

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ



**BITÜMLÜ SICAK KARIŞIM ÜSTYAPI TABAKA KALINLIKLARININ
ZAMAN DOMENİNDE SONLU FARKLAR YÖNTEMİ İLE
ELEKTROMANYETİK BENZETİMİ**

Baki YALIN

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

NİSAN 2018

ANTALYA

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ



**BITÜMLÜ SICAK KARIŞIM ÜSTYAPI TABAKA KALINLIKLARININ
ZAMAN DOMENİNDE SONLU FARKLAR YÖNTEMİ İLE
ELEKTROMANYETİK BENZETİMİ**

Baki YALIN

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

NİSAN 2018

ANTALYA

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIM ÜSTYAPI TABAKA KALINLIKLARININ
ZAMAN DOMENİNDE SONLU FARKLAR YÖNTEMİ İLE
ELEKTROMANYETİK BENZETİMİ

Baki YALIN
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

Bu tez 09/04/2018 Tarihinde jüri tarafından Oybirliği / Oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

Jüri

Prof. Dr. Selçuk HELHEL (Danışman)
Prof. Dr. Şükrü ÖZEN
Prof. Dr. Mesut TIĞDEMİR

İmza



ÖZET

BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIM ÜSTYAPI TABAKA KALINLIKLARININ ZAMAN DOMENİNDE SONLU FARKLAR YÖNTEMİ İLE ELEKTROMANYETİK BENZETİMİ

Baki YALIN

Yüksek Lisans Tezi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Selçuk HELHEL

Nisan 2018; 126 sayfa

Ülkemizde, karayollarının yapımı ve bakımı genel olarak şehirlerarası yollarda Karayolları Genel Müdürlüğü, şehir içi yollarda ise ilgili belediyeler tarafından yapılmaktadır. Asfalt yol yapım çalışmalarında belediye ve karayolları müdürlükleri tarafından görevlendirilen mühendisler kalite kontrol hizmetlerini karot alma yöntemi ile yapmaktadır. Bu durum tahribat verici bir yöntemdir. Teknolojinin ilerlemesi ile bu yöntemi kullanmak yerine yer görüntüleme radarları (YGR) kullanımı artmıştır. Ancak yer görüntüleme radarlarının tasarımdan önce benzetim performansının sonlu farklar yöntemi ile belirlenmesi büyük önem taşımaktadır. Sonlu farklar yöntemi sistem performansını belirlemede kullanılabilir en etkin elektromanyetik yöntemlerden biridir.

Bu çalışmada, asfalt yolların, yer görüntüleme radarı (YGR) kullanılarak tabaka kalınlıklarının bulunmasına katkı sağlamak amacıyla iki boyutlu (2B) zaman domaininde sonlu farklar(ZDSF) metodu ele alınmıştır. YGR de kullanılan antenlerin profil yönü paralel olduğu düşüncesi ile 2B ZDSF, enine manyetik alan (TM_z) moduna indirgenmiştir. TM_z modunda 3 GHz de EM dalga alanı hesaplayan MATLAB algoritması ve arayüzü geliştirilmiştir. Geliştirilen algoritma TM_z modundaki Maxwell denklemlerini iteratif olarak çözerek asfalt beton modeline ait katmanlar içerisinde elektromanyetik dalgaların yayılmasına ait bilgiler elde etmiştir.

Sonuç olarak, geliştirilen algoritma 2 tabakalı, 3 tabakalı ve 4 tabakalı asfalt beton modellerine uygulanmış ve katman kalınlıkları tespit edilmiştir. Ayrıca geliştirilen algoritmanın hesapladığı katman kalınlıkları ile radargram üzerinde gözlenen katman kalınlıkları karşılaştırılmış, algoritmanın doğruluğu ortaya konmuştur.

ANAHTAR KELİMELEER: Asfalt dielektrik sabiti, elektromanyetik modelleme, sıcak karışım kalınlık tespiti, yeraltı görüntüleme radarları (YGR), zaman domaininde sonlu farklar (ZDSF).

JÜRİ: Prof. Dr. Selçuk HELHEL

Prof. Dr. Şükrü ÖZEN

Prof. Dr. Mesut TIĞDEMİR

ABSTRACT

ELECTROMAGNETIC MODELING OF BITUMINOUS HOT MIX SUPERSTRUCTURE LAYER THICKNESSES WITH FINITE DIFFERENCE TIME DOMAIN METHOD

Baki YALIN

MSc Thesis in Electric Electronic Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Selçuk HELHEL

April 2018; 126 pages

In Turkey, the construction and maintenance of highway between cities is carried out by General Directorate of Highway Administration and the construction and maintenance of inner city roads is carried out by municipalities. The engineers who are assigned to the asphalt road construction works by the municipal and highway directorates, have performed destructive test method by taking the core for the quality control services. This technique is destructive method. Instead of this method, usage of ground penetrating radars is increasing with the progress of the technology. However it takes importance to determine performance of modelling with time domain finite difference method (FDTD), before designing ground penetrating radar. FDTD method is one of the most effective electromagnetic techniques to determine system performance.

In this study, FDTD method in 2D has been investigated in order to contribute to estimate layer thicknesses of asphalt roads by using GPR. The 2D FDTD is reduced to the transverse magnetic field (TM_z) mode with the assumption that the antennas used in the YGR are parallel to the profile direction. The MATLAB algorithm and graphical user interface, which computes the EM wave field at 3 GHz in TM_z mode, has been developed. The developed algorithm solves the Maxwell equations in the TM_z mode for each step and obtains information about the propagation of electromagnetic waves in the layers of the asphalt road model.

As a result, the developed algorithm is applied to 2 layered, 3 layered and 4 layered asphalt road models and layer thicknesses are estimated. In addition, the layer thicknesses calculated by the developed algorithm and the layer thicknesses observed on the radargram have been compared and the accuracy of the algorithm is revealed.

KEYWORDS: Asphalt permittivity, elektromagnetic modelling, ground penetrating radars (GPR), finite difference time domain (FDTD) method, hot mixture thickness estimation.

COMMITTEE: Prof. Dr Selçuk HELHEL

Prof. Dr. Şükrü ÖZEN

Prof. Dr. Mesut TIĞDEMİR

ÖNSÖZ

Günümüzde jeolojik araştırmalarda, yeraltı suyu araştırmalarında, mühendislik araştırmalarında, arkeojeofizik ve maden araştırmalarında yeraltı görüntüleme radarları (YGR) kullanılmaya başlanmıştır. Kemer Belediye Başkanlığı Fen İşleri Müdürlüğünde elektrik elektronik mühendisi olarak çalışmam sebebi ile belediye olarak yapmış olduğumuz asfalt yollarının kalitesinin ölçülmesinde karot alma yöntemi uygulanarak yeni yapılan üst yapının tahrip edildiği gözlenmiştir. Yol yapım çalışmalarında görev alan mühendislerin kontrolörlük hizmetlerinin tahribatsız, daha etkin ve daha verimli yapılabilmesi için zemin görüntüleme radarı (YGR) kullanılarak 2B zaman domeninde sonlu farklar (ZDSF) metodu ile asfalt beton tabaka kalınlıklarının bulunması ile ilgili yapay modelleme çalışmaları yapılarak asfalt tabaka kalınlıklarının tepkisini önceden incelemek, arazi verisinin yorumlanmasını konularında tecrübe edinilmiştir.

Tez çalışmasında bilgisini, tecrübelerini ve desteğini benden esirgemeyen, tez konusunun oluşumunda fikir ve önerileri ile önemli katkıları olan danışman hocam, Sayın Prof. Dr. Selçuk HELHEL'e ile Bölüm Başkanı Prof. Dr. Şükrü ÖZEN'e (Akdeniz Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı) teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam sırasında göstermiş olduğu sabır ve anlayış ile manevi desteğini hiç eksik etmeyen, ayrıca yardımlarıyla tezime önemli katkı sağlayan, üzüntümü ve sevincimi benimle paylaşan, başarıya ulaşmamı sağlayan bilgisayar mühendisi, sevgili eşim Canan ÖZGÜN YALIN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca eğitim süresi boyunca derslere katılmamı sağlayan ve yüksek lisans eğitimimi destekleyen Kemer Belediye Başkanı, Mustafa GÜL'e ve Fen İşleri Müdürüm Ü. Selçuk ÇELİK'e, bana gösterdikleri özveri ve anlayış için teşekkürü bir borç bilirim.

Hazırlamış olduğum tez çalışmamı yolunu sabırsızlıkla ve hasretle beklediğim kızım Defne YALIN'a armağan ediyorum. Ayrıca hazırlanan bu rapor araştırmacılar ve öğrenciler için açık kaynak olarak sunulmuş olup yaptıkları çalışmalara katkım olmasını temenni ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
ÖNSÖZ	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiv
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Amaç.....	2
1.2. Kapsam	3
2. KAYNAK TARAMASI	4
3. MATERYAL VE METOT	7
3.1. Kullanılan Materyal ve Metot	7
3.2. Temel Elektromanyetik ve EMD Denklemleri	8
3.2.1. Maxwell denklemleri	8
3.2.2. Maxwell denklemlerin entegral haldeki ifadeleri.....	8
3.2.3. Elektromanyetik dalgalar	10
3.3. Yer Görüntüleme Radarı (YGR) Yöntemi.....	11
3.3.1. Yer radar yöntemi.....	11
3.3.2. Yer radarı yönteminin tarihçesi.....	14
3.3.3. Yer radarı yönteminin avantajı ve dezavantajları.....	15
3.3.4. Yer radarı yönteminde elektromanyetik alan yayılım teorisi.....	15
3.3.4.1. Elektromanyetik dalga özellikleri	15
3.3.4.2. Elektromanyetik alanların dalga yapısı	17
3.3.4.3. Elektromanyetik dalganın yayılımı	18
3.3.4.4. Elektromanyetik dalgaların yayılımını etkileyen fiziksel özellikleri	20
3.3.4.5. Dielektrik geçirgenlik (ϵ).....	20
3.3.4.6. Elektriksel iletkenlik(σ).....	21
3.3.5. Elektromanyetik empedans	25
3.3.6. Kutuplanma	26

3.3.7. Yer radarı temel ilkeleri	27
3.3.7.1. Katkı eşitlikleri.....	27
3.3.7.2. Zaman ortamında EM dalga denklemleri	27
3.3.8. Yer radarı sinyallerinin oluşturulması ve yayınıcı	32
3.3.9. Yer radarı sinyallerinin ara yüzeylerde yansıması, kırılması ve iletimi.....	33
3.3.10. Yer radarı sinyal ölçümü.....	37
3.3.11. İşaret hızı ve derinlik belirlenmesi	37
3.3.12. Sinyalin sönümlenmesi	38
3.3.13. Nüfuz derinliği	40
3.3.14. Yapı belirlenebilirliği ve çözünürlük.....	42
3.3.15. Düşey ve yanal ayrımlılık	42
3.3.16. Yakın-alan etkisi.....	44
3.3.17. Radar anten frekansının seçimi	44
3.4. Yer Radarında Kullanılan Modelleme Tekniğı.....	47
3.5. Zaman Domeninde Sonlu Farklar (ZDSF) Yöntemi	49
3.5.1. ZDSF yöntemi için Maxwell denklemleri ve Yee algoritması	51
3.5.2. Üç boyutlu benzetimler için Maxwell denklemleri	52
3.5.3. İki boyutlu benzetimler için Maxwell denklemleri	54
3.5.4. Bir boyutlu benzetimler için Maxwell denklemleri.....	55
3.5.5. Sonlu farklar yaklaşımı	57
3.5.6. Sayısal dağılma (Dispersion) ve kararlılık.....	66
3.5.7. Yutucu sınır koşulu (YSK)	70
3.5.8. Bilgisayar algoritması ve ZDSF akış şeması	73
3.5.9. Kaynak seçimi	75
3.6. Modelleme Çalışmaları ve Uygulama Esasları.....	76
3.6.1. Bitümlü karışımların fiziki ve mekanik özellikleri	77
3.6.2. Kaplama tabakası.....	78
3.6.3. Temel tabakası.....	79
3.6.4. Modele uygulanan üstyapı kesitleri.....	80
3.6.4.1. 2 Tabakalı asfalt beton katmanı	80
3.6.4.2. 3 Tabakalı asfalt beton katmanı	81

3.6.4.3. 4 Tabakalı asfalt beton katmanı	82
4. BULGULAR ve TARTIŞMA.....	84
4.1 Farklı Dielektrik Özelliğe Sahip 2 Katmanlı Asfalt Beton Kalınlıklarının YGR ile İncelenmesi	84
4.1.1. Model 1'e ait 1. uygulama.....	84
4.1.2. Model 1'e ait 2. uygulama	85
4.1.3. Model 1'e ait 3. uygulama	87
4.2 Farklı Dielektrik Özelliğe Sahip 3 Katmanlı Asfalt Beton Kalınlıklarının YGR ile İncelenmesi	89
4.2.1. Model 2'e ait 1. uygulama.....	89
4.2.2. Model 2'e ait 2. uygulama	91
4.2.3. Model 2'e ait 3. uygulama	93
4.3 Farklı Dielektrik Özelliğe Sahip 4 Katmanlı Asfalt Beton Kalınlıklarının YGR ile İncelenmesi	95
4.3.1. Model 3'e ait 1. uygulama	95
4.3.2. Model 3'e ait 2. uygulama	97
4.3.3. Model 3'e ait 3. uygulama	99
5. SONUÇ.....	103
6. KAYNAKLAR	105
7. EKLER	110
7.1. Ek-1 (MATLAB Lisans Bilgileri)	110
7.2. Ek-2(MATLAB Kodu).....	110
7.2.1. 2 Katmanlı asfalt beton kalınlıklarının tespiti için yazılan MATLAB kodu.....	110
7.2.2. 3 Katmanlı asfalt beton kalınlıklarının tespiti için yazılan MATLAB kodu.....	115
7.2.3. 4 Katmanlı asfalt beton kalınlıklarının tespiti için yazılan MATLAB kodu.....	120
ÖZGEÇMİŞ	

AKADEMİK BEYAN

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Bitümlü Sıcak Karışım Üstyapı Tabaka Kalınlıklarının Zaman Domeninde Sonlu Farklar Yöntemi İle Elektromanyetik Benzetimi ” adlı bu çalışmanın, akademik kurallar ve etik değerlere uygun olarak yazıldığını belirtir, bu tez çalışmasında bana ait olmayan tüm bilgilerin kaynağını gösterdiğimi beyan ederim.

Tarih: 09/04/2018



Baki YALIN

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

- A** : Akımın geçtiği telin kuşattığı kapalı döngü alanı
- A** : Fresnel bölgesinin uzun ekseninin yarıçapı
- B** : Manyetik akı yoğunluğu (weber/m²=Tesla)
- C** : Işık Hızı (3x10⁸)
- \vec{D} : Elektrik alan yoğunluğu (C/m²)
- D** :Derinlik
- \vec{E} :Elektrik Alan (V/m)
- E_i : Gelen elektrik alan
- E_r : Yansıyan elektrik alan
- E_t : İletilen elektrik alan
- \vec{E}_z : Elektrik Alanın Z bileşeni (V/m)
- f_u : Maximum Frekans
- \vec{H} :Manyetik alan şiddeti (A/m)
- H_i : Gelen manyetik alan
- H_r : Yansıyan manyetik alan
- H_t : İletilen manyetik alan
- \vec{H}_x : Manyetik Alanın X bileşeni (A/m)
- I** : Elektrik akımı (A)
- \dot{I}_c : Kırılma açısı
- J** : Akım yoğunluğu (A/m²)
- J_D : Yer değiştirme akımı
- J_C : İletim akımları
- K** :Yeraltındaki EM dalganın yayılım faktörü

\vec{m}	: İndüklenen manyetik moment miktarı
\vec{M}	: Manyetik Dipol Momenti
\hat{n}	: Normal vektörü
θ_a	: Faz açısı
θ_b	: Faz açısı
θ_i	: Kritik açı
θ_t	: İletim açısı
q	: Yük yoğunluğu
T_{max}	: Toplam Zaman
t_o	: Ofsetteki tekyönlü seyahat süresi
W_t	: Geçiş frekansı
v	: EMD yayılma hızı
Z_0	: Boşluğun frekansı
μ	: Manyetik geçirgenlik (Henry/m)
ϵ_0	: Boşluğun elektriksel geçirgenliği
μ_0	: Boşluğun manyetik geçirgenliği
ϵ_e	: Etkin dielektrik sabiti
ϵ_r	: Maddenin bağıl dielektrik sabiti (Farad/m)
μ_r	: Maddenin bağıl manyetik geçirgenliği
Δs	: Konum adımı
Δt	: Zaman adımı
Γ	: Yansıma Sabiti
λ	: Dalga Boyu (m)
σ	: İletkenlik (siemens/m)
ρ	: Hacimsel yük yoğunluğu (C/m^3)
α	: Zayıflama Sabiti (neper/m)

β	:Faz Sabiti (Radian /m)
γ	: Yayılma sabiti
δ	:Kayıp Açısı (loss angle)
η	: Ortam empedansı (ohm)
τ	: İletim Sabiti

Kısaltmalar

BSK	Bitümlü Sıcak Karışım
EMD	Elektromanyetik Dalgalar
EYS	Enerji Yoğunluk Spekturmu
GKA	Grafiksel Kullanıcı Arayüzü
MUK	Mükemmel Uyumlu Katman
ODN	Ortak Derinlik Noktası
TE	Enine Elektrik Alan
TEM	Enine Elektromanyetik Alan
TM	Enine Manyetik Alan
TMY	Tahribatsız Muayene Yöntemi
YGR	Yer Görüntüleme Radarı
YSK	Yutucu Sınır Koşulu
ZDSF	Zaman Domeninde Sonlu Farklar

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1. Elektromanyetik daganın E ve H bileşenleri	11
Şekil 3.2. Frekans Spektrumu	11
Şekil 3.3. a) Yer radarı yönteminin genel çalışma sistemi b) Radargram.....	12
Şekil 3.4. a) Hız ve b) sönümlenme değerlerinin frekansa bağlı olarak değişimi	16
Şekil 3.5. Elektromanyetik dalga yayılımının gösterimi (Annan 2001).....	17
Şekil 3.6. Elektrik, manyetik ve elektromanyetik alan gösterimi	18
Şekil 3.7. Kaynaktan dışı doğru seyat eden dalgalar	18
Şekil 3.8. Elektrik alan uygulandığında serbest elektrik yüklerinin hareketi (Annan, 2001).....	22
Şekil 3.9. Uygulanan elektrik alan doğrultusunda bağlı elektrik yüklerinin yer değiştirm hareketi (Annan 2001).....	23
Şekil 3.10. Uygulanan elektrik alan sonucu oluşan elektrik dipol moment dağılımı (Annan 2001).....	24
Şekil 3.11. Toplam elektrik akımının frekansla değişimi (Annan 2001).....	25
Şekil 3.12. Eliptik kutuplanma.....	26
Şekil 3.13. a) TM modu ve b) TE Modu için EM alan bileşenleri.....	30
Şekil 3.14. Derinlikle bağlı dielektrik geçirgenlik katsayıları (a) odaklanma ve (b) saçılma yeraltı modeli için dalga kırılma etkileri.	33
Şekil 3.15. Ara katmana gelen elektromanyetik dalganın sınıra çarptıktan sonraki iletilen ve yansıyan kısımları.....	34
Şekil 3.16. a) TM Modu ve b) Alan Bileşenleri c) TE Modu ve d)Alan Bileşenleri.....	35
Şekil 3.17. Anten yönlerine bağlı olarak TE ve TM modları (Van der Kruk vd. 2006)	36
Şekil 3.18. Sinyalin Sönümlenmesi.....	39
Şekil 3.19 Ortamın elektrik iletkenliği ile nüfuz derinliği arasındaki ilişki (Moorman 2001).....	41
Şekil 3.20. a) Arayüzeyden yansıma b) Fresnel zonu (Conyers ve Goodman 1997; Reynolds 1977)	43

Şekil 3.21. Bağlı dielektrik geçirgenlik ve derinlik ile Fresnel zonun yarıçapının değişimi (Conyers ve Goodman 1997)	44
Şekil 3.22. EM alan bileşenlerinin Yee hesaplama ağı üzerindeki konumları	50
Şekil 3.23. Maxwell denklemlerinin ayrıklaştırılmasının bir boyutlu halde konum-zaman ilişkisi	59
Şekil 3.24. Zamanda H ve E konumda ve hesaplanması.....	60
Şekil 3.25. Birim Yee hücresinde E ve H-alan vektörlerinin yerleşimi	61
Şekil 3.26. Sayısal dağılımın gösterimi.....	67
Şekil 3.27. Bir boyutlu ZDSF algoritmasındaki sayısal faz hızının bir dalga boyundaki örnek sayısı ile değişimi.....	67
Şekil 3.28. İki boyutlu ZDSF algoritmasında üç farklı hücre sayısı için sayısal faz hızının dalga yayılma açısı ile değişimi (R: bir dalga boyundaki örnekleme sayısı)	69
Şekil 3.29. İki boyutlu ZDSF algoritmasında üç farklı yayılma açısı için sayısal faz hızının hücre boyutu ile değişimi.....	70
Şekil 3.30. ZDSF elektromanyetik dalga etkileşimi (yansısız)	71
Şekil 3.31. Berenger'in MUK sınır koşullarına sahip iki boyutlu benzetim ortamı	72
Şekil 3.32. TM Modu ZDSF Akış Şeması	75
Şekil 3.33. Asfalt Yollardaki Tabakalar	77
Şekil 3.34. Asfalt kaplama tabakaları	79
Şekil 3.35. Şehiriçi yollarda geleneksel olarak kullanılan üstyapı kesiti.....	80
Şekil 3.36. Şehiriçi yollarda kullanılan üst yapı kesitleri	80
Şekil 3.37. Geliştirilen Algoritmada Kullanılan Model 1	81
Şekil 3.38. Geliştirilen Algoritmada Kullanılan Model 2.....	82
Şekil 3.39. Geliştirilen Algoritmada Kullanılan Model 3.....	83
Şekil 4.1. Radargram üzerindeki aşınma ve plentmix tabaka kalınlıkları	84
Şekil 4.2. Ez'in her katmandaki genliği.....	85
Şekil 4.3. Radargram üzerindeki aşınma ve plentmix tabaka kalınlıkları	86
Şekil 4.4 Ez'in her katmandaki genliği.....	87

Şekil 4.5. Radargram üzerindeki aşınma ve plentmix tabaka kalınlıkları	88
Şekil 4.6. Ez'in her katmandaki genliği.....	89
Şekil 4.7. Radargram üzerindeki aşınma, binder ve plentmix tabaka kalınlıkları	90
Şekil 4.8. Ez'in her katmandaki genliği.....	91
Şekil 4.9. Radargram üzerindeki aşınma, binder ve plentmix tabaka kalınlıkları	92
Şekil 4.10. Ez'in her katmandaki genliği.....	93
Şekil 4.11. Radargram üzerindeki aşınma, binder ve plentmix tabaka kalınlıkları.....	94
Şekil 4.12. Ez'in her katmandaki genliği.....	95
Şekil 4.13. Radargram üzerindeki aşınma, binder, B.temel ve plentmix tabaka kalınlıkları	96
Şekil 4.14. Ez'in her katmandaki genliği.....	97
Şekil 4.15. Radargram üzerindeki aşınma, binder, B.temel ve plentmix tabaka kalınlıkları	98
Şekil 4.16. Ez'in her katmandaki genliği.....	99
Şekil 4.17. Radargram üzerindeki aşınma, binder, B.temel ve plentmix tabaka kalınlıkları	100
Şekil 4.18. Ez'in her katmandaki genliği.....	101

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1 Frekansa göre penetrasyon derinliği	13
Çizelge 3.2 Çeşitli ortamlar ve birimler için dielektrik sabit, iletkenlik, hız ve soğrulma değerleri n/a bu malzemeler için bir değer olmadığını ifade etmektedir. (Wilchek 2000; Conyers ve Goodman 1997; Leckebush 2003).	21
Çizelge 3.3 Ana kaya ($v = 0.11$ m/ns) ve toprak ($v = 0,075$ m/ns) için üç farklı frekans değerinde hesaplanan düşey ayrımlılık değerleri (Reynolds 1997)	43
Çizelge 3.4 Farklı bağıl dielektrik sabitine sahip ortamlarda anten frekanslarına göre radar dalga boylarının değişimi (Conyers ve Goodman 1997).....	45
Çizelge 4.1 Örneklemelere ait Parametreler ve Sonuçları	102

1. GİRİŞ

Belediyelerin ve karayolları bölge müdürlüklerinin temel görevlerinden biri, buldukları bölgelerde ve lokasyonlarda üst yapı çalışmalarının içerisinde olan asfalt yolları yapmak veya yaptırmaktır. Gerek yapım sırasında, gerek yapım sonrasında ilgili kurum tarafından asfalt yolların fonksiyonel ve yapısal koşullarını belirlemek amacıyla kontrol heyeti tarafından denetleme yapılmaktadır. Serin vd. (2014) tarafından bildirildiğine göre; fonksiyonel durum, yolun yüzey kaplama kalitesini ve sürüş konforunu arttırmayı hedeflerken, yapısal durumda ise yolun kaplama ve malzeme özellikleri ile aşınma, binder, plentmix gibi katmanların uygulama kalınlıkları ile ilgili özellikleri belirlemeyi hedeflemektedir (Russel ve Lenz 2011). Bir asfalt yolun yapısal durumunu belirlemek için muhakkak tabaka kalınlıklarının tespit edilmesi gerekmektedir.

Trafiğe ve servise açık bir asfalt yolun tabaka kalınlığını belirlemek için tahribatsız muayene yöntemleri (TMY) kullanılabilir. Bu yöntem en güvenilir yöntemlerin başında gelmektedir. TMY yöntemi, tahrip edici deneylere göre iki önemli avantaj sağlar. Birincisi; tahribatsız deneyler yola zarar vermez ve deney için malzeme çıkarılmasını gerektirmez. Tahrip edici yöntemde ise yola zarar verilerek yapısal ve fonksiyonel özelliğinin bozulmasına sebep olur. İkinci avantajı ise yolu trafiği kapatmadan veya trafiğin akışını sekteye uğratmadan uygulanabilirliği ve pahalı olmamasıdır (Shahin 2002).

Sayılan bu avantajlarına ek olarak kurumların yapmış oldukları asfalt yolların, uygulama projesinde belirlenen uygunlukta olup olmadığını, belirlenen miktarda asfalt kullanılıp kullanılmadığı hususlarının tespiti için kalınlık tayinin yapılması şarttır. Bunun için karot numunesi alınarak kalınlık tayini yapılabilmektedir. Ancak karot numunesi almak zahmetli bir işlem olup yolun yalnız belirli noktalarında numuneler alınmak suretiyle kalınlık tahyini yapılırken, TMY yönteminde yolun tamamı detaylı olarak incelenmektedir (Saltan 1999). Dolayısıyla, TMY yöntemi deney aletleri giderek önem kazanmaktadır. Bu doğrultuda, tahribatsız deney aleti olarak kullanılan yer radarlarının (YGR) önemi giderek artmaktadır.

Daniels (2004)'e göre yapılan tanımlamaya göre yer altına, dipol, horn vb. antenler vasıtası ile elektromanyetik (EM) enerji gönderip, yerin altındaki katmanlara ve malzemelere çarparak yansıyan dalgayı monostatik veya bistatik antenle algılayan ve algılanan sinyali işlemek suretiyle nesnelerin görüntülenmesini sağlayan radar sistemine yer görüntüleme radarı (YGR) denir.

Bir asfalt yola YGR uygulaması sırasında elektromanyetik dalga enerjisi, antenler aracılığı ile üstyapı yüzeyine iletilir. Bu dalgalar malzeme (Hava – asfalt, asfalt-plentmix, plentmix-doğal zemin) içerisindeki dielektrik süreksizliğinin durumu ve yerine bağlı olarak çeşitlilik gösteren gidiş dönüş zamanı ve genlikler ile birlikte antene geri yansımaktadırlar. Yansıyan enerji yakalanır ve radar dalga formu olarak tanımlanan itki serisi formunda radargramda gösterilir. Üstyapı tabaka malzemeleri üzerinde seyahat eden ve yansıyan bu enerji, farklı tabakaların sınırlarını oluşturur; bu yansımanın gücü ve gidiş dönüş süresi tabaka kalınlıklarının belirlenmesinde kullanılmaktadır.

ZDSF yöntemi Yee (1966) tarafından, Maxwell denkleminin sonlu farklar yöntemi kullanılarak zaman domeninde yazılması ile ortaya çıkarılmıştır. Yöntemde, üç boyutlu (3B) ve iki boyutlu (2B) modelleme yapmak mümkündür. Üç boyutlu modellemede, EM alanların (x, y, z) yöndeki bileşenleri hesaplanırken, İki boyutlu modellemede sadece iki yönde bileşenler hesaplanmaktadır. Ayrıca İki boyutlu modellemede TE ve TM modları söz konusudur. Elektrik ve manyetik alanın hangi bileşenlerinin hesaplanacağı, seçilen EM moda göre farklılık gösterdiğinden, mod seçimi önemlidir.

Bu tez çalışmasının temelinde, 2B ZDSF modellemesiyle Maxwell denklemlerinin, zamanda ve konumda yinelemeli olarak ayrıklaştırılması ve iteratif olarak çözülmesi yatmaktadır. Çalışmamızda iki boyutlu asfalt beton üstyapısı için elektromanyetik dalgaların yayılmasını modellemek amacıyla z yönünde elektrik alanı olan TM modlu (TMz), zaman domeninde sonlu farklar (ZDSF) metodu kullanılmış ve hesaplar bu doğrultuda yapılmıştır. Modelin içerdiği 2 boyutlu geometri, dalga boyundan, 10 kat daha küçük boydaki hücrelere bölünerek sonlu farklar ağı oluşturulmuştur. Ayrıca Gürel ve Oğuz (2000) tarafından sonlu farklar ağı, geometrinin ve anten merkez frekansının büyüklüğüne bağlı olarak, binlerce küçük hücreden oluşabileceğini ve manyetik ve elektrik alanların bileşenleri bu hücrelerin farklı noktalarında, ardışık zaman adımlarında hesaplanabileceğini bildirilmiştir.

Bu uzmanlık tez çalışmasında; belediyeler ve karayolları tarafından yapılan asfalt beton yolların sağlıklı üretilmesi, proje uygulama sürecinde karşılaşılması muhtemel maddi ve manevi kayıpların en aza indirilmesi amacıyla kullanılacak en etkili yöntemlerden biri olan YGR yöntemi ele alınarak 2 boyutlu zaman domeninde sonlu farklar (ZDSF) yaklaşımı ile asfalt yol tabaka kalınlıklarının nasıl tespit edildiği benzetim yolu ile incelenecektir. Asfalt beton tabaka modelimiz için MATLAB algoritma ve arayüzü (GKA) geliştirilmiş olup radargram üzerinde farklı katmanlara ait kalınlık bilgileri elde edilmiştir. Bu benzetimde 3GHz frekans değerinde farklı kalınlıklardaki, 2 tabakalı, 3 tabakalı ve 4 tabakalı yol katmanları için ayrı ayrı uygulanmış, hesaplanan değerler ile radargramda gözlenen değerleri karşılaştırılarak, doğruluk payları ortaya açıkça konmuştur.

1.1. Amaç

Bu tez çalışmasında amaç, inşa edilecek olan asfalt yolların, yer görüntüleme radarı (YGR) kullanılarak tabaka kalınlıklarının bulunmasına katkı sağlamak amacıyla 2 boyutlu ZDSF yaklaşımı ile 3GHz'de elektrik ve manyetik alan hesaplayan MATLAB algoritması ve arayüzü geliştirmektir. Böylece pratikte kullanılan yer radarları ile modelde oluşturulan radargramı karşılaştırma imkanı sağlanarak yer radarlarının kullandığı 2 boyutlu ZDSF algoritması kavramsal olarak daha çok anlaşılacaktır. Belediyeler ve karayolları bölge müdürlükleri, asfalt yol tasarımında planlanan tabaka kalınlıklarına ulaşıp ulaşamadığını, katmanlarda sıkıştırma işlemi yapılıp yapılmadığını, üstyapı tabakaları ve tabakalar arasında meydana gelmiş her hangi bir anomali olup olmadığını tespit edecek ve tahribatsız olarak kalite kontrolü de gerçekleştirmiş olacaklardır.

1.2. Kapsam

Tez, asfalt beton tabaka kalınlıklarının 2 boyutlu ZDSF yaklaşımı kullanarak EM dalga alanı hesaplayan MATLAB algoritması ve arayüzü geliştirmek için sistem gereksinimlerini kapsamaktadır.

Tezin ikinci bölümünde kaynak araştırılması yapılarak YGR ve elektromanyetikte zaman bölgesinde sonlu farklar (ZDSF) üzerine yapılmış çalışmalardan bahsedilmiştir.

Üçüncü bölümde tezde kullanılan materyal ve yöntem, temel elektromanyetik ve elektromanyetik dalga denklemlerinden, yer radarı (YGR) yönteminden, zaman domeninde sonlu farklar (ZDSF) metodundan ve modelleme çalışmaları ve uygulama esasları detaylı olarak ele alınmıştır. Bu bölümde yer radarları hakkında temel bilgiler ve dayandığı temel fiziksel ve matematiksel tanımlara yer verilmiştir. Ayrıca ZDSF metodunun dayandığı matematiksel ve fiziksel özellikler anlatılmıştır. Yöntemin uygulanacağı 3 farklı modelin hangi katmalardan oluşacağı ve her katmanın tanımı yapılmıştır. Modellerdeki asfalt katmanların fiziksel özellikleri değerlendirilmiş, model parametreleri özet tablolar halinde çıkarılmıştır. Sayısal analiz için gerekli eşitlikler verilmiş ve sınanmıştır. 2B ZDSF yönteminde kararlılık koşulları, sayısal dağılma, yutucu sınır koşulları (YSK) ve kaynak seçimi gibi önemli kavramlar açıklanmıştır.

Dördüncü bölümde tez kapsamı içerisinde farklı dielektrik özellikte ve farklı katmanlı asfalt beton yol kalınlıklarının tespiti için incelemelerde bulunulmuştur. Elde edilen bulgular ve tartışma konularından bahsedilmiştir.

Beşinci bölümde ise modelleme ve uygulamadan çıkarılan sonuçlar ve öneriler açıkça anlatılmıştır.

Eklerde ise MATLAB lisans bilgileri ve modellemede kullanılan MATLAB kodları yer almaktadır.

2. KAYNAK TARAMASI

Koçaslan (2008) ve Kurt (2009) tarafından bildirildiğine göre; ZDSF yöntemi sonlu farklar yönteminin 1966 yılında Yee tarafından Maxwell denklemlerine uyacak şekilde zaman gölgesinin genişlemesi ile ortaya atılmıştır. Özellikle 1985 yılından itibaren bilgisayar hızlarının ve kapasitelerinin hızlı artışı ile EM dalga problemleri için en çok kullanılan yöntemlerden biri haline gelmiştir. ZDSF yöntemi 30 yıldır varlığına rağmen bilgisayarların hız ve kapasitesi arttığı sürece, popüleritesi korumaya devam edecek ve günden güne uygulanabilirliği artacaktır. Ayrıca yöntemin geliştirilmesine yönelik yayınların artması da yöntemin kullanılabilirliğini arttırmaktadır.

ZDSF'nin uygulama alanlarına bakıldığında; Taflo ve Umashankar (1977) tarafından radar saçılma yüzeyi (RSY) modelleme, Engquist ve Majda (1977), Bayliss ve Turkel (1980), Liao vd. (1980), Scientia Sinica (1984) ve Brenger (1994) tarafından yutucu sınır koşulları, Choi ve Hoefer (1982) tarafından mikroşerit hatlı devre analizi, açık veya kapalı dalga kılavuzlarından dalga iletimi ve süreksizler, Sullivan vd. (1987) ve Zhang vd. (1987) tarafından biyolojik dokularda elektromanyetik tutulma hesapları, Maloney vd. (1991), Katz vd. (1991) ve Tirkas ve Balanis (1991) tarafından anten ve anten dizi tasarımları ve sentezi, Sui vd. (1991) tarafından mikrodalga fırın benzetimi EMC/EMI (elektromanyetik uyumluluk ve girişim) modelleme, Schneider ve Wagner (1999), Krumpholz ve Katehi (1996) ve Q.H.Liu (1997) tarafından sayısal dağılıma, Taflove ve Brodwin (1975), Namiki (1999), Zheng vd. (2000) ve De raedt vd. (2003) tarafından sayısal kararlılık çalışmaları yapılmıştır.

Tüm bunlara ek olarak ZDSF, YGR modellenmesinde günümüzde en çok kullanılan sayısal yöntemlerden biri haline gelmiştir. Bilgisayar teknolojisinde ilerlemesi ile yer radarı yönteminde modelleme çalışmaları hızlanmıştır. Yee (1966), Wang ve Tripp (1996), Bourgeois ve Smith (1996), Teixeira vd. (1998), Holliger ve Bergmann (2002), Carcione (1998) ve Irving ve Knight (2006) gibi birçok araştırmacı tarafından ZDSF ile YGR'nin 2B modellemesi incelenmiştir. Yöntemde, Maxwell denklemlerinin doğrudan zamanda ve konumda yinelenmeli olarak ayrıştırılıp çözülmesine dayandığı ortaya koyulmuştur. ZDSF yöntemi, ilk olarak Yee (1966) tarafından sonlu farklar yönteminin geliştirilmesi, elektrik alan ve manyetik alan denklemlerinin zaman bölgesi için yazılması ile ortaya çıkmıştır. Modellemede kullanılan 2B geometri, dalga boyundan çok daha küçük hücrelere bölünerek sonlu farklar ağı oluşturulmuştur. Ayrıca Gürel ve Oğuz (2000) tarafından sonlu farklar ağı, geometrinin ve anten merkez frekansının büyüklüğüne bağlı olarak, binlerce küçük hücreden oluşabileceğini ve manyetik ve elektrik alanların bileşenleri bu hücrelerin farklı noktalarında, ardışık zaman adımlarında hesaplanabileceğini bildirilmiştir.

Araştırılan yüzeyin sığ derinliklerini yüksek çözünürlükte görüntüleyebilen bu yöntem çok çeşitli problemlerin çözümünde kullanılmaktadır (Davis ve Annan 1989; Harrari 1996; Zeng ve McMechan 1997; Dannowski ve Yaramancı 1999; Aspiron ve Aigner 1999; Hammon III vd. 2000; Kadioğlu ve Daniels 2008; Kadioğlu 2008). Jeoteknik ve jeolojik araştırmalar, maden araştırmaları, otoyol asfalt ve dolgularındaki deformasyonların izlenmesi, arkeolojik arama çalışmaları, güvenlik ve kriminal amaçlı kullanım, fay/kırık ve çatlaklarının haritalanmasında, kablo ve boru güzergâhı belirleme gibi çalışmalar bunlardan bazılarıdır.

YGR modelleme çalışmalarında, birbirinden farklı tiplerde kaynak seçilebilmektedir. Sevgi (1999) tarafından sinüzoidal (dar bantlı) ya da darbesele (geniş bantlı) kaynaklarının seçilebileceği belirtilmiştir. Ayrıca Bergmann vd. (1999) tarafından sismik yöntemlerde kullanılan Ricker dalgacığının da kaynak tipi olarak seçilebileceği tespit edilmiştir. Irving (2006) 'e göre Blackman Harris penceresi de bu yöntem için uygun bir kaynak tipi olup, yapı olarak Ricker dalgacığına benzediği değerlendirilmiştir.

Benedetto vd. (2005), YGR verileri ile yol yüzeyindeki bozuklukların belirlenmesinde optimum bir işaret işleme algoritmasının güvenilirliğini araştırmışlardır. Bu çalışmada otomatik YGR analizine dayalı yol bozukluklarının tespiti ve sınıflandırılması gerçekleştirilmiş ve deneysel olarak doğruluğu gösterilmiştir. Bozukluk tespiti için bir eşik seviyesi kullanılmıştır. İkinci bir eşik seviyesi de bozukluğun şeklini belirlemek için kullanılmıştır. Optimum algılama için klasik Neyman-Pearson radar testi kullanılmıştır. Deneysel ölçümler aracılığıyla gerekli olan ayarlamalar yapılmıştır. Alıcı çalışma karakteristik eğrisine bakılarak tüm sistemin performansı değerlendirilmiştir. Sonuçlar, alınan işaretlerin uzaysal korelasyon özelliklerinden faydalanılarak uygun performansın elde edilebildiğini göstermiştir.

Kao vd. (2007), yaptıkları çalışmada YGR kullanarak yol yüzeyi kalınlığı ölçümü üzerine yoğunlaşmıştır. İlk olarak, YGR verilerinden dielektrik sabiti bilgisi ve katman kalınlığını elde etmek için yeni bir algoritma geliştirilmiştir. YGR verilerinden dielektrik sabiti ve katman kalınlığı belirlenmesi için çoğunlukla genel orta nokta (Common Middle Point, CMP) yöntemi kullanılmaktadır. Fakat antenler arası aralık arttıkça, CMP yönteminin uygulanması genellikle hatalı sonuçlar vermektedir. Yeni modelde sadece hava yer geçişinde oluşan etkiler incelenmemiş, aynı zamanda Fermat'ın en kısa yol kuralını kullanarak YGR ölçümlerinde ışın yolu araştırma işlemi de gerçekleştirilmiştir. Her bir katmanın dielektrik sabiti ve kalınlığının belirlenmesi için YGR verilerinin dönüştürülmesi amacıyla en kısa yol kullanılmıştır. Çok katmanlı ortam için iletim hattı matrisi (Transmission Line Matrix, TLM) yöntemi kullanılarak YGR benzetimi gerçekleştirilmiştir. Bu yeni modeli açıklamak için ZDSF yöntemi ile oluşturulan zaman sıralı görüntü kullanılmıştır. Ölçüm sonuçları ile benzetim sonuçları kıyaslanarak önerilen yeni modelin önceki modele göre daha doğru ve uygun sonuçlar verdiği görülmüştür.

Roth vd. (2005), yaptıkları çalışmada YGR saçılma alanlarının integral formlarından frekans ve zaman domeni konvolüsyon modellerini türetmişlerdir. Bu aşamada kullanılan ana işlemler, saçılma probleminin Born ya da fiziksel optik yaklaşımı ile düzgünleştirilmesi, yarı-uzay Green sensorünün yeni bir uzak alan ters saçılma temsiline uygulanması ve YGR antenleri ve alıcı sistemi için kaynak/alıcı modellerinin oluşturulmasıdır. Üç boyutlu ZDSF yöntemi ve ölçüm verileri kullanılarak, konvolüsyon modelinin doğruluğu gösterilmiştir. Hedef yeri, boyutu gibi bilgiler dürtü cevap yaklaşımı kullanan ters konvolüsyon algoritması ile elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, laboratuvar ortamında hedefin gömüldüğü derinliğin ve boyutunun milimetrik doğrulukta belirlenebildiğini göstermiştir.

Loizos ve Plati (2007), yaptıkları çalışmada bir kamyonete yerleştirilmiş olan YGR sistemi kullanılarak asfalt bir yüzeyin taramasını yapmışlardır. Farklı merkez frekanslı hava kuplajlı iki horn anten kullanılmıştır. Elde edilen radar verileri antenlerin

doğruluğunun değerlendirilmesi için analiz edilmiştir. Bu sebeple asfalt katmanının dielektrik sabiti değerleri ve kalınlığı hesaplanmıştır. YGR veri analiz sonuçlarını değerlendirerek iki horn antenin performansı gözlenmiştir.

Ho vd. (2008) yaptıkları çalışmada ise plastik mayınların tespitinde mayın dışı cisimlerden gelen işaretlerden dolayı oluşan yanlış alarm sayısının azaltılması için YGR'nin frekans domeni spektral özelliklerini kullanmayı önermişlerdir. Mayın gibi hedefler ile yanlış alarm veren cisimlerin enerji yoğunluk spektrumu (EYS) birbirinden farklı oldukları için ayırt edilebileceklerdir. İlk olarak ZDSF yöntemi kullanılarak teorik analiz gerçekleştirilmiştir. Daha sonra YGR ölçümleriyle YYS oluşturma yönteminden bahsedilmiştir. Frekans domeni özelliklerinin tutarlılığı, farklı örnekleme oranlarına ve farklı frekans band genişliğine sahip YGR'lar kullanılarak test edilmiştir. Mayın ve başka malzemelerin yerleştirildiği birkaç test alanından deneysel sonuçlar elde edilmiştir. Sonuçlar, mayın tespiti ve mayının diğer nesnelere ayırt edilmesinde doğruluk artışı olduğunu göstermiştir.

Literatürde asfalt yol katmanları üzerinde YGR araştırmaları yapılarak anten performansı analizleri ve farklı sayısal yöntemler uygulanarak asfalt kalınlık hesaplama çalışmaları yapılmıştır. Ancak Asfalt katmanları üzerinde iki boyutlu ZDSF metodu ile kalınlık hesaplama algoritması üzerine bir araştırma ve geliştirme yapılmamıştır.

3. MATERYAL VE METOT

3.1. Kullanılan Materyal ve Metot

Bu tez çalışmasında materyal olarak bir bilgisayar ve The Mathworks firmasının geliştirdiği Matlab programlama dili kullanılmıştır. Bilgisayar, Intel Core i5 2.53GHz işlemci, 64 bit işletim sistemi, 4GB RAM ve 500GB hafızaya sahiptir. Kullanılan Matlab sürümünün lisans bilgileri Ek-1'de verilmiştir. Matlab, teknik hesaplamalar ile programlamayı birleştiren bir yazılımdır. Ayrıca, Matlab kolay bir kullanım imkanı sunarak kullanıcıların derinlemesine bilgi sahibi olmamasına rağmen hızlı ve zahmetsiz bir şekilde program yazabilmesini mümkün kılar. Matlab programının bazı kullanım alanları

- ✓ Görüntü işleme
- ✓ Embeded sistemler
- ✓ Anten tasarımı
- ✓ Sayısal işaret işleme
- ✓ Haberleşme sistemleri
- ✓ Kontrol sistemleri
- ✓ Mekatronik
- ✓ Test ve Ölçüm şeklinde sıralanabilir.

Matlab ayrıca üniversitelerde ders ortamında kullanılan bir araç haline gelmiştir. Matlab ile programlama ve hesaplama kolaylığı için, Matlab içerisinde araç kutuları (toolbox) oluşturulmuştur. Çalışma konularına özel olarak hazırlanan araç kutularının sayısı otuzun üzerindedir. Bu araç kutuları sayesinde diğer programlama dillerinde onlarca satırlık kodlar yazarak geliştirilecek programlar Matlab ile bir komutla gerçekleştirilebilmektedir.

Çalışmamızda uyguladığımız metot, 2B ZDSF modellemesiyle Maxwell denklemlerinden elektrik alan ve manyetik alan ifadelerinin zamanda ve konumda yinelemeli olarak ayrıklaştırılması ve MATLAB programı yardımı ile iteratif olarak çözülmesine dayanmaktadır. Elektrik alan ve manyetik alan bileşenlerinin x, y, z yönlerindeki bileşenleri yazılarak toplamda 6 adet denklem elde edilecektir. Oluşturulan bu denklemler, daha sonra 2B benzetim için x ve y yönünde manyetik alan ve z yönünde elektrik alandan meydana gelen TM moduna indirgenecektir. Asfalt uygulama esasları çerçevesinde farklı kalınlıklardan meydana gelen asfalt üst yapıları için her katmanın elektriksel özellikleri değiştirilerek 2, 3 ve 4 katmanlı yapay üst yapılar elde edilecektir. Her bir katmanın elektriksel özellikleri daha önce deneyler sonucu tespit edilen değerlerden atanır. Modelin içerdiği 2 boyutlu yapay asfalt üst yapısı için, dalga boyundan 10 kat daha küçük boydaki hücrelere bölünerek sonlu farklar ağı oluşturulacaktır. İki boyutlu asfalt yol üst yapısı için elektromanyetik dalgaların bileşenleri bu hücrelerin farklı noktalarında, ardışık zaman adımlarında hesaplanarak yapay bir radargram üzerinde elektrik alanın düşey bileşeni (Ez) izlenerek her bir katmanın kalınlığı tespit edilecektir.

3.2. Temel Elektromanyetik ve EMD Denklemleri

3.2.1. Maxwell denklemleri

Birbirinden tamamen ayrı olarak düşünölen elektrik ve manyetizma kanunlarının bir bütönlük içerisinde ele alınıp, matematiksel bir yapı içerisinde bir anlam kazanması ile elektromanyetizma kuramının temelleri ilk olarak önlü fizikçi James Clerk Maxwell tarafından ortaya atılmıştır. Maxwell yapmış olduğu çalışmaları neticesinde elektrik ve manyetik alanların birbirinden ayrı olarak var olamayacaklarını ispatlamıştır. Maxwell denklemleri uzayın herhangi bir anında elektrik ve manyetik alan değeriinin birbirine bağılı olarak ifade edilebileceğini tanımlamıştır. Maxwell denklemlerinin integral biçimindeki matematiksel ifadeleri, elektromanyetik dalgaların katmanlar arasındaki geçişi hesaplayabilme fırsatı verir.

3.2.2. Maxwell denklemlerin entegral haldeki ifadeleri

Temel elektrik ve manyetizma yasaları kullanılarak elde edilmiş olan 4 adet Maxwell denklemi bulunmaktadır.

- a) Gauss Yasasına göre bir yüzey parçası üzerindeki \vec{E} alanının akısı $(\int \vec{E} \cdot d\vec{S})$, o yüzeyi kesen çizgilerin sayısı ile orantılıdır. Burada, bir yükü çevreleyen kapalı bir yüzeyden geçen akı q/ϵ_0 ile verilir. Böylece,

$$\int \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{q}{\epsilon_0} \quad (3.1)$$

olur. Burada q yükü, kapalı bir yüzey içinde kalan yüklerin toplamıdır. Bu yüzeyin dışında kalan bir yükün akıya katkısı sıfır olur çünkü, büyüklerin alan çizgileri yüzeyin bir yerinde girip başka bir yerinden çıkarlar. Gauss yasasında verilen Eşitlik (3.1) ifadesine diverjans teoremi uygulanırsa,

$$\int \vec{E} \cdot d\vec{S} = \int (\nabla \cdot \vec{E}) dv = \frac{q}{\epsilon_0} \quad (3.2)$$

olur. Burada $q = (\int \rho \cdot d\vec{v})$ olduğundan,

$$\int (\nabla \cdot \vec{E}) \cdot dv = \frac{\int \rho \cdot d\vec{v}}{\epsilon_0} \quad (3.3)$$

olur. Böylece 1. Maxwell denklemi;

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (3.4)$$

olarak elde edilir.

- b) Gauss kanunu; manyetizma için doğada izole edilmiş manyetik kutupların var olmayacağını gösterir. Yani herhangi bir kapalı yüzey boyunca manyetik akı sıfırdır. Buna göre,

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0 \quad (3.5)$$

dır. Bu ifade için diverjans teoremi alınırsa 2.Maxwell denklemi aşağıdaki gibi elde edilir.

$$(\vec{\nabla} \cdot \vec{B}) = 0 \quad (3.6)$$

- c) Faraday yasasına göre, sabit bir manyetik alan içinde hareket ettirilen iletken çerçevede indüklenen gerilim,

$$\varepsilon = -\frac{d\phi}{dt} \quad (3.7)$$

ile verilir. Faraday kanununun integral ifadesi ,

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d\phi}{dt} \quad (3.8)$$

olduğundan (3.8) denkleminde Stokes teoremi uygulanırsa ;

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = \int (\vec{\nabla} \times \vec{E}) \cdot d\vec{S} \quad (3.9)$$

ve

$$-\frac{d\phi}{dt} = -\frac{d}{dt} \int \vec{B} \cdot d\vec{S} \quad (3.10)$$

olur. Böylece 3. Maxwell denklemi aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (3.11)$$

Buna göre manyetik alanın zamana bağlı değişimi elektrik alan meydana getirir.

- d) Amper yasasına göre

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \cdot I \quad (3.12)$$

dır. Burada $I = (\int \vec{J} \cdot d\vec{S})$ olduğundan Stokes teoremine göre,

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \int (\vec{\nabla} \times \vec{E}) \cdot d\vec{S} = \mu_0 \cdot \left(\int \vec{J} \cdot d\vec{S} \right) \quad (3.13)$$

olur. Buradan 4. Maxwell denklemi aşağıdaki gibi elde edilir.

$$(\vec{\nabla} \times \vec{B}) = \mu_0 \cdot \vec{J} + \mu_0 \cdot \epsilon_0 \cdot \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (3.14)$$

Buna göre manyetik alanın oluşması için ya elektrik alanının zamana bağlı olarak değişmesi ya da bir akımın varlığı gereklidir.

Serbest uzayda ρ yük yoğunluğu ve J akım yoğunluğu sıfır olduğundan elde edilen 4 adet Maxwell denkleminin entegral haldeki gösterimi aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \int_s \left(\vec{J}_c + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) \cdot d\vec{S} \quad (3.15)$$

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = \int_s \left(-\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \right) \cdot d\vec{S} \quad (3.16)$$

$$\oint_s \vec{D} \cdot d\vec{S} = \int_v \rho dv \quad (3.17)$$

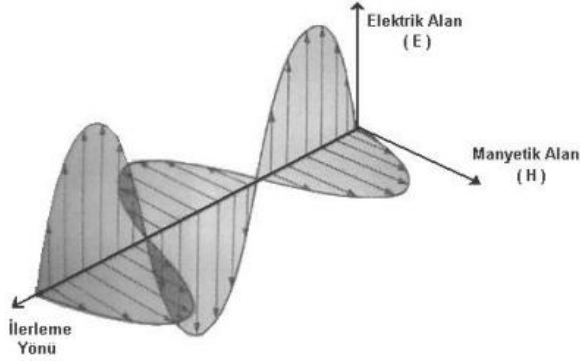
$$\oint_s \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0 \quad (3.18)$$

3.2.3. Elektromanyetik dalgalar

Hareketli bir yük elektrik alan ile birlikte manyetik alanı da oluştururken, durgun bir yük ise sadece elektrik alanını meydana getirir. Düzgün doğrusal hareket yapan bir yük ve durgun bir yükte zamanla değişim söz konusu değildir. Bu nedenle birbirine eşlik eden bir elektrik alan, manyetik alandan bağımsızdır.

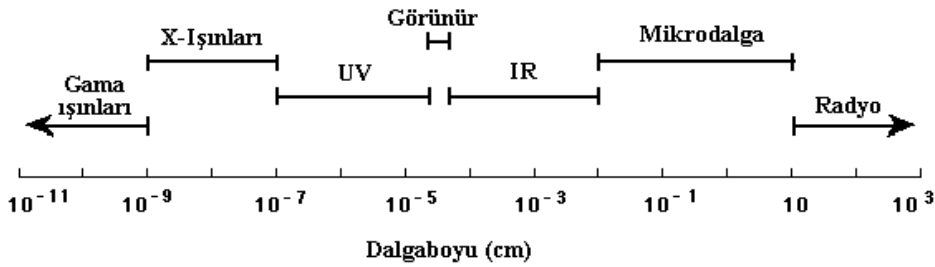
Elektromanyetik dalganın oluşması için zamanla hızlanması gerekmektedir. Zamanın değişim gösterdiği durumlarda, elektrik alan ve manyetik alan birbirine mutlak bağlıdır. Elektrik alanın değişimi ile manyetik alan oluşurken, manyetik alanın değişimi ile de elektrik alan oluşur.

Değişkenlik gösteren elektrik alanlarda bir manyetik alan, değişkenlik gösteren manyetik alanda ise bir elektrik alan muhakkak eşlik eder. Serbest uzayda elektrik ve manyetik alan birbirine diktir. Elektromanyetik dalga ise söz konusu bu iki alana da dik bir şekilde yayılır (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. Elektromanyetik dalganın E ve H bileşenleri

Elektromanyetik dalgalar, serbest uzayda ışık hızı ile yayılırken bir malzeme içerisinde faz hızı ile yayılırlar ve doğa içinde ilerledikleri ortamın elektriksel özelliklerinden(eşdeğer olarak kırılma indislerinden) etkilenirler. Elektromanyetik dalgalarındaki farklılık dalga boylarının farklı olmasından kaynaklanır. Dalga boyu $\lambda = c/f$ bağıntısı ile ifade edilir. Bu bağıntı incelendiğinde frekansın artmasıyla dalga boyunun küçüldüğü, frekansın azalmasıyla da dalga boyunun arttığı anlaşılmaktadır. Elektromanyetik dalgaların düşük frekanslardan çok yüksek frekanslara kadar değiştiği görülmektedir. Dolayısıyla elektromanyetik spektrum geniş frekans aralığı içerir (Şekil 3.2). Tüm elektromanyetik dalgalar daima ışık hızında yayımlandıklarından dolayı frekans spektrumunun hangi bandında olduğu önemli değildir. Radyo, mikrodalga, IR, UV, X ışınları ve gama ışınları gibi dalga çeşitleri, $100 \text{ Hz}-10^{22} \text{ Hz}$ aralığında değişim gösterir.



Şekil 3.2. Frekans Spektrumu

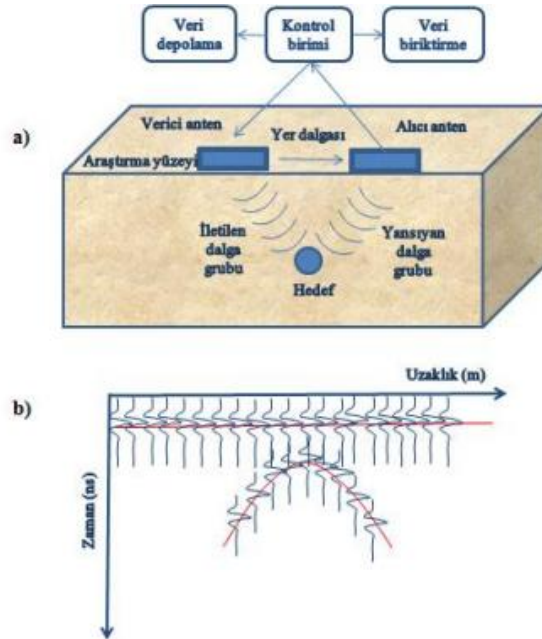
3.3. Yer Görüntüleme Radarı (YGR) Yöntemi

3.3.1. Yer radar yöntemi

Yer radarı yöntemi, jeofizik yöntemler içerisinde yakın yüzey sığ araştırmalar için kullanılan yüksek frekanslı elektromanyetik bir yöntemdir. Yöntemde, araştırma yapılan yerde herhangi bir tahrip edici bir etkide bulunmaması, hızlı veri toplanabilmesi, santimetre düzeyinde yüksek çözünürlükte 2B ve 3B olarak detaylı araştırma yapılabilmesi en önemli özelliklerindedir. Ayrıca bu yöntemle çevreye zarar vermeden çok kolay bir şekilde incelemelerde bulunmak mümkündür. Bu yöntemde

gömülü veya yeraltındaki hedeflerin derinlik ve konum bilgileri net olarak belirlenmesi konusunda popüleritesi giderek artmaktadır.

Zamana bağlı olarak değişim gösteren yüksek frekanslı elektromanyetik dalgalar bir verici anten aracılığı ile yeraltına gönderilerek inceleme yapılmaktadır. Zamana bağlı olarak değişim gösteren elektromanyetik dalgalar, elektrik alan ve manyetik alanların bileşenlerinden oluşur. Bu iki alan yeraltındaki malzemelerin etkisi altında değişmekte olup ortamların elektriksel özelliklerinin değişiminin gözlenmesine olanak sağlamaktadır. Yöntemde bir verici ve bir alıcıdan oluşan iki adet anten kullanılmaktadır. Verici antenle (transmitter) araştırılan ortama gönderilen elektromanyetik dalgaların bir kısmı ortamın fiziksel özelliklerine göre (ϵ ; dielektrik geçirgenlik, σ ; iletkenlik, μ ; manyetik geçirgenlik) geri yansımakta ve diğer kalan bölümü ise daha derin ortamlarda yayılmaya devam etmektedir. (Davis ve Annan 1989). Alıcı anten üzerinden toplanarak kaydedilen işaretler her bir katmandan yansıyan işarete ilişkin zaman farklarını ve toplamını içermektedir (Şekil 3.3). Böylece, radar işaretlerinin gidiş- geliş zamanlarından yararlanılarak, elektrik özelliklerin değiştiği yerin derinliği ve geometrisi belirlenir (Milsom 2003). Şekil 3.3.b'de görüldüğü gibi ölçüm uzayındaki elektromanyetik izler bir araya gelerek bir dizi oluşturur ve 'radargram' adını verdiğimiz 2B kesitler elde edilir (Annan 2001; Daniels 1989). Araştırma ortamına iletilen EM radar enerjisi bir merkez frekans içermekte olup nüfuz derinliğini, soğrulma miktarını ve saçılma dercesini belirlenmesinde önemli bir role sahiptir (Annan 2001). Bu merkez frekansı, sahip olduğu değerinin 0,5 katı ile 1,5 katı arasında kullanılabilir (Milsom 2003). Yöntemde kullanılan verici antenin merkez frekansı oldukça geniş bir aralığa sahip olup, 10 MHz ile birkaç GHz arasında değişmektedir.



Şekil 3.3. a) Yer radarı yönteminin genel çalışma sistemi ; b) Radargram.

Zemin iletkenliği ve dielektrik sabiti yüzeysel özelliklerin bulunmasını etkileyen en önemli iki faktör içerisinde yer alır (Ulriksen 1982). Çünkü bu iki önemli parametre sudan ciddi bir Şekilde etkilenirler (Griffin ve Pippet 2002). Suyun dielektrik sabiti yüksek olduğu ve iletken olduğu için YGR'nın çalışma performansını olumsuz etkilemektedir. Araştırma için seçilen ortamın nem ve su içeriğinin mümkün olduğu mertebede az olması istenir. Ayrıca, araştırma zeminin tanecik yapısı, yoğunluğu, su miktarı ile tuz miktarı ve yüzey dokusu yer radar dalgalarının yayılımını doğrudan etkileyen diğer önemli çevresel parametreler arasında yer alır (Bristow ve Jol 2003).

Yüksek iletkenliğin, radar çalışmalarını olumsuz yönde etkilediği yukarıdaki bölümlerde bahsedilmişti. Genellikle çalışılan ortamın düşük iletkenlikli ortam olması istenir. Bu tip bir ortamın matematiksel ifadesi $\sigma/\omega\epsilon \ll 1$ olarak verilir. Elektromanyetik dalgaların, yüksek iletkenli ortamlarda (ıslak kil, Şeyl vb.) düşük iletkenli (kuru kum, granit mermer vb.) ortamlara göre daha fazla enerjisi sönümlenir. YGR sinyalleri iletkenliği düşük ortamlarda yaklaşık 50-60 m derinliklere kadar ulaşabilirken, yüksek iletkenlikli ortamlarda YGR sinyalleri soğurmakta ve nüfuz derinliği 1m ya da daha az olarak sınırlandırılmaktadır. Bunlara ek olarak anten frekansı nüfuz derinliğini doğrudan etkiler. Düşük frekanslı antenler yeraltının daha derin noktalardan yansımalar alırken, radagramlar üzerindeki görüntülerin çözünürlüğünün azalmasına sebep olurlar. Çözünürlüğü arttırmak için yüksek frekanslı antenlerin kullanılması gerekmekte olup araştırma derinliğini de düşürdüğü unutulmamalıdır (Davis ve Annan 1989). Buna bağlı olarak gömülü cisimlerin geometrileri cm mertebesinde ölçülerek, hassas bir görüntü elde edilmiş olur. YGR ler bu avantajı sayesinde günümüzde sıđđ çalışmalarda en çok kullanılan yöntem haline gelmiştir. Aynı zamanda araştırılan yzeze zarar vermeden ve hızlı bir Şekilde lm yapılabilmesi de yöntemi çekici kılmıştır. Çizelge 3.1'de frekansa göre toprak ve kaya ortamları için nüfuz derinliği gösterilmiştir.

Çizelge 3.1. Frekansa göre penetrasyon derinliği

Frekans	znrlk	Toprak(m)	Kaya Ortamı (m)
25	1.000	35-40 arası	50-60 arası
50	0.5	20-25 arası	30-40 arası
75	0.375	12-20 arası	25-30 arası
100	0.250	10-12 arası	20-25 arası
150	0.200	6-10 arası	15-20 arası
250	0.100	4-6 arası	12-15 arası
500	0.050	3.5-4 arası	5-7 arası
750	0.040	1.5-3 arası	3-4 arası
800	0.030	1-2 arası	3
1200	0.020	1	2

*Düşük resistiviteli materyallerin olmadığı normal jeolojik çevresel koşullarda

YGR işaretlerini etkileyen diğer bir husus ise yüzeyin bağlı dielektrik sabiti olup, elektromanyetik alanların yayılma hızının tespitini sağlar. Dielektrik sabiti ile yayılma hızı ters orantılıdır. Yeraltı katmanlarında meydana gelen ani dielektrik sabiti düşüşleri elektromanyetik dalgaların hızlarının artmasını sebep olur. Ortamlar arasındaki bu değişiklik yansıma arayüzü oluşturduğundan, gönderilen dalganın bir

kısmı geri döner ve alıcı antene ulaşmış olur. Eğer bir ortamda su içeriğinin artışı söz konusu ise dalganın hızının azalmasından ve enerji kaybına uğramasından söz edilebilir. Bu sebepten dolayı dielektrik sabitinin arttığı yer altı katmanları YGR uygulamasının yapılmasını zorlaştırır (Weeds 1994).

3.3.2. Yer radarı yönteminin tarihçesi

1865 yılında James Clerk Maxwell elektromanyetik dalgaları ve bunların yansımalarıyla açıklanan elektromanyetik ışık kuramını açıklayan elektromanyetik ışık kuramını ortaya attı. Bundan 21 yıl sonra 1886'da Alman fizikçi Heinrich Rudolf Hertz elektromanyetik dalgaları keşfederek Maxwellin kuramını kanıtlamıştır. EM dalgaların ilk kullanılmaya başlaması ise; metal nesnelerin yerinin belirlenmesi amacıyla 1904'de Alman yüksek frekans teknisyeni Christian Hülsmeier tarafından gerçekleştirilmiştir. Yine aynı yıl içerisinde Hülsmeier su üzerindeki trafiği denetlemek için telemobiloskopu icat etti ve bu ilk radar denemesi için patent başvurusunda bulundu. Bu alet, metal bir nesneden çarparak geri dönen elektromanyetik dalgaların süresini ölçüyor ve böylece menzile hesaplanabiliyordu. Hülsmeier, bu icadını ilk olarak Ren nehrinde bulunan buharlı bir geminin yerini tespiti için kullanmıştır. Denemeler sonucunda geminin resmini ortaya çıkarabilmiş, böylece geliştirdiği cihazın kullanılabilirliğini kanıtlamıştır. Ancak, bu kullanım için yapılan ilk tanımlama, bundan altı yıl sonra 1910 yılında Leimbach ve Löwy tarafından yapılmıştır. Bu araştırmalarda kullanılan sistemler, sürekli dalga (continuous wave, CW) iletimini uygulamaktadır. Bir yıl sonra 1911'de Löwy, kendisinin geliştirdiği bir teknikle, yeraltı ara yüzeylerinin derinliğinin saptanabileceğini göstermiştir. Daha sonra ilerleyen yıllara bakıldığında; 1921'de Albert Wallace Hull tarafından güçlü gönderici tüp magnetron icat edildi. 1922'de ABD Donanma Araştırma Laboratuvarından A. H. Taylor ve L.C.Young ilk kez bir tahtadan gemiyi algılamayı başardılar. 1925 yılında, Merle A. Tuve, Amerika'da darbeler halinde elektromanyetik dalgalar oluşturunca, bugünkü anlamda radara geçiş sağlandı. Hülsenbeck 1926 yılında gömülü nesnelerin araştırılmasında, ilk olarak darbeleri radarı (pulsed radar) kullandı. Stern (1930) ise jeolojik materyallerin haritalanmasında, yöntemi uygulayan ilk kişi olmuştur.

1939 yılında başlayan İkinci Dünya Savaşı esnasında İngiliz, Alman, Fransız, ve Amerikan fizikçilerin radar konusundaki çalışmaları artmıştır. 1939 yılında İngiltere Birmingham Üniversitesinden John Randall ve Henry Boot adlı iki fizikçi hafif fakat güçlü mikro dalga radarını geliştirdiler. Ve bu radar B-17 bombardıman uçaklarına takıldı. Geliştirilen bu radarın Almanların savaşı kaybetmelerinde büyük rolü olup, deniz altı savaşlarında bir dönüm noktası oluşturmuştur. 1940 yılında ABD, Rusya, Almanya ve Japonya'da muhtelif radar tesisleri geliştirildi. Buna ek olarak, 1940 yılında 180 km uzaklıktaki hedefi hassas bir şekilde tespit eden radarlar yapılmıştır. Ayrıca bu dönemde kutuplardaki buz tabakası kalınlıkları belirlemede ve gezegen araştırmasında kullanılmıştır (Davis ve Annan 1989). İkinci Dünya Savaşı sırasında silah sistemlerinin gelişmesi radar teknolojisinde olağanüstü gelişmelere yol açtı ve özellikle buna bağlı olarak hava savunma sistemleri kurulmaya başlandı. Savaş sonrasında NATO ve Varşova Paktı üyesi ülkelerin ortak sınırlarında bir çok radar sistemi yerleştirildi. İkinci dünya savaşından sonra radar yöntem "barışçıl kullanım" olarak adlandırılan bir yönde kullanılmaya başlandı.

Yer radarının popülerliği 1980'li yılların ortalarına gelindiğinde, ilk dijital yer radarı sisteminin (Sensors ve Software) ortaya çıkması ile artmıştır. 1989'lı yıllara gelindiğinde uygulama alanlarının Annan ve Davis tarafından genişletilmesi ile yöntemin zayıf noktaları ve güçlü yanları anlaşılmıştır (Annan 2001). Bu sistemin en belirgin özellikleri; yüksek performansının yanında, penetrasyon derinliği, veri işlemeye uygun sayısal veri üretebilmesi ve hareket kabiliyetidir (Moorman 2001).

3.3.3. Yer radarı yönteminin avantajı ve dezavantajları

Yer radarı yönteminin günümüzde çeşitli problemlere karşı tercih edilen bir yöntem haline gelmesinde etkili olan birçok özelliği vardır. Jeofizik mühendisliğinde araştırma yapılan alanın sığ derinliklerinden bilgi almak için kullanılan yer radarı yönteminin, diğer yöntemlere göre avantajlı ve dezavantajlı olduğu durumlar vardır. Bunlar; Yer radarı yönteminin avantajları;

- ✓ Yüksek frekanslarda kullanıldığından çözünürlüğü de yüksektir.
- ✓ Uygulamadaki frekans aralığının geniş olması, farklı frekansa sahip antenlerle aynı profilde çalışma imkanı verdiği için daha sağlıklı yorum yapılabilir.
- ✓ Elde edilen verilerdeki gereksiz yansıma bilgileri veri işleme metodları ile temizlenebilir.
- ✓ Çalışma sahasına hasar vermeden ve tahrip etmeden uygulama imkanı vermektedir.
- ✓ Yeraltında gömülü bulunan cismin şekli, yeri ve derinliği kolaylıkla tespit edilebilir.
- ✓ Yer radarı yönteminde diğer elektromanyetik yöntemlerden farklı olarak araştırılan alanın tek bir fiziksel özelliğine bağlı olmayıp, araştırılan alanın dielektrik geçirgenlik (ϵ), bağıl manyetik geçirgenlik (μ) ve elektrik iletkenlik (σ) gibi fiziksel özelliklerindeki değişime duyarlıdır.
- ✓ Duyarlı olduğu fiziksel parametreler nedeniyle (ϵ , μ , σ) kullanıldığı alan oldukça geniştir. Örneğin; Arkeolojik araştırmalarda, yeraltının haritalanmasında, köprü, tünel, yol araştırmalarında çevresel uygulamalar bunlardan bazılarıdır.

Yer radarı yönteminin dezavantajları;

- ✓ Çalışma alanındaki jeolojik elemanların etkisi sinyallerin yeraltına nüfuz etmesini engelleyebilir.
- ✓ Araştırma yapılan çevrede bulunan radyo vericileri başlıca gürültü kaynağı olduğundan ölçüm hassasiyetini düşürür.
- ✓ Kayıtlara çevredeki yapılardan gelen yansımalar karışabilir.
- ✓ Yer iletkenliğinin yüksek olduğu durumlarda enerji yayılımında keskin yansıma sinyali yarattığından dolayı iletken cisimler üzerinden bilgi alınmasını zorlaştırır.

3.3.4. Yer radarı yönteminde elektromanyetik alan yayılım teorisi

3.3.4.1 Elektromanyetik dalga özellikleri

Elektromanyetik dalgaların yer içerisindeki hareketlerini açıklayabilmek için en önemli parametreler faz hızı (θ), sönümlenme (α) ve elektromanyetik empedans (η)'dir.

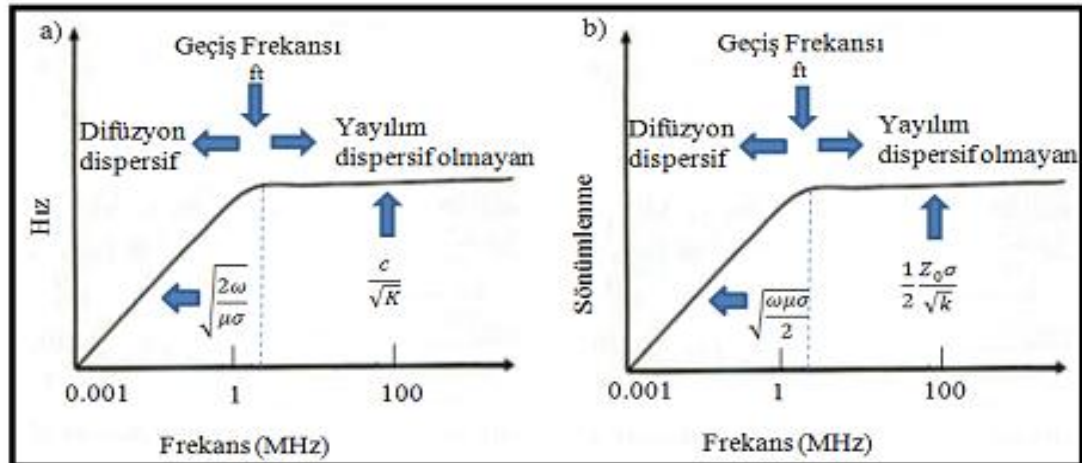
Elektromanyetik teoride basit ortamlar olarak ifade edilen, sabit dielektrik geçirgenlik, elektrik iletkenlik ve manyetik geçirgenliğe sahip ortamlarda dalga özelliklerinin hepsi; benzer davranışlar sergilemekte ve frekans değerlerine bağlı olarak değişimler göstermektedir. Düşük frekanslarda, tüm dalga özellikleri açılmal frekansa ($\sqrt{\omega}$) bağımlı olup, elektromanyetik dalga düşük frekanslarda dispersif yayılım göstererek difüzyon hareketi ile ilerlemektedir. Yüksek frekanslarda, eğer ϵ , μ , σ sabit ise, dalga özellikleri frekanstan bağımsız olup, dispersif olmayan yayılım göstermektedir. Yüksek frekanslarda elektromanyetik dalgaların bu davranışı yer radarının en karakteristik özelliğidir (Şekil 3.4).

Düşük frekanslarda, elektromanyetik alanlar ortam içine yayılır ve elektromanyetik enerji kendini ortama ısı enerjisi şeklinde dağıtır. Bu ortamdaki bir dürtü sinyali, bu sinyalin frekans bileşenlerinin bu ortam içerisinde farklı oranlarda sönümlenmesi ve farklılaşan faz hızlarında seyahat etmesi nedeniyle saçılmaya başlar. Bu durumdaki faz hızı, sönümlenme ve elektromanyetik empedans için matematiksel gösterim (3.19 - 3.21) bağıntılarıyla tanımlanmıştır.

$$\theta_f = \sqrt{\frac{2\omega}{\mu\sigma}} \quad (3.19)$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}} \quad (3.20)$$

$$\eta = (1 + i) \sqrt{\frac{\omega\mu}{2\sigma}} \quad (3.21)$$



Şekil 3.4 a) Hız ; b) sönümlenme değerlerinin frekansa bağlı olarak değişimi

Yüksek frekanslarda, elektromanyetik alanlar ortam içerisinde dalgalar şeklinde yayınırlar. Tüm frekans bileşenleri aynı hızda seyahat eder ve aynı sönümlenmeden etkilenir. Bir dürtü sinyali bozulmamış şekliyle seyahat edecektir. Bu yayılımı,

saçılmasız yayılım olarak adlandırılır (Annan 1996). Yüksek frekanslı elektromanyetik dalgaların ortam içerisindeki hız, sönümlenme ve elektromanyetik empedans değerleri (3.22 - 3.24) bağıntıları ile bulunabilir. Burada ortamın manyetik özellikleri ihmal edilmektedir ve Eşitlik (3.25) bağıntısıyla verilen η_0 boşluğun empedansını göstermektedir.

$$\vartheta_f = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (3.22)$$

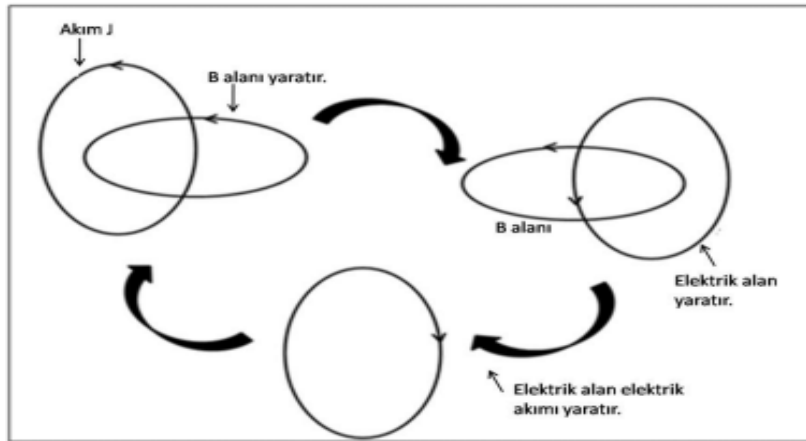
$$\alpha = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \frac{\sigma}{2} = \eta_0 \frac{\sigma}{2\sqrt{\epsilon}} \quad (3.23)$$

$$\eta = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} = \frac{\eta_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (3.24)$$

$$\eta_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 377 \Omega \quad (3.25)$$

3.3.4.2 Elektromanyetik alanların dalga yapısı

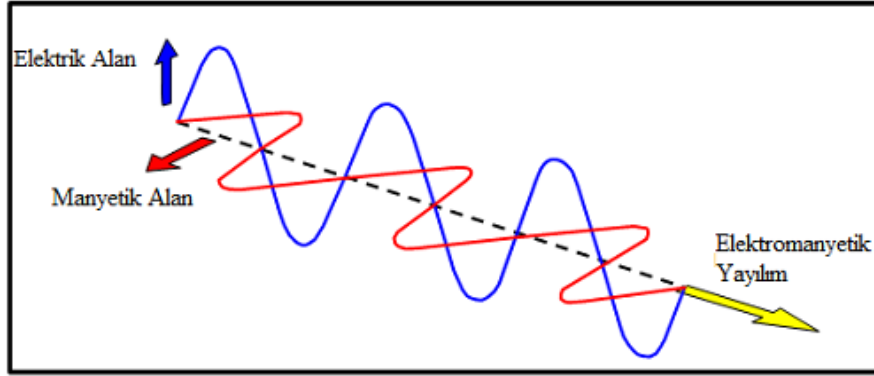
EM alanların dalga yapısı burada basit homojen ortam için dikkate alınmıştır. Malzeme özellikleri izotropik, frekans bağımsız ve lineer ifade edilmiştir. Elektrik alan indüklenerek, Şekil 3.5'deki gibi elektrik alanın değişimiyle manyetik alan oluşturur. Bu devamlılık bir alanın diğer alanı indüklemesiyle ortamda hareket ederek devam etmektedir. Kayıplara bağlı olarak, alanlar dalga şeklinde yayılabilir.



Şekil 3.5. Elektromanyetik dalga yayılımının gösterimi (Annan 2001)

Elektromanyetik dalga, daha öncede belirtildiği gibi elektrik ve manyetik alanların bileşkesinden oluşur. Elektrik alan (\vec{E}) ve manyetik alan (\vec{H}) birbirlerine dik sinüs dalgaları şeklindedir ve dışarıdan gelen herhangi bir etki olmadığı müddetçe aynı fazdadırlar. Bu nedenle birisi maksimum olduğunda diğeri de maksimum, biri minimum

olduğunda diğeri de minimumdur. Elektromanyetik dalgalar boşlukta ışık hızında hareket ederler. İlerleme yönü $E \times H$ vektörü yönünde ve z eksenine doğrudur (Şekil 3.6).

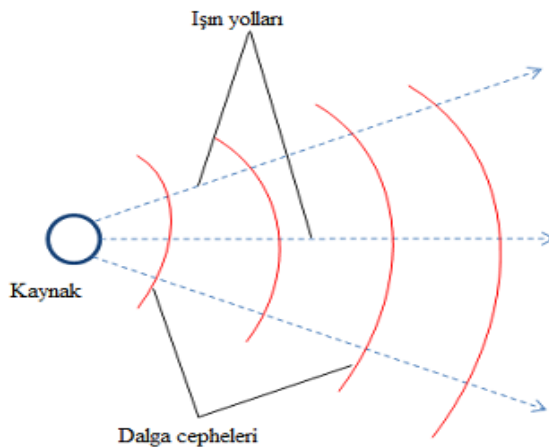


Şekil 3.6. Elektrik, manyetik ve elektromanyetik alan gösterimi

3.3.4.3 Elektromanyetik dalganın yayılımı

Elektromanyetik bir dalganın yayılımını temel olarak, dalga cepheleri ve ışın yolları ile karakterize edilebilir. Her iki kavram da Şekil 3.7’de gösterilmektedir. Dalga cephesi, sinyallerin tümünün aynı fazda olduğu uzamsal bir yüzeyi gösterirken, ışın yolu dalga boyu ya da geçici sinyal süresinin bir ifadesidir. Herhangi bir kaynaktan gönderilen geçici bir sinyal için uzamsal yüzeyin eş seyahat süresi, dalga cephesini belirler. Işın yolları, dalga cephesine ve ortamdaki elektrik ve manyetik alanlara dik bir konumda bulunmaktadır.

Işın yolları için en ideal durum, dalga boyu ya da geçici sinyal süresinin çok kısa olmasıdır. Elektromanyetik bir dalganın yayılımında ortam koşulları çok önemli olmakla birlikte, dalganın özellikleri de önem taşır. Bu nedenle, elektromanyetik dalga yayılımının doğasının iyi bilinmesi çözümü olası kılar. Elektromanyetik alanlar ışınlar olarak davrandığında, kavramsal olarak, ışın tarafından tanımlanan yol boyunca seyahat eder (Şekil 3.7).



Şekil 3.7. Kaynaktan dışı doğru seyahat eden dalgalar

Dalga cepheleri bir kaynaktan dışa doğru seyahat eden dalgalar için eş seyahat süreli ya da eş fazlı yüzeylerdir. Işınlarda dalga cephelerine diktir ve yörüngeden dışa doğru çizilir (Annan 2001). Yeraltındaki elektromanyetik enerjinin hareketi, içinden geçtiği maddenin/ortamın yayınım sabiti tarafından yönlendirilir. Boşlukta elektromanyetik dalgaların genel yayınım sabiti (γ_0), (3.26) bağıntısıyla verilir. Denklemde ω radyan cinsinden frekansı, yayınım sabiti boşluğun manyetik geçirgenliğini μ_0 ve boşluğun elektrik geçirgenliğini ϵ_0 ifade etmektedir.

$$\gamma_0 = \sqrt{(\omega^2 \mu_0 \epsilon_0)} = \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_0} \quad (3.26)$$

Yer içinde, elektromanyetik dalganın ilerleyişi, seyahat ettiği ortamın elektrik iletkenliğine bağlıdır ve yüksek elektrik iletkenlikli ortamlarda elektromanyetik dalgalar çok çabuk sönümlenir. Bu nedenle yayınım katsayısının hesabı (3.27) denklemi ile verilir. Burada μ , ortamın manyetik geçirgenliği, ϵ ortamın elektrik geçirgenliği ve σ_{DC} doğru akım elektrik iletkenliği ve $i = \sqrt{-1}$ dir.

$$\gamma_0 = \sqrt{(\omega^2 \mu \epsilon + i \omega \sigma_{DC})} \quad (3.27)$$

Elektrik geçirgenlik radar uygulamalarında çok büyük önem taşımaktadır ve genellikle bağıl geçirgenlik ya da bağıl dielektrik geçirgenlik katsayısı şeklinde açıklanır. Eşitlik (3.28) bağıntısında gösterildiği gibi verilir. Denklemdeki ϵ^* karmaşık dielektrik katsayısı, ϵ' dielektrik katsayısı ve ϵ'' kayıp faktörü olarak adlandırılır. Buradan yeraltındaki elektromanyetik dalganın yayınım faktörü, Denklem (3.29) bağıntısıyla verilen şekilde tanımlanabilir. $\omega \epsilon'$ dielektrik katsayısı faktörünü, $i \omega \epsilon''$ dielektrik kayıp faktörünü ve $i \sigma_{DC}$ iletkenlik kayıp faktörünü ifade eder.

$$\frac{\epsilon}{\epsilon_0} = \epsilon^* = \epsilon' \epsilon_0 + i \epsilon'' \epsilon_0 \quad (3.28)$$

$$\epsilon = \sqrt{\omega \mu_0 \epsilon_0 (\omega \epsilon' + i \omega \epsilon'' + i \omega \sigma_{DC})} \quad (3.29)$$

Eşitlik (3.29) bağıntısı, söz konusu madde içerisinde yayınan enerji miktarını, hem doğru akım iletkenlik değerinin hem de karmaşık dielektrik geçirgenlik katsayılarının belirlediğini göstermektedir.

3.3.4.4 Elektromanyetik dalgaların yayınımlarını etkileyen fiziksel özellikleri

Zamanla değişen elektrik alan (\vec{E}) ve manyetik alan (\vec{H}) bileşenlerinden oluşan elektromanyetik alanlar, geçtikleri ortamların veya maddelerin farklı fiziksel özelliklerinden etkilenirler. Manyetik ve elektrik alanlarda meydana gelen bu değişim, EM alanların ortamda yayınımlarını ve sönümlenmelerini etkilemenin yanında, farklı karakterlerde yansımalar elde edilmesine de neden olur.

Birçok yer radarı uygulamasında, yerin fiziksel özellikleri (ϵ , μ , σ), kayıt edilen radar verilerini etkileyen faktörlerdendir. Manyetik özelliklerdeki değişimle elektrik özelliklerdeki değişimler kıyaslandığında, manyetik değişim, diğerlerine oranla daha zayıf kalmaktadır. Ancak yer radarı yanıtlarını etkileyebilecek manyetik özelliklere sahip ortamların bulunduğu da göz ardı edilmemelidir. Bu nedenle elektromanyetik alanları etkileyen fiziksel özelliklerden dielektrik geçirgenlik ve elektrik iletkenlik kavramları ele alınmıştır.

3.3.4.5 Dielektrik geçirgenlik (ϵ)

Dielektrik (ϵ) ifadesi elektriksel yalıtkanlıkla eş anlamlıdır ve dielektrik bir madde, elektrik akımına yüksek derecede direnç gösteren madde olarak tanımlanmaktadır. Yalıtkan ortamlar, elektromanyetik enerjinin büyük bir kısmının saçılmadan geçişine izin verir. Yalıtkan bir ortamda bir elektromanyetik alan söz konusu olduğunda, elektrik alan tarafından zorlanan yükler bu zorlamaya bir yer değiştirme hareketiyle yanıt verirler. Birim elektrik alan başına düşen elektriksel yer değiştirme miktarının ölçüsü dielektrik geçirgenlik olarak tanımlanır. Birimi Farad/metre ya da Coulomb/voltmetredir.

Elektriksel geçirgenlik matematiksel ifadesi (3.30) bağıntısında verildiği gibidir.

$$\epsilon = \frac{\vec{D}}{\vec{E}} \quad (3.30)$$

Yalıtkan bir ortamda elektrik alan şiddeti arttığında, elektrik yer değiştirme hareketi bu ortamda depolanır. Daha sonra elektrik alan azaldığında, ortam depoladığı enerjiyi bırakır ve yer değiştirme akımlarını oluşturur. Bir maddenin bağıl dielektrik geçirgenliği (ϵ_r), o madde elektromanyetik enerjiyle yüklendiğinde, enerjiyi depolama ve daha sonra elektromanyetik enerjinin geçişine izin verme kapasitesi olarak tanımlanır (Von Hippel 1954). Bağıl geçirgenlik katsayısı (ϵ_r), bir maddenin elektrik geçirgenliğinin, boşluğun elektrik geçirgenliğine oranı ile hesaplanabilir. Ortamların elektriksel geçirgenlikleri; onların bileşimleri, nem içeriği, hacim yoğunluğu, gözeneklilik, sıcaklık ve fiziksel yapılarına bağlıdır (Olhoeft 1981).

Bir ortam içerisinde belirli bir θ_f faz hızında ilerleyen elektromanyetik dalgalar için o ortamın bağıl dielektrik geçirgenlik değeri izleyen bağıntıyla hesaplanabilir.

$$\sqrt{\epsilon_r} = \frac{c}{\vartheta_f} \quad (3.31)$$

Bağıl dielektrik geçirgenlik katsayısını arazide hesaplamak oldukça zordur. Bunun kestirimi arazide kullanılan bazı hız analizi teknikleri yardımıyla yapılabilir. Bunun yanı sıra, toprak ve çökel örnekleri üzerinde laboratuvar ölçümleri yapılarak da dielektrik geçirgenlik ölçülebilir. Çizelge 3.2’de bazı malzemelere ait dielektrik geçirgenlik, iletkenlik, yayılma hızı ve sönmülme katsayıları verilmiştir.

Çizelge 3.2 Çeşitli ortamlar ve birimler için dielektrik sabit, iletkenlik, hız ve soğrulma değerleri (n/a bu malzemeler için bir değer olmadığını ifade etmektedir) (Wilchek 2000; Conyers ve Goodman 1997; Leckebush 2003)

Malzeme	Bağıl dielektrik sabit ϵ_r (ϵ/ϵ_0)	Yayılm hızı V (m/nsn)	İletkenlik σ (mS/m)	Soğrulma, Soğrulma sabiti α	Malzeme	Bağıl dielektrik sabit ϵ_r (ϵ/ϵ_0)	Yayılm hızı V (m/nsn)	İletkenlik σ (mS/m)	Soğrulma, Soğrulma sabiti α
Arijilit	n/a	n/a	1-100	n/a	Kireçtaşı	4-8	0.12	0.5-2	0.4-1.0
Asfalt	5	n/a	n/a	n/a	Kömür	4,5	n/a	n/a	n/a
Bazalt	12	0.09	$8*10^{-6}$ -0.025	$4*10^{-6}$ -0.01	Kum (kuru)	5	0.13	0.01	0.01
Beton	5,5	n/a	n/a	n/a	Kumlu toprak (ıslak)	25	0.06	69	23
Buz	4	0.16	0.01	0.01	Kumlu toprak (kuru)	2,6	0,19	1,4	1
Dasit	6.8-8,2	0.12	0.05	0.03	Kumtaşı	4.7-12	0.09-0.14	$1*10^{-5}$ -0.7	$5*10^{-8}$ -0.6
Diorit	6	0.12	0.0002-0.002	0.0001-0.001	Kuru granit	5	n/a	n/a	n/a
Diyabaz	10.5-34.5	0.05-0.09	$2*10^{-5}$ -50	$1*10^{-2}$ -26	Kuru kil	4	n/a	n/a	n/a
Donmuş kum ve çakıl	5,5	n/a	n/a	n/a	Kuru kireçtaşı	5,5	n/a	n/a	n/a
Donmuş kum ve granit	5,5	n/a	n/a	n/a	Kuru kum	4-6	n/a	n/a	n/a
Donmuş toprak	6	n/a	n/a	n/a	Kuru kumlu toprak	6	n/a	n/a	n/a
Doygun kum	25	n/a	n/a	n/a	Kuru toprak	2,5	n/a	n/a	n/a
Gabro	8.5-40	0.05-0.10	0.001-1	$3*10^{-4}$ -0.6	Kuvars	4.2-5	0.13-0.15	$3*10^{-4}$ - $5*10^{-12}$	$2*10^{-8}$ - $4*10^{-12}$
Gnays	8.5	0.10	0.0003-0.02	n/a	Kuvarsit	n/a	n/a	$5*10^{-6}$ -100	n/a
Gösel Çökel	50	0.04	n/a	n/a	Norit	61	0.04	0.02-1	0.004-0.2
Granit	4,6	0.13	0.01-1	0.01-1	Obsidiyen	5.8-10.4	0.11	n/a	n/a
Granit (kuru)	5	0.13	0.01	0.01	Organik toprak	64	n/a	n/a	n/a
Hava	1	0.3	0	0	Peridotit	8.6	0.10	0.15-0.33	n/a
Islak bazalt	8,5	n/a	n/a	n/a	Silt	5-30	0.07	1-100	1-100
Islak granit	6,5	n/a	n/a	n/a	Su (taze)	80	0.033	0.5	0.1
Islak kil	27	n/a	n/a	n/a	Su (tuzlu)	80	0.01	3000	1000
Islak kireçtaşı	8	n/a	n/a	n/a	Sualtımda bul. kültürel tab.	70	0.04	-	-
Islak kum	15-25	n/a	n/a	n/a	Şeyl	5-15	0.09	1-100	1-100
Islak kumlu toprak	23,5	n/a	n/a	n/a	Tatlı su	80	0,033	0,5	0,1
Islak toprak	6	n/a	n/a	n/a	Toprak (doygun)	20-30	0.06	0.1-1.0	0.03-0.3
Kalsit	7.8-8.5	0.11	$5*10^{-10}$	$3*10^{-10}$	Toprak (kuru)	3-5	0.15	0.01	0.01
Kar	1,5	n/a	n/a	n/a	Turba	61,5	n/a	n/a	n/a
Kil	5-40	0.06	2-1000	1-300	Tuz (kuru)	5-6	0.13	0.01-1	0.01-1
Kil (ıslak)	10	0.095	500	300	Tuzlu su	81-88	0,033	3000	600
Killi toprak (ıslak)	19	0.07	500	200	Volkanik kül	13	n/a	n/a	n/a
Killi toprak (kuru)	2,5	0,19	2,7	3					

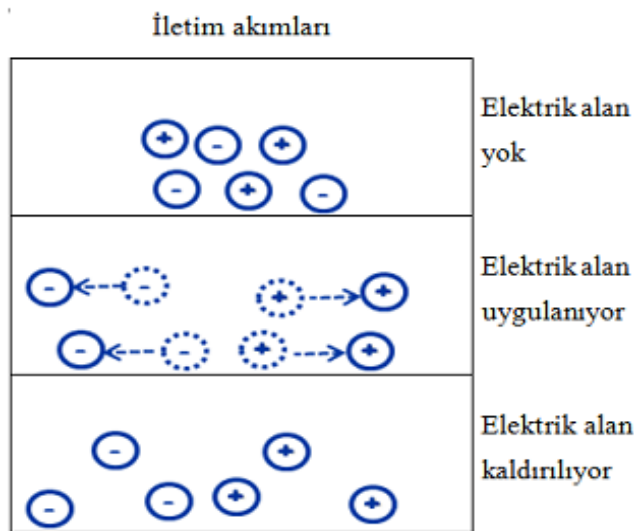
3.3.4.6 Elektriksel iletkenlik (σ)

Bir ortamda bulunan elektrik yükleri o ortamda bir elektrik alan (E) ortaya çıkmasına neden olur. Elektrik alan vektörel bir büyüklüktür ve ortamın doğasına bağlı olarak iki farklı şekilde oluşabilir. Yükler, bir maddede bağlı ve serbest olmak üzere iki türde bulunabilir. Bunlar sırasıyla yer değiştirme akımları ve iletim akımları olarak adlandırılan akım dolaşımına neden olurlar.

İletim Akımları

Bilindiği gibi elektrik iletkenliğe sahip ortamlarda, serbest (bağısız) elektrik yükler bulunmaktadır. Bu yüklerin bulunduğu ortamlara bir elektrik alan

uygulandığında, bu alanın etkisiyle yükler ani bir şekilde hızlanmaya başlar ve bir uç hıza ulaşırlar ve yüklerin doğası gereği ortamda bir elektrik akımı oluşur. Bu elektrik alan uygulanmaya devam ettiği sürece yüklerin hareketi devam eder ve bu esnada yükler buldukları ortama, elektrik alan etkisiyle aldıkları enerjiyi ısı enerjisi olarak transfer ederler. Bu hareketli yükler, ortamda bulunan hareketsiz nesnelere karşılaştıklarında, ısı enerjisi olarak ortaya çıkan enerji, hareketsiz yükleri hareketlendirecek biçimde mekanik enerjiye dönüşür. Elektrik alan uygulandığı sürece bu yükler hareketlerine ve dolayısıyla, elektrik enerjisi önce ısı ve daha sonra da mekanik enerjiye dönüşmeye devam eder. Elektrik alan kalktığında, bu hareketlenen yükler yavaşlar ve anlık bir sürede dururlar. Burada unutulmaması gereken, bu enerji dönüşümünün tek taraflı olduğu yani elektrik enerjisinin önce ısıya ardından mekanik enerjiye bir daha geri dönülmez şekilde dönüştüğüdür. Metal bir telde dolaşan elektronlar iletim akımlarına örnek olarak verilebilir. Metallerde, elektronlar yüklerini bir noktadan diğerine aktarmak için yapının metalik bağları içinde hareket ederler. Sulu çözeltilerde oluşan iyon hareketleri de yaygın bir iletim mekanizmasıdır ve birçok yer radarı uygulamasında en önemli iletim şeklidir (Annan 2001). Şekil 3.8’de iletim akımları için elektrik yüklerinin hareketini göstermektedir.



Şekil 3.8. Elektrik alan uygulandığında serbest elektrik yüklerinin hareketi (Annan 2001)

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (3.32)$$

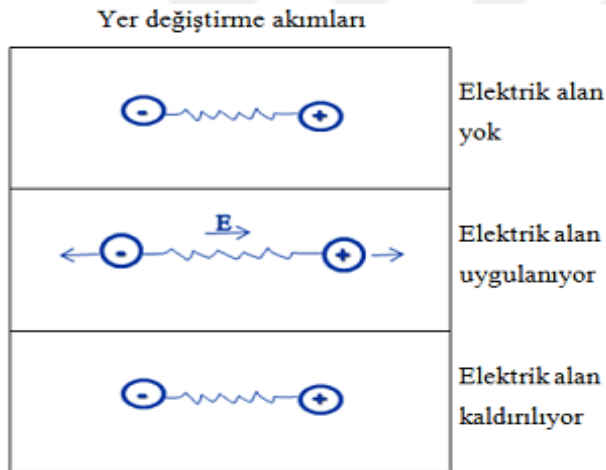
İletim akımı ile uygulanan elektrik alan arasındaki ilişki (3.33) bağıntısı ile ifade edilmektedir ve bir elektrik alan var olduğunda, serbest yüklerin elektrik akımı oluşturabilmeleri için hareketlerini tanımlar. Burada σ elektrik iletkenliktir.

Matematiksel olarak çözümü basite indirmek için, ortamın elektrik iletkenlik açısından homojen, izotrop (yönden bağımsız) ve frekandan bağımsız olduğu düşünülür. Bu durumda, ortamdaki elektrik akımı ile elektrik alan arasındaki ilişki doğrusaldır ve aralarındaki oransallık katsayısı elektrik iletkenlik değerini verir. Gerçekte iletkenlik, elektrik alandaki değişim oranı kadar sıcaklık, basınç ve diğer faktörlerin de bir fonksiyonu olabilir. Ancak bunlar yer radarından elde edilen yanıtlarda çoğunlukla ikinci derecede önem taşır. Elektrik iletkenliğe sahip ortamların

içerisine giren elektromanyetik enerji , elektromanyetik alanın elektrik alan bileşenlerinin bu ortam içerisinde manyetik alan bileşenlerinden ayrılarak enerji dönüşümüne uğraması nedeni ile , saçılıp çabuk şekilde sönmülmektedir. Yani diğer bir ifadeyle, bir enerji yitimi söz konusudur ve bu ortamlarda radar dalgalarının ilerleyemeyeceği anlamına gelmektedir. Bu yüzden, maksimum elektromanyetik enerji iletimi (nüfuzu) için ortam düşük elektrik iletkenliğe ve yüksek derecede dielektrik özelliklere sahip olmalıdır. Bu durumun matematiksel ifadesi $\sigma/\omega\epsilon \ll 1$ şeklindedir.

a) Yer değiştirme (Kutuplanma) Akımları

Yer değiştirme akımları, maddenin yapısında bulunan bağlı yüklerin dışarıdan uygulanan elektrik alan etkisiyle harekete zorlanması sonucu oluşur. Bağlı yüklere atomun çekirdeği çevresindeki elektron bulutu örnek verilebilir. Başlangıçta durağan olan bağlı yükler elektrik alan uygulandığında, bağlarının izin verdiği miktarda diğer bir durağan konuma hareket ederler. Yer değiştirme hareketinin tamamlanmasının hemen ardından, elektromanyetik enerji elektrik alandan ortama aktarılır ve ortamda depolanır. Uygulanan elektrik alan kaldırıldığında, yük başlangıçtaki denge konumuna geri döner ve bu sırada depolanan enerji geri bırakılır (Şekil 3.9). Bu davranışa en temel örnek, kapalı bir elektrik devresindeki kondansatör verilebilir. Devrede enerji, yüklerin kondansatörde toplanması ile biriktirilir ve sonrasında yüklerin boşalmasıyla tekrar devreye aktarılır.

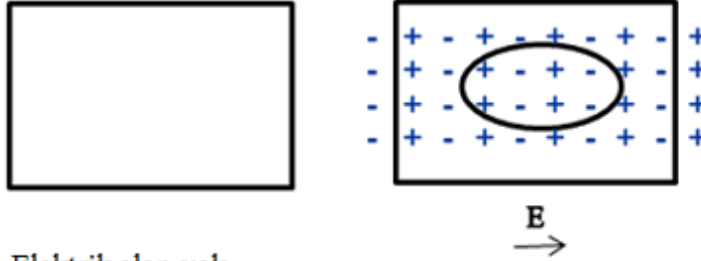


Şekil 3.9. Uygulanan elektrik alan doğrultusunda bağlı elektrik yüklerinin yer değiştirme hareketi (Annan 2001)

Bir elektrik alan uygulandığında, hacimsel bir maddede yük hareketi o maddede dipol moment dağılımı şeklinde bir yük dağılımına neden olur (Şekil 3.10). Dipol moment dağılımının oluşumu, bağlı yük hareketleri (diğer bir deyişle yer değiştirme akımları) ile ilgilidir. Bu yük dağılımı dipol moment yoğunluğu (\vec{D}) ile tanımlanır. Dipol moment dağılımı literatürde elektrik yer değiştirme olarak da adlandırılır. Dipol moment yoğunluğunun zamanla değişimi yer değiştirme akımını (\vec{J}_D) matematiksel olarak tanımlar (Denklemler 3.33).

$$\vec{J}_D = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (3.33)$$

Dipol moment yoğunluğu



Şekil 3.10. Uygulanan elektrik alan sonucu oluşan elektrik dipol moment dağılımı (Annan 2001)

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

b) Toplam Akım Dolaşımı

Herhangi bir maddede, bir elektrik alan uygulanması sonucu ortaya çıkan elektrik akımı, iletim ve yer değiştirme akımlarının toplamından oluşur. Elektrik alandaki değişime bağlı olarak, bu iki farklı türdeki akımdan biri diğerine baskın olabilir. Toplam akım, ortamın elektriksel özellikleriyle birlikte, elektrik alanın kendisinden ve elektrik alanın zamanla değişiminden oluşur. Bu kavram, sinüzoidal şekilde zamanla değişen alanlar için matematiksel olarak (3.35) ve (3.36) bağıntılarında gösterildiği şekilde ifade edilebilir.

$$\vec{J} = \vec{J}_C + \vec{J}_D \quad (3.34)$$

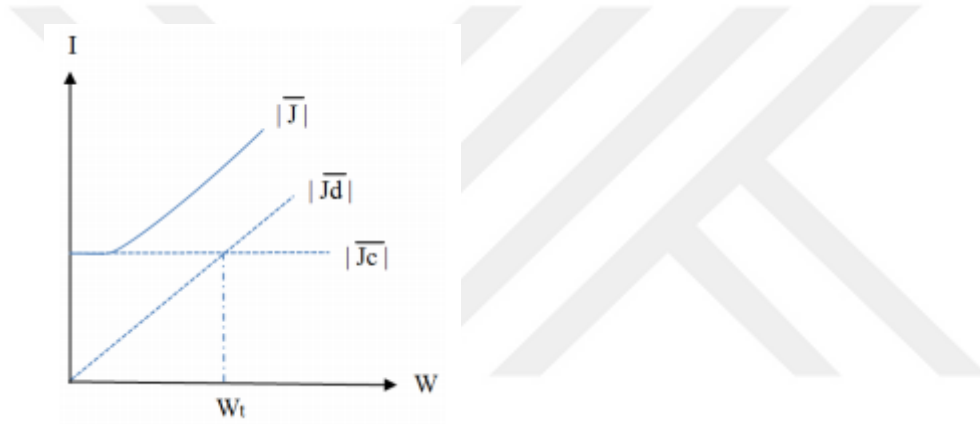
$$\vec{J} = \sigma \vec{E} + \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (3.35)$$

Bu bağıntılardan açısal frekansı ile yer değiştirme akımlarının açısal frekansının orantılı olduğu anlaşılmaktadır:

$$\vec{J} = (\sigma + i\omega\epsilon)\vec{E} \quad (3.36)$$

Yer değiştirme akımları ile iletim akımları arasında 90° faz farkı vardır ve yer değiştirme akımı sanal bileşeni oluşturur. Akımlar arasındaki bu faz farkı, yer değiştirme akımının elektromanyetik alanlar için enerji toplayıcı bir mekanizma olduğunu gösterirken, iletim akımının ise enerji dağıtıcı bir mekanizma olduğunu göstermektedir (Annan 2001).

şekil 3.11’de toplam elektrik akımının (J) frekansa göre değişimi görülmektedir. Yer radarı için tanımlanan basit ortamlarda, elektrik iletkenlik ve dielektrik geçirgenliğinin sabit, yer değiştirme ve iletim akımlarının eşit olduğu bir geçiş frekansı (W_t) vardır. Genelde ortamlarda, yer değiştirme akımları iletim akımlarının bir miktar üzerinde olma eğilimdedir. Geçiş frekansı değerinin üzerinde yer değiştirme akımları baskın iken, bu frekans değerinin altında iletim akımları baskındır (Annan 2001).



şekil 3.11. Toplam elektrik akımının frekansla değişimi (Annan 2001)

Geçiş frekansı açısal frekans olarak ifade edilip (3.37) bağıntısında verilmektedir.

$$W_t = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (3.37)$$

Geçiş frekansı yer radarında düşük-kayıplı ortamların tanımlanmasında önem taşır. (3.38) bağıntısı, kayıp tanjantı olarak adlandırılır ve bir maddedeki iletim akımlarının yer değiştirme akımlarına oranını verir.

$$\tan\delta = \frac{|\vec{J}_d|}{|\vec{J}_c|} = \frac{\sigma}{\omega\epsilon} \quad (3.38)$$

3.3.5. Elektromanyetik empedans

Elektromanyetik alanların bileşenleri olan elektrik ve manyetik alanlar birbirine dik yönlerde oluşur ve her iki alana dik yöndeki doğrultu boyunca hareket ederler.

Oluşacak manyetik alanın genliği, uygulanan elektrik alanın genliğine bağlıdır. Bu durumun tam tersi, alan bağılaşımı yani bir alanın diğer alan üzerindeki etkisi nedeniyle ortaya çıkabilir. Bu olgu elektromanyetik empedans kavramı ile açıklanabilir. Elektromanyetik empedans (η) Eşitlik (3.39) bağıntısı ile ifade edilir.

$$\eta = \frac{\vec{E}}{\vec{H}} \quad (3.39)$$

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

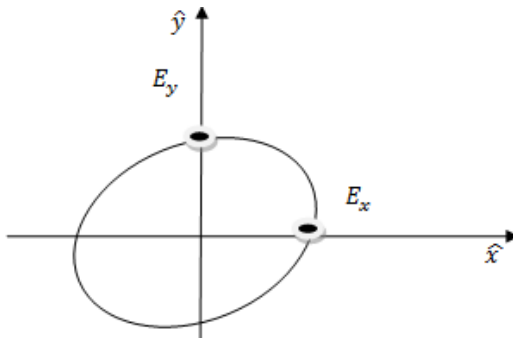
$$\eta = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon + i\frac{\sigma}{\omega}}} \quad (3.40)$$

$$\eta = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \left(1 - i\frac{\sigma}{2\omega\epsilon}\right) \quad (3.41)$$

bağıntılarıyla hesaplanır.

3.3.6. Kutuplanma

Genel anlamda bir dalganın varlığından bahsedebilmek için gerekli koşullar sırası ile bir titreşimin varlığı ve bu titreşimin bir doğrultuda taşınmasıdır. Bu anlamda dalgayı oluşturan elektronların titreşim yönü basitçe kutuplanma olarak tanımlanır. Kutuplanmanın en genel ifadesi eliptik kutuplanma olup Şekil 3.13 yardımı ile denklem (3.42) ile ifade edildiği biçimdedir.



Şekil 3.12. Eliptik kutuplanma

$$\sin^2 \delta = \left(\frac{E_x}{E_{0x}} \right)^2 - 2 \left(\frac{E_x}{E_{0x}} \right) \left(\frac{E_y}{E_{0y}} \right) \cos \delta + \left(\frac{E_y}{E_{0y}} \right)^2 \quad (3.42)$$

δ x ve y bileşenleri arasındaki açıyı ifade eder. $\delta = (2n + 1) \frac{\pi}{2}$ için denklem dairesel kutuplanmayı ifade ederken, E_x ve E_y den birinin sıfır olması hali doğrusal kutuplanmayı gösterir.

3.3.7. Yer radarı temel ilkeleri

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

YGR sinyallerinin tanımlanması için EM alanlar ve malzemenin fiziksel özelliklerinin ilişkilendirilmesi büyük önem taşımakta olup, temeli Maxwell eşitliklerine dayandırılır. Maxwell eşitlikleri; malzemenin fiziksel özellikleriyle EM alanları ilişkilendirir ve bu alanların fiziğini matematiksel olarak tanımlar.

3.3.7.1 Katkı eşitlikleri

Katkı eşitlikleri homojen, izotropik bir ortamdaki alan miktarları arasındaki ilişkileri tanımlamaktadır. Bu eşitlikler (3.43), (3.44), (3.45) EM alanındaki uygulamalarda elektronun, atomun ve moleküler tepkinin nasıl tanımlandığını gözle görülebilir şekilde sağlamaktadır.

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (3.43)$$

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (3.44)$$

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} \quad (3.45)$$

3.3.7.2 Zaman ortamında EM dalga denklemleri

Zaman ortamında elektrik alan ve manyetik alan denklemlerini bulmak için Maxwell eşitlikleri ile katkı eşitliklerini beraber kullanmak gerekmektedir. Çalışmamızda \vec{E} ve \vec{H} bileşenleri için dalga denklemleri elde edilmiştir.

a) Elektrik alan dalga denklemi

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (3.46)$$

Denklem (3.46)'ya sırasıyla aşağıda verildiği gibi (3.43)-(3.45) denklemleri yerleştirilerek elektrik alan dalga denklemi elde edilir.

$$\vec{\nabla}_x \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \xrightarrow{\vec{B}=\mu\vec{H}} \vec{\nabla}_x \vec{E} = -\left(\frac{\partial \mu \vec{H}}{\partial t}\right) \xrightarrow{\mu=sbt} \vec{\nabla}_x \vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \quad (3.47)$$

Bu denklemde her iki tarafın rotasyoneli alınırsa ;

$$\begin{aligned} \vec{\nabla}_x \vec{\nabla}_x \vec{E} &= -\mu \left(\frac{\partial (\vec{\nabla}_x \vec{H})}{\partial t} \right) \xrightarrow{\vec{\nabla}_x \vec{H} = \vec{J} + \left(\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right)} \vec{\nabla}_x \vec{\nabla}_x \vec{E} \\ &= -\mu \left(\frac{\partial \left(\vec{J} + \left(\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) \right)}{\partial t} \right) \xrightarrow{\vec{J} = \sigma \vec{E}, \vec{D} = \epsilon \vec{E}} \end{aligned} \quad (3.48)$$

$$\begin{aligned} \vec{\nabla}_x \vec{\nabla}_x \vec{E} &= -\mu \left(\frac{\partial \left(\sigma \vec{E} + \left(\frac{\partial \epsilon \vec{E}}{\partial t} \right) \right)}{\partial t} \right) \xrightarrow{\sigma \text{ v } \epsilon \text{ sbt}} \vec{\nabla}_x \vec{\nabla}_x \vec{E} \\ &= -\mu \sigma \left(\frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right) - \mu \epsilon \left(\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \right) \end{aligned} \quad (3.49)$$

ve

$$\vec{\nabla}_x \vec{\nabla}_x A = \nabla(\nabla A - \nabla^2 A) \quad (3.50)$$

Denklem (3.50) özelliği kullanılarak , zaman ortamındaki elektrik alan dalga denklemi aşağıdaki gibi elde edilir (Sadiku 1992).

$$\nabla^2 \vec{E} = \mu \sigma \left(\frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right) + \mu \epsilon \left(\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \right) \quad (3.51)$$

b) Manyetik alan dalga denklemi

$$\vec{\nabla}_x \vec{H} = \vec{J} + \left(\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) \quad (3.52)$$

Eşitlik(3.46) için yapılanlar Eşitlik (3.52) de belirtilen manyetik alan eşitliği için de yapılır. Buna göre;

$$\begin{aligned} \vec{\nabla}_x \vec{H} = \vec{J} + \left(\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) &\xrightarrow{j=\sigma \vec{E}, \vec{D}=\epsilon \vec{E}} \vec{\nabla}_x \vec{H} = \sigma \vec{E} + \left(\frac{\partial \epsilon \vec{E}}{\partial t} \right) \xrightarrow{\epsilon=sbt} = \vec{\nabla}_x \vec{H} \\ &= \sigma \vec{E} + \epsilon \left(\frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right) \end{aligned} \quad (3.53)$$

Bu denklemde her iki tarafın rotasyoneli alınırsa ;

$$\begin{aligned} \vec{\nabla}_x \vec{\nabla}_x \vec{H} = \sigma \left(\frac{\partial (\mu \vec{H})}{\partial t} \right) + \epsilon \left(\frac{\partial \left(\frac{-\partial (\mu \vec{H})}{\partial t} \right)}{\partial t} \right) &\xrightarrow{\mu sbt} \vec{\nabla}_x \vec{\nabla}_x \vec{H} \\ &= \sigma \mu \left(\frac{-\partial \vec{H}}{\partial t} \right) + \left(\frac{\partial \epsilon}{\partial t} \right) \left(-\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \right) \end{aligned} \quad (3.54)$$

$$\Delta_x \Delta_x \vec{H} = \sigma \mu \left(\frac{-\partial \vec{H}}{\partial t} \right) + \left(\frac{\partial \epsilon \mu}{\partial t} \right) \left(-\frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \right) \quad (3.55)$$

Eşitlik (3.50) özelliği kullanıldığında , zaman domeninde manyetik alan dalga denklemi aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\nabla^2 \vec{H} = \mu \sigma \left(\frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \right) + \mu \epsilon \left(\frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} \right) \quad (3.56)$$

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

$$\nabla^2 \vec{E} = \mu \epsilon \left(\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \right) \quad (3.57)$$

Ve manyetik alan dalga denklemi;

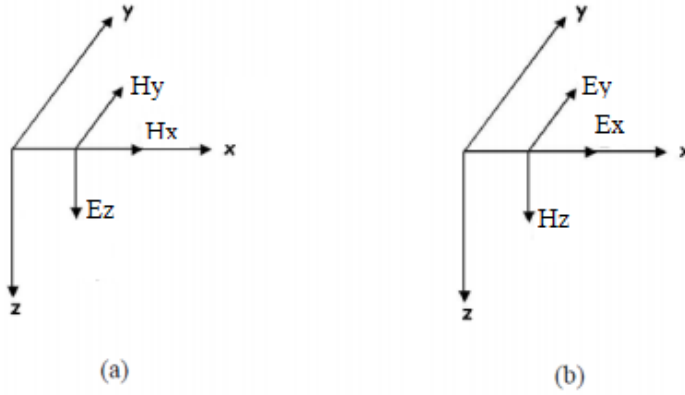
$$\nabla^2 \vec{H} = \mu\epsilon \left(\frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} \right) \quad (3.58)$$

olarak yazılır.

Bu denklemler yüksek frekanslarda, yaklaşık olarak 100 kHz' ten büyük değerler için kullanılan denklemlerdir. Yer radarı yönteminde kullanılan denklemler de bu denklemlerdir.

c) TE (Enine Elektrik Alan) ve TM (Enine Manyetik Alan) Modları İçin Elektrik ve Manyetik Alan Denklemleri

Elektromanyetik dalga yayılım doğrultusuna göre TE ve TM modları olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Düzlemsel tabaka sınırlarında birbirinden bağımsız iki farklı elektromanyetik alan vardır. Elektrik alan vektörü tabaka düzleminde olduğu zaman TE modu, manyetik alan vektörü tabaka düzleminde olduğu zaman ise TM modu söz konusudur (Balkaya 2010). TM modunda birbirine dik iki manyetik alan bileşeni ve bu manyetik alan bileşenlerine dik bir elektrik alan bileşeni, TE modunda ise birbirine dik iki elektrik alan bileşeni ve bu elektrik alan bileşenlerine dik bir manyetik alan bileşeni söz konusudur.



Şekil 3.13. a) TM modu ; b) TE Modu için EM alan bileşenleri

➤ TM modu için alan denklemleri

TM modunda x ve y yönünde zamanla değişen manyetik alan ve manyetik alana bağımlı olarak meydana gelen elektrik alan vardır (Şekil 3.13a). x ve y yönündeki elektrik alan ve z yönündeki manyetik alan bileşenleri sıfır kabul edilir. Bu duruma göre;

$$H_x \neq H_y \neq E_z \neq 0 \quad \text{ve} \quad H_z = E_x = E_y = 0 \quad (3.59)$$

olarak ifade edilir. Bu durumda TM modu için elektrik alan denklemleri ;

$$\frac{\partial E_z}{\partial x} = \mu \frac{\partial H_y}{\partial t} \quad (3.60)$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial y} = -\mu \frac{\partial H_x}{\partial t} \quad (3.61)$$

ve manyetik alan denklemleri (3.62) de görüldüğü gibi yazılır;

$$\sigma E_z + \varepsilon \frac{\partial E_z}{\partial t} = \frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} \quad (3.62)$$

➤ TE modu için alan denklemleri

TE modunda x ve y yönünde, zamanla değişen elektrik alan ve elektrik alana bağlı olarak meydana gelen bir manyetika alan vardır (Şekil 3.13b). x ve y yönündeki manyetik alan ve z yönündeki elektrik alan bileşenleri sıfır kabul edilir. Bu duruma göre;

$$E_x \neq E_y \neq H_z \neq 0 \quad \text{ve} \quad E_z = H_x = H_y = 0 \quad (3.63)$$

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

$$\frac{\partial H_z}{\partial x} = -\varepsilon \frac{\partial E_y}{\partial t} - \sigma E_y \quad (3.64)$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial y} = \varepsilon \frac{\partial E_x}{\partial t} + \sigma E_x \quad (3.65)$$

$$\mu \frac{\partial H_z}{\partial t} = \mu \frac{\partial E_x}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial x} \quad (3.66)$$

olarak yazılır.

3.3.8. Yer radarı sinyallerinin oluşturulması ve yayını

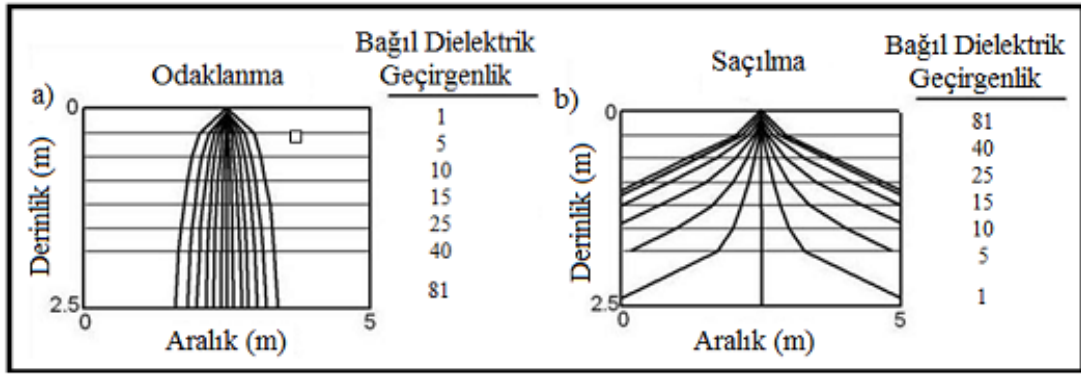
YGR sistemlerinde bant genişliği iki oktav olan nikelle kaplı alüminyum metal çubuk şeklinde dipol antenler tercih edilir. Bunun anlamı antende üretilen frekansların merkez frekansın yarısı ile iki katı arasında çeşitlilik göstermesidir. Bunu örneklendirmek istersek; 500 MHz merkez frekansı olan anten 250 – 1000 MHz frekans aralığında değişim gösteren sinyaller meydana getirir (Conyers ve Goodman 1997). Nikelle kaplı alüminyum olan bu dipol antenlerin çapları birkaç milimetreden 200 mm 'ye kadar değişebilmektedir. Antenlerin uzunluğu çıkan darbenin genişliğine bağlı olarak farklılık gösterir. Örneğin darbe genişliği 8-12 ns aralığında iken anten 0.9-1.2m; darbe genişliği 1-2ns aralığında iken anten boyu 0.15-0.4 m aralığında olur. Eğer darbe genişliği arttırılmak isteniyorsa daha uzun anten kullanılmalıdır. Yer görüntüleme radarları tek dalga oluşturmazlar. Aksine, 2-50 s aralığında değişkenlik gösteren , aynı şekle ve aynı sürüye sahip, belirli aralıklarda ilerleyen darbeler dizisi oluştururlar.

Belirli aralıklarda ilerleyen bu darbeler dizisinin art arda gelen iki darbenin arasındaki aralığın tersine, tekrarlanma frekansı denir. Tekrarlanma frekansı genellikle 200-500 kHz arasında değişiklik gösterir. Tek bir darbeden söz ettiğimizde ise süresi yaklaşık 1-100ns arasında değişiklik gösterir.

Yer radarı sistemleri yeraltına yayınan ışınları gönderirken bu ışınlar elips şeklinde koni biçimindedir. Gönderilen yayını doğrusal bir hat şeklinde değildir (Annan ve Davis1989). Elips şeklindeki iletim konisi antenin uzun eksenine paralel doğrultuda veya ilerleme doğrultusunda uzanır. YGR çalışmalarında Fresnel bölgesi olarak adlandırılan bu koni radar sinyalinin yansıdığı alan olarak ifade edilir. Yatay çözünürlük olarak da isimlendirilebilir. Fresnel bölgesinin boyutu, ışınım örüntüsü dalga boyu ve derinlik tarafından belirlenir.

Radar dalgaları ara yüzeylerde farklı açılarla kırılabilir, bunun nedeni yer altının dielektrik özelliğindeki değişimlerdir. Farklı açılardaki bu kırılmalar, yansıyan radar dalgalarını da etkilemektedir.

EM radar işareti yeraltındaki katmanlarda derine doğru gittikçe bağıl dielektrik geçirgenlik katsayısının artışı ile karşılaştığında arayüzeylerde dar açıyla kırılır (Şekil 3.14a). Buna bağlı olarak konik radar işareti yer içine daha fazla odaklanır (Goodman 1994). Radar dalgaları daha yüksek bağıl dielektrik geçirgenlik ortamlarına hareket ettikçe odaklanma etkisi de giderek artar.



Şekil 3.14. Derinlikle bağıl dielektrik geçirgenlik katsayıları **a)** odaklanma; **b)** saçılma yeraltı modeli için dalga kırılma etkileri

Derinlikte ilerledikçe meydana gelen kırılmalar ile buna bağlı olarak oluşan odaklanma miktarı Snell yasası ile açıklanmaktadır. Bir radar dalgasının ara yüzeye geliş açısı ve hızı iki ortam arasında meydana gelen yansıma ya da kırılma miktarını belirler. Derinliğin artmasıyla birlikte bağıl dielektrik geçirgenlik katsayılarındaki artış, radar dalgalarının ilerleme hızının azalmasına ve geliş açısının küçülmesine neden olur. Bu sonucunda da iletim konisinde daha fazla odaklanma olur.

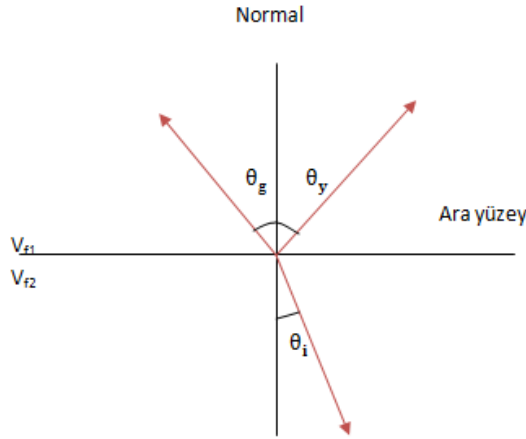
Eğer iletim konisi her ara yüzeyde daha geniş açıda kırılarak, genişliyor ve saçılıyorsa; radar dalgaları yer altında artan derinlikte ilerlerken, yer altının bağıl dielektrik değeri git gide azalıyor demektir (Şekil 3.14b).

Yeraltında bulunan katmanların bağıl dielektrik geçirgenlik değerleri, her katmanda artış gösteriyorsa, radar ışınları odaklanma eğilimi içinde olurlar. Bundan dolayı, yüksek bağıl dielektrik geçirgenliğe sahip alanlarda araştırma yapılacaksa, arandılan tüm yer altı katmanlarının belirlenmesi için radar profilleri birbirine yaklaştırılmalıdır.

3.3.9. Yer radarı sinyallerinin ara yüzeylerde yansıması, kırılması ve iletimi

Elektromanyetik dalgalar bir ortamda hareket ederken başka bir ortamın ara yüzeyine geldiğinde bu dalganın bir kısmı yansır, bir kısmı da ikinci ortama geçiş yapar. Arayüzeyden birinci ortama gelme açısına eşit açıyla geri dönen dalgaya yansıyan dalga denir. İkinci ortamdaki yayılan elektromanyetik enerjinin doğrultusunda değişim olur. EM enerjinin doğrultusunu değiştirerek başka bir ortam içerisinde ilerlemesine kırılma denir. Bir EM dalganın bu yansıma ve kırılma hareketleri Snell Yasası ile açıklanır. Snell yasası EM dalgaların genliği hakkında bilgi içermez, tamamiyle sinyalin bulunduğu ortam içerisindeki hızı ve yansıma- kırılma açılarıyla ilgilidir (Şekil 3.15). Eşitlik (3.67) bağıntısı ile ifade edilir.

$$\frac{\sin\theta_g}{\vartheta_{f1}} = \frac{\sin\theta_i}{\vartheta_{f2}} \quad (3.67)$$



θ_g : Gelme açısı

θ_y : Yansıma açısı

θ_i : İletim açısı

ϑ_f : Faz hızı

$$\vartheta_f = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

Şekil 3.15. Ara katmana gelen elektromanyetik dalganın sınıra çarptıktan sonraki iletilen ve yansıyan kısımları

Radar dalgaları hava içinde ışık hızına çok yakın bir değerde yayılır. Bundan dolayı YGR sistemlerinde yeryüzünde bulunan alıcıya ilk ulaşan dalga hava dalgasıdır. Hava dalgasının alıcıya ulaşmaya kadar geçen süre kolayca hesaplanabilir. Alıcıya ikinci ulaşan dalga ise yer dalgasının kendisidir. Daha sonra kaydedilen dalgalar ise yeraltındaki ara yüzeylerden gelen yansımalarıdır. Bu yansımalar, ara katmalardan yansıyan dalgaların derinlik sırasına göre alıcıya ulaşır. Yani en üst tabakada olan katmandan elde edilen yansıma, en alt tabakada bulunan katmandan elde edilen yansıma göre daha kızılı kaydedilir.

Radar dalgalarının alıcı antene ulaşma zamanları ve dönüş genlikleri, radar dalgalarının yayılım hızlarına ve soğrulma oranına(α) bağlıdır. EM dalgaların herhangi bir arayüzdeki genlik değişimi yansıma ve iletim katsayıları ile açıklanabilmektedir. EM radar enerjisi bir ortamdan başka bir ortama verici anten vasıtası ile transfer edilir. Transfer edilen sinyal bulunduğu ortamdan farklı yayılım hızına sahip veya farklı bağlı dielektrik özelliğe sahip bir ortamla karşılaşmaya dek aynı doğrultuda ilerler. Sinyal bu iki ortamın sınırına ulaştığında, bir kısmı geliş açısı ile eşit açı ile geri yansır, sinyalin diğer bir kısmı ise ortamda kırılarak ilerlemeye devam eder. Sınırı geçen iletilen enerji başka bir arayüzle karşılaştığında tekrar kırılarak ilerlemeye devam edebilir. Her arayüzde meydana gelen bu kırılmalar dalganın genliğini düşürür.

Yansıma katsayısı, farklı ortamlara ait iki ortamın bağlı dielektrik katsayısı farkı ile doğru orantılıdır. Yer altında bulunan ortamların bağlı dielektrik katsayıları birbirine çok yakın veya azar azar bir değişim söz konusu ise yansıma özelliğinde çok küçük ve çok zayıf yansımalar olacaktır. Tam tesli durumda, ortamlar arasındaki bağlı dielektrik zıtlığı artması, oluşacak yansımaların genliğinin büyümesine sebep olacaktır.

Yukarıda bahsedildiği üzere, herhangi bir EM dalganın genliği hakkındaki bilgi yansıma ve iletim sabitleri ile açıklanır ve ortamın bağlı dielektrik katsayıları ile doğrudan etkileşim içerisindedir. Ayrıca yansıyan dalga genliğinin gelen dalga genliğine oranı, bize yansıma katsayısını verir. İletilen dalga genliğinin gelen dalga genliğine oranı ise bize iletim katsayısını verir. Yansıma ve iletim katsayıları, her iki ortamın dielektrik sabiti katsayıları kullanılarak da hesaplanabilir (Wilchek 2000).

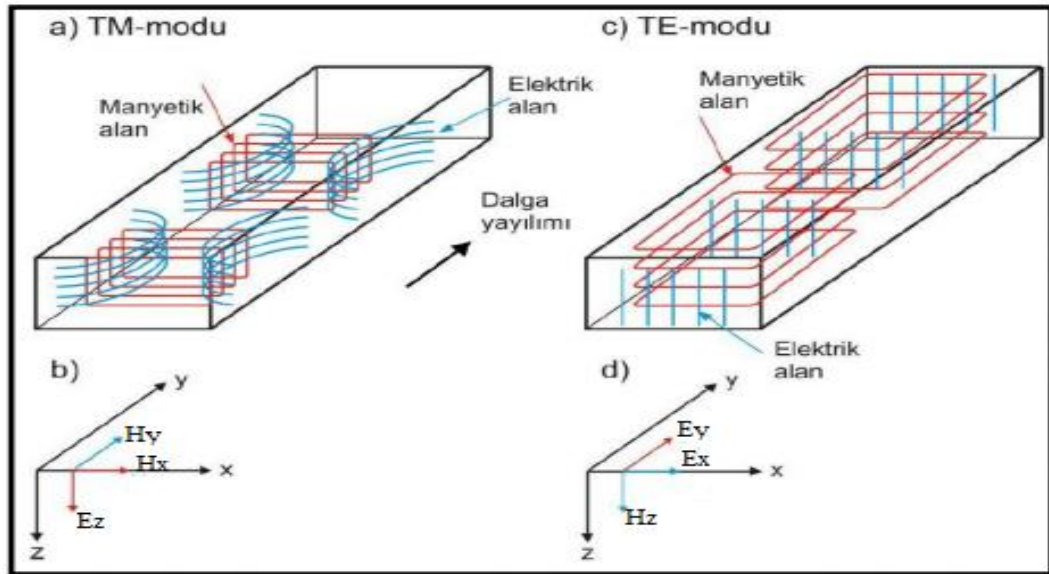
İki tabakalı bir ortam ele alındığında birinci ortamın bağıl dielektrik sabiti ϵ_{r1} , ikinci ortamın bağıl dielektrik sabiti ise ϵ_{r2} olsun. Yansıma ve iletim katsayıları bu iki ortamın bağıl dielektrik katsayıları cinsinden Eşitlik (3.68) ve (3.69) bağıntıları ile ifade edilir.

$$\Gamma = \frac{\sqrt{\epsilon_{r1}} - \sqrt{\epsilon_{r2}}}{\sqrt{\epsilon_{r1}} + \sqrt{\epsilon_{r2}}} \quad (3.68)$$

$$T = \frac{2\sqrt{\epsilon_{r2}}}{\sqrt{\epsilon_{r1}} + \sqrt{\epsilon_{r2}}} \quad (3.69)$$

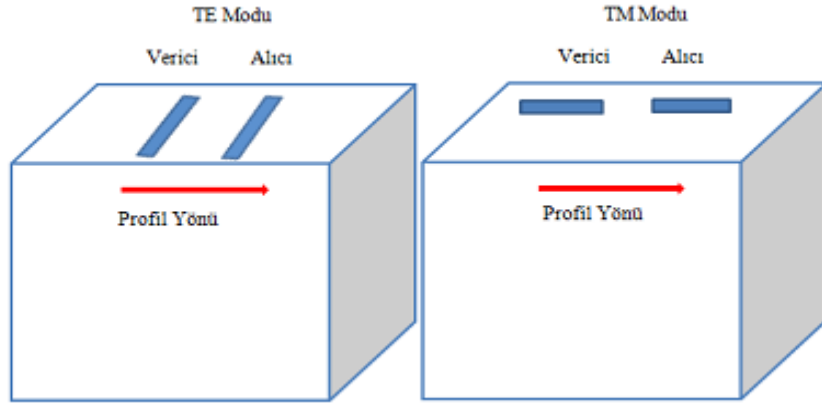
EM dalgalar düzlemsel bir yapı içerisinde yayılırken bu yapı sınırlarına uygun yönelimlerde hareket eden iki ayrı mod içerir. Bu modlar enine manyetik alan (TM) ve enine elektrik alan (TE) olarak tanımlanır. TM modunun H_x ve H_y manyetik alan bileşenleri x ve y yönünde ilerlerken, TE modunun E_x ve E_y elektrik alan bileşenleri x ve y yönünde hareket eder.

TM modunda manyetik alanın z yönünde hiçbir bileşeni yoktur ve manyetik alan z yönüne dik bir doğrultuda yayılım gösterir (Şekil 3.16a). Elektrik alan bileşenleri de her yönde bulunabilir, TE modunda ise elektrik alan z yönüne diktir ve elektrik alan bileşenleri de her yöne dağılım göstermektedir (Şekil 3.16c).



Şekil 3.16. a) TM Modu; b) Alan Bileşenleri; c) TE Modu; d) Alan Bileşenleri

EM dalgaların bu iki moda incelenmesinin nedeni alıcı ve verici antenin geometrik yapısından kaynaklıdır. Antenin yönü profilin doğrultusuna dik durumdaysa TE modu, profil doğrultusuna paralel durumdaysa TM modu olarak değerlendirilir (Şekil 3.17).



Şekil 3.17. Anten yönlerine bağlı olarak TE ve TM modları (Van der Kruk vd. 2006)

Elektromanyetik alan TE ve TM bileşenlerine ayrıldığında yansıma ve kırılma katsayıları TE modu için;

$$\Gamma_{TE} = \frac{E_r}{E_i} = \frac{Z_2 \cos \theta_i - Z_1 \cos \theta_t}{Z_2 \cos \theta_i + Z_1 \cos \theta_t} \quad (3.70)$$

$$\tau_{TE} = \frac{E_t}{E_i} = \frac{2Z_2 \cos \theta_i}{Z_2 \cos \theta_i + Z_1 \cos \theta_t} \quad (3.71)$$

$$1 + \tau = \Gamma \quad (3.72)$$

TM modu için;

$$\Gamma_{TM} = \frac{E_r}{E_i} = \frac{Z_2 \cos \theta_t - Z_1 \cos \theta_i}{Z_2 \cos \theta_t + Z_1 \cos \theta_i} \quad (3.73)$$

$$\tau_{TM} = \frac{E_t}{E_i} = \frac{2Z_2 \cos \theta_i}{Z_2 \cos \theta_i + Z_1 \cos \theta_t} \quad (3.74)$$

$$1 + \tau = \Gamma \frac{\cos \theta_t}{\cos \theta_i} \quad (3.75)$$

olarak verilir (Balanis 1989). Burada i 'inci tabaka için elektromanyetik empedansları ifade etmektedir. Bu duruma göre yansıma katsayılarının değeri negatif veya pozitif olabilir. Burada enerjinin korunumu sağlanmıyormuş gibi görünse de aslında enerji korunur (Sadiku 1992).

3.3.10. Yer radarı sinyali ölçümü

Yer radarı sistemleri kavramsal olarak basittir. Alıcı ve verici anten, kayıt ünitesi, gösterim ünitesi ve kontrol ünitesinden oluşur. Verici anten yayılan EM dalganın frekansını ve şeklini belirlerken, alıcı anten yeri içinden yansıtılarak ya da saçılarak geri dönen EM daga enerjisini toplar. Kontrol ünitesi, üretilen (transfer edilen) ve geri gelen (yansıyan dalgaları) kontrol eder. Buradaki amaç zamana bağlı olarak yansıtılarak gelen sinyalin genliğindeki değişimi ölçmektir. Alıcı antenin topladığı yansıma sinyallerini de kayıt ünitesi kayda alır. Gösterim ünitesi ise zamanla elde edilen sinyalin kayıt ekranında görüntülenmesini sağlar.

Yer görüntüleme sistemleri kavramsal olarak basit olmasına karşın, sisteminin kullanımı oldukça önemli ve dikkat gerektirir. Sistem yanlış ve dikkatsiz kullanıldığı takdirde elde edilen radargramlar karmaşık bir hal almaktadır. Örneğin; sistem açıldığında belirli bir süre beklenmesi gerekir, beklenmediği takdirde elde edilen radargramlarda hava dalgaları oluşmaktadır. Antenlerin düzgün taşınması, antenin yeryüzünden olan yükseklik etkisi de önemlidir. Gerçek arazi durumlarında, yüzey pürüzlülüğü ve antenlerin yüzey üstünde taşınması gerekliliği yakın yer bağlantısını sınırlandırabilir. Anten yüksekliği anten yönelimini değiştirmektedir. Yüksek taşındığında sinyal daha çok havaya doğru verilir ve anten etkinliği azalır. Ayrıca yerden olan yakın yansımalar anten üzerinde zaman gecikmeli tekrarlılar oluşturur. Yer radar sinyalleri üzerinde anten yönelimi de oldukça önemlidir. Teoride ve pratikte yapılan tüm çalışmalar, radar enerjisinin anten dipolüne dik bir şekilde yayındığında en yüksek değeri aldığını göstermiştir. Bu durum gösteriyor ki bir yer radarı çalışması yapılacağı zaman, uzanımı bilinen yada tahmin edilebilen yapılara dik doğrultuda yapılması gerekir (Leckeubush 2003).

3.3.11. İşaret hızı ve derinlik belirlenmesi

Araştırma yapılan yapılardaki derinlik hesaplarının yapılabilmesi açısından en önemli faktör, yeraltında ilerleyen radar dalgalarının hızının tam olarak belirlenmesidir. Hız belirlendiği takdirde radagram üzerinde derinlik eksenini belirlenebilir. Örneklerin çoğunda görülen, radar yazılımlarıyla radagram için bir derinlik skalası oluşmasıdır. Eğer derinlikle veya hat boyunca hız değişiminin ani olduğu yerler varsa, buralarda farklı birimler için elle derinlik skalası oluşturulabilir.

Elektromanyetik enerji havanın içerisinde veya boşlukta ışık hızı ile ilerler. Işık hızında yayılan enerji havanın içerisindeyken bir kısmı kırılarak yer içerisinde 0.01-0.16 m/ns arasında değişiklik gösteren hızlar ile ilerler. Bu ortamlarda yayılan radar dalgalarının hızlarını en çok etkileyen dielektrik katsayısı ve elektrik iletkenliğidir (Moorman 2001). Radar dalgalarının yayılım hızları Eşitlik (3.76) ve (3.77) kullanılarak elde edilir.

$$\vartheta_f = \frac{c}{\left(\epsilon' (\sqrt{1 + \tan^2 \delta} + 1)\right) / 2} \quad (3.76)$$

$$\vartheta_f = \frac{c}{(\sqrt{\epsilon_r})} \text{ (m/ns)} \quad (3.77)$$

Eşitliklerdeki c ; ışık hızı, ϵ' ; ortalama bağıl dielektrik katsayısı, ϵ_r bağıl dielektrik geçirgenlik, $\tan\delta$ ise kayıp tanjantını göstermektedir.

Farklı ortamlarda bulunan radar sinyalinin yayılım hızları Çizelge 3.2'de sunulmaktadır. Suda bulunan EM dalgalarının yayılım hızı sabit kabul edilerek, görsel ortamlardaki çalışmalarda suyun derinliği tabloda sunulmakta olan fiziksel parametreler yardımıyla hesaplanabilmektedir. Fakat yeraltında bulunan tortul tabakalar gibi farklı gözenek yapıları ve su içeren ortamların yayılım hızlarında çeşitlilik oldukça fazladır ve bu ortamlarda kalınlık ölçülmek istenildiğinde hızın belirlenmesi en önemli faktör olarak karşımıza çıkmaktadır. Sondaj yapılma imkanı var ise, yayılım hızı direkt arazideki derinlik ölçümleri ile hesaplanabilir. Sondaj yapılma imkanı yok ise hız değeri gelen varışlar ile yatay ara yüzeylerde meydana gelen yansımaların kullanılmakta olduğu ortak derinlik noktası (ODN) adı verilen ölçüm tekniği veya sabit ofsetli ölçümlerde ortaya çıkan radagramlarda nokta kaynakların yansımalarının analizi sayesinde belirlenebilir. Güçlü ve basit yansımali ortamlar olarak belirlenen ortamlardaki üst tabakaların hızlarının belirlenmesinde ikinci ve üçüncü yöntemler diğer yöntemlere göre daha uygundur (Moorman 2001).

Radagramdaki yatay ara yüzey veya nokta kaynak yansıtıcı bağlantı, sabit ofsetli radagramlardan yapılan hız hesaplama çalışmalarında uygulanır. Bu durumda seyahat zamanı Eşitlik (3.78) bağıntısı ile yazılabilir.

$$t^2 = \frac{x^2}{\vartheta_f^2} + t_0^2 \quad (3.78)$$

Burada x ifadesi ile hız çalışmasındaki antenler arasındaki mesafeyi, ϑ_f ifadesi ile yayılım hızını ve t_0 ofsetteki tek yönlü seyahat süresini göstermektedir. Hızı hesaplamak için Eşitlik (3.78) tekrar düzenlendiğinde;

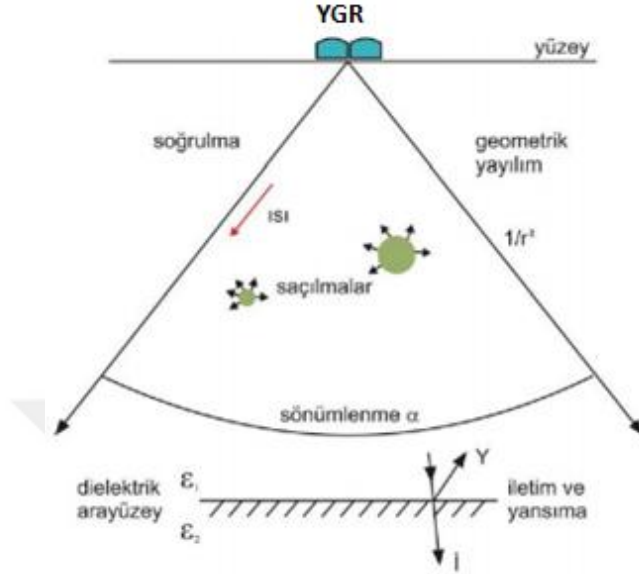
$$\vartheta_f = \frac{x^2}{\sqrt{t^2 - t_0^2}} \quad (3.79)$$

Bağıntısı elde edilir. Hız hesaplamalarındaki en önemli nokta, radar dalgasının gidiş-dönüş süresi, derinlik değerleri ve bu derinliğe kadar olan tabakaların tamamının hızına bağlı olmasıdır. Bu durumdan dolayı radagramlardaki yansımalar yorumlanırken bu husus muhakkak göz ardı edilmemelidir.

3.3.12. Sinyalin sönümlenmesi

Herhangi bir kaynaktan üretilen EM dalga, katmanlı bir ortamda, bir arayüzey ile karşılatıldığında dalganın bir kısmı bu iki ortamın sınırından yansırken, bir kısmında diğer ortamda ilerlemeye devam eder. İletilen dalganın ilerleyişi sırasında EM radar enerjisinde derinliğin artması ile genliğinde düşüşler meydana gelir. Eğer dalganın ilerlediği ortamda, sinyalin, dalga boyuna eşit büyüklükte cisimlerle karşılaştığında bu cisimlerden yada malzemelerden dolayı rastgele saçılan enerji meydana gelecektir. Ayrıca EM sinyalin enerjisinin bir kısmı ilerlediği ortamda ısı enerjine dönüşerek

zamanla kaybolur. Şekil 3.18’de görüldüğü üzere radar sinyalleri 90° lik bir açı ile konik bir şekilde ilerlerken birim alanda $1/r^2$ oranında kayba uğrarlar.



Şekil 3.18. Sinyalin Sönümlenmesi

Bu tür enerji kayıplarının temel nedeni aslında sönümlenme olayıdır. Sönümlenme, Reynolds (1977) tarafından EM enerjinin ilerlediği ortamın elektrik iletkenliğinin ve dielektrik özelliğinin karmaşık bir fonksiyonu olarak tanımlanmıştır. Sönümlenme, EM enerjinin bulunmuş olduğu malzeme içerisinde soğurulması olarak da ifade edilebilir. Soğrulma faktörü (α) EM sinyalin ilerlediği ortamın dielektrik, manyetik ve elektrik özelliklerinden doğrudan etkilenmektedir. Leckebush (2003), kaynaktan yayılan EM enerjinin derinde bulunan ortamlara doğru ilerledikçe sönümlendiğini ve EM dalganın genliğinin çok kısa bir sürede düştüğünü belirtmiştir. Ayrıca, EM dalgaların genliğindeki bu düşüş dalgaların yayılım uzaklığı ile ters orantılı olarak azaldığını açıklamıştır. Aslında, soğrulma ortamın iletkenliğinin bir etkisidir (Leckebush 2003). Herhangi bir x mesafesindeki soğrulma faktörünü (α) hesaplayabilmek için ortamın dielektrik katsayısının ve elektrik iletkenlik değerlerinin bilinmesi gerekmektedir. Soğrulma faktörü (α) ile dielektrik katsayısı ve elektrik iletkenlikleri arasındaki bağıntı Eşitlik (3.80) ile açıklanmıştır.

$$e^{-\alpha x}, \quad \alpha = 1,69 \frac{\sigma}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (3.80)$$

Moorman (2001)’e göre sönümlenme katsayısı (α) ile ilgili benzer bir bağıntı, Eşitlik (3.81) ile verilmiştir.

$$\tan^2 \delta = \sigma_{DC} (\omega \epsilon' \epsilon_0)^{-1} \quad \text{ve} \quad c = 2,998 \times 10^8 \text{ m/s} \quad \text{ise}$$

$$\alpha = \omega c^{-1} \{[\epsilon'((1 + \tan^2 \delta)^{0.5} + 1)]/2\}^{0.5} \quad (3.81)$$

Dielektrik özelliği ve elektrik iletkenliği etkin olan bir ortamda ise sönümlenme katsayısı (α), Eşitlik (3.82) ve (3.83) 'deki bağıntı ile ifade edilmiştir (Moorman 2001). Farklı ortamların sönümlenme oranları Çizelge 3.2'de gösterilmiştir.

$$\alpha \approx \sqrt{(60\pi\sigma_{DC}) / (\epsilon')} \quad (\text{m}^{-1}) \quad (3.82)$$

$$\alpha \approx \sqrt{\frac{1.64\delta}{\epsilon'}} \quad (\text{dBm}^{-1}) \quad (3.83)$$

Örneğin toprak içerisinde EM radar enerjisinin sönümlenme kayıpları, topraktaki su miktarına ve bünyesindeki tuz türüne ve miktarına göre değişmektedir. Buna ek olarak toprağın en üst katmanında yer alan yüksek miktardaki karbonat da sinyalin yüksek oranda soğurulmasına sebep olabilir.

Genellikle düşük dielektrik geçirgenlik değerine ve elektrik iletkenlik değerine sahip ortamlarda elektromanyetik enerjinin yayınımlı daha fazla olur. Örnek verilecek olursa suya doygun ve yüksek kil içeriğine sahip ortamlar, yüksek elektrik iletkenliklerine sahip olduklarından sinyalin yayınımlı engellenir. Radar enerjisi bu tür ortamlara rastladığı anda derinliğinde etkisiyle çok hızlı bir şekilde sönümlenmeler meydana gelir ve maksimum tarama derinliği, kullanılan antenin frekansından bağımsız olarak bir metreyi geçmez.

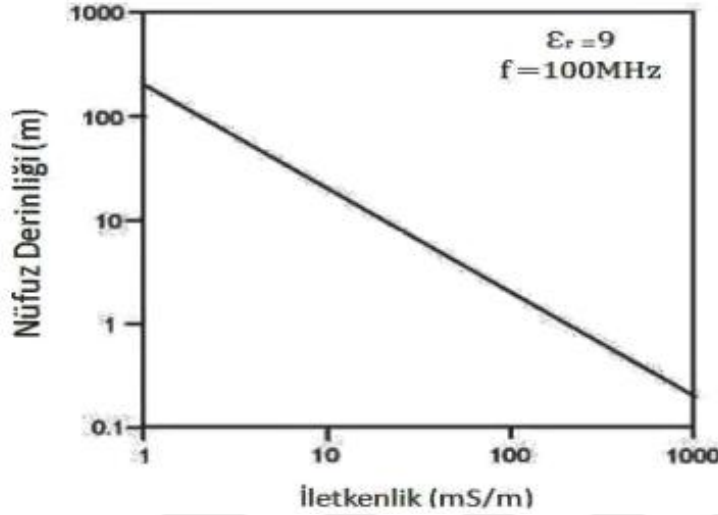
YGR sinyalinin aralığının tespit edilebilmesi için EM dalganın bulunduğu tabakaların fiziksel özellikleri, araştırılması istenen katmanların kalınlıkları, uzunlukları, eğimi gibi bir çok parametrenin tasarıma dahil edilmesi gerekmektedir. Reynolds (1997) 'e göre herhangi bir uzaklıktaki toplam kayıp, hava ve yer ortamının arasındaki iletim kayıpları, anten ve geometrik yayınımlı kayıpları, soğrulma ve saçılmalardan oluşmaktadır.

3.3.13. Nüfuz derinliği

Bir EM radar sinyalinin soğrulma oranını (α), kullanılan antenin merkez frekansını, yer radarının görüntüleyebilme yeteneğini ve ilerleyen radar dalgalarının nüfuz derinliğini araştırma yapılmak istenen ortamlardaki ara yüzlerin sayısı ve bu ara yüzler arasındaki dielektrik zıtlık etkilemektedir.

Radar dalgaları ara yüzeylere ulaştığında, dalgaların bazıları yüzeye dönmekteyken, geri dönmeyen kısım ise daha derinlerdeki katman veya katmanların içerisine doğru ilerlemesine devam edebilir. Ara yüzeyler sayıca artış gösterdikçe, derinlere doğru yayınımlı devam eden enerjide azalma olduğu gözlemlenir. Karmaşık yansımaların oluşumunda çoğunlukla çökel tabakalardaki bölgesel dielektrik farklılıkları etkilidir. İlgilenilen yansımalar bu karmaşık yapı nedeniyle gerçek görünümü baskılayabilir, bu durumda da araştırma derinliği düşebilir (Moorman 2001).

Elektromanyetik enerjinin yayılım gösterdiği ortamın elektrik iletkenliğinin yükselmesi sonucu sönümlenmeler meydana gelir ve nüfuz derinliği düşer. Yani, EM radar sinyalinin yayılım gösterdiği ortamın iletkenliği, sinyalin nüfuz edeceği derinliği doğrudan etkiler. Nüfuz derinliği ile elektrik iletkenlik arasındaki ilişki Şekil 3.19’da gösterilmiştir. Şekilden anlaşıldığı gibi, ortamın iletkenliğinin yükselmesi radar dalgalarının nüfuz derinliğini hızlıca azaltmaktadır.



Şekil 3.19. Ortamın elektrik iletkenliği ile nüfuz derinliği arasındaki ilişki (Moorman 2001)

Ayrıca nüfuz derinliğini etkileyen diğer önemli faktör ise kullanılan antenin frekansıdır. Düşük merkez – frekanslı antenler yüksek merkez-frekanslı antenlere oranla daha uzun dalga boylu sinyaller üretmektedir. Bu sayede iletkenlik kayıpları ve ortamdaki küçük boyutlu yapıların sebep olduğu saçılmanın azalmasından dolayı, daha az sönümlenme gerçekleşir. Bunun sonucunda radar dalgaları daha derin kısımlarına kadar ulaşabilirler (Şekil 3.19). Fakat düşük frekanslı dalga boylarının kullanımının doğurduğu en büyük dezavantaj, yeraltında bulunan küçük cisimlerin net olarak belirlenememesi ve ince tabaka kalınlıklarının da net bir şekilde ölçülememesidir. Bu durum da yeraltının çözünürlüğünün azalmasına sebep olur (Conyers ve Goodman 1997).

Eğer d derinlik çözünürlüğü olarak alınırsa uygun frekans Eşitlik (3.84) ile bulunur.

$$f = 150 / \frac{d}{\sqrt{\epsilon}} \text{ MHz} \quad (3.84)$$

Bu ifadede nüfuz derinliği, çözünürlüğü istenen derinliğin 1/4 'ü i olarak alınır. Genelde çözünürlük ve nüfuz derinliği koşulları karmaşaya neden olduğundan uygulamalarda en çok bu husus göz önünde bulundurulmalıdır. Ayrıca çözünürlük iz aralığından etkilenmektedir. Sabit aralıklı profillerde iki iz arası uzaklık (Dx), dalga boyu ile kıyaslandığında dalga boyunun dörtte birinden fazla ise teorik olarak hedefler tespit edilemez. Bu koşul tahminen Eşitlik (3.85) ile verilebilir.

$$D_x = 75 / \frac{f}{\sqrt{\epsilon}} \quad (\text{m}) \quad (3.85)$$

Başka bir yaklaşım ile iki işlemde de D_x in en fazla alabileceği değer, araştırma derinliğinin 1/8'i ya da bu değerden daha düşük olması gerekmektedir. Anten dizilimleri sıklıkla yan yana kullanılmasının yanı sıra uç uca konularak kullanıldığı da görülmektedir. Derinliğe bağlı olarak ampirik bağıntı ise Eşitlik (3.86) ile ifade edilir.

$$D_{\text{anten}} = \frac{(2d)}{\sqrt{\epsilon - 1}} \quad (\text{m}) \quad (3.86)$$

Örnekleme frekansının seçerken örnekleme kuramına dikkat edilmelidir. Yer radarlarındaki en yüksek frekans değeri, merkez frekansının 3/2 katı olduğundan örnekleme aralığı merkez frekansın en az 3 katı değerinde olmalıdır. İki katsayının beraberce kullanılması tutarlı ölçümler elde edilebilmesi için önem arzeder.

3.3.14. Yapı belirlenebilirliği ve çözünürlük

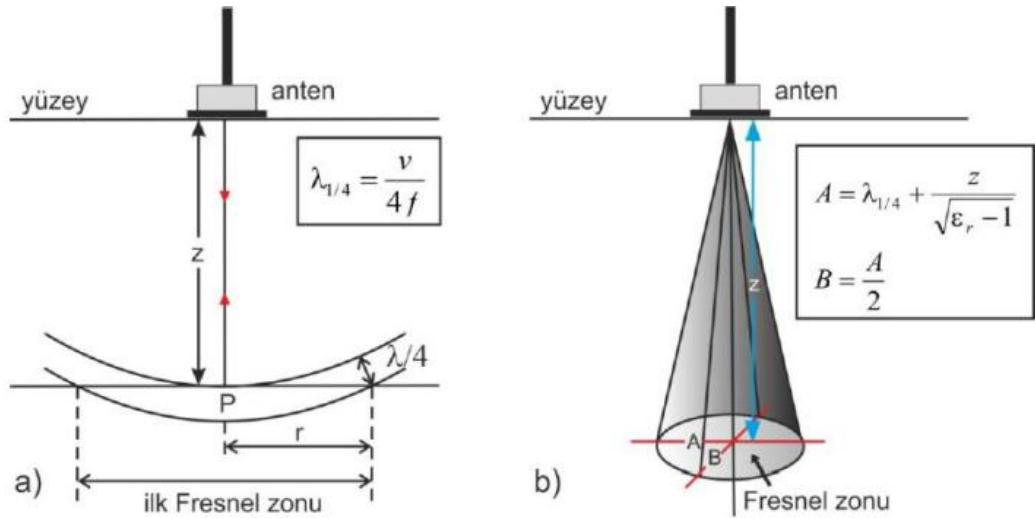
YGR sisteminin frekansı ve ortamın yayılım hızı sayesinde araştırılacak herhangi bir tabakanın kalınlığının ya da her hangi bir derinlikteki cismin doğru bir biçimde tespit edilebilmesi açısından çok önemlidir. Yüksek çözünürlük elde edebilmek için yüksek frekanslı antenler kullanılır. Bu antenler daha kısa dalga boylarında sinyaller ürettiklerinden santimetre mertebesindeki küçük nesnelere belirlenebilmesine olanak sağlar. Ayrıca EM radar sinyalinin ilerlediği ortamın fiziksel özellikleri bu ortam içerisindeki hızlarını doğrudan etkiler. Bu yüzden herhangi bir ortamın hız bilgisinin bilinmesi, yer altında bulunan cisimlerin derinliklerinin ve boyutlarının doğru bir biçimde tespit edilmesini sağlar.

3.3.15. Düşey ve yanal ayrımlılık

Zaman ortamında, birbirine komşu iki sinyal arasındaki farklılıkların bir ölçülmesine düşey ayrımlılık denir (Reynolds 1997). Başka bir ifadeyle frekansın (f) bir fonksiyonu olarak da tanımlanabilir. Dalga boyu (λ) ile kontrol edilir.

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (3.87)$$

Frekans ile doğru orantılı olup frekans değeri düştükçe, düşey ayrımlılıkta düşer, frekans değeri arttıkça düşey ayrımlılıkta artar. Yer radarlarında her bir anten belirli bir frekans aralığında çalışmaktadır. Düşey ayrımlılık teorik olarak dalga boyunun 1/4'üne ($\lambda/4$) karşılık gelir. Dolayısı ile tabaka kalınlıklarının veya araştırılan cisimlerin, dalga boyunun 1/4'ünden küçük olması halinde bu tabakaların ve cisimlerin radargram üzerinde tespit edilmesi zorlaşır. Toprak ve anakaya için 3 farklı frekansda hesaplanmış düşey ayrımlılık değerleri Çizelge 3.3'de verilmiştir. Şekil 3.20.b'de A ve B sırasıyla Frensel zonunun çapını z ise derinliği göstermektedir.

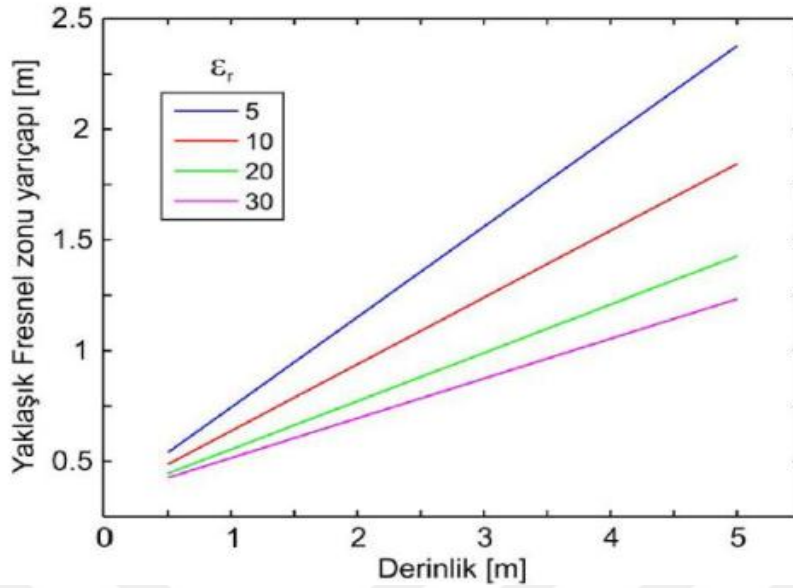


Şekil 3.20. a) Arayüzeyden yansımaya; b) Fresnel zonu (Conyers ve Goodman 1997; Reynolds 1977)

Çizelge 3.3. Ana kaya ($v = 0.11$ m/ns) ve toprak ($v = 0,075$ m/ns) için üç farklı frekans değerinde hesaplanan düşey ayrımlılık değerleri (Reynolds 1997)

Malzeme		Anten frekansı (MHz)		
		120	500	900
Anakaya	Dalga boyu (cm)	92	22	12
	Düşey ayrımlıklık (cm)	23	5,5	3
Toprak	Dalga boyu (cm)	62,5	15	8
	Düşey ayrımlıklık (cm)	15,6	3,75	2

Yanal ayrımlılık ise Fresnel zonunun (Şekil 3.20.a) genişliğine, bu genişlik ise yansıtıcının derinliğine ve dalga boyuna bağlıdır (Neal 2004). Genellikle, Şekil (3.20)'den görüldüğü üzere derinlik arttıkça, Fresnel zonu yanal yönde giderek genişlemektedir. Bunun sonucunda, aynı yönde ayrımlılık azalmakta ve birbirine yakın cisimlerin ayrımı güçleşmektedir (Reynolds 1997). Şekil 3.21'de bağıl dielektrik geçirgenlik katsayıları sırası ile 5, 10, 20 ve 30 olan bir ortam için hesaplanan Fresnel zonu değerlerinin derinlik ile değişimi gösterilmiştir. Burada 100 MHz merkez frekansa sahip bir anten kullanılmıştır.



Şekil 3.21. Bağlı dielektrik geçirgenlik ve derinlik ile Fresnel zonunun yarıçapının değişimi (Conyers ve Goodman 1997)

Şekil 3.21'e göre bağlı dielektrik katsayısındaki artış zonun küçülmesine, derinliğin artması ise aksine zonun büyümesine neden olmaktadır.

3.3.16. Yakın-alan etkisi

Yere yakın bir YGR sisteminde üretilen elektromanyetik radar işareti anten çevresinde sahip olduğu frekansın 1.5λ genişliktedir (Balanis 1989). Bir anten yere yakın ise, yer iletken gibi modelleneceğinden simetrik sanal bir antenin var olduğu kabul edilir. Adeta bir anten dizisi oluşacağından gerçek anten ile simetrik sanal eşleniği arasında kalan bölgede anlamlı veriler elde edilemez. Bu olay yakın alan etkileşimi olarak tanımlanır.

3.3.17. Radar anten frekansının seçimi

YGR çalışmalarında derinliğin ve ilgilenilen yapıların çözünürlüğünün belirlenebilmesi için ilk olarak uygun anten frekansının seçiminin yapılması gerekmektedir (Smith ve Jol 1995). Sistemin çözünürlüğünü etkileyen en önemli faktör dalga boyudur. Anten frekansının değerinin düşmesi bir başka ifade ile dalga boyundaki artış, gerekli araştırma derinliğinin artmasına ve yer altı çözünürlüğünün azalmasına sebep olur.

Antenin merkez frekansı (f), yeraltında ilerleyen sinyalin baskın dalga boyunun (λ) belirlenmesi açısından önemlidir. Fakat bu katmanların etkisiyle geri yansıyan sinyalin merkez frekansı ile birbirine karıştırılmamalıdır. Yeraltındaki yayılım frekansı, sinyalin yayıldığı ortamın özelliklerine, yayılım hızına ve yayılan enerji miktarına göre değişiklik gösterir. Genellikle yeraltında kullanılacak olan bu frekans değerinin belirlenmesi zordur (Leckebush 2003).

Yeraltı çözünürlüğü ile nüfuz derinliği arasında karşılıklı olarak bir etkileşim bulunmaktadır. Çizelge 3.5'te farklı frekansa sahip antenler için farklı bağlı dielektrik

sabiti değerindeki ortamların dalga boyları gösterilmiştir. Yeraltındaki nem miktarı, katmanlar arasındaki hava boşluğu, katmanların bileşim özellikleri nüfuz derinliğini ve yeraltı çözünürlüğünü doğrudan etkilemektedir. Bu yüzden Çizelge 3.4'te verilen değerler genel bir değerlendirme amacıyla verilmiştir (Conyers ve Goodman 1997).

Kullanılacak anten frekansının, tespit edilmek istenen yapıları belirleyip belirlemedikleri değişik bağıntılar kullanılarak incelenebilir. Ancak temel olarak, tespit edilmek istenen katmanın ya da cismin kesit alanı hedef derinliğindeki Fresnel bölgesinde olmalıdır. Herhangi bir ortamın bağıl dielektrik sabiti biliniyorsa istenen derinlikteki Fresnel bölgesi hesaplanabilir.

Çizelge 3.4. Farklı bağıl dielektrik sabitine sahip ortamlarda anten frekanslarına göre radar dalga boylarının değişimi (Conyers ve Goodman 1997)

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

Araştırılan yapı yada tabaka, Fresnel bölgesinden çok küçük ise yer altındaki hedeften alıcı antene yansıyan enerjinin çok küçük bir kısmı iletilir. Böylece yeraltındaki hedeften kaynaklanan yansımalar ortamda bulunan diğer yansımalarla karışarak radargram kayıtlarında fark edilmemesine ve görünmemesine sebep olacaktır. Böyle küçük hedeflerin yansımalarının radargram kayıtlarında tespit edilebilmesi için genlik kuvvetlendirme gibi veri işleme aşamalarından sonra ortaya net olarak çıkartılabilmektedir.

Yeraltında tespit edilmek istenen yapılar maden ocaklarının tabanları ya da farklı tabakalardan oluşan düzlemsel yüzeylerin olabileceği gibi yer altına gömülü su ve kanizasyon boruları, elektrik kabloları, tüneller ve yer altı boşlukları gibi çok küçük hedefler de olabilir (Conyers ve Goodman 1997). Düzlemsel yapılar, ortam şartlarının neden olduğu kısıtlamalar dışında, gömülü olduğu derinlik, düzlemsel yapı kalınlığı ve yönelimine göre seçilebilecek bir frekans değerine sahip anten aracılığı ile görüntü sağlanır. Noktasal hedeflerin daha küçük yüzeylere sahip olması nedeni ile bu yüzeylerden yansıyan radar enerjisi daha az olup bu tür yapıların düşük frekanslı antenlerle belirleyebilmek zordur. Ancak düzlemsel yansıtıcılarda bu durum tam tersi

olup düşük frekanslarda bile hedef tespiti yapılabilir. Bundan dolayı düşük çözünürlüğe sahip hedefler, kendini çevreleyen ortamlardan ayırt edilemezler. Bu tür yapıların tespiti, yer altında çok derinde olmadığı sürece, yüksek frekanslı antenlerin kullanılması ile yapılır (Conyers ve Goodman 1997).

Yeraltında iki farklı paralel ortamdan oluşan yansımaları ayırt etmek için bu arayüzler arasındaki mesafenin, radar enerjisinin en az bir dalga boyu mesafesinde olması gerekmektedir (Davis ve Annan 1989). Bu iki tabaka birbirine bir dalga boyundan daha az uzaklıkta ise her iki yüzeyden oluşan yansımalar nedeni ya fark edilmeyecekler ya da yok olacaklardır. Eğer birbirine paralel bu iki düzlem arasında bir dalga boyundan fazla mesafe bulunuyorsa bu iki ara yüzeyden iki ayrı yansıma tespit edilir ve aranan hedef rahatlıkla tespit edilebilir. Sadece bir tabakadan oluşan yüzey görüntülenmek isteniyorsa ve bu arayüz ortamda bulunan diğer hedeflerle karıştırılmayacak şekilde bir yansıma sebep oluyorsa, ortam içerisindeki dalga boyu ne olursa olsun o yüzey doğru bir biçimde tespit edilebilir. Fakat bu arayüz dalgalı ve düzensiz bir yapıda ise yeraltının doğru bir şekilde görüntülenebilmesi için yüksek yeraltı çözünürlüğü gerekmektedir.

Standart bir radar profili düşünüldüğünde gömülü bir ara yüzeyden elde edilen yansımalar sonucunda yüksek frekanslı antenlerin görüntüsü düşük frekanslı antenlerin görüntüsüne oranla daha keskindir. Bu, düşük frekanslı antenin frenal bölgesinin, yüksek frekanslı anteninkine göre daha geniş olmasından dolayıdır.

10 ile 120 MHz arasındaki antenler belirli şartlar altında 50 metreye kadar ulaşabilen uzun dalga boyu üretebilirler. Ancak bu antenler sadece büyük yeraltı özelliklerini görüntüleyebilme özelliğine sahiptir. Yüksek frekanslı antenlerde ise maksimum nüfuz derinliği çeşitli ortamlarda bir kaç metreyi geçemez. Ayrıca ürettikleri yansımalar bir kaç cm derinlikte bulunan hedeflerden elde edilir.

Yüksek frekanslı sinyaller yeraltında yayılırken düşük frekanslı sinyallere göre daha fazla sönümlenirler. Engheta vd. (1982)'ne göre sinyalin bant genişliğinin azalmasının ve spektrumun daha düşük frekansa doğru kaymasının nedeni budur.

Çalışılacak anten frekansı seçilirken ortamın elektrik ve manyetik özellikleri, seçilen antenin çalışma alanındaki kullanılabilirliği, araştırma derinliği, istenen çözünürlük ve ortamdaki gürültü içeriği dikkat edilmesi gereken hususların başında gelmektedir. Tasarımdan önce muhakkak planlanması gerekmektedir. Çözünürlük, araştırma derinliği ve yukarıda bahsedilen zorluklardan dolayı çalışma yapılacak frekans değerinin önceden planlanması başarı yüzdesini arttıracaktır. Kullanılacak antenin düşük frekans bandında olması, araştırma derinliğinin artması demektir. Düşük frekanslı antenler daha büyük boyutlarda oldukları gibi ağırdırlar. Düşük frekanslı antenler yüksek frekanslı antenlerle kıyaslandığında, ebatları ve ağırlıklarından dolayı çalışma alanına taşınması daha zordur. Ayrıca birçok alanda düşük frekanslı antenlerle çalışırken sistemi hareket ettirebilmek için kızaklı ve tekerlekli aksamın montajı gerektiğinden bu antenlerle araştırma yapmak zorlaşmaktadır. Halbuki, yüksek frekanslı antenlerin boyutları oldukça küçük olduğundan hareket kabiliyeti ve taşınmaları çok kolaydır (Conyers ve Goodman 1997).

Tespit edilmesi planlanan hedefin boyutları ve bu hedefi çevreleyen ortamın fiziksel ve kimyasal özellikleri kullanılacak anten frekasının belirlenmesinde etkilidir.

Genellikle hedef yapı küçük, dağınık bir yüzeye sahipse ve ortamda bozucu bir etki bulunuyorsa, aranan yapının tespit edilebilmesi için iletilen EM dalga boyu, bozucu etkiye sahip olan yapının en yüksek değerdeki boyundan çok daha büyük olmalıdır. Ayrıca aranmakta olan küçük yüzeyli hedefler veya düzlemsel katmanlar küçük boyutlara sahip ise ve derinlerde gömülü şekildelerse tespit edilmesi mümkün değildir.

En uygun frekans değerini belirlemek için YGR tasarımı yapmadan önce ya da radar ölçümlerinde bulunmadan önce tespit edilmesi istenen hedefin geometrisi, hedefin yer aldığı ortamın fiziksel özellikleri ve tahmini hedef derinliği gibi parametreler kullanılarak bir modelleme yapmak gerekir.

Modellemede farklı katmanlardaki asfalt betonlarının en düşük kalınlığı 5cm olarak alınmıştır. Dolayısı ile 5cm'lik bir katmanı tespit edebilmek için cm düzeyinde bir dalga boyu elde edilmelidir. 1cm lik dalga boyu ile 5cm katman kalınlığının görüntülenmesini sağlayan çözünürlük 5 zaman adımında algoritmaya yük oluşturmadan rahatlıkla elde edilecektir. 1cm'lik dalga boyu 3GHz'de yakalanabildiğinden çalışma frekansı 3GHz olarak belirlenmiştir. Ayrıca modelleme boyutumuz 200x200 cm olduğunda radar işareti 2m'lik araştırma uzayı boyumca nüfuz edebilmektedir.

3.4. Yer Radarında Kullanılan Modelleme Tekniği

Yer radarı modellemesinin yapılmasının genel amacı; araştırma yapılan ortamda anomaliye neden olan kaynağın şeklini, büyüklüğünü, cinsini ve uzunluğunu doğru yorumlayabilmektir.

Gerçek arazi ölçümlerinden elde edilen radargramlar birçok tekrarlı yansıma ve gürültü içerir. Aynı zamanda araştırma yapılan alanda olası bir kaynak, yanlış ölçüm dizaynı, yanlış anten seçimi ve yetersiz ölçü aralığı nedeniyle elde edilen radargramlarda görünmeyebilir. Bu problemleri çözümlerin bir yolu da modelleme yapmaktır. Bu nedenle bilgisayar yardımıyla geometrisini ve ortam şartlarını kendimizin belirlediği modeller oluşturup, bu modellerin nasıl belirti verdiğini belirleriz. Elde edilen modellerle araziden alınan veriler karşılaştırılır. Radargramın yorumlanmasında da karşılaştırma sonuçlarından yararlanır. Böylelikle yorumlamada hem kolaylık, hem de doğruluk oranı artırılmaya çalışılır. Yorumlama yaparken karşılaşılan en önemli sorunlardan biri, elde edilen radargramların karmaşıklığı ve yapı-ortam özelliklerini her zaman doğru biçimde yansıtmamasıdır..

Radar modellemesiyle, gerçek yeraltı koşullarına yakın özellikte oluşturulan yapay modellerle radargramlarda ne tür belirtiler elde edileceğini öğrenmenin yanı sıra, aranan yapı ya da yapılarla onları çevreleyen ortam hakkında araziye çıkmadan önce gerekli olan ön bilgilerin elde edilmesine olanak sağlanır. Ayrıca farklı frekans değerleri için oluşturulan yapay modeller yardımıyla da, araştırmaya uygun anten frekansı seçilir (Conyers ve Goodman 1997; Goodman 1994).

Bilinen alan koşullarını daha iyi ortaya koyabilmenin bir diğer yolu olan modellemede; elde edilen arazi verileri ile oluşturulan yapay radargramlar kıyaslanarak, gerçek veriler ile yapay veriler arasında uygun bir eşleşme sağlanıncaya kadar modele ait parametreler değiştirilerek yinelemeli işlemler sonucunda en doğru model üretilir. Gerçek arazi verileriyle olan farkın en aza indirildiği bu çözüm tekniği jeofizikte ters

çözüm olarak bilinir. Bilindiği gibi düz-çözüm, ters-çözüm içerisinde kullanılan bir modellemedir ve ters-çözümün ilk çözüm aşamasıdır. Bu şekilde bir yaklaşım yeraltının daha güçlü bir şekilde yorumlanmasına imkan tanımaktadır (Conyers ve Goodman 1997).

Işın izleme algoritması, fourier yöntemi ve zaman domeninde sonlu farklar metodu yer radarı benzetiminde kullanılan tekniklerden bazılarıdır.

Bunlardan en çok kullanılan zaman ortamı sonlu farklar yöntemidir. Kullanılan sonlu farklar ağının hücre yapısı nedeniyle, yöntemde sadece basit yeraltı şekilleri değil daha karmaşık olan yeraltı yapıları da fazladan hesaplama süresi gerekmeden modellenenir. Ayrıca, yöntemin bir radar anteninin yakın-alan etkisinin içine giren varil, kablo, boru, patlamamış askeri malzemeler gibi gömülü hedeflerden oluşan saçılmaları modellemesi de diğer yöntemlere göre en önemli üstünlüğüdür. Zaman ortamı sonlu farklar yönteminin uygulanması radar antenin şekli (bu şekil yeraltına yayılan elektromanyetik dalgaların şekli ile ilgilidir) anten yüksekliği, yerin elektriksel özellikleri, yeraltında gömülü bulunan hedeflerin geometrisi gibi birçok önemli radar parametresinin doğrudan modelin içine dahil edilmesiyle gerçekleştirilir (Roberts ve Daniels 1997). Bilgisayara model ortamında bulunan yapıların fiziksel özellik ve geometrileri girilerek, çeşitli arayüzelerde karşılaşılan yansıma katsayıları, derinlikle ortaya çıkan sinyal sönümlenmesi, farklı birimlerdeki radar enerji hızları ve oluşacak yansımaların genlikleri hesaplanır (Goodman 1994). Hesaplanan yansımalar yeraltının basitleştirilmiş gösterimi olan dilimlerle ya da hacimsel olarak çizdirilebilir. Bu şekilde gösterilen yansımaların genliklerini vurgulamak için farklı renk paletleri kullanılabilir (Conyers ve Goodman 1997).

Yer radarı yöntemiyle modelleme yaparken dikkat edilmesi gereken unsurlar sırası ile;

➤ Yapılacak model çalışmasında seçilen anten frekansı ile Δx (iz aralığı), Δt (zaman aralığı), T_{max} (en yüksek zaman değeri) ve model geometrisinin derinliği arasında uyum olmasına dikkat edilmelidir. Eğer dikkat edilmez ise programda hata oluşur veya çıkan yapay radagramda model geometrisi tam olarak belirlenemez. Örneklendirmek gerekir ise; anten frekansını 500 MHz seçip, model geometrisini de 50 m derinliğe koyarsak elde edilen yapay radagramda istenilen anomali görüntülenemez. Eğer Δx aralığını modelin büyüklüğünden fazla veya yeteri kadar küçük seçmezsek model geometrisi net bir şekilde görüntülenemez. Derinde bir model oluşturup yüksek frekans seçildiğinde de yine aynı sonuçlarla karşılaşılır model çalışmasında seçilen anten frekansı ile Δx (iz aralığı), Δt (zaman aralığı), T_{max} (en yüksek zaman değeri) ve model geometrisinin derinliği arasında uyum olmasına dikkat edilmelidir. Eğer dikkat edilmez ise programda hata oluşur veya çıkan yapay radagramda model geometrisi tam olarak belirlenemez.

➤ Yer radar modellemede dikkat edilmesi gereken diğer bir husus ise yutucu sınır koşullarıdır (YSK). Gerçekte sınırsız bir ortamda ölçüm alınırken, modelleme yaparken belirli sınırlar içerisinde modelleme yapılmaktadır. Bu durumda da sınırlar bir yansıtıcı kaynak gibi davranıp bu sınırlardan yansımalar neden olmaktadır. Dikkat edilmediği takdirde yanlış yorumlamaya neden olur. Bu durumu düzeltmek için YSK' nin rolü sınıra çarpan herhangi bir dalgayı ortadan kaldırmak ve ortamı sınırsız bir model haline getirmektir.

➤ Dikkat edilmesi gereken diğer bir husus ise σ, μ, ϵ değerlerinin doğru seçimidir. İletken bir ortamda EM dalga sönümünden dolayı modelin içerisinde bulunduğu ortamın iletkenliği düşük seçilmelidir. Aksi takdirde EM dalga sönümlenir ve model geometrisi elde edilen radargramlarda görüntülenemez. Aynı zamanda yapı - ortam arasındaki empedans farkı ne kadar fazla ise model yapı radargramlarda daha net görüntülenir.

3.5. Zaman Domeninde Sonlu Farklar (ZDSF) Yöntemi

Zaman ortamındaki sonlu farklar yöntemi ingilizcede “finite difference time domain” (FDTD) kelimelerinin kısaltılmış halidir. Teknolojinin gelişmesi ile birlikte yer radarı modelleme çalışmaları da günden güne artarak hız kazanmıştır. 2B ZDSF ile YGR modelleme Yee (1966), Wang ve Tripp (1996), Bourgeois ve Smith (1996) ve Irving (2006) gibi araştırmacılar tarafından incelenmiştir. Yöntem, uzun yıllardır bilinmesine rağmen Maxwell denklemlerinin zaman ortamında yazılması ile Kano Yee tarafından 1966 yılında ilk kez dile getirilmiştir.

ZDSF Yönteminin temel özellikleri:

- Her türlü 2 ve 3 boyutlu nesnelerin benzetimini gerçekleştirir.
- Farklı iletkenlikteki cisim ya da ortamların etkilerini araştırabilir.
- Kayıplı dielektrik malzemelerin, manyetik, izotropik olmayan ve kompleks ortam ve nesnelerin benzetimi için frekans bağımlı temel parametreleri içerir.
- Anten tasarımı ve anten parametreleri, saçılmış EM dalgalar, radar kesit hesabı, yüzeylerde oluşan alanlar, akımlar güç yoğunlukları, yeraltındaki hedeflerin tespiti ve farklı dielektrik özellikteki yapılarda elektromanyetik dalga hesabı yapılabilir.

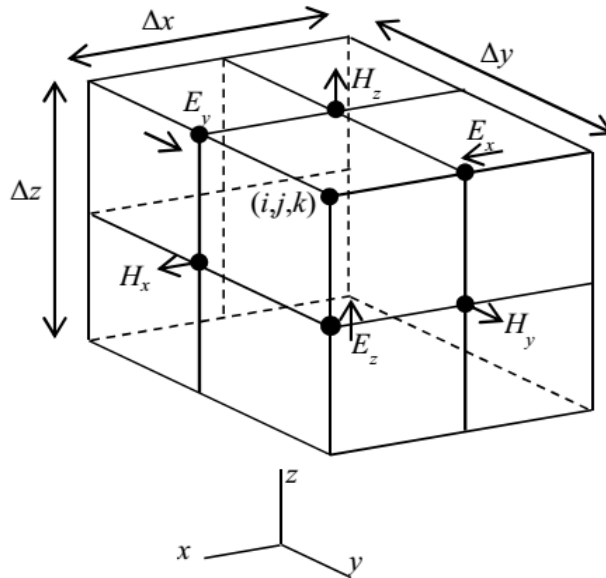
ZDSF yöntemi, Maxwell denklemlerinin diferansiyel yaklaşımlarının, zamanda ve konumda ayrıklaştırılması ve iteratif olarak çözümlenmesine dayanır. Bu yöntem Yee (1966) tarafından, elektromanyetik dalga denklemlerinin zaman domaininde yazılması ve sonlu farklar yönteminin kullanılmasıyla elde edilmiştir. Sonlu farklar ağı, modellemede kullanılan iki boyutlu geometrinin antende kullanılan merkez frekansın büyüklüğüne bağlı olarak, dalga boyundan daha küçük ebatlardaki kübik hücrelere bölünmesi ile hesaplanabilir (Gürel ve Oğuz 2000). Yöntemde, üç boyutlu (3B) ve iki boyutlu (2B) modelleme yapmak mümkündür. Üç boyutlu modellemede, EM alanının x,y,z yönlerindeki bileşenleri ayrı ayrı hesaplanarak altı adet denklem elde edilirken, iki boyutlu modellemede yalnızca iki yönde bileşenler hesaplanarak üç adet denklem elde edilir. Ayrıca iki boyutlu modellemede, hesaplanacak bileşenlerin seçimi kullanılacak olan moda göre farklılıklar gösterecektir. Bu durumdan dolayı mod seçimi önemli olup enine elektrik alan (TE) ya da enine manyetik alan (TM) modu tercih edilebilir. Irving ve Knight (2006)'a göre TM modu özellikle yüzeydeki YGR çalışmalarında, TE modu ise kuyru yer radarlarında kullanıldığı belirtilmiştir.

Özellikle 3B ZDSF'de Yee hücrelerinin her birinde t anında, (i, j, k) ile belirlenen konumlarda üç elektrik alan ve üç manyetik alan bileşeni hesaplanır. Şekil 3.22'deki, sonlu farklar ağındaki herhangi bir alan noktası Eşitlik(3.88) ile ifade edilir.

$$(\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}) = (i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z) \quad (3.88)$$

Eşitlik 3.88’ te $\Delta x, \Delta y$ ve Δz sırası ile x, y, z yönündeki sonlu farklar ağı alan artışları; i, j, k ise iteratif hesaplamada kullanılan tam sayılardır.

Ayrıklaştırma işlemi, Maxwell denklemlerinin bilgisayar ortamında çözülmesi ve modellenmesi için mutlaka uygulanması gereken adımdır. Yee (1966)’ nin savına göre 3B problemlerin ayrıklaştırılması birim hücre kullanılarak yapılır. Buna göre Taylor serisine merkezi sonlu farklar açılımı uygulanır.



Şekil 3.22. EM alan bileşenlerinin Yee hesaplama ağı üzerindeki konumları

Benzetimi yapılacak olan bölgenin boyutları sınırlı olmalıdır. Hesaplamalar ayrık denklemler aracılığıyla yapıldığı için benzetim ortamının sınırları belirlenmediği takdirde konum ve zaman ekseninde hesaplamalar adım adım gerçekleştirilerek sonsuza dek sürecek ve benzetimi yapmaya çalışan bilgisayar kararsız hale girecektir. Ayrıca, belirlenen bölgenin sınırlarındaki hesaplamalarda elde edilen sonuçlar, sanki gelen elektromanyetik dalga sınırlardan yansıyor geri dönmüş gibi değerler oluşturur. Benzetimi yapılan ortam için gerçekte böyle bir durum söz konusu değildir. Benzetim esnasında oluşan bu yapay yansımalar ZDSF algoritmasının hesaplama mantığından kaynaklanan bir sorundur ve bu sorunun giderilebilmesi yutucu sınır koşulu (YSK) kullanımı ile mümkün olabilir.

3.5.1. ZDSF yöntemi için Maxwell denklemleri ve Yee algoritması

ZDSF algoritmasında kullanılabilmesi için Maxwell denklemleri fark denklemlerine dönüştürülmelidir. Bu dönüşüm bir, iki ve üç boyutlu benzetimler için ayrı ayrı gerçekleştirilir.

Yee (1966)'e göre Maxwell'in zamanla değişen rotasyonel denklemleri için enerji kaybınının ($\rho = 0$ ve $\sigma = 0$) söz konusu olmadığı durumlarda, bir sonlu farklar denklem dizisi oluşturulur. Böyle bir ortam için Maxwell denklemleri şu şekilde yazılabilir.

$$\frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = -\frac{1}{\mu} \vec{\nabla}_x \vec{E} \quad (3.89)$$

$$\frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = \frac{1}{\epsilon} \vec{\nabla}_x \vec{H} \quad (3.90)$$

ZDSF yönteminde (3.89) ve (3.90)'de verilen elektrik alan ve manyetik alan denklemleri ayrıştırılarak her adımda çözmek için Yee tarafından önerilen Şekil 3.30'daki birim hücre kullanılarak üç boyutlu alan bileşenleri yazılır.

1966'da Kane Yee ve ($\rho = 0$) ve ($\sigma = 0$) olan kayıpsız malzemelerde zamana bağlı Maxwell'in dönel denklemleri için bir sonlu fark denklemleri oluşturmuştur. Yee'nin geliştirdiği algoritma bir dalga eşitliğiyle elektrik alanın ve manyetik alanın tek başına çözümünden ziyade, Maxwell'in dönel denklemleri kullanılarak zaman ve konuma bağlı şekilde elektrik ve manyetik alanın her ikisini de çözecek şekildedir ve bilgisinin her ikisinin de kullanılarak çözüm yapılması, çözümü daha kuvvetli kılmaktadır. Elektrik ve manyetik alanın her ikisinin de mevcut veya elde edilebilir olduğu durumda, kenar ve köşelere yakın teğetsel manyetik alan özellikleri, ince tellerin yakınındaki manyetik alan özellikleri, kenarlarda ve ince teller yakınındaki elektriksel alan değerleri gibi herhangi bir alan bilgisi tek başına modellenilebilir. Sonuç olarak Yee algoritması, eşzamanlı olarak, Maxwell denklemlerinin integral ve diferansiyel formlarının simülasyonunu sağlar.

Maxwell denklemleri ile ilgi bir çok sonlu farklar savı olmasına karşın Yee'nin savı kararlılığını ve tutarlılığını koruyarak günümüze kadar ulaşmış ve etkin olarak kullanılmaktadır.

Yee'nin izlencesindeki algoritma ile bir dalga denklemi sayesinde elektrik alan ve manyetik alan çözümlerinin yanı sıra Maxwell denklemleri kullanılarak zamanda ve konumda elektrik alan ve manyetik alan tamamen birbirine bağlı olarak çözebilmektedir. Bu yöntem daha karalı bir yöntem olup her bir elektrik alan bileşeni, dört manyetik alan bileşenine, her bir manyetik alan bileşeni ise dört elektrik alan bileşenine çevrilerek bulunmuştur. Bu algoritmada model, işlemlerde de kolaylık sağlaması açısından eşit büyüklükteki çok sayıda hücreye bölünmüştür. Şekil 3.22'de elektrik alan ve manyetik alan bileşenlerinin bu hücreler üzerindeki konumları görülmektedir.

Kayıplı ve kaynak olmayan bir ortam düşünülduğünde eşdeğer manyetik akım yoğunluğu \vec{J}_M

$$\vec{J}_M = \rho \vec{H} \quad (3.91)$$

Şeklinde ifade edilir. Burada ρ manyetik kayıpları temsil eden bir sayıdır. Elektriksel kayıpların hesabını yapabilmek için de eş değer elektrik akım yoğunluğu \vec{J} ifadesi

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (3.92)$$

Şeklinde ifade edilir. σ , elektriksel iletkenliktir. Böyle ortamlarda ise Maxwell denklemleri 3.93 – 3.96’de verilen bağıntılardan oluşmaktadır.

$$\nabla \times \vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} - \rho \vec{H} \quad (3.93)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} - \sigma \vec{E} \quad (3.94)$$

$$\nabla \times (\epsilon \vec{E}) = 0 \quad (3.95)$$

$$\nabla \times (\mu \vec{H}) = 0 \quad (3.96)$$

Burada ρ_v hacimsel yük yoğunluğunu ifade etmektedir. Modellememizi de kayıplı ortam içerisinde olduğunu düşünerek tasarlanacaktır. Bu doğrultuda üç boyutlu benzetimler için Maxwell denklemleri kayıplı ve kayıpsız ortamlar için ayrı ayrı ayrıştırılacaktır.

3.5.2. Üç boyutlu benzetimler için Maxwell denklemleri

Zaman ortamında EM Dalga denklemlerin çözümünde vektörel çarpım için (3.97) eşitliği kullanılır.

$$\vec{\nabla}_x \vec{A} = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ A_x & A_y & A_z \end{vmatrix} = \vec{i} \cdot \left(\frac{\partial A_z}{\partial y} - \frac{\partial A_y}{\partial z} \right) + \vec{j} \cdot \left(\frac{\partial A_x}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \vec{k} \cdot \left(\frac{\partial A_y}{\partial x} - \frac{\partial A_x}{\partial y} \right) \quad (3.97)$$

$$\frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = -\frac{1}{\mu} \cdot \vec{\nabla}_x \vec{E} = -\frac{1}{\mu} \left[\vec{i} \cdot \left(\frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z} \right) + \vec{j} \cdot \left(\frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x} \right) + \vec{k} \cdot \left(\frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} \right) \right] \quad (3.98)$$

$$\frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \cdot \vec{\nabla}_x \vec{H} = \frac{1}{\varepsilon} \left[\vec{i} \cdot \left(\frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} \right) + \vec{j} \cdot \left(\frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} \right) + \vec{k} \cdot \left(\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} \right) \right] \quad (3.99)$$

elde edilir. Burada elektrik ve manyetik alanın üçer bileşeni bulunmaktadır. Bunlar;

$$\frac{\partial H_x}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial E_y}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial y} \right) \quad (3.100)$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial E_z}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial z} \right) \quad (3.101)$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial E_x}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial x} \right) \quad (3.102)$$

$$\frac{\partial E_x}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} \right) \quad (3.103)$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} \right) \quad (3.104)$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} \right) \quad (3.105)$$

Eşitlikleri yazılır.

Sonuç olarak 3 yöne (x,y,z) ait elektrik alan ve manyetik alan denklemleri yazılır. Bu denklem bileşenlerinden yararlanarak 1B ve 2B da elektrik alan ve manyetik alan bileşenleride yazılabilir. Burada anlaşılması gereken şudur ki; uzayın her hangi bir konumunda ve herhangi bir anında zamanla değişen bir elektrik alan varsa manyetik alan da vardır, manyetik alan varsa elektrik alanda vardır. Yani, bu iki alan birbirine bağlı olup zaman ortamında bir biri cinsinden ifade edilebilir. Bu bağlılık ortamın manyetik geçirgenliği ve dielektrik geçirgenliği ile yakından ilgilidir. Kayıplı ortamlar için 3.100 -3.105 denklemleri tekrar yazılır ise;

$$\frac{\partial H_x}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial E_y}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial y} - \rho H_x \right) \quad (3.106)$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial E_z}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial z} - \rho H_y \right) \quad (3.107)$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial E_x}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial x} - \rho H_z \right) \quad (3.108)$$

$$\frac{\partial E_x}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} - \sigma E_x \right) \quad (3.109)$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} - \sigma E_y \right) \quad (3.110)$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} - \sigma E_z \right) \quad (3.111)$$

Denklemleri elde edilir. Tasarımımızı kayıplı ortamlarda gerçekleştireceğimizden bundan sonraki hesaplarımıza kayıplı Maxwell denklemleri üzerinden devam edeceğiz.

3.5.3. İki boyutlu benzetimler için Maxwell denklemleri

İki boyutlu benzetimlerde x, y ve z eksenlerinin birinde hesaplama yapılmayacağı için o yönde alan değerlerinde herhangi bir değişim olmadığı düşünülür. Benzetimin x-y düzleminde gerçekleştirileceği durum için, z eksenini üzerinde alan değişimleri söz konusu olmadığı için elektrik ve manyetik alan bileşenlerinin z'ye göre alınan kısmi türevleri sıfır olacaktır.

Benzetimin iki boyutlu olarak gerçekleştirildiği durum için Maxwell denklemlerinin iki boyuta indirgenmesi esnasında iki mod ortaya çıkacaktır. Bunlar enine elektrik (TE) ve enine manyetik (TM) modlarıdır. TM modunda benzetimin geometri eksenine (burada z eksenini) dik olan sadece manyetik alan bileşenleri söz konusu olabilir. z eksenini yönünde sadece elektrik alan bileşeni söz konusu olabilecek ve manyetik alan bileşeni bulunmayacaktır. TE modunda da z eksenine dik olarak sadece elektrik alan bileşenleri söz konusudur. z eksenini yönünde sadece manyetik alan bileşeni bulunup elektrik alan bileşeni bulunmayacaktır. Bu düzenlemeler sonrasında Denklem 3.106 ile 3.111'deki oluşturulan denklemlerin TM modu bağıntıları ;

$$\frac{\partial H_x}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left(-\frac{\partial E_z}{\partial y} - \rho H_x \right) \quad (3.112a)$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial E_z}{\partial x} - \rho H_y \right) \quad \text{İki Boyutlu TM Modu} \quad (3.112b)$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} - \sigma E_z \right) \quad (3.112c)$$

Formülleri ile ifade edilir. Aynı şekilde TE Modu bağıntılar

$$\frac{\partial E_x}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\partial H_z}{\partial y} - \sigma E_x \right) \quad (3.113a)$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left(-\frac{\partial H_z}{\partial x} - \sigma E_y \right) \quad \text{İki Boyutlu TE Modu} \quad (3.113b)$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial E_x}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial x} - \rho H_z \right) \quad (3.113c)$$

eşitlikleri ile ifade edilir.

TM ve TE modları izotropik yapılar için birbirine bağlı olmadan kullanılabilirler. Yani bu modlar bağımsız olarak oluşabilirler. TM ve TE modlarının ikisini de içeren problemlerde iki mod için ayrı ayrı elde edilen çözümler süperpozisyon yöntemi kullanılarak birleştirilir.

3.5.4. Bir boyutlu benzetimler için Maxwell denklemleri

Bir boyutlu benzetimlerde incelenecek olan eksenin dışındaki iki eksende elektrik ve manyetik alan bileşenlerinin değerlerinde hiçbir değişim olmadığı düşünülür.

Burada, y ve z eksenlerinde alan değerlerinde değişim olmadığı düşünülürse alan bileşenlerinin y ve z eksenine göre alınan kısmi türevleri sıfır olacaktır. Böylece benzetim, dalga yayılımı x yönünde olan bir boyutlu bir problemi içerecektir. Bir boyutlu benzetimler için Maxwell denklemlerini düzenlerken iki boyutlu TM veya TE denklemleri kullanılabilir.

Bir boyutlu TE modunu oluşturmak için iki boyutlu TE modu kullanılır. Bu durumda, bir boyuta indirgeme için y ekseninde alan değerlerinde her hangi bir değişim olmayacağından y parametresine göre alınan türevler sıfır olacaktır. Böylece Denklem 3.113'deki bağıntılar düzenlendiğinde,

$$\frac{\partial E_x}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} (-\sigma E_x) \quad (3.114a)$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left(-\frac{\partial H_z}{\partial x} - \sigma E_y \right) \quad \text{İki Boyutlu TE Modu} \quad (3.114b)$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left(-\frac{\partial E_y}{\partial x} - \rho H_z \right) \quad (3.114c)$$

bağıntıları elde edilir.

Denklemleri bir boyuta indirgerken de TE ve TM modları söz konusu olmaktadır. Bir boyutlu TE modu için x yönünde elektrik alan bileşeni (E_x) denklemlerde bulunmayacaktır. Bu durumda E_y ve H_z bileşenlerini içeren bağıntılar,

$$\frac{\partial E_y}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left(-\frac{\partial H_z}{\partial x} - \sigma E_y \right) \quad \text{Bir Boyutlu TE Modu} \quad (3.115a)$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left(-\frac{\partial E_y}{\partial x} - \rho H_z \right) \quad (3.115b)$$

olacaktır.

Bir boyutlu TM modunu oluştururken Denklem 3.112'da verilen iki boyutlu TM modu kullanılır. Denklem 3.112'daki bağıntılarda y eksenine göre alınan kısmi türevlerin sıfır olduğu düşünülerek yeniden düzenlenirse,

$$\frac{\partial H_x}{\partial t} = \frac{1}{\mu} (-\rho H_x) \quad (3.116a)$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial E_z}{\partial x} - \rho H_y \right) \quad \text{İki Boyutlu TM Modu} \quad (3.116b)$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\partial H_y}{\partial x} - \sigma E_z \right) \quad (3.116c)$$

Bağıntıları elde edilir. TM modu söz konusu olduğundan denklemlerde H_x bileşeni bulunmayacaktır. Bu durumda, bir boyutlu TM modu Denklem 3.117'de görüldüğü gibi H_y ve E_z bileşenlerini içeren bağıntılardan oluşmaktadır.

$$\frac{\partial H_y}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial E_z}{\partial x} - \rho H_y \right) \quad \text{Bir Boyutlu TM Modu} \quad (3.117a)$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\partial H_y}{\partial x} - \sigma E_z \right) \quad (3.117b)$$

Bir boyutlu TE ve TM modları birbirine dik düzlemsel dalgaları ifade etmektedir. Yani, TE veya TM modunun seçiminden bağımsız olarak incelenecek eksen göz önünde bulundurularak ilgili polarizasyona sahip düzlemsel dalga gerçekleştirilir.

Bir boyutlu TM ve TE modlarında Denklem 3.115 ve 3.117'de gösterildiği üzere manyetik alan bileşeni ve elektrik alan bileşeni x eksenine dik durumdadır. Bu durum enine elektromanyetik (TEM) modunu temsil etmektedir.

3.5.5. Sonlu farklar yaklaşımı

ZDSF yöntemi Maxwell denklemlerindeki kısmi türev operatörlerinin sonlu farklar karşılıkları ile değiştirilip doğrudan zaman ve konum düzlemlerinde sayısallaştırılmasına dayanır. Kısmi türev ifadelerinin sayısallaştırılmasını açıklamak için kendisi ve türevleri her noktada sürekli olan bir $f(x)$ fonksiyonunun türev açılımı incelendiğinde $f(x)$ fonksiyonunun x_0 noktasındaki türevi,

$$f(x)' = \frac{df}{dx} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{f(x_0 + \Delta x) - f(x_0)}{\Delta x} \quad (3.118)$$

olarak tanımlanır. Denklem (3.118) Taylor serisine açılıp gerekli düzenlemeler neticesinde limit operatörü de kaldırılırsa;

$$f(x)' \cong \frac{df}{dx} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{f(x + \Delta x) - f(x)}{\Delta x} + O(\Delta x) \quad (3.119)$$

şeklinde sayısal türevin tanımı kolaylıkla elde edilir.

İleri Sonlu Farklar adı verilen 3.119'daki 1. dereceden hata $O(\Delta x)$ ifadesi katkılarının küçük olduğu varsayılan ve ihmal edilen üst mertebeli terimlerin Δx ile orantılı olduğunu gösterir. Sayısal türev tanımı yine üst mertebeli terimlerin katkısının küçük olduğu düşünülüp ihmal edildiği varsayımı ile

$$f(x)' = \frac{f(x + \Delta x) - f(x - \Delta x)}{2\Delta x} + O(\Delta x^2) \quad (3.120)$$

şeklinde ifade edilir. Merkezi farklar denkleminin açılımı

$$f(x)' = \frac{f\left(x + \frac{1}{2}\Delta x\right) - f\left(x - \frac{1}{2}\Delta x\right)}{\Delta x} + O(\Delta x^2) \quad (3.121)$$

Şeklinde de ifade edilebilir.

Merkezi farklar yöntemindeki hata denklemi (3.121)'de görüldüğü gibi diğer iki yöntemden bir mertebe daha küçüktür. Türev açılımında ne kadar fazla nokta kullanılırsa hata o derece azalır, ancak bilgisayarların hesaplama süresi ve bellek gereksinimleri nokta sayısını kısıtlayan faktörlerdir.

Bölüm 3.5.2 'deki (3.106)-(3.111) denklemlerin için ayrıklaştırma yapılmalıdır. Ayrıklaştırma işlemi, Maxwell denklemlerinin bilgisayar ortamında çözülmesi ve modellenmesi için mutlaka uygulanması gereken adımdır. Yee (1966)'nin savına göre 3B problemlerin ayrıklaştırılması birim hücre kullanılarak yapılır. Buna göre Taylor serisine merkezi sonlu farklar açılımı uygulanır.

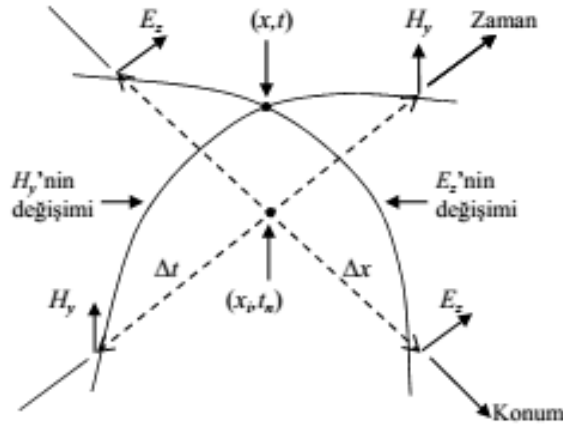
Burada Yee hücreleri aracılığıyla ZDSF algoritmasının temel formüllerinin nasıl oluşturulduğu gösterilecektir. Yee hücrelerindeki elektrik ve manyetik alan bileşenleri, konuma ve zamana göre türev içeren Maxwell denklemlerinin sonlu fark yaklaşımı ile hesaba katılmıştır. Başlangıç olarak Denklem (3.117a) kayıpsız durum göz önünde bulundurularak düzenlenirse ρ sıfır olacağından

$$\frac{\partial H_y}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial E_z}{\partial x} \right) \quad (3.122a)$$

Denklemi elde edilir. Türevin klasik tanımı ile yeniden düzenlenecek olursa

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta H_y}{\Delta t} = \frac{1}{\mu} \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta E_z}{\Delta x} \quad (3.122b)$$

Denklemleri elde edilir. Şekil 3.23'de Denklemi 3.117'in çözüleceği (x,t) noktası görülmektedir.



Şekil 3.23. Maxwell denklemlerinin ayrıklaştırılmasının bir boyutlu halde konum-zaman ilişkisi

Bu çizimde konum ve zaman eksenlerindeki adım boyları birbirine eşit gibi gösterildi. Fakat bunlar asıl değerler değildir. (x,t) noktasında zamanda ve konumda Δx ve Δt adımlarıyla ayrıklaştırmak Maxwell denkleminin doğruluğundan bir şey eksiltmez. Yani türev denklemleri ile fark denklemleri değiştirilerek Denklem 3.122 ayrıklaştırıldığında

$$\frac{H_y\left(t_n + \frac{\Delta t}{2}\right) - H_y\left(t_n - \frac{\Delta t}{2}\right)}{\Delta t} \Big|_{x_i} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{E_z\left(x_i + \frac{\Delta x}{2}\right) - E_z\left(x_i - \frac{\Delta x}{2}\right)}{\Delta x} \right) \Big|_{t_n} \quad (3.123)$$

Denklemleri elde edilir. Denklem 3.123, ikinci bir yolla konum x_i noktasında sabit tutularak $H_y(x_i, t_n)$, t_n ve $t_n + \frac{\Delta t}{2}$ noktalarında Taylor serisine açılarak $H_y\left(t_n + \frac{\Delta t}{2}\right) \Big|_{x_i}$ ve benzer şekilde $H_y\left(t_n - \frac{\Delta t}{2}\right) \Big|_{x_i}$ nin elde edilmesi ile gerçekleştirilebilir. Böylece zamanda ve konumda birinci dereceden kısmi türev denklemleri, ikinci dereceden doğruluklu merkezi fark yaklaşımı ile elde edilebilir. Eşitlik (3.123) yeniden yazıldığında

$$H_y\left(t_n + \frac{\Delta t}{2}\right) \Big|_{x_i} = H_y\left(t_n - \frac{\Delta t}{2}\right) \Big|_{x_i} + \frac{\Delta t}{\mu \Delta x} \left(E_z\left(x_i + \frac{\Delta x}{2}\right) - E_z\left(x_i - \frac{\Delta x}{2}\right) \right) \quad (3.124)$$

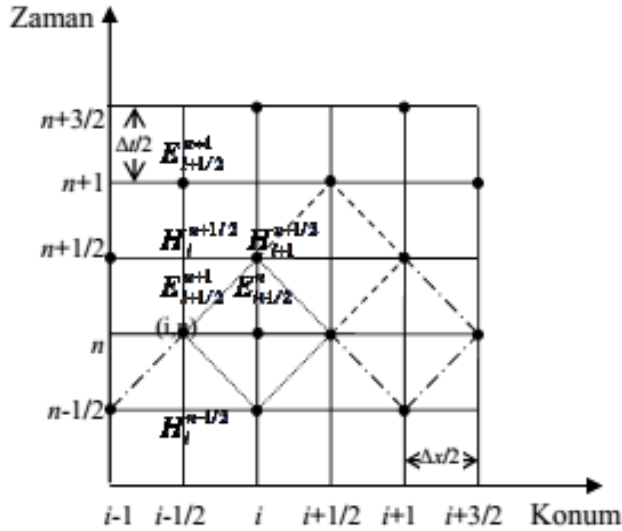
Denklemleri elde edilir. Bundan sonraki bağıntılarda ifade kolaylığı için x eksen yönündeki konum değişkeni olarak alt indis şeklinde i, zaman değişkeni olarak üst indis şeklinde n parametreleri kullanılacaktır. Bu şekilde Denklem 3.124 yeniden yazılarak Eşitlik (3.125) elde edilir.

$$H_i^{n+1/2} = H_i^{n-1/2} + \frac{\Delta t}{\mu \Delta x} [E_{i+1/2}^n - E_{i-1/2}^n] \quad (3.125)$$

Dolayısıyla, $H_i^{n+1/2}$, aynı konumdaki fakat Δt birim zamanı kadar önce H değerinin ve $x_{i-\frac{\Delta x}{2}}$ konumlarında, $\Delta t/2$ önceki zamanlarda E değerlerinin kullanılmasıyla hesaplanabilir. Bu durum Şekil 3.23'de zaman-konum diyagramında açıklanmaya çalışılmıştır. E'nin $x_{i-\frac{\Delta x}{2}}$ noktalarındaki değerlerini hesaplamak için Denklem 3.117b'nin kayıpsız ortam için düzenlenmiş halini kullanarak E_z için $(n+1/2)$ anında ve $(i+1/2)$ noktasında merkezi fark yaklaşımı uygulanır. Böylece

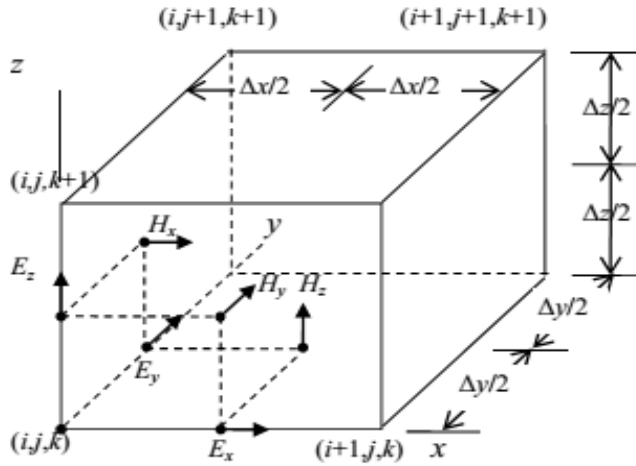
$$E_{i+1/2}^{n+1} = E_{i+1/2}^n + \frac{\Delta t}{\varepsilon \Delta x} [H_{i+1}^{n+1/2} - H_i^{n+1/2}] \quad (3.126)$$

Şeklinde elde edilir. Bir boyutlu ZDSF benzetiminde \vec{H} alanını hesaplamak için Denklem 3.125, \vec{E} alanını hesaplamak için Denklem 3.126 kullanılır.



Şekil 3.24. Zamanda \vec{H} ve \vec{E} konumda ve hesaplanması

Denklem 3.106 ve 3.111'de belirtilen, 3B ve zamanla değişen Maxwell denklemlerinin sonlu farklar ile ayrıklaştırılarak yazılmış hali 1966 yılında K.S. Yee tarafından oluşturulmuştur. Şekil 3.24'de ifade edilen bir boyutlu durum gibi Şekil 3.25'den görülen üç boyutlu uzayda elektrik alan ve manyetik alan vektörleri birbirlerinin ardına ardına oluşturmaktadır. Elektrik alan vektörü manyetik alan vektörü ile manyetik alan vektöründe elektrik alan vektörü ile çevrelenmiştir. Amper ve Faraday yasaları bu durumu doğrulamaktadır.



Şekil 3.25. Birim Yee hücresinde E ve H-alan vektörlerinin yerleşimi

Bir boyutlu benzetim için elde edilen Denklem 3.126'da biri zaman biri de konum değişkeni olmak üzere iki değişken bulunmaktadır. Fakat üç boyutlu denklemler için üç tanesi konumda, bir tanesi de zamanda olmak üzere toplam dört değişken mevcuttur. Bunlar Denklem 3.127'de gösterildiği gibi ifade edilebilir

$$(i, j, k, t) = (i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z, n\Delta t) \quad (3.127)$$

Burada Δx , Δy ve Δz sırasıyla x, y ve z eksenlerinde, Δt ise zamanda gerçekleşen birim artışlardır. i, j, k ve n ise tamsayı değerdeki katsayılardır. Bu andan itibaren yazımı kolaylaştırmak amacıyla Denklem 3.128'de belirtildiği gibi bir gösterim yöntemi kullanılır.

$$u(i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z, n\Delta t) = u_{i,j,k}^n \quad (3.128)$$

Burada u fonksiyonu, E ya da H alanını temsilen kullanılmış vektördür. $t_n = n\Delta t$ noktasında u fonksiyonunun x'e göre türevi için Yee'nin ifadesi,

$$\frac{\partial}{\partial x} u(i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z, n\Delta t) = \frac{u_{i+1/2,j,k}^n - u_{i-1/2,j,k}^n}{\Delta x} + O(\Delta x^2) \quad (3.129a)$$

şeklinde olur. Buradaki $O(\Delta x^2)$ terimi Taylor serisi açılımının ikinci dereceden doğruluklu eklentisidir. $\frac{\partial u}{\partial y}$ ya da $\frac{\partial u}{\partial z}$ Denklem 3.129a'dakine benzer şekilde hesaplanabilir. u fonksiyonunun zamana göre türevi için Yee'nin ifadesi,

$$\frac{\partial}{\partial t} u(i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z, n\Delta t) = \frac{u_{i,j,k}^{n+1/2} - u_{i,j,k}^{n-1/2}}{\Delta t} + O(\Delta t^2) \quad (3.129b)$$

Şeklindedir.

Şimdi Denklem 3.129’da ifade edilen bağıntılar aracılığıyla, Maxwell’in iki boyutlu denklemlerinin sayısal yaklaşımı (ZDSF denklemleri) elde edilebilir. İlk olarak Denklem (3.112a) ele alınırsa,

$$\frac{\partial H_x}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left(-\frac{\partial E_z}{\partial y} - \rho H_x \right) \quad (3.130)$$

ifadesi, zaman ve konum türevlerinin yerine fark denklemleri konularak

$$\frac{H_{x,i,j}^{n+\frac{1}{2}} - H_{x,i,j}^{n-\frac{1}{2}}}{\Delta t} = \frac{1}{\mu_{i,j}} \left[-\frac{E_{z,i,j+\frac{1}{2}}^n - E_{z,i,j-\frac{1}{2}}^n}{\Delta y} - \rho_{i,j} \cdot H_{x,i,j}^n \right] \quad (3.131)$$

elde edilir. Denklem (3.131)’in sağ tarafındaki terimlerin tamamı n zaman adımında hesap edilmektedir. Fakat n zaman adımındaki Hx teriminin hesaplama anında bilgisayar hafızasında kayıtlı olmadığı kabul edildiğinden (o anda Hx teriminin sadece n-1/2 zamanındaki değerinin bilgisayar hafızasında kayıtlı olduğu düşünülür), bu terimi hesaplamak için Denklem (3.132)’de belirtildiği gibi bir önceki ve sonraki terimlerin ortalaması alınır.

$$H_{x,i,j}^n = \frac{H_{x,i,j}^{n+\frac{1}{2}} + H_{x,i,j}^{n-\frac{1}{2}}}{2} \quad (3.132)$$

Denklem (3.132), (3.131)’da yerine konularak düzenlenirse

$$\frac{H_{x,i,j}^{n+\frac{1}{2}} - H_{x,i,j}^{n-\frac{1}{2}}}{\Delta t} = \frac{1}{\mu_{i,j}} \left[\frac{E_{z,i,j-\frac{1}{2}}^n + E_{z,i,j+\frac{1}{2}}^n}{\Delta y} - \rho_{i,j} \cdot \left(\frac{H_{x,i,j}^{n+\frac{1}{2}} + H_{x,i,j}^{n-\frac{1}{2}}}{2} \right) \right] \quad (3.133)$$

Elde edilir. Denklem her iki tarafında da bulunan $H_{x,i,j}^{n+\frac{1}{2}}$ terimi sol tarafta toplanırsa

$$\left(1 + \frac{\Delta t}{\mu_{i,j}} \cdot \frac{\rho_{i,j}}{2} \right) H_{x,i,j}^{n+\frac{1}{2}} = \left(1 - \frac{\Delta t}{\mu_{i,j}} \cdot \frac{\rho_{i,j}}{2} \right) H_{x,i,j}^{n-\frac{1}{2}} + \frac{\Delta t}{\mu_{i,j}} \left[\frac{E_{z,i,j-\frac{1}{2}}^n - E_{z,i,j+\frac{1}{2}}^n}{\Delta y} \right] \quad (3.134)$$

Denklemleri elde edilir. Son bir düzenleme daha yaparak $H_{x,i,j}^{n+\frac{1}{2}}$ terimi

$$H_{x,i,j}^{n+\frac{1}{2}} = \left(\frac{1 - \frac{\Delta t}{\mu_{i,j}} \cdot \frac{\rho_{i,j}}{2}}{1 + \frac{\Delta t}{\mu_{i,j}} \cdot \frac{\rho_{i,j}}{2}} \right) H_{x,i,j}^{n-\frac{1}{2}} + \left(\frac{\frac{\Delta t}{\mu_{i,j}}}{1 + \frac{\Delta t}{\mu_{i,j}} \cdot \frac{\rho_{i,j}}{2}} \right) \left[\frac{E_{z,i,j-\frac{1}{2}}^n - E_{z,i,j+\frac{1}{2}}^n}{\Delta y} \right] \quad (3.135)$$

Şeklinde elde edilir. Benzer şekilde elde edilen H_y ve E_z bileşenlerini de hesapladığımızda

$$H_{y,i,j}^{n+\frac{1}{2}} = \left(\frac{1 - \frac{\Delta t}{\mu_{i,j}} \cdot \frac{\rho_{i,j}}{2}}{1 + \frac{\Delta t}{\mu_{i,j}} \cdot \frac{\rho_{i,j}}{2}} \right) H_{y,i,j}^{n-\frac{1}{2}} + \left(\frac{\frac{\Delta t}{\mu_{i,j}}}{1 + \frac{\Delta t}{\mu_{i,j}} \cdot \frac{\rho_{i,j}}{2}} \right) \left[\frac{E_{z,i+\frac{1}{2},j}^n - E_{z,i-\frac{1}{2},j}^n}{\Delta x} \right] \quad (3.136)$$

Ve

$$E_{z,i,j}^{n+1} = \left(\frac{1 - \frac{\sigma_{i,j} \Delta t}{2\epsilon_{i,j}}}{1 + \frac{\sigma_{i,j} \Delta t}{2\epsilon_{i,j}}} \right) E_{z,i,j}^n + \left(\frac{\frac{\Delta t}{\epsilon_{i,j}}}{1 + \frac{\sigma_{i,j} \Delta t}{2\epsilon_{i,j}}} \right) \left[\frac{H_{y,i+\frac{1}{2},j}^{n+\frac{1}{2}} - H_{y,i-\frac{1}{2},j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x} - \frac{H_{x,i,j+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} - H_{x,i,j-\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y} \right] \quad (3.137)$$

şeklinde denklemler elde edilir. Denklem 3.112'deki Maxwell denklemleri ayrıştırılarak tez çalışmasında kullanılan iki boyutlu TM modlu fark denklemleri elde edilmiş olur.

Denklemler 3.138 ve 3.139 kullanılarak iki boyutlu TE modlu fark denklemleri de elde edilebilir. Denklem 3.113a TE modu için E_x bileşeni zamanda ve konumda ayrıştırılarak yazılırsa,

$$\frac{E_{x,i,j,k}^{n+1} - E_{x,i,j,k}^n}{\Delta t} = \frac{1}{\epsilon_{i,j,k}} \left[\frac{H_{z,i,j+\frac{1}{2},k}^{n+\frac{1}{2}} - H_{z,i,j-\frac{1}{2},k}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y} - \sigma_{i,j,k} \cdot E_{x,i,j,k}^{n+\frac{1}{2}} \right] \quad (3.138)$$

$$E_{x,i,j,k}^{n+\frac{1}{2}} = \frac{E_{x,i,j,k}^{n+1} + E_{x,i,j,k}^n}{2} \quad (3.139)$$

Denklem 3.138 ve denklem 3.139 elde edilir.

$E_{x,i,j,k}^{n+\frac{1}{2}}$ terimini 3.138. denklemde yerine koyup $E_{x,i,j,k}^{n+1}$ sol tarafta yalnız bıraktığımızda;

$$E_{x,i,j}^{n+1} = \left(\frac{1 - \frac{\sigma_{ij}\Delta t}{2\varepsilon_{ij}}}{1 + \frac{\sigma_{ij}\Delta t}{2\varepsilon_{ij}}} \right) E_{x,i,j}^n + \left(\frac{\frac{\Delta t}{\varepsilon_{ij}}}{1 + \frac{\sigma_{ij}\Delta t}{2\varepsilon_{ij}}} \right) \left[\frac{H_{z,i,j+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} - H_{z,i,j-\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y} \right] \quad (3.140)$$

denklemini elde edilir. Benzer şekilde elde edilen E_y ve H_z bileşenlerini de hesapladığımızda

$$E_{y,i,j}^{n+1} = \left(\frac{1 - \frac{\sigma_{ij}\Delta t}{2\varepsilon_{ij}}}{1 + \frac{\sigma_{ij}\Delta t}{2\varepsilon_{ij}}} \right) E_{y,i,j}^n + \left(\frac{\frac{\Delta t}{\varepsilon_{ij}}}{1 + \frac{\sigma_{ij}\Delta t}{2\varepsilon_{ij}}} \right) \left[\frac{H_{z,i,j-\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} - H_{z,i,j+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x} \right] \quad (3.141)$$

$$H_{z,i,j}^{n+\frac{1}{2}} = \left(\frac{1 - \frac{\Delta t}{\mu_{ij}} \cdot \frac{\rho_{ij}}{2}}{1 + \frac{\Delta t}{\mu_{ij}} \cdot \frac{\rho_{ij}}{2}} \right) H_{z,i,j}^{n-\frac{1}{2}} + \left(\frac{\frac{\Delta t}{\mu_{ij}}}{1 + \frac{\Delta t}{\mu_{ij}} \cdot \frac{\rho_{ij}}{2}} \right) \left[\frac{E_{x,i,j+\frac{1}{2}}^n - E_{x,i,j-\frac{1}{2}}^n}{\Delta y} - \frac{E_{y,i+\frac{1}{2},j}^n - E_{y,i-\frac{1}{2},j}^n}{\Delta x} \right] \quad (3.142)$$

şeklinde denklemler elde edilir. Denklem 3.113'deki Maxwell denklemleri ayrıştırılarak iki boyutlu TE modlu fark denklemleri elde edilmiş olur. Elde edilen sonuçları izotropik cisimler içeren bir bölgede yazabilmek için her bir alan vektörü için sabit katsayılar tanımlanmalıdır. Katsayıların adlandırdığımız notasyolar MATLAB ile geliştirdiğimiz algoritma ile uyuşması için aynı olmasına özen gösterilmiştir.

$\Delta x = \Delta y = \Delta s$ olan kübik bir hücre için (i, j) noktasında elektrik alan bağıntılarının katsayıları,

$$A_{i,j} = \left(\frac{1 - \frac{\sigma_{ij}\Delta t}{2\varepsilon_{ij}}}{1 + \frac{\sigma_{ij}\Delta t}{2\varepsilon_{ij}}} \right) \quad (3.143)$$

$$B_{i,j} = \left(\frac{\frac{\Delta t}{\varepsilon_{i,j} \Delta s}}{1 + \frac{\sigma_{i,j} \Delta t}{2 \varepsilon_{i,j}}} \right) \quad (3.144)$$

şeklinde olur. Manyetik alan bağıntıları (i,j) noktasındaki katsayılar,

$$C_{i,j} = \left(\frac{1 - \frac{\Delta t}{\mu_{i,j}} \cdot \frac{\rho_{i,j}}{2}}{1 + \frac{\Delta t}{\mu_{i,j}} \cdot \frac{\rho_{i,j}}{2}} \right) \quad (3.145)$$

$$D_{i,j} = \left(\frac{\frac{\Delta t}{\mu_{i,j} \Delta s}}{1 + \frac{\Delta t}{\mu_{i,j}} \cdot \frac{\rho_{i,j}}{2}} \right) \quad (3.146)$$

şeklinde ifade edilir. Dikkat edilecek olursa B ve D katsayılarının içerisinde Δs birim konum adımı bulunmaktadır.

Denklem 3.135, 3.136 ve 3.137’de bir kısmı verilen ZDSF denklemlerinin tamamı aynı şekilde elde edilebilir. Denklem 3.135, 3.136 ve 3.137’de ifade edilen konum indisleri Şekil 3.25’deki yapıya uygun hale getirebilmek için düzenlenir. Örneğin, Hx bileşeni için konum indisleri j +1/2 ve Ez bileşeni için i ve j ‘ye +1/2 eklenir. Böylece Denklem 3.147 ve 3.148’de verilen sonlu fark denklemleri elde edilmiş olur.

$$H_{x,i,j}^{n+\frac{1}{2}} = C_{HX,i,j} \cdot H_{x,i,j}^{n-\frac{1}{2}} + D_{HX,i,j} \left(E_{z,i,j-\frac{1}{2}}^n - E_{z,i,j+\frac{1}{2}}^n \right) \quad (3.147a)$$

$$H_{y,i,j}^{n+\frac{1}{2}} = C_{HY,i,j} \cdot H_{y,i,j}^{n-\frac{1}{2}} + D_{HY,i,j} \left(E_{z,i+\frac{1}{2},j}^n - E_{z,i-\frac{1}{2},j}^n \right) \quad (3.147b)$$

$$E_{z,i,j}^{n+1} = A_{EZ,i,j} \cdot E_{z,i,j}^n + B_{EZ,i,j} \left(H_{y,i+\frac{1}{2},j}^{n+\frac{1}{2}} - H_{y,i-\frac{1}{2},j}^{n+\frac{1}{2}} - \left(H_{x,i,j+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} - H_{x,i,j-\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} \right) \right) \quad (3.147c)$$

$$E_{x,i,j}^{n+1} = A_{EX,i,j} \cdot E_{z,i,j}^n + B_{EX,i,j} \cdot \left(\left(H_{z,i,j+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} - H_{z,i,j-\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} \right) \right) \quad (3.148a)$$

$$E_{y,i,j}^{n+1} = A_{EY,i,j} \cdot E_{z,i,j}^n + B_{EY,i,j} \cdot \left(\left(H_{z,i-\frac{1}{2},j}^{n+\frac{1}{2}} - H_{x,i+\frac{1}{2},j}^{n+\frac{1}{2}} \right) \right) \quad (3.148b)$$

$$H_{z,i,j}^{n+\frac{1}{2}} = C_{HZ,i,j} \cdot H_{y,i,j}^{n-\frac{1}{2}} + D_{HZ,i,j} \cdot \left(E_{x,i,j+\frac{1}{2}}^n - E_{x,i,j-\frac{1}{2}}^n - \left(E_{y,i+\frac{1}{2},j}^n - E_{y,i-\frac{1}{2},j}^n \right) \right) \quad (3.148c)$$

Denklem 3.147 (TM modu) ve 3.148'deki (TE modu) altı denklem Şekil 3.33'deki gibi 2 boyutlu bir problemin çözümünde kullanılabileceği gibi, bir boyutlu durumlara da indirgenerek kullanılabilir.

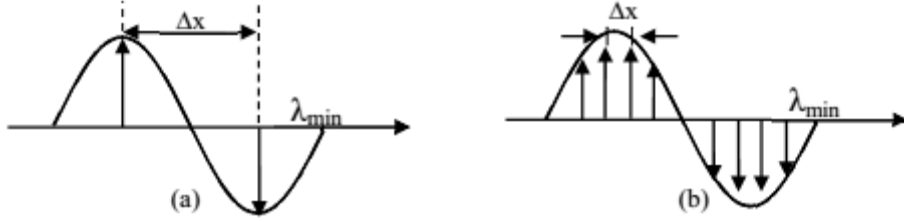
3.5.6. Sayısal dağılma (Dispersion) ve kararlılık

Benzetim esnasında fark denklemleri kullanılmadan önce birim hücre boyutu (konum adımı) ve zaman adımı belirlenmiş olmalıdır. Başlangıçta hücre boyutu tespit edilir. Sayısal dağılma, hücre boyutunun gereğinden büyük belirlenmesinden meydana gelmektedir. Benzetimde kullanılacak olan kaynak işaretinin frekansının büyük olması sebebiyle, belirlenen hücre boyutunun sinyalin bir dalga boyunu yeterince örnekleyecek değere sahip olmaması sayısal dağılmaya neden olmaktadır.

Hücre boyutunun belirlenmesinden sonra birim zaman adımı seçilmelidir. Birim zaman adımının uygun değerlerde seçilmesi ile sayısal kararlılığın sağlanması mümkün olacaktır. Seçilen hücre boyutunda birim zaman adımının yeterince küçük seçilmemesi nedeniyle, ilerleyen elektromanyetik dalgayı örneklemede gecikmelerin bulunması kararlılık şartının yerine getirilemediğinin göstergesidir.

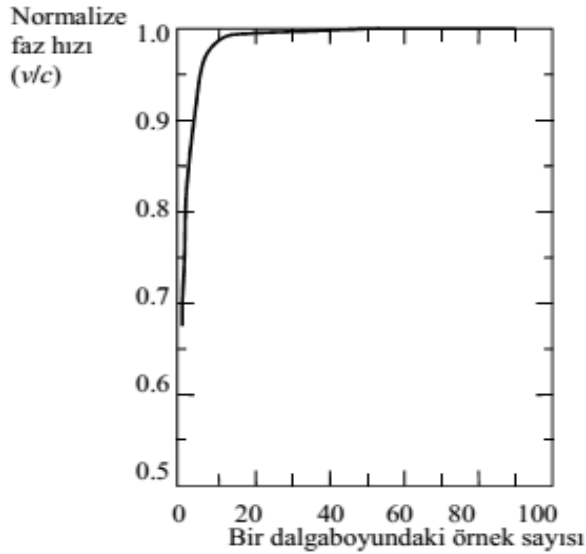
Şekil 3.26(a)'da $\Delta x = \frac{\lambda_{min}}{2}$ ve Şekil 3.26(b)'de ise $\Delta x = \frac{\lambda_{min}}{8}$ değerlerinde seçilmiştir. λ_{min} ortama yayılan dalganın minimum dalga boyunu temsil etmektedir. Bu durumda (b) şıkında belirtilen değerlerde yapılan benzetimin daha doğru sonuç vereceği aşikardır (Akleman, 1998). Birim hücre boyutu, benzetimde uygulanacak olan en büyük frekansa (f_u) sahip sinyalin dalga boyundan daha küçük değerde seçilmelidir. Fourier analizine bağlı olarak τ genişliğinde bir darbenin frekans tayfı sıfır ile $f_u = 1/\tau$ arasında olacağı söylenebilir. Nyquist örnekleme kuramına göre hücre boyutu $\frac{\lambda_u}{2}$ 'den küçük olmalıdır, böylece elektrik ve manyetik alanların konumdaki değişiklikleri doğru şekilde örneklenebilir. Burada $f_u = \frac{v_f}{\lambda_u}$ ve v_f dalganın ortamdaki hızını göstermektedir. Benzetimde kullanılan fark denklemleri de zaten yaklaşımlar kullanılarak oluşturulduğundan birim hücre boyutu sınır değerden daha küçük seçilmelidir. Sayısal dağılmanın benzetim sonuçlarına etkisini en aza indirebilmek için birim hücre boyutu $\frac{\lambda_u}{10}$ 'dan daha küçük olmalıdır. Birim hücre boyutunun küçük seçilmesi bilgisayarın

benzetimi bitirmesi için gerçekleştireceği adım sayısını artıracığından, hücre boyutunun değeri belirlenirken bilgisayar özellikleri de göz önünde bulundurulmalıdır. Eğer bilgisayar yeterince hızlı ise, hücre boyutu örneğin $\frac{\lambda_u}{20}$ olarak belirlenebilir.



Şekil 3.26. Sayısal dağılmanın gösterimi

Şekil 3.27’de bir boyutlu benzetim için yayılan dalganın dalga boyundaki örnekleme sayısının faz hızına etkisi gösterilmiştir. Örnekleme sayısı hücre boyutu ile ters orantılı olduğundan hücre boyutu en azından $\frac{\lambda_u}{20}$ kadar küçük olmalıdır. Benzetimi yapılacak olan yapının geometrisine bağlı olarak daha da küçük hücre boyutu seçilebilir.



Şekil 3.27. Bir boyutlu ZDSF algoritmasındaki sayısal faz hızının bir dalga boyundaki örnek sayısı ile değişimi

Zaman adımı (Δt) belirlenirken öncelikle bir boyutlu durum göz önünde bulundurulsun. Bir zaman adımı boyunca dalga bulunduğu hücreden en yakın komşu hücreye geçeceğinden Bir zaman adımında dalganın ilerlemesi bir hücreden daha fazla miktarda olmalıdır. Ayrıca sayısal kararlılığın sağlanması için zaman adımı sayısı gerektiğinden çok olmamalıdır. Bir boyutlu ZDSF de sayısal kararlılık şartı Eşitlik (3.149) ile açıklanır.

$$\Delta t \leq \frac{\Delta x}{c} \quad (3.149)$$

Üç boyutlu benzetimde ise sayısal kararlılığı garanti edebilmek için,

$$\Delta t \leq \frac{1}{c \sqrt{\left(\frac{1}{\Delta x}\right)^2 + \left(\frac{1}{\Delta y}\right)^2 + \left(\frac{1}{\Delta z}\right)^2}} \quad (3.150)$$

şartına bağlı olarak birim zaman adımı belirlenmelidir. Eşitlik (3.150) verilen kararlılık şartı ilk olarak Courant tarafından ortaya atılmış bir yaklaşımdır.(Sadıku, 2001).Modellemenin yapıldığı benzetim ortamı hava olduğu düşünülerek c ışık hızı olarak değerlendirilmiştir.

Üç boyutlu benzetim için eğer $\Delta x = \Delta y = \Delta z = \Delta s$ ise sayısal kararlılık sınırı,

$$\Delta t \leq \frac{\Delta s}{c\sqrt{3}} \quad (3.151)$$

şeklinde olacaktır. İki boyutlu durumda ise, sayısal kararlılık şartı

$$\Delta t \leq \frac{\Delta s}{c\sqrt{2}} \quad (3.152)$$

Denklem (3.152) ile ifade edilmiştir. Bu doğrultuda geliştirilen algorithmada sayısal dağılıma ve kararlılık koşulu Denklem (3.153) çözümlenerek belirlenmiştir.

$$\Delta s = \frac{\lambda_{min}}{10} \quad (3.153a)$$

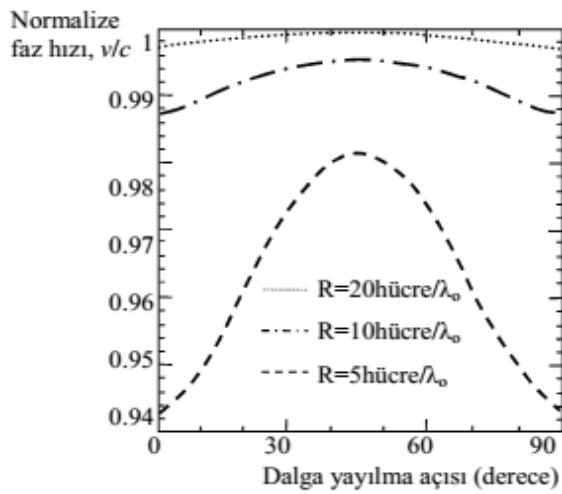
$$\lambda_{min} = \frac{c}{f_{max}} = \frac{3 \times 10^8}{3 \times 10^9} = 0.1m \quad (3.153b)$$

$$\Delta s = \frac{\lambda_{min}}{10} = \frac{0.1}{10} = 0.01m = 1cm \quad (3.153c)$$

$$\Delta t = \frac{\Delta s}{c\sqrt{2}} = \frac{0.01}{3 \times 10^8 \times \sqrt{2}} = 23,57 \times 10^{-12} \quad (3.153d)$$

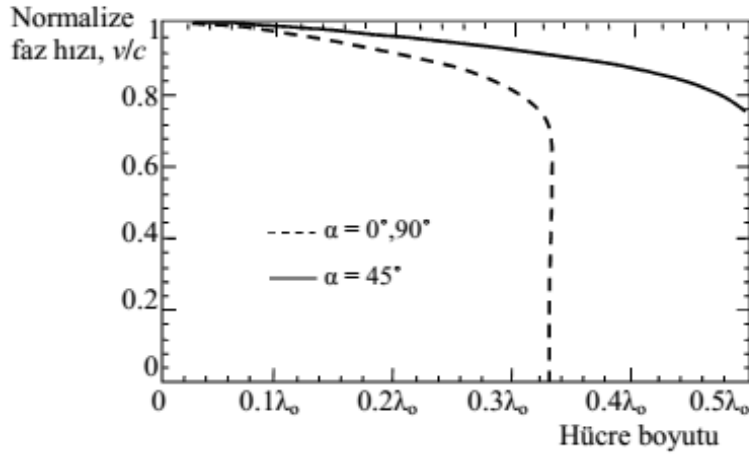
Dağılmayı tekrar ifade edecek olursak, farklı dalga boyuna sahip dalgaların farklı hızlarda yayılmasıdır. Bir boyutlu durumda kararlılık sınırı için birim zaman adımı sınır değerinde seçilirse dağılma söz konusu olmamaktadır. İki boyutlu durumda, birim zaman adımı sınır değerinde iken ve dalga yayılması birim hücrelerin köşegeni yönünde (yayılma açısı 45°) iken dağılma olmaz. Dalga yayılması diğer yönlerde (yayılma açısı 45° 'den farklı) iken dağılma olacaktır. Bu durum üç boyutlu ZDSF hesaplamaları içinde aynıdır. Hücre boyutunun düşmesi ile sayısal dağılma azalabilir ama tamamen yok edilemez.

Dağılma, Şekil 3.28'de ifade edilmeye çalışılmıştır. Burada iki boyutlu ZDSF benzetiminde yayılma açısı ile normalize edilmiş sayısal faz hızının nasıl değiştiği gösterilmiştir. Burada zaman adımı $c\Delta t \leq \Delta s/2$ olacak şekilde seçilmiştir.



Şekil 3.28. İki boyutlu ZDSF algoritmasında üç farklı hücre sayısı için sayısal faz hızının dalga yayılma açısı ile değişimi (R: bir dalga boyundaki örnekleme sayısı)

Şekil 3.29'da ise sayısal faz hızının aynı yayılma açısı ve birim zaman adımı için birim hücre boyutuna bağlı olarak değişimi görülmektedir. Bu grafikte yayılma açısı 0° ve 90° iken dalga yayılması sırasıyla x ve y-ekseni yönünde olmakta, 45° iken birim hücrenin köşegeni yönünde yayılma olmaktadır. Küçük hücre boyutu seçilmesinin nasıl iyileştirme yaptığı burada açık bir şekilde görülmektedir. Eğer büyük bir hücre boyutu (Nyquist sınırına çok yakın) kullanılırsa, benzetim dalga yayılmasını takip edemeyecektir.



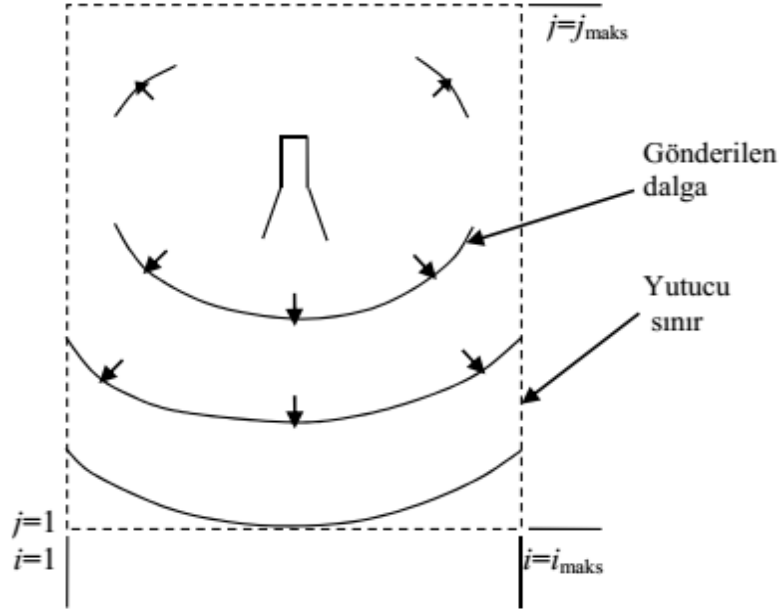
Şekil 3.29. İki boyutlu ZDSF algoritmasında üç farklı yayılma açısı için sayısal faz hızının hücre boyutu ile değişimi

3.5.7. Yutucu sınır koşulu (YSK)

ZDSF algoritmasını kullanarak yapılan benzetimde araştırma bölgesinin sınırlarında yapılan hesaplamalarda bir sorun görülmektedir. Sınırlarda dalga yansımaları meydana gelmektedir. Bu yansımalar gerçekte olmayıp sadece benzetimlerde oluştuğu için yapay yansımalar olarak isimlendirilir. Bu yapay yansımalar, YSK uygulanarak giderilebilir.

Bir boyutlu benzetimlerde YSK basittir. Çünkü bu durumda dalga hücrelere dik olarak yayılmaktadır ve basit bir yayılma gecikmesi uygulanarak yapay yansımalar giderilebilir. İki ve üç boyutlu benzetimlerde ise bu işlem oldukça zordur. Çünkü dalga hücrelere dik olarak yayılmaz. Şekil 3.30'da da görüldüğü gibi yayılan dalga düzlemsel değildir.

YSK olarak gündeme gelen yöntemlerden biri Mur'un YSK'si (Mur, 1981) diğeri ise daha sonra geliştirilmiş olan Berenger'in mükemmel uyumlu tabakasıdır (MUK) (Berenger 1994).



Şekil 3.30. ZDSF elektromanyetik dalga etkileşimi (yansız)

Mur tarafından geliştirilen YSK'ler birinci ve ikinci dereceden doğruluklu olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. İki boyutlu durumda $\mathbf{x} = i\Delta x$ ve $\mathbf{y} = j\Delta y$ noktasında E_z bileşeni düşünülecek olursa, bu alan bileşeni için birinci dereceden Mur'un YSK (Kunz ve Luebbers 1993),

$$E_{i,j}^{n+1} = E_{i-1,j}^n + \frac{c\Delta t - \Delta x}{c\Delta t + \Delta x} (E_{i-1,j}^{n+1} - E_{i,j}^n) \quad (3.154)$$

şeklinindedir. Birinci dereceden Mur hesaplamasında görüldüğü gibi, $x = i\Delta x$ konumundaki E_z alan değeri, aynı konumda bir önceki zamanda E_z değeri ve $x = (i-1)\Delta x$ 'deki E_z değeri kullanılarak hesaplanabilir.

Bir boyutlu durumda eğer $\Delta x = c\Delta t$ ise $E_i^{n+1} = E_{i-1}^n$ olur. Yani $n+1$ anında i konumundaki alan değeri, bir zaman adımı önceki anda (n) bir konum adımı önceki konumdaki ($i-1$) değerine eşit alınır. Bir boyutlu durum için bu hesaplama kesin doğru sonuç verir. İkinci dereceden doğruluklu Mur'un YSK, iki boyutlu durumda E_z bileşeni için $\Delta x = \Delta y$ ise (Kunz ve Luebbers 1993),

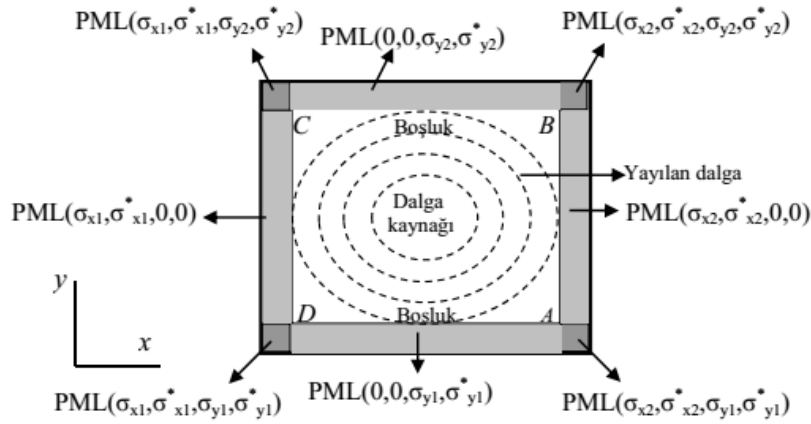
$$E_{i,j}^{n+1} = -E_{i-1,j}^n + \frac{c\Delta t - \Delta x}{c\Delta t + \Delta x} (E_{i-1,j}^{n+1} - E_{i,j}^n) + \frac{2\Delta x}{c\Delta t + \Delta x} (E_{i-1,j}^n - E_{i,j}^n) + \frac{(2\Delta t)^2}{2(\Delta x)(c\Delta t + \Delta x)} (E_{i,j+1}^n - 2E_{i,j}^n + E_{i,j-1}^n + E_{i-1,j+1}^n - 2E_{i-1,j}^n + E_{i-1,j-1}^n) \quad (3.155)$$

ile ifade edilir.

İkinci dereceden Mur hesaplamasında iki zaman adımı önceki değerler kullanılmaktadır. Burada eğer dalga hücrelere dik bir şekilde yayılıyorsa tam sonuç

alınabilmektedir. xz ve yz düzlemlerinin kesiştiği yerde yayılma gecikmesi mantığına dayanan Denklem 3.154'de ifade edilen birinci dereceden doğruluklu Mur koşulları kullanılabilir.

1994 yılında Berenger, hesaplama alanının sınırlarında oluşan yansımaları yok etmek için MUK ismini verdiği tekniği geliştirdi. Daha sonra iki boyutlu TE ve TM modlar için uyguladı. Şekil 3.31'da görülebileceği gibi MUK katmanı benzetim ortamını çevreleyecek şekilde uygulanmaktadır. Üstelik MUK ortamı dalga gelme açısından ve frekansından bağımsız iyi bir dalga empedansı değerine sahiptir (Stutzman ve Thiele 1998).



Şekil 3.31. Berenger'in MUK sınır koşullarına sahip iki boyutlu benzetim ortamı

MUK, ilk olarak bir düzlem dalga için aşağıda belirtilen elektriksel özellikleri sağlayan bir ortama dik olarak gelmesi sonucunda yansıma yapmadığının görülmesi ile fark edilmiştir (Sadiku 2001).

$$\frac{\sigma}{\epsilon_0} = \frac{\sigma^*}{\mu_0} \quad (3.156)$$

Burada σ^* eşdeğer manyetik iletkenliktir (ohm/metre). Açık bir bölgenin benzetimi, araştırılması istenilen bölgenin etrafının kayıplı bir katman (MUK) ile sarılmasıyla sınırlı bir ZDSF ızgarası üzerinde gerçekleştirilir. Bu katman bir yansısız odada yutucu malzemenin gördüğü işlevi görür. İki boyutlu TM modu için, Berenger'in geliştirdiği teknik incelenirse manyetik alan bileşeni yapay olarak iki alt bileşene bölünür ve her alt bileşeni bağımsız manyetik iletkenlik ile ilişkilendirilir. Elektriksel iletkenlik için de bu durum uygulanır ve MUK katmanı içerisindeki düzenlenmiş denklemler:

$$\mu_0 \frac{\partial H_x}{\partial t} = -\frac{\partial E_z}{\partial y} - \rho_y H_x \quad (3.157a)$$

$$\mu_0 \frac{\partial H_y}{\partial t} = \frac{\partial E_z}{\partial x} - \rho_x H_y \quad (3.157b)$$

$$\epsilon_0 \frac{\partial E_{zx}}{\partial t} = \left(\frac{\partial H_y}{\partial x} - \sigma_x^* E_{zx} \right) \quad (3.157c)$$

$$\epsilon_0 \frac{\partial E_{zy}}{\partial t} = \left(\frac{\partial E_x}{\partial y} - \sigma_y^* E_{zy} \right) \quad (3.157d)$$

şeklini alır. Burada $E_z = E_{zx} + E_{zy}$ olarak düşünülmüştür. Böylece gelen dalganın katmana geliş açısına bağımlı olmadan MUK katmanı yutucu sınır koşullarını sağlayabilmektedir.

MUK katmanındaki iletkenlikler yüksek olduğu zaman, elektrik ve manyetik alan bileşenleri hızlı bir şekilde zayıflar ve ZDSF algoritmasında kullanılan doğrusal fark almayı kullanmak uygun olmaz. Onun yerine eksponansiyel fark alma kullanılır.

$$H_y^{n+\frac{1}{2}}(i,j) = H_y^{n-\frac{1}{2}}(i,j) - \frac{1}{\rho_x} \left(1 - e^{-\frac{\rho_x \Delta t}{\epsilon_0}} \right) \frac{E_z^n \left(i, j + \frac{1}{2} \right) - E_z^n \left(i, j - \frac{1}{2} \right)}{\Delta y} \quad (3.158)$$

Gerçek bir ZDSF uygulamasında sonsuz kalınlıkta bir yutucu katman oluşturmak mümkün değildir. En basit çözüm, giden enerjiyi mükemmel iletken gibi bir sınır koşulu ile absorbe edecek uygun bir kalınlıktan sonra MUK katmanını sonlandırmaktır. Bu durum az da olsa hatalı hesaplamalara sebebiyet verebilecek geri yansımalar oluşturabilecektir. Uygulamada karşılaşılabilecek ikinci bir husus da MUK katmanının kalınlığıyla ilgilidir. Hesaplama alanının etrafına MUK katmanı olarak hücreler eklendikçe hesaplama yapılan hücrelerin sayısı da artmaktadır. Yani benzetimi gerçekleştiren bilgisayarın işlem yükü artacaktır. Bu durum özellikle üç boyutlu benzetimlerde daha çok önem arz etmektedir (Peterson vd. 1998).

3.5.8. Bilgisayar algoritması ve ZDSF akış şeması

ZDSF ile yapılan modelleme çalışmalarındaki en önemli aşama zaman adımlama işlemlerinin hesaplanmasıdır. Ancak zaman adımlama işlemine geçilmeden önce kaynak özellikleri, hücre boyutları, kayıt süresi ve zaman adımı gibi özellikler belirlenmelidir. Denklem 3.143, 3.144, 3.145 ve 3.146'daki elektrik alan çarpanları ve manyetik alan çarpanları (A, B,C ve D katsayıları) her bir zaman adımında tekrar tekrar hesaplanmaması için zaman adımlama işleminden önce hesaplanıp hafızaya atılmalıdır. Bu çarpanlar aslında yeraltında bulunan tabakaları yada cisimlerin geometrisini tanımlamaktadır. Bu özellikler tanımlandıktan sonra zaman adımlama sürecine geçilir. Bu adım modellemede kullanılan kodların çok az kısmını

oluşturmasına rağmen sürekli tekrarlandığı için program içinde sıklıkla kullanılır. Zaman adımlama işlemi bittikten sonra programın gerekli çıktıları verebilmesi için istenilecek sonuçlar belirlenmelidir. Ayrıca modellemenin gerçekleştirme süresinden yana bir kısıtlılık yoksa azam adımlama işlemi sırasında anlık E alan ve H alan bilgileride alınabilir.

Benzetim kodlarının yazımı ön hesaplamalar, zaman adımlama ve son aşama olmak üzere üç temel aşamada incelenmiştir.

Ön hesaplamalar bölümünde benzetimi yapılacak bölgeye uygulanacak ZDSF hücrelerinin boyutunu ve sayısını hesaplama, ZDSF benzetiminin doğru sonuçlar verebilmesi için courant kararlılık koşulunu sağlayacak zaman adımını hesaplama ve araştırma tabakaları ya da hedef cisim hakkındaki bilgilerin atandığı katsayılar hesaplama işlemleri yapılır.

Zaman adımlama bölümünde modellemede seçilen kaynak belirlemek, frekans bağımlı bir kaynak söz konusu ise anten merkez frekansı belirlemek, seçilene moda göre ZDSF hücrelerindeki elektrik alan ve manyetik alan bileşenlerini kullanarak bir başka yöndeki bileşenlerini hesaplamak, en yakın ZDSF hücrelerindeki alan bileşenlerini kullanarak E-alan bileşenini hesaplamak, gerçekte var olmayan yalancı yansımaları engellemek için yutucu sınır koşullarını (YSK) sürekli yenilemek ve manyetik alan bileşenlerini güncellemek gerekir.

Son aşamada ise; oluşturulan dizi veya matrislere modelin herhangi noktasındaki ve zamanındaki elektrik alan ve manyetik alan değerlerini kaydetme ve kaydedilen alan değerlerini kullanılarak istenilen benzetim sonuçlarını oluşturmak gerekmektedir.

Yukarıda ifade edilen adımları içeren basit bir akış şeması Şekil 3.32'de görülebilir.



Şekil 3.32. TM Modu ZDSF Akış Şeması

3.5.9. Kaynak seçimi

ZDSF yöntemiyle yapılan benzetimlerde ortama yayılan elektromanyetik dalganın özelliklerini belirleyen kaynak özellikleri benzetim sonuçlarını etkileyebilecek bir unsur olarak önümüze çıkmaktadır.

Sürekli olarak sinüs dalga üreten genel bir kaynak Eşitlik (3.159a)'da verilmiştir.

$$f(t) = E_0 \sin(2\pi f_0 n \Delta t) \quad (3.159a)$$

Eşitlikteki E_0 genlik, f_0 çalışma frekansı, n ise zaman adımıdır.

Geniş band gauss darbesi üreten diğer bir kaynak ise Eşitlik (3.168b) ile ifade edilmiştir.

$$f(t) = E_0 e^{-[(n-n_0)/n_{sönüm}]^2} \quad (3.159b)$$

Eşitlik (3.168b)'ye dikkat edilirse $n = 0$ anında fonksiyonun değeri sıfır değildir. Bu yüzden sıfırdan gauss darbesine geçişin düzgün olabilmesi için n_0 en az $3n_{sönüm}$ değerinde olması gerekmektedir.

Diğer bir kaynak da sinüs modüleli gauss darbesidir ve Eşitlik (3.168c) ile gösterilir.

$$f(t) = f(t) = E_0 e^{-[(n-n_0)/n_{sönüm}]^2} \sin(2\pi f_0(n - n_0)\Delta t) \quad (3.159c)$$

Eşitlik (3.168c)'de, verilen kaynakların tamamı zamana göre değişen bir dalga yayırlar. Bu dalgalar kaynaktan bütün yöne eşit şekilde dağılarak yayılır. Kaynaktan belirli bir uzaklıkta bir ortam söz konusu ise yayılan EM enerji ortama ulaşınca ortamın elektriksel özelliklerine göre bir kısmı yansırken bir kısmı da ilerlemeye devam eder. (Stutzman ve Thiele 1998).

Yansıma katsayısı formülü yüzeye herhangi bir açı ile gelen düzlemsel dalga için Eşitlik (3.160) ile açıklanır. θ_i ve θ_t sırasıyla gelen dalganın ve ikinci ortama geçen dalganın sınır yüzeyinin normali ile yaptığı açılarıdır.

$$\Gamma = \frac{E_{0r}}{E_{0i}} = \frac{\eta_2 \cos \theta_i - \eta_1 \cos \theta_t}{\eta_2 \cos \theta_i + \eta_1 \cos \theta_t} \quad (3.160)$$

Buradaki, ortam empedansı Eşitlik (3.161) ile belirlenir.

$$\eta = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma + j\omega\epsilon}} \quad (3.161)$$

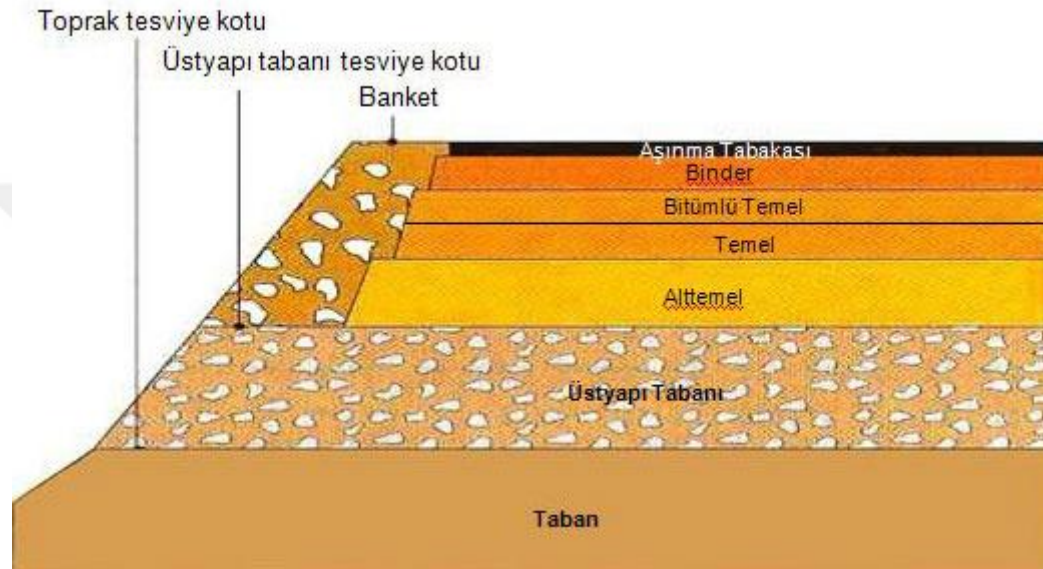
Ortama yayılan ya da ortamdaki yansıyan dalgalar için Eşitlik (3.168a)'daki sinüsün kaynağının en az bir periyodu ulaşmaya kadar ve Eşitlik (3.168b) ve (3.168c)'de iletilen ve yansıyan EM dalgaların tüm zaman adımlarındaki değerleri hesaplanmaya kadar benzetim işlemleri devam etmelidir. Yani, geçici bütün durumlar sıfırlanmaya kadar zaman adımlama işlemi devam etmelidir.

3.6. Modelleme Çalışmaları ve Uygulama Esasları

Yol yapım çalışmalarında kullanılan asfalt tabakaları, bitümlü karışımlardır. Bu karışımlar, agrega ile bitümlü bağlayıcıdan meydana gelmektedir. Piyasada BSK asfalt olarak bilinmekte olup bu tanım "bitümlü sıcak karışımın" ilk harflerinin kısaltmasından oluşmaktadır. Bu karışımlar pahalı olduğu için yalnız yolun en üst tabakasında kullanılmaktadır.

Bitümlü sıcak karışımlar, fonksiyonel durumu açısından değerlendirildiğinde yol yüzeyi, düzgün ve pürüzsüz olması, yol yüzeyinin su geçirmez olması, araçlarda sürtünmeden kaynaklı ses ve gürültünün azaltılması, araçların tekerlekleri sathi kaplama yollara göre daha az aşınması, yol yüzeyinde taş, çakıl, agrega vb. malzemelerin birikmesini engellemesi gibi avantajları bulunmaktadır.

Bitümlü sıcak karışım (BSK) ile yapılan asfalt çalışmalarında kaplama tabakasının kalınlığı 6 cm geçerse aşınma ve binder tabakasından oluşan iki katman halinde inşa edilir. Şekil 3.33'de gösterildiği üzere üstteki tabaka aşınma tabakası, alttaki tabaka binder tabakası olarak tanımlanır.



Şekil 3.33. Asfalt Yollardaki Tabakalar

Aşınma tabakasında ile binder tabakası karşılaştırıldığında, içerisinde kullanılan agrega çapı ve bitüm miktarları açısından farklılık gösterir. Aşınma tabakasında daha yüksek dirençli agregalar kullanılırken binder tabakasında aşınma tabakasına göre daha büyük agrega kullanılmaktadır. Ayrıca aşınma tabakası binder tabakasına göre daha fazla bitüm kullanır. Bu bağlamda aşınma tabakasının bağlayıcı özelliği daha fazladır.

3.6.1. Bitümlü karışımların fiziki ve mekanik özellikleri

Bitümlü karışımların fiziki ve mekanik özelliklerini aşağıda belirtildiği üzere 6 ana başlık altında ele alınır.

1-) Dayanıklılık: Bitümlü karışımın, su, hava, rüzgar, basınç ve trafik tesirlerine karşı gösterdiği direnç olarak ifade edilir. Kullanılan agreganın çapı, direnci, su emme özelliği, kuruluşu, asfaltın oksitlenmeye karşı direnci, karışım içerisindeki boşluğun %3-%5 arasında sınırlandırılması (istenilen oran) dayanıklılığı etkileyen başlıca faktörler olarak sayılabilir.

2-) Esneklik: Yolda meydana gelen bozulmalara ve yıpranmalara karşı bitümlü karışımın çatlamadan bütünlüğünü koruyabilme özelliğidir.

3-) Kararlılık: Taşıtların neden olduğu ani manevralar sonucunda meydana gelen basınç veya çekme kuvvetine karşı gösterdiği dirençtir.

4-)İşlenebilirlik: Bitümlü sıcak karışımın serme ve sıkıştırma özelliğidir. Asfalt karışımlarının bu özelliği agregaların dane çapı ve şeklinden, asfalt oranından ve yüzey dokusundan doğrudan etkilenir. Örneğin, yuvarlak daneli agregalar yerine köşeli agregalar kullanılması, stabilitiyi arttırırken, işlenebilirliği azaltır. Karışımdaki asfalt oranının artması da serme ve sıkıştırma işlemini kolaylaştırır.

5 -) Kaymaya karşı direnç: Taşıtların yüzey sürtünme kuvvetini kullanarak güvenli bir şekilde durması, yavaşlaması veya hareket etmesidir. Kaplamada kullanılan agreganın köşeli olması, yuvarlak olması ya da kırma taş olması yüzey dokusunu yüzey kalitesini belirler. Dolayısıyla agregaların yüzey dokusunun yanı sıra, asfalt oranı ve sıkıştırma yapılmamasından kaynaklanan hava boşluklarının oluşması kaymaya karşı direnci doğrudan etkiler. Çünkü karışım içerisindeki boşluk oranı az ve asfalt oranı fazla ise sıcaklığın artması ile agregalar genleşir ve trafiğin sıkıştırması sonucunda agregalar dibe gömülerek, asfalt dışarı çıkar. Bu olay kayganlaşmaya sebep olur.

6-) Geçirimsizlik: Bitümlü sıcak karışımın doğal zemine doğru suyu emme özelliğidir. Karışım içerisindeki hava boşluğu arttıkça suyun kaplama tabasından geçme özelliği de artar.

3.6.2. Kaplama tabakası

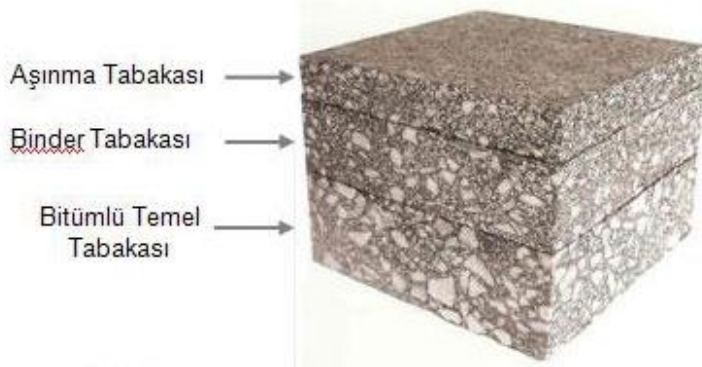
Kaplama tabakası, üstyapının trafik yüküne doğrudan maruz kalan ve suya karşı geçirimsizlik sağlayarak suyun temele ulaşmasını engellerek çökmelere ve çatlama karşı koruyan tabakadır. Ayrıca yolun yüzeyinde pürüzsüzlük sağlayarak sürüş konforu sağlar. Tozlanmayı ve kirliliği azaltır

Bitümlü kaplamalar, temel tabaksının üzerine serilirler. Bunlar yapım ve çalışma ilkeleri bakımından ikiye ayrılır.

- 1) Yüzeysel (sathi) Kaplamalar
- 2) Bitümlü Sıcak Karışımlar (Asfalt betonu)
 - Aşınma Tabakası
 - Binder Tabakası
 - Bitümlü Temel Tabakası

Aşınma tabakası: Aşınma tabakası olarak adlandırılan katman bitümlü sıcak karışımın en üstteki tabakasıdır. Genellikle Binder tabakası üzerinde uygulanmakta olup, kalınlığı 5 ile 6 cm arasında asfalt betonu olarak kullanılır.

Binder tabakası: Binder tabakası olarak adlandırılan katman Bitümlü temel tabakası üzerine uygulanmakta olup 6 ile 8cm kalınlığında asfalt betonu olarak kullanılır.



Şekil 3.34. Asfalt kaplama tabakaları

3.6.3. Temel tabakası

Kaplama tabakasının hemen altında yer alan daneli yapıya sahip ve uygun bağlayıcılar kullanılarak işleme uğramış malzeme tabakasıdır. Bu tabaka, sadece tabaka şeklinde değil, çok katmanlı olarak da uygulanabilir. Temel tabakası, üstyapının yük taşıma kapasitesini arttırabilmek için uygulanır. Ayrıca taşıt ağırlıklarından kaynaklanan kaymalara karşı direnebilme ve dengede kalabilmeyi sağlar. Bunların dışında drenaja yardımcı olmanın yanı sıra donlanmaya karşıda ekstra bir koruma sağlamış olur.

Temel tabakası tipleri:

1. Granüler temel
2. Plentmiks temel
3. Bitümlü temel tabakaları
 - Sıcak karışımlı bitümlü temel
 - Bitümlü karışım makadam temel
 - Penetrasyon makadam temel
4. Çimentolu temel

Granüler temel: Granüler temel olarak adlandırılan temel, sürekli granülometri verecek şekilde kırılmış taştan hazırlanmış olan malzemenin alt temel üzerine uygun oranda su ile bir veya daha çok katman halinde serilmesi ve sıkıştırılması ile meydana gelir.

Plentmiks temel: Plentmix temel olarak adlandırılan temel, en az iki ayrı boyutta olan kaba ve ince agreganın belirtilen sınırlar içinde sürekli granülometri verecek şekilde uygun su oranında plentlerde karıştırılması ve finişerde yola serilmesi ile oluşur. Bu katman alttemel tabaka ile bitümlü sıcak karışım tabakası arasında bağlantıyı sağlayarak yola gelen yükü alttemel tabakasına ileten katmandır. Genelde, 20cm kalınlıkta sıkıştırılarak uygulanmaktadır.

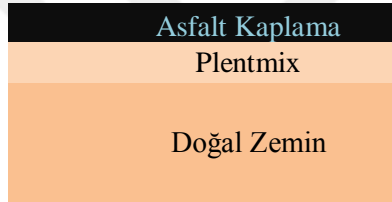
Bitümlü temel tabakaları: Bitümlü temel tabakaları olarak adlandırılan temel tabakası, trafik yoğunlu fazla olan yollarda uygulanan temel tipidir. Bu temel bitümlü sıcak karışım tabakası olup plentmiks temel tabakası üzerine uygulanır. Asfalt çimentosu ve belirli özelliklere sahip agreganın karıştırılmasından sonra serilip sıkıştırılması ile

meydana gelir. Diğer temel tipleri ile kıyaslandığında sıcak karışım bitümlü temeller daha kaliteli bir temel tipidir. Genellikle, trafik yoğunluğunun daha yüksek olduğu şehirlerarası yollarda kullanılmakta olup en az 7 cm, en fazla 18cm olarak uygulanmaktadır.

Çimentolu temel tabakaları: Çimentolu temel tabakaları olarak adlandırılan temel temel tabakası, yüksek trafik yoğunluğu ve taban zemini gevşek olan yollarda tercih edilmektedir. Sürekli gradasyon oluşturacak biçimde kaba ve ince agrega karışımı uygun miktarda çimento ile plentte karıştırılıp serici yardımı ile yola serilmesi ile oluşmaktadır.

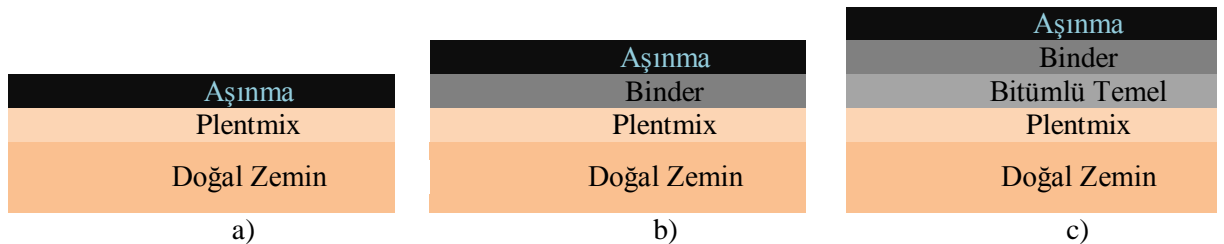
3.6.4. Modele uygulanan üstyapı kesitleri

Bu tez çalışmasında kullanılmakta olan üstyapı Şekil 3.35’de verilmiştir. Bu üst yapıya alternatif olarak yeni üstyapı tabakaları seçilmiştir. Şehir içi yollar mevcut durumda genel olarak bir tabaka asfalt kaplama ve bu kaplama altında temel tabakası olarak düşünülen ve plentmix adında ikinci bir tabakadan oluşmaktadır.



Şekil 3.35. Şehir içi yollarda geleneksel olarak kullanılan üstyapı kesiti

Ayrıca, bu çalışmada Şekil 3.36’da verilen üstyapı kesitleri değerlendirmeye tabi tutulmuştur. Bu kesitlerde; birinci model(Şekil 3.36a) aşınma tabakası, plentmix temel, ikinci model (Şekil 3.36b) aşınma, binder, plentmix, üçüncü model ise (Şekil 3.36c) aşınma, binder, bitümlü temel, plentmix den oluşmaktadır.



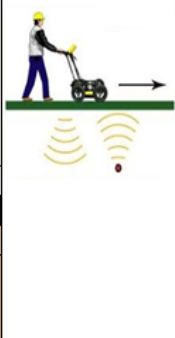
Şekil 3.36. Şehir içi yollarda kullanılan üst yapı kesitleri

3.6.4.1 2 Tabakalı asfalt beton katmanı

İki tabakalı asfalt yol katmanı aşınma tabakası ile plentmix tabakasından oluşur. Şehir içi yollarda ağır taşıt trafiği az olan sokak ve ara yollarda kullanılır. Uygulamalarda aşınma tabakası 5-6 cm aralığında uygulanırken, plentmix tabakası 18-23cm arasında yapılır Türkiye Asfalt Mütahhitleri Derneği 2009; Karayolları Genel Müdürlüğü 2008). YGR'lar asfalt katmanlarının kalınlıklarını tespit ederken her bir

katmanın dielektrik özelliğinden faydalanır. YGR aracılığı ile gönderilen elektromanyetik dalgalar asfalt zemin içinde ilerlerken bir kısmı ara katmandan yansıyor ve ilerlerken bir kısmı da ara katmanlar içinde ilerlemeye devam eder. Yansıyan ve iletilen elektromanyetik dalgaların hızı ve genliklerindeki ani değişimler ilgili katmanın başladığı ve bittiği yer hakkında bilgi edinmesine kolaylık sağlar. Dördüncü bölümde Şekil 3.37 belirtilen Model 1 için 3GHz frekans değerinde farklı kalınlıklarda aşınma tabakası ve plentmix tabakaları oluşturulacak ve elektromanyetik dalgaların bu iki katman arasında nasıl ilerlediği radargram üzerinde gözlenecektir. Radargram üzerindeki elektrik alanın genliklerin ani değişimi katmanların kalınlık tespiti için değerlendirilecektir.

Literatürde kaplama tabakası için genelde bağıl dielektrik sabiti 2-7 Farad/m arasında değişmektedir. Aşınma tabakası için bu değerler karıştırılan agrega ve bitümlü karışımın bağlayıcı özelliğine göre değişmekte olup genelde 2-3 Farad /m arasında değer alır. Plentmix temel tabakası için ise bağıl dielektrik sabiti kullanılan agreganın tane çapına bağlı olarak 7-18 Farad/m arasında değer almıştır. Doğal zemin malzemesi olarak doymuş toprak düşünülmüş olup dielektrik katsayısı Çizelge 3.2’den 20-30 Farad /m arasında değer aldığı görülmüştür. (Beyaz Özdemir 2015; Porubiaková ve Komačka 2015; ASCE vd. 2003; Lau vd. 2013).

Asfalt (üst yapı) Katmanları	GPR uygulama yüksekliği (h)	Katman Kalınlıkları (d)	Katmanların Bağıl Dielektrik Katsayısı (ϵ_r) Farad/m	Model 1	
Hava	50-60 cm	50-60	1	Hava	
Aşınma		5-6	2-3	Aşınma	
Plentmix		18-23	7-18	Plantmix	
Doğal Zemin		∞	20-30	Doğal Zemin	


Şekil 3.37. Geliştirilen Algoritmada Kullanılan Model 1

3.6.4.2 3 Tabakalı asfalt beton katmanı

Üç tabakalı asfalt yol katmanı aşınma tabakası, binder tabakası, plentmix tabakasından oluşur Şekil (3.36b). Şehir içi yollarda ağır taşıt trafiği yoğun olan cadde ve bulvarlarda kullanılır. Uygulamalarda aşınma tabakası 5-6 cm aralığında, binder tabakası 6-8cm aralığında uygulanırken, plentmix tabakası 18-30cm arasında yapılıdır (Türkiye Asfalt Mütahhitleri Derneği 2009; Karayolları Genel Müdürlüğü 2008). Dördüncü bölümde Şekil 3.38’de belirtilen Model 2 için 3 GHz farklı kalınlıklarda aşınma tabakası, binder tabakası ve plentmix tabakaları oluşturulacak ve elektromanyetik dalgaların bu iki katman arasında nasıl ilerlediği radargram üzerinde gözlenecektir. Radargram üzerindeki elektrik alanın genliklerin ani değişimi katmanların kalınlık tespiti için değerlendirilecektir.

Literatürde kaplama tabakası için genelde bağıl dielektrik sabiti 2-7 Farad/m arasında değişmektedir. Aşınma tabakası ve binder tabakası için bu değerler karıştırılan

agrega ve bitümlü karışımın bağlayıcı özelliğine göre değişmekte olup sırası ile genelde 2-3 Farad /m ile 3-5 Farad /m arasında değer alır. Plentmix temel tabakası için ise bağlı dielektrik sabiti kullanılan agreganın cinsine ve tane çapına bağlı olarak 7-18 Farad/m arasında değer almıştır. Doğal zemin malzemesi olarak doygun toprak düşünülmüş olup dielektrik katsayısı Çizelge 3.2'den 20-30 Farad /m arasında değer aldığı görülmüştür. (Beyaz Özdemir 2015; Porubiaková ve Komačka 2015; ASCE vd. 2003; Lau vd. 2013).


Asfalt (üst yapı) Katmanları	GPR uygulama yüksekliği (h)	Katman Kalınlıkları (d)	Katmanların Bağlı Dielektrik Katsayısı (ϵ_r) Farad/m	Model 2	
Hava	50-60 cm	50-60	1	Hava	
Aşınma		5-6	2-3	Aşınma	
Binder		6-8	3-5	Binder	
Plentmix		18-30	7-18	Plantmix	
Doğal Zemin		∞	20-30	Doğal Zemin	

Şekil 3.38. Geliştirilen Algoritmada Kullanılan Model 2

3.6.4.3 4 Tabakalı asfalt beton katmanı

Dört tabakalı asfalt beton katmanı aşınma tabakası, binder tabakası, plentmix tabakasında oluşur Şekil (3.36/c). Şehirlerarası yollarda trafiği yoğun olan otoyollarda kullanılır. Uygulamalarda aşınma tabakası 5-6 cm aralığında, binder tabakası 6-8cm aralığında, bitümlü temel 8-18cm aralığında uygulanırken, plentmix tabakası 20-33cm arasında yapılır (Türkiye Asfalt Müteahhitleri Derneği 2009; Karayolları Genel Müdürlüğü 2008). Dördüncü bölümde Şekil 3.39'de belirtilen Model 3 için 3GHz frekans değerinde farklı kalınlıklarda aşınma tabakası, binder tabakası, bitümlü temel ve plentmix tabakaları oluşturulacak ve elektromanyetik dalgaların bu iki katman arasında nasıl ilerlediği radargram üzerinde gözlenecektir. Radargram üzerindeki elektrik alanın genliklerin ani değişimi katmanların kalınlık tespiti için değerlendirilecektir.

Literatürde kaplama tabakası için genelde bağlı dielektrik sabiti 2-7 Farad/m arasında değişmektedir. Aşınma tabakası, binder tabakası ve bitümlü temel için bu değerler karıştırılan agrega ve bitümlü karışımın bağlayıcı özelliğine göre değişmekte olup sırası ile genelde 2-3 Farad /m, 3-5 Farad /m ve 5-7 Farad/m arasında değer alır. Plentmix temel tabakası için ise bağlı dielektrik sabiti kullanılan agreganın cinsine ve tane çapına bağlı olarak 7-18 Farad/m arasında değer almıştır. Doğal zemin malzemesi olarak doygun toprak düşünülmüş olup dielektrik katsayısı Çizelge 3.2'den 20-30 Farad /m arasında değer aldığı görülmüştür. (Beyaz Özdemir 2015; Porubiaková ve Komačka 2015; ASCE vd. 2003; Lau vd. 2013).

Asfalt (üst yapı) Katmanları	GPR uygulama yüksekliği (h)	Katman Kalınlıkları (d)	Katmanların Bağıl Dielektrik Katsayısı (ϵ_r) Farad/m	Model 3	
Hava	50-60 cm	50-60	1	Hava	
Aşınma		5-6	2-3	Aşınma	
Binder		6-8	3-5	Binder	
Bitümlü Temel		8-18	5-7	Bitümlü Temel	
Plantmix		20-33	7-18	Plantmix	
Doğal Zemin		∞	20-30	Doğal Zemin	

Şekil 3.39. Geliştirilen Algoritmada Kullanılan Model 3

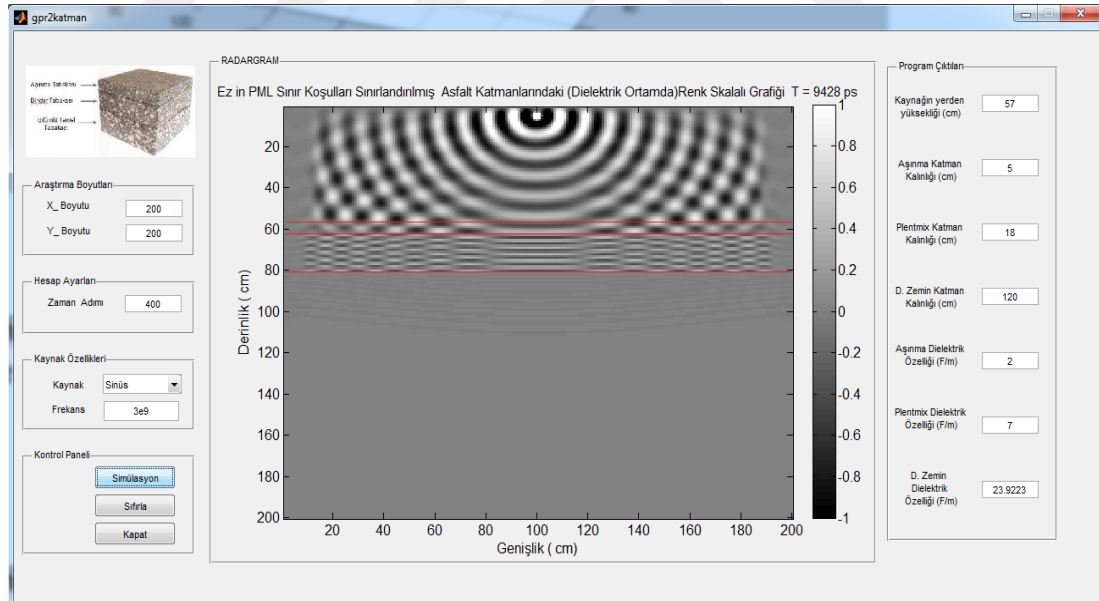
4. BULGULAR ve TARTIŞMA

Bu bölümde sahada yapılmış gerçek ölçümler olmaksızın bitümlü sıcak karışım tabakaları ile yapılan üst yapılara ait senaryolara göre oluşturulmuş sanal katmanlı yapıların benzetim yolu ile kalınlıkları tespit edilmeye çalışılmıştır.

7.1 Farklı Dielektrik Özelliğe Sahip 2 Katmanlı Asfalt beton Kalınlıklarının YGR ile İncelenmesi

7.1.1 Model 1'e ait 1. uygulama

Bu uygulamada, dielektrik özellikleri $\epsilon_{aşınma} = 2$ F/m , $\epsilon_{plentmix} = 7$ F/m ve kalınlıkları $d_{aşınma} = 5$ cm, $d_{plentmix} = 18$ cm olan katman modeli örneği ele alınmıştır. Örnekte, 200x200 cm boyutlarına sahip 2B alan içine 5 cm kalınlığında aşınma tabakası, 18 cm kalınlığında plentmix tabakası yer almaktadır. Bu model uygulanırken, $\Delta x = \Delta y = \Delta s = 0.01$ m ve $\Delta t = 23,57$ ps olarak hesaplanmıştır. Toplam kayıt süresi 9428 ps dir. Alıcı ve verici anten, alanın tam merkezine 1m ye yerleştirilip 2 tabakalı asfalt modelin, tam orta noktasından geçtiği tasarlanarak program çalıştırılmıştır. Antenin merkez frekansı, 3GHz değerine göre hesaplama yapılmıştır. Ortam parametreleri $\epsilon_r = 2$ F/m , $\sigma = 0$ S/m , $\mu_r = 1$ olan aşınma tabakası ile $\epsilon_r = 7$ F/m , $\sigma = 0$ S/m , $\mu_r = 1$ olan plentmix tabakasına ait radargram kesitleri elde edilmiştir. Modelde x doğrultusuna ait radar kesitlerinde kaplama tabakasının ve plentmix tabakasının sınırlarının ortaya koyulduğu görülmektedir (Şekil4.1).

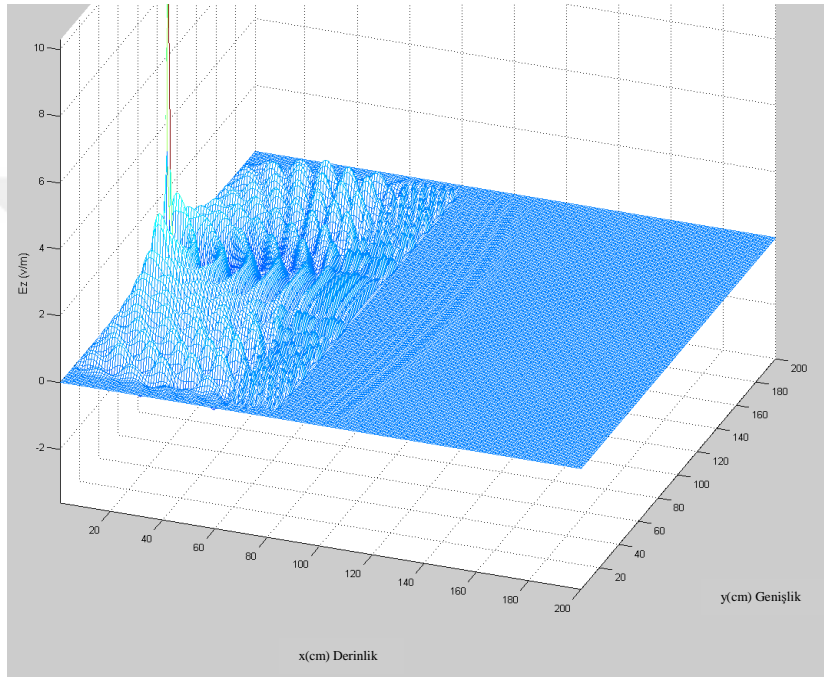


Şekil 4.1. Radargram üzerindeki aşınma ve plentmix tabaka kalınlıkları

Aşınma tabakası 57cm, plentmix tabakası 62cm, doğal zemin ise 81cm derinlikten itibaren başlamıştır. Elektrik alan her ne kadar yaklaşık 110 cm'e kadar ilerlediği gözükse de hücre boyutumuzdan dolayı geri kalan kısmı içinde aynı ortam olarak görmektedir. Yani doğal zemin kalınlığı 200-81=119cm olarak değerlendirilmiştir. Sınırlara bağlı olarak her bir katmanın kalınlıkları radargram üzerinde görünmektedir. Kaynak olarak sinüs dalgası kullanılmış olup, yerden 57cm yükseklikte uygulandığı anlaşılmıştır. Geliştirilen MATLAB algoritmasından

hesaplanan aşınma tabakasının ve plentmix tabakasının, sırası ile 5cm ve 18cm olması gerekirken radargram üzerinde 5 ve 19 cm olarak tespit edilmiştir. Plentmix tabakasında 1cm lik sapma söz konusudur. Buda 5,56% bağıl hata oranına karşılık gelmektedir.

Ayrıca elektrik alanın düşey bileşeni, E_z 'in her katmandaki genlik farkı net olarak gözükmemekte olup 81 cm sonra derine doğru ilerledikçe zayıfladığı görülmüştür (Şekil 4.2). Yutucu sınır koşulu olarak, MUK sınırlardan gelen yalancı yansımaları engellemiş, radargram üzerindeki elektrik alanın doğru bir şekilde gözlemlenmesini sağlamıştır. Konum değerleri için verilen aşınma ve plentmix tabakalarının kalınlık seviyesi radargram kesitlerinde santimetrelilik hatalarla uyumlu olduğu gözlenmiştir.



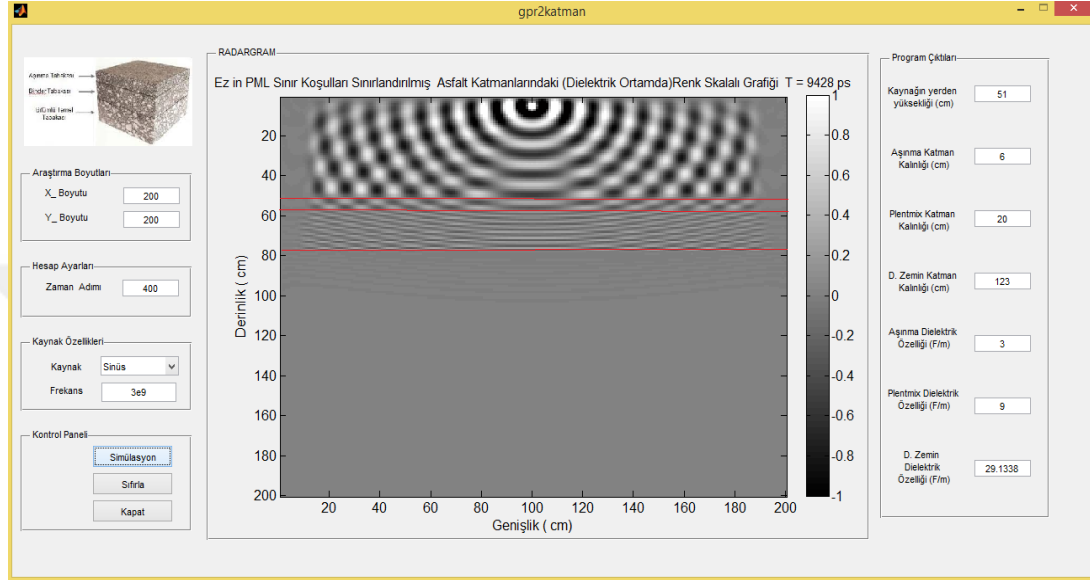
Şekil 4.2. E_z 'in her katmandaki genliği

Modelimizdeki EM radar sinyali yeraltındaki katmanlarda derine doğru gittikçe bağıl dielektrik geçirgenlik katsayısı artışı ile karşılaştığından arayüzelerde dar açıyla kırılmıştır. Radar dalgaları daha yüksek bağıl dielektrik geçirgenlik ortamlarına hareket ettikçe odaklanma etkisi de giderek arttığı görülmüştür. Buna ek olarak derinliğin artmasıyla birlikte bağıl dielektrik geçirgenlik katsayılarındaki artış, radar dalgalarının ilerleme hızının azalmasına neden olmuştur. Merkez frekanstan farklı olarak yüksek frekans seçildiğinde ise derine doğru ilerledikçe dalga boyu küçülmüş ve bu elektrik alanın yavaşlamasına kararlılık şartlarının bozulduğu görülmüştür.

7.1.2 Model 1'e ait 2. uygulama

Bu uygulamada dielektrik özellikleri $\mathcal{E}_{aşınma} = 3 \text{ F/m}$, $\mathcal{E}_{plentmix} = 9 \text{ F/m}$ ve kalınlıkları $d_{aşınma} = 6 \text{ cm}$ ve $d_{plentmix} = 20 \text{ cm}$ olan katman modeli örneği ele alınmıştır. Örnekte, 200x200 cm boyutlarına sahip 2B alan içine 6 cm kalınlığında aşınma tabakası, 20 cm kalınlığında plentmix tabakası yer almaktadır. Bu model uygulanırken, $\Delta x = \Delta y = \Delta s = 0.01 \text{ m}$ ve $\Delta t = 23,57 \text{ ps}$ olarak hesaplanmıştır. Toplam kayıt süresi 9428 ps dir. Alıcı verici anten, alanın tam merkezine 1m ye yerleştirilip 2 tabakalı asfalt

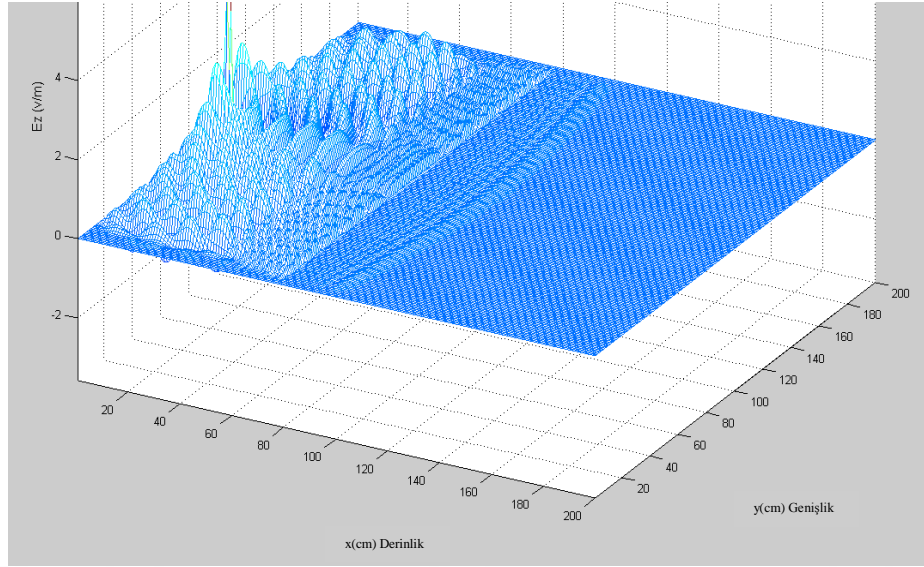
modelin, tam merkez noktasından geçtiği tasarlanarak program çalıştırılmıştır. Antenin merkez frekansı, 3GHz değerine göre hesaplama yapılmıştır. Ortam parametreleri $\epsilon_r=3$ F/m , $\sigma=0$ S/m , $\mu_r=1$ olan aşınma tabakası ile $\epsilon_r=9$ F/m , $\sigma=0$ S/m , $\mu_r=1$ olan plentmix tabakasına ait radargram kesitleri elde edilmiştir. Modelde x doğrultusuna ait radar kesitlerinde kaplama tabakasının ve plentmix tabakasının sınırlarının ortaya koyulduğu görülmektedir (Şekil 4.3) .



Şekil 4.3. Radargram üzerindeki aşınma ve plentmix tabaka kalınlıkları

Aşınma tabakası 51cm, plentmix tabakası 57cm, doğal zemin ise 77 cm derinlikten itibaren başlamıştır. Elektrik alan her ne kadar yaklaşık 110 cm e kadar ilerlediği gözükse de hücre boyutumuzdan dolayı geri kalan kısmı da aynı ortam olarak görmektedir. Yani doğal zemin kalınlığı $200-77=117$ cm olarak değerlendirilmiştir. Sınırlara bağlı olarak ta her bir katmanın kalınlıkları radargram üzerinde görünmektedir. Kaynak olarak sinüs dalgası kullanılmış olup , yerden 51cm yükseklikte uygulandığı anlaşılmıştır. Geliştirilen MATLAB algoritmasından hesaplanan aşınma tabakasının ve plentmix tabakasının radargram üzerinde gözlenen değerlerle uyduğu görülmüş olup sırası ile 6cm ve 20cm olarak tespit edilmiştir.

Ayrıca elektrik alanın düşey bileşeni , Ez'in her katmandaki genlik farkı net olarak gözükmemekte olup 77 cm sonra derine doğru ilerledikçe zayıfladığı görülmüştür (Şekil 4.4). Yutucu sınır koşulu olarak , MUK sınırlardan gelen yalancı yansımaları engellemiş , radargram üzerindeki elektrik alanın doğru bir şekilde gözlemlenmesini sağlamıştır. Konum değerleri için verilen aşınma ve plentmix tabakalarının kalınlık seviyesi radargram kesitlerinde %0,0 hata ile birlikte uyumlu olduğu gözlenmektedir .

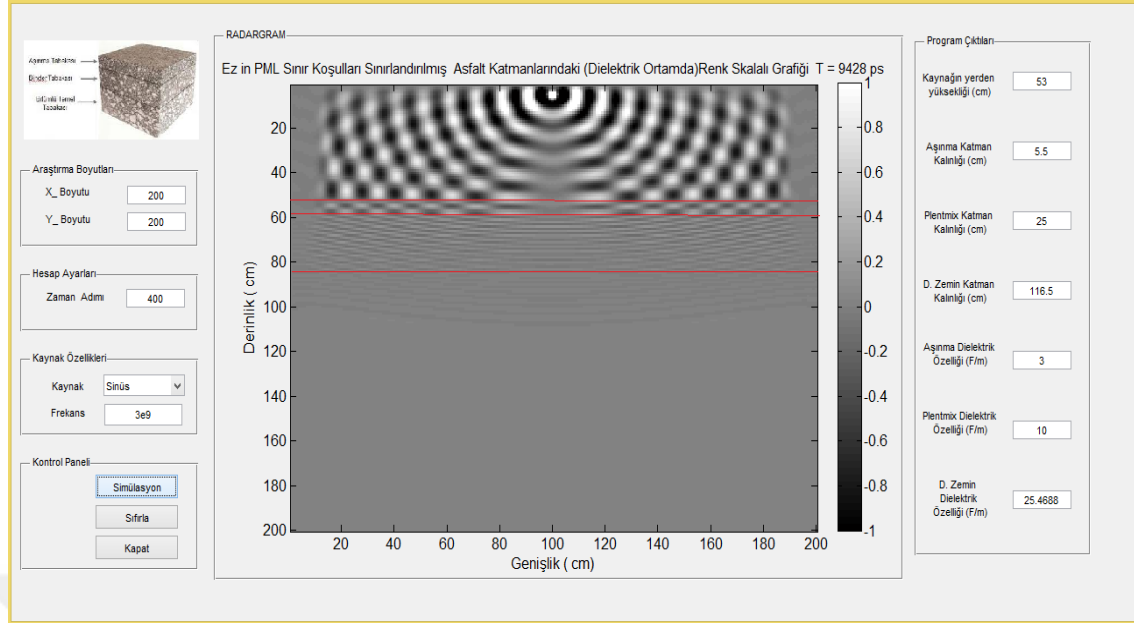


Şekil 4.4. Ez'in her katmandaki genliği

Modelimizdeki EM radar sinyali yeraltındaki katmanlarda derine doğru gittikçe bağıl dielektrik geçirgenlik katsayısı artışı ile karşılaştığından arayüzelerde dar açıyla kırılmıştır. Radar dalgaları daha yüksek bağıl dielektrik geçirgenlik ortamlarına hareket ettikçe odaklanma etkisi de giderek arttığı görülmüştür. Buna ek olarak derinliğin artmasıyla birlikte bağıl dielektrik geçirgenlik katsayılarındaki artış, radar dalgalarının ilerleme hızının azalmasına neden olmuştur. Merkez frekanstan farklı olarak yüksek frekans seçildiğinde ise derine doğru ilerledikçe dalga boyu küçülmüş ve bu elektrik alanının yavaşlamasına kararlılık şartlarının bozulduğu görülmüştür.

7.1.3 Model 1'e ait 3. uygulama

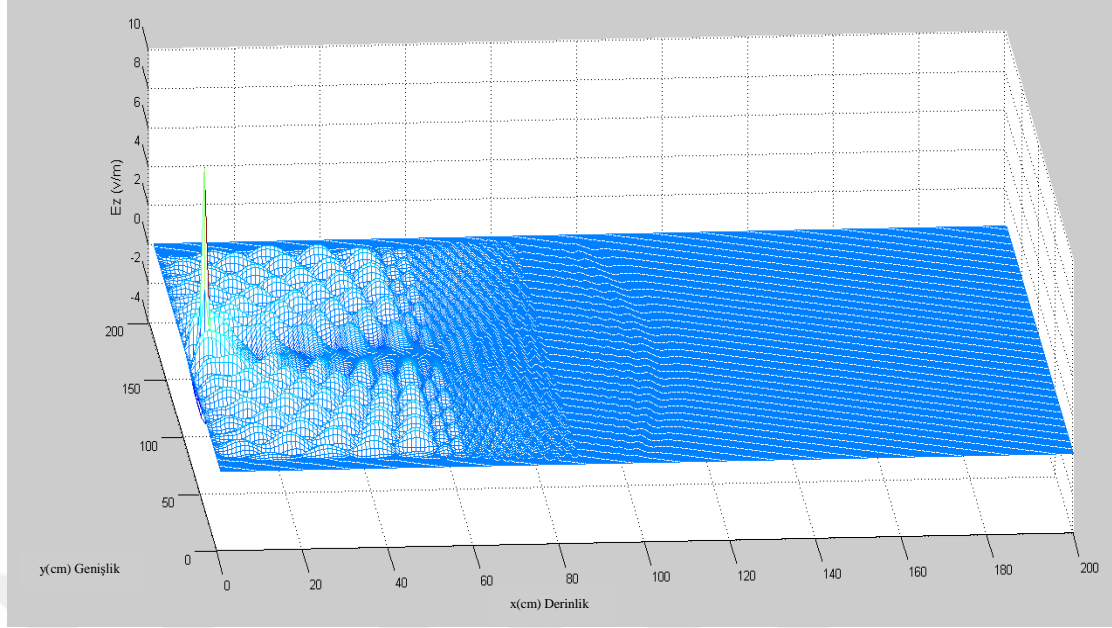
Bu uygulamada dielektrik özellikleri $\mathcal{E}_{aşınma} = 3 \text{ F/m}$, $\mathcal{E}_{plentmix} = 10 \text{ F/m}$ ve kalınlıkları $d_{aşınma} = 5.5 \text{ cm}$ ve $d_{plentmix} = 25 \text{ cm}$ olan katman modeli örneği ele alınmıştır. Örnekte, 200x200 cm boyutlarına sahip 2B alan içine 5,5 cm kalınlığında aşınma tabakası, 25 cm kalınlığında plentmix tabakası yer almaktadır. Bu model uygulanırken , $\Delta x = \Delta y = \Delta s = 0.01 \text{ m}$ ve $\Delta t = 23,57 \text{ ps}$ olarak hesaplanmıştır. Toplam kayıt süresi 9428 ps dir. Alıcı verici anten, alanın tam merkezine 1 m ye yerleştirilip 2 tabakalı asfalt modelin, tam merkez noktasından geçtiği tasarlanarak program çalıştırılmıştır. Antenin merkez frekansı, 3GHz değerine göre hesaplama yapılmıştır. Ortam parametreleri $\epsilon_r = 3 \text{ F/m}$, $\sigma = 0 \text{ S/m}$, $\mu_r = 1$ olan aşınma tabakası ile $\epsilon_r = 10 \text{ F/m}$, $\sigma = 0 \text{ S/m}$, $\mu_r = 1$ olan plentmix tabakasına ait radargram kesitleri elde edilmiştir. Modelde x doğrultusuna ait radar kesitlerinde kaplama tabakasının ve plentmix tabakasının sınırlarının ortaya koyulduğu görülmektedir (Şekil 4.5).



Şekil 4.5. Radargram üzerindeki aşınma ve plentmix tabaka kalınlıkları.

Aşınma tabakası 53cm, plentmix tabakası 58cm, doğal zemin ise 82 cm derinlikten itibaren başlamıştır. Elektrik alan her ne kadar yaklaşık 110 cm e kadar ilerlediği gözükse de hücre boyutumuzdan dolayı geri kalan kısmını da aynı ortam olarak görmektedir. Yani doğal zemin kalınlığı $200-83=117$ cm olarak değerlendirilmiştir. Sınırlara bağlı olarak ta her bir katmanın kalınlıkları radargram üzerinde görülmektedir. Kaynak olarak sinüs dalgası kullanılmış olup, yerden 53cm yükseklikte uygulandığı anlaşılmıştır. Geliştirilen MATLAB algoritmasından hesaplanan aşınma tabakasının ve plentmix tabakasının, sırası ile 5.5 cm ve 25cm olması gerekirken radargram üzerinde 5 ve 24 cm olarak tespit edilmiştir. Aşınma tabakasında, 0,5 cm, Plentmix tabakasında 1cm lik sapma söz konusudur. Bu, aşınmada tabakasında 9,09% , plentmix tabakasında 4,00% bağıl hata oranına karşılık gelmektedir.

Ayrıca elektrik alanın düşey bileşeni, Ez'in her katmandaki genlik farkı net olarak gözükmemekte olup 82 cm sonra derine doğru ilerledikçe zayıfladığı görülmüştür (Şekil 4.6). Yutucu sınır koşulu olarak, MUK sınırlardan gelen yalancı yansımaları engellemiş, radargram üzerindeki elektrik alanının doğru bir şekilde gözlemlenmesini sağlamıştır. Konum değerleri için verilen aşınma ve plentmix tabakalarının kalınlık seviyesi radargram kesitlerinde santimetrelilik hatalarla uyumlu olduğu gözlenmiştir.



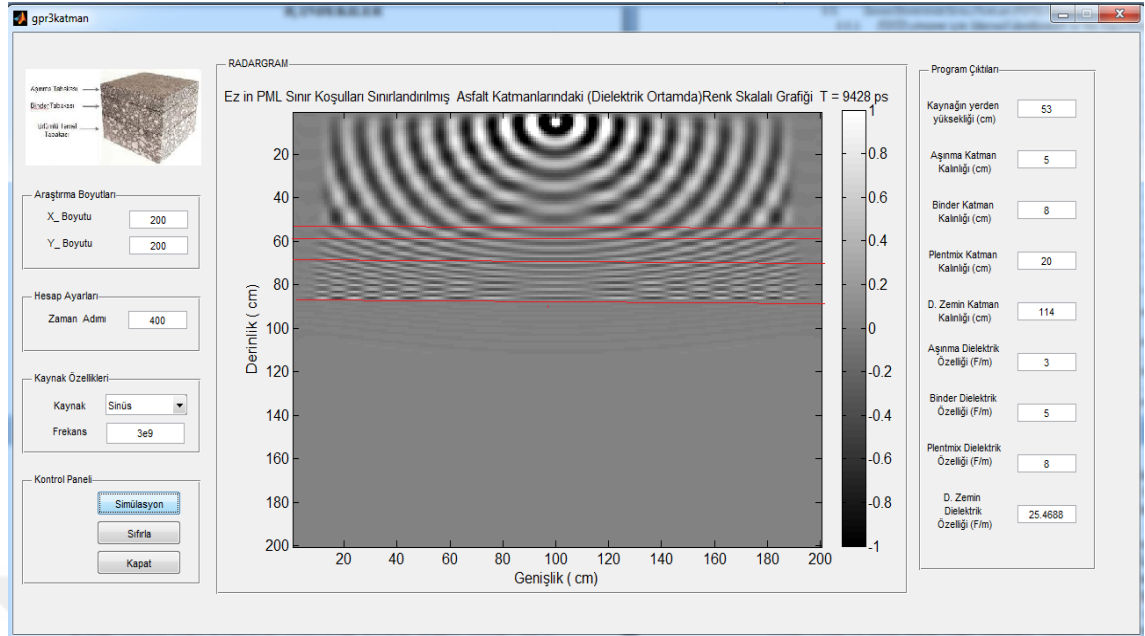
Şekil 4.6. Ez'in her katmandaki genişliği

Modelimizdeki EM radar sinyali yeraltındaki katmanlarda derine doğru gittikçe bağıl dielektrik geçirgenlik katsayısı artışı ile karşılaştığından arayüzelerde dar açıyla kırılmıştır. Radar dalgaları daha yüksek bağıl dielektrik geçirgenlik ortamlarına hareket ettikçe odaklanma etkisi de giderek arttığı görülmüştür. Buna ek olarak derinliğin artmasıyla birlikte bağıl dielektrik geçirgenlik katsayılarındaki artış, radar dalgalarının ilerleme hızının azalmasına neden olmuştur. Merkez frekanstan farklı olarak yüksek frekans seçildiğinde ise derine doğru ilerledikçe dalga boyu küçülmüş ve bu elektrik alanının yavaşlamasına kararlılık şartlarının bozulduğu görülmüştür.

7.2 Farklı Dielektrik Özelliğe Sahip 3 Katmanlı Asfalt beton Kalınlıklarının YGR ile İncelenmesi

7.2.1 Model 2'e ait 1. uygulama

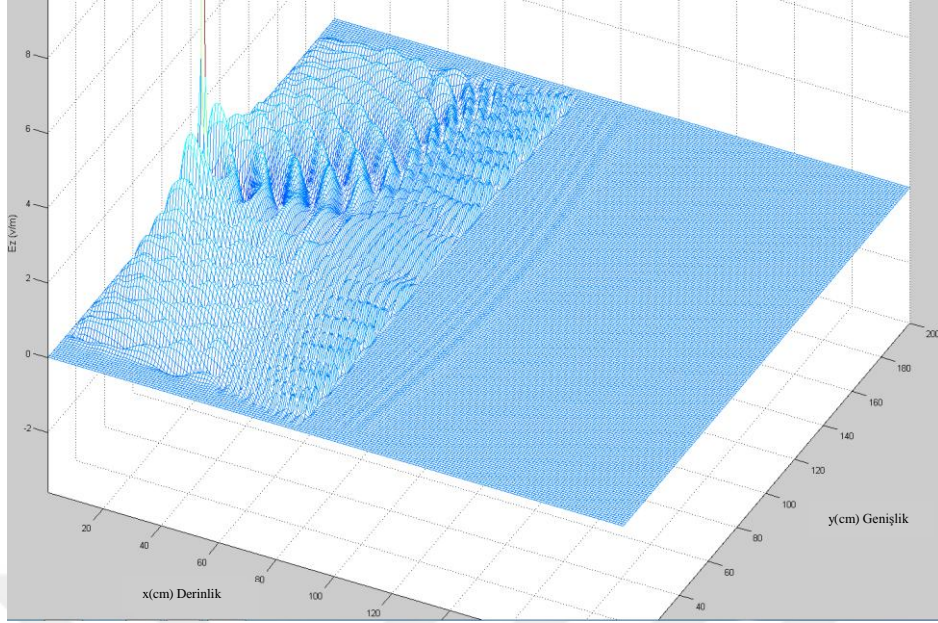
Bu uygulamada, dielektrik Özellikleri $\epsilon_{aşınma} = 3$ F/m , $\epsilon_{binder} = 5$ F/m , $\epsilon_{plentmix} = 8$ F/m ve kalınlıkları $d_{aşınma} = 5$ cm, $d_{binder} = 8$ cm ve $d_{plentmix} = 20$ cm olan katman modeli örneği ele alınmıştır. Örnekte, 200x200 cm boyutlarına sahip 2B alan içine 5 cm kalınlığında aşınma tabakası, 8 cm kalınlığında binder tabakası, 20cm kalınlığında plentmix tabakası yer almaktadır. Bu model uygulanırken, $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 0.01$ m ve $\Delta t = 23,57$ ps olarak hesaplanmıştır. Toplam kayıt süresi 9428 ps dir. Alıcı verici anten, alanın tam merkezine 1m ye yerleştirilip 3 tabakalı asfalt modelin, tam merkez noktasından geçtiği tasarlanarak program çalıştırılmıştır. Antenin merkez frekansı, 3GHz değerine göre hesaplama yapılmıştır. Ortam parametreleri $\epsilon_r = 3$ F/m , $\sigma = 0$ S/m , $\mu_r = 1$ olan aşınma tabakası , $\epsilon_r = 5$ F/m , $\sigma = 0$ S/m , $\mu_r = 1$ olan binder tabakası , $\epsilon_r = 8$ F/m , $\sigma = 0$ S/m , $\mu_r = 1$ olan plentmix tabakasına ait radargram kesitleri elde edilmiştir. Modelde x doğrultusuna ait radar kesitlerinde kaplama tabakalarından aşınma ve binder tabakasının ve temel tabakalarından plentmix tabakasının sınırlarının ortaya koyulduğu görülmektedir (Şekil 4.7).



Şekil 4.7. Radargram üzerindeki aşınma, binder ve plentmix tabaka kalınlıkları

Aşınma tabakası 54 cm, binder tabakası 59, plentmix tabakası 68 cm, doğal zemin ise 87cm derinlikten itibaren başlamıştır. Elektrik alan her ne kadar yaklaşık 115 cm e kadar ilerlediği gözükse de hücre boyutumuzdan dolayı geri kalan kısmını da aynı ortam olarak görmektedir. Yani doğal zemin kalınlığı $200-87=113$ cm olarak değerlendirilmiştir. Sınırlara bağlı olarak da her bir katmanın kalınlıkları radargram üzerinde görünmektedir. Kaynak olarak sinüs dalgası kullanılmış olup, yerden 54cm yükseklikte uygulandığı anlaşılmıştır. Geliştirilen MATLAB algoritmasından hesaplanan aşınma, binder ve plentmix tabakasının, sırası ile 5 cm, 8cm ve 20 cm olması gerekirken radargram üzerinde 5cm, 9cm ve 19 olarak tespit edilmiştir. Binder tabakasında 1 cm, Plentmix tabakasında 1cm lik sapma söz konusudur. Bu, binder tabakasında 12,5% , plentmix tabakasında 5,00% bağıl hata oranına karşılık gelmektedir.

Ayrıca elektrik alanın düşey bileşeni, Ez'in her katmandaki genlik farkı net olarak gözükmemekte olup 87 cm sonra derine doğru ilerledikçe zayıfladığı görülmüştür (Şekil 4.8). Yutucu sınır koşulu olarak, MUK sınırlardan gelen yalancı yansımaları engellemiş, radargram üzerindeki elektrik alanının doğru bir şekilde gözlemlenmesini sağlamıştır. Konum değerleri için verilen aşınma ve binder tabakalarının kalınlık seviyesi radargram kesitlerinde santimetrelik hatalarla birlikte uyumlu olduğu gözlenmektedir.

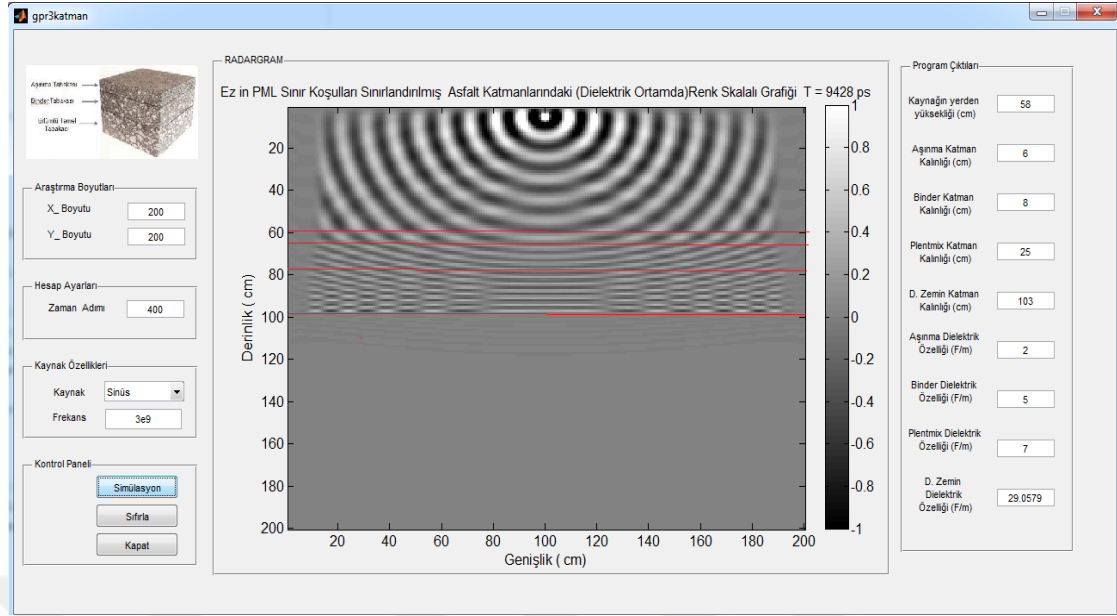


Şekil 4.8. Ez'in her katmandaki genliği

Modelimizdeki EM radar sinyali yeraltındaki katmanlarda derine doğru gittikçe bağıl dielektrik geçirgenlik katsayısı artışı ile karşılaştığından arayüzelerde dar açıyla kırılmıştır. Radar dalgaları daha yüksek bağıl dielektrik geçirgenlik ortamlarına hareket ettikçe odaklanma etkisi de giderek arttığı görülmüştür. Buna ek olarak derinliğin artmasıyla birlikte bağıl dielektrik geçirgenlik katsayılarındaki artış, radar dalgalarının ilerleme hızının azalmasına neden olmuştur. Merkez frekanstan farklı olarak yüksek frekans seçildiğinde ise derine doğru ilerledikçe dalga boyu küçülmüş ve bu elektrik alanın yavaşlamasına kararlılık şartlarının bozulduğu görülmüştür.

7.2.2 Model 2'e ait 2. uygulama

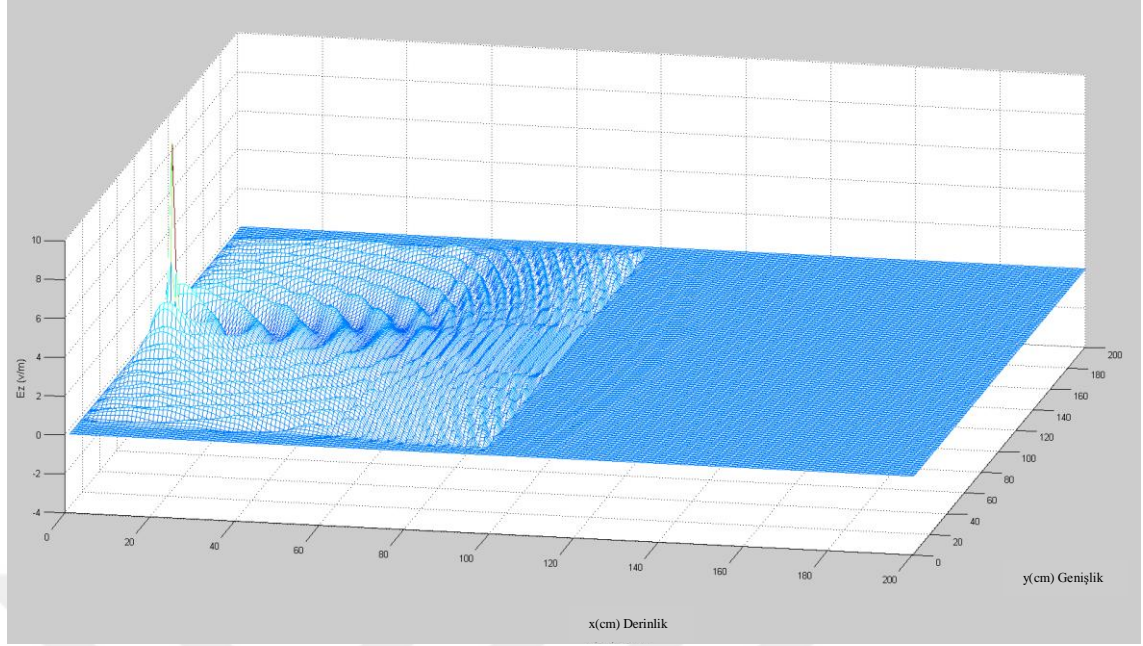
Bu uygulamada dielektrik özellikleri $\mathcal{E}_{aşınma} = 2 \text{ F/m}$, $\mathcal{E}_{binder} = 5 \text{ F/m}$, $\mathcal{E}_{plentmix} = 7 \text{ F/m}$ ve kalınlıkları $d_{aşınma} = 6 \text{ cm}$, $d_{binder} = 8 \text{ cm}$ ve $d_{plentmix} = 25 \text{ cm}$ olan katman modeli ele alınmıştır. Örnekte, 200x200 cm boyutlarına sahip 2B alan içine 6 cm kalınlığında aşınma tabakası, 8 cm kalınlığında binder tabakası, 30cm kalınlığında plentmix tabakası yer almaktadır. Bu model uygulanırken, $\Delta x = \Delta y = \Delta s = 0.01 \text{ m}$ ve $\Delta t = 23,57 \text{ ps}$ olarak hesaplanmıştır. Toplam kayıt süresi 9428 ps dir. Alıcı verici anten, alanın tam merkezine 1m ye yerleştirilip 3 tabakalı asfalt modelin, tam merkez noktasından geçtiği tasarlanarak program çalıştırılmıştır. Antenin merkez frekansı, 3GHz değerine göre hesaplama yapılmıştır. Ortam parametreleri $\epsilon_r = 2 \text{ F/m}$, $\sigma = 0 \text{ S/m}$, $\mu_r = 1$ olan aşınma tabakası, $\epsilon_r = 5 \text{ F/m}$, $\sigma = 0 \text{ S/m}$, $\mu_r = 1$ olan binder tabakası, $\epsilon_r = 7 \text{ F/m}$, $\sigma = 0 \text{ S/m}$, $\mu_r = 1$ olan plentmix tabakasına ait radargram kesitleri elde edilmiştir. Modelde x doğrultusuna ait radar kesitlerinde kaplama tabakalarından aşınma ve binder tabakasının ve temel tabakalarından plentmix tabakasının sınırlarının ortaya koyulduğu görülmektedir (Şekil.4.9).



Şekil 4.9. Radargram üzerindeki aşınma, binder ve plentmix tabaka kalınlıkları

Aşınma tabakası 59cm, binder tabakası 65, plentmix tabakası 77cm, doğal zemin ise 98 derinlikten itibaren başlamıştır. Elektrik alan her ne kadarda yaklaşık 118 cm e kadar ilerlediği gözükse de hücre boyutumuzdan dolayı geri kalan kısmı içinde aynı ortam olarak görmektedir. Yani doğal zemin kalınlığı $200-98=102$ cm olarak değerlendirilmiştir. Sınırlara bağlı olarak da her bir katmanın kalınlıkları radargram üzerinde görünmektedir. Kaynak olarak sinüs dalgası kullanılmış olup, yerden 59cm yükseklikte uygulandığı anlaşılmıştır. Geliştirilen MATLAB algoritmasından hesaplanan aşınma, binder ve plentmix tabakasının, sırası ile 6 cm, 8cm ve 25 cm olması gerekirken radargram üzerinde 6cm, 12cm ve 21cm olarak tespit edilmiştir. Binder tabakasında 4 cm, Plentmix tabakasında 4cm lik sapma söz konusudur. Bu binder tabakasında 50% , plentmix tabakasında 16,00% bağıl hata oranına karşılık gelmektedir.

Ayrıca elektrik alanın düşey bileşeni, Ez'in her katmandaki genlik farkı net olarak gözükmemekte olup 98 sonra derine doğru ilerledikçe zayıfladığı görülmüştür (Şekil 4.10). Bu sönümlenme binder ve plentmix tabakasının radargram üzerinde kalınlığını düşürerek hata payını arttırmıştır. Yutucu sınır koşulu olarak, MUK sınırlardan gelen yalancı yansımaları engellemiş, radargram üzerindeki elektrik alanın doğru bir şekilde gözlemlenmesini sağlamıştır. Konum değerleri için verilen aşınma ve binder tabakalarının kalınlık seviyesi radargram kesitlerinde santimetrelilik hatalarla birlikte uygun olmadıkları gözlenmektedir.

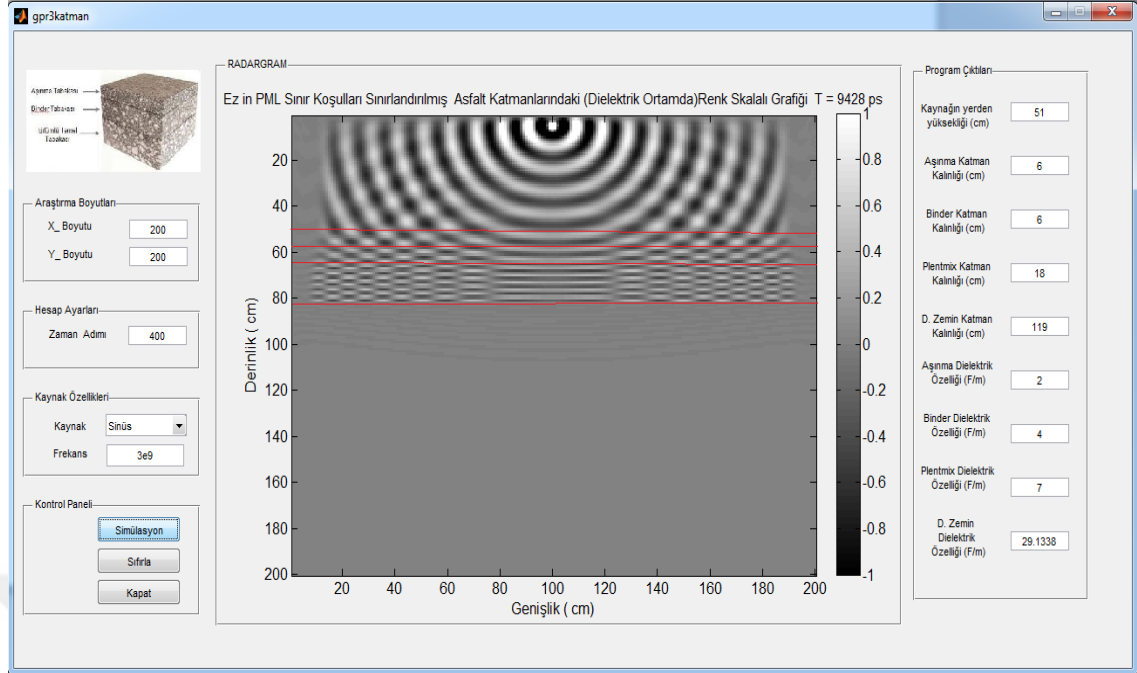


Şekil 4.10. Ez'in her katmandaki genliği

Modelimizdeki EM radar sinyali yeraltındaki katmanlarda derine doğru gittikçe bağıl dielektrik geçirgenlik katsayısı artışı ile karşılaştığından arayüzelerde dar açıyla kırılmıştır. Radar dalgaları daha yüksek bağıl dielektrik geçirgenlik ortamlarına hareket ettikçe odaklanma etkisi de giderek arttığı görülmüştür. Buna ek olarak derinliğin artmasıyla birlikte bağıl dielektrik geçirgenlik katsayılarındaki artış, radar dalgalarının ilerleme hızının azalmasına neden olmuştur. Merkez frekanstan farklı olarak yüksek frekans seçildiğinde ise derine doğru ilerledikçe dalga boyu küçülmüş ve bu elektrik alanının yavaşlamasına kararlılık şartlarının bozulduğu görülmüştür.

7.2.3 Model 2'e ait 3. uygulama

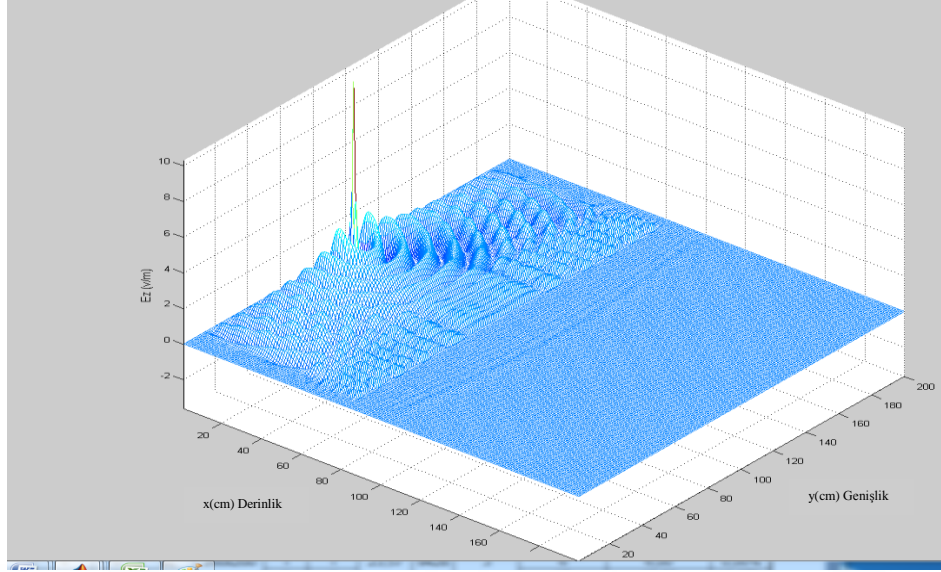
Bu uygulamada dielektrik özellikleri $\epsilon_{aşınma} = 2 \text{ F/m}$, $\epsilon_{binder} = 4 \text{ F/m}$, $\epsilon_{plentmix} = 7 \text{ F/m}$ ve kalınlıkları $d_{aşınma} = 6 \text{ cm}$, $d_{binder} = 6 \text{ cm}$ ve $d_{plentmix} = 18 \text{ cm}$ olan katman modeli örneği ele alınmıştır. Örnek, $200 \times 200 \text{ cm}$ boyutlarına sahip 2B alan içine 6 cm kalınlığında aşınma tabakası, 6 cm kalınlığında binder tabakası, 18 cm kalınlığında plentmix tabakası yer almaktadır. Bu model uygulanırken, $\Delta x = \Delta y = \Delta s = 0.01 \text{ m}$ ve $\Delta t = 23,57 \text{ ps}$ olarak hesaplanmıştır. Toplam kayıt süresi 9428 ps dir. Alıcı verici anten, alanın tam merkezine 1 m ye yerleştirilip 3 tabakalı asfalt modelin, tam merkez noktasından geçtiği tasarlanarak program çalıştırılmıştır. Antenin merkez frekansı, 3 GHz değerine göre hesaplama yapılmıştır. Ortam parametreleri $\epsilon_r = 2 \text{ F/m}$, $\sigma = 0 \text{ S/m}$, $\mu_r = 1$ olan aşınma tabakası, $\epsilon_r = 4 \text{ F/m}$, $\sigma = 0 \text{ S/m}$, $\mu_r = 1$ olan binder tabakası, $\epsilon_r = 7 \text{ F/m}$, $\sigma = 0 \text{ S/m}$, $\mu_r = 1$ olan plentmix tabakasına ait radargram kesitleri elde edilmiştir. Modelde x doğrultusuna ait radar kesitlerinde kaplama tabakalarından aşınma ve binder tabakasının ve temel tabakalarından plentmix tabakasının sınırlarının ortaya koyulduğu görülmektedir (Şekil 4.11).



Şekil 4.11. Radargram üzerindeki aşınma, binder ve plentmix tabaka kalınlıkları

Aşınma tabakası 51 cm, binder tabakası 58, plentmix tabakası 64 cm, doğal zemin ise 82cm derinlikten itibaren başlamıştır. Elektrik alan her ne kadarda yaklaşık 105 cm e kadar ilerlediği gözükse de hücre boyutumuzdan dolayı geri kalan kısmı içinde aynı ortam olarak görmektedir. Yani doğal zemin kalınlığı $200-82=118$ cm olarak değerlendirilmiştir. Sınırlara bağlı olarak da her bir katmanın kalınlıkları radargram üzerinde görünmektedir. Kaynak olarak sinüs dalgası kullanılmış olup, yerden 51cm yükseklikte uygulandığı anlaşılmıştır. Geliştirilen MATLAB algoritmasından hesaplanan aşınma, binder ve plentmix tabakasının, sırası ile 6 cm, 6cm ve 18 cm olması gerekirken radargram üzerinde 7 cm, 6cm ve 18cm olarak tespit edilmiştir. Aşınma tabakasında 1 cm lik sapma söz konusudur. Bu, aşınmada tabakasında 16,67% bağıl hata oranına karşılık gelmektedir.

Ayrıca elektrik alanın düşey bileşeni, Ez'in her katmandaki genlik farkı net olarak gözükmekte olup 82 sonra derine doğru ilerledikçe zayıfladığı görülmüştür (Şekil 4.12). Yutucu sınır koşulu olarak, MUK sınırlardan gelen yalancı yansımaları engellemi, radargram üzerindeki elektrik alanının doğru bir şekilde gözlemlenmesini sağlamıştır. Konum değerleri için verilen aşınma, binder ve plentmix tabakası derinlik seviyesi radar kesitlerinde santimetrelilik hatalarla birlikte uyumlu olduğu gözlenmektedir.



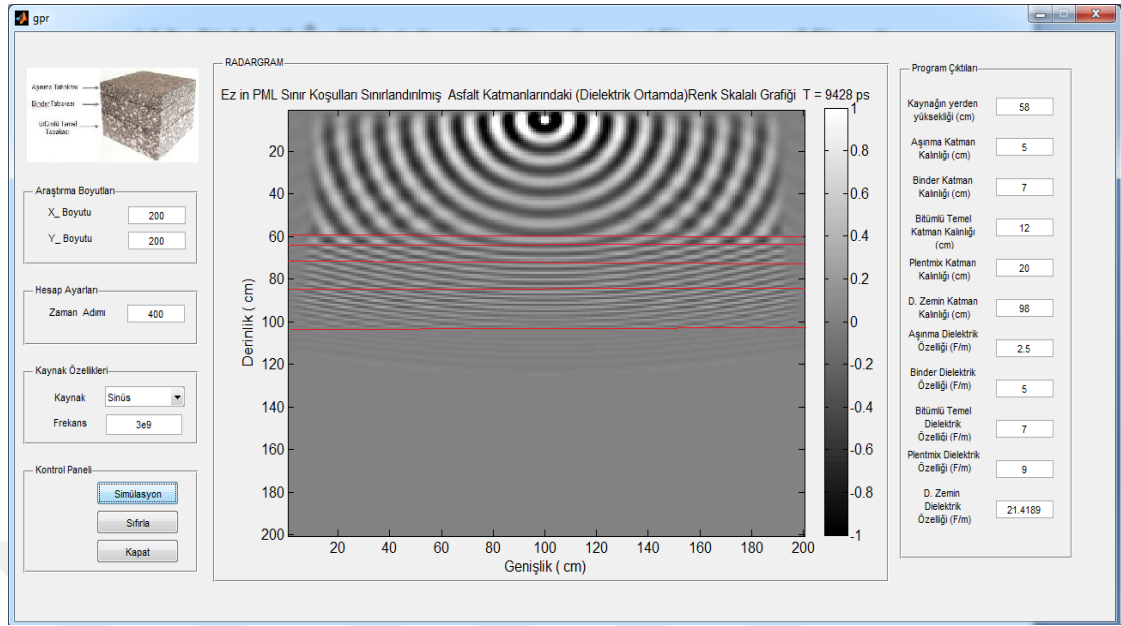
Şekil 4.12. Ez'in her katmandaki genişliği

Modelimizdeki EM radar sinyali yeraltındaki katmanlarda derine doğru gittikçe bağıl dielektrik geçirgenlik katsayısı artışı ile karşılaştığından arayüzeylerde dar açıyla kırılmıştır. Radar dalgaları daha yüksek bağıl dielektrik geçirgenlik ortamlarına hareket ettikçe odaklanma etkisi de giderek arttığı görülmüştür. Buna ek olarak derinliğin artmasıyla birlikte bağıl dielektrik geçirgenlik katsayılarındaki artış, radar dalgalarının ilerleme hızının azalmasına neden olmuştur. Merkez frekanstan farklı olarak yüksek frekans seçildiğinde ise derine doğru ilerledikçe dalga boyu küçülmüş ve bu elektrik alanının yavaşlamasına kararlılık şartlarının bozulduğu görülmüştür.

7.3 Farklı Dielektrik Özelliğe Sahip 4 Katmanlı Asfalt beton Kalınlıklarının YGR ile İncelenmesi

7.3.1 Model 3'e ait 1. uygulama

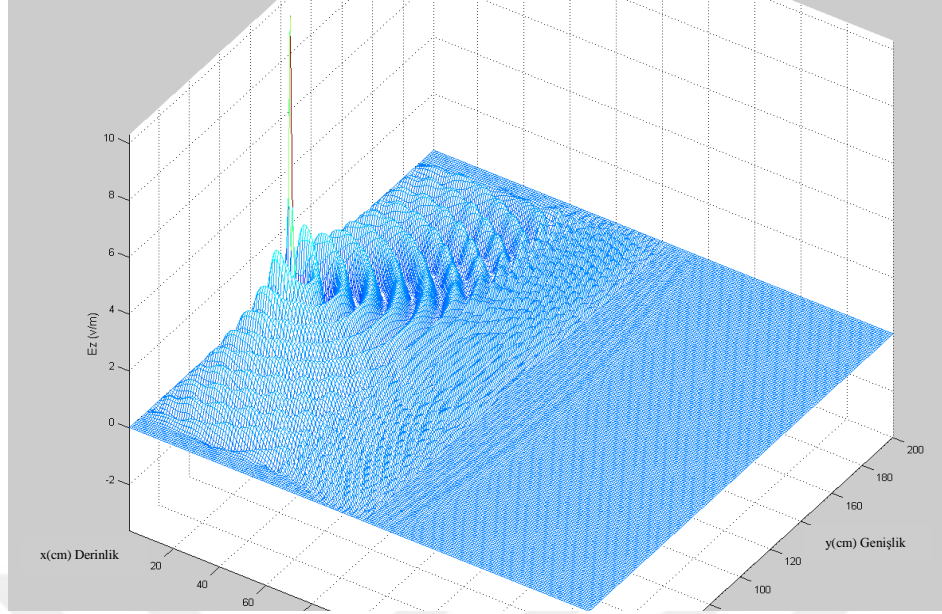
Bu uygulamada, dielektrik özellikleri $\mathcal{E}_{aşınma} = 2,5 \text{ F/m}$, $\mathcal{E}_{binder} = 5 \text{ F/m}$, $\mathcal{E}_{B.temel} = 7 \text{ F/m}$, $\mathcal{E}_{plentmix} = 9 \text{ F/m}$ ve kalınlıkları $d_{aşınma} = 5 \text{ cm}$, $d_{binder} = 7 \text{ cm}$, $d_{B.temel} = 12 \text{ cm}$, $d_{plentmix} = 20 \text{ cm}$ olan katman modeli örneği ele alınmıştır. Örnekte, 200x200 cm boyutlarına sahip 2B alan içine 5 cm kalınlığında aşınma tabakası, 7 cm kalınlığında binder tabakası, 12 cm kalınlığında bitümlü temel tabakası ve 20cm kalınlığında plentmix tabakası yer almaktadır. Bu model uygulanırken, $\Delta x = \Delta y = \Delta s = 0.01 \text{ m}$ ve $\Delta t = 23,57 \text{ ps}$ olarak hesaplanmıştır. Toplam kayıt süresi 9428 ps dir. Alıcı verici anten, alanın tam merkezine 1m ye yerleştirilip 4 tabakalı asfalt modelin, tam merkez noktasından geçtiği tasarlanarak program çalıştırılmıştır. Antenin merkez frekansı, 3GHz değerine göre hesaplama yapılmıştır. Ortam parametreleri $\epsilon_r = 2,5 \text{ F/m}$, $\sigma = 0 \text{ S/m}$, $\mu_r = 1$ olan aşınma tabakası , $\epsilon_r = 5 \text{ F/m}$, $\sigma = 0 \text{ S/m}$, $\mu_r = 1$ olan binder tabakası, $\epsilon_r = 7 \text{ F/m}$, $\sigma = 0 \text{ S/m}$, $\mu_r = 1$ olan bitümlü temel tabakası, $\epsilon_r = 9 \text{ F/m}$, $\sigma = 0 \text{ S/m}$, $\mu_r = 1$ olan plentmix tabakasına ait radargram kesitleri elde edilmiştir. Modelde x doğrultusuna ait radar kesitlerinde kaplama tabakalarından aşınma, binder, bitümlü temel ve temel tabakalarından plentmix tabakasının sınırlarının ortaya koyulduğu görülmektedir (Şekil 4.13).



Şekil 4.13. Radargram üzerindeki aşınma, binder, b.temel ve plentmix tabaka kalınlıkları

Aşınma tabakası 59 cm, binder tabakası 63,50, bitümlü temel tabakası 70, 50 plentmix tabakası 82 cm, doğal zemin ise 102 cm derinlikten itibaren başlamıştır. Elektrik alan her ne kadarda yaklaşık 130 cm e kadar ilerlediği gözükse de hücre boyutumuzdan dolayı geri kalan kısmı içinde aynı ortam olarak görmektedir. Yani doğal zemin kalınlığı $200-102=98$ cm olarak değerlendirilmiştir. Sınırlara bağlı olarak da her bir katmanın kalınlıkları radargram üzerinde görünmektedir. Kaynak olarak sinüs dalgası kullanılmış olup, yerden 59cm yükseklikte uygulandığı anlaşılmıştır. Geliştirilen MATLAB algoritmasından hesaplanan aşınma, binder, bitümlü temel ve plentmix tabakasının sırası ile 5 cm, 7cm, 12 cm ve 20 cm olması gerekirken radargram üzerinde 4,5cm, 7cm, 11,5cm ve 20cm olarak tespit edilmiştir. Aşınma tabakasında 0,5 cm, bitümlü temelde 0,5 cm sapma söz konusudur. Bu, aşınmada tabakasında 10% , bitümlü temel tabakasında 4,17% bağıl hata oranına karşılık gelmektedir.

Ayrıca elektrik alanın düşey bileşeni , Ez'in her katmandaki genlik farkı net olarak gözükmekte olup 102cm sonra derine doğru ilerledikçe zayıfladığı görülmüştür (Şekil 4.14). Yutucu sınır koşulu olarak , MUK sınırlardan gelen yalancı yansımaları engellemiş, radargram üzerindeki elektrik alanın doğru bir şekilde gözlemlenmesini sağlamıştır. Konum değerleri için verilen aşınma , binder , bitümlü temel ve plentmix tabakalarının kalınlık seviyesi radargram kesitlerinde santimetrelilik hatalarla birlikte uyumlu olduğu gözlenmektedir.

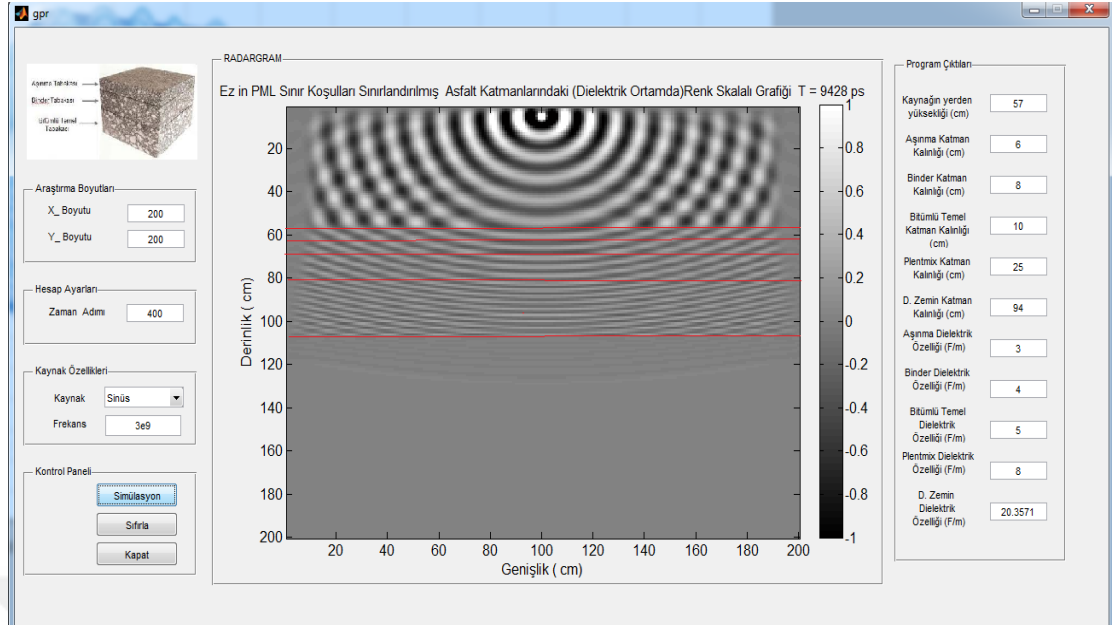


Şekil 4.14. Ez'in her katmandaki genliği

Modelimizdeki EM radar sinyali yeraltındaki katmanlarda derine doğru gittikçe bağıl dielektrik geçirgenlik katsayısı artışı ile karşılaştığından arayüzeylerde dar açıyla kırılmıştır. Radar dalgaları daha yüksek bağıl dielektrik geçirgenlik ortamlarına hareket ettikçe odaklanma etkisi de giderek arttığı görülmüştür. Buna ek olarak derinliğin artmasıyla birlikte bağıl dielektrik geçirgenlik katsayılarındaki artış, radar dalgalarının ilerleme hızının azalmasına neden olmuştur. Merkez frekanstan farklı olarak yüksek frekans seçildiğinde ise derine doğru ilerledikçe dalga boyu küçülmüş ve bu elektrik alanın yavaşlamasına kararlılık şartlarının bozulduğu görülmüştür.

7.3.2 Model 3'e ait 2. uygulama

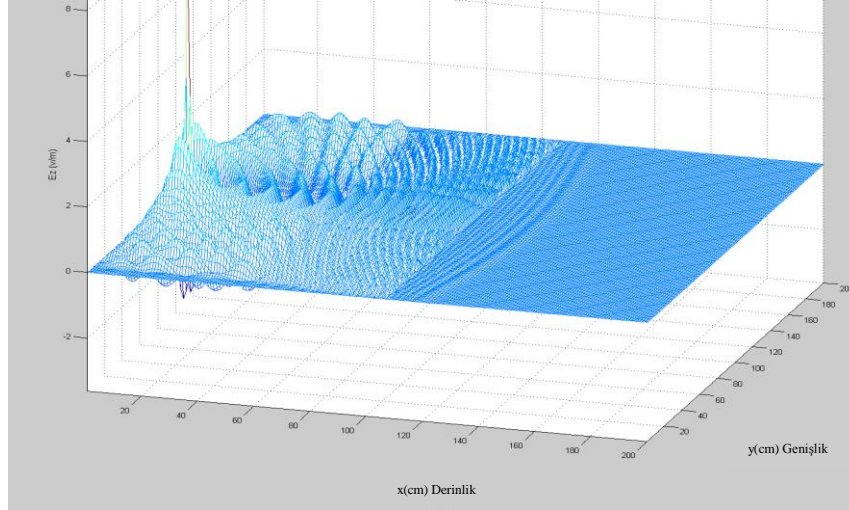
Bu uygulamada dielektrik özellikleri $\mathcal{E}_{aşınma}=3 \text{ F/m}$, $\mathcal{E}_{binder}=4 \text{ F/m}$, $\mathcal{E}_{B.temel}=5 \text{ F/m}$, $\mathcal{E}_{plentmix}=8 \text{ F/m}$ ve kalınlıkları $d_{aşınma}=6 \text{ cm}$, $d_{binder}=8 \text{ cm}$, $d_{B.temel}=10 \text{ cm}$, $d_{plentmix}=25 \text{ cm}$ olan katman modeli örneği ele alınmıştır. Örnekte, $200 \times 200 \text{ cm}$ boyutlarına sahip 2B alan içine 6 cm kalınlığında aşınma tabakası, 8 cm kalınlığında binder tabakası, 10 cm kalınlığında bitümlü temel tabakası ve 25 cm kalınlığında plentmix tabakası yer almaktadır. Bu model uygulanırken , $\Delta x=\Delta y=\Delta s=0.01 \text{ m}$ ve $\Delta t=23,57 \text{ ps}$ olarak hesaplanmıştır. Toplam kayıt süresi 9428 ps dir. Alıcı verici anten, alanın tam merkezine 1 m ye yerleştirilip 4 tabakalı asfalt modelin, tam merkez noktasından geçtiği tasarlanarak program çalıştırılmıştır. Antenin merkez frekansı, 3 GHz değerine göre hesaplama yapılmıştır. Ortam parametreleri $\epsilon_r=3 \text{ F/m}$, $\sigma=0 \text{ S/m}$, $\mu_r=1$ olan aşınma tabakası , $\epsilon_r=4 \text{ F/m}$, $\sigma=0 \text{ S/m}$, $\mu_r=1$ olan binder tabakası, $\epsilon_r=5 \text{ F/m}$, $\sigma=0 \text{ S/m}$, $\mu_r=1$ olan bitümlü temel tabakası, $\epsilon_r=8 \text{ F/m}$, $\sigma=0 \text{ S/m}$, $\mu_r=1$ olan plentmix tabakasına ait radargram kesitleri elde edilmiştir. Modelde x doğrultusuna ait radar kesitlerinde kaplama tabakalarından aşınma, binder, bitümlü temel ve temel tabakalarından plentmix tabakasının sınırlarının ortaya koyulduğu görülmektedir (Şekil 4.15).



Şekil 4.15. Radargram üzerindeki aşınma, binder, b.temel ve plentmix tabaka kalınlıkları

Aşınma tabakası 57 cm, binder tabakası 62cm, bitümlü temel tabakası 69 cm, plentmix tabakası 80 cm, doğal zemin ise 106 cm derinlikten itibaren başlamıştır. Elektrik alan her ne kadar yaklaşık 130 cm e kadar ilerlediği gözükse de hücre boyutumuzdan dolayı geri kalan kısmı içinde aynı ortam olarak görmektedir. Yani doğal zemin kalınlığı $200-106=94$ cm olarak değerlendirilmiştir. Sınırlara bağlı olarak da her bir katmanın kalınlıkları radargram üzerinde görünmektedir. Kaynak olarak sinüs dalgası kullanılmış olup, yerden 57cm yükseklikte uygulandığı anlaşılmıştır. Geliştirilen MATLAB algoritmasından hesaplanan aşınma, binder, bitümlü temel ve plentmix tabakasının sırası ile 6 cm, 8cm, 10cm ve 25 cm olması gerekirken radargram üzerinde 5cm, 7cm, 11cm ve 26cm olarak tespit edilmiştir. Aşınma tabakasında 1 cm, binder tabakasında 1cm, bitümlü temelde 1 cm ve plentmix tabakasında ise yine 1 cm sapma söz konusudur. Bu, aşınmada tabakasında 16,67% , binder tabakasında 12,50% , bitümlü temel tabakasında 10% , plentmix tabakasında 4% bağıl hata oranına karşılık gelmektedir.

Ayrıca elektrik alanın düşey bileşeni, Ez'in her katmandaki genlik farkı net olarak gözükmekte olup 106 cm sonra derine doğru ilerledikçe zayıfladığı görülmüştür (Şekil 4.16). Yutucu sınır koşulu olarak, MUK sınırlardan gelen yalancı yansımaları engellemiş, radargram üzerindeki elektrik alanının doğru bir şekilde gözlemlenmesini sağlamıştır. Konum değerleri için verilen aşınma, binder, bitümlü temel ve plentmix tabakalarının kalınlık seviyesi radargram kesitlerinde santimetrelilik hatalarla birlikte uyumlu olduğu gözlenmektedir.

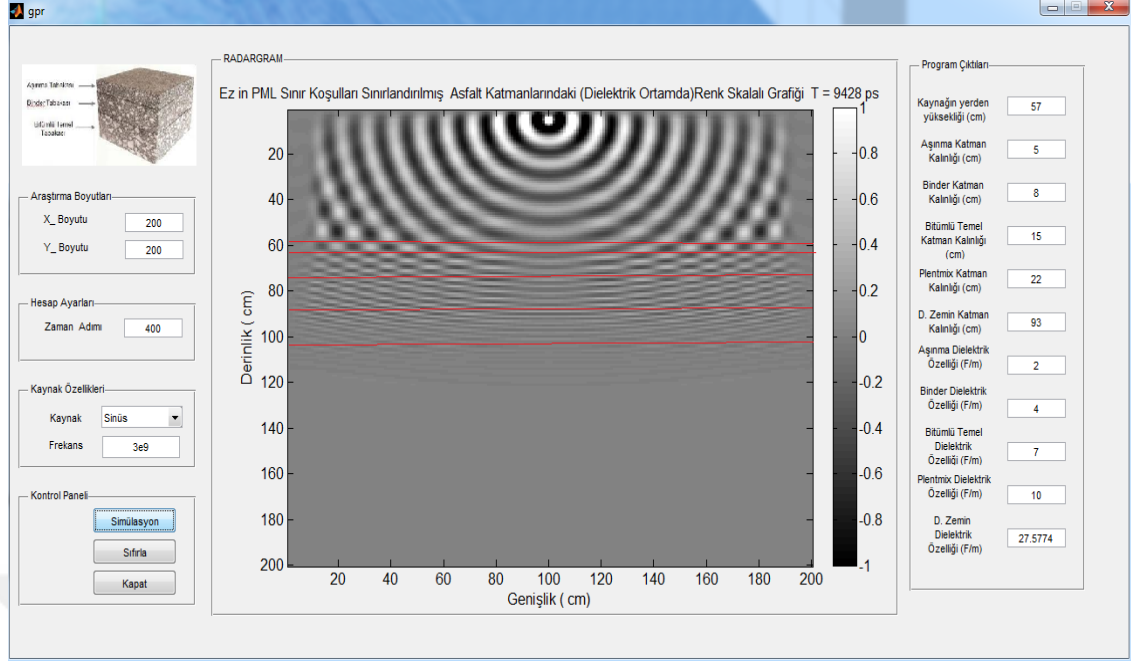


Şekil 4.16. Ez'in her katmandaki genişliği

Modelimizdeki EM radar sinyali yeraltındaki katmanlarda derine doğru gittikçe bağıl dielektrik geçirgenlik katsayısı artışı ile karşılaştığından arayüzelerde dar açıyla kırılmıştır. Radar dalgaları daha yüksek bağıl dielektrik geçirgenlik ortamlarına hareket ettikçe odaklanma etkisi de giderek arttığı görülmüştür. Buna ek olarak derinliğin artmasıyla birlikte bağıl dielektrik geçirgenlik katsayılarındaki artış, radar dalgalarının ilerleme hızının azalmasına neden olmuştur. Merkez frekanstan farklı olarak yüksek frekans seçildiğinde ise derine doğru ilerledikçe dalga boyu küçülmüş ve bu elektrik alanının yavaşlamasına kararlılık şartlarının bozulduğu görülmüştür.

7.3.3 Model 3'e ait 3. uygulama

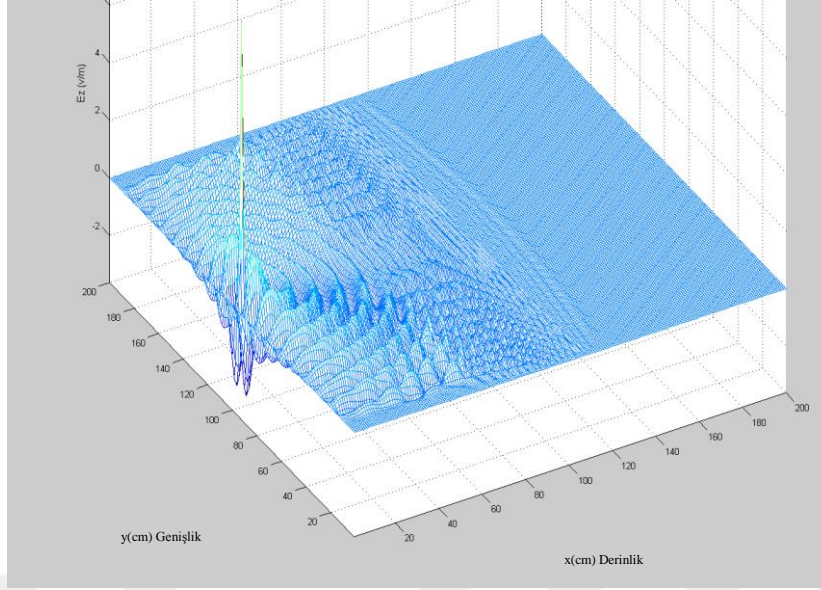
Bu uygulamada dielektrik özellikleri $\mathcal{E}_{aşınma}=2 \text{ F/m}$, $\mathcal{E}_{binder}=4 \text{ F/m}$, $\mathcal{E}_{B.temel}=7 \text{ F/m}$, $\mathcal{E}_{plentmix}=10 \text{ F/m}$ ve kalınlıkları $d_{aşınma}=5 \text{ cm}$, $d_{binder}=8 \text{ cm}$, $d_{B.temel}=15 \text{ cm}$, $d_{plentmix}=22 \text{ cm}$ olan katman modeli örneği ele alınmıştır. Örnekte, $200 \times 200 \text{ cm}$ boyutlarına sahip 2B alan içine 5 cm kalınlığında aşınma tabakası, 8 cm kalınlığında binder tabakası, 15 cm kalınlığında bitümlü temel tabakası ve 22 cm kalınlığında plentmix tabakası yer almaktadır. Bu model uygulanırken, $\Delta x=\Delta y=\Delta s=0.01 \text{ m}$ ve $\Delta t=23,57 \text{ ps}$ olarak hesaplanmıştır. Toplam kayıt süresi 9428 ps dir. Alıcı verici anten, alanın tam merkezine 1 m ye yerleştirilip 4 tabakalı asfalt modelin, tam merkez noktasından geçtiği tasarlanarak program çalıştırılmıştır. Antenin merkez frekansı, 3 GHz değerine göre hesaplama yapılmıştır. Ortam parametreleri $\epsilon_r=2 \text{ F/m}$, $\sigma=0 \text{ S/m}$, $\mu_r=1$ olan aşınma tabakası, $\epsilon_r=4 \text{ F/m}$, $\sigma=0 \text{ S/m}$, $\mu_r=1$ olan binder tabakası, $\epsilon_r=7 \text{ F/m}$, $\sigma=0 \text{ S/m}$, $\mu_r=1$ olan bitümlü temel tabakası, $\epsilon_r=10 \text{ F/m}$, $\sigma=0 \text{ S/m}$, $\mu_r=1$ olan plentmix tabakasına ait radargram kesitleri elde edilmiştir. Modelde x doğrultusuna ait radar kesitlerinde kaplama tabakalarından aşınma, binder, bitümlü temel ve temel tabakalarından plentmix tabakasının sınırlarının ortaya koyulduğu görülmektedir (Şekil 4.17).



Şekil 4.17. Radargram üzerindeki aşınma, binder, b.temel ve plentmix tabaka kalınlıkları

Aşınma tabakası 58 cm, binder tabakası 63cm, bitümlü temel tabakası 72 cm, plentmix tabakası 85 cm, doğal zemin ise 103 cm derinlikten itibaren başlamıştır. Elektrik alan her ne kadarda yaklaşık 130 cm e kadar ilerlediği gözükse de hücre boyutumuzdan dolayı geri kalan kısmı içinde aynı ortam olarak görmektedir. Yani doğal zemin kalınlığı $200-103=94$ cm olarak değerlendirilmiştir. Sınırlara bağlı olarak da her bir katmanın kalınlıkları radargram üzerinde görünmektedir. Kaynak olarak sinüs dalgası kullanılmış olup, yerden 58cm yükseklikte uygulandığı anlaşılmıştır. Geliştirilen MATLAB algoritmasından hesaplanan aşınma, binder, bitümlü temel ve plentmix tabakasının sırası ile 5 cm, 8cm,15cm ve 22 cm olması gerekirken radargram üzerinde 5cm, 9cm, 13cm ve 18cm olarak tespit edilmiştir. Binder tabakasında 1cm, bitümlü temelde 2 cm ve plentmix tabakasında ise yine 4 cm sapma söz konusudur. Bu, binder tabakasında 12,50% , bitümlü temel tabakasında 13,33% , plentmix tabakasında 18,18% bağıl hata oranına karşılık gelmektedir.

Ayrıca elektrik alanın düşey bileşeni, Ez'in her katmandaki genlik farkı net olarak gözükmekte olup 103 cm sonra derine doğru ilerledikçe zayıfladığı görülmüştür (Şekil 4.18). Yutucu sınır koşulu olarak, MUK sınırlardan gelen yalancı yansımaları engellemiş, radargram üzerindeki elektrik alanının doğru bir şekilde gözlemlenmesini sağlamıştır. Konum değerleri için verilen aşınma, binder, bitümlü temel ve plentmix tabakalarının kalınlık seviyesi radargram kesitlerinde santimetrelik hatalarla birlikte uyumlu olduğu gözlenmektedir.



Şekil 4.18. Ez'in her katmandaki genliği

Modelimizdeki EM radar sinyali yeraltındaki katmanlarda derine doğru gittikçe bağıl dielektrik geçirgenlik katsayısı artışı ile karşılaştığından arayüzelerde dar açıyla kırılmıştır. Radar dalgaları daha yüksek bağıl dielektrik geçirgenlik ortamlarına hareket ettikçe odaklanma etkisi de giderek arttığı görülmüştür. Buna ek olarak derinliğin artmasıyla birlikte bağıl dielektrik geçirgenlik katsayılarındaki artış, radar dalgalarının ilerleme hızının azalmasına neden olmuştur. Merkez frekanstan farklı olarak yüksek frekans seçildiğinde ise derine doğru ilerledikçe dalga boyu küçülmüş ve bu elektrik alanının yavaşlamasına kararlılık şartlarının bozulduğu görülmüştür.

Böylece 2 tabakalı, 3 tabakalı ve 4 tabakalı asfalt yol modellerine ait üçer örnekleme yapılmış olur. Her model için farklı katman kalınlığında ve dielektrik özelliğinde örnekleme yapılarak toplamda 9 adet örnekleme yapılmıştır. Çizelge 4.1'de her örnekleme için ortam parametreleri değiştirilerek, algoritmanın hesapladığı kalınlıklar ile radargram üzerinde görünen kalınlıklar karşılaştırılarak bağıl hata oranları hesaplanmıştır.

Çizelge 4.1. Örneklemelemlere ait Parametreler ve Sonuçları

Model No	Malzeme	ϵ (F/m)	σ (S/m)	μ (H/m)	Hücre Sayısı	Hücre Sayısı		Zaman (ps)		Frekans (Ghz)	Hesaplanan Kalınlık (cm)	Radargramda Ölçülen Kalınlık (cm)	Bağıl Hata Oranı (%)	
					Model Boyutları	Δx (cm)	Δy (cm)	Δt	Tmax					
Model 1	(a)	Hava	1	0	μ_0	200x200	1	1	23,57	9428	3	57,00	57,00	0,00%
		Aşınma	2	0	μ_0		1	1				5,00	5,00	0,00%
		Plentmix	7	0	μ_0		1	1				18,00	19,00	5,56%
		D. Zemin	23,922	0	μ_0		1	1				120,00	119,00	0,83%
	(b)	Hava	1	0	μ_0	200x200	1	1	23,57	9428	3	51,00	51,00	0,00%
		Aşınma	3	0	μ_0		1	1				6,00	6,00	0,00%
		Plentmix	9	0	μ_0		1	1				20,00	20,00	0,00%
		D. Zemin	25,468	0	μ_0		1	1				123,00	123,00	0,00%
	(c)	Hava	1	0	μ_0	200x200	1	1	23,57	9428	3	53,00	53,00	0,00%
		Aşınma	3	0	μ_0		1	1				5,50	5,00	9,09%
		Plentmix	10	0	μ_0		1	1				25,00	24,00	4,00%
		D. Zemin	25,468	0	μ_0		1	1				116,50	117,00	0,43%
Model 2	(a)	Hava	1	0	μ_0	200x200	1	1	23,57	9428	3	53,00	54,00	1,89%
		Aşınma	3	0	μ_0		1	1				5,00	5,00	0,00%
		Binder	5	0	μ_0		1	1				8,00	9,00	12,50%
		Plentmix	8	0	μ_0		1	1				20,00	19,00	5,00%
		D. Zemin	25,468	0	μ_0		1	1				114,00	113,00	0,88%
	(b)	Hava	1	0	μ_0	200x200	1	1	23,57	9428	3	58,00	59,00	1,72%
		Aşınma	2	0	μ_0		1	1				6,00	6,00	0,00%
		Binder	5	0	μ_0		1	1				8,00	12,00	50,00%
		Plentmix	7	0	μ_0		1	1				25,00	21,00	16,00%
	(c)	D. Zemin	29,057	0	μ_0	1	1	103,00	102,00	0,97%				
		Hava	1	0	μ_0	200x200	1	1	23,57	9428	3	51,00	51,00	0,00%
		Aşınma	2	0	μ_0		1	1				6,00	7,00	16,67%
Binder		4	0	μ_0	1		1	6,00				6,00	0,00%	
Plentmix	7	0	μ_0	1	1		18,00	18,00				0,00%		
Model 3	(a)	D. Zemin	29,133	0	μ_0	1	1	119,00	118,00	0,84%				
		Hava	1	0	μ_0	200x200	1	1	23,57	9428	3	58,00	59,00	1,72%
		Aşınma	2,5	0	μ_0		1	1				5,00	4,50	10,00%
		Binder	5	0	μ_0		1	1				7,00	7,00	0,00%
		Bitümlü Temel	7	0	μ_0		1	1				12,00	11,50	4,17%
		Plentmix	9	0	μ_0		1	1				20,00	20,00	0,00%
	D. Zemin	21,418	0	μ_0	1		1	98,00				98,00	0,00%	
	(b)	Hava	1	0	μ_0	200x200	1	1	23,57	9428	3	57,00	57,00	0,00%
		Aşınma	3	0	μ_0		1	1				6,00	5,00	16,67%
		Binder	4	0	μ_0		1	1				8,00	7,00	12,50%
		Bitümlü Temel	5	0	μ_0		1	1				10,00	11,00	10,00%
		Plentmix	8	0	μ_0		1	1				25,00	26,00	4,00%
D. Zemin		20,357	0	μ_0	1		1	94,00				94,00	0,00%	
(c)	Hava	1	0	μ_0	200x200	1	1	23,57	9428	3	57,00	58,00	1,75%	
	Aşınma	2	0	μ_0		1	1				5,00	5,00	0,00%	
	Binder	4	0	μ_0		1	1				8,00	9,00	12,50%	
	Bitümlü Temel	7	0	μ_0		1	1				15,00	13,00	13,33%	
	Plentmix	10	0	μ_0		1	1				22,00	18,00	18,18%	
	D. Zemin	27,577	0	μ_0		1	1				93,00	97,00	4,30%	

5. SONUÇ

Bu tez çalışmasında asfalt yolların, zemin görüntüleme radarı (YGR) kullanılarak tabaka kalınlıklarının bulunmasına katkı sağlamak amacıyla TMz modunda 2 boyutlu ZDSF yaklaşımı ile 3GHz de EM dalga alanı hesaplayan MATLAB algoritması ve arayüzü geliştirmiştir. Oluşturulan algoritma 3 yapay model için uygulanmış, hesaplanan kalınlık değerleri ile radargram üzerinde elde edilen veriler karşılaştırılarak bağıl hata oranları hesaplanmış ve algoritmanın tutarlılığı ve doğruluğu ortaya konmuştur. Yazılan modelleme algoritması, yapay modellerle test edilmiştir. Tüm modellerde, tabakaların kalınlıklarını ortaya koyan elektrik alanın düşey bileşeni, Ez'in her katmandaki radargram görüntüleri elde edilmiştir. Elde edilen bu görüntüler irdelenerek yorumlanmıştır.

Birinci Modelde, 2 tabakalı asfalt beton katmanlarından aşınma ve plentmix tabakası sınanmıştır. Kaynak, modelimizin tam orta merkezinden geçecek şekilde konumlandırılarak sonuçlar elde edilmiştir. Modelimizi yansıtan radargramlar üzerindeki elektrik alanın düşey bileşeni Ez 'in değişimleri incelenerek bu iki tabakanın kalınlığı başarılı bir şekilde tespit edilmiştir.

İkinci Modelde, 3 tabakalı asfalt beton katmanlarından aşınma, binder ve plentmix tabakaları ele alınmıştır. Yine kaynak, modelimizin tam orta merkezinden geçecek şekilde konumlandırılarak sonuçlar elde edilmiştir. Modelimizi yansıtan radargramlar üzerindeki elektrik alanın düşey bileşeni Ez 'in değişimleri incelendiğinde ve hesaplanan değerlerin radargram üzerinde gözlenen değerlerle kıyaslandığında binder tabakasında 50% , bitümlü temel tabakasında 16% kadar sapmaların meydana geldiği görülmüştür. Bu hatalara katmanların dielektrik özelliklerindeki yakınlıklar ve ortamda ilerleyen dalganın genlik kaybına uğramasının sebep olduğu söylenebilir.

Son olarak, 4 tabakalı asfalt beton katmanlarından aşınma, binder, bitümlü temel ve plentmix tabakaları denenmiştir. Kaynağı modelimizin tam orta merkezine göre yerleştirerek sonuçlar elde edilmiştir. Modelimizi yansıtan radargramlar üzerindeki elektrik alanın düşey bileşeni Ez 'in değişimleri incelenerek bu dört tabakanın kalınlığı tespit edilmiştir. İkinci ve üçüncü modele ait bazı örneklemelerde aşınma, binder ve bitümlü temel katmanlarının dielektrik özellikleri bir birine yakın değer aldığıda asfalt kaplama tabakasının toplam kalınlığı tespit edilmiş olup katman bazında bir tespit yapılamamıştır. Ayrıca katman kalınlıkları arttığında sönümlenmeler meydana gelmiş derin tabakalardaki plentmix katmanı ile doğal zemin katmanının kalınlıklarının tespit edilemediği durumlar da olmuştur.

Oluşturulan modellerde, yansıma genlikleri değişimleri incelenmiştir. Yansıma genliklerinin ortamın bağıl dielektrik katsayılarına göre değişiklik gösterdiği ispatlanmıştır.

Ayrıca, 2B ZDSF yönteminde kullanılan parametreler ve model ağı ortam parametreleri ayrıntılı olarak incelenmiştir. Özellikle gerçekte var olmayan ve sınırdan geri yansıyan yalancı EM dalgaları engellenerek, ZDSF yönteminin doğruluğunun artırılması ve denklemlerin çözümünde kullanılan sınır şartlarının, çözüme tam olarak yansıtılması için yutucu sınır koşullarından (YSK) , MUK (Mükemmel Uyumlu Katman) kullanılmıştır.

Yapılan modelleme çalışmalarında 200x200cm boyutlarına sahip bir ortam içine model parametreleri farklı asfalt katmanları yerleştirildiği farzedilmiş ve hesaplamalar için 3GHz anten kullanılmıştır. Modellere ait bağıl dielektrik katsayısının artması ve azalması sonucu EM dalga alanının katmanlar arasındaki hızı incelenmiştir. Ayrıca bir model üzerinde anten frekansı değiştirilerek frekans etkisine kısaca değinilmiştir. Değerlendirme sonucunda yüksek frekanslı anten kullanıldığında yer altında daha ayrıntılı ve yüksek çözünürlükte bilgi alınacağı ortaya konulmuştur. Ancak anten frekansı, öncelikle araştırılması gereken derinlik dikkate alınarak seçilmesi gerektiği daha sonra yer altındaki modellerin özelliklerini ortaya çıkarıcı etkiler düşünülmelidir. Çünkü, yüksek frekanslı anten kullanıldığında daha ayrıntılı bir görüntü yakalamaya çalışırken, EM dalganın araştırılması gereken derinliğe ulaşamayacağı anlaşılmıştır.

Arazi yapısına uygun oluşturulan yapay modellerle asfalt tabaka kalınlıklarının tepkisini önceden incelemek, arazi verisinin yorumlanmasını kolaylaştırdığından modelleme çalışmaları önemlidir. Bu tez kapsamında yapılan tüm çalışmalar, gelecekte arazi verisinin toplanmasında ve yorumlanmasında kolaylık sağlayacaktır. Ayrıca YGR kullanan karayolları müdürlüklerinin ve belediyelerin tasarımda planladıkları asfalt beton tabaka kalınlıklarının yerinde uygulanıp uygulanmadığı, tabakalarda gerektiği kadar sıkıştırma işlemi yapılıp yapılmadığı, üstyapı tabakaları ve tabakalar arasında meydana gelmiş herhangi bir anomali olup olmadığı hususlarında, analiz yaparken kalite kontrol heyetinde bulunan mühendis arkadaşlara yardımcı olacağı düşünülmüştür.

6. KAYNAKLAR

- Akleman, F. 1998, Zamanda sonlu farklar yöntemi ve yutucu sınır koşulları, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 94 s.
- Alper, A. 2011. Yere Nüfuz Eden Radar (YNR) Görüntülerinin Edinilmesinde Zaman Bölgesinde Sonlu Farklar (FDTR) Metodunun Kullanılması. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara, 120 s.
- Annan, A. P. 2001. Ground Penetrating Radar Workshop Notes. Mississauga, Ontario Sensors and Software Inc.
- Annan, A. P. 2004. Ground Penetrating Radar Principles, Procedures & Applications. Mississauga, On, Canada: Sensors & Software Inc.
- Annan, A. P., 1996. Transmission dispersion and GPR. The Journal of Environmental and Engineering Geophysics, 2: 125-136.
- Arı, N., Özen, Ş., Çolak, Ö. H., ve Teşneli, A. Y. 2008, Elektromanyetikte Sonlu Farklar Metodu, Palme Yayıncılık :467, Ders Kiabı, Ankara, 142 s.
- ASCE, A.M., Grigas, J. ve Algirdas B. 2003. Dielectric Properties of Asphalt Pavement, Journal of Materials in civil Engineering, (0899)1561: 427-433.
- Aspiron, U. and Aigner, T. 1999. Towards Realistic Aquifer Models: Three Dimensional Georadar Surveys of Quaternary Gravel Deltas (Singen Basin, SW Germany). Sedimentary Geology, 129: 281-297.
- Balanis, C. A. 1989. Advanced engineering electromagnetics. NY: John Wiley and Sons.
- Balkaya, Ç. ve Göktürkler G. 2016. Karşılıklı Kuyu Yer Radarı Verilerinin Modellenmesi, Araştırma Makalesi, Pamukkale Üniversitesi, Müh Bilim Dergisi 22(6):581-596 .
- Balkaya, Ç. 2010. Karşılıklı Kuyu Yer Radarı Verisinin İki Boyutlu Seyahat Zamanı Tomografisi, Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, 177s.
- Benedetto, A., Benedetto, F., and De Blasiis, M.R., Giunta, G. 2005. Reliability of signal processing technique for pavement damages detection and classification using ground penetrating radar, IEEE Sensors Journal, 5 (3): 471 – 480.
- Berenger, J.P. 1994. A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves. Journal of Computational Physics, 114 (2):185-200.
- Bergmann, T. Blanch, J.O. ve Robertsson, J.O.A., 1999. A Simplified Lax-Wendroff Correction for Staggered-grid ZDSF Modeling of Electromagnetic Wave Propagation in Frequency-dependent Media. Geophysics, 64(5):1369-1377.
- Beyaz Özdemir, M. 2015. Altyapı Elemanlarının Yer Radarı Yöntemi ile Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, 153 s.
- Bourgeois, J.M. ve Smith, G.S. 1996. A fully three-dimensional simulation of a ground-penetrating radar: FDTD theory compared with experiment. IEEE transactions on geoscience and remote sensing, 36(1).
- Bristow, C.S ve Jol, H.M. 2003. Ground Penetrating Radar in Sediments. Geological

- Society Special Publications, London, 211:191-198.
- Carcione, J. M., 1998. Radiation patterns for 2-D GPR forward modelling. *Geophysics*, 63(2): 424-430.
- Cheng, N., Tang, C.H. and Chan C. 2013. Identification and positioning of underground utilities using ground penetrating radar. *Sustain. Environ. Res.*, 23(2) 141-152.
- Conyers, L. B. and Cameron, C. M. 1998. Ground-penetrating Radar Technique Sand Three-Dimensional Computer Mapping in the American Southwest. *Journal of Field Archaeology*, 25: 417-430.
- Conyers, L. B. ve Goodman, D. 1997. Ground-penetrating radar: An Introduction for Archaeologists. California, Altamira Press.
- Daniels, D. J. 2004. Ground Penetrating Radar , 2nd ed., The Institution of Electrical Engineers, pp. 1-246 .
- Dannowski, G. ve Yaramancı, U. 1999. Estimation of Water Content and Porosity using Combined Radar and Geoelectric Measurements. *European Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 4: 71-85.
- Davis J.L. ve Annan A.P. 1989. Ground Penetrating Radar for High Resolution Mapping of Soil and Rock Stratigraphy, *Geophysical Prospecting*, 37(1): 531-551.
- Davis J.L. ve Annan A.P. 1989. Ground Penetrating Radar for High Resolution Mapping of Soil and Rock Stratigraphy. *Geophysical Prospecting*, 37: 531-551.
- Degenhardt, J. J. and Giardino, J. R. 2003. Subsurface Investigation of a Rock Glacier using Ground-Penetrating Radar: Implications for Locating Stored Water on Mars. *Journal of Geophysical Research*, 108: 8036-8053.
- Engheta, N., Papas, C. H. and Elachi, C. 1982. Radiation patterns of interfacial dipole antenna, *Radio Science*, 17: 1557-1566.
- Ergün Yardım, F. 2012. Zaman Bölgesinde Sonlu Farklar Yöntemi ile Radar Kesit Alanı Kestirimi. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara, 190 s.
- Ergüven, K. 2015. Tünel İmalatında Yer Radarı Yönetmeliğiyle Tahribatsız Test Uygulaması, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, İstanbul, 120 s.
- Fisher, E., McMechan, G. A. and Annan, A. P. 1992. Acquisition and processing of WideAperture Ground-Penetrating Radar Data. *Geophysics*, 57: 495-504.
- Goodman, D. 1994. Ground-penetrating Radar Simulation in Engineering and Archaeology. *Geophysics*, 59: 224-232.
- Grandjean, G. and Gourry, J.C. 1999. GPR Data Processing for 3D Fracture Mapping in a Marble Quarry (Thassos, Greece), *Journal of Applied Geophysics*, 36, 19-30
- Griffin, S. ve Pipet, T. 2002. Ground Penetrating Radar. *Geophysical and Remote Sensing Methods for Regolith Exploration*, 144: 80-89.
- Guru, B. ve Hızıroğlu, H. 2004. *Electromagnetic Field Theory Fundamentals* (2nd ed.), Cambridge University Press.

- Gürel, L. ve Oğuz, U. 2000. Three- dimensional FDTD modelling of a GroundPenetrating Radar. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 38(4).
- Hammon III, W. S. , McMechan, G. A.ve Zeng, X., 2000. Forensic GPR: Finite-Difference Simulations of Responses from Buried Human Remains. Journal of Applied Geophysics, 45,:171-186.
- Harrari, Z. 1996. Ground Penetrating Radar (GPR) for Imaging Stratigrafic Features and Groundwater in Sand Dunes, Journal of Applied Geophysics, 36(1):43-52.
- Ho, K.C., Carin, L., Gader, P.D. and Wilson, J.N. 2008. An investigation of using the spectral characteristics from ground penetrating radar for landmine/clutter discrimination. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 46 (4):1177 – 1191.
- Holliger, K. and Bergmann, T. 2002. Numerical modeling of borehole georadar data. Geophysics, 67(4): 1249-1257.
- Irving, J. and Knight, R. 2006. Numerical modelling of ground-penetrating radar in 2D using MATLAB, Computer and Geosciences, 35(1): 1247-1258.
- İlçin, İ.,2017.İller Bankası A. Ş Altyapı Projelerinde Yer Radarı ile Görüntüleme Yönteminin Kullanılabilirliği ve Harita Mühendisliği Uygulamaları, Uzmanlık Tezi, İller Bankası, 94s.
- Kadioğlu, S. ve Daniels, J. J. 2008. 3D Visualization of Integrated Ground Penetrating Radar Data and EM-61 Data to Determine Buried Objects and Their Characteristics, Journal of Geophysics and Engineering, 5, 448-456.
- Kadioğlu, S., 2008. Photographing layer thicknesses and discontinuities in a marble quarry with 3D GPR visualization. Journal of Applied Geophysics, 64(3): 109-114.
- Kao, C.P., Li, J., Wang Y., Xing H., and Liu C.R. 2007. Measurement of layer thickness and permittivity using a new multilayer model from GPR data. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 45 (8):2463 – 2470.
- Karayolları Genel Müdürlüğü. 2008. Karayolları esnek üstyapılar projelendirme rehberi.http://www.kgm.gov.tr/SiteCollectionDocuments/KGMdocuments/Baskanliklar/BaskanliklarTeknikArastirma/Yeni%20Klas%C3%B6r/Yay%C4%B1mlar/USTYAPI_PROJELENDIRME_REHBERI_2008-600.pdf. [Erişim Tarihi Ocak 12, 2018].
- Koçarlan, A. 2008. Sonlu Farklar Yönetimi ile Çok Yüksek Frekanslı Elektromanyetik Dalga Alanı Hesabı, Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi, Ankara, 254 s.
- Kunz, K.S. and Luebbers, R.J. 1993. The finite difference time domain method, CRC Press.
- Kurt, B. B.2009. Zaman Ortamında Sonlu Farklar İle İki Boyutlu Yer Radarı Modellemesi, Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi, Ankara, 96 s.
- Lau C. L., Scullion T. and Chan P. 2013. Modelling of Ground-Penetrating Radar Wave Propagation in Pavement Systems , Transportation Research Record ,1355: 99-107.

- Leckebusch, J. 2003. Ground-Penetrating Radar: A Modern Three-Dimensional Prospection Method, *Archaeological Prospection*, 10: 213-240.
- Loizos, A., and Plati, C. 2007. Accuracy of ground penetrating radar horn-antenna technique for sensing pavement subsurface. *IEEE Sensors Journal*, 7 (5), 842 – 850.
- Milsom, J. 2003. *Field Geophysics* (3rd ed.). John Wiley&Sons Ltd., England.
- Moorman, B. J. 2001. *Ground-Penetrating Radar Applications in Paleolimnology*. The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 23-47.
- Morcous G. and Erdoğmuş E. 2009. Use of Ground Penetrating Radar for Construction Quality Assurance of Concrete Pavement, Final Report , NDOR Project Number P307, , Principal Investigators, University of Nebraska – Lincoln.
- Mur, G. 1981. Absorbing boundary conditions for the finite-difference approximation of the time-domain electromagnetic field equations. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 23 (4):377-382.
- Negri, S. and Leucci, G. 2006. Geophysical Investigation of the Temple of Apollo (Hierapolis, Turkey), *Journal of Archaeological Science*, 33: 1505-1513.
- Neubauer, W., Eder-Hinterleitner, A., Seren, S., and Melichar, P. 2002. Georadar in the Roman Civil Town Carnuntum, Austria: An Approach for Archaeological Interpretation of YGR Data, *Archaeological Prospection*, 9: 135-156.
- Olhoeft, G. R. 1981. Electrical Properties of Rocks. in Y. S. *Physical Properties of Rock Sand Minerals*, 257-330.
- Özen, E. 2013, Zaman Bölgesinde Solu Farklar (FDTD) Yöntemi İle Plazma Anten Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara, 100 s.
- Peterson, A.F., Ray, S.L., Mittra, R. 1998. *Computational methods for electromagnetics*, IEEE press.
- Porubiaková, A. and Komačka, J. 2015. A comparison of dielectric constants of various asphalts calculated from time intervals and amplitudes, *Procedia Engineering* ,111: 660-665.
- Reynolds, J. M. 1997. *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*. Chichester: John Wiley&Sons Ltd.
- Roberts R. L. and Daniels J. J. 1997. Modeling near-field YGR in three dimensions using the ZDSF method. *Geophysics*, 62 : 1114-1126.
- Roth, F., Van Genderen, P., and Verhaegen, M. 2005. Convolutional models for buried target characterization with ground penetrating radar. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 53 (11):3799 – 3810.
- Russel, W., Lenz, PE. 2011. *Pavement Design Guide*. Texas Department of Transportation, Texas.
- Sadiku, M.N.O. 1992. *Numerical techniques in electromagnetics*, 2nd ed., London.
- Saltan , M. 1999. Esnek Üstyapıların Analitik Değerlendirilmesi. Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, 123s.
- Serin , S. ,Saltan , M. ,Terzi, S. ve Bayrak, M.Ç. 2015. YGR ile Karayolu Üstyapı

- Tabaka Kalınlıklarının Tespiti. Akademik Platform, 2289-2298.
- Sevgi, L. 1999. Elektromagnetik problemler ve sayısal yöntemler, Canada.
- Seyfi, L. 2011. Enerji Verimli İki Boyutlu Bir GPR Algoritmasının Geliştirilmesi, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi, Konya, 77 s.
- Seyfried D., Jansen R., and Schoebel J. 2014. Shielded Loaded Bowtie Antenna in Incorporating The Presence of Paving Structure for Improved GPR Pipe Detection. *Journal of Applied Geophysics*, 111: 289–298.
- Shahin, MY. 2002. Pavement Management for Airports. Roads and Parking Lots. Kluwer Academic Publishers, Massachusetts, U.S.A.
- Smith, D. G. and Jol, H. M., 1995. Ground Penetrating Radar: Antenna Frequencies and Maximum Probable Depths of Penetration in Quaternary Sediments. *Journal of Applied Geophysics*, 33:93-100.
- Stutzman, W.L., and Thiele, G.A. 1998. Antenna theory, John Wiley&Sons.
- Teixeira, F.L., Chew, W.C. , Straka, M. , Oristaglio, M.L. and Wang, T. 1998. FiniteDifference Time Domain simulation of ground penetrating radar on dispersive, inhomogeneous, and conductive soils, *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 36(6).
- Turesson, A. 2006. Water Content and Porosity Estimated from Ground-Penetrating Radar and Resistivity. *Journal of Applied Geophysics*, 58: 99-111.
- Türkiye Asfalt Mühendisleri Derneği. 2009. Asfalt ile ilgili terimler ve tanımlamaları. <http://www.asnud.org.tr/asfalt.php?sayfa=27>[Erişim Tarihi Ocak 9, 2018].
- Ulriksen, C. P. 1982. Application of Impulse Radar to Civil Engineering. Ph.D. thesis (published), Lund University of Technology, Lund, New Hampshire: Geophysical Survey Systems, Inc
- Van der Kruk, J., Streich, R. And Green, A.G. 2006. Properties of Surface Wave Guides Derived from Separate and Joint Inversion of Dispersive TE and TM GPR Data, *Geophysics*.
- Von Hippel, A. R. 1954 . Dielectric Material Sand Applications. NY: John Wiley and Sons.
- Wang, T. and Tripp, A.C. 1996. FDTD simulation of EM wave propagation in 3-D media. *Geophysics*, 61(1): 110-120.
- Weeds, R. D. 1994. Geophysical Characterization of Sites. Rotterdam: AA. Balkema, 69-79.
- Wilchek, L. 2000. Ground Penetrating Radar for Detection of Rock Structure. M.S. Thesis, Alberta University, Canada.
- Yee, K. S.1966. Numerical solution of initial boundary problems involving Maxwell's equations in isotropic media, *IEEE Trans. Ant. Prop.*, AP14(3): 302-309 .
- Zeng, X. and McMechan, G.A. 1997. GPR characterization of buried tanks and pipes. *Geophysics*, 62(1) 797-806.

7. EKLER

7.1. Ek-1 (Matlab Lisans Bilgileri)

Lisans numarası	: 874166
Platform	: PC
Lisans seçeneği	: Bireysel
Lisans dönemi	: Daimi
Kullanım türü	: Akademik

7.2. Ek-2(MATLAB Kodu)

Tez çalışmasında modellere uygulanan MATLAB kodlarının ana hatları aşağıda gösterildiği üzere yazılmış ve geliştirilmiştir.

7.2.1 2 Katmanlı asfalt beton kalınlıklarının tespiti için yazılan MATLAB kodu

```
% Araştırma Boyutu x (x_boyutu) and y (y_boyutu) düzlemleri
x_boyutu=str2num (get(handles.edit2, 'string'));
y_boyutu=str2num (get(handles.edit3, 'string'));

%Toplam Zaman Adımı
top_zaman=str2num (get(handles.edit4, 'string'));

%Kaynağın Düzlemdeki yeri
xkaynak=x_boyutu/2;
ykaynak=5;

%Courant Kararlılık Koşulu
K_faktoru=1/(2^0.5);

% Boşluk Parametreleri (permittivity and permeability and Işık hızı)
eps0=(1/(36*pi))*1e-9;
m0=4*pi*1e-7;
c=3e+8;

%Frekans
frekans=str2num (get(handles.edit7, 'string'));

% Aşınma ve Plentmix Katman Kalınlıkları
d_hava=round(50+(60-50)*rand(1));
d_asinma=round(5+(6-5)*rand(1));
d_plentmix=round(20+(40-20)*rand(1));
d_dogalzemin=x_boyutu-(d_hava+d_asinma+d_plentmix);

% Aşınma ve Plentmix Dielektrik Özellikleri
epsr_hava=1;
epsr_asinma=(2+(3-2)*rand(1));
epsr_plentmix=(6+(18-6)*rand(1));
epsr_dogalzemin=(20+(30-20)*rand(1));
eps=[epsr_asinma,epsr_plentmix,epsr_dogalzemin];
```

```

%Sayısal Dağılma ve Kararlılık
lamda_min=c/frekans;
delta_s=lamda_min/10;
delta_t=K_faktoru*(delta_s/c);

% Araştırma Uzayındaki E ve H Alan Başlangıç Değerleri
Ez=zeros(x_boyutu,y_boyutu);
Ez_x=zeros(x_boyutu,y_boyutu);
Ez_y=zeros(x_boyutu,y_boyutu);
Hy=zeros(x_boyutu,y_boyutu);
Hx=zeros(x_boyutu,y_boyutu);

% Araştırma Uzayındaki Ortamın Dielektrik Özellikleri
epsilon=eps0*ones(x_boyutu,y_boyutu);
epsilon(:,1:1:d_hava)=1*eps0;
epsilon(:,d_hava+1:1:d_hava+d_asinma)=epsr_asinma*eps0;
epsilon(:,d_hava+d_asinma+1:1:d_hava+d_asinma+d_plentmix)=epsr_plentmix*eps0;
epsilon(:,d_hava+d_asinma+d_plentmix+1:1:d_hava+d_asinma+d_plentmix+d_dogalzemini)=epsr_dogalzemini*eps0;

% Araştırma Uzayındaki Ortamın Manyetik Geçirgenlik Özellikleri
mu=m0*ones(x_boyutu,y_boyutu);

% Araştırma Uzayındaki Ortamın Elektrik İletkenlik Özellikleri
sig_x=zeros(x_boyutu,y_boyutu);
sig_y=zeros(x_boyutu,y_boyutu);

%Perfectly matched layer Sınırları

%Her Eksendeki MUK Sınır Genişliği

boundwidth=25;

grading_order=6;

% Gerekli yansımaya katsayısı
yan_sabiti=1e-6;

sigma_max=(-
log10(yan_sabiti)*(grading_order+1)*eps0*c)/(2*boundwidth*delta_s);
bf1=((epsilon(x_boyutu/2,boundwidth)/eps0)*sigma_max)/((boundwidth^grading_order)*(grading_order+1));
bf2=((epsilon(x_boyutu/2,y_boyutu-boundwidth)/eps0)*sigma_max)/((boundwidth^grading_order)*(grading_order+1));

```



```

bf3=((epsilon(boundwidth,y_boyutu/2)/eps0)*sigma_max)/((boundwidth^grading_order)*(grading_order+1));
bf4=((epsilon(x_boyutu-boundwidth,y_boyutu/2)/eps0)*sigma_max)/((boundwidth^grading_order)*(grading_order+1));
x=0:1:boundwidth;
for i=1:1:x_boyutu
    sig_x(i,boundwidth+1:-1:1)=bf1*((x+0.5*ones(1,boundwidth+1)).^(grading_order+1)-(x-0.5*[0 ones(1,boundwidth)]).^(grading_order+1));
    sig_x(i,y_boyutu-boundwidth:1:y_boyutu)=bf2*((x+0.5*ones(1,boundwidth+1)).^(grading_order+1)-(x-0.5*[0 ones(1,boundwidth)]).^(grading_order+1));
end
for i=1:1:y_boyutu
    sig_y(boundwidth+1:-1:1,i)=bf3*((x+0.5*ones(1,boundwidth+1)).^(grading_order+1)-(x-0.5*[0 ones(1,boundwidth)]).^(grading_order+1));
    sig_y(x_boyutu-boundwidth:1:x_boyutu,i)=bf4*((x+0.5*ones(1,boundwidth+1)).^(grading_order+1)-(x-0.5*[0 ones(1,boundwidth)]).^(grading_order+1));
end

% MUK in Meydana Getirdiği Manyetik geçirgenlik
% Ayrıca bu , Berenger modelinde x ve y yönlerine ayrılmıştır.
sig_conx=(sig_x.*mu)./epsilon;
sig_cony=(sig_y.*mu)./epsilon;

em_dalga=get(handles.popupmenu1,'value');
if (em_dalga==1);
    gaussian=0;
    sine=1;
    impulse=0;
end
if (em_dalga==2);
    gaussian=1;
    sine=0;
    impulse=0;
end
if (em_dalga==3);
    gaussian=0;
    sine=0;
    impulse=1;
end

% Programın hızını arttırmak için her defasında hesaplanmaması amacı ile
% Manyetik Alanın çarpım faktörleri hesaplanmıştır.

Cx=((mu-0.5*delta_t*sig_conx)./(mu+0.5*delta_t*sig_conx));
Dx=(delta_t/delta_s)./(mu+0.5*delta_t*sig_conx);

```

```

Cy=((mu-0.5*delta_t*sig_cony)./(mu+0.5*delta_t*sig_cony));
Dy=(delta_t/delta_s)./(mu+0.5*delta_t*sig_cony);

% Programın hızını arttırmak için her defasında hesaplanmaması amacı ile
% Elektrik Alanın çarpım faktörleri hesaplanmıştır.
Ax=((epsilon-0.5*delta_t*sig_x)./(epsilon+0.5*delta_t*sig_x));
Bx=(delta_t/delta_s)./(epsilon+0.5*delta_t*sig_x);
Ay=((epsilon-0.5*delta_t*sig_y)./(epsilon+0.5*delta_t*sig_y));
By=(delta_t/delta_s)./(epsilon+0.5*delta_t*sig_y);

axes(handles.axes5)
% Döngü başlangıçlarını güncelle

for n=1:1:top_zaman

    % Kaynağın impulse veya unit-time step olma durumu
    if gaussian==0 && sine==0 && n==1
        Ez_x(xkaynak,ykaynak)=0.5;
        Ez_y(xkaynak,ykaynak)=0.5;
    end

    if n<xkaynak-2
        t1=xkaynak-n-1;
    else
        t1=1;
    end
    if n<x_boyutu-1-xkaynak
        t2=xkaynak+n;
    else
        t2=x_boyutu-1;
    end
    if n<ykaynak-2
        t11=ykaynak-n-1;
    else
        t11=1;
    end
    if n<y_boyutu-1-ykaynak
        t21=ykaynak+n;
    else
        t21=y_boyutu-1;
    end

    %Araştırma Uzayındaki Hy ve Hx alanların her adımda hesaplanması

Hy(t1:t2,t11:t21)=Cy(t1:t2,t11:t21).*Hy(t1:t2,t11:t21)+Dy(t1:t2,t11:t21).*(Ez_x(t1+
1:t2+1,t11:t21)-Ez_x(t1:t2,t11:t21)+Ez_y(t1+1:t2+1,t11:t21)-Ez_y(t1:t2,t11:t21));
Hx(t1:t2,t11:t21)=Cx(t1:t2,t11:t21).*Hx(t1:t2,t11:t21)-
Dx(t1:t2,t11:t21).*(Ez_x(t1:t2,t11+1:t21+1)-
Ez_x(t1:t2,t11:t21)+Ez_y(t1:t2,t11+1:t21+1)-Ez_y(t1:t2,t11:t21));

```

%Araştırma Uzayındaki Ez alanların her adımda hesaplanması

```
Ez_x(t1+1:t2+1,t11+1:t21+1)=Ax(t1+1:t2+1,t11+1:t21+1).*Ez_x(t1+1:t2+1,t11+1:t21+1)+Bx(t1+1:t2+1,t11+1:t21+1).*(-Hx(t1+1:t2+1,t11+1:t21+1)+Hx(t1+1:t2+1,t11:t21));
```

```
Ez_y(t1+1:t2+1,t11+1:t21+1)=Ay(t1+1:t2+1,t11+1:t21+1).*Ez_y(t1+1:t2+1,t11+1:t21+1)+By(t1+1:t2+1,t11+1:t21+1).*(Hy(t1+1:t2+1,t11+1:t21+1)-Hy(t1:t2,t11+1:t21+1));
```

% Kaynak Seçimi

```
if impulse==0
```

```
    % Kaynağın unit-time stepolma durumu
```

```
    if gaussian==0 && sine==0
```

```
        Ez_x(xkaynak,ykaynak)=0.5;
```

```
        Ez_y(xkaynak,ykaynak)=0.5;
```

```
    end
```

```
    %Kaynağın Sinüs olma durumu
```

```
    if sine==1
```

```
        tstart=1;
```

```
        Ez_x(xkaynak,ykaynak)=5*sin(((2*pi*frekans*(n-tstart)*delta_t)));
```

```
        Ez_y(xkaynak,ykaynak)=5*sin(((2*pi*frekans*(n-tstart)*delta_t)));
```

```
    end
```

```
    %Kaynağın Gausse olması durumu
```

```
    if gaussian==1
```

```
        if n<=42
```

```
            Ez_x(xkaynak,ykaynak)=(10-15*cos(n*pi/20)+6*cos(2*n*pi/20)-cos(3*n*pi/20))/64;
```

```
            Ez_y(xkaynak,ykaynak)=(10-15*cos(n*pi/20)+6*cos(2*n*pi/20)-cos(3*n*pi/20))/64;
```

```
        else
```

```
            Ez_x(xkaynak,ykaynak)=0;
```

```
            Ez_y(xkaynak,ykaynak)=0;
```

```
        end
```

```
    end
```

```
else
```

```
    %Kaynağın İmpulse Olma durumu
```

```
    Ez_x(xkaynak,ykaynak)=0;
```

```
    Ez_y(xkaynak,ykaynak)=0;
```

```
end
```

```
Ez=Ez_x+Ez_y;
```

% Elektrik alanın (Ez) Renk skalalı grafiği (Movie Komutu)

```
imagesc((1:1:x_boyutu),(1:1:y_boyutu)',Ez',[-1,1]);
```

```
colormap(gray),colorbar;
```

```

title(['\fontsize{11}Ez in MUK Sınır Koşulları Sınırlandırılmış Asfalt
Katmanlarındaki (Dielektrik Ortamda)Renk Skalalı Grafiği T =
',num2str(round(n*delta_t*10*1e+11)), ' ps']);
xlabel('Genişlik ( cm)','FontSize',12);
ylabel('Derinlik ( cm)','FontSize',12);
set(gca,'FontSize',12);
getframe;

if n==top_zaman
    set(handles.edit10,'String',d_hava);
    set(handles.edit11,'String',d_asinma);
    set(handles.edit14,'String',d_plentmix);
    set(handles.edit15,'String',d_dogalzemin);
    set(handles.edit16,'String',epsr_asinma);
    set(handles.edit19,'String',epsr_plentmix);
    set(handles.edit20,'String',epsr_dogalzemin);
end
end
figure(1)
mesh(Ez)

xlabel('x (cm) Derinlik','FontSize',11);
ylabel('y (cm) Uzaklık','FontSize',11);
zlabel('Ez (v/m) ','FontSize',11);

```

7.2.2 3 Katmanlı asfalt beton kalınlıklarının tespiti için yazılan MATLAB kodu

```

% Araştırma Boyutu x (x_boyutu) and y (y_boyutu) düzlemleri
x_boyutu=str2num (get(handles.edit2, 'string'));
y_boyutu=str2num (get(handles.edit3, 'string'));

%Toplam Zaman Adımı
top_zaman=str2num (get(handles.edit4, 'string'));

%Kaynağın Düzlemdeki yeri
xkaynak=x_boyutu/2;
ykaynak=5;

%Courant Kararlılık Koşulu
K_faktoru=1/(2^0.5);

% Boşluk Parametreleri (permittivity and permeability and Işık hızı)
eps0=(1/(36*pi))*1e-9;
m0=4*pi*1e-7;
c=3e+8;

%Frekans

```

```

frekans=str2num (get(handles.edit7, 'string'));

% Aşınma, binder ve plentmix katman kalınlıkları
d_hava=round(50+(60-50)*rand(1));
d_asinma=round(5+(6-5)*rand(1));
d_binder=round(6+(8-6)*rand(1));
d_plentmix=round(20+(40-20)*rand(1));
d_dogalzemin=x_boyutu-(d_hava+d_asinma+d_binder+d_plentmix);

% Aşınma , binder ve Plentmix Dielektrik Özellikleri
epsr_hava=1;
epsr_asinma=(2+(3-2)*rand(1));
epsr_binder=(3+(5-3)*rand(1));
epsr_plentmix=(6+(18-6)*rand(1));
epsr_dogalzemin=(20+(30-20)*rand(1));
eps=[epsr_asinma,epsr_binder,epsr_plentmix,epsr_dogalzemin];

%Sayısal Dağılıma ve Kararlılık
lamda_min=c/frekans;
delta_s=lamda_min/10;
delta_t=K_faktoru*(delta_s/c);

% Araştırma Uzayındaki E ve H Alan Başlangıç Değerleri
Ez=zeros(x_boyutu,y_boyutu);
Ez_x=zeros(x_boyutu,y_boyutu);
Ez_y=zeros(x_boyutu,y_boyutu);
Hy=zeros(x_boyutu,y_boyutu);
Hx=zeros(x_boyutu,y_boyutu);

% Araştırma Uzayındaki Ortamın Dielektrik Özellikleri
epsilon=eps0*ones(x_boyutu,y_boyutu);
epsilon(:,1:1:d_hava)=1*eps0;
epsilon(:,d_hava+1:1:d_hava+d_asinma)=epsr_asinma*eps0;
epsilon(:,d_hava+d_asinma+1:1:d_hava+d_asinma+d_binder)=epsr_binder*eps0;
epsilon(:,d_hava+d_asinma+d_binder+1:1:d_hava+d_asinma+d_binder+d_plentmix)=epsr_plentmix*eps0;
epsilon(:,d_hava+d_asinma+d_binder+d_plentmix+1:1:d_hava+d_asinma+d_binder+d_plentmix+d_dogalzemin)=epsr_dogalzemin*eps0;

% Araştırma Uzayındaki Ortamın Manyetik Geçirgenlik Özellikleri
mu=m0*ones(x_boyutu,y_boyutu);

% Araştırma Uzayındaki Ortamın Elektrik İletkenlik Özellikleri
sig_x=zeros(x_boyutu,y_boyutu);
sig_y=zeros(x_boyutu,y_boyutu);

%Perfectly matched layer Sınırları

```

```

% Her Eksendeki MUK Sınır Genişliği

boundwidth=25;

grading_order=6;

% Gerekli yansıma katsayısı
yan_sabiti=1e-6;

sigma_max=(-
log10(yan_sabiti)*(grading_order+1)*eps0*c)/(2*boundwidth*delta_s);
bf1=((epsilon(x_boyutu/2,boundwidth)/eps0)*sigma_max)/((boundwidth^grading_order)*(grading_order+1));
bf2=((epsilon(x_boyutu/2,y_boyutu-boundwidth)/eps0)*sigma_max)/((boundwidth^grading_order)*(grading_order+1));
bf3=((epsilon(boundwidth,y_boyutu/2)/eps0)*sigma_max)/((boundwidth^grading_order)*(grading_order+1));
bf4=((epsilon(x_boyutu-boundwidth,y_boyutu/2)/eps0)*sigma_max)/((boundwidth^grading_order)*(grading_order+1));
x=0:1:boundwidth;
for i=1:1:x_boyutu
sig_x(i,boundwidth+1:-
1:1)=bf1*((x+0.5*ones(1,boundwidth+1)).^(grading_order+1)-(x-0.5*[0
ones(1,boundwidth)]).^(grading_order+1));
sig_x(i,y_boyutu-boundwidth:1:y_boyutu)=bf2*((x+0.5*ones(1,boundwidth+1)).^(grading_order+1)-(x-0.5*[0
ones(1,boundwidth)]).^(grading_order+1));
end
for i=1:1:y_boyutu
sig_y(boundwidth+1:-
1:1,i)=bf3*((x+0.5*ones(1,boundwidth+1)).^(grading_order+1)-(x-0.5*[0
ones(1,boundwidth)]).^(grading_order+1));
sig_y(x_boyutu-boundwidth:1:x_boyutu,i)=bf4*((x+0.5*ones(1,boundwidth+1)).^(grading_order+1)-(x-0.5*[0
ones(1,boundwidth)]).^(grading_order+1));
end

% MUK in Meydana Getirdiği Manyetik geçirgenlik
% Ayrıca bu , Berenger modelinde x ve y yönlerine ayrılmıştır.
sig_conx=(sig_x.*mu)./epsilon;
sig_cony=(sig_y.*mu)./epsilon;

em_dalga=get(handles.popupmenu1,'value');
if (em_dalga==1);
gaussian=0;
sine=1;

```

```

    impulse=0;
end
if (em_dalga==2);
    gaussian=1;
    sine=0;
    impulse=0;
end
if (em_dalga==3);
    gaussian=0;
    sine=0;
    impulse=1;
end

% Programın hızını arttırmak için her defasında hesaplanmaması amacı ile
% Manyetik Alanın çarpım faktörleri hesaplanmıştır.

Cx=((mu-0.5*delta_t*sig_conx)/(mu+0.5*delta_t*sig_conx));
Dx=(delta_t/delta_s)/(mu+0.5*delta_t*sig_conx);
Cy=((mu-0.5*delta_t*sig_cony)/(mu+0.5*delta_t*sig_cony));
Dy=(delta_t/delta_s)/(mu+0.5*delta_t*sig_cony);

% Programın hızını arttırmak için her defasında hesaplanmaması amacı ile
% Elektrik Alanın çarpım faktörleri hesaplanmıştır.
Ax=((epsilon-0.5*delta_t*sig_x)/(epsilon+0.5*delta_t*sig_x));
Bx=(delta_t/delta_s)/(epsilon+0.5*delta_t*sig_x);
Ay=((epsilon-0.5*delta_t*sig_y)/(epsilon+0.5*delta_t*sig_y));
By=(delta_t/delta_s)/(epsilon+0.5*delta_t*sig_y);

axes(handles.axes5)
% Döngü başlangıçlarını güncelle

for n=1:1:top_zaman

    % Kaynağın impulse veya unit-time step olma durumu
    if gaussian==0 && sine==0 && n==1
        Ez_x(xkaynak,ykaynak)=0.5;
        Ez_y(xkaynak,ykaynak)=0.5;
    end

    if n<xkaynak-2
        t1=xkaynak-n-1;
    else
        t1=1;
    end
    if n<x_boyutu-1-xkaynak
        t2=xkaynak+n;
    else
        t2=x_boyutu-1;
    end
    if n<ykaynak-2

```

```

    t11=ykaynak-n-1;
else
    t11=1;
end
if n<y_boyutu-1-ykaynak
    t21=ykaynak+n;
else
    t21=y_boyutu-1;
end

%Araştırma Uzayındaki Hy ve Hx alanların her adımda hesaplanması

Hy(t1:t2,t11:t21)=Cy(t1:t2,t11:t21).*Hy(t1:t2,t11:t21)+Dy(t1:t2,t11:t21).*(Ez_x(t1+
1:t2+1,t11:t21)-Ez_x(t1:t2,t11:t21)+Ez_y(t1+1:t2+1,t11:t21)-Ez_y(t1:t2,t11:t21));
Hx(t1:t2,t11:t21)=Cx(t1:t2,t11:t21).*Hx(t1:t2,t11:t21)-
Dx(t1:t2,t11:t21).*(Ez_x(t1:t2,t11+1:t21+1)-
Ez_x(t1:t2,t11:t21)+Ez_y(t1:t2,t11+1:t21+1)-Ez_y(t1:t2,t11:t21));

%Araştırma Uzayındaki Ez alanların her adımda hesaplanması

Ez_x(t1+1:t2+1,t11+1:t21+1)=Ax(t1+1:t2+1,t11+1:t21+1).*Ez_x(t1+1:t2+1,t11+1:t
21+1)+Bx(t1+1:t2+1,t11+1:t21+1).*(-
Hx(t1+1:t2+1,t11+1:t21+1)+Hx(t1+1:t2+1,t11:t21));

Ez_y(t1+1:t2+1,t11+1:t21+1)=Ay(t1+1:t2+1,t11+1:t21+1).*Ez_y(t1+1:t2+1,t11+1:t
21+1)+By(t1+1:t2+1,t11+1:t21+1).*(Hy(t1+1:t2+1,t11+1:t21+1)-
Hy(t1:t2,t11+1:t21+1));

% Kaynak Seçimi
if impulse==0
    % Kaynağın unit-time stepolma durumu
    if gaussian==0 && sine==0
        Ez_x(xkaynak,ykaynak)=0.5;
        Ez_y(xkaynak,ykaynak)=0.5;
    end
    %Kaynağın Sinüs olma durumu
    if sine==1
        tstart=1;

        Ez_x(xkaynak,ykaynak)=5*sin(((2*pi*frekans*(n-tstart)*delta_t)));
        Ez_y(xkaynak,ykaynak)=5*sin(((2*pi*frekans*(n-tstart)*delta_t)));
    end
    %Kaynağın Gausse olması durumu
    if gaussian==1
        if n<=42
            Ez_x(xkaynak,ykaynak)=(10-15*cos(n*pi/20)+6*cos(2*n*pi/20)-
cos(3*n*pi/20))/64;
            Ez_y(xkaynak,ykaynak)=(10-15*cos(n*pi/20)+6*cos(2*n*pi/20)-
cos(3*n*pi/20))/64;
        else

```



```

        Ez_x(xkaynak,ykaynak)=0;
        Ez_y(xkaynak,ykaynak)=0;
    end
end
else
    %Kaynağın İmpulse Olma durumu
    Ez_x(xkaynak,ykaynak)=0;
    Ez_y(xkaynak,ykaynak)=0;
end

Ez=Ez_x+Ez_y;

% Elektrik alanın (Ez) Renk skalalı grafiği (Movie Komutu)
imagesc((1:1:x_boyutu),(1:1:y_boyutu)',Ez,[-1,1]);
colormap(gray),colorbar;

title(['\fontsize{11}Ez in MUK Sınır Koşulları Sınırlandırılmış Asfalt
Katmanlarındaki (Dielektrik Ortamda)Renk Skalalı Grafiği T =
',num2str(round(n*delta_t*10*1e+11)), ' ps']);
xlabel('Genişlik ( cm)','FontSize',12);
ylabel('Derinlik ( cm)','FontSize',12);
set(gca,'FontSize',12);
getframe;

if n==top_zaman
    set(handles.edit10,'String',d_hava);
    set(handles.edit11,'String',d_asinma);
    set(handles.edit12,'String',d_binder);
    set(handles.edit14,'String',d_plentmix);
    set(handles.edit15,'String',d_dogalzemin);
    set(handles.edit16,'String',epsr_asinma);
    set(handles.edit17,'String',epsr_binder);
    set(handles.edit19,'String',epsr_plentmix);
    set(handles.edit20,'String',epsr_dogalzemin);
end
end
figure(1)
mesh(Ez)

xlabel('x (cm) Derinlik','FontSize',11);
ylabel('y (cm) Genişlik','FontSize',11);
zlabel('Ez (v/m) ','FontSize',11);

```

7.2.3 4 Katmanlı asfalt beton kalınlıklarının tespiti için yazılan MATLAB kodu

```

% Araştırma Boyutu x (x_boyutu) and y (y_boyutu) düzlemleri
x_boyutu=str2num (get(handles.edit2, 'string'));
y_boyutu=str2num (get(handles.edit3, 'string'));

```

```

%Toplam Zaman Adımı
top_zaman=str2num (get(handles.edit4, 'string'));

%Kaynağın Düzlemdeki yeri
xkaynak=x_boyutu/2;
ykaynak=5;

%Courant Kararlılık Koşulu
K_faktoru=1/(2^0.5);

% Boşluk Parametreleri (permittivity and permeability and Işık hızı)
eps0=(1/(36*pi))*1e-9;
m0=4*pi*1e-7;
c=3e+8;

%Frekans
frekans=str2num (get(handles.edit7, 'string'));

% Aşınma , binder , bitümlü temel ve Plentmix Katman Kalınlıkları
d_hava=round(50+(60-50)*rand(1));
d_asinma=round(5+(6-5)*rand(1));
d_binder=round(6+(8-6)*rand(1));
d_butumlu_temel=round(8+(18-8)*rand(1));
d_plentmix=round(20+(33-20)*rand(1));
d_dogalzemin=x_boyutu-
(d_hava+d_asinma+d_binder+d_butumlu_temel+d_plentmix);

% Aşınma, binder , bitümlü temel ve plentmix Dielektrik Özellikleri
epsr_hava=1;
epsr_asinma=(2+(3-2)*rand(1));
epsr_binder=(3+(5-3)*rand(1));
epsr_butumlu_temel=(5+(7-5)*rand(1));
epsr_plentmix=(7+(18-7)*rand(1));
epsr_dogalzemin=(20+(30-20)*rand(1));
eps=[epsr_asinma,epsr_binder,epsr_butumlu_temel,epsr_plentmix,epsr_dogalzemin]

%Sayısal Dağılım ve Kararlılık
lamda_min=c/frekans;
delta_s=lamda_min/10;
delta_t=K_faktoru*(delta_s/c);

% Araştırma Uzayındaki E ve H Alan Başlangıç Değerleri
Ez=zeros(x_boyutu,y_boyutu);
Ez_x=zeros(x_boyutu,y_boyutu);
Ez_y=zeros(x_boyutu,y_boyutu);
Hy=zeros(x_boyutu,y_boyutu);
Hx=zeros(x_boyutu,y_boyutu);

```

```

% Araştırma Uzayındaki Ortamın Dielektrik Özellikleri
epsilon=eps0*ones(x_boyutu,y_boyutu);
epsilon(:,1:1:d_hava)=1*eps0;
epsilon(:,d_hava+1:1:d_hava+d_asinma)=epsr_asinma*eps0;
epsilon(:,d_hava+d_asinma+1:1:d_hava+d_asinma+d_binder)=epsr_binder*eps0;
epsilon(:,d_hava+d_asinma+d_binder+1:1:d_hava+d_asinma+d_binder+d_butumlu_
temel)=epsr_butumlu_temel*eps0;
epsilon(:,d_hava+d_asinma+d_binder+d_butumlu_temel+1:1:d_hava+d_asinma+d_b
inder+d_butumlu_temel+d_plentmix)=epsr_plentmix*eps0;
epsilon(:,d_hava+d_asinma+d_binder+d_butumlu_temel+d_plentmix+1:1:d_hava+d
_asinma+d_binder+d_butumlu_temel+d_plentmix+d_dogalzemin)=epsr_dogalzemin
*eps0;
mu=m0*ones(x_boyutu,y_boyutu);

% Araştırma Uzayındaki Ortamın Elektrik İletkenlik Özellikleri
sig_x=zeros(x_boyutu,y_boyutu);
sig_y=zeros(x_boyutu,y_boyutu);

%Perfectly matched layer Sınırları

%Her Eksendeki MUK Sınır Genişliği

boundwidth=25;

grading_order=6;

% Gerekli yansıma katsayısı
yan_sabiti=1e-6;

sigma_max=(-
log10(yan_sabiti)*(grading_order+1)*eps0*c)/(2*boundwidth*delta_s);
bf1=((epsilon(x_boyutu/2,boundwidth)/eps0)*sigma_max)/((boundwidth^grading_or
der)*(grading_order+1));
bf2=((epsilon(x_boyutu/2,y_boyutu-
boundwidth)/eps0)*sigma_max)/((boundwidth^grading_order)*(grading_order+1));
bf3=((epsilon(boundwidth,y_boyutu/2)/eps0)*sigma_max)/((boundwidth^grading_or
der)*(grading_order+1));
bf4=((epsilon(x_boyutu-
boundwidth,y_boyutu/2)/eps0)*sigma_max)/((boundwidth^grading_order)*(grading
_order+1));
x=0:1:boundwidth;
for i=1:1:x_boyutu
    sig_x(i,boundwidth+1:-
1:1)=bf1*((x+0.5*ones(1,boundwidth+1)).^(grading_order+1)-(x-0.5*[0
ones(1,boundwidth)]).^(grading_order+1));

```

```

sig_x(i,y_boyutu-
boundwidth:1:y_boyutu)=bf2*((x+0.5*ones(1,boundwidth+1)).^(grading_order+1)-
(x-0.5*[0 ones(1,boundwidth)]).^(grading_order+1));
end
for i=1:1:y_boyutu
sig_y(boundwidth+1:-
1:1,i)=bf3*((x+0.5*ones(1,boundwidth+1)).^(grading_order+1)-(x-0.5*[0
ones(1,boundwidth)]).^(grading_order+1));
sig_y(x_boyutu-
boundwidth:1:x_boyutu,i)=bf4*((x+0.5*ones(1,boundwidth+1)).^(grading_order+1)-
(x-0.5*[0 ones(1,boundwidth)]).^(grading_order+1));
end
end

```

```

% MUK in Meydana Getirdiği Manyetik geçirgenlik
% Ayrıca bu , Berenger modelinde x ve y yönlerine ayrılmıştır.
sig_conx=(sig_x.*mu)./epsilon;
sig_cony=(sig_y.*mu)./epsilon;

```

```

em_dalga=get(handles.popupmenu1,'value');
if (em_dalga==1);
gaussian=0;
sine=1;
impulse=0;
end
if (em_dalga==2);
gaussian=1;
sine=0;
impulse=0;
end
if (em_dalga==3);
gaussian=0;
sine=0;
impulse=1;
end
end

```

```

% Programın hızını arttırmak için her defasında hesaplanmaması amacı ile
% Manyetik Alanın çarpım faktörleri hesaplanmıştır.

```

```

Cx=((mu-0.5*delta_t*sig_conx)./(mu+0.5*delta_t*sig_conx));
Dx=(delta_t/delta_s)./(mu+0.5*delta_t*sig_conx);
Cy=((mu-0.5*delta_t*sig_cony)./(mu+0.5*delta_t*sig_cony));
Dy=(delta_t/delta_s)./(mu+0.5*delta_t*sig_cony);

```

```

% Programın hızını arttırmak için her defasında hesaplanmaması amacı ile
% Elektrik Alanın çarpım faktörleri hesaplanmıştır.
Ax=((epsilon-0.5*delta_t*sig_x)./(epsilon+0.5*delta_t*sig_x));
Bx=(delta_t/delta_s)./(epsilon+0.5*delta_t*sig_x);
Ay=((epsilon-0.5*delta_t*sig_y)./(epsilon+0.5*delta_t*sig_y));
By=(delta_t/delta_s)./(epsilon+0.5*delta_t*sig_y);

```

```

axes(handles.axes5)
% Döngü başlangıçlarını güncelle

for n=1:1:top_zaman

    % Kaynağın impulse veya unit-time step olma durumu
    if gaussian==0 && sine==0 && n==1
        Ez_x(xkaynak,ykaynak)=0.5;
        Ez_y(xkaynak,ykaynak)=0.5;
    end

    if n<xkaynak-2
        t1=xkaynak-n-1;
    else
        t1=1;
    end
    if n<x_boyutu-1-xkaynak
        t2=xkaynak+n;
    else
        t2=x_boyutu-1;
    end
    if n<ykaynak-2
        t11=ykaynak-n-1;
    else
        t11=1;
    end
    if n<y_boyutu-1-ykaynak
        t21=ykaynak+n;
    else
        t21=y_boyutu-1;
    end

    %Araştırma Uzayındaki Hy ve Hx alanların her adımda hesaplanması

    Hy(t1:t2,t11:t21)=Cy(t1:t2,t11:t21).*Hy(t1:t2,t11:t21)+Dy(t1:t2,t11:t21).*(Ez_x(t1+
    1:t2+1,t11:t21)-Ez_x(t1:t2,t11:t21)+Ez_y(t1+1:t2+1,t11:t21)-Ez_y(t1:t2,t11:t21));
    Hx(t1:t2,t11:t21)=Cx(t1:t2,t11:t21).*Hx(t1:t2,t11:t21)-
    Dx(t1:t2,t11:t21).*(Ez_x(t1:t2,t11+1:t21+1)-
    Ez_x(t1:t2,t11:t21)+Ez_y(t1:t2,t11+1:t21+1)-Ez_y(t1:t2,t11:t21));

    %Araştırma Uzayındaki Ez alanların her adımda hesaplanması

    Ez_x(t1+1:t2+1,t11+1:t21+1)=Ax(t1+1:t2+1,t11+1:t21+1).*Ez_x(t1+1:t2+1,t11+1:t
    21+1)+Bx(t1+1:t2+1,t11+1:t21+1).*(-
    Hx(t1+1:t2+1,t11+1:t21+1)+Hx(t1+1:t2+1,t11:t21));

    Ez_y(t1+1:t2+1,t11+1:t21+1)=Ay(t1+1:t2+1,t11+1:t21+1).*Ez_y(t1+1:t2+1,t11+1:t
    21+1)+By(t1+1:t2+1,t11+1:t21+1).*(Hy(t1+1:t2+1,t11+1:t21+1)-
    Hy(t1:t2,t11+1:t21+1));

```

```

% Kayanak Seçimi
if impulse==0
    % Kaynağın unit-time stepolma durumu
    if gaussian==0 && sine==0
        Ez_x(xkaynak,ykaynak)=0.5;
        Ez_y(xkaynak,ykaynak)=0.5;
    end
    %Kaynağın Sinüs olma durumu
    if sine==1
        tstart=1;

        Ez_x(xkaynak,ykaynak)=5*sin(((2*pi*frekans*(n-tstart)*delta_t)));
        Ez_y(xkaynak,ykaynak)=5*sin(((2*pi*frekans*(n-tstart)*delta_t)));
    end
    %Kaynağın Gausse olması durumu
    if gaussian==1
        if n<=42
            Ez_x(xkaynak,ykaynak)=(10-15*cos(n*pi/20)+6*cos(2*n*pi/20)-
            cos(3*n*pi/20))/64;
            Ez_y(xkaynak,ykaynak)=(10-15*cos(n*pi/20)+6*cos(2*n*pi/20)-
            cos(3*n*pi/20))/64;
        else
            Ez_x(xkaynak,ykaynak)=0;
            Ez_y(xkaynak,ykaynak)=0;
        end
    end
else
    %Kaynağın İmpulse Olma durumu
    Ez_x(xkaynak,ykaynak)=0;
    Ez_y(xkaynak,ykaynak)=0;
end

Ez=Ez_x+Ez_y;

% Elektrik alanın (Ez) Renk skalalı grafiği (Movie Komutu)
imagesc((1:1:x_boyutu),(1:1:y_boyutu)',Ez,[-1,1]);
colormap(gray),colorbar;

title(['\fontsize{11}Ez in MUK Sınır Koşulları Sınırlandırılmış Asfalt
Katmanlarındaki (Dielektrik Ortamda)Renk Skalalı Grafiği T =
',num2str(round(n*delta_t*10*1e+11)), ' ps']);
xlabel('Genişlik ( cm)','FontSize',12);
ylabel('Derinlik ( cm)','FontSize',12);
set(gca,'FontSize',12);
getframe;

if n==top_zaman
    set(handles.edit10,'String',d_hava);
    set(handles.edit11,'String',d_asinma);

```

```
set(handles.edit12,'String',d_binder);
set(handles.edit13,'String',d_butumlu_temel);
set(handles.edit14,'String',d_plentmix);
set(handles.edit15,'String',d_dogalzemin);
set(handles.edit16,'String',epsr_asinma);
set(handles.edit17,'String',epsr_binder);
set(handles.edit18,'String',epsr_butumlu_temel);
set(handles.edit19,'String',epsr_plentmix);
set(handles.edit20,'String',epsr_dogalzemin);
end
end
figure(1)
mesh(Ez)

xlabel('x (cm) Derinlik','FontSize',11);
ylabel('y (cm) Genişlik','FontSize',11);
zlabel('Ez (v/m) ','FontSize',11);
```

ÖZGEÇMİŞ

BAKİ YALIN**baki_yalin07@hotmail.com**

ÖĞRENİM BİLGİLERİ

Yüksek Lisans 2013- 2018	Akdeniz Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Antalya
Lisans 2006-2011	Atılım Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara

MESLEKİ VE İDARİ GÖREVLER

Mühendis 2013-Devam Ediyor	Kemer Belediye Başkanlığı Fen İşleri Müdürlüğü, Antalya
Üye 2012-Devam Ediyor	TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası, Antalya Şubesi