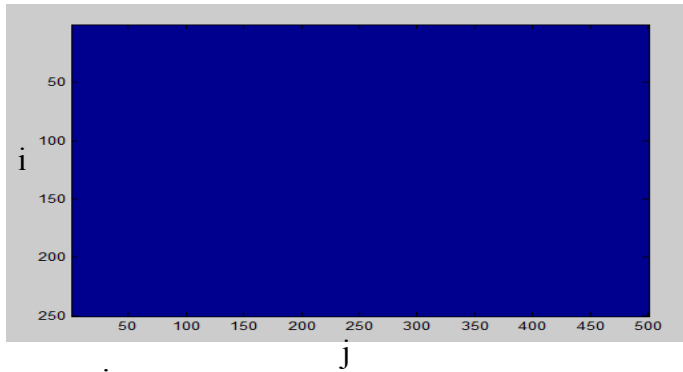


(f) $\sigma=10^{-2}$ iletkenlik değeriinde E_z elektrik alanının metal yani yansıma olduğu durum için üç boyutlu görüntüsü

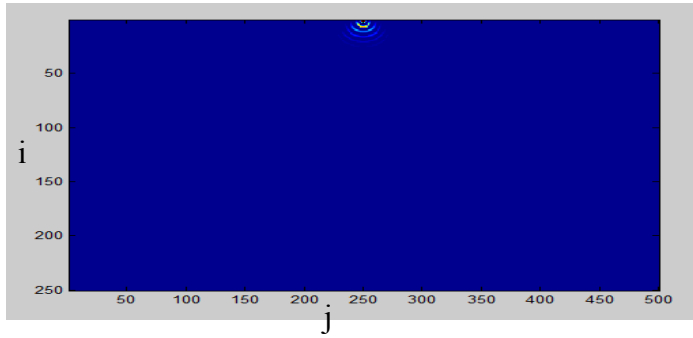
Şekil 4.27 (Devam)İletken toprak altı ($\sigma=10^{-2}$ değeriinde) elektrik ve manyetik alan görüntüleri (metal yani yansımanın olduğu durum)

Şekil 4.27 (a)'de H_y manyetik alanının i ve j boyutlarındaki bir düzlemde değişimi iki boyutlu (b)'de ise üç boyutlu olarak gösterilmektedir. Bu değişimlere benzer olarak, (c) ve (d) H_x manyetik alanının, (e) ve (f) ise E_z elektrik alanının i ve j boyutlarına göre sırasıyla iki ve üç boyutlu gösterimlerini ifade etmektedir.

Ortama yerleştirilen metalden yansımanın olduğu tespit edilmiştir. Bu yansıma bilgisi kullanılarak ortama yerleştirilen metalin konumunun görüntülenmesi amacıyla hazırlanan ve EK-16 ile EK-17'nin birleşiminden farkı EK-18'de verilen yazılımın çalıştırılması sonucu elde edilen elektrik alan şiddetinin z bileşeninin iki boyutta ve üç boyutta görüntüsü ve bu iki elektrik alanın farkı sonucunda ortama konan metalin görüntüsü Şekil 4.28'de görülmektedir.

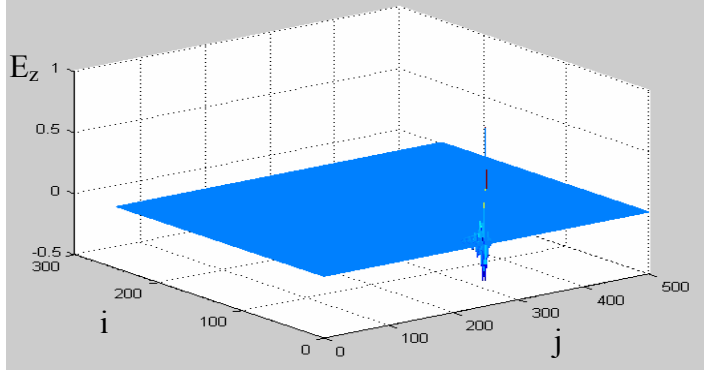


(a) İletken ortama yerleştirilen zayıflama nedeniyle görüntülenememesi



(b) $\sigma=10^{-2}$ iletkenlik değerinde E_z elektrik alanının metal yani yansıma olduğu durum için iki boyutlu görüntüsü

Şekil 4.28 İletken ortama ($\sigma=10^{-2}$) yerleştirilen metalin görüntülenememesi



(c) $\sigma=10^{-2}$ iletkenlik değerinde E_z elektrik alanının metal yani yansıma olduğu durum için üç boyutlu görüntüsü

Şekil 4.28 (Devam) İletken ortama ($\sigma=10^{-2}$) yerleştirilen metalin görüntülenememesi

Elde edilen sonuçlar yorumlanacak olursa iletkenliğin az olduğu ($\sigma=10^{-4}$) bir ortamda sinyalin derin mesafelere nüfuz edebildiği, ancak iletkenliğin yükselmesi durumunda ($\sigma=10^{-2}$) sinyalin zayıflayacağı artık derin mesafelere nüfuz edemediği görölmektedir. Bu nedenle iletkenlik değeri düşükken derinlere yerleştirilen metal görüntülenebilirken, iletkenlik yükseldikçe artık derin bölgeler için görüntüleme başarılamamaktadır.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında YNR ve FDTD yöntemleri araştırılmıştır. YNR radarları ile yerin altına elektromanyetik dalga gönderip yansıyan dalgadan yararlanarak yer altı görüntülenmiştir. Tek anten (monostatik) veya birden fazla anten (bistatik) kullanılarak, ortamın dielektrik parametrelerinin, kullanılan anten ve modülasyon tipinin ve başlıca sinyal işleme tipi olan A, B ve C taramayla farklı sonuçlar alınabildiği gösterilmiştir. Ayrıca bu konuda literatürde yapılan çalışmaların bazıları örnek olarak verilmiştir.

Bu çalışmayı desteklemek üzere modelleme tekniklerinden biri olan Zaman Bölgesinde Sonlu Farklar (FDTD) konusu araştırılmış, zaman ve uzay konumlarına zaman ve uzaydaki zaman adımı ve konum adımlarına göre elektrik ve manyetik alan ifadelerinin birbirleri cinsinden bir, iki veya üç boyutlu simülasyon denklemleri sunulmuştur. Ayrıca sınır koşulları, iletkenlik ve diğer önemli konuların bu çalışmaya nasıl etki edeceği formüllerle anlatılmıştır.

Uygulamada ise bu iki tekniğin birleştirilmesi amaçlanmış ve tezde sunulan iki boyutlu FDTD denklemlerinden yararlanılarak EM dalga yayılımı yüksek bir frekans için elde edilmiş; ancak boyutların yeterince fazla olmaması nedeniyle kenar yansımaları oluşmuştur. Burada yansımaları ortadan kaldırmak için boyutlar ve işlem süresi arttırılmış ve daha iyi bir yayılım elde edilmiştir. Bu EM dalga kaynağı önce üste taşınmış ve sinyalin bozulmadan üst bölgeden alt bölgeye çalışma ortamına yayıldığı görülmüştür. Bu noktada çalışma bölgesine metal konmuş ve elektrik ve manyetik alan görüntülerinde yansıma oluştuğu görülmüştür. Elektrik alandaki bu yansımadan yararlanılarak $\vec{E}$ elektrik alanının farkı;

$$\vec{E} \text{ (yansıma olduğu durum)} - \vec{E} \text{ (yansıma olmadığı durum)}$$

değeri hesaplatılmıştır. Bu farktan yararlanılarak metalin konumunun görüntülenebildiği gözlemlenmiştir. Bu uygulama daha sonra yan yana ve alt alta iki

metal için aynı algoritma mantığıyla tekrarlanmış ve aynı şekilde yan yana ve alt alta iki metal konumlarında gözlemlenmiştir.

Çalışmanın devamında boş uzay yerine dielektrik ortam ele alınmış ve dielektrik sabiti değiştirilerek elektrik alan ve manyetik alan terimlerin katsayı 2'ye bölünmüş ve beklendiği gibi sinyalin zayıfladığı ve derinlere inemediği görülmüştür. Burada derinlere inmek için frekansın azalması gerekir, ancak bu durumda çözünürlük zayıf olacaktır. Pratik uygulamalarda mayın veya patlayıcı düzeneklerin fazla derine konmadığı dikkate alınırsa, uygulamanın pratik çözümlere en azından algoritma mantığı seviyesinde katkı sağlayacağı değerlendirilmektedir.

Bu dielektrik ortamın yanı sıra iletkenlik değeriyle de çalışma yapılmış ve iki farklı iletkenlik değeri için sinyalin zayıflamaları ve iletken ortama yerleştirilen metalin iletkenlik nisbeten düşükken görüntülediği, ancak iletkenlik yükseldikçe sinyalin daha fazla kayba uğraması nedeniyle artık görüntülemenin başaramadığı tespit edilmiştir.

Çalışma kısaca özetlenecek olursa, adım adım önce FDTD yöntemiyle dalga yayılımı elde edilmiş, daha sonra bu dalganın bir ortamın üst kenarından yayılımı sağlanmıştır. YNR uygulamalarına geçilmiş ve ortama önce tek metal, daha sonra yan yana ve alt alta metaller yerleştirilerek önce yansımanın olduğu, daha sonra bu yansımadan yararlanılarak bu metallerin yerinin tespit edilebildiği gösterilmiştir. Bu sonucun pratik mayın yeri tespit uygulamalarında fayda sağlayacağı, en azından algoritma geliştirme performans tahminlerinin oluşturulmasında bu konudaki çalışmalara fayda sağlayacağı değerlendirilmektedir. Burada kaynak olarak kullanılan sinyal;

$$\cos(2 \cdot \pi \cdot f \cdot \Delta t \cdot (n+1))$$

şeklinde belirlenmiştir. Bu da çözünürlüğün iyi olmasını sağlamıştır. Bu tezde yapılan çalışmanın yaklaşım açısından pratik uygulamalara fayda sağlayacağı değerlendirilmektedir.

Son olarak elde edilen bu sinyal yayılımı MATLAB programı komutlarından “movie” komutuyla film olarak oynatılmış ve sinyalin adım adım ilerlemesi görülmüştür.

Yapılan çalışmanın elektrik alanın yansıma olduğu durumda ve olmadığı durumdaki farklarından yararlanılarak metal cisimlerin tespit edilmesinin, mayın veya patlayıcı tespiti çalışmalarına katkı sağlayacağı değerlendirilmektedir.

Gelecekte Yürütülebilecek Çalışmalar için,

- Sınır koşullarının da hesaba katılması,
- İki anten üzerinden bistatik durum ve B tarama konfigürasyonu için algoritma geliştirilerek yeni simülasyon sonuçları elde edilmesi,
- Bu simülasyon sonuçlarının deneysel ortamlarda denenmesi çalışmalarının da yapılabilceği

değerlendirilmektedir.

KAYNAKLAR

1. Daniels, D. J., "Ground Penetrating Radar 2nd ed.", *The Institution of Electrical Engineers*, 1-246 (2004).
2. "Mayın Tespit Sistemleri (MTS) Geliştirilmesi Projesi GPR Simülasyonu Sonuç Raporu", *Bilkent Üniversitesi MTS Proje Grubu*, 1-5 (1999).
3. Sullivan, D., "Electromagnetic Simulation Using The FDTD Method", *IEEE Press*, New York, 1-109, (2000).
4. Booton, R., "Computational Methods for Electromagnetics or Microwaves" *Wiley Series*, Colorado, 59-75 (1992).
5. Sadiku, M. N. O., "Numerical Techniques in Electromagnetics 2nd ed. Section 3", *CRC Press*, 39-66 (2001).
6. Taflove, A., "Computational Electromagnetics", *Artech House*, 65-66 (1995).
7. Yiğit, E., "Elektromagnetik Alan Ölçümlerinde Yeraltındaki Nesnelerin Tespit Edilmesi ve Yere Nüfuz Eden Radar (YNR) Görüntülerinin Elde Edilmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Mersin Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Mersin, 1-83 (2007).
8. Özdemir, C., Demirci, Ş., Yiğit, E., Kavak, A., "A Hyperbolic Summation Method to Focus B-Scan Ground Penetrating Radar Images. An Experimental Study with a Stepped Frequency System", *Microwave and Optical Technology Letters*, 49(3):673-676 (2007).
9. Özdemir, C., Ling, H., "An Experimental Investigation of Buried-Object Imaging in a Homogeneous Medium Using Synthetic-Aperture Radar Concepts", *Microwave and Optical Technology Letters*, 48(6):1209-1214 (2006).
10. Yiğit, E., Demirci, Ş., Özdemir, C., Kavak, A., "A Synthetic-Aperture Radar-Based Focusing Algorithm for B-Scan Ground Penetrating Radar Imagery," *Microwave and Optical Technology Letters*, 49(10):2534-2540 (2007).
11. Özdemir, C., Demirci, Ş., Yiğit, E., "B Tarama Yere Nüfuz Eden Radar Görüntüleri İçin Bir Odaklama Algoritması", *URSI-TÜRKİYE*, 244-246 (2006).
12. Özdemir, C., Demirci, Ş., Yiğit, E., "A Focusing Method for B-Scan GPR Images" *11 th International Conference on Ground Penetrating Radar* Columbus Ohio (2006).

13. Özdemir, C., Demirci, Ş., Yiğit, E., “Grond Penetrating Radar Image Focusing Using Frequency-Wavenumber Based Synthetic-Aperture Radar Technique”, *ICEAA*, 10 th Edition, (2007).
14. Özdemir, C., Demirci, Ş., Yiğit, E., “3 Boyutlu Yere Nüfuz Eden Radar (YNR) C-Tarama Görüntülerinin Elde Edilmesi”, *ELECO 2006*, Bursa 95-98 (2006).
15. Özdemir, C., Demirci, Ş., Yiğit, E., “Bir Yapay Açıklıklı Radar Tekniği ile Odaklanmış Yere Nüfuz Eden Radar Görüntülerinin Elde Edilmesi”, *URSI-TÜRKİYE*, 229-231 (2006).
16. Özdemir, C., Demirci, Ş., Yiğit, E., “Ground Penetrating Radar Studies at Mersin University”, *EWS-2006*, (10-25)-(10-30) (2006).
17. Pomposiello, C., Favetto, A., Estora, H., “Resistivity Imaging and Ground Penetrating Radar Survey at Gualaguaychu Landfill, Entre Rios Province, Argentina: Evidences of a Contamination Plume”, *IAGA WG 1.2 on Electromagnetic Induction in the Earth Proceedings of The 17 th Workshop*, Hyderabad, India, 1-5 (2004).
18. Knight, R., “Ground Penetrating Radar for Environmental Applications”, *Annu. Rev. Earth Planet*, 229-255 (2001).
19. Langley, K., Hamran, S. E., Hogda, K. A., Storrø, R., “Use of C-Band Ground Penetrating Radar to Determine Backscatter Sources Within Glaciers”, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45(5):1236-1246 (2007).
20. Olhoeft, G. R., “Working in a Difficult Environment:GPR Sensing on the Railroads”, *IEEE Trans Geoscience and Remote Sensing*, 108-111 (2005).
21. Witten, A., Molyneux, J.E., Nyquist, J. E., “Ground Penetrating Radar Tomography: Algorithms and Case Studies”, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 32(2):461-467 (2004).
22. Chignell, R.J., “Ground Penetrating Radar-A Sensor for Mine Detection”, *Conference Publication on “Detection of Abandoned Land Mines”*, 431:103-108 (1996).
23. Valle, S., Zanzi, L., Sghezzi, M., Lenzi, G., Friberg, J., “Ground Penetrating Radar Antennas:Theoretical and Experimental Directivity Functions”, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(4):749-758 (2001).

24. Shrestha, S. M., Arai, I., Miwa, T., Tomizawa, Y., "Signal Processing of Ground Penetrating Radar Using Super Resolution Technique", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 300-305 (2001).
25. Kim, K., Scott, W., "Investigation of Resistive Vee Antennas for a Multi-Static Ground-Penetrating Radar", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 96-99 (2005).
26. Youn, H. S., Chen, C.C., "Special GPR Antenna for Landmine and UXO Surveys", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 100-103 (2005).
27. Yee, K. S., "Numerical Solution of Initial Boundary Value Problems Involving Maxwell Equations in Isotropic Media", *IEEE Transactions on Antennas and Propagations*, 302-307 (1966).
28. Taflove, A., Brodwin, M.E., "Numerical Solution of Steady-State Electromagnetic Scattering Problems Using the Time-Dependent Maxwell's Equations", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 623-630 (1975).
29. Uduwawala, D., Norgren, M., Fuks, M., "A Complete FDTD Simulation of a Real GPR Antenna System Operating Above Lossy and Dispersive Grounds", *PIR 50*, 209-229 (2005).
30. Reineix, A., Martinat, B., Bertheilet, J. J., Ney, R., "FDTD method for Theoretical Analysis of the Netlander GPR", *Conference on the Geophysical Detection of Subsurface water on Mars*, 7013-7014 (2001)
31. GÜREL, L., "Three Dimensional FDTD Modeling of a Ground Penetrating Radar", *IEEE Trans Geoscience and Remote Sensing*, 38(4):1513-1521 (2000).
32. Teixeira, F.L., "FDTD/FEDT Methods: A Review on Some Recent Advances and Selected Applications", *Journal of Microwave and Optoelectronics*, 6(1):83-95 (2007).
33. Dib, N., Katehi, L. P. B., "Analysis of Transition from Rectangular Waveguide to Shielded Dielectric Image Guide Using Finite Difference Time-Domain Method", *IEEE Microwave and Guided Wave Letters*, 3(9):327-329 (1993).
34. Mur, G., "Absorbing Boundary Conditions for the Finite Difference Approximation of The Time-Domain Electromagnetic-Field Equations", *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, EMC-23(4):377-382 (1981).

EKLER

EK-1. Merkezde EM Dalga Kaynağı Olması İçin Geliştirilen Yazılım

```

clear all;
figure(1);figure(2);figure(3);
tic

% Boyut:
% E matrisi 60X60 seciliyor.
%IE=60;
%JE=60;
IE = 90;
JE = 90;

% Kaynak merkezi:
% Kaynak merkezi tam orta nokta seciliyor.
ic = IE/2;
jc = JE/2;

ddx = 0,1;    % delta x = 10 cm.
f = 3e8;      % frequency = 300 MHz
lamd= 3e10 / f; % lambda = 1 m

dt = ddx / (2*3e8);

% BASLANGIC DEGERLERi

for j=1:IE
    for i=1:JE
        dz(i,j) = 0;
        ez(i,j) = 0;
        hx(i,j) = 0;
    
```

EK-1. (Devam) Merkezde EM Dalga Kaynağı Olması İçin Geliştirilen Yazılım

```

hy(i,j) = 0;
ga(i,j) = 1,0;
end
end

% Zaman döngüsü
%t0 = 20000;
t0 = 120;
for n=1:t0
    for j=2:IE
        for i=2:IE

            dz(i,j) = dz(i,j)+0,5*(hy(i,j)-hy(i-1,j)-hx(i,j)+hx(i,j-1));

        end
    end

    pulse(n) = cos(2*pi*f*(dt*(n+1)));
    dz(ic,jc) = pulse(n); %ic jc matsisin tam ortasi.

    % Calculate the EZ field
    for j=2:JE
        for i=2:IE
            ez(i,j) = ga(i,j)*dz(i,j);

        end
    end

    % Calculate the Hx field
    for j=1:JE-1

```

EK-1. (Devam) Merkezde EM Dalga Kaynağı Olması İçin Geliştirilen Yazılım

```

for i=1:IE-1

    hx(i,j) = hx(i,j) + 0,5*(ez(i,j) - ez(i,j+1));

end

end

% Calculate the Hy field
for j=1:JE-1
    for i=1:IE-1

        hy(i,j) = hy(i,j) + 0,5*(ez(i+1,j) - ez(i,j));

    end
end

% Zaman döngüsü sonu
end

figure(1); plot(pulse);

figure(2); mesh(1:IE,1:JE,ez); title('Ez');
Max = max(max(abs(ez)))+1;
figure(3); image(254/Max * ez);

figure(4); mesh(1:IE,1:JE,hx); title('Hx');

Max = max(max(abs(hx)))+1;
figure(5); image(254/Max * hx);
figure(6); mesh(1:IE,1:JE,hy); title('Hy');
```

EK-1. (Devam) Merkezde EM Dalga Kaynağı Olması İçin Geliştirilen Yazılım

```
Max = max(max(abs(hy)))+1;  
figure(7); image(254/Max * hy);  
time = toc;  
disp('Dakika: ');  
round( (10*time) /60 / 10)  
disp('_____');  
disp(' ');  
disp(' ');
```

EK-2. Merkezde EM Dalga Kaynağı Olması İçin Geliştirilen Yazılım

EK-1’de geliştirilen yazılımda aşağıdaki ifadeler değiştirilmiştir.

$$IE = 500;$$

$$JE = 500;$$

$$t0 = 500;$$

EK-3. EM Dalga Kaynağının Üst Kenara Taşınması İçin Geliştirilen Yazılım

EK-2’de geliştirilen yazılıma ilave olarak sadece aşağıdaki ifadeler değiştirilmiştir.

$$IE=250;$$

$$JE=500;$$

$$ic = 2;$$

$$jc = JE/2;$$

Bu değişikliklerle yazılım sonucunda EM dalga üst kenara taşınmıştır.

EK-4. Ortama Metal Konması Durumunu Simüle Etmek İçin Geliştirilen Yazılım

Ortama metal konması için EK-3'deki yazılıma sadece aşağıdaki 4 satır ilave edilerek ortama metal yerleştirilmiştir.

%METAL NOKTA YERLESTIRIYORUM

$ez(IE/2,JE/2) = 0;$

$ez((IE/2+1) , (JE/2)) = 0;$

$ez((IE/2) , (JE/2+1)) = 0;.$

$ez((IE/2+1) , (JE/2+1)) = 0;$

EK-5. Movie Komutuyla Dalga Yayımını İzlemek İçin Geliştirilen Yazılım

Movie komutuyla EM dalganın adım adım izlenmesi için EK-4'deki yazılıma aşağıdaki satırlar ilave edilmiştir.

```
ddd=1;
```

```
for t0=10:10:100
```

```
M(ddd)=getframe;
```

```
ddd=ddd+1;
```

```
movie(M)
```

EK-6. Ortaya Yerleştirilen Konan Metalin Görüntülenmesi İçin Geliştirilen Yazılım

Ortaya konan metalin tespiti için önce EK-3'deki sonra EK-4'deki yazılım yazılmış ve aşağıdaki satırların ilavesiyle ortaya konan metal görüntülenebilmiştir.

```
ez1=ez;
```

```
fark=ez-ez1;
```

```
fark=abs(fark);
```

```
figure;image(254/Max*fark);
```

EK-7. Dielektrik Ortam Ortamda Metal Olmadığı Durum İçin Geliştirilen Yazılım

Burada sadece aşağıdaki satırların yazıldığı şekilde değiştirilmesiyle dielektrik ortam oluşturulmuştur. EK-3'deki yazılımdan farklı satırları,

$$dz(i,j) = dz(i,j) + 0,25 * (hy(i,j) - hy(i-1,j) - hx(i,j) + hx(i,j-1));$$

$$hx(i,j) = hx(i,j) + 0,25 * (ez(i,j) - ez(i,j+1));$$

$$hy(i,j) = hy(i,j) + 0,25 * (ez(i+1,j) - ez(i,j));$$

EK-8. Dielektrik Ortam Ortamda Metal Olduğu Durum İçin Geliştirilen Yazılım

EK-7'deki yazılıma sadece aşağıdaki şekilde metal yerleştirme satırları ilave edilmiştir.

%METAL NOKTA YERLESTIRIYORUM

$ez(IE/2,JE/2) = 0;$

$ez((IE/2+1) , (JE/2)) = 0;$

$ez((IE/2) , (JE/2+1)) = 0;$

$ez((IE/2+1) , (JE/2+1)) = 0;$

EK-9. Yan Yana İki Metal Olduğu Durumu Simüle Etmek İçin Geliştirilen Yazılım

Yan yana iki metal konması durumu için EK-3'deki yazılıma aşağıdaki satırlar ilave edilmiştir.

%METAL NOKTA YERLESTIRIYORUM

```
ez(IE/2,JE/2) = 0;
ez( (IE/2+1) , (JE/2 ) ) = 0;
ez( (IE/2 ) , (JE/2+1) ) = 0;
ez( (IE/2+1) , (JE/2+1) ) = 0;
```

% İKİNCİ METAL NOKTAYI YERLESTIRIYORUM

```
ez(IE/2,300) = 0;
ez( (IE/2+1) , (300 ) ) = 0;
ez( (IE/2 ) , (301) ) = 0;
ez( (IE/2+1) , (301) ) = 0;
```

EK-10. Yan Yana İki Metal Olduğu Durumda Bu İki Metali Görüntülemek İçin Geliştirilen Yazılım

Bu durumu simüle etmek için önce EK-3'deki yazılım sonra EK-9'daki yazılım birleştirilmiş ve aşağıdaki ilavelerle yan yana konan iki metal görüntülenebilmiştir.

```
ez1=ez;
```

```
fark=ez-ez1;
```

```
fark=abs(fark);
```

```
figure;image(254/Max*fark);
```

EK-11. Alt Alta İki Metal Olduğu Durumu Simüle Etmek İçin Geliştirilen Yazılım

Burada alt alta iki metal konması için EK-3'deki yazılıma aşağıdaki ilaveler yapılmıştır.

%METAL NOKTA YERLESTIRIYORUM

$ez(IE/2,JE/2) = 0;$

$ez((IE/2+1) , (JE/2)) = 0;$

$ez((IE/2) , (JE/2+1)) = 0;$

$ez((IE/2+1) , (JE/2+1)) = 0;$

% İKİNCİ METAL NOKTAYI ALTA YERLESTIRIYORUM

$ez(160,JE/2) = 0;$

$ez((161) , (JE/2)) = 0;$

$ez((160) , (JE/2+1)) = 0;$

$ez((161) , (JE/2+1)) = 0;$

EK-12. Alt Alta İki Metal Olduğu Durumda Bu İki Metali Görüntülemek İçin Geliştirilen Yazılım

Bu durumu simüle etmek için önce EK-3'deki yazılım sonra EK-11'deki yazılım birleştirilmiş ve aşağıdaki ilavelerle yan yana konan iki metal görüntülenebilmiştir.

```
ez1=ez;
```

```
fark=ez-ez1;
```

```
fark=abs(fark);
```

```
figure;image(254/Max*fark);
```

EK-13. İletken Toprak Altında ($\sigma=10^{-4}$) Ortamda Metal Olmadığı Durum İçin Geliştirilen Yazılım

Bu durumu simüle etmek için önce EK-3'deki yazılıma aşağıdaki ilaveler yapılarak iletken toprak altı simüle edilmiştir.

```
eps0 = 8,854e-12;
```

```
eps_r = 4;
```

```
eps = eps0*eps_r;
```

```
sigma = 1e-4;
```

```
e_coef1 = (2*eps-sigma*dt)/(2*eps+sigma*dt);
```

```
e_coef2 = 2*eps/(2*eps+sigma*dt);
```

```
dz(i,j) = dz(i,j)*e_coef1+0,25*e_coef2*(hy(i,j)-hy(i-1,j)-hx(i,j)+hx(i,j-1));
```

EK-14. İletken Toprak Altında ($\sigma=10^{-4}$) Ortamda Metal Olduğu Durum İçin Geliştirilen Yazılım

Bu durumu simüle etmek için önce EK-13'deki yazılıma aşağıdaki ilaveler yapılarak iletken toprak altı metalin olduğu durum simüle edilmiştir.

%METAL NOKTA YERLESTIRIYORUM

ez(85,250) = 0; .

ez(86 , 250) = 0; .

ez(85 , 251) = 0; .

ez(86 , 251) = 0; .

EK-15. İletken Toprak Altında ($\sigma=10^{-4}$) Ortamda Metali Görüntülemek İçin Geliştirilen Yazılım

Bu durumu simüle etmek için önce EK-13'deki yazılım sonra EK-14'deki yazılım birleştirilmiş ve aşağıdaki ilavelerle iletken ortama konan metal görüntülenebilmiştir.

```
ez1=ez;
```

```
fark=ez-ez1;
```

```
fark=abs(fark);
```

```
figure;image(254/Max*fark);
```

EK-16. İletken Toprak Altında ($\sigma=10^{-2}$) Ortamda Metal Olmadığı Durum İçin Geliştirilen Yazılım

Bu durumu simüle etmek için önce EK-3'deki yazılıma aşağıdaki ilaveler yapılarak iletken toprak altı bu kez $\sigma=10^{-2}$ değeri için simüle edilmiştir.

```
eps0 = 8,854e-12;
```

```
eps_r = 4;
```

```
eps = eps0*eps_r;
```

```
sigma = 1e-2;
```

```
e_coef1 = (2*eps-sigma*dt)/(2*eps+sigma*dt);
```

```
e_coef2 = 2*eps/(2*eps+sigma*dt);
```

```
dz(i,j) = dz(i,j)*e_coef1+0,25*e_coef2*(hy(i,j)-hy(i-1,j)-hx(i,j)+hx(i,j-1));
```

EK-17. İletken Toprak Altında ($\sigma=10^{-2}$) Ortamda Metal Olduğu Durum İçin Geliştirilen Yazılım

Bu durumu simüle etmek için önce EK-16'daki yazılıma aşağıdaki ilaveler yapılarak iletken toprak altı metalin olduğu durum bu kez $\sigma=10^{-2}$ değeri için simüle edilmiştir.

%METAL NOKTA YERLESTIRIYORUM

ez(85,250) = 0; .

ez(86 , 250) = 0; .

ez(85 , 251) = 0; .

ez(86 , 251) = 0; .

EK-18. İletken Toprak Altında ($\sigma=10^{-2}$) Ortamda Metali Görüntülemek İçin Geliştirilen Yazılım

Bu durumu simüle etmek için önce EK-16'daki yazılım sonra EK-17'deki yazılım birleştirilmiş ve aşağıdaki ilavelerle iletken ortama konan metalin zayıflama nedeniyle görüntülenemediği görülmüştür.

```
ez1=ez;
```

```
fark=ez-ez1;
```

```
fark=abs(fark);
```

```
figure;image(254/Max*fark);
```

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : ALPER, Alp
 Uyruğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 18.12.1970 Kayseri
 Medeni hali : Evli
 Telefon : 0 (312) 410 62 47
 Faks : 0 (312) 417 54 03
 e-mail : alp_alper7168@yahoo.com.

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Lisans	Yıldız Üni./Elektronik ve Hab.Müh.Bl.m. 1992	
Lise	Halide Edip Lisesi	1987

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
1992-Halen	Türk Hava Kuvvetleri	Mühendis Subay

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

-

Hobiler

Futbol, Kitap Okuma, Sinema ve Tiyatro izleme