

**FREKANS DAĞITICI MALZEMEYLE KAPLANMIŞ
CİSİMLERİN RADAR KESİT ALANININ ZAMANDA
SONLU FARKLAR YÖNTEMİ İLE HESAPLANMASI**

**RADAR CROSS SECTION COMPUTATION OF OBJECTS
COATED BY FREQUENCY DISPERSIVE MATERIALS
USING FINITE DIFFERENCE TIME DOMAIN METHOD**

MERT ÖTENEL

PROF. DR. ÖZLEM ÖZGÜN

Tez Danışmanı

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı için Öngördüğü

YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak hazırlanmıştır.

Sevgili eŒime,

6 Œubat 2023 tarihinde ebediyete intikal eden, kıymetli annem, babam ve ablama,

29 Mayıs 2023 tarihinde bana yeniden ışık olan canım oğluma...

ÖZET

FREKANS DAĞITICI MALZEMEYLE KAPLANMIŞ CİSİMLERİN RADAR KESİT ALANININ ZAMANDA SONLU FARKLAR YÖNTEMİ İLE HESAPLANMASI

Mert ÖTENEL

Yüksek Lisans, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Özlem ÖZGÜN

Ocak 2024, 152 sayfa

Tez kapsamında, rastgele geometriye sahip üç boyutlu karmaşık hedeflerin Radar Kesit Alanını (RKA) Zamanda Sonlu Farklar yöntemiyle hesaplayan MATLAB tabanlı bir yazılım aracı geliştirilmiştir. Bu yazılım “**Radar Cross Section Prediction Tool**” ismi içerisinde harfler seçilerek “**RaPTo**” olarak adlandırılmıştır. Geliştirilen yazılım hem iletken hedefleri hem de üzerinde izotropik (yön bağımsız) ve frekans dağıtıcı malzeme ile kaplanmış hedefleri modelleyebilmektedir. Hem grafiksel sonuç hem de görsel simülasyonlar elde edilmesine olanak sağlayan RaPTo yazılımı ile, RKA analizi ve özellikle RKA azaltımı gibi uygulamalar için bir yazılım altyapısının literatüre kazandırılması hedeflenmiştir.

RaPTo herhangi bir bilgisayar destekli grafik tasarım (CAD) programıyla üçgen yüzeyler kullanılarak modellenmiş .stl dosya uzantılı hedef ağ yapısını, ışın izleme algoritması

kullanarak üç boyutlu kübik elemanlara dönüştürmektedir. Kübik elemanları kullanarak probleme ait monostatik ve bistatik RKA değerlerini hesaplama kabiliyetine sahiptir. Yazılım içerisinde frekans dağıtıcı malzeme özelliklerini temsil eden üç farklı model (Debye, Lorentz ve Drude modelleri) tanımlanabilmektedir. Ayrıca problemdeki hedefin malzeme özellikleri tümüyle iletken, tümüyle frekans dağıtıcı malzeme ya da iletken üzerine istenilen kalınlıkta frekans dağıtıcı malzeme ile kaplı şekilde tanımlanabilmektedir. Kullanıcı tarafından belirlenen operasyon frekansı ve düzlem dalgaının küresel koordinatları kullanılarak RKA hesaplanmaktadır.

Yazılımın verdiği sonuçların gerçek RKA verilerine yakınlığının test edilmesi için, öncelikle kanonik bir cisim olan iletken küre kullanılmıştır. RaPTo ile elde edilen küreye ait bistatik RKA verileri, hem analitik sonuçlarla hem de ticari bir yazılım olan CST Studio'nun Zaman Alanı (Time Domain) çözücüsü kullanılarak elde edilen bistatik RKA sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Daha sonra frekans dağıtıcı malzeme ile kaplanmış küreye ait Lorentz, Debye ve Drude modellerinin RaPTo ile elde edilen bistatik RKA sonuçları CST ile karşılaştırılmıştır. Son olarak ise, RKA azaltılmasına yönelik çalışmalar yapılmıştır. Bu kapsamda hem küp, küre ve levha gibi kanonik geometriler hem de F-117 Nighthawk ve F-16 Fighting Falcon gibi karmaşık geometriler üzerinde kaplanmış frekans dağıtıcı malzemenin RKA azaltımı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Kaplama kalınlığının ve malzemeye ait çarpışma frekansının RKA üzerindeki etkisi analiz edilmiş ve sonuçlar karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Zamanda sonlu farklar yöntemi (FDTD), frekans dağıtıcı malzeme, radar kesit alanı (RKA), radar kesit alanının azaltılması, hesaplamalı elektromanyetik, MATLAB.

ABSTRACT

RADAR CROSS SECTION COMPUTATION OF OBJECTS COATED BY FREQUENCY DISPERSIVE MATERIALS USING FINITE DIFFERENCE TIME DOMAIN METHOD

Mert ÖTENEL

Master of Science, Department of Electrical and Electronics Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Özlem ÖZGÜN

January 2024, 152 pages

A MATLAB-based software tool has been developed under the scope of this study to calculate the Radar Cross Section (RCS) of three-dimensional complex targets with random geometry using the Finite Difference Time Domain (FDTD) method. The software is named "RaPTo", derived by selecting letters from the full name "**R**adar Cross Section **P**rediction **T**ool". The developed software is capable of modeling both conductive targets and targets coated with isotropic and frequency-dispersive materials. RaPTo allows for graphical results and visual simulations, aiming to contribute to the literature by providing a software infrastructure for RCS analysis and, particularly, RCS reduction applications.

RaPTo models the target mesh structure, initially modeled using triangular surfaces with any computer-aided design (CAD) software and saved in the .stl file format, into three-

dimensional cubic elements using a ray-tracing algorithm. Using cubic elements, the software can calculate both monostatic and bistatic RCS values for the given problem. Three different models representing the characteristics of frequency-dispersive materials (Debye, Lorentz, and Drude models) can be defined within the software. Additionally, the material properties of the target in the problem can be defined as entirely conductive, entirely frequency-dispersive material, or conductive with a desired thickness of frequency-dispersive material. The RCS is calculated using the operation frequency and spherical coordinates of the plane wave specified by the user.

To validate the results obtained by the RaPTo software, a canonical object (i.e., a conductive sphere) was initially used. Bistatic RCS data obtained by RaPTo for the sphere were compared with both analytical results and bistatic RCS results obtained using the time domain solver of the commercial software CST Studio. Subsequently, bistatic RCS results obtained by RaPTo for a sphere coated with frequency-dispersive material (Lorentz, Debye, and Drude models) were compared with those obtained using CST. Finally, studies on RCS reduction were conducted. In this context, the impact of coated frequency-dispersive material on RCS reduction was investigated on both canonical geometries such as cube, sphere, and plate, and complex geometries such as F-117 Nighthawk and F-16 Fighting Falcon. The influence of coating thickness and collision frequency of the material on RCS was analyzed, and the results are presented comparatively.

Keywords: Finite difference method in time (FDTD), frequency dispersive material, radar cross section (RCS), radar cross section reduction, computational electromagnetics (CEM), MATLAB.

TEŞEKKÜR

Bu tez çalıőması sűresince sağladığı rehberlik, derin bilgi birikimi, değerli öğretileri ve yardımları için değerli danıőmanım sayın Prof. Dr. Özlem ÖZGÜN'e en derin űkranlarımı sunarım.

Bu tezi okuyup deđerlendirme yapan jűri űyelerine ve Hacettepe Ŭniversitesi Elektrik ve Elektronik Műhendisliđi blűm đretim űyelerine teőekkűr ederim.

Çalıőtıđım kurum olan TŬBİTAK'a, kurum çalıőanlarına, yöneticilerime ve iő arkadaőlarıma destekleri için teőekkűr ederim.

Beni bűyűten ve her zaman desteklemiő olan kıymetli annem Sűheyla ve babam Mehmet Ali ÖTENEL'e çok teőekkűr ederim. Bana annem gibi davranıp her zaman desteklemiő olan ablam Hatice ÖTENEL ÇIKIK'a çok teőekkűr ederim. Onları her zaman rahmetle anacađım. Geride kalan ve manevi destekleriyle yanımda olan ađabeyim Malik ÖTENEL'e, yiđenlerim Ziya ve Arel ÇIKIK'a çok teőekkűr ederim.

Son olarak özel bir teőekkűrű eőim Nuriye iđdem EKİ ÖTENEL'e sunmak istiyorum. Bu zorlu sűreteki en bűyűk destekleri, sabrı ve anlayıőı için çok minnettar olduđumu ifade etmek isterim. Ayrıca bana yeniden umut ıőıđı olan canım ođlum Marsel ÖTENEL'e çok teőekkűr ederim.

Mert ÖTENEL

Ocak 2024, Ankara

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xx
SİMGELER VE KISALTMALAR	xxi
1. GİRİŞ	1
1.1. Tez Akışı	5
2. RADAR KESİT ALANI (RKA) TEMELLERİ.....	7
2.1. Giriş	7
2.2. Hedef Saçılım Matrisi.....	10
2.3. Hedef Saçılım Mekanizması.....	11
2.4. RKA Tahmin Yöntemleri	13
2.4.1. Moment Metodu (MoM)	13
2.4.2. Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM)	14
2.4.3. Sonlu Farklar Yöntemi (FDM).....	15
2.4.4. Geometrik Optik ve Geometrik Kırınım Teorisi (GO & GTD)	15
2.4.5. Fiziksel Optik	16
3. FDTD FORMÜLASYONU	17
3.1. FDTD'ye Giriş.....	17
3.2. FDTD'nin Temel Denklemleri	17
3.3. Türevin Sonlu Farklar Yaklaşımı	20
3.4. Üç Boyutlu Problemler İçin FDTD Güncelleme Denklemleri	23
3.5. Mükemmel Uyumlu Katman (PML)	34
3.5.1. Üç Boyutlu Problem için PML denklemleri.....	35
3.6. Uzamsal Izgara ve Zaman Adımı Seçimi	38
3.7. Kaynak Seçimi	38

3.8. Yakın Alandan Uzak Alana Dönüşüm	40
3.8.1. Yüzey Eşdeğerlik Teoremi.....	42
3.8.2. FDTD için Eşdeğer Yüzey Akımları	43
3.8.3. Vektör Potansiyeli Yaklaşımı	46
3.9. Saçılan Alan Formülasyonu	48
3.10. Saçılan Alan Güncelleme Denklemleri	50
4. FREKANS DAĞITICI MALZEME MODELLEMESİ	55
4.1. Debye Ortamının Formülasyonu	56
4.1.1. Debye Ortamının ADE Tekniği Kullanılarak Modellenmesi	57
4.2. Lorentz Ortamının Formülasyonu	60
4.2.1. Lorentz Ortamının ADE Tekniği Kullanılarak Modellenmesi	60
4.3. Drude Ortamının Formülasyonu	63
4.3.1. Drude Ortamının ADE Tekniği Kullanılarak Modellenmesi	63
5. NÜMERİK SONUÇLAR	68
5.1. Mükemmel İletken Küre'nin RKA Sonuçları	68
5.2. Frekans Dağıtıcı Malzeme ile Oluşturulmuş Kürenin RKA Sonuçları	71
5.2.1. Lorentz Modeli Sonuçları	71
5.2.2. Debye Modeli Sonuçları	76
5.2.3. Drude Modeli Sonuçları.....	78
5.3. Drude Malzeme ile Kaplı Mükemmel İletken Kanonik Cisimlerin RKA Sonuçları	79
5.3.1. Drude Malzeme ile Kaplı Mükemmel İletken Kanonik Cisimlerin Bistatik RKA Sonuçları	79
5.3.2. Drude Malzeme ile Kaplı Mükemmel İletken Kanonik Cisimlerin Monostatik RKA Sonuçları.....	88
5.4. Drude Malzeme ile Kaplı Mükemmel İletken Karmaşık Cisimlerin RKA Sonuçları.....	94
5.4.1. Drude Malzeme ile Kaplı Mükemmel İletken F-117 Nighthawk Uçağının Bistatik RKA Sonuçları.....	94
5.4.2. Drude Malzeme ile Kaplı Mükemmel İletken F-16 Fighting Falcon Uçağının Monostatik RKA Sonuçları.....	137
6. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	139
7. KAYNAKLAR	153

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1.1: Bazı doğal ve insan yapımı nesnelere için tipik RKA değerleri.....	8
Şekil 2.1.2: Mükemmel iletken kürenin RKA'sı ve frekans bölgeleri [23].....	9
Şekil 2.3.1: Kompleks geometrilerde görülen farklı saçılım mekanizmaları [24].....	12
Şekil 3.3.1: fx 'in x noktasındaki türevinin sonlu farklar yaklaşımı: ileri fark [10].....	21
Şekil 3.3.2: fx 'in x noktasındaki türevinin sonlu farklar yaklaşımı: geri fark [10].....	22
Şekil 3.3.3: fx 'in x noktasındaki türevinin sonlu farklar yaklaşımı: merkezi fark [10].....	23
Şekil 3.4.1: Yee hücrelerinden oluşan üç boyutlu bir FDTD hesaplama uzayı [10].....	24
Şekil 3.4.2: Alan bileşenlerinin (i, j, k) olarak indekslenmiş bir Yee hücresi üzerindeki düzeni [10].....	24
Şekil 3.4.3: Bir Yee hücresi üzerinde indekslenmiş malzeme parametreleri [10].....	26
Şekil 3.4.4: Exi, j, k etrafındaki alan bileşenleri [10].....	27
Şekil 3.4.5: Hxi, j, k etrafındaki alan bileşenleri [10].....	29
Şekil 3.4.6: FDTD algoritması [10].....	34
Şekil 3.5.1: Üç boyutlu bir FDTD simülasyon alanı için PML iletkenliklerinin sıfır olmayan bölgeleri: (a) sıfır olmayan σ_{pex} ve σ_{pmx} (b) sıfır olmayan σ_{pey} ve σ_{pmy} (c) sıfır olmayan σ_{pez} ve σ_{pmz} ve (d) çakışan PML bölgeleri [10].....	37
Şekil 3.8.1: Yüzey eşdeğerlik teoremi: (a) orijinal problem ve (b) S dışındaki bölge için eşdeğer problem [10].....	42
Şekil 3.8.2: Saçıcı veya anteni çevreleyen hayali yüzey [10].....	43
Şekil 3.8.3: Hayali kapalı yüzey üzerindeki eşdeğer yüzey akımları [10].....	45
Şekil 3.8.4: Eşdeğer yüzey akım kaynağı ve uzak alan [10].....	47
Şekil 4.1.1: Debye algoritmasındaki terimlerin güncelleme sırası [10].....	60
Şekil 4.2.1: Lorentz algoritmasındaki terimlerin güncelleme sırası.....	63
Şekil 4.3.1: Drude algoritmasındaki terimlerin güncelleme sırası [10].....	67
Şekil 5.1.1: İletken Küre.....	69
Şekil 5.1.2: İletken Küre (Kübik form).....	69
Şekil 5.1.3: Mükemmel iletken kürenin, 0.5 GHz frekans kullanılarak, $r = 0.3 m (\lambda/2)$ boyutunda, dikey polarize ve $\theta_i = 180^\circ$ ve $\phi_i = 0^\circ$ gelen dalga açılarında, $\theta_o = 0^\circ \rightarrow 180^\circ$ 1'er derece aralıklarla ve $\phi_o = 120^\circ$ gözlem açılarında oluşan dikey polarize RKA Kartezyen grafiği.....	70
Şekil 5.1.4: Mükemmel iletken kürenin, 1 GHz frekans kullanılarak, $r = 0.3 m (\lambda)$ boyutunda, dikey polarize ve $\theta_i = 180^\circ$ ve $\phi_i = 0^\circ$ gelen dalga açılarında, $\theta_o = 0^\circ \rightarrow 180^\circ$ 1'er	

derece aralıklarla ve $\phi_o = 45^\circ$ gözlem açılarında oluşan dikey polarize RKA Kartezyen grafiği	70
Şekil 5.1.5: Mükemmel iletken kürenin, 3 GHz frekans kullanılarak, $r = 0.3 \text{ m}$ (3λ) boyutunda, dikey polarize ve $\theta_i = 180^\circ$ ve $\phi_i = 0^\circ$ gelen dalga açılarında, $\theta_o = 0^\circ \rightarrow 180^\circ$ 1'er derece aralıklarla ve $\phi_o = 120^\circ$ gözlem açılarında oluşan dikey polarize RKA Kartezyen grafiği	70
Şekil 5.1.6: Mükemmel iletken kürenin, 8 GHz frekans kullanılarak, $r = 0.0375 \text{ m}$ (λ) boyutunda, dikey polarize ve $\theta_i = 180^\circ$ ve $\phi_i = 0^\circ$ gelen dalga açılarında, $\theta_o = 180^\circ$ ve $\phi_o = 0^\circ \rightarrow 359^\circ$ 1'er derece aralıklarla gözlem açılarında oluşan dikey polarize RKA Kartezyen grafiği.....	70
Şekil 5.2.1: Jenerik Lorentz Küre	71
Şekil 5.2.2: Jenerik Lorentz Küre (Kübik form).....	71
Şekil 5.2.3: Malzeme özelliği $\epsilon_\infty = 2 \text{ F/m}$, $\epsilon_s = 5 \text{ F/m}$, $\omega = 4\pi \times 10^9 \text{ rad/s}$, $\delta = 2\pi \times 10^9 \text{ Hz}$ olan kürenin, 1 GHz frekans kullanılarak, $r = 0.1 \text{ m}$ ($\lambda/3$) boyutunda, dikey polarize ve $\theta_i = 0^\circ$ ve $\phi_i = 0^\circ$ gelen dalga açılarında, $\theta_o = 0^\circ \rightarrow 180^\circ$ 1'er derece aralıklarla ve $\phi_o = 0^\circ$ gözlem açılarında oluşan dikey polarize RKA Kartezyen grafiği .	72
Şekil 5.2.4: Malzeme özelliği $\epsilon_\infty = 2 \text{ F/m}$, $\epsilon_s = 5 \text{ F/m}$, $\omega = 4\pi \times 10^9 \text{ rad/s}$, $\delta = 2\pi \times 10^9 \text{ Hz}$ olan kürenin, 2 GHz frekans kullanılarak, $r = 0.1 \text{ m}$ ($2\lambda/3$) boyutunda, dikey polarize ve $\theta_i = 0^\circ$ ve $\phi_i = 0^\circ$ gelen dalga açılarında, $\theta_o = 0^\circ \rightarrow 180^\circ$ 1'er derece aralıklarla ve $\phi_o = 0^\circ$ gözlem açılarında oluşan dikey polarize RKA Kartezyen grafiği .	72
Şekil 5.2.5: Malzeme özelliği $\epsilon_\infty = 2 \text{ F/m}$, $\epsilon_s = 5 \text{ F/m}$, $\omega = 4\pi \times 10^9 \text{ rad/s}$, $\delta = 2\pi \times 10^9 \text{ Hz}$ olan kürenin, 3 GHz frekans kullanılarak, $r = 0.1 \text{ m}$ (λ) boyutunda, dikey polarize ve $\theta_i = 0^\circ$ ve $\phi_i = 0^\circ$ gelen dalga açılarında, $\theta_o = 0^\circ \rightarrow 180^\circ$ 1'er derece aralıklarla ve $\phi_o = 0^\circ$ gözlem açılarında oluşan dikey polarize RKA Kartezyen grafiği .	73
Şekil 5.2.6: Altın Küre	73
Şekil 5.2.7: Altın Küre (Kübik form)	73
Şekil 5.2.8: Altın kürenin, $\epsilon_\infty = 22.3162 \text{ F/m}$, $\epsilon_s = 2.03979 \times 10^8 \text{ F/m}$, $\omega = 1.215 \times 10^{12} \text{ rads}$, $\delta = 4.4183 \times 10^{13} \text{ Hz}$ malzeme özelliklerinde, 200 THz frekans kullanılarak, $r = 1.5 \times 10^{-6} \text{ m}$ (λ) boyutunda, dikey polarize ve $\theta_i = 180^\circ$ ve $\phi_i = 0^\circ$ gelen dalga açılarında, $\theta_o = 0^\circ \rightarrow 180^\circ$ 1'er derece aralıklarla ve $\phi_o = 0^\circ$ gözlem açılarında oluşan dikey polarize normalize RKA Kartezyen grafiği.....	74
Şekil 5.2.9: Altın kürenin, $\epsilon_\infty = 22.3162 \text{ F/m}$, $\epsilon_s = 2.03979 \times 10^8 \text{ F/m}$, $\omega = 1.215 \times 10^{12} \text{ rads}$, $\delta = 4.4183 \times 10^{13} \text{ Hz}$ malzeme özelliklerinde, 400 THz frekans kullanılarak, $r = 7.5 \times 10^{-7} \text{ m}$ (λ) boyutunda, dikey polarize ve $\theta_i = 180^\circ$ ve $\phi_i = 0^\circ$	

gelen dalga açılarında, $\theta_o = 0^\circ \rightarrow 180^\circ$ 1'er derece aralıklarla ve $\phi_o = 0^\circ$ gözlem açılarında oluşan dikey polarize normalize RKA Kartezyen grafiği	74
Şekil 5.2.10: Gümüş Küre.....	75
Şekil 5.2.11: Gümüş Küre (Kübik form)	75
Şekil 5.2.12: Gümüş kürenin, $\epsilon_\infty = 4.2167F/m$, $\epsilon_s = 4.7982 \times 10^7 \times 10^8 F/m$, $\omega = 2.0254 \times 10^{12} rad/s$, $\delta = 1.4046 \times 10^{13} Hz$ malzeme özelliklerinde, 250 THz frekans kullanılarak, $r = 1.2 \times 10 - 6 m$ (λ) boyutunda, dikey polarize ve $\theta_i = 180^\circ$ ve $\phi_i = 0^\circ$ gelen dalga açılarında, $\theta_o = 0^\circ \rightarrow 180^\circ$ 1'er derece aralıklarla ve $\phi_o = 0^\circ$ gözlem açılarında oluşan dikey polarize normalize RKA Kartezyen grafiği	76
Şekil 5.2.13: Gümüş kürenin, $\epsilon_\infty = 4.2167F/m$, $\epsilon_s = 4.7982 \times 10^7 \times 10^8 F/m$, $\omega = 2.0254 \times 10^{12} rad/s$, $\delta = 1.4046 \times 10^{13} Hz$ malzeme özelliklerinde, 350 THz frekans kullanılarak, $r = 8.5717 \times 10 - 7 m$ (λ) boyutunda, dikey polarize ve $\theta_i = 180^\circ$ ve $\phi_i = 0^\circ$ gelen dalga açılarında, $\theta_o = 0^\circ \rightarrow 180^\circ$ 1'er derece aralıklarla ve $\phi_o = 0^\circ$ gözlem açılarında oluşan dikey polarize normalize RKA Kartezyen grafiği	76
Şekil 5.2.14: Jenerik Debye Küre	77
Şekil 5.2.15: Jenerik Debye Küre (Kübik form).....	77
Şekil 5.2.16: Malzeme özelliği $\epsilon_\infty = 2 F/m$, $\epsilon_s = 4 F/m$, $\tau = 1 \times 10 - 9 s$ malzeme özelliklerinde, 150 MHz frekans kullanılarak, $r = 2 m$ (λ) boyutunda, dikey polarize ve $\theta_i = 180^\circ$ ve $\phi_i = 0^\circ$ gelen dalga açılarında, $\theta_o = 0^\circ \rightarrow 180^\circ$ 1'er derece aralıklarla ve $\phi_o = 0^\circ$ gözlem açılarında oluşan dikey polarize normalize RKA Kartezyen grafiği	77
Şekil 5.2.17: Malzeme özelliği $\epsilon_\infty = 2 F/m$, $\epsilon_s = 4 F/m$, $\tau = 1 \times 10 - 9 s$ malzeme özelliklerinde, 500 MHz frekans kullanılarak, $r = 0.6 m$ (λ) boyutunda, dikey polarize ve $\theta_i = 180^\circ$ ve $\phi_i = 0^\circ$ gelen dalga açılarında, $\theta_o = 0^\circ \rightarrow 180^\circ$ 1'er derece aralıklarla ve $\phi_o = 0^\circ$ gözlem açılarında oluşan dikey polarize normalize RKA Kartezyen grafiği	77
Şekil 5.2.18: Alüminyum Küre	78
Şekil 5.2.19: Alüminyum Küre (Kübik form).....	78
Şekil 5.2.20: Alüminyum kürenin, $\epsilon_\infty = 1 F/m$, $\omega = 2.0598 \times 10^{16} rad/s$, $\gamma = 2.2876 \times 10^{14} Hz$ malzeme özelliklerinde, 400 THz frekans kullanılarak, $r = 7.5 \times 10 - 7 m$ (λ) boyutunda, dikey polarize ve $\theta_i = 180^\circ$ ve $\phi_i = 0^\circ$ gelen dalga açılarında, $\theta_o = 0^\circ \rightarrow 180^\circ$ 1'er derece aralıklarla ve $\phi_o = 0^\circ$ gözlem açılarında oluşan dikey polarize normalize RKA Kartezyen grafiği.....	79
Şekil 5.2.21: Alüminyum kürenin, $\epsilon_\infty = 1 F/m$, $\omega = 2.0598 \times 10^{16} rad/s$, $\gamma = 2.2876 \times 10^{14} Hz$ malzeme özelliklerinde, 600 THz frekans kullanılarak, $r = 5 \times 10 - 7 m$ (λ) boyutunda, dikey polarize ve $\theta_i = 180^\circ$ ve $\phi_i = 0^\circ$ gelen dalga açılarında, $\theta_o =$	

$0^\circ \rightarrow 180^\circ$ 1'er derece aralıklarla ve $\phi_0 = 0^\circ$ gözlem açılarında oluşan dikey polarize normalize RKA Kartezyen grafiği	79
Şekil 5.3.1: Drude ile Kaplı İletken Küp	80
Şekil 5.3.2: Drude ile Kaplı İletken Küp (Kübik form).....	80
Şekil 5.3.3: Drude ile kaplı mükemmel iletken küpün, $\varepsilon_\infty = 1$ F/m , $\omega = 20\pi \times 10^9$ rad/s , $\gamma = 20 \times 10^9$ Hz frekans dağıtıcı malzeme özelliklerinde, 5 GHz frekans kullanılarak, $x, y, z = 0.12$ m (2λ) boyutunda, $d = 0.02$ m kaplama kalınlığında, dikey polarize ve $\theta_i = 90^\circ$ ve $\phi_i = 90^\circ$ gelen dalga açılarında, $\theta_o = 90^\circ$ ve $\phi_o = 0^\circ \rightarrow 359^\circ$ 1'er derece gözlem açılarında oluşan dikey polarize bistatik normalize RKA (a) Kartezyen grafiği, (b) polar grafiği	81
Şekil 5.3.4: Drude ile kaplı mükemmel iletken küpün, $\varepsilon_\infty = 1$ F/m , $\omega = 20\pi \times 10^9$ rad/s , $\gamma = 20 \times 10^9$ Hz frekans dağıtıcı malzeme özelliklerinde, 5 GHz frekans kullanılarak, $x, y, z = 0.12$ m (2λ) boyutunda, $d = 0.02$ m kaplama kalınlığında, yatay polarize ve $\theta_i = 90^\circ$ ve $\phi_i = 90^\circ$ gelen dalga açılarında, $\theta_o = 90^\circ$ ve $\phi_o = 0^\circ \rightarrow 359^\circ$ 1'er derece gözlem açılarında oluşan yatay polarize bistatik normalize RKA (a) Kartezyen grafiği, (b) polar grafiği	81
Şekil 5.3.5: Drude ile kaplı mükemmel iletken küpün, $\varepsilon_\infty = 1$ F/m , $\omega = 20\pi \times 10^9$ rad/s , $\gamma = 20 \times 10^9$ Hz frekans dağıtıcı malzeme özelliklerinde, 5 GHz frekans kullanılarak, $x, y, z = 0.12$ m (2λ) boyutunda, $d = 0.02$ m kaplama kalınlığında, (a) dikey, (b) yatay polarize ve $\theta_i = 90^\circ$ ve $\phi_i = 90^\circ$ gelen dalga açılarında, $\theta_o = 90^\circ$ ve $\phi_o = 0^\circ \rightarrow 359^\circ$ 1'er derece gözlem açılarında oluşan (a) dikey, (b) yatay polarize bistatik RKA farkı Kartezyen grafiği	82
Şekil 5.3.6: Drude ile kaplı mükemmel iletken küpün, $\varepsilon_\infty = 1$ F/m , $\omega = 20\pi \times 10^9$ rad/s , $\gamma = 20 \times 10^9$ Hz frekans dağıtıcı malzeme özelliklerinde, 5 GHz frekans kullanılarak, $x, y, z = 0.12$ m (2λ) boyutunda, $d = 0.02$ m kaplama kalınlığında, (a) dikey, (b) yatay polarize ve $\theta_i = 90^\circ$ ve $\phi_i = 90^\circ$ gelen dalga açılarında, $\theta_o = 90^\circ$ ve $\phi_o = 0^\circ \rightarrow 359^\circ$ 1'er derece gözlem açılarında oluşan (a) dikey, (b) yatay polarize bistatik RKA farkı histogram grafiği	83
Şekil 5.3.7: Drude ile Kaplı İletken Küre	84
Şekil 5.3.8: Drude ile Kaplı İletken Küre (Kübik form).....	84
Şekil 5.3.9: Drude ile kaplı mükemmel iletken küre, $\varepsilon_\infty = 1$ F/m , $\omega = 20\pi \times 10^9$ rad/s , $\gamma = 20 \times 10^9$ Hz frekans dağıtıcı malzeme özelliklerinde, 7 GHz frekans kullanılarak, $r = 0.0429$ m (λ) boyutunda, $d = 0.0021$ m kaplama kalınlığında, dikey polarize ve $\theta_i = 180^\circ$ ve $\phi_i = 0^\circ$ gelen dalga açılarında, $\theta_o = 0^\circ \rightarrow 359^\circ$ 1'er derece aralıklarla ve $\phi_o =$	

0° gözlem açılarında oluşan dikey polarize bistatik normalize RKA (a) Kartezyen, (b) polar grafiği, RKA farkı (c) Kartezyen, (d) histogram grafiği.....	85
Şekil 5.3.10: Drude ile Kaplı İletken Levha	86
Şekil 5.3.11: Drude ile Kaplı İletken Levha (Kübik form).....	86
Şekil 5.3.12: Drude ile kaplı mükemmel iletken levha, $\epsilon_{\infty} = 1 F/m, \omega = 20\pi \times 10^9 \text{ rad/s}, \gamma = 20 \times 10^9 \text{ Hz}$ frekans dağıtıcı malzeme özelliklerinde, 9 GHz frekans kullanılarak, $x, z = 0.0666 \text{ m} (2\lambda)$ boyutunda, $d = 0.0022 \text{ m}$ kaplama kalınlığında, dikey polarize ve $\theta_i = 30^\circ$ ve $\phi_i = 30^\circ$ gelen dalga açılarında, $\theta_o = 90^\circ$ ve $\phi_o = 0^\circ \rightarrow 359^\circ$ 1'er derece gözlem açılarında oluşan dikey polarize bistatik normalize RKA (a) Kartezyen, (b) polar grafiği, RKA farkı (c) Kartezyen, (d) histogram grafiği.....	87
Şekil 5.3.13: Drude ile Kaplı İletken Küp	88
Şekil 5.3.14: Drude ile Kaplı İletken Küp (Kübik form)	88
Şekil 5.3.15: Drude ile kaplı mükemmel iletken küpün, $\epsilon_{\infty} = 1 F/m, \omega = 20\pi \times 10^9 \text{ rad/s}, \gamma = 20 \times 10^9 \text{ Hz}$ frekans dağıtıcı malzeme özelliklerinde, 5 → 25 GHz frekans bandında 0.5 GHz'lik adımla, $x, y, z = 0.06 \text{ m}$ boyutunda, $d = 0.01 \text{ m}$ kaplama kalınlığında, dikey polarize ve $\theta_i, o = 90^\circ$ ve $\phi_i, o = 90^\circ$ gelen dalga ve gözlem açılarında oluşan dikey polarize monostatik normalize RKA (a) Kartezyen, RKA farkı (b) Kartezyen, (c) histogram grafiği	89
Şekil 5.3.16: Drude ile Kaplı İletken Küre	90
Şekil 5.3.17: Drude ile Kaplı İletken Küre (Kübik form).....	90
Şekil 5.3.18: Drude ile kaplı mükemmel iletken kürenin, $\epsilon_{\infty} = 1 F/m, \omega = 20\pi \times 10^9 \text{ rad/s}, \gamma = 20 \times 10^9 \text{ Hz}$ frekans dağıtıcı malzeme özelliklerinde, 5 → 25 GHz frekans bandında 0.5 GHz'lik adımla, $r = 0.012 \text{ m}$ boyutunda, $d = 0.0006 \text{ m}$ kaplama kalınlığında, dikey polarize ve $\theta_i, o = 180^\circ$ ve $\phi_i, o = 0^\circ$ gelen dalga ve gözlem açılarında oluşan dikey polarize monostatik normalize RKA (a) Kartezyen, RKA farkı (b) Kartezyen, (c) histogram grafiği	91
Şekil 5.3.19: Drude ile Kaplı İletken Levha	92
Şekil 5.3.20: Drude ile Kaplı İletken Levha (Kübik form).....	92
Şekil 5.3.21: Drude ile kaplı mükemmel iletken levhanın, $\epsilon_{\infty} = 1 F/m, \omega = 20\pi \times 10^9 \text{ rad/s}, \gamma = 20 \times 10^9 \text{ Hz}$ frekans dağıtıcı malzeme özelliklerinde, 5 → 25 GHz frekans bandında 0.5 GHz'lik adımla, $x, z = 0.06 \text{ m}$ boyutunda, $d = 0.01 \text{ m}$ kaplama kalınlığında, dikey polarize ve $\theta_i, o = 75^\circ$ ve $\phi_i, o = 90^\circ$ gelen dalga ve gözlem açılarında oluşan dikey polarize monostatik normalize RKA (a) Kartezyen, RKA farkı (b) Kartezyen, (c) histogram grafiği	93
Şekil 5.4.1: Kaplama Kalınlığı 0.1 mm ve Çarpışma Frekansı 10 GHz olan F-117.....	95

Şekil 5.4.2: Drude ile kaplı mükemmel iletken F-117, $\varepsilon_{\infty} = 1$ F/m , $\omega = 20\pi \times 10^9$ rad/s , $\gamma = 10 \times 10^9$ Hz frekans dağıtıcı malzeme özelliklerinde, 4 GHz frekans kullanılarak, $x = 14.23$, $y = 19.65$, $z = 2.381$ cm boyutunda, $d = 0.1$ mm kaplama kalınlığında, yatay polarize ve $\theta_i = 90^\circ$ ve $\phi_i = 90^\circ$ gelen dalga açılarında, $\theta_o = 90^\circ$ ve $\phi_o = 0^\circ \rightarrow 359^\circ$ 1'er derece gözlem açılarındaki oluşan yatay polarize bistatik normalize RKA (a) Kartezyen, (b) polar grafiği, RKA farkı (c) Kartezyen, (d) histogram grafiği 96

Şekil 5.4.3: Drude ile kaplı mükemmel iletken F-117, $\varepsilon_{\infty} = 1$ F/m , $\omega = 20\pi \times 10^9$ rad/s , $\gamma = 10 \times 10^9$ Hz frekans dağıtıcı malzeme özelliklerinde, 7 GHz frekans kullanılarak, $x = 14.23$, $y = 19.65$, $z = 2.381$ cm boyutunda, $d = 0.1$ mm kaplama kalınlığında, yatay polarize ve $\theta_i = 90^\circ$ ve $\phi_i = 90^\circ$ gelen dalga açılarında, $\theta_o = 90^\circ$ ve $\phi_o = 0^\circ \rightarrow 359^\circ$ 1'er derece gözlem açılarındaki oluşan yatay polarize bistatik normalize RKA (a) Kartezyen, (b) polar grafiği, RKA farkı (c) Kartezyen, (d) histogram grafiği 97

Şekil 5.4.4: Drude ile kaplı mükemmel iletken F-117, $\varepsilon_{\infty} = 1$ F/m , $\omega = 20\pi \times 10^9$ rad/s , $\gamma = 10 \times 10^9$ Hz frekans dağıtıcı malzeme özelliklerinde, 10 GHz frekans kullanılarak, $x = 14.23$, $y = 19.65$, $z = 2.381$ cm boyutunda, $d = 0.1$ mm kaplama kalınlığında, yatay polarize ve $\theta_i = 90^\circ$ ve $\phi_i = 90^\circ$ gelen dalga açılarında, $\theta_o = 90^\circ$ ve $\phi_o = 0^\circ \rightarrow 359^\circ$ 1'er derece gözlem açılarındaki oluşan yatay polarize bistatik normalize RKA (a) Kartezyen, (b) polar grafiği, RKA farkı (c) Kartezyen, (d) histogram grafiği 99

Şekil 5.4.5: Drude ile kaplı mükemmel iletken F-117, $\varepsilon_{\infty} = 1$ F/m , $\omega = 20\pi \times 10^9$ rad/s , $\gamma = 10 \times 10^9$ Hz frekans dağıtıcı malzeme özelliklerinde, 13 GHz frekans kullanılarak, $x = 14.23$, $y = 19.65$, $z = 2.381$ cm boyutunda, $d = 0.1$ mm kaplama kalınlığında, yatay polarize ve $\theta_i = 90^\circ$ ve $\phi_i = 90^\circ$ gelen dalga açılarında, $\theta_o = 90^\circ$ ve $\phi_o = 0^\circ \rightarrow 359^\circ$ 1'er derece gözlem açılarındaki oluşan yatay polarize bistatik normalize RKA (a) Kartezyen, (b) polar grafiği, RKA farkı (c) Kartezyen, (d) histogram grafiği 100

Şekil 5.4.6: Kaplama Kalınlığı 0.2 mm ve Çarpışma Frekansı 10 GHz olan F-117..... 101

Şekil 5.4.7: Drude ile kaplı mükemmel iletken F-117, $\varepsilon_{\infty} = 1$ F/m , $\omega = 20\pi \times 10^9$ rad/s , $\gamma = 10 \times 10^9$ Hz frekans dağıtıcı malzeme özelliklerinde, 4 GHz frekans kullanılarak, $x = 14.23$, $y = 19.65$, $z = 2.381$ cm boyutunda, $d = 0.2$ mm kaplama kalınlığında, yatay polarize ve $\theta_i = 90^\circ$ ve $\phi_i = 90^\circ$ gelen dalga açılarında, $\theta_o = 90^\circ$ ve $\phi_o = 0^\circ \rightarrow 359^\circ$ 1'er derece gözlem açılarındaki oluşan yatay polarize bistatik normalize RKA (a) Kartezyen, (b) polar grafiği, RKA farkı (c) Kartezyen, (d) histogram grafiği 102

Şekil 5.4.8: Drude ile kaplı mükemmel iletken F-117, $\varepsilon_{\infty} = 1$ F/m , $\omega = 20\pi \times 10^9$ rad/s , $\gamma = 10 \times 10^9$ Hz frekans dağıtıcı malzeme özelliklerinde, 7 GHz frekans kullanılarak, $x = 14.23$, $y = 19.65$, $z = 2.381$ cm boyutunda, $d = 0.2$ mm kaplama kalınlığında, yatay polarize ve $\theta_i = 90^\circ$ ve $\phi_i = 90^\circ$ gelen dalga açılarında, $\theta_o = 90^\circ$ ve $\phi_o = 0^\circ \rightarrow 359^\circ$

- 1' er derece gözlem açılarında oluşan yatay polarize bistatik normalize RKA (a) Kartezyen, (b) polar grafiği, RKA farkı (c) Kartezyen, (d) histogram grafiği..... 103
- Şekil 5.4.9:** Drude ile kaplı mükemmel iletken F-117, $\epsilon_{\infty} = 1$ F/m , $\omega = 20\pi \times 10^9$ rad/s , $\gamma = 10 \times 10^9$ Hz frekans dağıtıcı malzeme özelliklerinde, 10 GHz frekans kullanılarak, $x = 14.23$, $y = 19.65$, $z = 2.381$ cm boyutunda, $d = 0.2$ mm kaplama kalınlığında, yatay polarize ve $\theta_i = 90^\circ$ ve $\phi_i = 90^\circ$ gelen dalga açılarında, $\theta_o = 90^\circ$ ve $\phi_o = 0^\circ \rightarrow 359^\circ$ 1' er derece gözlem açılarında oluşan yatay polarize bistatik normalize RKA (a) Kartezyen, (b) polar grafiği, RKA farkı (c) Kartezyen, (d) histogram grafiği..... 105
- Şekil 5.4.10:** Drude ile kaplı mükemmel iletken F-117, $\epsilon_{\infty} = 1$ F/m , $\omega = 20\pi \times 10^9$ rad/s , $\gamma = 10 \times 10^9$ Hz frekans dağıtıcı malzeme özelliklerinde, 13 GHz frekans kullanılarak, $x = 14.23$, $y = 19.65$, $z = 2.381$ cm boyutunda, $d = 0.2$ mm kaplama kalınlığında, yatay polarize ve $\theta_i = 90^\circ$ ve $\phi_i = 90^\circ$ gelen dalga açılarında, $\theta_o = 90^\circ$ ve $\phi_o = 0^\circ \rightarrow 359^\circ$ 1' er derece gözlem açılarında oluşan yatay polarize bistatik normalize RKA (a) Kartezyen, (b) polar grafiği, RKA farkı (c) Kartezyen, (d) histogram grafiği..... 106
- Şekil 5.4.11:** Kaplama Kalınlığı 0.4 mm ve Çarpışma Frekansı 10 GHz olan F-117..... 107
- Şekil 5.4.12:** Drude ile kaplı mükemmel iletken F-117, $\epsilon_{\infty} = 1$ F/m , $\omega = 20\pi \times 10^9$ rad/s , $\gamma = 10 \times 10^9$ Hz frekans dağıtıcı malzeme özelliklerinde, 4 GHz frekans kullanılarak, $x = 14.23$, $y = 19.65$, $z = 2.381$ cm boyutunda, $d = 0.4$ mm kaplama kalınlığında, yatay polarize ve $\theta_i = 90^\circ$ ve $\phi_i = 90^\circ$ gelen dalga açılarında, $\theta_o = 90^\circ$ ve $\phi_o = 0^\circ \rightarrow 359^\circ$ 1' er derece gözlem açılarında oluşan yatay polarize bistatik normalize RKA (a) Kartezyen, (b) polar grafiği, RKA farkı (c) Kartezyen, (d) histogram grafiği..... 108
- Şekil 5.4.13:** Drude ile kaplı mükemmel iletken F-117, $\epsilon_{\infty} = 1$ F/m , $\omega = 20\pi \times 10^9$ rad/s , $\gamma = 10 \times 10^9$ Hz frekans dağıtıcı malzeme özelliklerinde, 7 GHz frekans kullanılarak, $x = 14.23$, $y = 19.65$, $z = 2.381$ cm boyutunda, $d = 0.4$ mm kaplama kalınlığında, yatay polarize ve $\theta_i = 90^\circ$ ve $\phi_i = 90^\circ$ gelen dalga açılarında, $\theta_o = 90^\circ$ ve $\phi_o = 0^\circ \rightarrow 359^\circ$ 1' er derece gözlem açılarında oluşan yatay polarize bistatik normalize RKA (a) Kartezyen, (b) polar grafiği, RKA farkı (c) Kartezyen, (d) histogram grafiği..... 109
- Şekil 5.4.14:** Drude ile kaplı mükemmel iletken F-117, $\epsilon_{\infty} = 1$ F/m , $\omega = 20\pi \times 10^9$ rad/s , $\gamma = 10 \times 10^9$ Hz frekans dağıtıcı malzeme özelliklerinde, 10 GHz frekans kullanılarak, $x = 14.23$, $y = 19.65$, $z = 2.381$ cm boyutunda, $d = 0.4$ mm kaplama kalınlığında, yatay polarize ve $\theta_i = 90^\circ$ ve $\phi_i = 90^\circ$ gelen dalga açılarında, $\theta_o = 90^\circ$ ve $\phi_o = 0^\circ \rightarrow 359^\circ$ 1' er derece gözlem açılarında oluşan yatay polarize bistatik normalize RKA (a) Kartezyen, (b) polar grafiği, RKA farkı (c) Kartezyen, (d) histogram grafiği..... 111
- Şekil 5.4.15:** Drude ile kaplı mükemmel iletken F-117, $\epsilon_{\infty} = 1$ F/m , $\omega = 20\pi \times 10^9$ rad/s , $\gamma = 10 \times 10^9$ Hz frekans dağıtıcı malzeme özelliklerinde, 13 GHz frekans kullanılarak,

$x = 14.23, y = 19.65, z = 2.381 \text{ cm}$ boyutunda, $d = 0.4 \text{ mm}$ kaplama kalınlığında, yatay polarize ve $\theta_i = 90^\circ$ ve $\phi_i = 90^\circ$ gelen dalga açılarında, $\theta_o = 90^\circ$ ve $\phi_o = 0^\circ \rightarrow 359^\circ$ 1'er derece gözlem açılarındaki oluşan yatay polarize bistatik normalize RKA (a) Kartezyen, (b) polar grafiği, RKA farkı (c) Kartezyen, (d) histogram grafiği 112

Şekil 5.4.16: Drude ile kaplı mükemmel iletken F-117, $\epsilon_\infty = 1 F/m, \omega = 20\pi \times 10^9 \text{ rad/s}$, $\gamma = 200 \times 10^9 \text{ Hz}$ frekans dağıtıcı malzeme özelliklerinde, 4 GHz frekans kullanılarak, $x = 14.23, y = 19.65, z = 2.381 \text{ cm}$ boyutunda, $d = 0.1 \text{ mm}$ kaplama kalınlığında, yatay polarize ve $\theta_i = 90^\circ$ ve $\phi_i = 90^\circ$ gelen dalga açılarında, $\theta_o = 90^\circ$ ve $\phi_o = 0^\circ \rightarrow 359^\circ$ 1'er derece gözlem açılarındaki oluşan yatay polarize bistatik normalize RKA (a) Kartezyen, (b) polar grafiği, RKA farkı (c) Kartezyen, (d) histogram grafiği 114

Şekil 5.4.17: Drude ile kaplı mükemmel iletken F-117, $\epsilon_\infty = 1 F/m, \omega = 20\pi \times 10^9 \text{ rad/s}$, $\gamma = 200 \times 10^9 \text{ Hz}$ frekans dağıtıcı malzeme özelliklerinde, 7 GHz frekans kullanılarak, $x = 14.23, y = 19.65, z = 2.381 \text{ cm}$ boyutunda, $d = 0.1 \text{ mm}$ kaplama kalınlığında, yatay polarize ve $\theta_i = 90^\circ$ ve $\phi_i = 90^\circ$ gelen dalga açılarında, $\theta_o = 90^\circ$ ve $\phi_o = 0^\circ \rightarrow 359^\circ$ 1'er derece gözlem açılarındaki oluşan yatay polarize bistatik normalize RKA (a) Kartezyen, (b) polar grafiği, RKA farkı (c) Kartezyen, (d) histogram grafiği 115

Şekil 5.4.18: Drude ile kaplı mükemmel iletken F-117, $\epsilon_\infty = 1 F/m, \omega = 20\pi \times 10^9 \text{ rad/s}$, $\gamma = 200 \times 10^9 \text{ Hz}$ frekans dağıtıcı malzeme özelliklerinde, 10 GHz frekans kullanılarak, $x = 14.23, y = 19.65, z = 2.381 \text{ cm}$ boyutunda, $d = 0.1 \text{ mm}$ kaplama kalınlığında, yatay polarize ve $\theta_i = 90^\circ$ ve $\phi_i = 90^\circ$ gelen dalga açılarında, $\theta_o = 90^\circ$ ve $\phi_o = 0^\circ \rightarrow 359^\circ$ 1'er derece gözlem açılarındaki oluşan yatay polarize bistatik normalize RKA (a) Kartezyen, (b) polar grafiği, RKA farkı (c) Kartezyen, (d) histogram grafiği 116

Şekil 5.4.19: Drude ile kaplı mükemmel iletken F-117, $\epsilon_\infty = 1 F/m, \omega = 20\pi \times 10^9 \text{ rad/s}$, $\gamma = 500 \times 10^9 \text{ Hz}$ frekans dağıtıcı malzeme özelliklerinde, 4 GHz frekans kullanılarak, $x = 14.23, y = 19.65, z = 2.381 \text{ cm}$ boyutunda, $d = 0.1 \text{ mm}$ kaplama kalınlığında, yatay polarize ve $\theta_i = 90^\circ$ ve $\phi_i = 90^\circ$ gelen dalga açılarında, $\theta_o = 90^\circ$ ve $\phi_o = 0^\circ \rightarrow 359^\circ$ 1'er derece gözlem açılarındaki oluşan yatay polarize bistatik normalize RKA (a) Kartezyen, (b) polar grafiği, RKA farkı (c) Kartezyen, (d) histogram grafiği 118

Şekil 5.4.20: Drude ile kaplı mükemmel iletken F-117, $\epsilon_\infty = 1 F/m, \omega = 20\pi \times 10^9 \text{ rad/s}$, $\gamma = 500 \times 10^9 \text{ Hz}$ frekans dağıtıcı malzeme özelliklerinde, 7 GHz frekans kullanılarak, $x = 14.23, y = 19.65, z = 2.381 \text{ cm}$ boyutunda, $d = 0.1 \text{ mm}$ kaplama kalınlığında, yatay polarize ve $\theta_i = 90^\circ$ ve $\phi_i = 90^\circ$ gelen dalga açılarında, $\theta_o = 90^\circ$ ve $\phi_o = 0^\circ \rightarrow 359^\circ$ 1'er derece gözlem açılarındaki oluşan yatay polarize bistatik normalize RKA (a) Kartezyen, (b) polar grafiği, RKA farkı (c) Kartezyen, (d) histogram grafiği 119

Şekil 5.4.21: Drude ile kaplı mükemmel iletken F-117, $\varepsilon_{\infty} = 1 F/m$, $\omega = 20\pi \times 10^9 \text{ rad/s}$, $\gamma = 500 \times 10^9 \text{ Hz}$ frekans dağıtıcı malzeme özelliklerinde, 10 GHz frekans kullanılarak, $x = 14.23, y = 19.65, z = 2.381 \text{ cm}$ boyutunda, $d = 0.1 \text{ mm}$ kaplama kalınlığında, yatay polarize ve $\theta_i = 90^\circ$ ve $\phi_i = 90^\circ$ gelen dalga açıları, $\theta_o = 90^\circ$ ve $\phi_o = 0^\circ \rightarrow 359^\circ$ 1'er derece gözlem açıları, oluşan yatay polarize bistatik normalize RKA (a) Kartezyen, (b) polar grafiği, RKA farkı (c) Kartezyen, (d) histogram grafiği..... 120

Şekil 5.4.22: Drude ile kaplı mükemmel iletken F-117, $\varepsilon_{\infty} = 1 F/m$, $\omega = 20\pi \times 10^9 \text{ rad/s}$, $\gamma = 10 \times 10^9 \text{ Hz}$ frekans dağıtıcı malzeme özelliklerinde, 4 GHz frekans kullanılarak, $x = 14.23, y = 19.65, z = 2.381 \text{ cm}$ boyutunda, $d = 0.1, 0.2, 0.4 \text{ mm}$ kaplama kalınlıklarında, yatay polarize ve $\theta_i = 90^\circ$ ve $\phi_i = 90^\circ$ gelen dalga açıları, $\theta_o = 90^\circ$ ve $\phi_o = 0^\circ \rightarrow 359^\circ$ 1'er derece gözlem açıları, oluşan yatay polarize bistatik normalize RKA (a) Kartezyen, (b) histogram grafiği..... 122

Şekil 5.4.22: Drude ile kaplı mükemmel iletken F-117, $\varepsilon_{\infty} = 1 F/m$, $\omega = 20\pi \times 10^9 \text{ rad/s}$, $\gamma = 10 \times 10^9 \text{ Hz}$ frekans dağıtıcı malzeme özelliklerinde, 4 GHz frekans kullanılarak, $x = 14.23, y = 19.65, z = 2.381 \text{ cm}$ boyutunda, $d = 0.1, 0.2, 0.4 \text{ mm}$ kaplama kalınlıklarında, yatay polarize ve $\theta_i = 90^\circ$ ve $\phi_i = 90^\circ$ gelen dalga açıları, $\theta_o = 90^\circ$ ve $\phi_o = 0^\circ \rightarrow 359^\circ$ 1'er derece gözlem açıları, oluşan yatay polarize bistatik normalize RKA (a) Kartezyen, (b) histogram grafiği..... 122

Şekil 5.4.23: Drude ile kaplı mükemmel iletken F-117, $\varepsilon_{\infty} = 1 F/m$, $\omega = 20\pi \times 10^9 \text{ rad/s}$, $\gamma = 10 \times 10^9 \text{ Hz}$ frekans dağıtıcı malzeme özelliklerinde, 5 GHz frekans kullanılarak, $x = 14.23, y = 19.65, z = 2.381 \text{ cm}$ boyutunda, $d = 0.1, 0.2, 0.4 \text{ mm}$ kaplama kalınlıklarında, yatay polarize ve $\theta_i = 90^\circ$ ve $\phi_i = 90^\circ$ gelen dalga açıları, $\theta_o = 90^\circ$ ve $\phi_o = 0^\circ \rightarrow 359^\circ$ 1'er derece gözlem açıları, oluşan yatay polarize bistatik normalize RKA (a) Kartezyen, (b) histogram grafiği..... 123

Şekil 5.4.24: Drude ile kaplı mükemmel iletken F-117, $\varepsilon_{\infty} = 1 F/m$, $\omega = 20\pi \times 10^9 \text{ rad/s}$, $\gamma = 10 \times 10^9 \text{ Hz}$ frekans dağıtıcı malzeme özelliklerinde, 6 GHz frekans kullanılarak, $x = 14.23, y = 19.65, z = 2.381 \text{ cm}$ boyutunda, $d = 0.1, 0.2, 0.4 \text{ mm}$ kaplama kalınlıklarında, yatay polarize ve $\theta_i = 90^\circ$ ve $\phi_i = 90^\circ$ gelen dalga açıları, $\theta_o = 90^\circ$ ve $\phi_o = 0^\circ \rightarrow 359^\circ$ 1'er derece gözlem açıları, oluşan yatay polarize bistatik normalize RKA (a) Kartezyen, (b) histogram grafiği..... 124

Şekil 5.4.25: Drude ile kaplı mükemmel iletken F-117, $\varepsilon_{\infty} = 1 F/m$, $\omega = 20\pi \times 10^9 \text{ rad/s}$, $\gamma = 10 \times 10^9 \text{ Hz}$ frekans dağıtıcı malzeme özelliklerinde, 7 GHz frekans kullanılarak, $x = 14.23, y = 19.65, z = 2.381 \text{ cm}$ boyutunda, $d = 0.1, 0.2, 0.4 \text{ mm}$ kaplama kalınlıklarında, yatay polarize ve $\theta_i = 90^\circ$ ve $\phi_i = 90^\circ$ gelen dalga açıları, $\theta_o = 90^\circ$

- ve $\phi_o = 0^\circ \rightarrow 359^\circ$ 1'er derece gözlem açılarında oluşan yatay polarize bistatik normalize RKA (a) Kartezyen, (b) histogram grafiği 124
- Şekil 5.4.26:** Drude ile kaplı mükemmel iletken F-117, $\varepsilon_\infty = 1 F/m$, $\omega = 20\pi \times 10^9 \text{ rad/s}$, $\gamma = 10 \times 10^9 \text{ Hz}$ frekans dağıtıcı malzeme özelliklerinde, 8 GHz frekans kullanılarak, $x = 14.23, y = 19.65, z = 2.381 \text{ cm}$ boyutunda, $d = 0.1, 0.2, 0.4 \text{ mm}$ kaplama kalınlıklarında, yatay polarize ve $\theta_i = 90^\circ$ ve $\phi_i = 90^\circ$ gelen dalga açılarında, $\theta_o = 90^\circ$ ve $\phi_o = 0^\circ \rightarrow 359^\circ$ 1'er derece gözlem açılarında oluşan yatay polarize bistatik normalize RKA (a) Kartezyen, (b) histogram grafiği 125
- Şekil 5.4.27:** Drude ile kaplı mükemmel iletken F-117, $\varepsilon_\infty = 1 F/m$, $\omega = 20\pi \times 10^9 \text{ rad/s}$, $\gamma = 10 \times 10^9 \text{ Hz}$ frekans dağıtıcı malzeme özelliklerinde, 9 GHz frekans kullanılarak, $x = 14.23, y = 19.65, z = 2.381 \text{ cm}$ boyutunda, $d = 0.1, 0.2, 0.4 \text{ mm}$ kaplama kalınlıklarında, yatay polarize ve $\theta_i = 90^\circ$ ve $\phi_i = 90^\circ$ gelen dalga açılarında, $\theta_o = 90^\circ$ ve $\phi_o = 0^\circ \rightarrow 359^\circ$ 1'er derece gözlem açılarında oluşan yatay polarize bistatik normalize RKA (a) Kartezyen, (b) histogram grafiği 126
- Şekil 5.4.28:** Drude ile kaplı mükemmel iletken F-117, $\varepsilon_\infty = 1 F/m$, $\omega = 20\pi \times 10^9 \text{ rad/s}$, $\gamma = 10 \times 10^9 \text{ Hz}$ frekans dağıtıcı malzeme özelliklerinde, 10 GHz frekans kullanılarak, $x = 14.23, y = 19.65, z = 2.381 \text{ cm}$ boyutunda, $d = 0.1, 0.2, 0.4 \text{ mm}$ kaplama kalınlıklarında, yatay polarize ve $\theta_i = 90^\circ$ ve $\phi_i = 90^\circ$ gelen dalga açılarında, $\theta_o = 90^\circ$ ve $\phi_o = 0^\circ \rightarrow 359^\circ$ 1'er derece gözlem açılarında oluşan yatay polarize bistatik normalize RKA (a) Kartezyen, (b) histogram grafiği 126
- Şekil 5.4.29:** Drude ile kaplı mükemmel iletken F-117, $\varepsilon_\infty = 1 F/m$, $\omega = 20\pi \times 10^9 \text{ rad/s}$, $\gamma = 10 \times 10^9 \text{ Hz}$ frekans dağıtıcı malzeme özelliklerinde, 11 GHz frekans kullanılarak, $x = 14.23, y = 19.65, z = 2.381 \text{ cm}$ boyutunda, $d = 0.1, 0.2, 0.4 \text{ mm}$ kaplama kalınlıklarında, yatay polarize ve $\theta_i = 90^\circ$ ve $\phi_i = 90^\circ$ gelen dalga açılarında, $\theta_o = 90^\circ$ ve $\phi_o = 0^\circ \rightarrow 359^\circ$ 1'er derece gözlem açılarında oluşan yatay polarize bistatik normalize RKA (a) Kartezyen, (b) histogram grafiği 127
- Şekil 5.4.30:** Drude ile kaplı mükemmel iletken F-117, $\varepsilon_\infty = 1 F/m$, $\omega = 20\pi \times 10^9 \text{ rad/s}$, $\gamma = 10 \times 10^9 \text{ Hz}$ frekans dağıtıcı malzeme özelliklerinde, 12 GHz frekans kullanılarak, $x = 14.23, y = 19.65, z = 2.381 \text{ cm}$ boyutunda, $d = 0.1, 0.2, 0.4 \text{ mm}$ kaplama kalınlıklarında, yatay polarize ve $\theta_i = 90^\circ$ ve $\phi_i = 90^\circ$ gelen dalga açılarında, $\theta_o = 90^\circ$ ve $\phi_o = 0^\circ \rightarrow 359^\circ$ 1'er derece gözlem açılarında oluşan yatay polarize bistatik normalize RKA (a) Kartezyen, (b) histogram grafiği 128
- Şekil 5.4.31:** Drude ile kaplı mükemmel iletken F-117, $\varepsilon_\infty = 1 F/m$, $\omega = 20\pi \times 10^9 \text{ rad/s}$, $\gamma = 10 \times 10^9 \text{ Hz}$ frekans dağıtıcı malzeme özelliklerinde, 13 GHz frekans kullanılarak, $x = 14.23, y = 19.65, z = 2.381 \text{ cm}$ boyutunda, $d = 0.1, 0.2, 0.4 \text{ mm}$ kaplama

- kalınlıklarında, yatay polarize ve $\theta_i = 90^\circ$ ve $\phi_i = 90^\circ$ gelen dalga açılarında, $\theta_o = 90^\circ$ ve $\phi_o = 0^\circ \rightarrow 359^\circ$ 1'er derece gözlem açılarındaki oluşan yatay polarize bistatik normalize RKA (a) Kartezyen, (b) histogram grafiği..... 128
- Şekil 5.4.32:** Drude ile kaplı mükemmel iletken F-117, $\epsilon_\infty = 1 F/m, \omega = 20\pi \times 10^9 \text{ rad/s}$, $\gamma = 10 \times 10^9 \text{ Hz}$ frekans dağıtıcı malzeme özelliklerinde, 14 GHz frekans kullanılarak, $x = 14.23, y = 19.65, z = 2.381 \text{ cm}$ boyutunda, $d = 0.1, 0.2, 0.4 \text{ mm}$ kaplama kalınlıklarında, yatay polarize ve $\theta_i = 90^\circ$ ve $\phi_i = 90^\circ$ gelen dalga açılarında, $\theta_o = 90^\circ$ ve $\phi_o = 0^\circ \rightarrow 359^\circ$ 1'er derece gözlem açılarındaki oluşan yatay polarize bistatik normalize RKA (a) Kartezyen, (b) histogram grafiği..... 129
- Şekil 5.4.33:** Drude ile kaplı mükemmel iletken F-117, $\epsilon_\infty = 1 F/m, \omega = 20\pi \times 10^9 \text{ rad/s}$, $\gamma = 10 \times 10^9 \text{ Hz}$ frekans dağıtıcı malzeme özelliklerinde, 15 GHz frekans kullanılarak, $x = 14.23, y = 19.65, z = 2.381 \text{ cm}$ boyutunda, $d = 0.1, 0.2, 0.4 \text{ mm}$ kaplama kalınlıklarında, yatay polarize ve $\theta_i = 90^\circ$ ve $\phi_i = 90^\circ$ gelen dalga açılarında, $\theta_o = 90^\circ$ ve $\phi_o = 0^\circ \rightarrow 359^\circ$ 1'er derece gözlem açılarındaki oluşan yatay polarize bistatik normalize RKA (a) Kartezyen, (b) histogram grafiği..... 130
- Şekil 5.4.34:** Drude ile kaplı mükemmel iletken F-117, $\epsilon_\infty = 1 F/m, \omega = 20\pi \times 10^9 \text{ rad/s}$, $\gamma = 10, 200, 500 \text{ GHz}$ frekans dağıtıcı malzeme özelliklerinde, 4 GHz frekans kullanılarak, $x = 14.23, y = 19.65, z = 2.381 \text{ cm}$ boyutunda, $d = 0.1 \text{ mm}$ kaplama kalınlığında, yatay polarize ve $\theta_i = 90^\circ$ ve $\phi_i = 90^\circ$ gelen dalga açılarında, $\theta_o = 90^\circ$ ve $\phi_o = 0^\circ \rightarrow 359^\circ$ 1'er derece gözlem açılarındaki oluşan yatay polarize bistatik normalize RKA (a) Kartezyen, (b) histogram grafiği..... 132
- Şekil 5.4.35 :** Drude ile kaplı mükemmel iletken F-117, $\epsilon_\infty = 1 F/m, \omega = 20\pi \times 10^9 \text{ rad/s}$, $\gamma = 10, 200, 500 \text{ GHz}$ frekans dağıtıcı malzeme özelliklerinde, 5 GHz frekans kullanılarak, $x = 14.23, y = 19.65, z = 2.381 \text{ cm}$ boyutunda, $d = 0.1 \text{ mm}$ kaplama kalınlığında, yatay polarize ve $\theta_i = 90^\circ$ ve $\phi_i = 90^\circ$ gelen dalga açılarında, $\theta_o = 90^\circ$ ve $\phi_o = 0^\circ \rightarrow 359^\circ$ 1'er derece gözlem açılarındaki oluşan yatay polarize bistatik normalize RKA (a) Kartezyen, (b) histogram grafiği..... 132
- Şekil 5.4.36:** Drude ile kaplı mükemmel iletken F-117, $\epsilon_\infty = 1 F/m, \omega = 20\pi \times 10^9 \text{ rad/s}$, $\gamma = 10, 200, 500 \text{ GHz}$ frekans dağıtıcı malzeme özelliklerinde, 6 GHz frekans kullanılarak, $x = 14.23, y = 19.65, z = 2.381 \text{ cm}$ boyutunda, $d = 0.1 \text{ mm}$ kaplama kalınlığında, yatay polarize ve $\theta_i = 90^\circ$ ve $\phi_i = 90^\circ$ gelen dalga açılarında, $\theta_o = 90^\circ$ ve $\phi_o = 0^\circ \rightarrow 359^\circ$ 1'er derece gözlem açılarındaki oluşan yatay polarize bistatik normalize RKA (a) Kartezyen, (b) histogram grafiği..... 133
- Şekil 5.4.37:** Drude ile kaplı mükemmel iletken F-117, $\epsilon_\infty = 1 F/m, \omega = 20\pi \times 10^9 \text{ rad/s}$, $\gamma = 10, 200, 500 \text{ GHz}$ frekans dağıtıcı malzeme özelliklerinde, 7 GHz frekans kullanılarak,

- $x = 14.23, y = 19.65, z = 2.381 \text{ cm}$ boyutunda, $d = 0.1 \text{ mm}$ kaplama kalınlığında, yatay polarize ve $\theta_i = 90^\circ$ ve $\phi_i = 90^\circ$ gelen dalga açılarında, $\theta_o = 90^\circ$ ve $\phi_o = 0^\circ \rightarrow 359^\circ$ 1'er derece gözlem açılarında oluşan yatay polarize bstatik normalize RKA (a) Kartezyen, (b) histogram grafiği..... 134
- Şekil 5.4.38:** Drude ile kaplı mükemmel iletken F-117, $\varepsilon_\infty = 1 \text{ F/m}, \omega = 20\pi \times 10^9 \text{ rad/s}$, $\gamma = 10, 200, 500 \text{ GHz}$ frekans dağıtıcı malzeme özelliklerinde, 8 GHz frekans kullanılarak, $x = 14.23, y = 19.65, z = 2.381 \text{ cm}$ boyutunda, $d = 0.1 \text{ mm}$ kaplama kalınlığında, yatay polarize ve $\theta_i = 90^\circ$ ve $\phi_i = 90^\circ$ gelen dalga açılarında, $\theta_o = 90^\circ$ ve $\phi_o = 0^\circ \rightarrow 359^\circ$ 1'er derece gözlem açılarında oluşan yatay polarize bstatik normalize RKA (a) Kartezyen, (b) histogram grafiği..... 134
- Şekil 5.4.39:** Drude ile kaplı mükemmel iletken F-117, $\varepsilon_\infty = 1 \text{ F/m}, \omega = 20\pi \times 10^9 \text{ rad/s}$, $\gamma = 10, 200, 500 \text{ GHz}$ frekans dağıtıcı malzeme özelliklerinde, 9 GHz frekans kullanılarak, $x = 14.23, y = 19.65, z = 2.381 \text{ cm}$ boyutunda, $d = 0.1 \text{ mm}$ kaplama kalınlığında, yatay polarize ve $\theta_i = 90^\circ$ ve $\phi_i = 90^\circ$ gelen dalga açılarında, $\theta_o = 90^\circ$ ve $\phi_o = 0^\circ \rightarrow 359^\circ$ 1'er derece gözlem açılarında oluşan yatay polarize bstatik normalize RKA (a) Kartezyen, (b) histogram grafiği..... 135
- Şekil 5.4.40:** Drude ile kaplı mükemmel iletken F-117, $\varepsilon_\infty = 1 \text{ F/m}, \omega = 20\pi \times 10^9 \text{ rad/s}$, $\gamma = 10, 200, 500 \text{ GHz}$ frekans dağıtıcı malzeme özelliklerinde, 10 GHz frekans kullanılarak, $x = 14.23, y = 19.65, z = 2.381 \text{ cm}$ boyutunda, $d = 0.1 \text{ mm}$ kaplama kalınlığında, yatay polarize ve $\theta_i = 90^\circ$ ve $\phi_i = 90^\circ$ gelen dalga açılarında, $\theta_o = 90^\circ$ ve $\phi_o = 0^\circ \rightarrow 359^\circ$ 1'er derece gözlem açılarında oluşan yatay polarize bstatik normalize RKA (a) Kartezyen, (b) histogram grafiği 136
- Şekil 5.4.41:** Kaplama Kalınlığı 0.1 mm ve Çarpışma Frekansı 20 GHz olan F-16..... 137
- Şekil 5.4.42:** Drude ile kaplı mükemmel iletken F-16, $\varepsilon_\infty = 1 \text{ F/m}, \omega = 20\pi \times 10^9 \text{ rad/s}, \gamma = 20 \times 10^9 \text{ Hz}$ frekans dağıtıcı malzeme özelliklerinde, 4 → 15 GHz frekans bandında 0.1 GHz'lik adımla, $x = 9.14, y = 14.48, z = 2.381 \text{ cm}$ boyutunda, $d = 0.1 \text{ mm}$ kaplama kalınlığında, yatay polarize ve $\theta_i, o = 180^\circ$ ve $\phi_i, o = 0^\circ$ gelen dalga ve gözlem açılarında oluşan yatay polarize monostatik normalize RKA (a) Kartezyen, RKA farkı (b) Kartezyen, (c) histogram grafiği..... 138

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 5.1.	Kaplama Kalınlığına göre Normal RKA Dağılımı (Çarpışma Frekansı = 10 GHz)....	130
Çizelge 5.2.	Çarpışma Frekansına göre Normal RKA Dağılımı (Kaplama Kalınlığı = 0.1 mm)	136
Çizelge 6.1.	Kaplama Kalınlığının, Tüm Yönlerdeki F-117 RKA'sı Üzerindeki Etkisi	141
Çizelge 6.2.	Kaplama Kalınlığının, Geri Saçılan Yönlerdeki F-117 RKA'sı Üzerindeki Etkisi	143
Çizelge 6.3.	Kaplama Kalınlığının, İleri Saçılan Yönlerdeki F-117 RKA'sı Üzerindeki Etkisi.....	145
Çizelge 6.4.	Çarpışma Frekansının, Tüm Yönlerdeki F-117 RKA'sı Üzerindeki Etkisi.....	147
Çizelge 6.5.	Çarpışma Frekansının, Geri Saçılan Yönlerdeki F-117 RKA'sı Üzerindeki Etkisi.....	148
Çizelge 6.6.	Çarpışma Frekansının, İleri Saçılan Yönlerdeki F-117 RKA'sı Üzerindeki Etkisi	149

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

ϵ	Elektriksel Geçirgenlik
μ	Manyetik Geçirgenlik
ϵ_r	Bağıl Elektriksel Geçirgenlik
μ_r	Bağıl Manyetik Geçirgenlik
ϵ_0	Boş Uzayın Elektriksel Geçirgenliği
μ_0	Boş Uzayın Manyetik Geçirgenliği
\vec{E}	Elektrik Alan Vektörü
\vec{E}_{inc}	Gelen Dalganın Elektrik Alan Vektörü
\vec{E}_{scat}	Saçılan Dalganın Elektrik Alan Vektörü
\vec{E}_{tot}	Toplam Elektrik Alan Vektörü
\vec{E}_θ	Gelen Dalganın Elektrik Alanının θ bileşeni
\vec{E}_ϕ	Gelen Dalganın Elektrik Alanının ϕ bileşeni
\vec{H}	Manyetik Alan Vektörü
\vec{H}_{inc}	Gelen Dalganın Manyetik Alan Vektörü
\vec{H}_{scat}	Saçılan Dalganın Manyetik Alan Vektörü
\vec{H}_{tot}	Toplam Manyetik Alan Vektörü
\vec{D}	Elektriksel Yer Değiştirme Vektörü
\vec{B}	Manyetik Akı Yoğunluğu Vektörü
\vec{J}	Elektrik Akım Yoğunluğu Vektörü
\vec{M}	Manyetik Akım Yoğunluğu Vektörü
ρ_e	Elektrik Yük Yoğunluğu

ρ_m	Manyetik Yük Yoğunluğu
σ^e	Elektriksel İletkenlik
σ^m	Manyetik İletkenlik
η_0	Boş Uzayın Empedansı
c	Işık Hızı
λ	Dalga Boyu
ω	Açısal Frekans
r	Problem Merkezinden Gözlem Noktasına Olan Uzaklık
ϕ	Yanca Açısı
θ	Elevasyon Açısı
k	Serbest Uzaydaki Dalga Sayısı
\vec{r}	Problem Merkezine göre Gözlem Noktasının Konum Vektörü
\vec{r}'	Problem Merkezine göre Kaynak Noktasının Konum Vektörü
\vec{R}	Kaynak ve Gözlem Noktası Arasındaki Mesafe Vektörü
\vec{A}	Elektrik Akım Bağımlı Potansiyel Alan Vektörü
\vec{F}	Manyetik Akım Bağımlı Potansiyel Alan Vektörü
S	Kapalı yüzey
\vec{n}	Birim yüzey normali
$\hat{a}_x, \hat{a}_y, \hat{a}_z$	Kartezyen koordinat sistemi birim vektörleri
$\hat{a}_r, \hat{a}_\theta, \hat{a}_\phi$	Küresel koordinat sistemi birim vektörleri
i, j, k	Kartezyen koordinat sistemi konum noktaları x, y, z
ϵ_∞	Sonsuz frekanslarda Bağlı Elektriksel Geçirgenlik
ϵ_s	Statik Bağlı Elektriksel Geçirgenlik
τ	Gevşeme Zamanı
ω_0	Doğal Frekans, Kutup Noktası

δ	Sönümlenme Faktörü
ω_p	Plazma Frekansı
γ	Çarpışma Frekansı

Kısaltmalar

ZSF, FDTD	Zamanda Sonlu Farklar (<u>F</u> inite <u>D</u> ifference <u>T</u> ime <u>D</u> omain)
RKA, RCS	Radar Kesit Alanı (<u>R</u> adar <u>C</u> ross <u>S</u> ection)
HE, CEM	Hesaplama Elektromanyetik (<u>C</u> omputational <u>E</u> lectromagnetics)
DD, DE	Diferansiyel Denklem (<u>D</u> ifferential <u>E</u> quation)
ID, IE	İntegral Denklem (<u>I</u> ntegral <u>E</u> quation)
MUK, PML	Mükemmel Uyumlu Katman (<u>P</u> erfectly <u>M</u> atched <u>L</u> ayer)
SSK, ABC	Soğurma Sınır Koşulu (<u>A</u> bsorbing <u>B</u> oundary <u>C</u> onditions)
FO, PO	Fiziksel Optik (<u>P</u> hysical <u>O</u> ptics)
GO, GO	Geometrik Optik (<u>G</u> eometric <u>O</u> ptics)
FKT, PTD	Fiziksel Kırınım Teorisi (<u>P</u> hysical <u>T</u> heory of <u>D</u> iffraction)
GKT, GTD	Geometrik Kırınım Teorisi (<u>G</u> eometric <u>T</u> heory of <u>D</u> iffraction)
MM, MoM	Moment Metodu (<u>M</u> ethod of <u>M</u> oment)
SEM, FEM	Sonlu Elemanlar Metodu (<u>F</u> inite <u>E</u> lement <u>M</u> ethod)
SIY, SBR	Seken Işın Yöntemi (<u>S</u> hooting and <u>B</u> ouncing <u>R</u> ay)
YDD, ADE	Yardımcı Diferansiyel Denklem (<u>A</u> uxiliary <u>D</u> ifferential <u>E</u> quation)
MEİ, PEC	Mükemmel Elektrik İletken (<u>P</u> erfect <u>E</u> lectric <u>C</u> onductor)
AFD, DFT	Ayrık Fourier Dönüşümü (<u>D</u> iscrete <u>F</u> ourier <u>T</u> ransform)

1. GİRİŞ

Elektromanyetik saçılma problemlerinin çözümü, radarlar, radar kesit alanı (RKA) analizi, antenler, mikrodalga ile görüntüleme, kompozit malzemelerin analizi, fiber optik, atmosferik optik gibi çeşitli alanlar için önemlidir [1]. Özellikle askeri uygulamalarda hedeflerin tespiti, kimliklendirilmesi ve takibi amaçlarıyla radarlar kullanılır. Radarlar genel olarak alıcı ve verici temellerinde çalışır. Radarın göndermeç kısmı elektromanyetik dalga göndererek hedefin yüzeyinde akım indüklenmesine sebebiyet verir. Hedef bundan sonra bir anten gibi davranarak indüklenen akımın tüm yönlere saçılmasını sağlar. Hedeften saçılan bu dalgalar radar sistemine döndüğü zaman hedefin tespiti sağlanır. Radar kesit alanı bir nesnenin elektromanyetik izi olarak düşünülebilir. Radardan gönderilen dalganın ne kadarlık kısmının nesne tarafından geri yansıtıldığını ifade eder. Elektronik harbin alt dallarından biri olan elektronik korunma tedbirleri için önem taşıyan RKA; radar tespiti ve görünmezlik araştırmalarında kilit unsur olarak düşünülebilir. RKA'nın azaltılmasına yönelik çeşitli yöntemler bulunmaktadır. Bunlardan biri, son zamanlarda üzerinde çalışılan frekans dağıtıcı malzeme (örneğin manyetize plazma) ile cisimlerin kaplanması yöntemidir. Frekans dağıtıcı malzemelerin kurucu parametreleri frekans bağımlı olduğu için bu tür malzemelerin elektromanyetik dalga ile etkileşimini incelemek, frekans bağımlı olmayan malzemelere göre daha zordur.

Hesaplamalı elektromanyetik (CEM) yöntemlerinden olan zamanda sonlu farklar yöntemi (FDTD) özellikle elektrik geçirgenlik ve manyetik geçirgenliğin karmaşık zamansal ve uzaysal dağılımlarını içeren problemlerin çözümü için kullanılabilir [2], [3], [4]. Bu yüzden zamanda sonlu farklar yönteminin algoritmasına frekans bağımlı ortamın özelliklerini adapte etmek diğer nümerik yaklaşımlara göre daha kolaydır. Hesaplamalı elektromanyetik saçılma problemleri, radar kesit alanı tahminleri, antenlerin ve mikrodalga cihazların tasarımı da dahil olmak üzere çeşitli elektromanyetik problemler için son derece doğru tahminlerin yapılabildiği bir noktadadır. Günümüzde yaygın olarak kullanılan CEM yöntemleri iki kategoride sınıflandırılabilir. Birincisi diferansiyel denklem (DE) yöntemlerine dayanırken, ikincisi integral denklem (IE) yöntemlerine dayanır. Hem IE hem de DE çözüm yöntemleri, Maxwell denklemlerinin ve çözülecek problemle ilişkili uygun sınır koşullarının uygulanmasına dayanmaktadır. IE yöntemleri

genel olarak integral denklemler için sonlu toplamlar cinsinden yaklaşımlar sağlarken DE yöntemleri diferansiyel denklemler için sonlu farklar cinsinden yaklaşımlar sağlar. Daha hızlı ve daha güçlü hesaplama kaynaklarının gelişimi daha gelişmiş zaman alanı CEM modellerine olanak sağlamıştır. DE zaman alanı yaklaşımları karmaşık matematiği olmayan, bilgisayar simülasyon modellerinde formüle edilmesi ve uyarlanması daha kolay olan yaklaşımlar olduğu için bu yaklaşıma odaklanılmıştır. Ayrıca, problemlerin özelliklerine ilişkin daha fazla fiziksel parametre sağlamıştır. Bu nedenle, CEM uygulamaları için yaygın olarak kullanılan zaman alanı DE yaklaşımı, yani zamanda sonlu farklar yöntemi, elektromanyetik problemlerin derinlemesine bir analizine ve uygulamasına, anten tasarımlarına, mikrodalga filtre tasarımlarına ve üç boyutlu hedeflerin radar kesit analizine izin vermektedir. RKA hesaplamaları için ayrıca analitik yaklaşım yöntemleri de kullanılabilir. Fiziksel optik (PO), geometrik optik (GO), kırınım teorileri (GTD, UTD, PTD) ve ışın izleme (SBR) gibi yöntemleri içeren analitik yaklaşımlar yüksek hesaplama verimliliği sağlayabilir, ancak avantajının dışında birçok kısıtlamaya sahip olup örneğin geniş frekans bandında doğru RKA bilgisi elde edemezler [5]. Analitik yaklaşımların aksine; momentler yöntemi (MoM), zamanda sonlu farklar yöntemi (FDTD) ve sonlu elemanlar yöntemi (FEM) gibi nümerik yaklaşımlar ile oldukça güvenilir RKA bilgisi elde etmek mümkündür [6], [7]. Bu nedenle, nümerik yöntemler; silah sistemlerinin RKA analizinde, RKA'sı azaltılmış uçak (hayalet uçak), insansız savaş uçağı gibi kritik dizaynlarda yaygın olarak kullanılmıştır ve özellikle zamanda sonlu farklar yöntemi diğer sayısal yöntemlere kıyasla basitliği ve geniş bant kabiliyeti nedeniyle çokça tercih edilmiştir. Fakat analitik yaklaşım yöntemleriyle karşılaştırıldığında zamanda sonlu farklar yöntemi elektriksel olarak büyük nesnelerin analizinde daha fazla hesaplama süresine ve hafızaya ihtiyaç duyar. Literatürde zamanda sonlu farklar yönteminin uzun hesaplama süresini ve geniş hafıza ihtiyacını optimize edecek bir çözüm [8]'de önerilmiştir. Elektriksel boyutu büyük olan nesneyi ve onun çözümü için kullanılan parametreleri daha küçük değerlere ölçeklendirerek (scaling) çözüm önerisi yöntemi daha verimli hale getirmiştir. Genel olarak elektriksel geçirgenliğin, manyetik geçirgenliğin ve iletkenliğin frekans bağımlılığı, açılmal frekansın rasyonel fonksiyonları toplamı olarak ifade edilebilir. Bu rasyonel fonksiyonların en yaygın türleri Debye, Lorentz veya Drude modeli olarak adlandırılır. Debye modelleri, biyolojik dokuların frekans davranışını ve toprak geçirgenliklerini tahmin etmek için yaygın olarak kullanılır. Lorentz modelleri, rezonanslara yakın Çift Negatif (Double-

Negative) ortam gibi bazı metamalzemelerin frekans davranışını tanımlarken, Drude modelleri metallerin optik frekanslardaki davranışını açıklamada faydalıdır ve bazen Lorentz terimleriyle de genelleştirilebilir [9]. Bazı uygulamalarda bu üç modelin yanı sıra literatürde açıklanan başka dağılım modellerinin de kullanıldığı belirtilebilir. Örneğin, Cole-Cole biyolojik uygulamalar için Debye'den daha genel bir model iken, Condon kiral (chiral) ortamı tanımlamak için kullanılan bir modeldir [10]. Kane Shee Gong Yee'nin zamanda sonlu farklar yöntemi ağ algoritması, genel hesaplamalı elektromanyetik simülasyonlar için yaygın olarak kullanılmaktadır. Algoritmanın avantajları; açıklığı, basitliği, düşük hesaplama maliyetleri ve sapma içermeyen doğasıdır [11]. Standart Yee algoritma uygulamasının önemli bir kısıtlaması ise Kartezyen ağ yapısında olduğu için kavisli malzeme yüzeylerini içeren simülasyonlarda doğruluğunun düşmesidir. Bu sınırlama daha ince ağlar kullanılarak (yani ağ yapısındaki hücre sayısını arttırarak) azaltılabilir, ancak sonuç olarak hesaplama maliyetlerinde bir artışa sebep olur. Bu avantaj ve dezavantaj ışığında; Yee'nin zamanda sonlu farklar yöntemi algoritması verimliliği ile geometrik esnekliğin birleştirmesi sonucunda, hedef malzemenin yüzeyi yakınında yapılandırılmamış bir ağ prosedürünün kullanılması ve hedef malzemenin yüzeyinden başka yerlerde standart Yee algoritmasının kullanıldığı yeni bir hibrit çözüm yöntemi geliştirilmiştir [12]. Yapılandırılmamış ağ prosedürü aslında zamanda sonlu farklar yönteminin Delaunay ve onun Voronoi ikili ağı kullanılarak gerçekleştirilmiş uygulamasıdır. Hem izotropik hem de anizotropik malzemeleri içeren saçılma ve iletim problemlerinin analizi için halihazırda kullanılmış olan bu hibrit yaklaşım ağ kalınlığı üzerinden karşılaştırıldığında, standart zamanda sonlu farklar yöntemi ağ yapısında ihtiyaç duyulandan sekiz kat daha kalın ağ kullanılmasının gerektiği gösterilmiştir. Geleneksel zamanda sonlu farklar yöntemi algoritmasında zamana bağlı Maxwell denklemleri sonlu fark yaklaşımı ile zaman ve uzayda ayrıklaştırılır. Daha sonra ayrıklaştırılan uzayda zamana bağlı olarak sırayla elektrik ve manyetik alan vektörleri iterasyon ile çözülür. Alan bileşenlerine dayanan bu klasik yaklaşıma alternatif bir yol ise, zamanda sonlu farklar yöntemi algoritmasında elektrik ve manyetik alan bileşenlerini kullanmak yerine voltaj ve akım bileşenlerini kullanmaktır. Bu alternatif yaklaşım sonucu oluşan pasif eşdeğer devre ile frekans dağıtıcı malzemenin çözümüne daha kolay erişilebilir. Eşdeğer devre zamanda sonlu farklar yönteminin (EC FDTD) diğer avantajı ise çarpma sayılarını azalttığı için iterasyon döngüsünün nümerik yükünü hafifletmesidir. Son olarak eşdeğer devre zamanda sonlu farklar yöntemi algoritması, silindirik ağ

yapısına küçük değişikliklerle adapte edilebilmektedir. Silindirik ağ yapısının kullanılması daha mantıklı olan geometrilerde bahsedilen bu alternatif yöntemi kullanmak avantajlı olacaktır [13], [14], [15]. Elektromanyetik modellemedeki en büyük zorluklardan biri sonsuz uzayı simüle etmek ve uygunsuz geometri ızgarasından (grid) kaynaklanan yansımaları önlemek için uygun soğurucu sınırların formülasyonudur. Günümüzde kullanılan iki popüler soğurma sınır koşulu (ABC); Mur yöntemi [16] ve mükemmel uyumlu katman (PML) yöntemi [17], [18] olarak belirtilebilir. 1993 yılına kadar Mur dahil tüm soğurucu sınır koşullarının elektromanyetik dalgalar ile doğru etkileşim sonucunu verme yetenekleri sınırlıydı. 1994'te Berenger, 2 boyut için bölünmüş alan mükemmel uyumlu katman (SF-PML) tekniğini önerdi ve 1996'da 3 boyutlu uzay için kullanılacak bir formülasyon geliştirdi [19], [20]. Mükemmel uyumlu katman, genellikle zamanda sonlu farklar yöntemi ızgarasının sonlandırılması için yani problemin sınır koşulu olması için en iyi teknik olarak kabul edilebilir.

Görüldüğü üzere zamanda sonlu farklar yöntemi birçok araştırmaya konu olup çeşitli problemlerin çözümü için üzerinde çalışmalar yapılmıştır.

Bu tezin amaçları şunlardır:

- 3 boyutlu zamanda sonlu farklar yöntemi algoritmasını kullanarak hem iletken malzemeyi hem de frekans dağıtıcı malzemeleri içeren problemleri çözebilmek,
- İletken malzeme ile kaplı cisimlerin radar kesit alanını hesaplamak,
- Frekans dağıtıcı malzeme ile kaplı cisimlerin radar kesit alanını hesaplamak,
- Drude modeli kullanılarak frekans dağıtıcı malzemenin radar kesit alanı üzerindeki etkisini incelemek,
- Yapılan çalışma sonucu radar kesit alanının azaltılmasına yönelik fikir edinilmesidir.

Drude modeli RKA azaltılmasına yönelik çalışmalarda kullanılan bir yöntem olduğu için nümerik sonuçların büyük çoğunluğu Drude model ile elde edilmiştir.

Bunun yanında Debye modeli biyolojik dokularda frekans davranışını açıklamak için, Lorentz modeli ise metamateryallerin frekans davranışı incelemek için kullanılabilir.

1.1. Tez Akışı

Tezin giriş bölümünde hesaplamalı elektromanyetik konseptinin önemi ve zamanda sonlu farklar yönteminin üstesinden gelebileceği problemlerden genel olarak bahsedilmiştir.

Tezin ikinci bölümünde radar kesit alanı terimi basitçe açıklanmıştır. Ayrıca frekans bölgelerinden bahsedilmiştir. RKA değerlerinin anlaşılabilmesi için saçılım matrisinden bahsedilmiştir. Bununla birlikte karmaşık hedef geometrilerinde RKA değerlerini doğrudan etkileyen saçılma mekanizmasından bahsedilmiştir. Daha sonra RKA problemlerinin çözümü için kullanılan bazı yaygın nümerik yöntemlerden basitçe bahsedilmiştir. Bu yöntemler arasında Moment Metodu, Sonlu Elemanlar Yöntemi ve Sonlu Farklar Yöntemi bulunmaktadır. Son olarak RKA problemlerinin çözümü için kullanılan analitik yöntemlerden, Geometrik Optik ve Fiziksel Optik yöntemlerinden kısaca bahsedilmiştir.

Tezin üçüncü bölümünde FDTD'ye giriş yapılmış, daha sonra FDTD'nin temel denklemlerinden, türevin sonlu farklar yaklaşımından, 3 boyutlu problemler için FDTD güncelleme denklemlerinden, mükemmel uyumlu katmandan, uzamsal ızgaradan, zaman adımı seçiminden, kaynak seçiminden, yakın alandan uzak alana dönüşümden, saçılan alan formülasyonundan ve saçılan alan güncelleme denklemlerinden bahsedilmiştir.

Tezin dördüncü bölümünde frekans dağıtıcı ortamın modellenmesinden bahsedilmiştir. Modellerde kullanılan Debye, Lorentz ve Drude ortamları yardımcı diferansiyel denklem tekniğiyle anlatılmış ve FDTD algoritması ile ilişkilendirilmiştir.

Tezin beşinci bölümünde iletken ve frekans dağıtıcı malzemeler ile kaplanmış çeşitli cisimlerle radar kesit alanı çalışması yapılmıştır. Radar kesit alanını tahmin eden programın ismi "RaPTo" olarak adlandırılmıştır. RaPTo'nun verdiği çıktıların doğruluğunu tayin etmek için, başlangıçta kanonik cisim olarak iletken küre kullanılmıştır. Küreye ait bistatik RKA verileri, RaPTo ile birlikte hem analitik yöntemi

bazı olarak oluşturulan kodun sonuçları hem de ticari bir yazılım olan CST Studio'nun Zaman Alanı çözücüsü kullanılarak elde edilen bistatik RKA sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Daha sonra küre frekans dağıtıcı malzeme ile kaplanmıştır. Kaplanmış küreye ait Lorentz, Debye ve Drude modellerinin bistatik RKA sonuçları RaPTo ile CST arasında karşılaştırılmıştır. Bu tez kapsamında RKA'nın azaltılmasına yönelik çalışma nihai hedef olarak belirlenmiştir. Bundan dolayı daha sonrasında RKA azaltılmasına yönelik çalışma yapılmıştır. Bu kapsamda ilk olarak kanonik cisimler olarak küp, küre ve levha cisimleri kullanılmıştır. Bu cisimler Drude modelle temsil edilecek frekans dağıtıcı malzeme ile kaplanmıştır. RKA değişimini anlayabilmek için hem iletken malzeme hem de kaplama sonucu ortaya çıkan bistatik ve monostatik RKA verileri CST ile karşılaştırılmıştır. Son olarak daha kompleks cisim olarak F-117 Nighthawk ve F-16 Fighting Falcon kullanılmıştır. Yine aynı şekilde bu cisimlerde frekans dağıtıcı malzeme ile kaplanmıştır. Kaplama kalınlığının ve malzemeye ait çarpışma frekansının RKA üzerindeki etkisini anlayabilmek için F-177'ye ait analizlerde bu parametreler değiştirilmiştir. Bistatik RKA sonuçları RaPTo ile CST arasında karşılaştırılmıştır. Tez çalışmasının son kısmında ise F-16 kullanılmıştır. F-16'ya ait monostatik RKA değerleri RaPTo ile CST arasında karşılaştırılmıştır.

Tezin son bölümünde RaPTo ile alınan sonuçların değerlendirilmesi, CST ve analitik yöntemlerle alınan sonuçların karşılaştırılması, karşılaştırma sonucu gözlenen farklılıkların ve buna sebebiyet verecek muhtemel hataların neler olabileceği tartışılmıştır. RKA azaltılmasına yönelik çalışmalarda daha çok fikir edinilebilmesi amacıyla operasyonel frekansına göre, kaplama kalınlığının ve çarpışma frekansının etkileri açısal temelde detaylıca incelenmiştir. Diğer tartışılan bir konu ise FDTD tekniğinin zayıflığından ötürü ortaya çıkan zaman ve hafıza problemidir. Bu problem analiz edilen cismin boyutunun elektriksel olarak büyük olmasından ortaya çıkmaktadır. Bu sorunun üstesinden gelmek için kullanılabilir olası bir yöntem olan ölçeklendirme kavramından bahsedilmiştir. Son olarak RaPTo'nun ileriki süreçlerde nasıl geliştirilebileceği hakkında önerilerde bulunulmuştur. Bu şekilde tez sonlandırılmıştır.

2. RADAR KESİT ALANI (RKA) TEMELLERİ

2.1. Giriş

Elektromanyetik dalgalar, bir cismin yüzeyinde oluşturulan yüzey akımını tetikler. Bu akım, cismin şekline ve yapısına bağlı olarak değişkenlik gösterir ve cismin anten gibi davranmasına sebep olur, bu da elektromanyetik dalgaları yaymasına yol açar. Elektromanyetik dalgaların yayılma özellikleri, Radar Kesit Alanı (RKA) değerini belirler. RKA, bir cismin veya platformun radarda görünürlük miktarını ifade eder ve radar sistemleri tarafından algılanma ve izlenme derecesini gösterir.

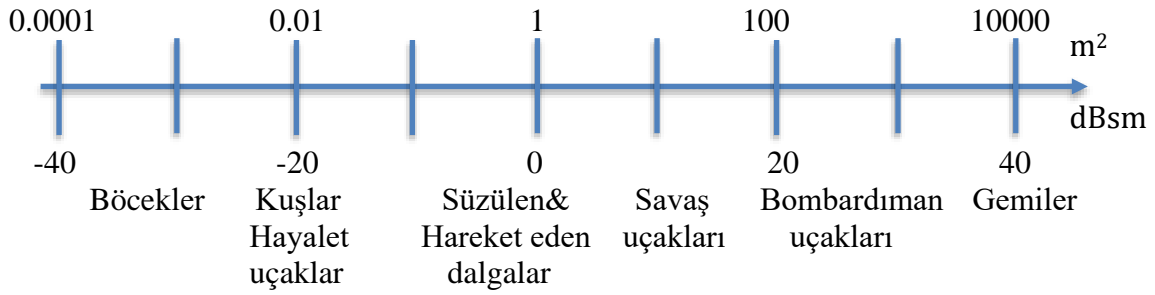
Basit bir formülasyonla RKA'yı ifade edecek olursak, hedef bir dalgayla aydınlatıldığında, RKA, belirli bir yönde saçılan ve birim alana düşen gücün, gelen dalganın birim alana düşen gücüne oranı olarak tanımlanır. RKA değeri yansıyan ve gelen alan vektörleri cinsinden denklem (2.1.1)'de ifade edilmiştir [21]. Burada saçılan alan gücü, gelen alan gücüne göre normalize edildiği için cismin ve kaynağın arasındaki mesafenin önemi yoktur.

$$\sigma = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \frac{|\vec{E}_s|^2}{|\vec{E}_i|^2} \quad (2.1.1)$$

RKA birimi m^2 olarak belirtilir. Genel olarak, büyük fiziksel hedeflerin büyük RKA değerlerine sahip olduğu gözlemlenir. RKA'nın hedefin fiziksel boyutu ile orantılı olma zorunluluğu yoktur. Bir cismin farklı açılardaki RKA değerleri $10^{-4} m^2$ ile $10^4 m^2$ arasında değişebilir. Bu değerlerin dinamik aralığı geniş olduğu için aynı grafikte göstermek zordur; bu nedenle $1 m^2$ referans değeriyle bir “desibel metrekare, $dBsm$ ya da dBs^2 ” (decibel square meter) logaritmik güç ölçeği kullanılır [22].

$$\sigma(dBsm) = \sigma(dBm^2) = 10 \log_{10} \frac{\sigma(m^2)}{\sigma(ref)} = 10 \log_{10} \frac{\sigma(m^2)}{1} \quad (2.1.2)$$

Şekil 2.1.1’de olduğu gibi, gemiler ve büyük bombardıman uçakları için tipik RKA değerleri 40 dBsm (10.000 m²) civarında seyrederken, böcekler için bu değerler -30 dBsm (0,001 m²) arasında değişebilir. Modern radarlar kuş sürülerini ve hatta böcek sürülerini bile algılayabilir. Radarın bilgisayarı tüm algılamaları gözden geçirir ve bu hedefleri hızlarına ve yörüngelerine göre ayırt edebilir. Hatta, bu kadar düşük RKA değerlerine sahip hedeflerin algılanabilir olması, RKA tasarım mühendislerinin işinin zor olduğu anlamına gelir [23].



Şekil 2.1.1: Bazı doğal ve insan yapımı nesnelere ait tipik RKA değerleri.

Radar kesit alanı bir dizi faktöre bağlı olarak değişir. Bu faktörler arasında gelen dalganın frekansı, polarizasyonu ve hedefin yönü (radara göre yönelimi) bulunabilir. Bir radar belirli bir hedefi algılamak için tasarlandığında bu faktörler dikkate alınır. Tam tersine, bir platform bilinen özelliklere sahip bir radarla karşılaşacaksa, hedef radarın performansı göz önünde bulundurularak tasarlanabilir [23]. Örneğin, bir uçak belirli bir tehdit radarına doğru uçacaksa, burun kısmında oluşacak RKA'yı azaltmak için ek çaba sarf etmelidir. Uçak, radarın bulunduğu açıya göre burnu dik bir konumda olmamalıdır [23]. Hedefin boyutu ve hedefe ulaşan sinyalin dalga boyunun oranına göre tanımlanan üç farklı RKA frekans bölgesi vardır. Bu bölgeler, mükemmel iletken bir küre için Şekil 2.1.2’de olduğu gibi gösterilmiştir [21]- [23].

1) Alçak Frekans (Rayleigh) Bölgesi

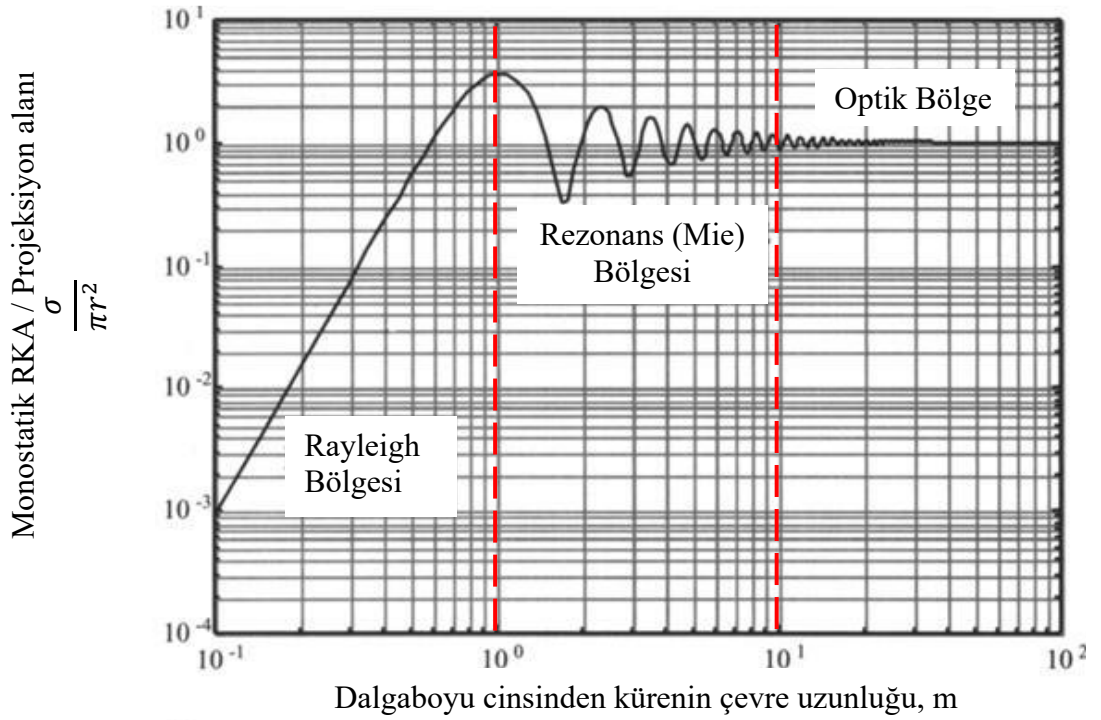
Bu frekansta, gelen düzlem dalganın hedef boyunca faz değişimi minimaldir. Bu nedenle gövde üzerinde indüklenen akım genlik ve faz açısından neredeyse sabittir. Hedefin özel şekli bu bağlamda önemli değildir [23].

2) Rezonans (Mie) Bölgesi

Bu frekans aralığında, gövde boyunca akımın faz değişimi kritik bir faktördür ve tüm parçalar saçılma modeline katkıda bulunur; bu bölgede RKA salınımlarına neden olacaktır [23].

3) Yüksek Frekans Bölgesi (Optik Bölge)

Gemi, uçak gibi büyük ve karmaşık yapıdaki hedeflerin RKA analizleri için, hedef boyutunun dalga boyuna oranla oldukça büyük olduğu bu bölgede, gövde üzerinde indüklenen akımın faz açısı değişkendir. Bu nedenle, karmaşık hedefler genellikle boyutu azaltılmış alt birimlere ayrılarak, farklı saçılım mekanizmalarının etkisi dikkate alınarak hesaplanır [21] - [23].



Şekil 2.1.2: Mükemmel iletken kürenin RKA'sı ve frekans bölgeleri [23]

2.2. Hedef Saçılım Matrisi

RKA tahmininde elektromanyetik (EM) dalgalar, gelen ve saçılan dalgaların yönleri ve polarizasyonlarıyla karakterize edilir. Genellikle, polarizasyon terimi, elektrik alan vektörünün zamana göre uzamsal yönetimini ifade eder ve eğer elektrik alanı belirli bir düzleme paralel ise, polarizasyonun doğrusal olduğu ifade edilir. Ayrıca, eğer elektrik alanı dünya yüzeyine göre dikeyse, dikey polarizasyon, yatay ise yatay polarizasyon olarak adlandırılır.

Elektrik alan vektörü, zamana göre bir elips çiziyorsa, bu duruma eliptik polarizasyon denir. Eliptik polarizasyonun özel bir durumu da dairesel polarizasyondur. Bir hedefin RKA'sı genellikle hem dikey hem de yatay polarizasyon durumları için incelenir. RKA, bir uzak alan niceliği olup hem gelen hem de saçılan dalgalar küresel bir koordinat sisteminde temsil edilir. Hem gelen hem de saçılan dalgalar, E_θ veya E_ϕ olabilir ve bunlara sırasıyla theta veya phi polarize dalgalar (yani dikey veya yatay polarizasyon) ifade eder.

Bir hedefin RKA'sı vericinin ve alıcının polarizasyonuna bağlıdır. Pratikte, bir hedefin RKA'sı, dört durumdan biri belirtilerek verilir. Bu durumlar eş polarize olma durumu yani co-polarized, ya da çapraz polarize durumu yani cross-polarized olarak adlandırılır. Eş polarize olduğu durumda verici ve alıcı aynı polarizasyona sahip olmalıdır. Çapraz polarizasyonda ise verici ve alıcı ters polarizasyona sahip olmalıdır. Genel olarak, gelen ve saçılan alanları ilişkilendiren bir saçılma matrisi denklem (2.2.1)'deki gibi tanımlanabilir [23].

$$\begin{bmatrix} E_{s\theta} \\ E_{s\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{\theta\theta} & S_{\theta\phi} \\ S_{\phi\theta} & S_{\phi\phi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{i\theta} \\ E_{i\phi} \end{bmatrix} \quad (2.2.1)$$

2.3. Hedef Saçılım Mekanizması

Çoğu radarın karşılaştığı hedeflerin RKA değerleri küre ya da levhalardan daha karmaşıktır. Basit olmayan cisimlerde, açı ve frekansın karmaşık birer fonksiyonu olan radar kesit alanının oluşmasını etkileyen farklı saçılım mekanizmaları vardır. Hedef geometrisine göre saçılım mekanizmalarının baskınlığı Şekil 2.3.1’de görüldüğü üzere bölgesel olarak değişiklik göstermektedir [23].

• Yansımalar

Elektromanyetik yansıma, dalgaların bir yüzeye çarptıktan sonra yön ve doğrultularının değiştiği ve ardından geldiği ortama geri döndüğü bir olaydır. Bu süreçte, dalganın geçtiği ortam ile çarptığı ortam arasındaki empedans farkı önemlidir. Eğer bu fark azsa, dalganın büyük bir kısmı karşı tarafa geçer ve yansıma miktarı azalır. Yansımalar, RKA üzerinde önemli bir etkiye sahip olan saçılım mekanizmalarından biridir. Böylece RKA değerinin tepe değerini belirler. Özellikle birden fazla yüzeyin bulunduğu durumlarda, çoklu yansımalar gözlemlenebilir [21], [23].

• Kırınım

Kırınım olayı, cismin uç ve kenar süreksizliklerinden kaynaklanır. Bu olay dalgaların engellerden ve küçük açıklıklardan geçmesiyle oluşur. Kırınım hadisesinin varlığından bahsedeceksek dalganın geçtiği açıklıkların boyutunun, dalga boyuna oranla küçük olması gerekir. Kırınımın etkisiyle oluşan dalgalar, nesnenin geometrik düzensizlikleri ve açıklıkları nedeniyle farklılık gösterir. Bu durum, hedefin daha karmaşık bir RKA profiline sahip olmasına neden olabilir [21], [23].

• Yüzey Dalgaları

Yüzey dalgaları, bir hedefin içbükey yüzeylerinde seyreden dalgalardır. Bu dalgalar genellikle yuvarlak gövdelerde ortaya çıkar. Yuvarlak gövdelerdeki yüzey dalgaları, gövdenin arkasından hedefe doğru yayılan sürünen dalgalarla ilişkilidir. Düz gövdelerde ise yüzey dalgaları, cismin gövdesinde doğru yayılan sızıntı dalgalarını oluşturur. Sızıntı dalgaları, yüzey geometrisini izlerken köşe veya süreksizlikle karşılaşırlarsa, bu

süreksizlik tarafından kaynağına doğru geri yansıtılır. Aynı zamanda, sürünen dalgalar kavisli nesnelere etrafında dönme eğilimindedir. Yüzey dalgaları, radar sistemlerinde hedeflerin tespiti ve karakterizasyonu açısından önemli bir rol oynarlar [21], [23].

- Kanal Yansımaları (Ducting)

Kanal yansımaları veya dalga kılavuzu modları olarak adlandırılan olgu, bir dalganın kapalı bir yapı içinde tıklıp kalma durumunu tanımlar. Örneğin, bir jetin hava alım boşluğu bu duruma bir örnektir. Dalga, bu boşluğa girdiğinde bir dizi yansıma gerçekleşebilir ve ardından bir ışın oluşur. Bu ışın, birkaç farklı yol izleyebilir, bu nedenle ışınlar genellikle çeşitli açılardan ortaya çıkar. Sonuç olarak, geniş ve genellikle büyük bir radar kesit alanı (RKA) örüntüsü elde edilir. Bu olgu, bir kedinin gözünün ışıkla aydınlatıldığında parlaması gibi optik bir benzetmeye sahiptir. Bu mekanizmalar zaman zaman birbirleriyle etkileşebilir. Örneğin, düz bir yüzeyden yansıyan bir dalga daha sonra bir kenardan kırılabilir veya bir boşluğa girebilir; bu durumda etkisi tekrar ortaya çıkabilir. Fakat karmaşık hedefler için, bu etkileşimler her zaman net bir şekilde görülmeyebilir [23].



Şekil 2.3.1: Kompleks geometrilere görülen farklı saçılım mekanizmaları [24]

2.4. RKA Tahmin Yöntemleri

Radar Kesit Alanı (RKA) tahmin yöntemleri, genellikle iki kategoride değerlendirilir: yüksek frekans teknikleri ve alçak frekans teknikleri. Bu teknikler, nesnenin karmaşıklığı ve uygulama frekansına bağlı olarak farklı yaklaşımlar kullanır.

Alçak frekans teknikleri, genellikle tam dalga çözümüne odaklanır ve Maxwell denklemleri altında belirli sınır koşulları ile saçılan dalgayı tanımlayan diferansiyel veya integral denklemleri çözerek çalışır. Moment Metodu, Sonlu Elemanlar Yöntemi ve Sonlu Farklar Yöntemi gibi tam dalga hesaplama metotları bu kategoriye dahildir. Ancak, bu yöntemler genellikle karmaşık ve zaman alıcıdır, çünkü yüksek hesap gücüne ihtiyaç duyarlar.

Yüksek frekans teknikleri ise daha çok yaklaşık çözümlerle çalışır. Fiziksel Optik (PO), Geometrik Optik (GO), Fiziksel Kırınım Teorisi (PTD) ve Geometrik Kırınım Teorisi (GTD) gibi yaklaşık çözümler, genellikle yüksek frekansta çalışan sistemlerde elektromanyetik olarak büyük ve karmaşık problemleri ele alabilirler. Bu yöntemler, genellikle hesaplama maliyetini azaltırken, gerçeğe yakın sonuçlar sağlarlar.

Bu bağlamda, RKA tahmin yöntemleri geniş bir yelpazede uygulanabilirlik gösterir, ancak seçilen yöntemin özellikle uygulama alanı ve frekansına uygun olması önemlidir [23].

2.4.1. Moment Metodu (MoM)

Moment Metodu, elektrik ve manyetik alan integral denklemlerini çözmek için kullanılan bir nümerik yöntemdir. Bu yöntem, Green fonksiyonu temel alınarak elde edilen integral denklemi frekans bölgesinde çözer. Akımı matrislerle çözebilme seçeneği sunar ve problemin kesin sonuçlarına ulaşılmasını sağlar. Ancak, bu yöntem, alçak frekans bölgelerinde etkilidir, çünkü hedef geometrisi dalga boyuna göre küçüktür. Yüksek

frekanslar bölgelerinde ise karmaşık geometriler için çözülmesi gereken matris boyutları çok büyük olduğundan tek başına MoM ile çözüm yapılamaz.

Moment Metodu, tanımlanmış bir aralıktaki Fredholm veya Volterra tipi integral denklemlerin çözümünde kullanılır. Integral denklemlerde bilinmeyen fonksiyon, integrandın içinde bulunurken, denklemin diğer tarafı bilinen ifadeler içerir. Bilinmeyen katsayılar ve baz fonksiyonları kullanılarak hesaplanan yaklaşık sonuç, integral denklem eşitliğinin sağ tarafında bulunan tam sonuç ile karşılaştırılarak fark (residual) minimize edilir ve bilinmeyen katsayılara ulaşılır. Elde edilen denklem setleri $[A][x]=[b]$ matris şekline getirilir ve matris çözüm yöntemleri kullanılarak bilinmeyen katsayılar bulunur. Bilinmeyen katsayılar ortaya çıktıktan sonra, tekrar baz fonksiyonları ile çarpılıp toplandığında bilinmeyen fonksiyon bulunur [21], [25].

2.4.2. Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM)

Sonlu elemanlar yöntemi, muhtemelen tüm sayısal yöntemlerin en eskisidir ve genellikle tam olarak çözülemeyen sınır değer problemlerini çözmek için kullanılan bir nümerik yöntemdir. Kısmi diferansiyel denklemlerle ifade edilen problemleri çözmek için kullanılabilen bu yöntem, problemin geometrisini sonlu elemanlara böler ve bu elemanların düğüm noktalarını belirler. Daha sonra, her eleman için düğüm noktalarının global bağlantı matrisleri oluşturulur. Moment metodunda olduğu gibi, bir matris denkleminin çözülmesi gerekir.

Sonlu elemanlar yönteminde ortaya çıkan seyrek matris denklemi, verimli ve hızlı matris çözücülerin uygulanmasına olanak tanır. Problemin özelliklerine uygun sınır koşulları uygulandıktan sonra, her bir eleman için ayrı ayrı çözümler gerçekleştirilir. Elde edilen bu çözümler, süperpozisyon ilkesi kullanılarak birleştirilerek nihai sonuca ulaşılır. Örneğin, bir radar anteni tasarımında elektromanyetik dalgaların yayılması için kullanılan bu yöntem, farklı geometrik yapıların etkileşimini ve radar kesit alanını analiz etmek için uygundur. Bu bağlamda, sonlu elemanlar yöntemi, elektromanyetik problemleri çözmek ve radar sistemlerini optimize etmek için güçlü bir araçtır [7], [21], [23], [25].

2.4.3. Sonlu Farklar Yöntemi (FDM)

Sonlu farklar yöntemi, zaman ya da frekans bölgesindeki Maxwell denklemlerinin diferansiyel operatörlerini kullanmak için kullanılır. Moment metodunda olduğu gibi, problem ayrıklaştırılır. Maxwell denklemleri ve sınır koşulları ayrıklaştırılmış uzamsal ve zamansal olgularda çözülür. Bu yöntem basitliği ve yeteneği sayesinde geniş bir kullanım alanı bulmuştur. Sonlu farklar yöntemi zaman bölgesinde kullanıldığında, moment metodunun ihtiyaç duyduğu büyük matrislere gerek duymaz çünkü problem zamanda adım adım çözülür.

Maxwell denklemleri hem diferansiyel hem de integral formda yazılabildiğinden, diferansiyel formlar gibi integral formlar da nümerik olarak çözülebilir. Maxwell denklemlerinin nümerik olarak integral formuyla çözülmesine, sonlu entegrasyon tekniği (FIT) yöntemi denir [23], [25].

2.4.4. Geometrik Optik ve Geometrik Kırınım Teorisi (GO & GTD)

Yüksek frekanslarda, elektromanyetik dalga yayılımı optik ışınların davranışına benzer. Bu nedenle, elektromanyetik problemleri analiz etmek için optik teorileri kullanmak mümkündür.

Geometrik optik, ışın kavramı ve enerjinin korunumu ilkesine dayanır. Geometrik optik, ışığın sonsuz küçük bir tüp içinde yayıldığını varsayar. Işın yoğunluğu, bir ışın tüpündeki enerji akışının korunumuna uyar. Homojen bir ortamda, ışınlar genellikle dalga cepheleri için doğal yön olan en kısa yolu (çoğunlukla minimum yol) izlemeye çalışır. Klasik geometrik optikte, sadece yansıyan ve kırılan ışınlar dikkate alınır. Ancak bu yaklaşım, hedefin kenarlarında, köşelerinde ve uç bölgelerinde oluşan kırınım etkilerini göz ardı ettiği için gölge sınırlarında kesikli alanlar oluşturur.

Geometrik kırınım teorisi, iletken bir yüzeyin kenarlarından kaynaklanan kırınımı hesaba katar. Bu, gölge bölgelerindeki değerlerin tahmin edilmesini ve kırınım kaynaklı hataların azaltılmasını sağlar. Işınlara, yansıma sırasında Snell Yasası'na uyar, ancak tek bir ışın yerine sonsuz küçük ışın tüplerinden oluşur. Kırınım, özellikle mükemmel iletken kenarlarda meydana gelen özel bir olgudur. Bir ışın, iletken bir kenara ulaştığında, bir dizi kırınım olayına uğramış ışın üretilir [26], [27].

2.4.5. Fiziksel Optik

Rastgele indüklenen yüzey akımını tahmin etmek için kullanılan bir yöntem fiziksel optik yaklaşımıdır. Bu yaklaşım, bir cismin üzerine düşen dalganın doğrudan aydınlattığı bölgelerde, indüklenen akımın basitçe gelen manyetik alan yoğunluğuyla orantılı olduğunu öne sürer. Gölgede kalan kısımda, akım sıfıra eşitlenir. Elde edilen akım daha sonra radyasyon integrallerinde kullanılarak hedeften uzaklara saçılan alan hesaplanır.

Fiziksel optik, özellikle elektriksel olarak büyük cisimler ($L \geq 10\lambda$) için yüksek frekanslı bir yaklaşım olup, gölge sınırlarında ve geniş açılarda hatalı sonuçlara neden olabilir. Ayrıca, bu yöntem yüzey dalgaları, çoklu yansımalar, köşe kırınımları gibi saçılım mekanizmalarını içermez. Fiziksel optik yaklaşımı hem zaman hem de frekans alanlarında kullanılabilir [23].

3. FDTD FORMÜLASYONU

3.1. FDTD'ye Giriş

FDTD yöntemi, bir dizi avantaj sunarak Maxwell denklemlerini çözme amacını taşır [2]:

1. Maxwell denklemlerini doğrudan çözmektedir.
2. Hesaplama alanı için özel bir üst sınırı olmayan tamamen açık bir yöntemdir. Ancak, hesaplama alanı genişledikçe hafıza ve zaman gereksinimleri artmaktadır.
3. Güvenilir ve güçlü bir yöntemdir.
4. Doğrusal olmayan davranışları doğal bir şekilde ele alır ve basit bir görselleştirme imkânı sunar.

FDTD yöntemi, 1966 yılında Yee tarafından ilk kez öne sürülmüştür [11]. 1980'lerden sonra, özellikle Mur'un [16] ve Berenger'in PML [20] önerileri sayesinde FDTD yöntemi büyük bir kabul görmüş ve EM simülasyonlarında yaygın olarak kullanılan bir teknik haline gelmiştir. Bu yönetime odaklanan birçok kaynak bulunmaktadır [2], [3], [28].

Orijinal Yee algoritması, izotropik ve doğrusal malzemeler için uygundur. Ancak, 1980'lerin başlarından itibaren araştırmacılar, FDTD yöntemini anizotropik ortamlara genişletme olasılığını keşfetmiş ve günümüzde izotropik, anizotropik, frekans dağıtıcı gibi çeşitli ortamlarda kullanılan bir teknik haline getirmişlerdir [26].

3.2. FDTD'nin Temel Denklemleri

FDTD algoritmasının temeli Maxwell'in zaman alanı denklemleridir. Zaman içindeki alan davranışını belirlemek için gereken “genelleştirilmiş” diferansiyel zaman alanı Maxwell denklemleri şunlardır:

$$\begin{aligned}
\nabla \times \vec{H} &= \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{J} \\
\nabla \times \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} - \vec{M} \\
\nabla \cdot \vec{D} &= \rho_e \\
\nabla \cdot \vec{B} &= \rho_m
\end{aligned} \tag{3.2.1}$$

Burada \vec{E} metre başına Volt cinsinden elektrik alan vektörü, \vec{D} metrekare başına Coulomb cinsinden elektrik yer değiştirme vektörü, \vec{H} metre başına Amper cinsinden manyetik alan vektörü, \vec{B} metrekare başına Weber cinsinden manyetik akı yoğunluğu vektörü, \vec{J} metrekare başına Amper cinsinden elektrik akım yoğunluğu vektörü, \vec{M} metrekare başına Volt cinsinden manyetik akım yoğunluğu vektörü, ρ_e metreküp başına Coulomb cinsinden elektrik yükü yoğunluğu ve ρ_m metreküp başına Weber cinsinden manyetik yük yoğunluğudur.

Maxwell denklemlerini tamamlamak ve malzeme ortamını karakterize etmek için kurucu bağıntılar gereklidir. Doğrusal, izotropik ve frekans bağımsız malzemeler için kurucu bağıntılar aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\begin{aligned}
\vec{D} &= \epsilon \vec{E} \\
\vec{B} &= \mu \vec{H}
\end{aligned} \tag{3.2.2}$$

Burada ϵ elektriksel geçirgenlik ve μ manyetik geçirgenliktir. Boş uzayda:

$$\begin{aligned}
\epsilon &= \epsilon_0 \approx 8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m} \\
\mu &= \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}
\end{aligned} \tag{3.2.3}$$

FDTD denklemlerini türetirken sadece dönel (curl) denklemlerini dikkate almamız gerekir çünkü ıraksama (divergence) denklemleri geliştirilen FDTD güncelleme denklemleri tarafından üretilebilir [2], [10]. İletim akım yoğunluğu (induced) \vec{J}_c , iletim

akımının toplamıdır ve $\vec{J}_c = \sigma^e \vec{E}$ olarak ifade edilebilir. Ayrıca empresyona (impressed) uğramış akım yoğunluğu \vec{J}_i varsa elektrik akım yoğunluğuna eklenmelidir. Eğer dışarda ekstra bir kaynak yoksa empresyona uğramış akım yoğunluğu sıfır olarak kabul edilir. Sonuç olarak elektrik akım yoğunluğu $\vec{J} = \vec{J}_c + \vec{J}_i$ olarak kabul görmektedir. Benzer durum manyetik akım yoğunluğu için geçerlidir. Yani $\vec{M} = \vec{M}_c + \vec{M}_i$ olarak kabul görmektedir. Burada $\vec{M}_c = \sigma^m \vec{H}$ olarak ifade edilebilir. Ayrıca σ^e metre başına Siemens cinsinden elektrik iletkenliğidir ve σ^m metre başına Ohm cinsinden manyetik iletkenliğidir. Maxwell'in dönel denklemlerini (3.2.1)'deki akım yoğunluklarını iletim ve empresyon bileşenleri cinsinden ve (3.2.2)'deki kurucu bağıntıları cinsinden aşağıdaki gibi yazabiliriz:

$$\begin{aligned}\nabla \times \vec{H} &= \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \sigma^e \vec{E} + \vec{J}_i \\ \nabla \times \vec{E} &= -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} - \sigma^m \vec{H} - \vec{M}_i\end{aligned}\tag{3.2.4}$$

Bu formülasyon sadece \vec{E} ve \vec{H} elektromanyetik alanlarını ele alırken \vec{D} ve \vec{B} akılarını doğrudan ele almaz. Bunun yerine dört kurucu parametre yani ε , μ , σ^e , ve σ^m kullanılır. Böylece çalışmak istenilen malzeme özellikleri belirtilebilir. Dışarıda ekstra elektrik ve manyetik kaynakları varsa empresyon akımları aracılığıyla formüle dahil edilebilir. FDTD formalizasyonunda (3.2.4)'te bulunan dönel denklemler kullanılacaktır.

Denklem (3.2.4) iki vektör denkleminde oluşur ve her vektör denklemi üç boyutlu uzay için üç skaler denkleme ayrıştırılabilir. Bu nedenle, Kartezyen koordinat sisteminde (x , y , z) Maxwell'in dönel denklemleri aşağıdaki altı skaler denklem ile temsil edilebilir [10]:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial E_x}{\partial t} &= \frac{1}{\varepsilon_x} \left(\frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} - \sigma_x^e E_x - J_{ix} \right) \\
\frac{\partial E_y}{\partial t} &= \frac{1}{\varepsilon_y} \left(\frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} - \sigma_y^e E_y - J_{iy} \right) \\
\frac{\partial E_z}{\partial t} &= \frac{1}{\varepsilon_z} \left(\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} - \sigma_z^e E_z - J_{iz} \right) \\
\frac{\partial H_x}{\partial t} &= \frac{1}{\mu_x} \left(\frac{\partial E_y}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial y} - \sigma_x^m H_x - M_{ix} \right) \\
\frac{\partial H_y}{\partial t} &= \frac{1}{\mu_y} \left(\frac{\partial E_z}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial z} - \sigma_y^m H_y - M_{iy} \right) \\
\frac{\partial H_z}{\partial t} &= \frac{1}{\mu_z} \left(\frac{\partial E_x}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial x} - \sigma_z^m H_z - M_{iz} \right)
\end{aligned} \tag{3.2.5}$$

Malzeme parametreleri ε_x , ε_y , ve ε_z sırasıyla $D_x = \varepsilon_x E_x$, $D_y = \varepsilon_y E_y$ ve $D_z = \varepsilon_z E_z$ kurucu bağıntıları aracılığıyla elektrik alan bileşenleri E_x , E_y ve E_z ile ilişkilendirilir. Benzer şekilde, malzeme parametreleri μ_x , μ_y ve μ_z sırasıyla $B_x = \mu_x H_x$, $B_y = \mu_y H_y$ ve $B_z = \mu_z H_z$ kurucu bağıntıları aracılığıyla manyetik alan bileşenleri H_x , H_y ve H_z ile ilişkilendirilir. Diğer ortogonal koordinat sistemleri için de benzer ayrıştırmalar mümkündür, ancak bunlar uygulamalar açısından kullanışsızdır [10].

FDTD algoritması, problem geometrisine ait elektrik ve manyetik alan bileşenlerini uzayda belirli ayırık konumlara yerleştirildiği uzamsal bir ızgaraya böler ve Maxwell denklemlerini ayırık zaman örneklerinde çözer. Algoritma ilk olarak Maxwell denklemlerinde görülen zaman ve uzay türevlerini sonlu farklar yöntemiyle çözümlenmeye gider ve daha sonra geçmiş bir zaman anındaki alanların değerlerinden gelecek bir zaman anındaki alanların değerlerini hesaplayan bir dizi denklem oluşturur. Dolayısıyla alanların zaman içindeki ilerlemesini simüle eden bir zaman yürüyüşü algoritması olarak nitelendirilebilir [10], [11].

3.3. Türevin Sonlu Farklar Yaklaşımı

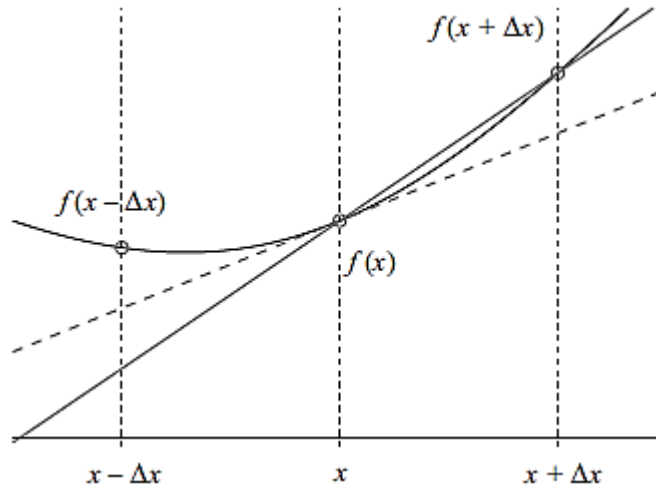
Sürekli bir fonksiyon, rastgele noktalarda ayrıklaştırılarak örneklenebilir ve örnekleme oranı, fonksiyonun varyasyonuna göre yeterliyse, ayırık fonksiyon sürekli fonksiyonun iyi bir yaklaşımı haline gelir.

Şekil 3.3.1'de verilen ve ayrık noktalarda örneklenen sürekli fonksiyonu ele alacak olursak $f(x)$ 'in x noktasındaki türevi aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$f'(x) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{f(x + \Delta x) - f(x)}{\Delta x} \quad (3.3.1)$$

Bununla birlikte, Δx sıfır olmayan sabit bir sayı olduğundan, $f(x)$ 'in türevi yaklaşık olarak şu şekilde alınabilir:

$$f'(x) \approx \frac{f(x + \Delta x) - f(x)}{\Delta x} \quad (3.3.2)$$

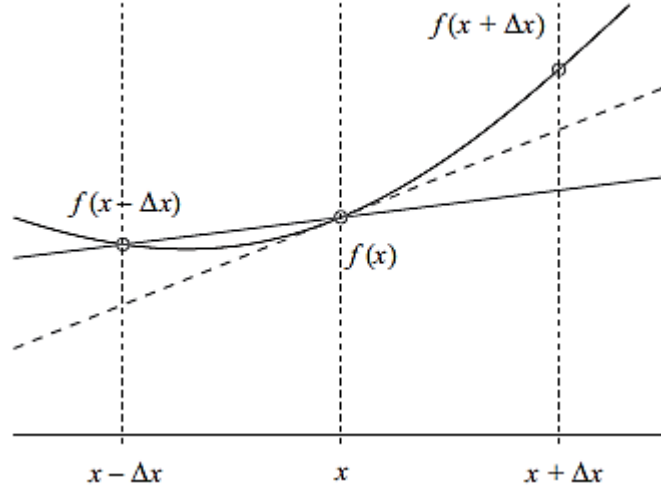


Şekil 3.3.1: $f(x)$ 'in x noktasındaki türevinin sonlu farklar yaklaşımı: ileri fark [10]

$f(x)$ 'in türevi Şekil 3.3.1'de gösterildiği gibi kesikli çizginin eğimidir. Denklem (3.3.2) ileri fark formülü olarak adlandırılır çünkü $f'(x)$ 'i tahmin etmek için ileri bir nokta olan $f(x + \Delta x)$ ile birlikte $f(x)$ kullanılır. Şekil 3.3.2'de gösterildiği gibi ileri bir nokta olan $f(x + \Delta x)$ yerine geri bir nokta olan $f(x - \Delta x)$ kullanılarak $f'(x)$ 'in tahmin edileceği başka bir formül aşağıda ifade edilmiştir:

$$f'(x) \approx \frac{f(x) - f(x - \Delta x)}{\Delta x} \quad (3.3.3)$$

Bu denklem, geriye doğru $f(x - \Delta x)$ noktasının kullanılması nedeniyle geriye doğru fark formülü olarak adlandırılır.

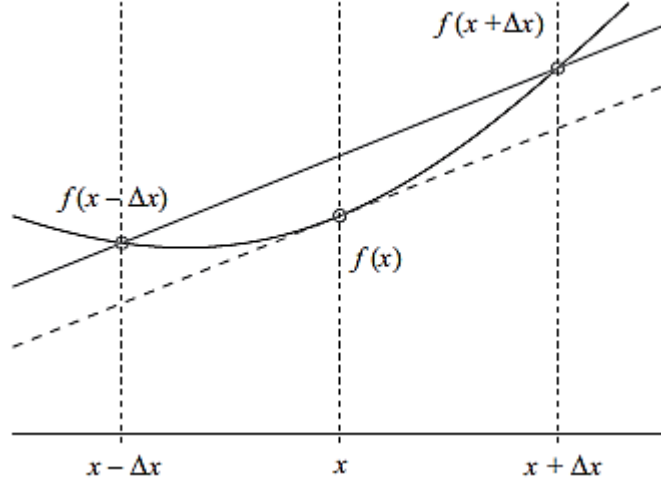


Şekil 3.3.2: $f(x)$ 'in x noktasındaki türevinin sonlu farklar yaklaşımı: geri fark [10]

$f'(x)$ 'i tahmin etmenin üçüncü yolu ise ileri fark ve geri fark formüllerinin ortalamasını almaktır:

$$f'(x) \approx \frac{f(x + \Delta x) - f(x - \Delta x)}{2\Delta x} \quad (3.3.4)$$

Denklem (3.3.4) merkez etrafındaki hem ileri hem de geri noktaları kullandığı için merkezi fark formülü olarak adlandırılır. Merkezi fark yöntemiyle $f(x)$ 'in türevini temsil eden doğru Şekil 3.3.3'te gösterilmiştir.

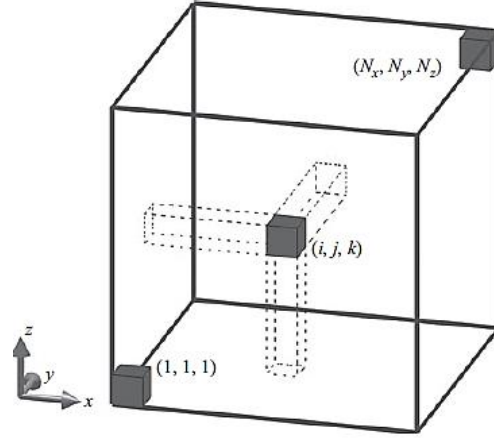


Şekil 3.3.3: $f(x)$ 'in x noktasındaki türevinin sonlu farklar yaklaşımı: merkezi fark [10]

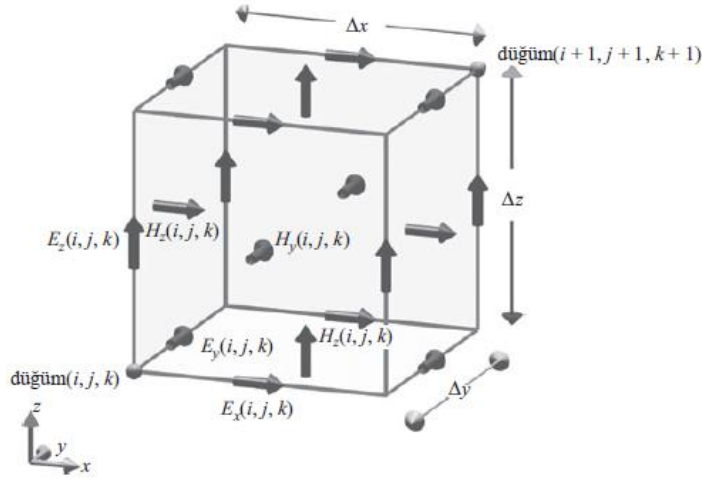
Şekil 3.3.1, Şekil 3.3.2 ve Şekil 3.3.3 incelendiğinde, üç farklı grafiğinde $f'(x)$ için farklı değerler verdiği ve buna bağlı olarak bir miktar hata oluştuğu hemen anlaşılmaktadır. Bu fark formüllerinin getirdiği hata miktarı Taylor serisi yaklaşımı kullanılarak analitik olarak değerlendirilebilir [6]. İleri ve geri fark formları için hatalar (Δx) mertebesi ile orantılı iken, merkezi fark formunun hataları $(\Delta x)^2$ mertebesi ile orantılıdır. Bu tür hatalar kesme hatası olarak adlandırılır [10].

3.4. Üç Boyutlu Problemler İçin FDTD Güncelleme Denklemleri

1966'da Yee, zamana bağlı Maxwell'in dönel denklemleri için bir dizi sonlu fark denklemi oluşturdu [11]. Bu denklemler, ikinci derece doğru mertebesinde merkezi fark formülü kullanılarak hem uzayda hem de zamanda ayrık biçimdedir. Yani elektrik ve manyetik alan bileşenlerini hem zaman hem de uzayda ayrık konumlarda örnelemiştir. FDTD tekniği, üç boyutlu problem geometrisini bir ızgara oluşturmak için hücelere böler. Şekil 3.4.1'de $(N_x \times N_y \times N_z)$ hücrelerinden oluşan bir FDTD ızgarası gösterilmektedir. Bu ızgaranın her bir hücresine Yee hücresi denir. Dikdörtgen Yee hücreleri kullanarak ilgilenilen yapının yüzeyi ve iç geometrisi basamaklı veya merdivenli şekilde çözülür. Yee hücresinde çözülecek olan alan vektörleri bileşenleri ayrık uzayda Şekil 3.4.2'deki gibi gösterilir [10].



Şekil 3.4.1: Yee hücrelerinden oluşan üç boyutlu bir FDTD hesaplama uzayı [10]



Şekil 3.4.2: Alan bileşenlerinin (i, j, k) olarak indekslenmiş bir Yee hücresi üzerindeki düzeni [10]

Elektrik alan vektör bileşenleri Yee hücrelerinin kenarlarının merkezlerine yerleştirilir ve ilgili kenarlara paralel olarak yönlendirilir. Manyetik alan vektör bileşenleri ise Yee hücrelerinin yüzlerinin merkezlerine yerleştirilir ve ilgili yüzlere normal olarak yönlendirilir. Bu, Faraday yasası ve Amper yasası konturlarının birbirine bağlı bir dizisi tarafından doldurulan üç boyutlu uzayın basit bir resmini sağlar. Şekil 3.4.2’de her bir manyetik alan vektörünün, dönel elektrik alan vektörleri tarafından çevrelediği ve böylece Faraday yasasını görselleştirdiğini söyleyebiliriz. Benzer şekilde, Şekil 3.4.2’de bulunan Yee hücresine komşu bir tane daha Yee hücresi eklenirse, her bir elektrik alan

vektörünün, dönel manyetik alan vektörleri tarafından çevrelendiği ve böylece Amper yasasını görselleştirdiğini söyleyebiliriz [10].

Boyutları x yönünde Δx , y yönünde Δy ve z yönünde Δz olan düzgün Yee hücrelerinden oluşan bir hesaplama alanı için, alan bileşenlerinin $(1, 1, 1)$ düğümünün konumuyla çakışan bir orijine göre gerçek konumları kolayca şu şekilde hesaplanabilir:

$$\begin{aligned}
 E_x(i, j, k) &\Rightarrow ((i - 0.5)\Delta x, (j - 1)\Delta y, (k - 1)\Delta z), \\
 E_y(i, j, k) &\Rightarrow ((i - 1)\Delta x, (j - 0.5)\Delta y, (k - 1)\Delta z), \\
 E_z(i, j, k) &\Rightarrow ((i - 1)\Delta x, (j - 1)\Delta y, (k - 0.5)\Delta z) \\
 H_x(i, j, k) &\Rightarrow ((i - 1)\Delta x, (j - 0.5)\Delta y, (k - 0.5)\Delta z), \\
 H_y(i, j, k) &\Rightarrow ((i - 0.5)\Delta x, (j - 1)\Delta y, (k - 0.5)\Delta z), \\
 H_z(i, j, k) &\Rightarrow ((i - 0.5)\Delta x, (j - 0.5)\Delta y, (k - 1)\Delta z).
 \end{aligned} \tag{3.4.1}$$

FDTD algoritması alanları ayrık zaman aralıklarında örneklemede ve hesaplamaktadır. Ancak elektrik ve manyetik alan bileşenleri aynı zaman aralıklarında örneklenmemektedir. Bir zaman periyodu Δt ile temsil edilmektedir.

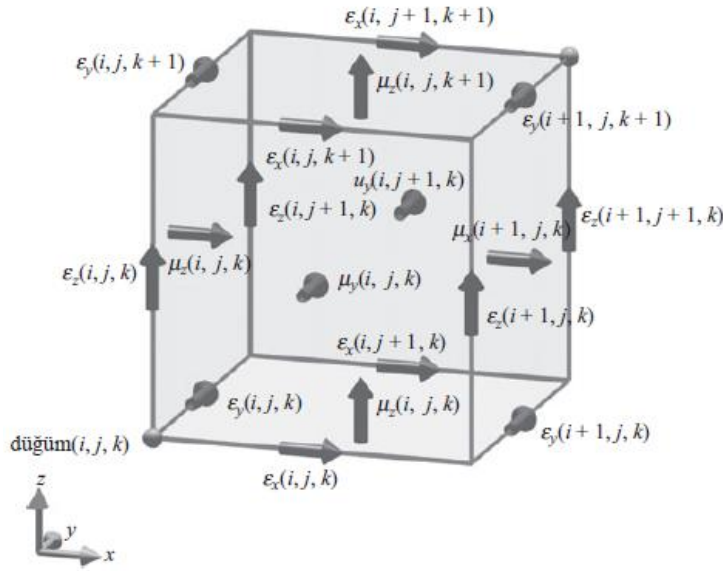
Elektrik alan bileşenleri $0, \Delta t, 2\Delta t, \dots, n\Delta t, \dots$ zaman anlarında örneklenir.

Manyetik alan bileşenleri ise $\frac{1}{2}\Delta t, \left(1 + \frac{1}{2}\right)\Delta t, \dots, \left(n + \frac{1}{2}\right)\Delta t, \dots$ zaman anlarında örneklenir.

Bu nedenle, elektrik alan bileşenleri tam sayılarda hesaplanır ve manyetik alan bileşenleri yarım tam sayılarda hesaplanır. Alan bileşenlerinin sadece uzaydaki konumlarını gösteren uzaysal indisleriyle değil, aynı zamanda zaman anlarını gösteren zamansal indisleriyle de ifade edilmeleri gerekir. Bu nedenle, zaman anını belirtmek için bir üst simge notasyonu benimsenmiştir. Örneğin $((i - 1)\Delta x, (j - 1)\Delta y, (k - 0.5)\Delta z)$ konumunda bulunan ve $n\Delta t$ zaman anında örneklenen bir elektrik alan vektörünün z bileşeni $E_z^n(i, j, k)$ olarak adlandırılır. Benzer şekilde $((i - 0.5)\Delta x, (j - 1)\Delta y, (k - 0.5)\Delta z)$ konumunda bulunan

ve $(n + \frac{1}{2})\Delta t$ zaman anında örneklenen bir manyetik alan vektörünün y bileşeni $H_y^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k)$ olarak adlandırılır.

Malzeme parametreleri benzer şekilde FDTD ızgarası üzerine dağıtılabilir ve alan bileşenleriyle ilişkilendirilebilir. Bu nedenle, ilgili alan bileşenleriyle aynı şekilde indekslenirler. Örneğin, Şekil 3.4.3'te iletkenlik ve manyetik geçirgenlik parametrelerinin indisleri gösterilmektedir [10].



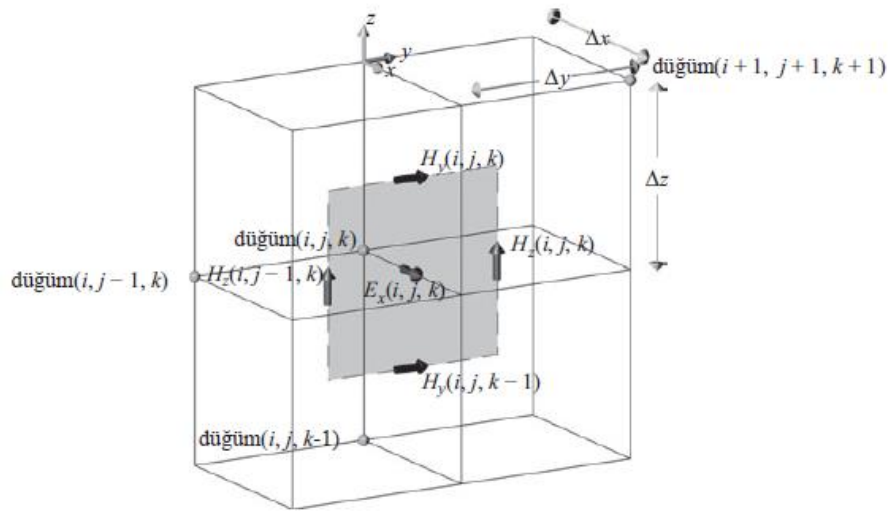
Şekil 3.4.3: Bir Yee hücresi üzerinde indekslenmiş malzeme parametreleri [10]

Hem zaman hem de uzaydaki alan bileşenlerinin ayrık örnekleri için bir indeksleme şeması benimsendikten sonra, skaler formda verilen Maxwell'in dönelemleri (3.2.5) sonlu farklar cinsinden ifade edilebilir. Denklem (3.2.5)'teki elektrik alanının x bileşenini ele alacak olursak:

$$\frac{\partial E_x}{\partial t} = \frac{1}{\epsilon_x} \left(\frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} - \sigma_x^e E_x - J_{ix} \right)$$

Bu denklemdeki türevler merkezi fark formülü kullanılarak tekrar yazılabilir. Uzaydaki merkez noktası $E_x(i, j, k)$ olan ve zamandaki merkez noktası $(n + \frac{1}{2}) \Delta t$ olacak şekilde merkezi fark formülasyonu uygulanabilir. Şekil 3.4.4'te verilen alan bileşeni konumlarını göz önünde bulundurarak şunları yazabiliriz:

$$\begin{aligned} \frac{E_x^{n+1}(i, j, k) - E_x^n(i, j, k)}{\Delta t} = & \frac{1}{\varepsilon_x(i, j, k)} \frac{H_z^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k) - H_z^{n+\frac{1}{2}}(i, j - 1, k)}{\Delta y} \\ & - \frac{1}{\varepsilon_x(i, j, k)} \frac{H_y^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k) - H_y^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k - 1)}{\Delta z} \\ & - \frac{\sigma_x^e(i, j, k)}{\varepsilon_x(i, j, k)} E_x^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k) - \frac{1}{\varepsilon_x(i, j, k)} J_{ix}^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k) \end{aligned} \quad (3.4.2)$$



Şekil 3.4.4: $E_x(i, j, k)$ etrafındaki alan bileşenleri [10]

Elektrik alan bileşenlerinin, tam sayı zaman adımlarında çözüme ulaşıldığından bahsedildikten sonra denklem (3.4.2)'nin sağ tarafı incelendiğinde $(n + \frac{1}{2})$ zaman anında bir elektrik alan terimi bulunduğu gözükmektedir. Bu terimin de tam sayı zaman anında yazılması gerektiği için aşağıdaki gibi yeniden tanım yapılabilir [10]:

$$E_x^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k) = \frac{E_x^{n+1}(i, j, k) + E_x^n(i, j, k)}{2} \quad (3.4.3)$$

Denklem (3.4.3)'ü denklem (3.4.2)'ye yerleştirerek ve $E_x^{n+1}(i, j, k)$ terimi denklemin sol tarafında kalacak ve geri kalan terimler denklemin sağ tarafında kalacak şekilde düzenleyerek şunları yazabiliriz:

$$\begin{aligned}
\frac{2\varepsilon_x(i, j, k) + \Delta t\sigma_x^e(i, j, k)}{2\varepsilon_x(i, j, k)} E_x^{n+1}(i, j, k) &= \frac{2\varepsilon_x(i, j, k) - \Delta t\sigma_x^e(i, j, k)}{2\varepsilon_x(i, j, k)} E_x^n(i, j, k) \\
&+ \frac{\Delta t}{\varepsilon_x(i, j, k)\Delta y} \left(H_z^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k) - H_z^{n+\frac{1}{2}}(i, j - 1, k) \right) \\
&- \frac{\Delta t}{\varepsilon_x(i, j, k)\Delta z} \left(H_y^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k) - H_y^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k - 1) \right) \\
&- \frac{\Delta t}{\varepsilon_x(i, j, k)} J_{ix}^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k)
\end{aligned} \tag{3.4.4}$$

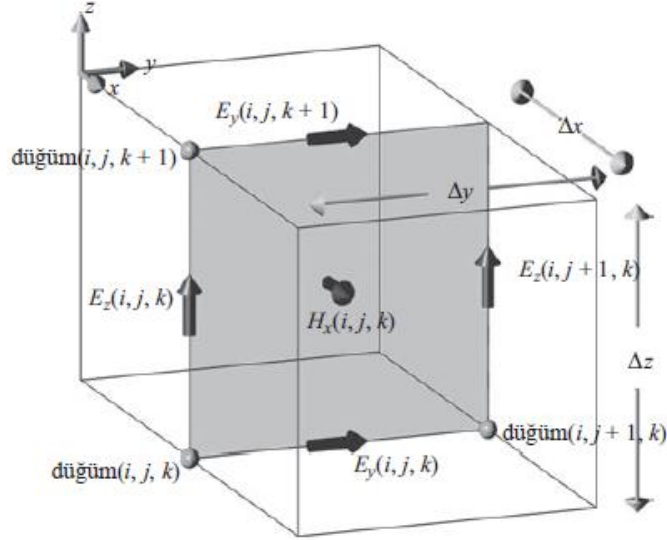
$E_x^{n+1}(i, j, k)$ terimi sol tarafta yalnız kalacak şekilde tekrar düzenlenirse:

$$\begin{aligned}
E_x^{n+1}(i, j, k) &= \frac{2\varepsilon_x(i, j, k) - \Delta t\sigma_x^e(i, j, k)}{2\varepsilon_x(i, j, k) + \Delta t\sigma_x^e(i, j, k)} E_x^n(i, j, k) \\
&+ \frac{2\Delta t}{(2\varepsilon_x(i, j, k) + \Delta t\sigma_x^e(i, j, k))\Delta y} \left(H_z^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k) - H_z^{n+\frac{1}{2}}(i, j - 1, k) \right) \\
&- \frac{2\Delta t}{(2\varepsilon_x(i, j, k) + \Delta t\sigma_x^e(i, j, k))\Delta z} \left(H_y^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k) - H_y^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k - 1) \right) \\
&- \frac{2\Delta t}{2\varepsilon_x(i, j, k) + \Delta t\sigma_x^e(i, j, k)} J_{ix}^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k)
\end{aligned} \tag{3.4.5}$$

Denklem (3.4.5) bir elektrik alan bileşeninin gelecekteki değerinin, elektrik alan bileşeninin, manyetik alan bileşenlerinin ve kaynak bileşenlerinin kendisine göre geçmiş zamandaki değerleri kullanılarak nasıl hesaplanacağını göstermektedir. Bu denklem biçimine FDTD *güncelleme denklemi* denir. Manyetik alan bileşenleri için benzer metodoloji izlenerek güncelleme denklemleri oluşturulabilir. Fakat bu sefer merkezi zaman noktası olarak $n\Delta t$ alınmalıdır. Örneğin denklem (3.2.5)'teki manyetik alanının x bileşenini ele alacak olursak:

$$\frac{\partial H_x}{\partial t} = \frac{1}{\mu_x} \left(\frac{\partial E_y}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial y} - \sigma_x^m H_x - M_{ix} \right)$$

Türevlerin sonlu farklar yaklaşımıyla düzenlemesi ve Şekil 3.4.5'teki konumu göz önünde bulundurularak aşağıdaki gibi tekrar yazılabilir [10]:



Şekil 3.4.5: $H_x(i, j, k)$ etrafındaki alan bileşenleri [10]

$$\frac{H_x^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k) - H_x^{n-\frac{1}{2}}(i, j, k)}{\Delta t} = \frac{1}{\mu_x(i, j, k)} \frac{E_y^n(i, j, k+1) - E_y^n(i, j, k)}{\Delta z} - \frac{1}{\mu_x(i, j, k)} \frac{E_z^n(i, j+1, k) - E_z^n(i, j, k)}{\Delta y} - \frac{\sigma_x^m(i, j, k)}{\mu_x(i, j, k)} H_x^n(i, j, k) - \frac{1}{\mu_x(i, j, k)} M_{ix}^n(i, j, k) \quad (3.4.6)$$

$H_x^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k)$ terimi sol tarafta yalnız kalacak şekilde tekrar düzenlenirse:

$$\begin{aligned}
H_x^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k) = & \frac{2\mu_x(i, j, k) - \Delta t\sigma_x^m(i, j, k)}{2\mu_x(i, j, k) + \Delta t\sigma_x^m(i, j, k)} H_x^{n-\frac{1}{2}}(i, j, k) \\
& + \frac{2\Delta t}{(2\mu_x(i, j, k) + \Delta t\sigma_x^m(i, j, k))\Delta z} (E_y^n(i, j, k+1) - E_y^n(i, j, k)) \\
& - \frac{2\Delta t}{(2\mu_x(i, j, k) + \Delta t\sigma_x^m(i, j, k))\Delta y} (E_z^n(i, j+1, k) - E_z^n(i, j, k)) \\
& - \frac{2\Delta t}{2\mu_x(i, j, k) + \Delta t\sigma_x^m(i, j, k)} M_{ix}^n(i, j, k)
\end{aligned} \tag{3.4.7}$$

Denklem (3.4.7) $H_x^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k)$ için güncelleme denklemdir. Benzer şekilde diğer elektrik ve manyetik alan bileşenlerinin güncelleme denklemleri yazılabilir.

Sonuç olarak denklem (3.2.5)'te bulunan tüm alan bileşenleri sonlu farklar yöntemiyle ifade edilebilir. Bir sistematik çevresinde katsayı terimleri kullanılarak elektromanyetik alanların altı bileşeni için aşağıdaki altı FDTD güncelleme denklemi oluşturulabilir.

1. Elektrik alanın x bileşeninin güncelleme denklemi:

$$\begin{aligned}
E_x^{n+1}(i, j, k) = & C_{exe}(i, j, k)E_x^n(i, j, k) \\
& + C_{exhz}(i, j, k) \left(H_z^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k) - H_z^{n+\frac{1}{2}}(i, j-1, k) \right) \\
& + C_{exhy}(i, j, k) \left(H_y^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k) - H_y^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k-1) \right) \\
& + C_{exj}(i, j, k) J_{ix}^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k)
\end{aligned} \tag{3.4.8}$$

Katsayılar burada

$$\begin{aligned}
C_{exe}(i, j, k) = & \frac{2\varepsilon_x(i, j, k) - \Delta t\sigma_x^e(i, j, k)}{2\varepsilon_x(i, j, k) + \Delta t\sigma_x^e(i, j, k)} \\
C_{exhz}(i, j, k) = & \frac{2\Delta t}{(2\varepsilon_x(i, j, k) + \Delta t\sigma_x^e(i, j, k))\Delta y} \\
C_{exhy}(i, j, k) = & -\frac{2\Delta t}{(2\varepsilon_x(i, j, k) + \Delta t\sigma_x^e(i, j, k))\Delta z} \\
C_{exj}(i, j, k) = & -\frac{2\Delta t}{2\varepsilon_x(i, j, k) + \Delta t\sigma_x^e(i, j, k)}
\end{aligned} \tag{3.4.9}$$

2. Elektrik alanın y bileşeninin güncelleme denklemi:

$$\begin{aligned}
E_y^{n+1}(i, j, k) = & C_{eye}(i, j, k) E_y^n(i, j, k) \\
& + C_{eyhx}(i, j, k) \left(H_x^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k) - H_x^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k-1) \right) \\
& + C_{eyhz}(i, j, k) \left(H_z^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k) - H_z^{n+\frac{1}{2}}(i-1, j, k) \right) \\
& + C_{eyj}(i, j, k) J_{iy}^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k)
\end{aligned} \tag{3.4.10}$$

Katsayılar burada

$$\begin{aligned}
C_{eye}(i, j, k) &= \frac{2\varepsilon_y(i, j, k) - \Delta t \sigma_y^e(i, j, k)}{2\varepsilon_y(i, j, k) + \Delta t \sigma_y^e(i, j, k)} \\
C_{eyhx}(i, j, k) &= \frac{2\Delta t}{(2\varepsilon_y(i, j, k) + \Delta t \sigma_y^e(i, j, k)) \Delta z} \\
C_{eyhz}(i, j, k) &= -\frac{2\Delta t}{(2\varepsilon_y(i, j, k) + \Delta t \sigma_y^e(i, j, k)) \Delta x} \\
C_{eyj}(i, j, k) &= -\frac{2\Delta t}{2\varepsilon_y(i, j, k) + \Delta t \sigma_y^e(i, j, k)}
\end{aligned} \tag{3.4.11}$$

3. Elektrik alanın z bileşeninin güncelleme denklemi:

$$\begin{aligned}
E_z^{n+1}(i, j, k) = & C_{eze}(i, j, k) E_z^n(i, j, k) \\
& + C_{ezhy}(i, j, k) \left(H_y^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k) - H_y^{n+\frac{1}{2}}(i-1, j, k) \right) \\
& + C_{ezhx}(i, j, k) \left(H_x^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k) - H_x^{n+\frac{1}{2}}(i, j-1, k) \right) \\
& + C_{ezj}(i, j, k) J_{iz}^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k)
\end{aligned} \tag{3.4.12}$$

Katsayılar burada

$$\begin{aligned}
C_{eze}(i, j, k) &= \frac{2\varepsilon_z(i, j, k) - \Delta t \sigma_z^e(i, j, k)}{2\varepsilon_z(i, j, k) + \Delta t \sigma_z^e(i, j, k)} \\
C_{ezhy}(i, j, k) &= \frac{2\Delta t}{(2\varepsilon_z(i, j, k) + \Delta t \sigma_z^e(i, j, k)) \Delta x} \\
C_{ezhx}(i, j, k) &= -\frac{2\Delta t}{(2\varepsilon_z(i, j, k) + \Delta t \sigma_z^e(i, j, k)) \Delta y} \\
C_{ezj}(i, j, k) &= -\frac{2\Delta t}{2\varepsilon_z(i, j, k) + \Delta t \sigma_z^e(i, j, k)}
\end{aligned} \tag{3.4.13}$$

4. Manyetik alanın x bileşeninin güncelleme denklemi:

$$\begin{aligned}
 H_x^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k) = & C_{hxh}(i, j, k) H_x^{n-\frac{1}{2}}(i, j, k) \\
 & + C_{hxey}(i, j, k) (E_y^n(i, j, k+1) - E_y^n(i, j, k)) \\
 & + C_{hxzez}(i, j, k) (E_z^n(i, j+1, k) - E_z^n(i, j, k)) \\
 & + C_{hxm}(i, j, k) M_{ix}^n(i, j, k)
 \end{aligned} \tag{3.4.14}$$

Katsayılar burada

$$\begin{aligned}
 C_{hxh}(i, j, k) &= \frac{2\mu_x(i, j, k) - \Delta t \sigma_x^m(i, j, k)}{2\mu_x(i, j, k) + \Delta t \sigma_x^m(i, j, k)} \\
 C_{hxey}(i, j, k) &= \frac{2\Delta t}{(2\mu_x(i, j, k) + \Delta t \sigma_x^m(i, j, k)) \Delta z} \\
 C_{hxzez}(i, j, k) &= -\frac{2\Delta t}{(2\mu_x(i, j, k) + \Delta t \sigma_x^m(i, j, k)) \Delta y} \\
 C_{hxm}(i, j, k) &= -\frac{2\Delta t}{2\mu_x(i, j, k) + \Delta t \sigma_x^m(i, j, k)}
 \end{aligned} \tag{3.4.15}$$

5. Manyetik alanın y bileşeninin güncelleme denklemi:

$$\begin{aligned}
 H_y^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k) = & C_{hyh}(i, j, k) H_y^{n-\frac{1}{2}}(i, j, k) + C_{hyez}(i, j, k) \\
 & (E_z^n(i+1, j, k) - E_z^n(i, j, k)) + C_{hyex}(i, j, k) \\
 & (E_x^n(i, j, k+1) - E_x^n(i, j, k)) + C_{hym}(i, j, k) M_{iy}^n(i, j, k)
 \end{aligned} \tag{3.4.16}$$

Katsayılar burada

$$\begin{aligned}
 C_{hyh}(i, j, k) &= \frac{2\mu_y(i, j, k) - \Delta t \sigma_y^m(i, j, k)}{2\mu_y(i, j, k) + \Delta t \sigma_y^m(i, j, k)} \\
 C_{hyez}(i, j, k) &= \frac{2\Delta t}{(2\mu_y(i, j, k) + \Delta t \sigma_y^m(i, j, k)) \Delta x} \\
 C_{hyex}(i, j, k) &= -\frac{2\Delta t}{(2\mu_y(i, j, k) + \Delta t \sigma_y^m(i, j, k)) \Delta z} \\
 C_{hym}(i, j, k) &= -\frac{2\Delta t}{2\mu_y(i, j, k) + \Delta t \sigma_y^m(i, j, k)}
 \end{aligned} \tag{3.4.17}$$

6. Manyetik alanın z bileşeninin güncelleme denklemi:

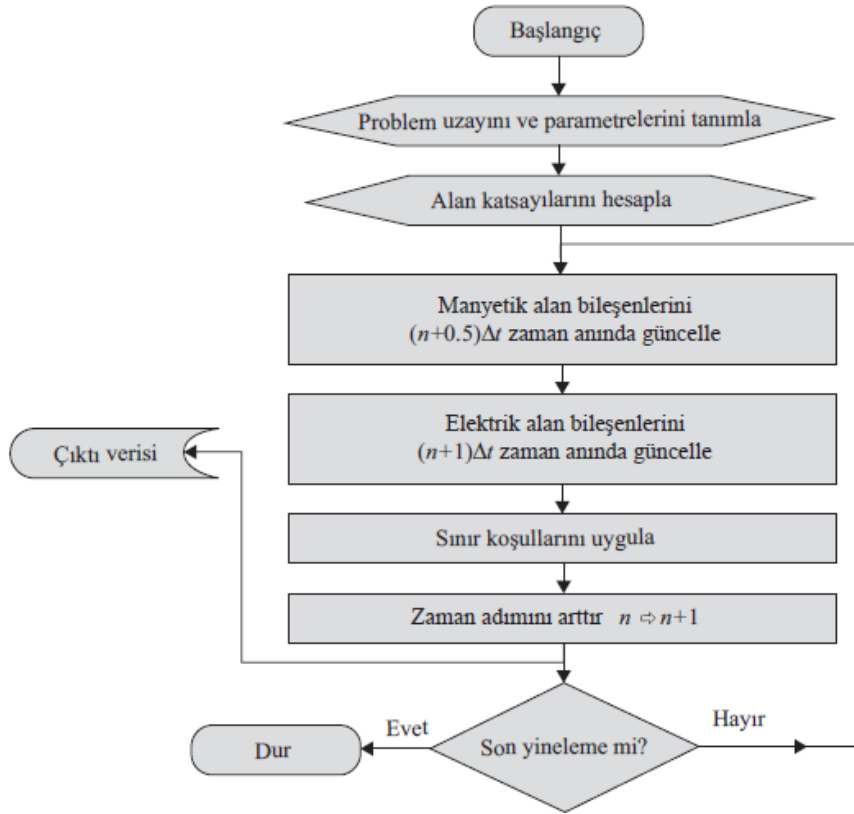
$$\begin{aligned}
H_z^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k) = & C_{hzh}(i, j, k) H_z^{n-\frac{1}{2}}(i, j, k) \\
& + C_{hzex}(i, j, k) (E_x^n(i, j+1, k) - E_x^n(i, j, k)) \\
& + C_{hzey}(i, j, k) (E_y^n(i+1, j, k) - E_y^n(i, j, k)) \\
& + C_{hzm}(i, j, k) M_{iz}^n(i, j, k)
\end{aligned} \tag{3.4.18}$$

Katsayılar burada

$$\begin{aligned}
C_{hzh}(i, j, k) &= \frac{2\mu_y(i, j, k) - \Delta t \sigma_z^m(i, j, k)}{2\mu_z(i, j, k) + \Delta t \sigma_z^m(i, j, k)} \\
C_{hzex}(i, j, k) &= \frac{2\Delta t}{(2\mu_z(i, j, k) + \Delta t \sigma_z^m(i, j, k)) \Delta y} \\
C_{hzey}(i, j, k) &= -\frac{2\Delta t}{(2\mu_z(i, j, k) + \Delta t \sigma_z^m(i, j, k)) \Delta x} \\
C_{hzm}(i, j, k) &= -\frac{2\Delta t}{2\mu_z(i, j, k) + \Delta t \sigma_z^m(i, j, k)}
\end{aligned} \tag{3.4.19}$$

FDTD güncelleme denklemleri türetildikten sonra, Şekil 3.4.6'da gösterildiği gibi bir zaman yürüyüşü algoritması oluşturulabilir. Bu algoritmadaki ilk adım problem uzayını ayarlayıp hem uzayın hem de hedefin parametrelerini tanımlamaktır. Daha sonra denklem (3.4.8) ile (3.4.19) arasında verilen katsayı terimlerini hesaplamaktır. Başlangıç iterasyonunda değerler sıfır olarak kabul edilebilir.

Daha sonra zaman yürüyüşü içerisinde $(n + 0.5)\Delta t$ anında (3.4.14)- (3.4.19) denklemleri kullanılarak manyetik alan bileşenleri güncellenir. Ardından $(n + 1)\Delta t$ anında (3.4.8)- (3.4.13) denklemleri kullanılarak elektrik alan bileşenleri güncellenir. Problem uzayı sonlu bir boyuta sahiptir ve problem uzayının sınırlarında belirli sınır koşulları uygulanabilir. Bu nedenle, problem uzayının sınırlarındaki alan bileşenleri iterasyon sırasında sınır koşullarının türüne ve değerlerine göre ele alınır. Alanlar güncellendikten ve sınır koşulları uygulandıktan sonra, istenen herhangi bir alan bileşeninin mevcut değerleri çıktı verileri olarak saklanabilir ve bu veriler gerçek zamanlı işlenebilir veya istenen diğer bazı parametreleri hesaplamak için işlem sonrası için kullanılabilir. FDTD iterasyonları belirli durdurma kriterlerine ulaşılan kadar devam ettirilir [10].



Şekil 3.4.6: FDTD algoritması [10]

3.5. Mükemmel Uyumlu Katman (PML)

FDTD ile simüle edilen açık alan problemlerinin hacmi bilgisayar belleği ile sınırlıdır. Ancak saçılma ve radyasyon problemleri sınırları açık olacak şekilde çözülmelidir. Hesaplama uzayının ötesinde sürekli olarak yayılan elektromanyetik dalgaları simüle eden özel sınır koşulları türlerine emici sınır koşulları (Absorbing Boundary Condition, ABC) denir. Bununla birlikte, problem uzayının süreksizlik oluşturacak şekilde kesilmesi ile yansımalar oluşacak ve bu da belirli bir simülasyon süresinden sonra problem uzayında hesaplama sonuçlarını bozacaktır. Şimdiye kadar çeşitli ABC türleri geliştirilmiştir. Bununla birlikte, Berenger [17], [20] tarafından tanıtılan mükemmel uyumlu katmanın (PML), geçmişte benimsenen diğer tekniklerle karşılaştırıldığında en güvenilir ABC'lerden biri olduğunu kanıtlamıştır [10], [18], [19], [29], [30], [31]. PML gelen dalganın açılarından ve frekanslarından bağımsız bir dalga empedans eşleştirme koşulu oluşturmak için hayali kurucu parametrelere dayalı olarak hesaplama alanını çevreleyen sonlu kalınlıkta özel bir ortamdır.

3.5.1. Üç Boyutlu Problem için PML denklemleri

TE_z polarize dalga için Maxwell denklemleri şöyledir:

$$\begin{aligned}\varepsilon_0 \frac{\partial E_x}{\partial t} + \sigma^e E_x &= \frac{\partial H_z}{\partial y} \\ \varepsilon_0 \frac{\partial E_y}{\partial t} + \sigma^e E_y &= -\frac{\partial H_z}{\partial x} \\ \mu_0 \frac{\partial H_z}{\partial t} + \sigma^m H_z &= \frac{\partial E_x}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial x}.\end{aligned}\quad (3.5.1.1)$$

Bir TE_z polarize dalga PML ortamında, H_z ve x ve y yönleriyle ilişkili iki yapay bileşene aşağıdaki gibi ayrılabilir:

$$\begin{aligned}H_{zx} &= H_{zx0} e^{-j\omega\beta y} e^{j\omega(t-\alpha x)} \\ H_{zy} &= H_{zy0} e^{-j\omega\alpha x} e^{j\omega(t-\beta y)}\end{aligned}\quad (3.5.1.2)$$

Burada $H_z = H_{zx} + H_{zy}$ 'dir.

Benzer şekilde TE_z polarize dalga PML ortamında, E_x ve y ve z yönleriyle ilişkili iki yapay bileşene şu şekilde ayrılabilir:

$$\begin{aligned}E_{xy} &= E_{xy0} e^{-j\omega\beta y} e^{j\omega(t-\alpha y)} \\ E_{xz} &= E_{xz0} e^{-j\omega\alpha x} e^{j\omega(t-\beta z)}\end{aligned}\quad (3.5.1.3)$$

Burada $E_x = E_{xy} + E_{xz}$ 'dir.

Üç boyutlu bir problem alanı için, elektrik ve manyetik alanların her bir alan bileşeni, iki boyutlu duruma benzer şekilde iki alan bileşenine ayrılır. Bu nedenle, değiştirilmiş Maxwell denklemleri orijinal altı bileşen yerine 12 alan bileşenine sahiptir. [20]'de sunulan bu değiştirilmiş bölünmüş elektrik alan denklemleri şunlardır [10]:

$$\begin{aligned}
\varepsilon_0 \frac{\partial E_{xy}}{\partial t} + \sigma_{pey} E_{xy} &= \frac{\partial(H_{zx} + H_{zy})}{\partial y}, \\
\varepsilon_0 \frac{\partial E_{xz}}{\partial t} + \sigma_{pez} E_{xz} &= -\frac{\partial(H_{yx} + H_{yz})}{\partial z}, \\
\varepsilon_0 \frac{\partial E_{yx}}{\partial t} + \sigma_{pex} E_{yx} &= -\frac{\partial(H_{zx} + H_{zy})}{\partial x}, \\
\varepsilon_0 \frac{\partial E_{yz}}{\partial t} + \sigma_{pez} E_{yz} &= \frac{\partial(H_{xy} + H_{xz})}{\partial z}, \\
\varepsilon_0 \frac{\partial E_{zx}}{\partial t} + \sigma_{pex} E_{zx} &= \frac{\partial(H_{yx} + H_{yz})}{\partial x}, \\
\varepsilon_0 \frac{\partial E_{zy}}{\partial t} + \sigma_{pey} E_{zy} &= -\frac{\partial(H_{xy} + H_{xz})}{\partial y},
\end{aligned} \tag{3.5.1.4}$$

Burada $\sigma_{pex}, \sigma_{pey}, \sigma_{pez}$ PML ortamında bulunan hayali iletkenlikleri temsil etmektedir. Ayrıca denklem (3.5.1.4) PML ortamı için oluşturulmuş Maxwell denklemlerini temsil etmektedir. Modifiye edilmiş ve bölünmüş Maxwell'in manyetik alan denklemleri ise:

$$\begin{aligned}
\mu_0 \frac{\partial H_{xy}}{\partial t} + \sigma_{pmy} H_{xy} &= -\frac{\partial(E_{zx} + E_{zy})}{\partial y} \\
\mu_0 \frac{\partial H_{xz}}{\partial t} + \sigma_{pmz} H_{xz} &= \frac{\partial(E_{yx} + E_{yz})}{\partial z} \\
\mu_0 \frac{\partial H_{yz}}{\partial t} + \sigma_{pmz} H_{yz} &= -\frac{\partial(E_{xy} + E_{xz})}{\partial z}, \\
\mu_0 \frac{\partial H_{yx}}{\partial t} + \sigma_{pmx} H_{yx} &= \frac{\partial(E_{zx} + E_{zy})}{\partial x} \\
\mu_0 \frac{\partial H_{zy}}{\partial t} + \sigma_{pmy} H_{zy} &= \frac{\partial(E_{xy} + E_{xz})}{\partial y} \\
\mu_0 \frac{\partial H_{zx}}{\partial t} + \sigma_{pmx} H_{zx} &= -\frac{\partial(E_{yx} + E_{yz})}{\partial x}.
\end{aligned} \tag{3.5.1.5}$$

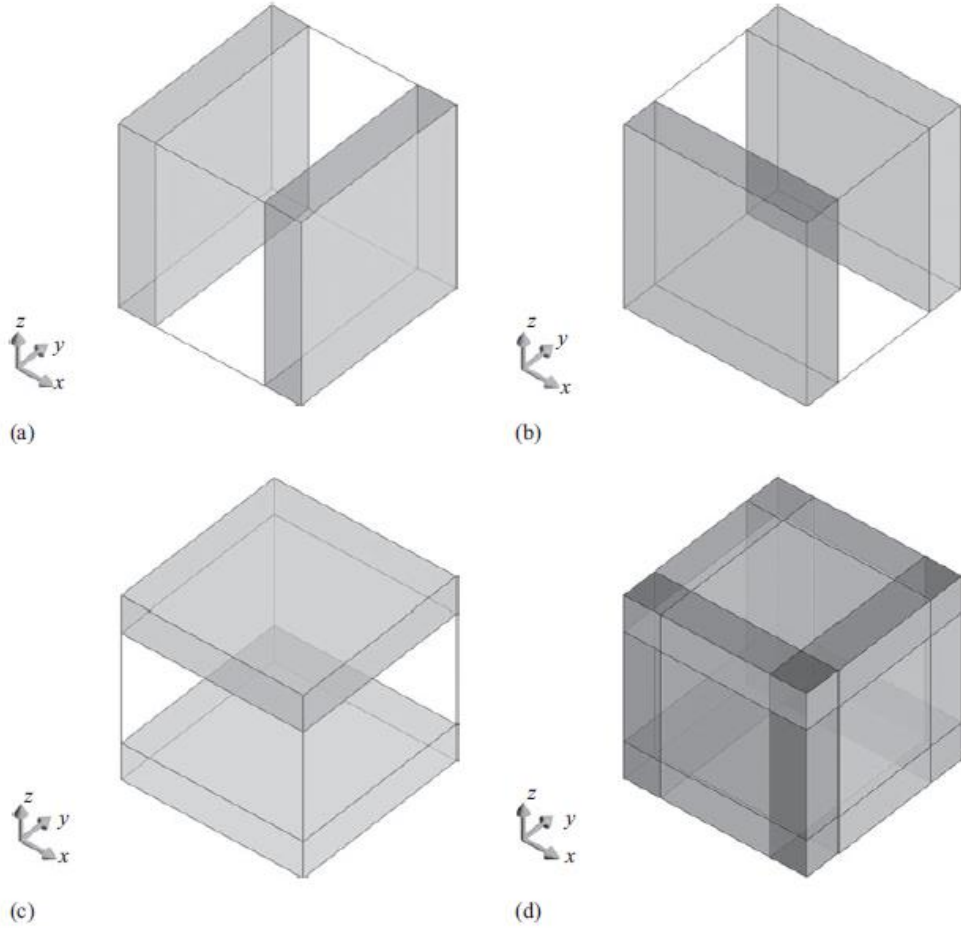
O halde üç boyutlu PML için eşleşme koşulu şu şekilde olmalıdır:

$$\frac{\sigma_{pex}}{\varepsilon_0} = \frac{\sigma_{pmx}}{\mu_0}, \frac{\sigma_{pey}}{\varepsilon_0} = \frac{\sigma_{pmy}}{\mu_0}, \frac{\sigma_{pez}}{\varepsilon_0} = \frac{\sigma_{pmz}}{\mu_0} \tag{3.5.1.6}$$

Üç boyutlu bir FDTD problem uzayına Şekil 3.5.1'de gösterildiği gibi yeterli kalınlıkta PML ortamı eklenirse, giden ya da saçılan dalgalar istenmeyen yansımalar olmadan emilecektir. PML bölgelerine denklem (3.5.1.6)'da verilen eşleşme koşulunu karşılayan

uygun iletkenlik değerleri verilmelidir. PML bölgelerinin pozitif ve negatif x sınırlarına sıfır olmayan σ_{pex} ve σ_{pmx} , PML bölgelerinin pozitif ve negatif y sınırlarına sıfır olmayan σ_{pey} ve σ_{pmy} , ve PML bölgelerinin pozitif ve negatif z sınırlarına Şekil 3.5.1.1’de gösterildiği gibi sıfır olmayan σ_{pez} ve σ_{pmz} değerleri verilmelidir. PML’in çakışan bölgelerde σ_{pex} , σ_{pmx} , σ_{pey} , σ_{pmy} , σ_{pez} ve σ_{pmz} değerlerinin sıfır olmayan değerlerinin bir arada bulunması gerekir.

Son olarak, değiştirilmiş Maxwell denklemlerine yani denklem (3.5.1.4)’e ve denklem (3.5.1.5)’e sonlu fark şemaları uygulandığında  boyutlu PML bölgeleri için FDTD alan güncelleme denklemlerini elde edebiliriz.



Şekil 3.5.1:  boyutlu bir FDTD simülasyon alanı için PML iletkenliklerinin sıfır olmayan bölgeleri: (a) sıfır olmayan σ_{pex} ve σ_{pmx} (b) sıfır olmayan σ_{pey} ve σ_{pmy} (c) sıfır olmayan σ_{pez} ve σ_{pmz} ve (d) akışan PML bölgeleri [10]

3.6. Uzamsal Izgara ve Zaman Adımı Seçimi

Çeşitli uygulamalarda FDTD modeli için uygun ızgara parametre seçimini kısıtlayan bazı kurallar vardır [32]. Bunlardan biri basitçe hücre boyutunun yeterince küçük olmasıdır. Örneğin en kısa dalga boyu en az beş birim hücreye karşılık gelmelidir. FDTD ağırları geometrik detayları yeterince iyi temsil etmelidir. En küçük geometrik boyutlar en az iki ila üç birim hücre ile temsil edilmelidir.

Merkezi fark algoritmasının kararlılık gereksinimlerini karşılamak için, zaman adımı ile uzamsal hücre boyutu arasında bir ilişki vardır. Uzamsal ayrıklaştırma dalga boyu başına 10 hücrenin üzerindeyse, sayısal dağılım oldukça yüksek olacaktır [2]. Özellikle hassas bazı durumlarda, iyi bir doğruluk elde etmek için dalga boyu başına en az 20 hücre gereklidir. Zaman adımı boyutu, uzamsal hücre boyutuna ve mevcut kararlılık koşuluna bağlıdır. 3 boyutlu bir durum için:

$$\Delta t \leq \frac{1}{c \sqrt{\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} + \frac{1}{\Delta z^2}}} \quad (3.6.1)$$

Burada c vakumdaki ışık hızını temsil etmektedir.

Denklem (3.6.1)'e bakınca daha kısa bir zaman adımı doğruluğu artırmadığından, genellikle Δt kararlılık sınırına yakın seçilir. Eğer $\Delta x = \Delta y = \Delta z = \Delta$ ise, maksimum zaman adımı $\Delta t = \frac{\Delta}{c\sqrt{3}}$ olabilir ya da programlamanın basit olması amacıyla $\Delta t = \frac{\Delta}{2c}$ olarak seçilebilir [26].

3.7. Kaynak Seçimi

Kaynaklar FDTD simülasyonları için gerekli bileşenlerdir. Kaynak türleri problemin türüne bağlı olarak değişir. Her durumda bir kaynak, elektrik ve manyetik alanları

zamanın bir fonksiyonu olacak şekilde bir dalga biçimiyle uyarır. Spektrum simülasyonları için kaynak, ilgilenilen tüm frekansları içermelidir. Örneğin Gauss darbesi çok frekanslı dalga biçimidir.

Kaynak dalga formunun frekans spektrumu, geçerli ve doğru sonuçların elde edilebileceği frekans aralığını belirler. Frekans arttıkça dalga boyu azalır ve problem uzayının hücre boyutundan küçük olmaya başlar. Eğer hücre boyutu dalga boyunun bir kısmına kıyasla büyükse, o frekanstaki sinyal uzayda doğru bir şekilde örneklenemez. Gauss dalgası kaynak dalga formu için en iyi seçimdir, çünkü bir hücre boyutuna bir faktörle bağlı olan en yüksek frekansa kadar tüm frekansları içerecek şekilde oluşturulabilir.

Gauss dalga biçimi zamanın bir fonksiyonu olarak şu şekilde yazılabilir:

$$g(t) = e^{-\frac{t^2}{\tau^2}} \quad (3.7.1)$$

Burada τ Gauss darbesinin hem zaman hem de frekans alanındaki genişliğini belirleyen bir parametredir. Bir Gauss dalga biçiminin Fourier dönüşümü frekansın bir fonksiyonu olarak şu şekilde ifade edilebilir:

$$G(\omega) = \tau\sqrt{\pi}e^{-\frac{\tau^2\omega^2}{4}} \quad (3.7.2)$$

Bir FDTD hesaplamasından elde edilebilecek en yüksek frekans, dalga boyu başına hücre sayısı ile belirlenebilir:

$$f_{max} = \frac{c}{\lambda_{min}} = \frac{c}{n_c\Delta_{max}} \quad (3.7.3)$$

Burada c vakumdaki ışık hızını, Δ_{max} hücre boyutlarının (Δx , Δy veya Δz) maksimumu ve λ_{min} serbest uzaydaki en yüksek frekansın dalga boyudur. En yüksek frekanslı dalga

boyunun birim hücre boyutuna oranına *dalga boyu başına hücre sayısı* denir. Bu da n_c olarak ifade edilir. Çeşitli yaklaşımları kullanarak τ Gauss darbesinin değerini denklem (3.7.3) ile ilişkilendirebiliriz:

$$\tau = \frac{\sqrt{2.3}n_c\Delta_{max}}{\pi c} \cong \frac{n_c\Delta_{max}}{2c} \quad (3.7.4)$$

FDTD simülasyonunda kullanılacak bir Gauss dalgası için τ parametresinin belirlenmesi yeterli değildir. FDTD simülasyonunda alanların başlangıç değerleri sıfırdır, dolayısıyla kaynaklar da sıfır olmalıdır. Gerçek alanların simülasyonunu oluşturmanın yolu Gauss kaynağının zamanda kaydırılmasıyla olabilir.

Zamanda kaydırma ile Gauss dalga formu şu biçimi alır:

$$g(t) = e^{-\frac{(t-t_0)^2}{\tau^2}} \quad (3.7.5)$$

Burada t_0 zamanda kayma miktarını temsil eder. Yine bir yaklaşım ile t_0 değeri:

$$t_0 = \sqrt{20}\tau \cong 4.5\tau \quad (3.7.6)$$

olarak kabul görebilir. Sonuç olarak Gaussian dalga formu FDTD simülasyonları için kullanılabilir [10].

3.8. Yakın Alandan Uzak Alana Dönüşüm

Radar kesit alanı uygulamalarında saçıcıdan uzakta olan bölgedeki saçılan alanla uğraşmaktadır. FDTD tekniği ile uzak alanın doğrudan değerlendirilmesi zordur çünkü büyük bir hesaplama alanı gerektirir. Bunun yerine yakın alandan uzak alana dönüşüm

tekniki kullanılır. Bu sayede yakın alan bileşenleriyle uzak alan bileşenleri türetilir [2]. Uzak alan koşulu aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$kR \gg 1 \Rightarrow \frac{2\pi R}{\lambda} \gg 1 \quad (3.8.1)$$

Burada R kaynaktan gözlem noktasına olan uzaklık, k serbest uzaydaki dalga sayısı ve λ dalga boyudur. Parabolik yansıtıcı gibi elektriksel olarak büyük bir anten için, açıklık boyutu “D” genellikle uzak alan koşulunu belirlemek için kullanılır [33]:

$$r > \frac{2D^2}{\lambda} \quad (3.8.2)$$

Burada r anten merkezinden gözlem noktasına olan uzaklıktır. Uzak alan bölgesinde, bir gözlem noktasındaki (r, θ, ϕ) elektromanyetik alan şu şekilde ifade edilebilir:

$$\begin{aligned} \vec{E}(r, \theta, \phi) &= \frac{e^{-jkr}}{4\pi r} \vec{F}(\theta, \phi), \\ \vec{H} &= \hat{r} \times \frac{\vec{E}}{\eta_0} \end{aligned} \quad (3.8.3)$$

Burada η_0 serbest uzaydaki empedans değeri ve $\vec{F}(\theta, \phi)$ elektrik alanının uzak alan örüntüsünün açısal değişimlerini belirleyen bir terimdir. Böylece, antenin ışınım örüntüsü sadece açısal konumun (θ, ϕ) bir fonksiyonudur ve r uzaklığından bağımsızdır. Genel olarak, yakın alandan uzak alana dönüşüm tekniği iki adımlı bir prosedürle uygulanır. İlk olarak hedefi çevreleyen hayali bir yüzey seçilir. Yüzeydeki \vec{J} ve \vec{M} akımları hesaplanan \vec{E} ve \vec{H} alanları tarafından belirlenir. Eşdeğerlik teoremine göre, akımlardan gelen ışınım alanı hedeften gelen ışınım alanına eşdeğerdir. Daha sonra \vec{A} ve \vec{F} vektör potansiyelleri, \vec{J} ve \vec{M} eşdeğer akımlarından radyasyon alanlarını hesaplamak için kullanılır. Uzak alan koşulları, uygun analitik formülleri elde etmek için türetmelerde kullanılır.

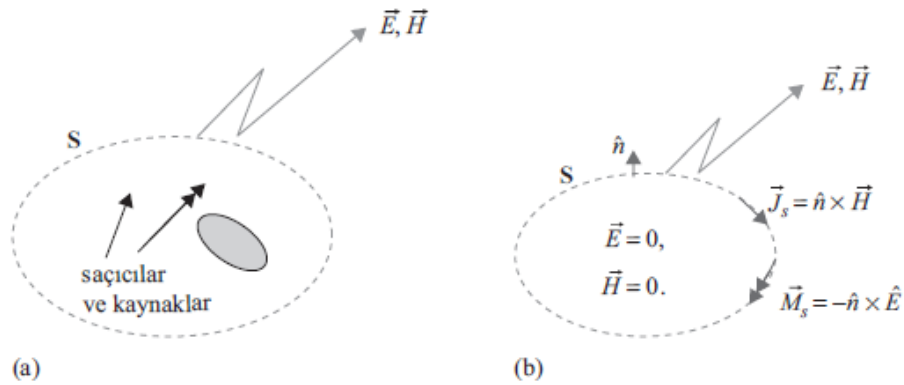
3.8.1. Yüzey Eşdeğerlik Teoremi

Yüzey eşdeğerlik teoremi 1936 yılında Skelkunoff [34] tarafından ortaya atılmıştır ve günümüzde elektromanyetik ve anten problemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır [35].

Temel fikir basitçe antenler veya saçıcılar gibi gerçek kaynakları, onları çevreleyen kapalı bir yüzey üzerindeki hayali yüzey akımları ile değiştirmektir. Yani belirli bir bölge içinde, hayali akımlar tarafından üretilen alanlar orijinal alanları temsil eder.

Şekil 3.8.1 yüzey eşdeğer teoreminin tipik bir uygulamasını göstermektedir. Rastgele bir kaynak tarafından üretilen alanların (\vec{E} ve \vec{H}) olduğunu varsayalım. Şekil 3.8.1 (a)'da gösterildiği gibi, tüm kaynakları ve saçıcı nesnelere içine alacak hayali bir yüzey S seçilir. Yüzeyin dışında S sadece boş alandır. Şekil 3.8.1 (b)'de S yüzeyinin dışındaki alanların aynı kaldığı ancak S yüzeyinin içindeki alanların sifira ayarlandığı eşdeğer bir problem oluşturulmuştur. Yüzeydeki sınır koşullarına uymak için, S üzerinde eşdeğer yüzey akımları tanımlanmalıdır:

$$\begin{aligned}\vec{J}_S &= \hat{n} \times (\vec{H}^{out} - \vec{H}^{in}) = \hat{n} \times \vec{H} \\ \vec{M}_S &= -\hat{n} \times (\vec{E}^{out} - \vec{E}^{in}) = -\hat{n} \times \vec{E}\end{aligned}\quad (3.8.1.1)$$

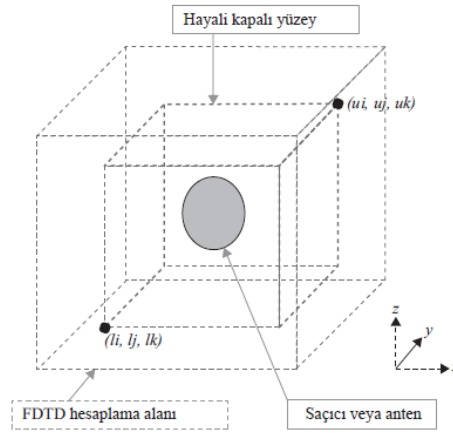


Şekil 3.8.1: Yüzey eşdeğerlik teoremi: (a) orijinal problem ve (b) S dışındaki bölge için eşdeğer problem [10]

Yüzey eşdeğer teoreminin uygulanması uzak alan hesaplamasını basitleştirir. Orijinal problemde S yüzeyinin içinde farklı ϵ ve μ değerlerine sahip malzemeler bulunabilir. Bu nedenle, saçılan alanı hesaplamak için karmaşık bir Green fonksiyonunun türetilmesi gerekir. Şekil 3.8.1 (b)'deki problemde yüzeyin içindeki alanlar sıfırdır. Ayrıca ϵ ve μ değerleri dıştaki boş alanla aynı olacak şekilde ayarlanabilir. Bu nedenle, saçılan alanı hesaplamak için basit serbest uzay Green fonksiyonu kullanılır [10].

3.8.2. FDTD için Eşdeğer Yüzey Akımları

İlk olarak Şekil 3.8.2'de gösterildiği gibi antenlerin veya saçıcıların etrafında kapalı bir yüzey seçilir. Seçilen yüzey genellikle FDTD ızgarasına uyan dikdörtgen bir kutudur. Analiz edilen nesnelere en dışta bulunan soğurucu katman arasında bulunur. Katmanlar arası hava ile kaplıdır. Kutunun konumu iki köşe ile tanımlanabilir: en alt koordinat (l_i, l_j, l_k) köşesi ve üst koordinat (u_i, u_j, u_k) köşesi. Eşdeğer teoremin uygulanabilmesi için tüm antenlerin veya saçıcıların bu dikdörtgen kutu tarafından çevrelenmesi kritik önem taşır.



Şekil 3.8.2: Saçıcı veya anteni çevreleyen hayali yüzey [10]

Hayali kapalı yüzey seçildikten sonra, eşdeğer yüzey akımları hesaplanır. Dikdörtgen kutunun altı yüzeyi vardır ve her yüzey Şekil 3.8.3'te gösterildiği gibi dört skaler elektrik ve manyetik akıma sahiptir. Eşdeğer yüzey akımları şu şekilde hesaplanır:

1. Üst yüzey için eşdeğer akım (normal vektörü: \hat{z}):

$$\begin{aligned}\vec{J}_S &= \hat{z} \times \vec{H} = \hat{z} \times (\hat{x}H_x + \hat{y}H_y + \hat{z}H_z) = -\hat{x}H_y + \hat{y}H_x \\ \vec{M}_S &= -\hat{z} \times \vec{E} = -\hat{z} \times (\hat{x}E_x + \hat{y}E_y + \hat{z}E_z) = \hat{x}E_y - \hat{y}E_x\end{aligned}\quad (3.8.2.1)$$

Skaler yüzey akımları ise:

$$\begin{aligned}\vec{J}_S &= \hat{x}J_x + \hat{y}J_y \Rightarrow J_x = -H_y, J_y = H_x \\ \vec{M}_S &= \hat{x}M_x + \hat{y}M_y \Rightarrow M_x = E_y, M_y = -E_x\end{aligned}\quad (3.8.2.2)$$

2. Alt yüzey için eşdeğer akım (normal vektörü: $-\hat{z}$):

$$\begin{aligned}\vec{J}_S &= \hat{x}J_x + \hat{y}J_y \Rightarrow J_x = H_y, J_y = -H_x \\ \vec{M}_S &= \hat{x}M_x + \hat{y}M_y \Rightarrow M_x = -E_y, M_y = E_x\end{aligned}\quad (3.8.2.3)$$

3. Sol yüzey için eşdeğer akım (normal vektörü: $-\hat{y}$):

$$\begin{aligned}\vec{J}_S &= \hat{x}J_x + \hat{z}J_z \Rightarrow J_x = -H_z, J_z = H_x \\ \vec{M}_S &= \hat{x}M_x + \hat{z}M_z \Rightarrow M_x = E_z, M_z = -E_x\end{aligned}\quad (3.8.2.4)$$

4. Sağ yüzey için eşdeğer akım (normal vektörü: \hat{y}):

$$\begin{aligned}\vec{J}_S &= \hat{x}J_x + \hat{z}J_z \Rightarrow J_x = H_z, J_z = -H_x \\ \vec{M}_S &= \hat{x}M_x + \hat{z}M_z \Rightarrow M_x = -E_z, M_z = E_x\end{aligned}\quad (3.8.2.5)$$

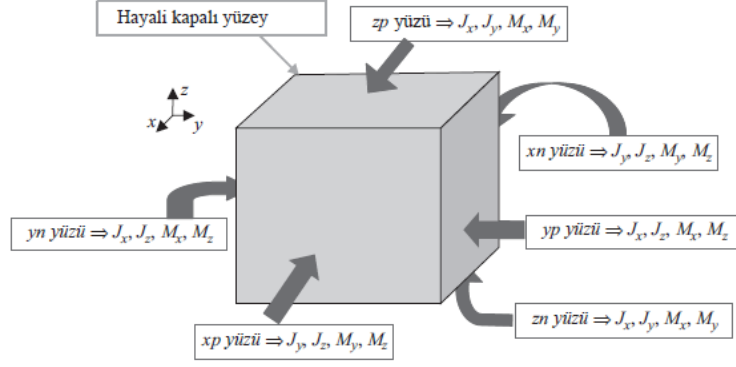
5. Ön yüzey için eşdeğer akım (normal vektörü: \hat{x}):

$$\begin{aligned}\vec{J}_S &= \hat{y}J_y + \hat{z}J_z \Rightarrow J_y = -H_z, J_z = H_y \\ \vec{M}_S &= \hat{y}M_y + \hat{z}M_z \Rightarrow M_y = E_z, M_z = -E_y\end{aligned}\quad (3.8.2.6)$$

6. Arka yüzey için eşdeğer akım (normal vektörü: $-\hat{x}$):

$$\begin{aligned}\vec{J}_S &= \hat{y}J_y + \hat{z}J_z \Rightarrow J_y = H_z, J_z = -H_y \\ \vec{M}_S &= \hat{y}M_y + \hat{z}M_z \Rightarrow M_y = -E_z, M_z = E_y.\end{aligned}\quad (3.8.2.7)$$

Uzak alan hesaplamasında eşdeğer akımların hepsi her FDTD hücresinde hesaplanmalıdır [10].



Şekil 3.8.3: Hayali kapalı yüzey üzerindeki eşdeğer yüzey akımları [10]

Burada bulunan E ve H alan bileşenleri bölüm 3.4'te anlatıldığı gibi hesaplanmaktadır. Yüzey akımlarını kullanarak uzak alan hesaplaması yaparken, zaman alan verileri doğrudan kullanılabilir. Frekans alanı hesaplamalarında ise uzak alanların, istenen frekans bileşenlerini elde etmek amacıyla her zaman adımında ayrık Fourier dönüşümü (Discrete Fourier Transform, DFT) kullanılır. Yüzey akımları kullanılarak uzak alanların hesaplanması bir sonraki başlık olan 3.8.3'te anlatılmıştır.

Frekans alanı, uzak alan hesaplanmasından daha detaylı bahsedecek olursak zaman alanında bulunan denklem (3.8.2.2)'deki J_y frekans alanında aşağıdaki gibi hesaplanabilir [10], [28]:

$$J_y(u, v, w; f_m) = H_x(u, v, w; f_m) = \sum_{n=1}^N H_x(u, v, w; n\Delta t) e^{-j2\pi f_m n\Delta t} \quad (3.8.2.8)$$

Burada (u, v, w) konum ve n zaman adımı indeksleridir. Δt zaman adım uzunluğudur. N zaman alanı simülasyonunda kullanılan maksimum zaman adımı sayısıdır. f_m ilgilenilen frekans bileşenidir. Burada m frekans bileşeni indisidir. Örneğin f_1 değeri 1 GHz, f_2 değeri 2 GHz olabilir. Burada m indisinin boyutu 1'den büyük ise ilgilenilen farklı frekans bileşenleri için J_y , ilgili frekans bileşeni için tekrar hesaplanmakta ve hafızada tutulmaktadır.

Sistem teorisine göre, kaynak tipi bir dürtü (impulse) olduğunda her frekans bileşeni için yanıt alınabilir. Bu bağlamda Gauss darbesi yeterince küçük olursa dürtü olarak düşünülebilir. Daha önce bölüm 3.7’de kaynak tipinin Gauss olmasının bu amaçla uygun olacağı belirtilmiştir. Tekrar bahsedecek olursak Gauss darbesi çok frekanslı dalga biçimidir. Gauss darbesi kullanılarak istenilen frekans bileşeni için yüzey akımları hesaplanabilir. Örneğin kaynak tipinin sinusoidal olması halinde, uzan alanların tek frekans bileşeni için değer elde edilebilir. FDTD’nin bir avantajı belirli bir frekans aralığında bulunan uzak alan bileşenlerini aynı zaman adımında ayırık Fourier dönüşümü kullanarak çözmesidir. Bu avantaj zamanda tasarruf sağlarken aynı zamanda farklı frekans bileşenlerinde bulunan yüzey akımı ve uzak alan bileşenlerini hafızada tutarak hafızadan ödün verir [28].

3.8.3. Vektör Potansiyeli Yaklaşımı

Radyasyon problemlerinde bilinen elektrik ve manyetik akımlardan bilinmeyen uzak alanları hesaplamak için bir vektör potansiyeli yaklaşımı geliştirilmiştir [35]. Vektör potansiyel fonksiyonu şu şekilde tanımlanır:

$$\begin{aligned}\vec{A} &= \frac{\mu_0}{4\pi} \iint_S \vec{J}_s \frac{e^{-jkR}}{R} ds' \cong \frac{\mu_0 e^{-jkr}}{4\pi r} \vec{N} \\ \vec{F} &= \frac{\varepsilon_0}{4\pi} \iint_S \vec{M}_s \frac{e^{-jkR}}{R} ds' \cong \frac{\varepsilon_0 e^{-jkr}}{4\pi r} \vec{L}\end{aligned}\quad (3.8.3.1)$$

Burada

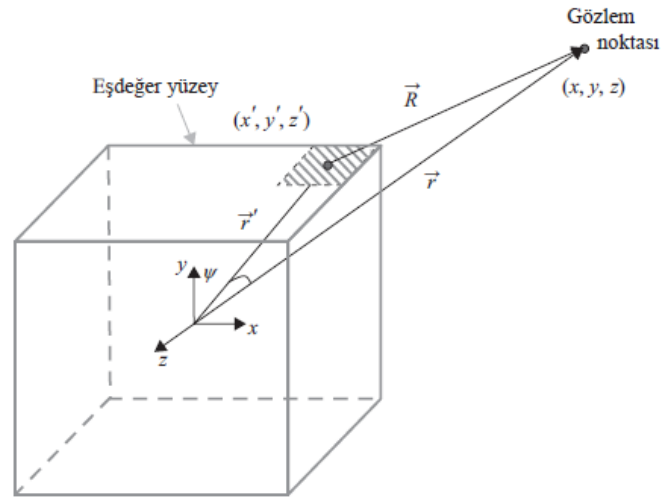
$$\begin{aligned}\vec{N} &= \iint_S \vec{J}_s e^{jkr' \cos \psi} ds' \\ \vec{L} &= \iint_S \vec{M}_s e^{jkr' \cos \psi} ds'\end{aligned}\quad (3.8.3.2)$$

Şekil 3.8.4’te gösterildiği gibi $\vec{r} = r \hat{r}$ vektörü gözlem noktasının (x, y, z) konumunu gösterirken, $\vec{r}' = r' \hat{r}'$ vektörü S yüzeyindeki kaynak noktasının (x', y', z') konumunu gösterir. $\vec{R} = R \hat{R}$ vektörü kaynak noktası ile gözlem noktası arasındadır ve ψ , \vec{r} ile \vec{r}'

arasındaki açıyı temsil eder. Uzak alan hesaplamasında, R mesafesi yaklaşık olarak şu şekilde hesaplanır:

$$R = \sqrt{r^2 + (r')^2 - 2rr' \cos(\psi)} = \begin{cases} r - r' \cos(\psi) & \text{faz terimi için} \\ r & \text{genlik terimi için} \end{cases} \quad (3.8.3.3)$$

Uzak alanlardaki E ve H bileşenleri aşağıda ifade edilen vektör potansiyelleri ile elde edilebilir [10]:



Şekil 3.8.4: Eşdeğer yüzey akım kaynağı ve uzak alan [10]

$$\begin{aligned} E_r &= 0 \\ E_\theta &= -\frac{jke^{-jkr}}{4\pi r} (L_\phi + \eta_0 N_\theta), \\ E_\phi &= +\frac{jke^{-jkr}}{4\pi r} (L_\theta - \eta_0 N_\phi), \\ H_r &= 0 \\ H_\theta &= +\frac{jke^{-jkr}}{4\pi r} \left(N_\phi - \frac{L_\theta}{\eta_0} \right) \\ H_\phi &= -\frac{jke^{-jkr}}{4\pi r} \left(N_\theta + \frac{L_\phi}{\eta_0} \right). \end{aligned} \quad (3.8.3.4)$$

Yardımcı fonksiyonlar N ve L şu şekilde hesaplanır:

$$\begin{aligned}
N_\theta &= \int_S (J_x \cos(\theta) \cos(\phi) + J_y \cos(\theta) \sin(\phi) - J_z \sin(\theta)) e^{jkr' \cos(\psi)} dS' \\
N_\phi &= \int_S (-J_x \sin(\phi) + J_y \cos(\phi)) e^{jkr' \cos(\psi)} dS' \\
L_\theta &= \int_S (M_x \cos(\theta) \cos(\phi) + M_y \cos(\theta) \sin(\phi) - M_z \sin(\theta)) e^{jkr' \cos(\psi)} dS' \\
L_\phi &= \int_S (-M_x \sin(\phi) + M_y \cos(\phi)) e^{jkr' \cos(\psi)} dS'
\end{aligned} \tag{3.8.3.5}$$

Denklem (3.8.3.5)'i denklem (3.8.3.4)'te yerine koyarak uzak alan örüntüsü herhangi bir gözlem noktasında (r, θ, ϕ) elde edilebilir [10].

Bu noktada, bistatik RKA bileşenleri şu şekilde hesaplanabilir:

$$\begin{aligned}
RCS_\theta &= \frac{k^2}{8\pi\eta_0 P_{inc}} |L_\phi + \eta_0 N_\theta|^2 \\
RCS_\phi &= \frac{k^2}{8\pi\eta_0 P_{inc}} |L_\theta - \eta_0 N_\phi|^2
\end{aligned} \tag{3.8.3.6}$$

Burada P_{inc} gelen dalganın gücünü temsil etmektedir. P_{inc} aşağıdaki şekilde hesaplanabilir:

$$P_{inc} = \frac{1}{2\eta_0} |E_{inc}(\omega)|^2 \tag{3.8.3.7}$$

Burada $E_{inc}(\omega)$ gelen elektrik alanının (*incident electric field*) ayrık Fourier dönüşümüdür [10]. Gelen elektrik alanının anlatımı bir sonraki başlıkta anlatılmıştır.

3.9. Saçılan Alan Formülasyonu

Uzak bölge kaynakları, FDTD problem uzayının dışında bir yerde üretilen ve problem uzayındaki nesnelere aydınlatan alanlardır. Bu kaynaklar gelen alanlar (*incident fields*)

olarak tanımlanır. Gelen alanlar analitik ifadelerle tanımlanabilir ve problem uzayının boş olduğu durumlarda Maxwell'in dönelemlerini karşılayan alanlardır, öyle ki:

$$\begin{aligned}\nabla \times \vec{H}_{inc} &= \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}_{inc}}{\partial t} \\ \nabla \times \vec{E}_{inc} &= -\mu_0 \frac{\partial \vec{H}_{inc}}{\partial t}\end{aligned}\quad (3.9.1)$$

olarak tanımlanabilir.

Gelen alanın en yaygın türü düzlem dalgadır. Gelen alan bir FDTD problem alanındaki nesnelere aydınlattığında, saçılan alanlar oluşur ve RKA tahminleri için hesaplanması gerekir. Saçılan alan formülasyonu, saçılan alanları hesaplamak için kullanılabilir en basit tekniklerden biridir [10]. Bir problem uzayındaki alanlar genel olarak toplam alanlar olarak adlandırılır. Toplam alanlar, genel bir ortam için Maxwell'in dönelemlerine karşılık gelir. Aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\begin{aligned}\nabla \times \vec{H}_{tot} &= \epsilon \frac{\partial \vec{E}_{tot}}{\partial t} + \sigma^e \vec{E}_{tot} \\ \nabla \times \vec{E}_{tot} &= -\mu \frac{\partial \vec{H}_{tot}}{\partial t} - \sigma^m \vec{H}_{tot}\end{aligned}\quad (3.9.2)$$

Daha sonra saçılan alanlar, toplam alanlar ile gelen alanlar arasındaki fark olarak tanımlanır. Bu nedenle, şöyle yazılabilir:

$$\begin{aligned}E_{tot} &= E_{inc} + E_{scat} \\ H_{tot} &= H_{inc} + H_{scat}\end{aligned}\quad (3.9.3)$$

Burada E_{scat} ve H_{scat} saçılan elektrik ve manyetik alanlardır. Denklem (3.9.2), denklem (3.9.3) ışığında gelen ve saçılan alan terimleri cinsinden aşağıdaki gibi yeniden yazılabilir:

$$\begin{aligned}
\nabla \times \vec{H}_{scat} + \nabla \times \vec{H}_{inc} &= \varepsilon \frac{\partial \vec{E}_{scat}}{\partial t} + \varepsilon \frac{\partial \vec{E}_{inc}}{\partial t} + \sigma^e \vec{E}_{scat} + \sigma^e \vec{E}_{inc} \\
\nabla \times \vec{E}_{scat} + \nabla \times \vec{E}_{inc} &= -\mu \frac{\partial \vec{H}_{scat}}{\partial t} - \mu \frac{\partial \vec{H}_{inc}}{\partial t} - \sigma^m \vec{H}_{scat} - \sigma^m \vec{H}_{inc}
\end{aligned} \tag{3.9.4}$$

Denklem (3.9.4)'teki gelen alanların dönele sonuçları, denklem (3.9.1)'deki zaman türevli terimlerle değiştirilebilir, bu da aşağıdaki sonucu verir:

$$\begin{aligned}
\nabla \times \vec{H}_{scat} + \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}_{inc}}{\partial t} &= \varepsilon \frac{\partial \vec{E}_{scat}}{\partial t} + \varepsilon \frac{\partial \vec{E}_{inc}}{\partial t} + \sigma^e \vec{E}_{scat} + \sigma^e \vec{E}_{inc} \\
\nabla \times \vec{E}_{scat} - \mu_0 \frac{\partial \vec{H}_{inc}}{\partial t} &= -\mu \frac{\partial \vec{H}_{scat}}{\partial t} - \mu \frac{\partial \vec{H}_{inc}}{\partial t} - \sigma^m \vec{H}_{scat} - \sigma^m \vec{H}_{inc}
\end{aligned} \tag{3.9.5}$$

Denklem (3.9.5)'teki terimler yeniden düzenlendikten sonra şu sonuç elde edilebilir:

$$\begin{aligned}
\varepsilon \frac{\partial \vec{E}_{scat}}{\partial t} + \sigma^e \vec{E}_{scat} &= \nabla \times \vec{H}_{scat} + (\varepsilon_0 - \varepsilon) \frac{\partial \vec{E}_{inc}}{\partial t} - \sigma^e \vec{E}_{inc} \\
\mu \frac{\partial \vec{H}_{scat}}{\partial t} + \sigma^m \vec{H}_{scat} &= -\nabla \times \vec{E}_{scat} + (\mu_0 - \mu) \frac{\partial \vec{H}_{inc}}{\partial t} - \sigma^m \vec{H}_{inc}
\end{aligned} \tag{3.9.6}$$

Bu noktada (3.9.6)'daki türevler merkezi sonlu fark yaklaşımları ile temsil edilebilir ve saçılan alan formülasyonu için güncelleme denklemleri elde edilebilir [10].

3.10. Saçılan Alan Güncelleme Denklemleri

Merkezi sonlu fark yaklaşımı uygulandıktan sonra denklem (3.9.6)'daki elektrik alan bileşenleri aşağıdaki gibi yazılabilir [10]:

$$\varepsilon_x(i, j, k) \frac{E_{scat,x}^{n+1}(i, j, k) - E_{scat,x}^n(i, j, k)}{\Delta t} + \sigma_x^e(i, j, k) \frac{E_{scat,x}^{n+1}(i, j, k) + E_{scat,x}^n(i, j, k)}{2}$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{H_{scat,z}^{n+\frac{1}{2}}(i,j,k) - H_{scat,z}^{n+\frac{1}{2}}(i,j-1,k)}{\Delta y} - \frac{H_{scat,y}^{n+\frac{1}{2}}(i,j,k) - H_{scat,y}^{n+\frac{1}{2}}(i,j,k-1)}{\Delta z} \\
&+ (\varepsilon_0 - \varepsilon_x(i,j,k)) \frac{E_{inc,x}^{n+1}(i,j,k) + E_{inc,x}^n(i,j,k)}{\Delta t} \\
&- \sigma_x^e(i,j,k) \frac{E_{inc,x}^{n+1}(i,j,k) + E_{inc,x}^n(i,j,k)}{2}
\end{aligned} \tag{3.10.1}$$

Denklem (3.10.1) ilgili elektrik alanı bileşenleri için düzenlenerek tek tek güncelleme denklemleri elde edilebilir.

1. Saçılan elektrik alanın x bileşeninin güncelleme denklemi:

$$\begin{aligned}
E_{scat,x}^{n+1}(i,j,k) &= C_{exe}(i,j,k) E_{scat,x}^n(i,j,k) \\
&+ C_{exhz}(i,j,k) \left[H_{scat,z}^{n+\frac{1}{2}}(i,j,k) - H_{scat,z}^{n+\frac{1}{2}}(i,j-1,k) \right] \\
&+ C_{exhy}(i,j,k) \left[H_{scat,y}^{n+\frac{1}{2}}(i,j,k) - H_{scat,y}^{n+\frac{1}{2}}(i,j,k-1) \right] \\
&+ C_{exeic}(i,j,k) E_{inc,x}^{n+1}(i,j,k) + C_{exeip}(i,j,k) E_{inc}^n(i,j,k)
\end{aligned} \tag{3.10.2}$$

Burada

$$\begin{aligned}
C_{exe}(i,j,k) &= \frac{2\varepsilon_x(i,j,k) - \sigma_x^e(i,j,k)\Delta t}{2\varepsilon_x(i,j,k) + \sigma_x^e(i,j,k)\Delta t} \\
C_{exhz}(i,j,k) &= \frac{2\Delta t}{\Delta y(2\varepsilon_x(i,j,k) + \sigma_x^e(i,j,k)\Delta t)} \\
C_{exhy}(i,j,k) &= -\frac{2\Delta t}{\Delta z(2\varepsilon_x(i,j,k) + \sigma_x^e(i,j,k)\Delta t)} \\
C_{exeic}(i,j,k) &= \frac{2(\varepsilon_0 - \varepsilon_x(i,j,k)) - \sigma_x^e(i,j,k)\Delta t}{2\varepsilon_x(i,j,k) + \sigma_x^e(i,j,k)\Delta t} \\
C_{exeip}(i,j,k) &= -\frac{2(\varepsilon_0 - \varepsilon_x(i,j,k)) + \sigma_x^e(i,j,k)\Delta t}{2\varepsilon_x(i,j,k) + \sigma_x^e(i,j,k)\Delta t}
\end{aligned} \tag{3.10.3}$$

2. Saçılan elektrik alanın y bileşenin güncelleme denklemi:

$$\begin{aligned}
E_{\text{scat},y}^{n+1}(i,j,k) = & C_{eye}(i,j,k) E_{\text{scat},y}^n(i,j,k) \\
& + C_{eyhx}(i,j,k) \left[H_{\text{scat},x}^{n+\frac{1}{2}}(i,j,k) - H_{\text{scat},x}^{n+\frac{1}{2}}(i,j,k-1) \right] \\
& + C_{eyhz}(i,j,k) \left[H_{\text{scat},z}^{n+\frac{1}{2}}(i,j,k) - H_{\text{scat},z}^{n+\frac{1}{2}}(i-1,j,k) \right] \\
& + C_{eyeic}(i,j,k) E_{\text{inc},y}^{n+1}(i,j,k) + C_{eyeip}(i,j,k) E_{\text{inc},y}^n(i,j,k)
\end{aligned} \tag{3.10.4}$$

Burada

$$\begin{aligned}
C_{eye}(i,j,k) &= \frac{2\varepsilon_y(i,j,k) - \sigma_y^e(i,j,k)\Delta t}{2\varepsilon_y(i,j,k) + \sigma_y^e(i,j,k)\Delta t} \\
C_{eyhx}(i,j,k) &= \frac{2\Delta t}{\Delta z(2\varepsilon_y(i,j,k) + \sigma_y^e(i,j,k)\Delta t)} \\
C_{eyhz}(i,j,k) &= -\frac{2\Delta t}{\Delta x(2\varepsilon_y(i,j,k) + \sigma_y^e(i,j,k)\Delta t)} \\
C_{eyeic}(i,j,k) &= \frac{2(\varepsilon_0 - \varepsilon_y(i,j,k)) - \sigma_y^e(i,j,k)\Delta t}{2\varepsilon_y(i,j,k) + \sigma_y^e(i,j,k)\Delta t} \\
C_{eyeip}(i,j,k) &= -\frac{2(\varepsilon_0 - \varepsilon_y(i,j,k)) + \sigma_y^e(i,j,k)\Delta t}{2\varepsilon_y(i,j,k) + \sigma_y^e(i,j,k)\Delta t}
\end{aligned} \tag{3.10.5}$$

3. Saçılan elektrik alanın z bileşenin güncelleme denklemi:

$$\begin{aligned}
E_{\text{scat},z}^{n+1}(i,j,k) = & C_{eze}(i,j,k) E_{\text{scat},z}^n(i,j,k) \\
& + C_{ezhy}(i,j,k) \left[H_{\text{scat},y}^{n+\frac{1}{2}}(i,j,k) - H_{\text{scat},y}^{n+\frac{1}{2}}(i,j,k-1) \right] \\
& + C_{ezhx}(i,j,k) \left[H_{\text{scat},x}^{n+\frac{1}{2}}(i,j,k) - H_{\text{scat},x}^{n+\frac{1}{2}}(i-1,j,k) \right] \\
& + C_{ezeic}(i,j,k) E_{\text{inc},z}^{n+1}(i,j,k) + C_{ezeip}(i,j,k) E_{\text{inc},z}^n(i,j,k)
\end{aligned} \tag{3.10.6}$$

Burada

$$\begin{aligned}
C_{eze}(i,j,k) &= \frac{2\varepsilon_z(i,j,k) - \sigma_z^e(i,j,k)\Delta t}{2\varepsilon_z(i,j,k) + \sigma_z^e(i,j,k)\Delta t} \\
C_{ezhy}(i,j,k) &= \frac{2\Delta t}{\Delta x(2\varepsilon_z(i,j,k) + \sigma_z^e(i,j,k)\Delta t)} \\
C_{ezhx}(i,j,k) &= -\frac{2\Delta t}{\Delta y(2\varepsilon_z(i,j,k) + \sigma_z^e(i,j,k)\Delta t)} \\
C_{ezeic}(i,j,k) &= \frac{2(\varepsilon_0 - \varepsilon_z(i,j,k)) - \sigma_z^e(i,j,k)\Delta t}{2\varepsilon_z(i,j,k) + \sigma_z^e(i,j,k)\Delta t} \\
C_{ezeip}(i,j,k) &= -\frac{2(\varepsilon_0 - \varepsilon_z(i,j,k)) + \sigma_z^e(i,j,k)\Delta t}{2\varepsilon_z(i,j,k) + \sigma_z^e(i,j,k)\Delta t}
\end{aligned} \tag{3.10.7}$$

Benzer bir yol izlenerek manyetik alan bileşenleri için güncelleme denklemleri aşağıdaki gibi elde edilebilir:

4. Saçılan manyetik alanın x bileşeninin güncelleme denklemi:

$$\begin{aligned}
H_{\text{scat},x}^{n+\frac{1}{2}}(i,j,k) = & C_{hxh}(i,j,k) H_{\text{scat},x}^{n-\frac{1}{2}}(i,j,k) \\
& + C_{hxez}(i,j,k) [E_{\text{scat},z}^n(i,j+1,k) - E_{\text{scat},z}^n(i,j,k)] \\
& + C_{hxey}(i,j,k) [E_{\text{scat},y}^n(i,j,k+1) - E_{\text{scat},y}^n(i,j,k)] \\
& + C_{hxhic}(i,j,k) H_{\text{inc},x}^{n+\frac{1}{2}}(i,j,k) + C_{hxhip}(i,j,k) H_{\text{inc},x}^{n-\frac{1}{2}}(i,j,k)
\end{aligned} \tag{3.10.8}$$

Burada

$$\begin{aligned}
C_{hxh}(i,j,k) &= \frac{2\mu_x(i,j,k) - \sigma_x^m(i,j,k)\Delta t}{2\mu_x(i,j,k) + \sigma_x^m(i,j,k)\Delta t} \\
C_{hxez}(i,j,k) &= -\frac{\Delta y(2\mu_x(i,j,k) + \sigma_x^m(i,j,k)\Delta t)}{2\Delta t} \\
C_{hxey}(i,j,k) &= \frac{\Delta z(2\mu_x(i,j,k) + \sigma_x^m(i,j,k)\Delta t)}{2\Delta t} \\
C_{hxhic}(i,j,k) &= \frac{2(\mu_0 - \mu_x(i,j,k)) - \sigma_x^m(i,j,k)\Delta t}{2\mu_x(i,j,k) + \sigma_x^m(i,j,k)\Delta t} \\
C_{hxhip}(i,j,k) &= -\frac{2(\mu_0 - \mu_x(i,j,k)) + \sigma_x^m(i,j,k)\Delta t}{2\mu_x(i,j,k) + \sigma_x^m(i,j,k)\Delta t}
\end{aligned} \tag{3.10.9}$$

5. Saçılan manyetik alanın y bileşeninin güncelleme denklemi:

$$\begin{aligned}
H_{\text{scat},y}^{n+\frac{1}{2}}(i,j,k) = & C_{hyh}(i,j,k) H_{\text{scat},y}^{n-\frac{1}{2}}(i,j,k) \\
& + C_{hyex}(i,j,k) [E_{\text{scat},x}^n(i,j+1,k) - E_{\text{scat},x}^n(i,j,k)] \\
& + C_{hyez}(i,j,k) [E_{\text{scat},z}^n(i,j,k+1) - E_{\text{scat},z}^n(i,j,k)] \\
& + C_{hyhic}(i,j,k) H_{\text{inc},y}^{n+\frac{1}{2}}(i,j,k) + C_{hyhip}(i,j,k) H_{\text{inc},y}^{n-\frac{1}{2}}(i,j,k)
\end{aligned} \tag{3.10.10}$$

Burada

$$\begin{aligned}
C_{hyh}(i, j, k) &= \frac{2\mu_y(i, j, k) - \sigma_y^m(i, j, k)\Delta t}{2\mu_y(i, j, k) + \sigma_y^m(i, j, k)\Delta t} \\
C_{hyex}(i, j, k) &= -\frac{2\Delta t}{\Delta x(2\mu_y(i, j, k) + \sigma_y^m(i, j, k)\Delta t)} \\
C_{hyez}(i, j, k) &= \frac{2\Delta t}{\Delta x(2\mu_y(i, j, k) + \sigma_y^m(i, j, k)\Delta t)} \\
C_{hyhic}(i, j, k) &= \frac{2(\mu_0 - \mu_y(i, j, k)) - \sigma_y^m(i, j, k)\Delta t}{2\mu_y(i, j, k) + \sigma_y^m(i, j, k)\Delta t} \\
C_{hyhip}(i, j, k) &= -\frac{2(\mu_0 - \mu_y(i, j, k)) + \sigma_y^m(i, j, k)\Delta t}{2\mu_y(i, j, k) + \sigma_y^m(i, j, k)\Delta t}
\end{aligned} \tag{3.10.11}$$

6. Saçılan manyetik alanın z bileşeninin güncelleme denklemi:

$$\begin{aligned}
H_{\text{scat},z}^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k) &= C_{hzh}(i, j, k) H_{\text{scat},z}^{n-\frac{1}{2}}(i, j, k) \\
&+ C_{hzey}(i, j, k) [E_{\text{scat},y}^n(i, j + 1, k) - E_{\text{scat},y}^n(i, j, k)] \\
&+ C_{hzex}(i, j, k) [E_{\text{scat},x}^n(i, j, k + 1) - E_{\text{scat},x}^n(i, j, k)] \\
&+ C_{hzhic}(i, j, k) H_{\text{inc},z}^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k) + C_{hzhip}(i, j, k) H_{\text{inc},z}^{n-\frac{1}{2}}(i, j, k)
\end{aligned} \tag{3.10.12}$$

Burada

$$\begin{aligned}
C_{hzh}(i, j, k) &= \frac{2\mu_z(i, j, k) - \sigma_z^m(i, j, k)\Delta t}{2\mu_z(i, j, k) + \sigma_z^m(i, j, k)\Delta t} \\
C_{hzey}(i, j, k) &= -\frac{2\Delta t}{\Delta x(2\mu_z(i, j, k) + \sigma_z^m(i, j, k)\Delta t)} \\
C_{hzex}(i, j, k) &= \frac{2\Delta t}{\Delta y(2\mu_z(i, j, k) + \sigma_z^m(i, j, k)\Delta t)} \\
C_{hzhic}(i, j, k) &= \frac{2(\mu_0 - \mu_z(i, j, k)) - \sigma_z^m(i, j, k)\Delta t}{2\mu_z(i, j, k) + \sigma_z^m(i, j, k)\Delta t} \\
C_{hzhip}(i, j, k) &= -\frac{2(\mu_0 - \mu_z(i, j, k)) + \sigma_z^m(i, j, k)\Delta t}{2\mu_z(i, j, k) + \sigma_z^m(i, j, k)\Delta t}
\end{aligned} \tag{3.10.13}$$

Denklem (3.10.2)'den başlayarak denklem (3.10.13)'e kadar verilen denklemler saçılan alan formülasyonu için güncelleme denklemleridir. Bu denklemler genel güncelleme denklemleri (3.4.8)-(3.4.19) ile karşılaştırıldığında, denklem (3.10.2)-(3.10.13)'ün fazladan gelen alan terimlerini içerir. Bunun dışında denklemlerin formları ve katsayı ifadeleri aynıdır [10].

4. FREKANS DAĞITICI MALZEME MODELLEMESİ

FDTD yönteminin önemli özelliklerinden biri frekans dağıtıcı ve doğrusal olmayan ortamlar gibi karmaşık ortam davranışlarının modellenmesine izin vermesidir. Bu ortamların elektromanyetik özelliklerini modellemek ve ayrık zaman alanı çözümüne entegre etmek için doğrudan algoritmalar geliştirilebilir [10].

Radar görünürlüğü azaltılması uygulamalarında kullanılan malzemeler genellikle frekansa bağlıdır. Bu tür malzemelerin parametrik değerleri ilgilenilen frekans bandında frekansın fonksiyonu olarak önemli ölçüde değişir. Bunun yanında biyolojik dokuların, dünyanın ve yapay metamateryallerin elektromanyetik özellikleri frekansa büyük ölçüde bağlıdır ve bunların frekans dağıtıcı özelliklerinin anlaşılabilmesi için doğru bir şekilde FDTD ile modellenmesi gerekir.

Frekans dağıtıcı malzeme modellemesi için birçok algoritma geliştirilmiştir. Bu algoritmaların çoğu temel olarak yardımcı diferansiyel denklem (ADE) [36], [37], [38], [39], [40], özyinelemeli konvolüsyon (RC) [41], [42], [43], [44], [45] ve Z-dönüşümü [4], [46] teknikleri altında sınıflandırılmaktadır. FDTD yönteminde frekans dağıtıcı ve diğer karmaşık ortamların modellenmesi için bu tekniklerin derinlemesine bir incelemesi [47]'da sunulmuştur. Genel olarak elektriksel geçirgenlik, manyetik geçirgenlik ve iletkenliğin frekans bağıllığı, açısal frekansın rasyonel fonksiyonlarının bir toplamı olarak tensör şeklinde ifade edilebilir. Bu rasyonel fonksiyonların en yaygın türleri Debye, Lorentz ve Drude modeli olarak adlandırılır.

Debye modeli, dielektrik malzemelerin düşük frekanstaki elektriksel davranışlarını açıklamak için kullanılabilir. Uygulama alanı olarak, biyolojik dokuların frekans davranışı ve EM dalgaların toprak ile etkileşimi örnek verilebilir.

Lorentz modeli, atomik veya moleküler rezonansları incelemek için kullanılabilir. Lorentz modeli ile metamateryallerin frekans davranışı incelenebilir.

Drude modeli, metalik malzemelerin iletkenlik özellikleri, serbest elektronların dalgaya verdiği tepkileri modellemek için kullanılabilir. Modelleme alanı olarak iyonize gazların elektriksel davranışı ve EM dalgaların metallere etkileşimi örnek verilebilir. Tez kapsamında Debye, Lorentz ve Drude modelleri oluşturulurken ADE tekniği kullanılmıştır.

4.1. Debye Ortamının Formülasyonu

Debye ortamı bir ya da çok kutuplu karmaşık değerlere sahip ve frekansa bağlı bir fonksiyon ile karakterize edilebilir. Duyarlılık (susceptibility) fonksiyonu aşağıdaki gibi ifade edilebilir [2]:

$$\chi_k(\omega) = \frac{\varepsilon_{s,k} - \varepsilon_{\infty,k}}{1 + j\omega\tau_k} = \frac{\Delta\varepsilon_k}{1 + j\omega\tau_k} \quad (4.1.1)$$

Burada $\chi_k(\omega)$ frekansa bağlı duyarlılık fonksiyonu, $\varepsilon_{s,k}$ statik veya sıfır frekanstaki bağıl elektriksel geçirgenlik, $\varepsilon_{\infty,k}$ sonsuz frekanstaki bağıl elektriksel geçirgenlik, $\Delta\varepsilon_k = (\varepsilon_{s,k} - \varepsilon_{\infty,k})$ Debye kutbundan kaynaklanan bağıl elektriksel geçirgenlikteki değişim ve τ_k kutup gevşeme (relaxion) zamanıdır. Duyarlılık fonksiyonu kullanılarak polarizasyon vektörü aşağıdaki gibi ifade edilebilir [48]:

$$\bar{P}(\omega) = \varepsilon_0 \chi_k(\omega) \bar{E}(\omega) \text{ (coul/m}^2\text{)} \quad (4.1.2)$$

Burada $\bar{P}(\omega)$ frekansa bağlı polarizasyon vektörü, ε_0 boş uzayın elektriksel geçirgenliği ve $\bar{E}(\omega)$ frekansa bağlı elektrik alan vektörünü göstermektedir. Polarizasyon vektörü kullanılarak polarizasyon akımı aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\bar{J}(\omega) = j\omega \bar{P}(\omega) \quad (4.1.3)$$

Burada $\bar{J}(\omega)$ frekansa bağlı polarizasyon akımını ifade etmektedir.

4.1.1. Debye Ortamının ADE Tekniği Kullanılarak Modellenmesi

Amper yasası, M kutuplu frekans dağıtıcı bir ortam için frekans alanında şu şekilde ifade edilir:

$$\nabla \times \bar{H} = j\omega\varepsilon_0\varepsilon_\infty\bar{E} + \sigma\bar{E} + \sum_{k=1}^M \bar{J}_k \quad (4.1.1.1)$$

Zaman alanında ise

$$\nabla \times \bar{H} = \varepsilon_0\varepsilon_\infty \frac{\partial}{\partial t} \bar{E} + \sigma\bar{E} + \sum_{k=1}^M \bar{J}_k \quad (4.1.1.2)$$

Burada ε_∞ sonsuz frekanslarda ortamın bağıl elektriksel geçirgenliği ve \bar{J}_k k. terimin polarizasyon akımıdır.

Frekans alanında Debye modeli için polarizasyon akımı \bar{J}_k denklem (4.1.3)'ten yola çıkarak şu şekilde yazılabilir:

$$\bar{J}_k = j\omega\varepsilon_0 \frac{A_k(\varepsilon_s - \varepsilon_\infty)}{1 + j\omega\tau_k} \bar{E} = j\omega \frac{\zeta_k}{1 + j\omega\tau_k} \bar{E} \quad (4.1.1.3)$$

Burada ε_s statik bağıl elektriksel geçirgenlik, A_k k. terimin genliği ve τ_k k. terimin gevşeme (relaxion) zamanıdır. Burada $\zeta_k = A_k\varepsilon_0(\varepsilon_s - \varepsilon_\infty)$ olarak tanımlanmıştır. FDTD güncelleme denklemlerini yazarken ilk adım denklem (4.1.1.2)'yi ayrık zaman diliminde, $(n + 0.5)$ zaman adımında ifade etmektir:

$$\nabla \times \bar{H}^{n+0.5} = \varepsilon_0\varepsilon_\infty \frac{\partial}{\partial t} \bar{E}^{n+0.5} + \sigma\bar{E}^{n+0.5} + \sum_{k=1}^M \bar{J}_k^{n+0.5} \quad (4.1.1.4)$$

Denklem (4.1.1.4)'teki $\bar{J}_k^{n+0.5}$ terimi denklem (4.1.1.3) düzenlenerek yeniden yazılabilir:

$$j\omega\tau_k\bar{J}_k + \bar{J}_k = j\omega\zeta_k\bar{E}, \quad (4.1.1.5)$$

Denklem (4.1.1.5)'i zaman alanında yazarsak:

$$\tau_k \frac{\partial}{\partial t} \bar{J}_k + \bar{J}_k = \zeta_k \frac{\partial}{\partial t} \bar{E} \quad (4.1.1.6)$$

Bu denklem $\bar{J}_k^{n+0.5}$ terimi için bir değer elde etmek amacıyla kullanılabilir bir yardımcı diferansiyel denklem yani ADE olarak adlandırılır [39].

Denklem (4.1.1.6)'nın $(n + 0.5)$ zaman adımındaki ifadesi aşağıdaki gibi gösterilebilir:

$$\tau_k \frac{\bar{J}_k^{n+1} - \bar{J}_k^n}{\Delta t} + \frac{\bar{J}_k^{n+1} + \bar{J}_k^n}{2} = \zeta_k \frac{\bar{E}^{n+1} - \bar{E}^n}{\Delta t}, \quad (4.1.1.7)$$

Denklem (4.1.1.7)'de \bar{J}_k^{n+1} terimi yalnız kalacak şekilde yeniden düzenlenirse:

$$\bar{J}_k^{n+1} = \frac{(2\tau_k - \Delta t)}{(2\tau_k + \Delta t)} \bar{J}_k^n + \frac{2\zeta_k}{(2\tau_k + \Delta t)} (\bar{E}^{n+1} - \bar{E}^n). \quad (4.1.1.8)$$

\bar{J}_k^n , \bar{E}^{n+1} ve \bar{E}^n değerleri biliniyorsa denklem (4.1.1.8)'deki \bar{J}_k^{n+1} teriminin değeri bulunabilir. Ayrıca denklem (4.1.1.4)'te bulunan $\bar{J}_k^{n+0.5}$ teriminin \bar{J}_k^{n+1} terimi ile ilişkilendirilmesi için ek bir denklemin yazılması gerekmektedir:

$$\bar{J}_k^{n+0.5} = \frac{\bar{J}_k^{n+1} + \bar{J}_k^n}{2}, \quad (4.1.1.9)$$

Denklem (4.1.1.8), denklem (4.1.1.9) kullanılarak yeniden düzenlenirse:

$$\bar{J}_k^{n+0.5} = \frac{2\tau_k}{(2\tau_k + \Delta t)} \bar{J}_k^n + \frac{\zeta_k}{(2\tau_k + \Delta t)} (\bar{E}^{n+1} - \bar{E}^n) \quad (4.1.1.10)$$

Denklem (4.1.1.10)'daki $\bar{J}_k^{n+0.5}$ terimi denklem (4.1.1.4)'e yerleştirilerek aşağıdaki denklem elde edilir:

$$\begin{aligned} \nabla \times \bar{H}^{n+0.5} = & \varepsilon_0 \varepsilon_\infty \frac{\bar{E}^{n+1} - \bar{E}^n}{\Delta t} + \sigma \frac{\bar{E}^{n+1} + \bar{E}^n}{2} \\ & + \sum_{k=1}^M \left(\frac{2\tau_k}{(2\tau_k + \Delta t)} \bar{J}_k^n + \frac{\zeta_k}{(2\tau_k + \Delta t)} (\bar{E}^{n+1} - \bar{E}^n) \right) \end{aligned} \quad (4.1.1.11)$$

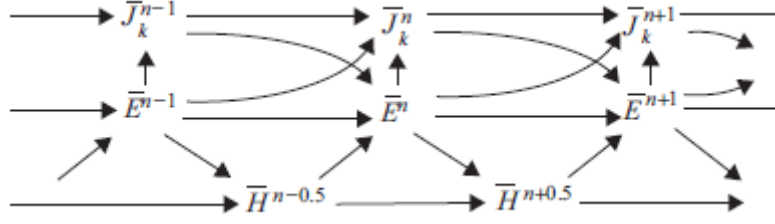
\bar{E}^{n+1} terimini sol tarafa taşıyarak, elektrik alanı için aşağıdaki gibi bir güncelleme denklemi elde edebiliriz [10]:

$$\begin{aligned} \bar{E}^{n+1} = & \frac{2\Delta t}{(2\varepsilon_0 \varepsilon_\infty + \sigma \Delta t + \xi)} \nabla \times \bar{H}^{n+0.5} + \frac{2\varepsilon_0 \varepsilon_\infty - \sigma \Delta t + \xi}{2\varepsilon_0 \varepsilon_\infty + \sigma \Delta t + \xi} \bar{E}^n \\ & - \frac{2\Delta t}{(2\varepsilon_0 \varepsilon_\infty + \sigma \Delta t + \xi)} \sum_{k=1}^M \frac{2\tau_k}{(2\tau_k + \Delta t)} \bar{J}_k^n \end{aligned} \quad (4.1.1.12)$$

Burada

$$\xi = \sum_{k=1}^M \frac{2\Delta t \zeta_k}{(2\tau_k + \Delta t)} \quad (4.1.1.13)$$

Şekil 4.1.1'de gösterildiği gibi denklem (4.1.1.8) ve (4.1.1.12) kullanılarak bir algoritma oluşturulabilir. Her zaman adımında manyetik alan bileşenleri manyetik alan güncelleme denklemlerini kullanarak güncellenir. Daha sonra yeni elektrik alan bileşenleri, elektrik ve manyetik alan bileşenlerinin geçmiş değerleri ve denklem (4.1.1.12)'yi takip eden polarizasyon akımı bileşenleri kullanılarak güncellenir. Ardından, yeni polarizasyon akım bileşenleri, elektrik alan bileşenlerinin mevcut ve geçmiş değerleri ve denklem (4.1.1.8)'i takiben polarizasyon akım bileşenlerinin geçmiş değerleri kullanılarak hesaplanır. Denklem (4.1.1.8)'i hesaplayabilmek için \bar{E}^n 'yi bir hafızada tutmak gerektiği unutulmamalıdır [10].



Şekil 4.1.1: Debye algoritmasındaki terimlerin güncelleme sırası [10]

4.2. Lorentz Ortamının Formülasyonu

Lorentz ortamı bir ya da daha fazla karmaşık eşlenik kutup çiftine ve karmaşık değerlere sahip, frekansa bağlı bir fonksiyon ile karakterize edilebilir. Duyarlılık fonksiyonu aşağıdaki gibi ifade edilebilir [2]:

$$\chi_k(\omega) = \frac{\Delta\varepsilon_k \omega_k^2}{\omega_k^2 + 2j\omega\delta_k - \omega^2} \quad (4.2.1)$$

Burada $\chi_k(\omega)$ frekansa bağlı duyarlılık fonksiyonu, $\Delta\varepsilon_k = (\varepsilon_{s,k} - \varepsilon_{\infty,k})$ Lorentz kutup çiftinden kaynaklanan bağıl elektriksel geçirgenlikteki değişim, $\varepsilon_{s,k}$ statik veya sıfır frekanstaki bağıl elektriksel geçirgenlik, $\varepsilon_{\infty,k}$ sonsuz frekanstaki bağıl elektriksel geçirgenlik, ω_k kutup (pole) frekansı yani doğal (natural) açısal frekans değeri, δ_k sönümlenme (damping) faktörüdür. Duyarlılık fonksiyonu kullanılarak polarizasyon vektörü denklem (4.1.2) kullanılarak ifade edilebilir. Aynı şekilde polarizasyon vektörü kullanılarak polarizasyon akımı denklem (4.1.3) kullanılarak ifade edilebilir.

4.2.1. Lorentz Ortamının ADE Tekniği Kullanılarak Modellenmesi

ADE tekniği kullanılarak Lorentz ortamı modellenebilir. Lorentz modelinde [40]'de bahsedilen yöntem uygulanacaktır.

Başlama noktamız yine Amper yasası olacaktır. Amper yasası M kutuplu frekans dağıtıcı bir ortam için frekans alanında şu şekilde ifade edilebilir:

$$\nabla \times \bar{H} = j\omega \varepsilon_0 \varepsilon_\infty \bar{E} + \sigma \bar{E} + j\omega \sum_{k=1}^M \bar{P}_k \quad (4.2.1.1)$$

Zaman alanında ise

$$\nabla \times \bar{H} = \varepsilon_0 \varepsilon_\infty \frac{\partial}{\partial t} \bar{E} + \sigma \bar{E} + \sum_{k=1}^M \frac{\partial}{\partial t} \bar{P}_k \quad (4.2.1.2)$$

Denklem (4.2.1.1) ile denklem (4.1.1.1) karşılaştırıldığında \bar{J}_k terimi (4.1.3) incelendiğinde $\bar{J}_k = j\omega \bar{P}_k$ eşitliği durumunda aynı denklemler olacağı açıkça görülmektedir.

Frekans alanında Lorentz modeli için \bar{P}_k terimi şu şekilde yazılabilir:

$$\bar{P}_k = \frac{A_k \varepsilon_0 (\varepsilon_s - \varepsilon_\infty) \omega_k^2}{\omega_k^2 + 2j\omega \delta_k - \omega^2} \bar{E} = \frac{\psi_k}{\omega_k^2 + 2j\omega \delta_k - \omega^2} \bar{E} \quad (4.2.1.3)$$

Burada ω_k k. terimin kutup (pole) frekansı yani doğal (natural) açısal frekans değeri, δ_k k. terimin sönümlenme (damping) faktörüdür. Burada $\psi_k = A_k \varepsilon_0 (\varepsilon_s - \varepsilon_\infty) \omega_k^2$ olarak tanımlanmıştır. Denklem (4.2.1.3)'ü kullanarak yardımcı diferansiyel denklem aşağıdaki şekilde oluşturulabilir:

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial t^2} + 2\delta_k \frac{\partial}{\partial t} + \omega_k^2 \right) \bar{P}_k = \psi_k \bar{E} \quad (4.2.1.4)$$

Denklem (4.2.1.4) merkezi fark yaklaşımı kullanılarak ayrık zamanda ve (n) zaman adımında şu şekilde ifade edilebilir [10]:

$$\frac{\bar{P}_k^{n+1} - 2\bar{P}_k^n + \bar{P}_k^{n-1}}{\Delta t^2} + \delta_k \frac{\bar{P}_k^{n+1} - \bar{P}_k^{n-1}}{\Delta t} + \omega_k^2 \bar{P}_k^n = \psi_k \bar{E}^n \quad (4.2.1.5)$$

Denklem (4.2.1.5) \bar{P}_k 'nın gelecekteki değerini hesaplamak için şu şekilde düzenlenebilir:

$$\bar{P}_k^{n+1} = \frac{2 - (\Delta t)^2 \omega_k^2}{(\delta_k \Delta t + 1)} \bar{P}_k^n + \frac{(\delta_k \Delta t - 1)}{(\delta_k \Delta t + 1)} \bar{P}_k^{n-1} + \frac{(\Delta t)^2 \psi_k}{(\delta_k \Delta t + 1)} \bar{E}^n \quad (4.2.1.6)$$

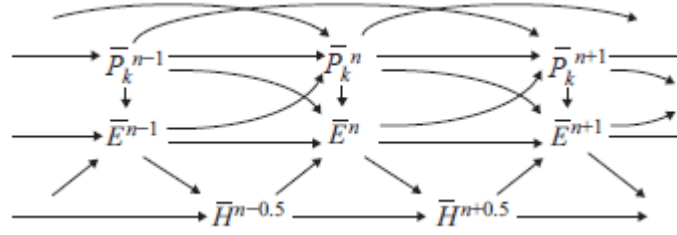
Ayrıca denklem (4.2.1.2) ayrık zaman diliminde ve $(n + 0.5)$ zaman adımında aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\nabla \times \bar{H}^{n+0.5} = \varepsilon_0 \varepsilon_\infty \frac{\bar{E}^{n+1} - \bar{E}^n}{\Delta t} + \sigma \frac{\bar{E}^{n+1} + \bar{E}^n}{2} + \frac{1}{\Delta t} \sum_{k=1}^M (\bar{P}_k^{n+1} - \bar{P}_k^n) \quad (4.2.1.7)$$

Denklem (4.2.1.7)'deki \bar{E}^{n+1} terimi sol tarafta kalacak şekilde yeniden düzenlenerek elektrik alanı için bir güncelleme denklemi elde edebiliriz:

$$\bar{E}^{n+1} = \frac{2\Delta t}{2\varepsilon_0 \varepsilon_\infty + \Delta t \sigma} \nabla \times \bar{H}^{n+0.5} + \frac{2\varepsilon_0 \varepsilon_\infty - \Delta t \sigma}{2\varepsilon_0 \varepsilon_\infty + \Delta t \sigma} \bar{E}^n - \frac{2}{2\varepsilon_0 \varepsilon_\infty + \Delta t \sigma} \sum_{k=1}^M (\bar{P}_k^{n+1} - \bar{P}_k^n) \quad (4.2.1.8)$$

Şekil 4.2.1'de gösterildiği gibi denklem (4.2.1.6) ve (4.2.1.8) kullanılarak bir algoritma oluşturulabilir. Her zaman adımında manyetik alan bileşenleri manyetik alan güncelleme denklemlerini kullanarak güncellenir. Daha sonra \bar{P}_k teriminin yeni değerleri, \bar{P}_k teriminin geçmiş değerleri ve denklem (4.2.1.6)'da belirtilen elektrik alan bileşenlerinin geçmiş değerleri kullanılarak hesaplanır. Daha sonra, yeni elektrik alan bileşeni, elektrik ve manyetik alan bileşenlerinin geçmiş değerleri ve denklem (4.2.1.8)'i takip eden yeni ve eski \bar{P}_k bileşenleri kullanılarak güncellenir. Denklem (4.2.1.6)'yı hesaplayabilmek için \bar{P}_k^n ve \bar{P}_k^{n-1} terimlerini bir hafızada tutmak gerektiği unutulmamalıdır.



Şekil 4.2.1: Lorentz algoritmasındaki terimlerin güncelleme sırası

4.3. Drude Ortamının Formülasyonu

Drude ortamı bir ya da çok kutuplu karmaşık değerlere sahip ve frekansa bağlı bir fonksiyon ile karakterize edilebilir. Duyarlılık fonksiyonu aşağıdaki gibi ifade edilebilir [2]:

$$\chi_k(\omega) = -\frac{\omega_k^2}{\omega^2 - j\omega\gamma_k} \quad (4.3.1)$$

Burada $\chi_k(\omega)$ frekansa bağlı duyarlılık fonksiyonu, ω_k kutup (pole) frekansı yani plazma açısıl frekans değeri, γ_k kutup gevşeme (relaxation) süresinin tersi ya da literatürde daha çok çarpışma (collision) frekansı olarak ifade edilmektedir. Duyarlılık fonksiyonu kullanılarak polarizasyon vektörü denklem (4.1.2) kullanılarak ifade edilebilir. Aynı şekilde polarizasyon vektörü kullanılarak polarizasyon akımı denklem (4.1.3) kullanılarak ifade edilebilir.

4.3.1. Drude Ortamının ADE Tekniği Kullanılarak Modellenmesi

Amper yasası, M kutuplu frekans dağıtıcı bir ortam için frekans alanında şu şekilde ifade edilir:

$$\nabla \times \bar{H} = j\omega\varepsilon_0\varepsilon_\infty\bar{E} + \sigma\bar{E} + \sum_{k=1}^M \bar{J}_k \quad (4.3.1.1)$$

Zaman alanında ise

$$\nabla \times \bar{H} = \varepsilon_0 \varepsilon_\infty \frac{\partial \bar{E}}{\partial t} + \sigma \bar{E} + \sum_{k=1}^M \bar{J}_k \quad (4.3.1.2)$$

Burada ε_∞ sonsuz frekanslarda ortamın bağıl elektriksel geçirgenliği ve \bar{J}_k k. terimin polarizasyon akımıdır.

Frekans alanında Drude modeli için polarizasyon akımı \bar{J}_k denklem (4.1.3)'ten yola çıkarak şu şekilde yazılabilir:

$$\bar{J}_k = -j\omega\varepsilon_0 \left(\frac{\omega_k^2}{\omega^2 - j\omega\gamma_k} \right) \bar{E} \quad (4.3.1.3)$$

Burada ω_k k. terimin kutup (pole) frekansı yani plazma açısal frekans değeri, γ_k k. terimin kutup gevşeme (relaxation) süresinin tersi ya da literatürde daha çok çarpışma (collision) frekansı olarak ifade edilmektedir.

FDTD güncelleme denklemlerini yazarken ilk adım denklem (4.3.1.2)'yi ayrık zaman diliminde, $(n + 0.5)$ zaman adımında ifade etmektir:

$$\nabla \times \bar{H}^{n+0.5} = \varepsilon_0 \varepsilon_\infty \frac{\partial \bar{E}^{n+0.5}}{\partial t} + \sigma \bar{E}^{n+0.5} + \sum_{k=1}^M \bar{J}_k^{n+0.5} \quad (4.3.1.4)$$

Denklem (4.3.1.4)'de \bar{J}_k terimini denklem (4.3.1.3) düzenlenerek yeniden yazılabilir.

Bunun için öncelikle denklem (4.3.1.3)'te her iki tarafı $(\omega^2 - j\omega\gamma_k)$ ile çarpabiliriz:

$$\omega^2 \bar{J}_k - j\omega\gamma_k \bar{J}_k = -j\omega\varepsilon_0 \omega_k^2 \bar{E} \quad (4.3.1.5)$$

Denklem (4.3.1.5)'i zaman alanında yazarsak:

$$\frac{\partial^2 \bar{J}_k}{\partial t^2} + \gamma_k \frac{\partial \bar{J}_k}{\partial t} = \varepsilon_0 \omega_k^2 \frac{\partial \bar{E}}{\partial t} \quad (4.3.1.6)$$

Zamana göre bir kez integral alındığında terimdeki türev birinci dereceye düşer:

$$\frac{\bar{J}_k}{\partial t} + \gamma_k \bar{J}_k = \varepsilon_0 \omega_k^2 \bar{E} \quad (4.3.1.7)$$

Denklem (4.3.1.7), \bar{J}_k için kullanılabilecek yardımcı diferansiyel denklemdir. Denklem (4.3.1.7)'nin $(n + 0.5)$ zaman adındaki ifadesi aşağıdaki gibi gösterilebilir:

$$\left(\frac{\bar{J}_k^{n+1} - \bar{J}_k^n}{\Delta t} \right) + \gamma_k \left(\frac{\bar{J}_k^{n+1} + \bar{J}_k^n}{2} \right) = \varepsilon_0 \omega_k^2 \left(\frac{\bar{E}^{n+1} + \bar{E}^n}{2} \right) \quad (4.3.1.8)$$

Denklem (4.3.1.8)'de \bar{J}_k^{n+1} terimi yalnız kalacak şekilde yeniden düzenlenirse:

$$\bar{J}_k^{n+1} = \alpha_k \bar{J}_k^n + \beta_k (\bar{E}^{n+1} + \bar{E}^n) \quad (4.3.1.9)$$

Burada

$$\alpha_k = \frac{1 - \gamma_k \Delta t / 2}{1 + \gamma_k \Delta t / 2}; \quad \beta_k = \frac{\omega_k^2 \varepsilon_0 \Delta t / 2}{1 + \gamma_k \Delta t / 2} \quad (4.3.1.10)$$

\bar{J}_k^n , \bar{E}^{n+1} ve \bar{E}^n değerleri biliniyorsa denklem (4.3.1.9)'deki \bar{J}_k^{n+1} teriminin değeri bulunabilir. Ayrıca denklem (4.3.1.4)'te bulunan $\bar{J}_k^{n+0.5}$ teriminin \bar{J}_k^{n+1} terimi ile ilişkilendirilmesi için ek bir denklemin yazılması gerekmektedir:

$$\bar{J}_k^{n+0.5} = \frac{\bar{J}_k^{n+1} + \bar{J}_k^n}{2}, \quad (4.3.1.11)$$

Denklem (4.3.1.9), denklem (4.3.1.11) kullanılarak yeniden düzenlenirse:

$$\bar{J}_k^{n+0.5} = \frac{1}{2} \left[(1 + \alpha_k) \bar{J}_k^n + \beta_k (\bar{E}^{n+1} + \bar{E}^n) \right] \quad (4.3.1.12)$$

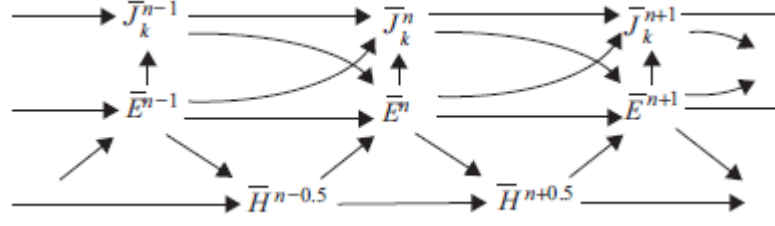
Denklem (4.3.1.12)'deki $\bar{J}_k^{n+0.5}$ terimi denklem (4.3.1.4)'e yerleştirilerek aşağıdaki denklem elde edilir:

$$\begin{aligned} \nabla \times \bar{H}^{n+0.5} &= \varepsilon_0 \varepsilon_\infty \left(\frac{\bar{E}^{n+1} - \bar{E}^n}{\Delta t} \right) + \sigma \left(\frac{\bar{E}^{n+1} + \bar{E}^n}{2} \right) \\ &+ \frac{1}{2} \sum_{k=1}^M \left[(1 + \alpha_k) \bar{J}_k^n + \beta_k (\bar{E}^{n+1} + \bar{E}^n) \right] \end{aligned} \quad (4.3.1.13)$$

\bar{E}^{n+1} terimini sol tarafa taşıyarak, elektrik alanı için aşağıdaki gibi bir güncelleme denklemini elde edebiliriz [2]:

$$\begin{aligned} \bar{E}^{n+1} &= \left(\frac{2\varepsilon_0 \varepsilon_\infty - \Delta t \sum_{k=1}^M \beta_k - \sigma \Delta t}{2\varepsilon_0 \varepsilon_\infty + \Delta t \sum_{k=1}^M \beta_k + \sigma \Delta t} \right) \bar{E}^n \\ &+ \left(\frac{2\Delta t}{2\varepsilon_0 \varepsilon_\infty + \Delta t \sum_{k=1}^M \beta_k + \sigma \Delta t} \right) \cdot \left[\nabla \times \bar{H}^{n+0.5} - \frac{1}{2} \sum_{k=1}^M (1 + \alpha_k) \bar{J}_k^n \right] \end{aligned} \quad (4.3.1.14)$$

Şekil 4.3.1'de gösterildiği gibi denklem (4.3.1.9) ve (4.3.1.14) kullanılarak bir algoritma oluşturulabilir. Her zaman adımında manyetik alan bileşenleri manyetik alan güncelleme denklemlerini kullanarak güncellenir. Daha sonra yeni elektrik alan bileşenleri, elektrik ve manyetik alan bileşenlerinin geçmiş değerleri ve denklem (4.3.1.14)'ü takip eden polarizasyon akımı bileşeni kullanılarak güncellenir. Ardından, yeni polarizasyon akımı, elektrik alan bileşeninin mevcut ve geçmiş değeri ve denklem (4.3.1.9)'u takiben polarizasyon akım bileşeninin geçmiş değeri kullanılarak hesaplanır. Denklem (4.3.1.9)'u hesaplayabilmek için \bar{E}^n 'yi bir hafızada tutmak gerektiği unutulmamalıdır [2].



Şekil 4.3.1: Drude algoritmasındaki terimlerin güncelleme sırası [10]

Drude ortamı ile bir metal modelleniyorsa kullanılan metalin iletkenliği frekansa bağlı olacak şekilde değişmektedir. Aşağıdaki gibi metalin iletkenliği bulunabilir [48]:

$$\sigma(\omega) = \frac{\epsilon_0 \omega_k^2 \tau_k}{1 + (\omega \tau_k)^2} \quad (4.3.1.15)$$

Burada $\tau_k = 1/\gamma_k$ değerine eşittir. τ_k elektronların ortalama çarpışma oranı olarak ifade edilebilir. Burada ω_k k. terimin kutup (pole) frekansı yani plazma açısallık frekans değeri, γ_k k. terimin kutup gevşeme (relaxation) süresinin tersi ya da literatürde daha çok çarpışma (collision) frekansı ve ω operasyon açısallık frekansısıdır.

5. NÜMERİK SONUÇLAR

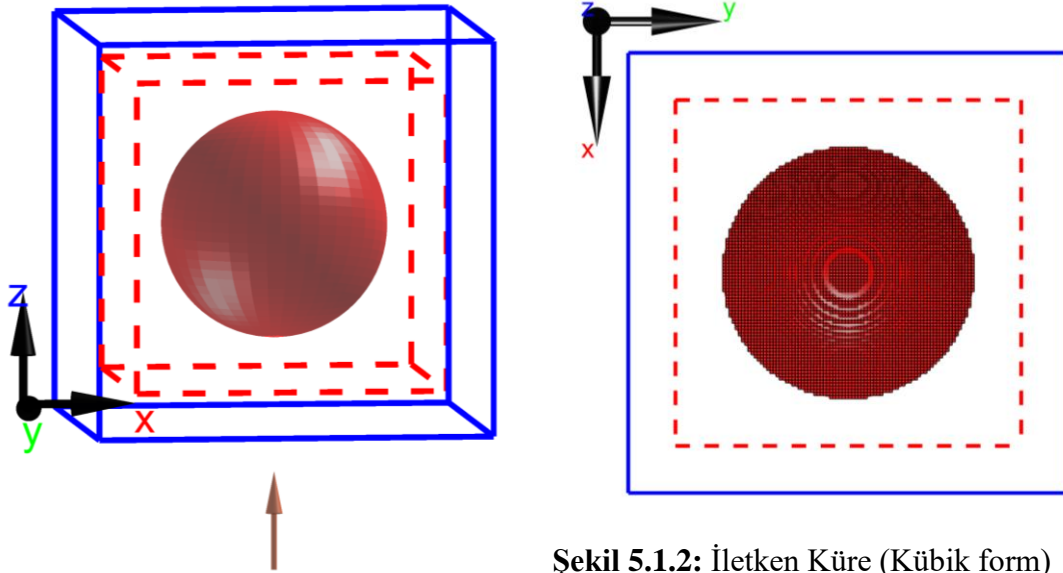
Tezin bu bölümünde iletken ve frekans dağıtıcı malzemeler ile kaplanmış çeşitli cisimlerle radar kesit alanı çalışması yapılmıştır. Radar kesit alanını tahmin eden programın ismi “RaPTo” olarak adlandırılmıştır. RaPTo’nun verdiği sonuçların değerlendirilmesi, CST ve analitik yöntemlerle alınan sonuçların karşılaştırılması için, başlangıçta kanonik cisim olarak iletken küre kullanılmıştır. Küreye ait bistatik RKA verileri, RaPTo ile birlikte hem analitik yöntemi baz alarak oluşturulan kodun sonuçları hem de ticari bir yazılım olan CST Studio’nun Zaman Alanı çözücüsü kullanılarak elde edilen bistatik RKA sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Daha sonra küre frekans dağıtıcı malzeme ile kaplanmıştır. Kaplanmış küreye ait Lorentz, Debye ve Drude modellerinin bistatik RKA sonuçları RaPTo ile CST arasında karşılaştırılmıştır. Bu tez kapsamında RKA’nın azaltılmasına yönelik çalışma nihai hedef olarak belirlenmiştir. Bundan dolayı daha sonrasında RKA azaltılmasına yönelik çalışma yapılmıştır. Bu kapsamda ilk olarak kanonik cisimler olarak küp, küre ve levha cisimleri kullanılmıştır. Bu cisimler Drude modelle temsil edilecek frekans dağıtıcı malzeme ile kaplanmıştır. RKA değişimini anlayabilmek için hem iletken malzeme hem de kaplama sonucu ortaya çıkan bistatik ve monostatik RKA verileri CST ile karşılaştırılmıştır. Son olarak daha kompleks cisim olarak F-117 Nighthawk ve F-16 Fighting Falcon kullanılmıştır. Yine aynı şekilde bu cisimlerde frekans dağıtıcı malzeme ile kaplanmıştır. F-177’ye ait bistatik RKA sonuçları RaPTo ile CST arasında karşılaştırılmıştır. Tez çalışmasının son kısmında ise F-16 kullanılmıştır. F-16’ya ait monostatik RKA değerleri RaPTo ile CST arasında karşılaştırılmıştır.

RaPTo üçgen yüzeylerin kullanıldığı herhangi bir Bilgisayar Destekli Tasarım (CAD) programıyla modellenmiş .stl dosya uzantılı cisim ağ yapısını, [49]’da anlatılan algoritma ile yani ışın izleme algoritması ile üç boyutlu kübik elemanlara dönüştürmektedir.

5.1. Mükemmel İletken Küre’nin RKA Sonuçları

Analizde kullanılan küre Şekil 5.1.1’de gösterilmiştir. Kürenin yanında x , y , z eksenlerini gösteren oklar, gelen dalganın yönünü gösteren ok, problem uzayının sınırı ve aynı

zamanda mükemmel uyumlu katmanın sınırı (mavi ve sürekli çizgi) ve toplam alan (içeride kalacak şekilde) ile saçılan alanın sınırı (kırmızı kesik çizgi) gösterilmiştir. Şekil 5.1.2’de kübik elemanlara dönüştürülmüş hali gösterilmiştir. Grafiklerde PEC etiketi kullanılan malzemenin mükemmel iletken olduğunu göstermektedir.

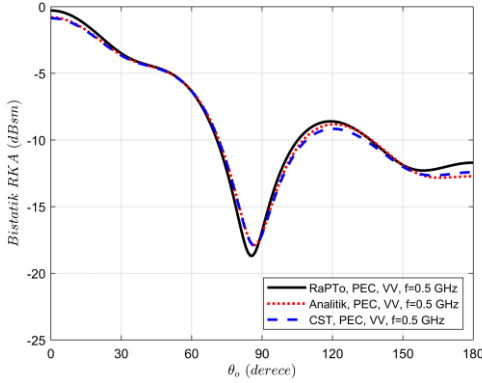


Şekil 5.1.2: İletken Küre (Kübik form)

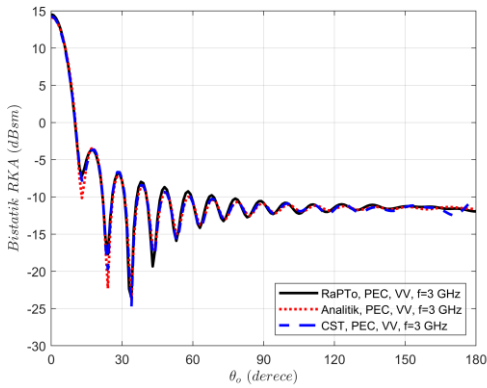
Şekil 5.1.1: İletken Küre

Mükemmel iletken kürenin, 0.5 GHz frekans kullanılarak, $r = 0.3 m (\lambda/2)$ boyutunda, dikey polarize ve $\theta_i = 180^\circ$ ve $\phi_i = 0^\circ$ gelen dalga açılarında, $\theta_o = 0^\circ \rightarrow 180^\circ$ 1'er derece aralıklarla ve $\phi_o = 120^\circ$ gözlem açıları oluşmuş dikey polarize RKA değerleri hesaplanmıştır. Radar kesit alanı değerleri Şekil 5.1.3'te gösterilmiştir. Mükemmel iletken kürenin, 1 GHz frekans kullanılarak, $r = 0.3 m (\lambda)$ boyutunda, dikey polarize ve $\theta_i = 180^\circ$ ve $\phi_i = 0^\circ$ gelen dalga açıları, $\theta_o = 0^\circ \rightarrow 180^\circ$ 1'er derece aralıklarla ve $\phi_o = 45^\circ$ gözlem açıları oluşmuş dikey polarize RKA değerleri hesaplanmıştır. Radar kesit alanı değerleri Şekil 5.1.4'te gösterilmiştir. Mükemmel iletken kürenin, 3 GHz frekans kullanılarak, $r = 0.3 m (3\lambda)$ boyutunda, dikey polarize ve $\theta_i = 180^\circ$ ve $\phi_i = 0^\circ$ gelen dalga açıları, $\theta_o = 0^\circ \rightarrow 180^\circ$ 1'er derece aralıklarla ve $\phi_o = 120^\circ$ gözlem açıları oluşmuş dikey polarize RKA değerleri hesaplanmıştır. Radar kesit alanı değerleri Şekil 5.1.5'te gösterilmiştir. Mükemmel iletken kürenin, 8 GHz frekans kullanılarak, $r = 0.0375 m (\lambda)$ boyutunda, dikey polarize ve $\theta_i = 180^\circ$ ve $\phi_i = 0^\circ$ gelen dalga açıları, $\theta_o = 180^\circ$ ve $\phi_o = 0^\circ \rightarrow 359^\circ$ 1'er derece aralıklarla gözlem açıları

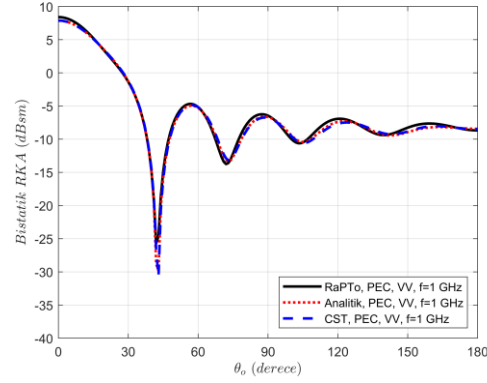
oluşan dikey polarize RKA değerleri hesaplanmıştır. Radar kesit alanı değerleri Şekil 5.1.6’da gösterilmiştir.



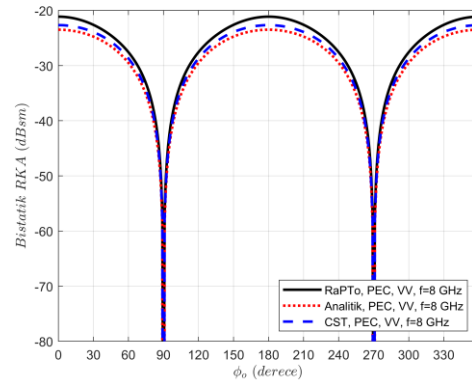
Şekil 5.1.3: Mükemmel iletken kürenin, **0.5 GHz** frekans kullanılarak, $r = 0.3 m$ ($\lambda/2$) boyutunda, dikey polarize ve $\theta_i = 180^\circ$ ve $\phi_i = 0^\circ$ gelen dalga açılarında, $\theta_o = 0^\circ \rightarrow 180^\circ$ 1’er derece aralıklarla ve $\phi_o = 120^\circ$ gözlem açılarındaki oluşan dikey polarize RKA Kartezyen grafiği



Şekil 5.1.5: Mükemmel iletken kürenin, **3 GHz** frekans kullanılarak, $r = 0.3 m$ (3λ) boyutunda, dikey polarize ve $\theta_i = 180^\circ$ ve $\phi_i = 0^\circ$ gelen dalga açılarında, $\theta_o = 0^\circ \rightarrow 180^\circ$ 1’er derece aralıklarla ve $\phi_o = 120^\circ$ gözlem açılarındaki oluşan dikey polarize RKA Kartezyen grafiği



Şekil 5.1.4: Mükemmel iletken kürenin, **1 GHz** frekans kullanılarak, $r = 0.3 m$ (λ) boyutunda, dikey polarize ve $\theta_i = 180^\circ$ ve $\phi_i = 0^\circ$ gelen dalga açılarında, $\theta_o = 0^\circ \rightarrow 180^\circ$ 1’er derece aralıklarla ve $\phi_o = 45^\circ$ gözlem açılarındaki oluşan dikey polarize RKA Kartezyen grafiği



Şekil 5.1.6: Mükemmel iletken kürenin, **8 GHz** frekans kullanılarak, $r = 0.0375 m$ (λ) boyutunda, dikey polarize ve $\theta_i = 180^\circ$ ve $\phi_i = 0^\circ$ gelen dalga açılarında, $\theta_o = 180^\circ$ ve $\phi_o = 0^\circ \rightarrow 359^\circ$ 1’er derece aralıklarla gözlem açılarındaki oluşan dikey polarize RKA Kartezyen grafiği

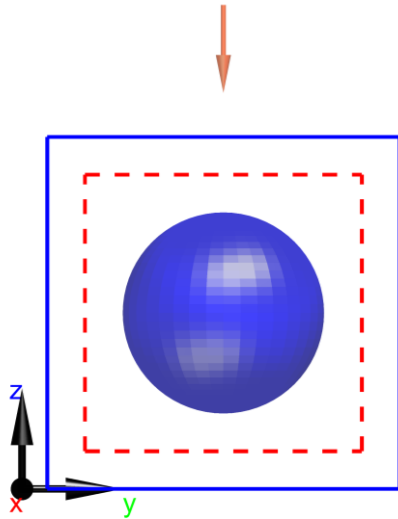
5.2. Frekans Dağıtıcı Malzeme ile Oluşturulmuş Kürenin RKA Sonuçları

5.2.1. Lorentz Modeli Sonuçları

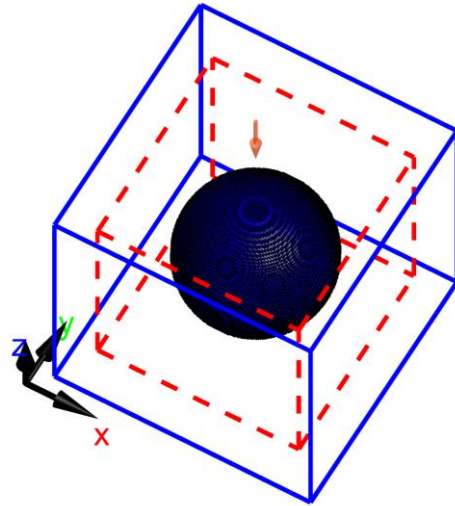
Lorentz modelinde öncelikle jenerik bir malzeme ile çalışılmıştır. Daha sonra altın ile çalışılmıştır. Son olarak gümüş ile çalışılmıştır.

5.2.1.1 Jenerik Lorentz Malzeme ile Oluşturulmuş Küre

Analizde kullanılan küre Şekil 5.2.1’de gösterilmiştir. Kürenin yanında x , y , z eksenlerini gösteren oklar, gelen dalga yönünü gösteren ok, problem uzayının sınırı ve aynı zamanda mükemmel uyumlu katmanın sınırı (mavi ve sürekli çizgi) ve toplam alan (içeride kalacak şekilde) ile saçılan alanın sınırı (kırmızı kesik çizgi) gösterilmiştir. Şekil 5.2.3’te kübik elemanlara dönüştürülmüş hali gösterilmiştir.



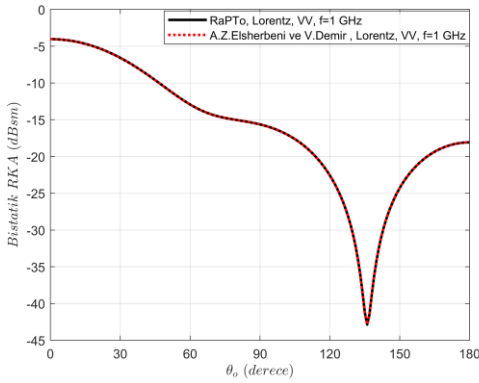
Şekil 5.2.1: Jenerik Lorentz Küre



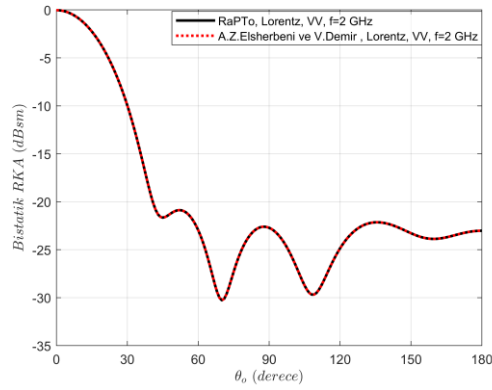
Şekil 5.2.2: Jenerik Lorentz Küre (Kübik form)

Lorentz modeli ile malzeme özelliği belirtilen ve malzeme özelliği [10]’dan alınan kürenin, $\epsilon_{\infty} = 2 F/m$, $\epsilon_s = 5 F/m$, $\omega = 4\pi \times 10^9 \text{ rad/s}$, $\delta = 2\pi \times 10^9 \text{ Hz}$ malzeme özelliklerinde, 1 GHz frekans kullanılarak, $r = 0.1 \text{ m}$ ($\lambda/3$) boyutunda, dikey polarize

ve $\theta_i = 0^\circ$ ve $\phi_i = 0^\circ$ gelen dalga açılarında, $\theta_o = 0^\circ \rightarrow 180^\circ$ 1'er derece aralıklarla ve $\phi_o = 0^\circ$ gözlem açılarında oluşan dikey polarize RKA değerleri hesaplanmıştır. Radar kesit alanı değerleri Şekil 5.2.3'te gösterilmiştir. Lorentz modeli ile malzeme özelliği belirtilen ve malzeme özelliği [10]'dan alınan kürenin, $\epsilon_\infty = 2 F/m$, $\epsilon_s = 5 F/m$, $\omega = 4\pi \times 10^9 \text{ rad/s}$, $\delta = 2\pi \times 10^9 \text{ Hz}$ malzeme özelliklerinde, 2 GHz frekans kullanılarak, $r = 0.1 \text{ m}$ ($2\lambda/3$) boyutunda, dikey polarize ve $\theta_i = 0^\circ$ ve $\phi_i = 0^\circ$ gelen dalga açılarında, $\theta_o = 0^\circ \rightarrow 180^\circ$ 1'er derece aralıklarla ve $\phi_o = 0^\circ$ gözlem açılarında oluşan dikey polarize RKA değerleri hesaplanmıştır. Radar kesit alanı değerleri Şekil 5.2.4'te gösterilmiştir.



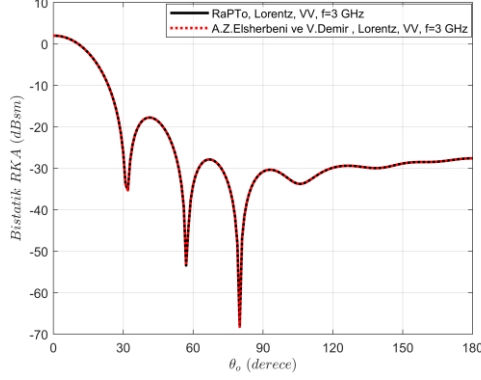
Şekil 5.2.3: Malzeme özelliği $\epsilon_\infty = 2 F/m$, $\epsilon_s = 5 F/m$, $\omega = 4\pi \times 10^9 \text{ rad/s}$, $\delta = 2\pi \times 10^9 \text{ Hz}$ olan kürenin, **1 GHz** frekans kullanılarak, $r = 0.1 \text{ m}$ ($\lambda/3$) boyutunda, dikey polarize ve $\theta_i = 0^\circ$ ve $\phi_i = 0^\circ$ gelen dalga açılarında, $\theta_o = 0^\circ \rightarrow 180^\circ$ 1'er derece aralıklarla ve $\phi_o = 0^\circ$ gözlem açılarında oluşan dikey polarize RKA Kartezyen grafiği



Şekil 5.2.4: Malzeme özelliği $\epsilon_\infty = 2 F/m$, $\epsilon_s = 5 F/m$, $\omega = 4\pi \times 10^9 \text{ rad/s}$, $\delta = 2\pi \times 10^9 \text{ Hz}$ olan kürenin, **2 GHz** frekans kullanılarak, $r = 0.1 \text{ m}$ ($2\lambda/3$) boyutunda, dikey polarize ve $\theta_i = 0^\circ$ ve $\phi_i = 0^\circ$ gelen dalga açılarında, $\theta_o = 0^\circ \rightarrow 180^\circ$ 1'er derece aralıklarla ve $\phi_o = 0^\circ$ gözlem açılarında oluşan dikey polarize RKA Kartezyen grafiği

Lorentz modeli ile malzeme özelliği belirtilen ve malzeme özelliği [10]'dan alınan kürenin, $\epsilon_\infty = 2 F/m$, $\epsilon_s = 5 F/m$, $\omega = 4\pi \times 10^9 \text{ rad/s}$, $\delta = 2\pi \times 10^9 \text{ Hz}$ malzeme özelliklerinde, 3 GHz frekans kullanılarak, $r = 0.1 \text{ m}$ (λ) boyutunda, dikey polarize ve $\theta_i = 0^\circ$ ve $\phi_i = 0^\circ$ gelen dalga açılarında, $\theta_o = 0^\circ \rightarrow 180^\circ$ 1'er derece aralıklarla ve

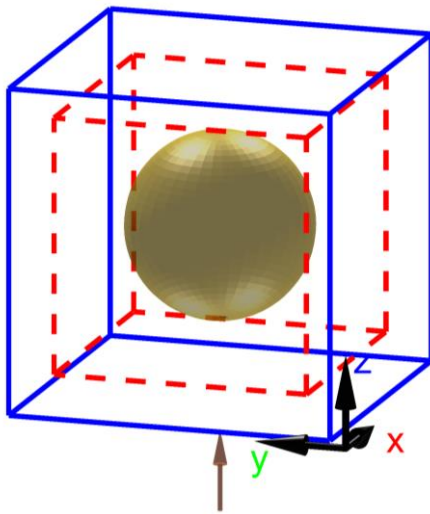
$\phi_o = 0^\circ$ gözlem açılarındaki oluşan dikey polarize RKA değerleri hesaplanmıştır. Radar kesit alanı değerleri Şekil 5.2.5'te gösterilmiştir.



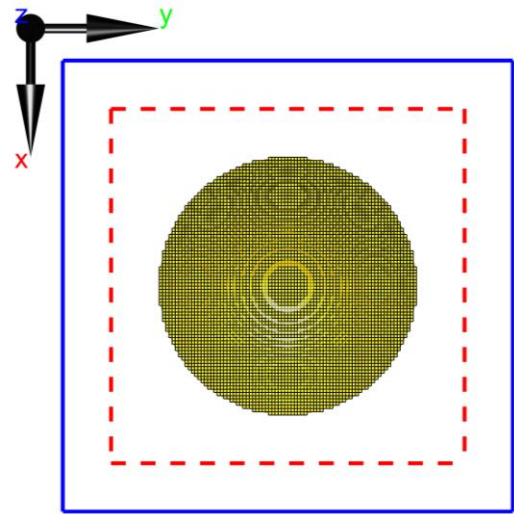
Şekil 5.2.5: Malzeme özelliği $\epsilon_\infty = 2 F/m$, $\epsilon_s = 5 F/m$, $\omega = 4\pi \times 10^9 \text{ rad/s}$, $\delta = 2\pi \times 10^9 \text{ Hz}$ olan kürenin, **3 GHz** frekans kullanılarak, $r = 0.1 \text{ m}$ (λ) boyutunda, dikey polarize ve $\theta_i = 0^\circ$ ve $\phi_i = 0^\circ$ gelen dalga açılarındaki, $\theta_o = 0^\circ \rightarrow 180^\circ$ 1'er derece aralıklarla ve $\phi_o = 0^\circ$ gözlem açılarındaki oluşan dikey polarize RKA Kartezyen grafiği

5.2.1.2 Altın ile Oluşturulmuş Küre

Analizde kullanılan küre Şekil 5.2.6'da gösterilmiştir. Kürenin yanında x , y , z eksenlerini gösteren oklar, gelen dalganın yönünü gösteren ok, problem uzayının sınırı ve aynı zamanda mükemmel uyumlu katmanın sınırı (mavi ve sürekli çizgi) ve toplam alan (içeride kalacak şekilde) ile saçılan alanın sınırı (kırmızı kesik çizgi) gösterilmiştir. Şekil 5.2.7'de kübik elemanlara dönüştürülmüş hali gösterilmiştir.

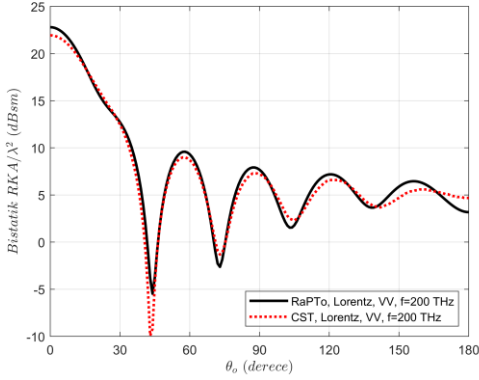


Şekil 5.2.6: Altın Küre

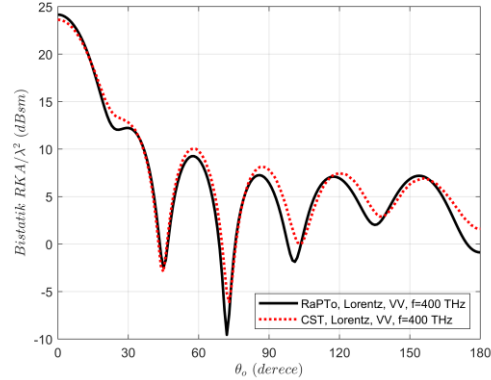


Şekil 5.2.7: Altın Küre (Kübik form)

Malzeme özelliği [50]'den alınan altın kürenin, $\epsilon_{\infty} = 22.3162 F/m$, $\epsilon_s = 2.03979 \times 10^8 F/m$, $\omega = 1.215 \times 10^{12} rad/s$, $\delta = 4.4183 \times 10^{13} Hz$ malzeme özelliklerinde, 200 THz frekans kullanılarak, $r = 1.5 \times 10^{-6} m (\lambda)$ boyutunda, dikey polarize ve $\theta_i = 180^\circ$ ve $\phi_i = 0^\circ$ gelen dalga açılarında, $\theta_o = 0^\circ \rightarrow 180^\circ$ 1'er derece aralıklarla ve $\phi_o = 0^\circ$ gözlem açılarında oluşan dikey polarize RKA değerleri hesaplanmıştır. Radar kesit alanı değerleri Şekil 5.2.8'de gösterilmiştir. Malzeme özelliği [50]'den alınan altın kürenin, $\epsilon_{\infty} = 22.3162 F/m$, $\epsilon_s = 2.03979 \times 10^8 F/m$, $\omega = 1.215 \times 10^{12} rad/s$, $\delta = 4.4183 \times 10^{13} Hz$ malzeme özelliklerinde, 400 THz frekans kullanılarak, $r = 7.5 \times 10^{-7} m (\lambda)$ boyutunda, dikey polarize ve $\theta_i = 180^\circ$ ve $\phi_i = 0^\circ$ gelen dalga açılarında, $\theta_o = 0^\circ \rightarrow 180^\circ$ 1'er derece aralıklarla ve $\phi_o = 0^\circ$ gözlem açılarında oluşan dikey polarize RKA değerleri hesaplanmıştır. Radar kesit alanı değerleri Şekil 5.2.9'da gösterilmiştir.



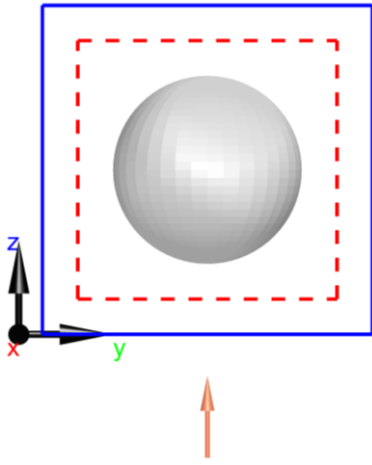
Şekil 5.2.8: Altın kürenin, $\epsilon_{\infty} = 22.3162 F/m$, $\epsilon_s = 2.03979 \times 10^8 F/m$, $\omega = 1.215 \times 10^{12} rad/s$, $\delta = 4.4183 \times 10^{13} Hz$ malzeme özelliklerinde, **200 THz** frekans kullanılarak, $r = 1.5 \times 10^{-6} m (\lambda)$ boyutunda, dikey polarize ve $\theta_i = 180^\circ$ ve $\phi_i = 0^\circ$ gelen dalga açılarında, $\theta_o = 0^\circ \rightarrow 180^\circ$ 1'er derece aralıklarla ve $\phi_o = 0^\circ$ gözlem açılarında oluşan dikey polarize normalize RKA Kartezyen grafiği



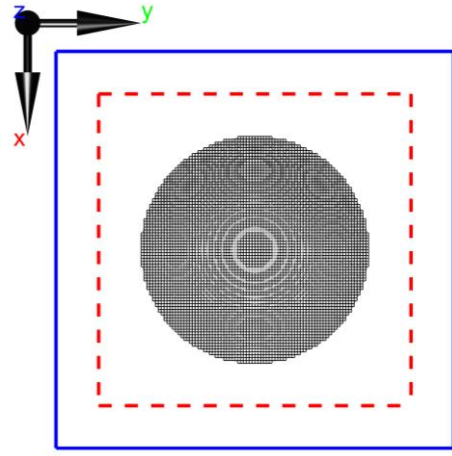
Şekil 5.2.9: Altın kürenin, $\epsilon_{\infty} = 22.3162 F/m$, $\epsilon_s = 2.03979 \times 10^8 F/m$, $\omega = 1.215 \times 10^{12} rad/s$, $\delta = 4.4183 \times 10^{13} Hz$ malzeme özelliklerinde, **400 THz** frekans kullanılarak, $r = 7.5 \times 10^{-7} m (\lambda)$ boyutunda, dikey polarize ve $\theta_i = 180^\circ$ ve $\phi_i = 0^\circ$ gelen dalga açılarında, $\theta_o = 0^\circ \rightarrow 180^\circ$ 1'er derece aralıklarla ve $\phi_o = 0^\circ$ gözlem açılarında oluşan dikey polarize normalize RKA Kartezyen grafiği

5.2.1.3 Gümüş ile Oluşturulmuş Küre

Analizde kullanılan küre Şekil 5.2.10'da gösterilmiştir. Kürenin yanında x , y , z eksenlerini gösteren oklar, gelen dalganın yönünü gösteren ok, problem uzayının sınırı ve aynı zamanda mükemmel uyumlu katmanın sınırı (mavi ve sürekli çizgi) ve toplam alan (içeride kalacak şekilde) ile saçılan alanın sınırı (kırmızı kesik çizgi) gösterilmiştir. Şekil 5.2.11'de kübik elemanlara dönüştürülmüş hali gösterilmiştir.

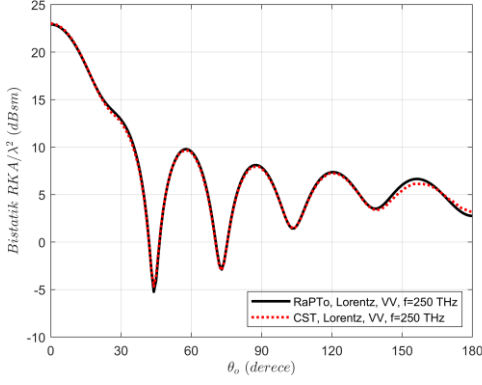


Şekil 5.2.10: Gümüş Küre

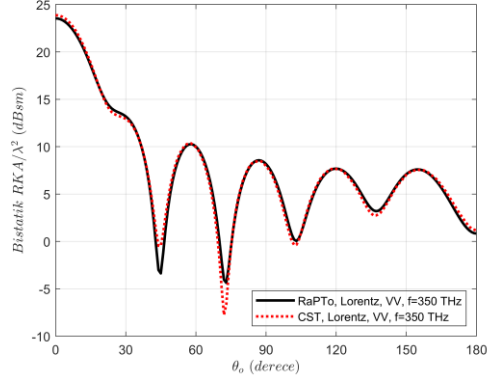


Şekil 5.2.11: Gümüş Küre (Kübik form)

Malzeme özelliği [50]'den alınan gümüş kürenin, $\epsilon_{\infty} = 4.2167F/m$, $\epsilon_s = 4.7982 \times 10^7 \times 10^8 F/m$, $\omega = 2.0254 \times 10^{12} rad/s$, $\delta = 1.4046 \times 10^{13} Hz$ malzeme özelliklerinde, 250 THz frekans kullanılarak, $r = 1.2 \times 10^{-6} m$ (λ) boyutunda, dikey polarize ve $\theta_i = 180^\circ$ ve $\phi_i = 0^\circ$ gelen dalga açılarında, $\theta_o = 0^\circ \rightarrow 180^\circ$ 1'er derece aralıklarla ve $\phi_o = 0^\circ$ gözlem açıları oluşmuş dikey polarize RKA değerleri hesaplanmıştır. Radar kesit alanı değerleri Şekil 5.2.12'de gösterilmiştir. Malzeme özelliği [50]'den alınan gümüş kürenin, $\epsilon_{\infty} = 4.2167F/m$, $\epsilon_s = 4.7982 \times 10^7 \times 10^8 F/m$, $\omega = 2.0254 \times 10^{12} rad/s$, $\delta = 1.4046 \times 10^{13} Hz$ malzeme özelliklerinde, 350 THz frekans kullanılarak, $r = 8.5717 \times 10^{-7} m$ (λ) boyutunda, dikey polarize ve $\theta_i = 180^\circ$ ve $\phi_i = 0^\circ$ gelen dalga açıları, $\theta_o = 0^\circ \rightarrow 180^\circ$ 1'er derece aralıklarla ve $\phi_o = 0^\circ$ gözlem açıları oluşmuş dikey polarize RKA değerleri hesaplanmıştır. Radar kesit alanı değerleri Şekil 5.2.13'te gösterilmiştir.



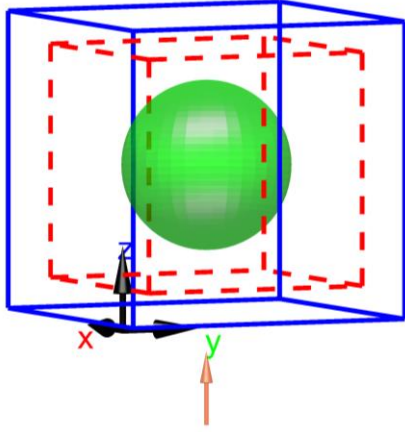
Şekil 5.2.12: Gümüş kürenin, $\epsilon_\infty = 4.2167F/m$, $\epsilon_s = 4.7982 \times 10^7 \times 10^8 F/m$, $\omega = 2.0254 \times 10^{12} \text{ rad/s}$, $\delta = 1.4046 \times 10^{13} \text{ Hz}$ malzeme özelliklerinde, **250 THz** frekans kullanılarak, $r = 1.2 \times 10^{-6} \text{ m}$ (λ) boyutunda, dikey polarize ve $\theta_i = 180^\circ$ ve $\phi_i = 0^\circ$ gelen dalga açıları, $\theta_o = 0^\circ \rightarrow 180^\circ$ 1'er derece aralıklarla ve $\phi_o = 0^\circ$ gözlem açıları oluşmuş dikey polarize normalize RKA Kartezyen grafiği



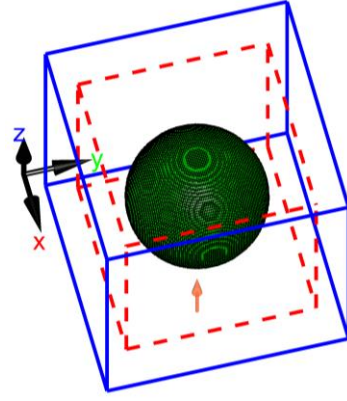
Şekil 5.2.13: Gümüş kürenin, $\epsilon_\infty = 4.2167F/m$, $\epsilon_s = 4.7982 \times 10^7 \times 10^8 F/m$, $\omega = 2.0254 \times 10^{12} \text{ rad/s}$, $\delta = 1.4046 \times 10^{13} \text{ Hz}$ malzeme özelliklerinde, **350 THz** frekans kullanılarak, $r = 8.5717 \times 10^{-7} \text{ m}$ (λ) boyutunda, dikey polarize ve $\theta_i = 180^\circ$ ve $\phi_i = 0^\circ$ gelen dalga açıları, $\theta_o = 0^\circ \rightarrow 180^\circ$ 1'er derece aralıklarla ve $\phi_o = 0^\circ$ gözlem açıları oluşmuş dikey polarize normalize RKA Kartezyen grafiği

5.2.2. Debye Modeli Sonuçları

Debye modelinde jenerik bir malzeme ile çalışılmıştır. Analizde kullanılan küre Şekil 5.2.14'te gösterilmiştir. Kürenin yanında x , y , z eksenlerini gösteren oklar, gelen dalganın yönünü gösteren ok, problem uzayının sınırı ve aynı zamanda mükemmel uyumlu katmanın sınırı (mavi ve sürekli çizgi) ve toplam alan (içeride kalacak şekilde) ile saçılan alanın sınırı (kırmızı kesik çizgi) gösterilmiştir. Şekil 5.2.15'te kübik elemanlara dönüştürülmüş hali gösterilmiştir. Debye modeli ile malzeme özelliği belirtilen ve malzeme özelliği [28]'den alınan kürenin, $\epsilon_\infty = 2 F/m$, $\epsilon_s = 4 F/m$, $\tau = 1 \times 10^{-9} \text{ s}$ malzeme özelliklerinde, 150 MHz frekans kullanılarak, $r = 2 \text{ m}$ (λ) boyutunda, dikey polarize ve $\theta_i = 180^\circ$ ve $\phi_i = 0^\circ$ gelen dalga açıları, $\theta_o = 0^\circ \rightarrow 180^\circ$ 1'er derece aralıklarla ve $\phi_o = 0^\circ$ gözlem açıları oluşmuş dikey polarize RKA değerleri hesaplanmıştır. Radar kesit alanı değerleri Şekil 5.2.16'da gösterilmiştir.

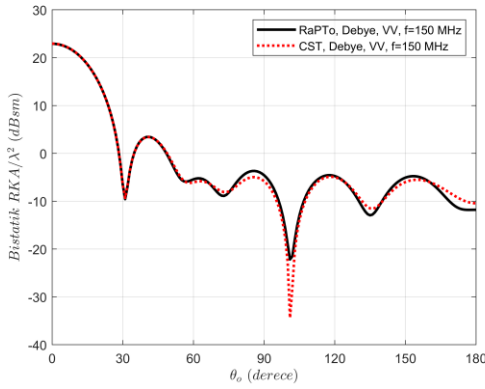


Şekil 5.2.14: Jenerik Debye Küre

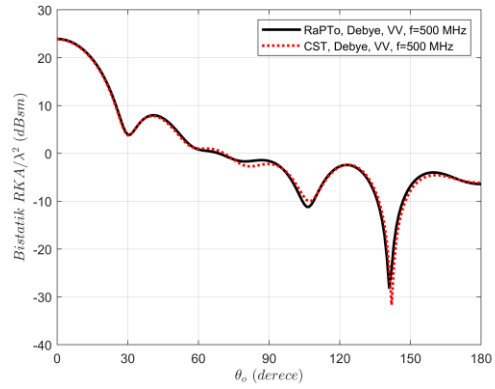


Şekil 5.2.15: Jenerik Debye Küre (Kübik form)

Debye modeli ile malzeme özelliği belirtilen ve malzeme özelliği [28]'den alınan kürenin, $\epsilon_{\infty} = 2 F/m$, $\epsilon_s = 4 F/m$, $\tau = 1 \times 10^{-9} s$ malzeme özelliklerinde, 500 MHz frekans kullanılarak, $r = 0.6 m (\lambda)$ boyutunda, dikey polarize ve $\theta_i = 180^\circ$ ve $\phi_i = 0^\circ$ gelen dalga açılarında, $\theta_o = 0^\circ \rightarrow 180^\circ$ 1'er derece aralıklarla ve $\phi_o = 0^\circ$ gözlem açılarında oluşan dikey polarize RKA değerleri hesaplanmıştır. Radar kesit alanı değerleri Şekil 5.2.17'de gösterilmiştir.



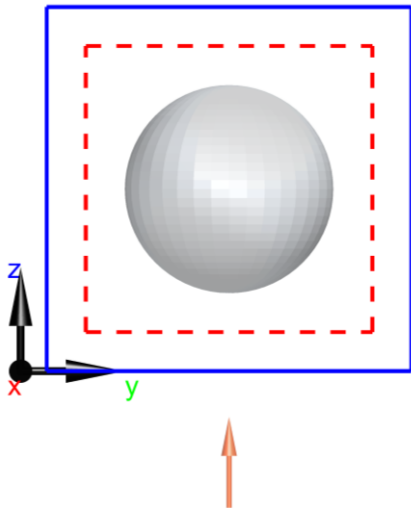
Şekil 5.2.16: Malzeme özelliği $\epsilon_{\infty} = 2 F/m$, $\epsilon_s = 4 F/m$, $\tau = 1 \times 10^{-9} s$ malzeme özelliklerinde, **150 MHz** frekans kullanılarak, $r = 2 m (\lambda)$ boyutunda, dikey polarize ve $\theta_i = 180^\circ$ ve $\phi_i = 0^\circ$ gelen dalga açılarında, $\theta_o = 0^\circ \rightarrow 180^\circ$ 1'er derece aralıklarla ve $\phi_o = 0^\circ$ gözlem açılarında oluşan dikey polarize normalize RKA Kartezyen grafiği



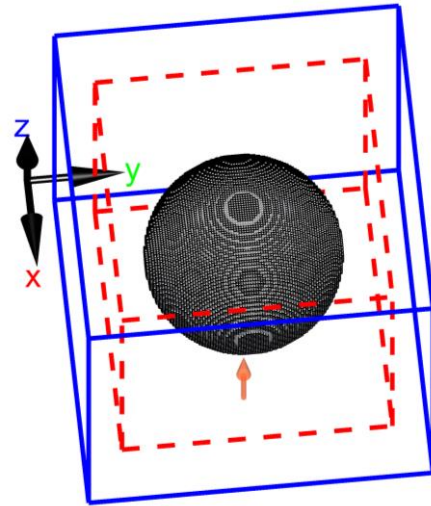
Şekil 5.2.17: Malzeme özelliği $\epsilon_{\infty} = 2 F/m$, $\epsilon_s = 4 F/m$, $\tau = 1 \times 10^{-9} s$ malzeme özelliklerinde, **500 MHz** frekans kullanılarak, $r = 0.6 m (\lambda)$ boyutunda, dikey polarize ve $\theta_i = 180^\circ$ ve $\phi_i = 0^\circ$ gelen dalga açılarında, $\theta_o = 0^\circ \rightarrow 180^\circ$ 1'er derece aralıklarla ve $\phi_o = 0^\circ$ gözlem açılarında oluşan dikey polarize normalize RKA Kartezyen grafiği

5.2.3. Drude Modeli Sonuçları

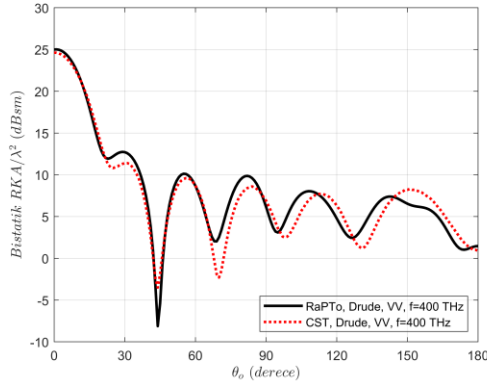
Drude modelinde Alüminyum ile çalışılmıştır. Analizde kullanılan küre Şekil 5.2.18’de gösterilmiştir. Kürenin yanında x , y , z eksenlerini gösteren oklar, gelen dalganın yönünü gösteren ok, problem uzayının sınırı ve aynı zamanda mükemmel uyumlu katmanın sınırı (mavi ve sürekli çizgi) ve toplam alan (içeride kalacak şekilde) ile saçılan alanın sınırı (kırmızı kesik çizgi) gösterilmiştir. Şekil 5.2.19’da kübik elemanlara dönüştürülmüş hali gösterilmiştir. Malzeme özelliği [51]’den alınan alüminyum kürenin, $\epsilon_{\infty} = 1 F/m$, $\omega = 2.0598 \times 10^{16} \text{ rad/s}$, $\gamma = 2.2876 \times 10^{14} \text{ Hz}$ malzeme özelliklerinde, 400 THz frekans kullanılarak, $r = 7.5 \times 10^{-7} \text{ m} (\lambda)$ boyutunda, dikey polarize ve $\theta_i = 180^\circ$ ve $\phi_i = 0^\circ$ gelen dalga açılarında, $\theta_o = 0^\circ \rightarrow 180^\circ$ 1’er derece aralıklarla ve $\phi_o = 0^\circ$ gözlem açılarında oluşan dikey polarize RKA değerleri hesaplanmıştır. Radar kesit alanı değerleri Şekil 5.2.20’de gösterilmiştir. Malzeme özelliği [51]’den alınan alüminyum kürenin, $\epsilon_{\infty} = 1 F/m$, $\omega = 2.0598 \times 10^{16} \text{ rad/s}$, $\gamma = 2.2876 \times 10^{14} \text{ Hz}$ malzeme özelliklerinde, 600 THz frekans kullanılarak, $r = 5 \times 10^{-7} \text{ m} (\lambda)$ boyutunda, dikey polarize ve $\theta_i = 180^\circ$ ve $\phi_i = 0^\circ$ gelen dalga açılarında, $\theta_o = 0^\circ \rightarrow 180^\circ$ 1’er derece aralıklarla ve $\phi_o = 0^\circ$ gözlem açılarında oluşan dikey polarize RKA değerleri hesaplanmıştır. Radar kesit alanı değerleri Şekil 5.2.21’de gösterilmiştir.



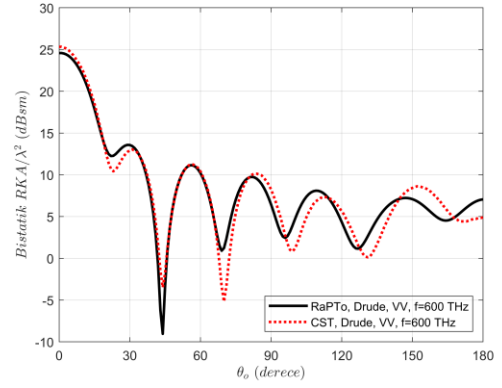
Şekil 5.2.18: Alüminyum Küre



Şekil 5.2.19: Alüminyum Küre (Kübik form)



Şekil 5.2.20: Alüminyum kürenin, $\epsilon_{\infty} = 1 F/m$, $\omega = 2.0598 \times 10^{16} \text{ rad/s}$, $\gamma = 2.2876 \times 10^{14} \text{ Hz}$ malzeme özelliklerinde, **400 THz** frekans kullanılarak, $r = 7.5 \times 10^{-7} \text{ m}$ (λ) boyutunda, dikey polarize ve $\theta_i = 180^\circ$ ve $\phi_i = 0^\circ$ gelen dalga açılarında, $\theta_o = 0^\circ \rightarrow 180^\circ$ 1'er derece aralıklarla ve $\phi_o = 0^\circ$ gözlem açılarında oluşan dikey polarize normalize RKA Kartezyen grafiği



Şekil 5.2.21: Alüminyum kürenin, $\epsilon_{\infty} = 1 F/m$, $\omega = 2.0598 \times 10^{16} \text{ rad/s}$, $\gamma = 2.2876 \times 10^{14} \text{ Hz}$ malzeme özelliklerinde, **600 THz** frekans kullanılarak, $r = 5 \times 10^{-7} \text{ m}$ (λ) boyutunda, dikey polarize ve $\theta_i = 180^\circ$ ve $\phi_i = 0^\circ$ gelen dalga açıları, $\theta_o = 0^\circ \rightarrow 180^\circ$ 1'er derece aralıklarla ve $\phi_o = 0^\circ$ gözlem açılarında oluşan dikey polarize normalize RKA Kartezyen grafiği

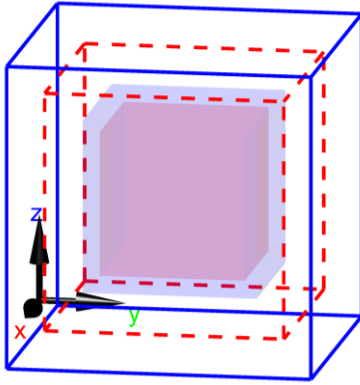
5.3. Drude Malzeme ile Kaplı Mükemmel İletken Kanonik Cisimlerin RKA Sonuçları

Bu bölümde, frekans dağıtıcı malzeme ile kaplanmış mükemmel iletken cisimlerin RKA analizi Drude modeli ile gerçekleştirilmiştir. Bunun için basit cisim olarak küp, küre ve levha kullanılmıştır. Öncelikle bistatik RKA analizi daha sonra monostatik RKA analizi yapılmıştır. Tüm sonuçlar CST ile karşılaştırılmıştır.

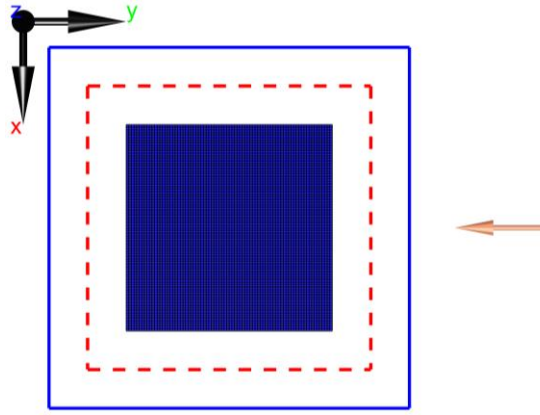
5.3.1. Drude Malzeme ile Kaplı Mükemmel İletken Kanonik Cisimlerin Bistatik RKA Sonuçları

5.3.1.1 Drude Malzeme ile Kaplı Mükemmel İletken Küp (Bistatik RKA)

Analizde kullanılan küp Şekil 5.3.1’de gösterilmiştir. Küpün kırmızı yüzeyi mükemmel iletken yüzey olduğu yeri gösterirken mavi olduğu kısım frekans dağıtıcı malzeme ile kaplı olduğu yeri göstermektedir. Küpün yanında x , y , z eksenlerini gösteren oklar, gelen dalganın yönünü gösteren ok, problem uzayının sınırı ve aynı zamanda mükemmel uyumlu katmanın sınırı (mavi ve sürekli çizgi) ve toplam alan (içeride kalacak şekilde) ile saçılan alanın sınırı (kırmızı kesik çizgi) gösterilmiştir. Şekil 5.3.2’de kübik elemanlara dönüştürülmüş hali gösterilmiştir.

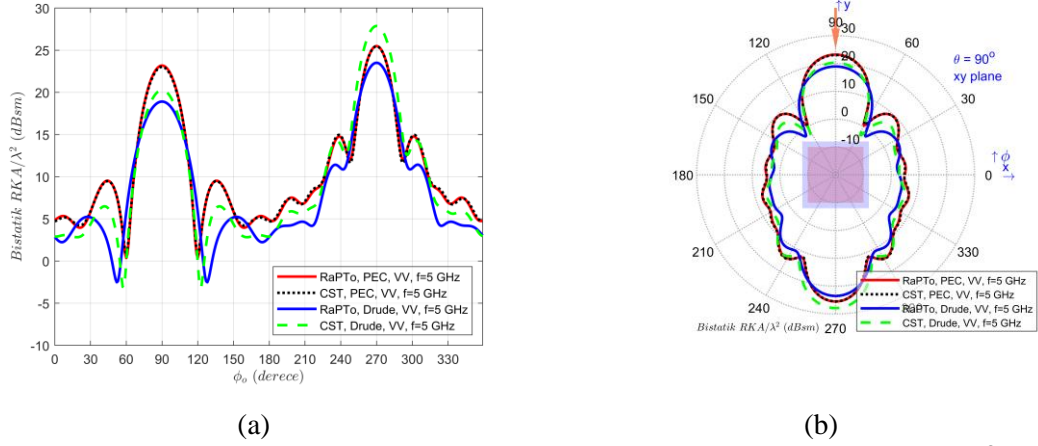


Şekil 5.3.1: Drude ile Kaplı İletken Küp



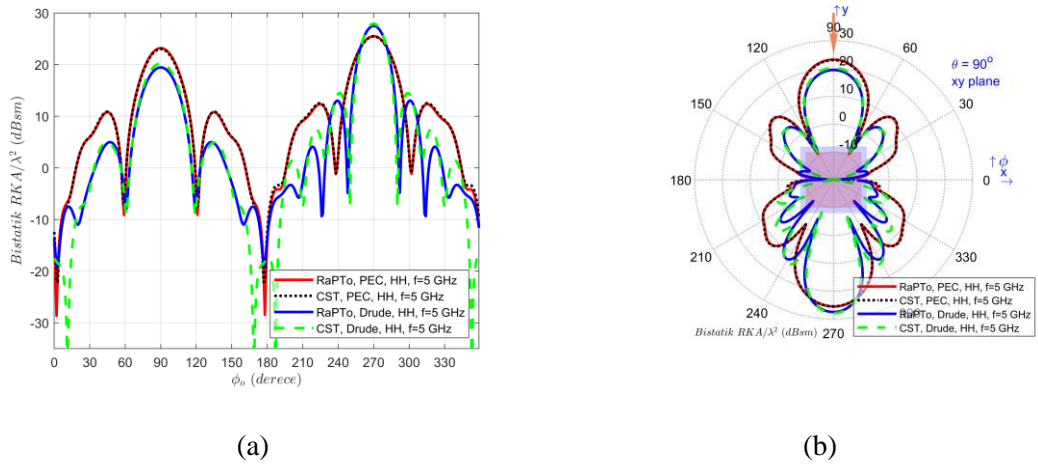
Şekil 5.3.2: Drude ile Kaplı İletken Küp (Kübik form)

Drude ile kaplı mükemmel iletken küpün, $\epsilon_\infty = 1$, $\omega = 20\pi \times 10^9 \text{ rad/s}$, $\gamma = 20 \times 10^9 \text{ Hz}$ frekans dağıtıcı malzeme özelliklerinde, 5 GHz frekans kullanılarak, $x, y, z = 0.12 \text{ m}$ (2λ) boyutunda, $d = 0.02 \text{ m}$ kaplama kalınlığında, dikey polarize ve $\theta_i = 90^\circ$ ve $\phi_i = 90^\circ$ gelen dalga açılarında, $\theta_o = 90^\circ$ ve $\phi_o = 0^\circ \rightarrow 359^\circ$ 1’er derece gözlem açılarında oluşan dikey polarize bistatik RKA değerleri hesaplanmıştır. Radar kesit alanı değerleri Şekil 5.3.3 (a)’da Kartezyen grafik, (b)’de polar grafikte gösterilmiştir.



Şekil 5.3.3: Drude ile kaplı mükemmel iletken küpün, $\epsilon_\infty = 1 F/m, \omega = 20\pi \times 10^9 \text{ rad/s}, \gamma = 20 \times 10^9 \text{ Hz}$ frekans dağıtıcı malzeme özelliklerinde, 5 GHz frekans kullanılarak, $x, y, z = 0.12 \text{ m} (2\lambda)$ boyutunda, $d = 0.02 \text{ m}$ kaplama kalınlığında, dikey polarize ve $\theta_i = 90^\circ$ ve $\phi_i = 90^\circ$ gelen dalga açılarında, $\theta_o = 90^\circ$ ve $\phi_o = 0^\circ \rightarrow 359^\circ$ 1'er derece gözlem açılarında oluşan dikey polarize bistatik normalize RKA (a) Kartezyen grafiği, (b) polar grafiği

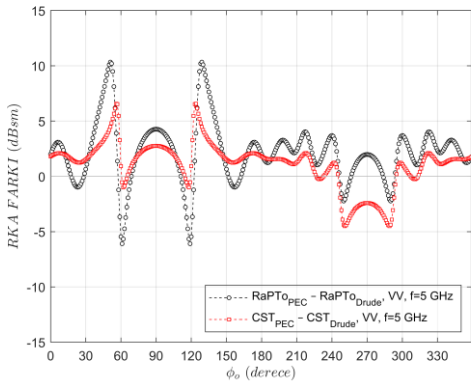
Drude ile kaplı mükemmel iletken küpün, $\epsilon_\infty = 1 F/m, \omega = 20\pi \times 10^9 \text{ rad/s}, \gamma = 20 \times 10^9 \text{ Hz}$ frekans dağıtıcı malzeme özelliklerinde, 5 GHz frekans kullanılarak, $x, y, z = 0.12 \text{ m} (2\lambda)$ boyutunda, $d = 0.02 \text{ m}$ kaplama kalınlığında, yatay polarize ve $\theta_i = 90^\circ$ ve $\phi_i = 90^\circ$ gelen dalga açılarında, $\theta_o = 90^\circ$ ve $\phi_o = 0^\circ \rightarrow 359^\circ$ 1'er derece gözlem açılarında oluşan yatay polarize bistatik RKA değerleri hesaplanmıştır. Radar kesit alanı değerleri Şekil 5.3.4 (a)'da Kartezyen grafik, (b)'de polar grafiklerle gösterilmiştir.



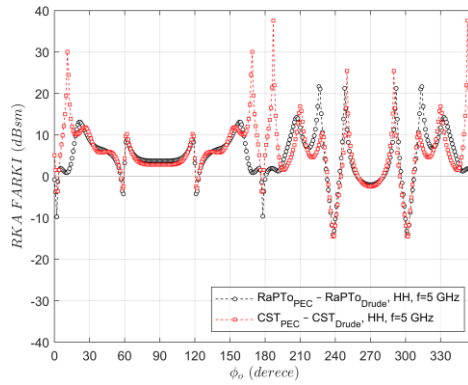
Şekil 5.3.4: Drude ile kaplı mükemmel iletken küpün, $\epsilon_\infty = 1 F/m, \omega = 20\pi \times 10^9 \text{ rad/s}, \gamma = 20 \times 10^9 \text{ Hz}$ frekans dağıtıcı malzeme özelliklerinde, 5 GHz frekans kullanılarak, $x, y, z = 0.12 \text{ m} (2\lambda)$ boyutunda, $d = 0.02 \text{ m}$ kaplama kalınlığında, yatay polarize ve $\theta_i =$

90° ve $\phi_i = 90^\circ$ gelen dalga açılarında, $\theta_o = 90^\circ$ ve $\phi_o = 0^\circ \rightarrow 359^\circ$ 1'er derece gözlem açılarındaki oluşan yatay polarize bistatik normalize RKA (a) Kartezyen grafiği, (b) polar grafiği

RKA değerinin azalıp arttığını daha iyi analiz edebilmek için Şekil 5.3.5 (a) ve (b)'de RKA FARKI (dBsm) grafiği oluşturulmuştur. Burada mükemmel iletken (PEC)'in RKA değeri ile Drude malzeme ile kaplama sonucunda oluşan RKA değeri birbirinden çıkarılmıştır. X eksenini gözlem açıları göstermektedir. Y ekseninde sıfırın üstünde kalan açılarda RKA değeri azalmış, sıfırın altında kalan açılarda RKA değeri artmış ve sıfır olduğu yerde RKA değeri değişmemiştir.



(a)

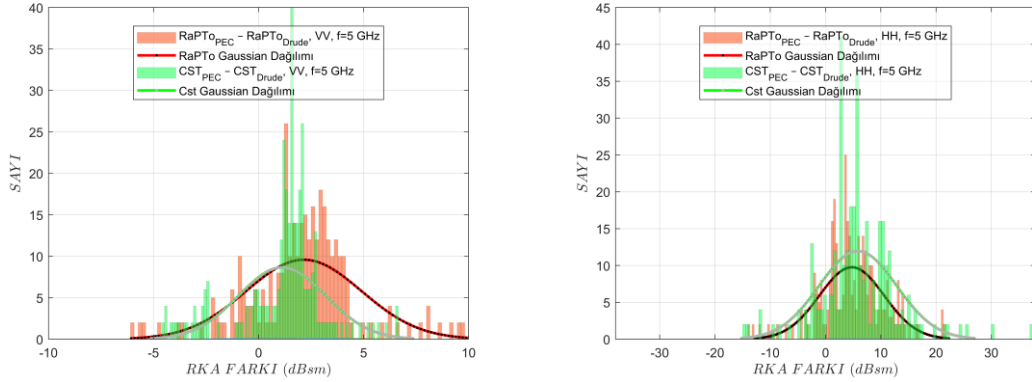


(b)

Şekil 5.3.5: Drude ile kaplı mükemmel iletken küpün, $\epsilon_\infty = 1$ F/m , $\omega = 20\pi \times 10^9$ rad/s , $\gamma = 20 \times 10^9$ Hz frekans dağıtıcı malzeme özelliklerinde, 5 GHz frekans kullanılarak, $x, y, z = 0.12$ m (2λ) boyutunda, $d = 0.02$ m kaplama kalınlığında, (a) dikey, (b) yatay polarize ve $\theta_i = 90^\circ$ ve $\phi_i = 90^\circ$ gelen dalga açılarındaki gözlem açılarındaki oluşan (a) dikey, (b) yatay polarize bistatik RKA farkı Kartezyen grafiği

RKA FARKI (dBsm) grafiğini daha anlaşılır yapabilmek için PEC ve Drude kaplaması sonucunda oluşan RKA farkı değerleriyle Şekil 5.3.6 (a) ve (b)'de gösterdiği gibi histogram grafiği oluşturulmuştur. X ekseninde sıfırın sağında kalan açılarda RKA değeri azalmış, sıfırın solunda kalan açılarda RKA değeri artmış ve sıfır olduğu yerde RKA değeri değişmemiştir. Y eksenini RKA farkının açılardaki miktarını belirtmektedir. Örneğin X ekseninde sıfır değerinde genlik (Y ekseninde) on olsun. Bunun anlamı on adet açıda RKA değeri değişmemiştir. Aynı grafikte histogram sütunlarını daha anlaşılır

yapmak için Normal (Gaussian) dağılımı eklenmiştir. Bu şekilde RKA değişiminin ortalaması ve RKA değişiminin ortalamasına göre ne kadar saptığı daha rahat görülmektedir.



(a)

(b)

Şekil 5.3.6: Drude ile kaplı mükemmel iletken küpün, $\epsilon_\infty = 1$, $F/m, \omega = 20\pi \times 10^9$ rad/s, $\gamma = 20 \times 10^9$ Hz frekans dağıtıcı malzeme özelliklerinde, 5 GHz frekans kullanılarak, $x, y, z = 0.12$ m (2λ) boyutunda, $d = 0.02$ m kaplama kalınlığında, (a) dikey, (b) yatay polarize ve $\theta_i = 90^\circ$ ve $\phi_i = 90^\circ$ gelen dalga açılarında, $\theta_o = 90^\circ$ ve $\phi_o = 0^\circ \rightarrow 359^\circ$ 1'er derece gözlem açılarındaki oluşan (a) dikey, (b) yatay polarize bistatik RKA farkı histogram grafiği

Analiz edecek olursak;

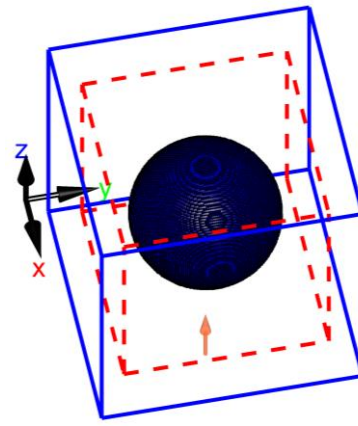
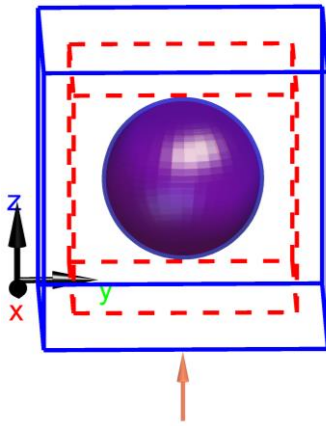
Küp çarpışma (collision) frekansı 20 GHz ve plazma frekansı $20\pi \times 10^9$ rad/s olan frekans bağımlı bir malzeme ile 0.02 m kalınlığında mükemmel iletken malzeme üzerine kaplanmıştır. Gelen dalga dikey polarize ve frekansının 5 GHz olduğu durumda, dikey RKA değerleri incelendiğinde 296 adet gözlem noktasında RKA değeri azalmıştır. Azalma miktarı 0.010467 ila 10.3373 dBsm aralığında ölçülmüştür. RKA azalması en çok 51. derecede en az 111. derecede gözlenmiştir. Ortalama RKA azalma miktarı 3.0095 dBsm'dir. RKA değerinin arttığı açı değerleri de olmuştur. RKA değeri 64 açıda artmıştır. Artış miktarı 0.097464 ila 6.0939 dBsm aralığında ölçülmüştür. RKA artışı en çok 119. derecede en az 256. derecede olmuştur. Ortalama RKA artış miktarı 1.784 dBsm'dir.

Gelen dalga yatay polarize ve frekansının 5 GHz olduğu durumda, yatay RKA değerleri incelendiğinde 301 adet gözlem noktasında RKA değeri azalmıştır. Azalma miktarı 0.39389 ila 21.646 dBsm aralığında ölçülmüştür. RKA azalması en çok 226. derecede en

az 258. derecede gözlenmiştir. Ortalama RKA azalma miktarı 6.4821 dBsm'dir. RKA değerinin arttığı açı değerleri de olmuştur. RKA değeri 59 açıda artmıştır. Artış miktarı 0.067747 ila 14.0613 dBsm aralığında ölçülmüştür. RKA artışı en çok 238. derecede en az 281. derecede olmuştur. Ortalama RKA artış miktarı 4.0893 dBsm'dir.

5.3.1.2 Drude Malzeme ile Kaplı Mükemmel İletken Küre (Bistatik RKA)

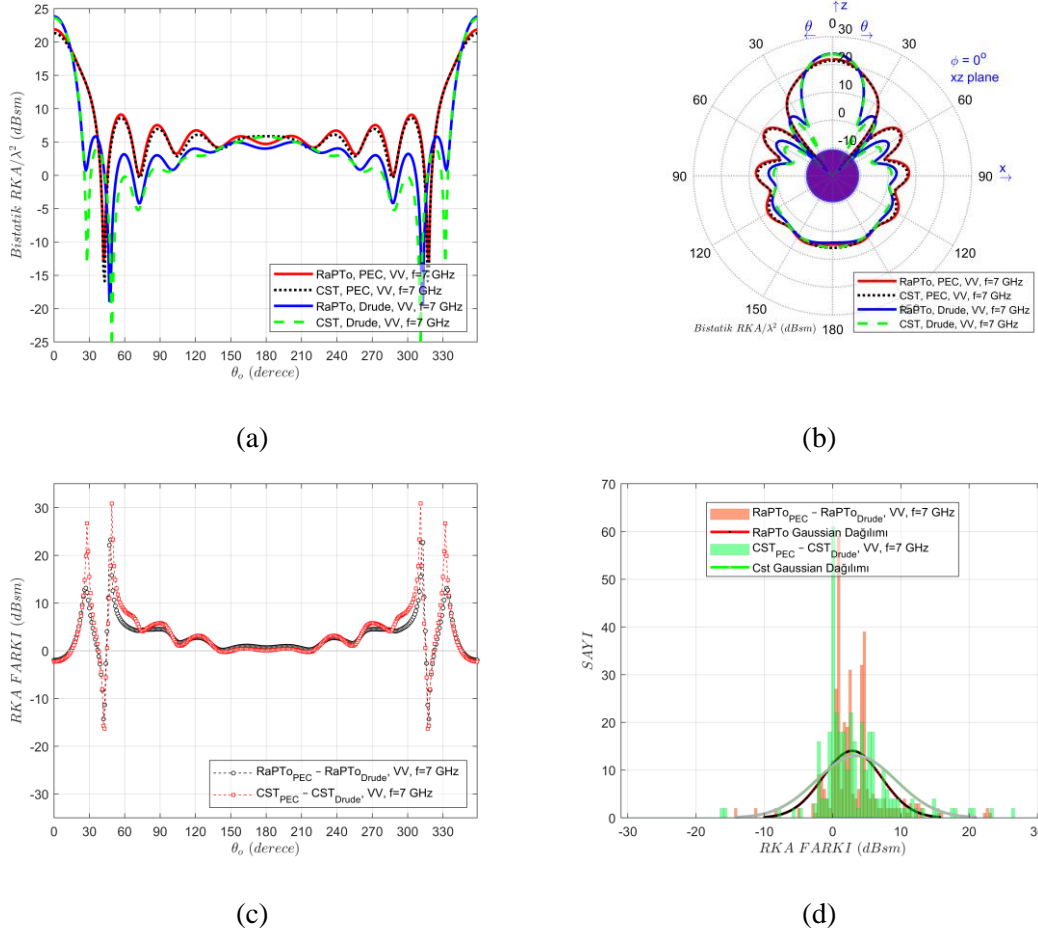
Analizde kullanılan küre Şekil 5.3.7'de gösterilmiştir. Küre kırmızı yüzeyi mükemmel iletken yüzey olduğu yeri gösterirken mavi olduğu kısım frekans dağıtıcı malzeme ile kaplı olduğu yeri göstermektedir. Kürenin yanında x , y , z eksenlerini gösteren oklar, gelen dalganın yönünü gösteren ok, problem uzayının sınırı ve aynı zamanda mükemmel uyumlu katmanın sınırı (mavi ve sürekli çizgi) ve toplam alan (içeride kalacak şekilde) ile saçılan alanın sınırı (kırmızı kesik çizgi) gösterilmiştir. Şekil 5.3.8'de kübik elemanlara dönüştürülmüş hali gösterilmiştir.



Şekil 5.3.7: Drude ile Kaplı İletken Küre **Şekil 5.3.8:** Drude ile Kaplı İletken Küre (Kübik form)

Drude ile kaplı mükemmel iletken küre, $\epsilon_{\infty} = 1$ F/m , $\omega = 20\pi \times 10^9$ rad/s , $\gamma = 20 \times 10^9$ Hz frekans dağıtıcı malzeme özelliklerinde, 7 GHz frekans kullanılarak, $r = 0.0429$ m (λ) boyutunda, $d = 0.0021$ m kaplama kalınlığında, dikey polarize ve $\theta_i = 180^\circ$ ve $\phi_i = 0^\circ$ gelen dalga açılarında, $\theta_o = 0^\circ \rightarrow 359^\circ$ 1'er derece aralıklarla ve $\phi_o = 0^\circ$ gözlem açılarında oluşan dikey polarize bistatik RKA değerleri hesaplanmıştır.

Radar kesit alanı değerleri Şekil 5.3.9 (a) Kartezyen grafik (b) polar grafik ile gösterilmiştir. RKA farkına ait değerler (c) Kartezyen, (d) histogram grafiği ile gösterilmiştir.



Şekil 5.3.9: Drude ile kaplı mükemmel iletken küre, $\epsilon_{\infty} = 1$, $\omega = 20\pi \times 10^9$ rad/s, $\gamma = 20 \times 10^9$ Hz frekans dağıtıcı malzeme özelliklerinde, 7 GHz frekans kullanılarak, $r = 0.0429$ m (λ) boyutunda, $d = 0.0021$ m kaplama kalınlığında, dikey polarize ve $\theta_i = 180^\circ$ ve $\phi_i = 0^\circ$ gelen dalga açıları, $\theta_o = 0^\circ \rightarrow 359^\circ$ 1'er derece aralıklarla ve $\phi_o = 0^\circ$ gözlem açıları, oluşan dikey polarize bistatik normalize RKA (a) Kartezyen, (b) polar grafiği, RKA farkı (c) Kartezyen, (d) histogram grafiği

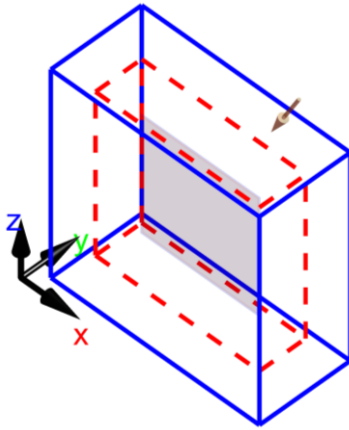
Analiz edecek olursak;

Küre çarpışma frekansı 20 GHz ve plazma frekansı $20\pi \times 10^9$ rad/s olan frekans bağımlı bir malzeme ile 0.0021 m kalınlığında mükemmel iletken malzeme üzerine kaplanmıştır. Gelen dalga dikey polarize ve frekansının 7 GHz olduğu durumda, RKA değerleri

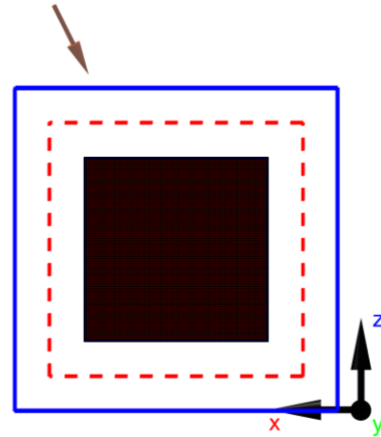
incelendiğinde 319 adet gözlem noktasında RKA değeri azalmıştır. Azalma miktarı 0.043344 ila 23.2793 dBsm aralığında ölçülmüştür. RKA azalması en çok 48. derecede en az 14. derecede gözlenmiştir. Ortalama RKA azalma miktarı 3.6412 dBsm'dir. RKA değerinin arttığı açı değerleri de olmuştur. RKA değeri 41 açıda artmıştır. Artış miktarı 0.31549 ila 14.3029 dBsm aralığında ölçülmüştür. RKA artışı en çok 318. derecede en az 347. derecede olmuştur. Ortalama RKA artış miktarı 3.1527 dBsm'dir.

5.3.1.3 Drude Malzeme ile Kaplı Mükemmel İletken Levha (Bistatik RKA)

Analizde kullanılan levha Şekil 5.3.10'da gösterilmiştir. Levha kırmızı yüzeyi mükemmel iletken yüzey olduğu yeri gösterirken mavi olduğu kısım frekans dağıtıcı malzeme ile kaplı olduğu yeri göstermektedir. Levhanın yanında x , y , z eksenlerini gösteren oklar, gelen dalganın yönünü gösteren ok, problem uzayının sınırı ve aynı zamanda mükemmel uyumlu katmanın sınırı (mavi ve sürekli çizgi) ve toplam alan (içeride kalacak şekilde) ile saçılan alanın sınırı (kırmızı kesik çizgi) gösterilmiştir. Şekil 5.3.11'de kübik elemanlara dönüştürülmüş hali gösterilmiştir.



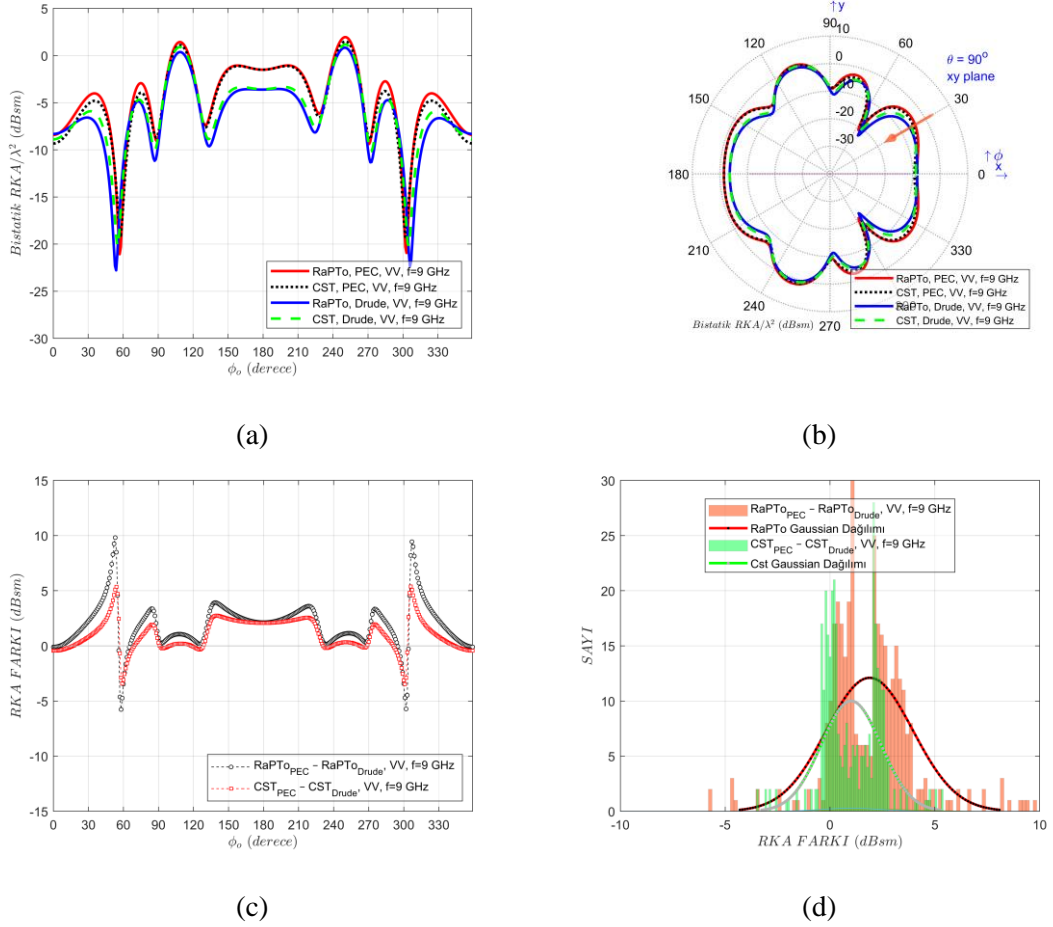
Şekil 5.3.10: Drude ile Kaplı İletken Levha



Şekil 5.3.11: Drude ile Kaplı İletken Levha (Kübik form)

Drude ile kaplı mükemmel iletken levha, $\epsilon_{\infty} = 1$ F/m, $\omega = 20\pi \times 10^9$ rad/s, $\gamma = 20 \times 10^9$ Hz frekans dağıtıcı malzeme özelliklerinde, 9 GHz frekans kullanılarak, $x, z =$

0.0666 m (2λ) boyutunda, $d = 0.0022$ m kaplama kalınlığında, dikey polarize ve $\theta_i = 30^\circ$ ve $\phi_i = 30^\circ$ gelen dalga açılarında, $\theta_o = 90^\circ$ ve $\phi_o = 0^\circ \rightarrow 359^\circ$ 1'er derece gözlem açılarında oluşan dikey polarize bistatik RKA değerleri hesaplanmıştır. Radar kesit alanı değerleri Şekil 5.3.12 (a) Kartezyen grafik (b) polar grafik ile gösterilmiştir. RKA farkına ait değerler (c) Kartezyen, (d) histogram grafiği ile gösterilmiştir.



Şekil 5.3.12: Drude ile kaplı mükemmel iletken levha, $\epsilon_\infty = 1$ F/m , $\omega = 20\pi \times 10^9$ rad/s , $\gamma = 20 \times 10^9$ Hz frekans dağıtıcı malzeme özelliklerinde, 9 GHz frekans kullanılarak, $x, z = 0.0666$ m (2λ) boyutunda, $d = 0.0022$ m kaplama kalınlığında, dikey polarize ve $\theta_i = 30^\circ$ ve $\phi_i = 30^\circ$ gelen dalga açılarında, $\theta_o = 90^\circ$ ve $\phi_o = 0^\circ \rightarrow 359^\circ$ 1'er derece gözlem açılarında oluşan dikey polarize bistatik normalize RKA (a) Kartezyen, (b) polar grafiği, RKA farkı (c) Kartezyen, (d) histogram grafiği

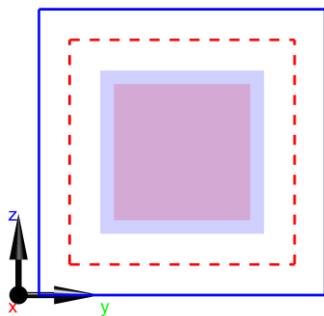
Analiz edecek olursak;

Levha çarpışma (collision) frekansı 20 GHz ve plazma frekansı $20\pi \times 10^9$ rad/s olan frekans bağımlı bir malzeme ile 0.0022 m kalınlığında mükemmel iletken malzeme üzerine kaplanmıştır. Gelen dalga frekansının 9 GHz olduğu durumda, RKA değerleri incelendiğinde 329 adet gözlem noktasında RKA değeri azalmıştır. Azalma miktarı 0.018864 ila 9.8176 dBsm aralığında ölçülmüştür. RKA azalması en çok 53. derecede en az 6. derecede gözlenmiştir. Ortalama RKA azalma miktarı 2.2186 dBsm'dir. RKA değerinin arttığı açı değerleri de olmuştur. RKA değeri 31 açıda artmıştır. Artış miktarı 0.01073 ila 5.7648 dBsm aralığında ölçülmüştür. RKA artışı en çok 58. derecede en az 355. derecede olmuştur. Ortalama RKA artış miktarı 1.5999 dBsm'dir.

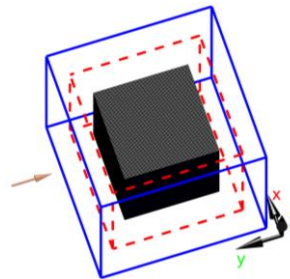
5.3.2. Drude Malzeme ile Kaplı Mükemmel İletken Kanonik Cisimlerin Monostatik RKA Sonuçları

5.3.2.1 Drude Malzeme ile Kaplı Mükemmel İletken Küp (Monostatik RKA)

Analizde kullanılan küp Şekil 5.3.13'te gösterilmiştir. Küpün kırmızı yüzeyi mükemmel iletken yüzey olduğu yeri gösterirken mavi olduğu kısım frekans dağıtıcı malzeme ile kaplı olduğu yeri göstermektedir. Küpün yanında x , y , z eksenlerini gösteren oklar, gelen dalganın yönünü gösteren ok, problem uzayının sınırı ve aynı zamanda mükemmel uyumlu katmanın sınırı (mavi ve sürekli çizgi) ve toplam alan (içeride kalacak şekilde) ile saçılan alanın sınırı (kırmızı kesik çizgi) gösterilmiştir. Şekil 5.3.14'te kübik elemanlara dönüştürülmüş hali gösterilmiştir.

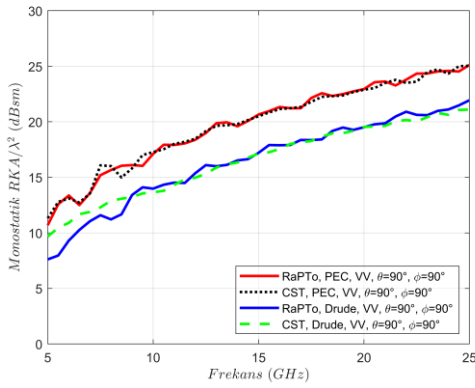


Şekil 5.3.13: Drude ile Kaplı İletken Küp

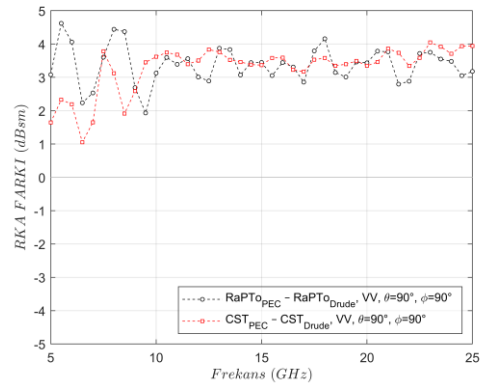


Şekil 5.3.14: Drude ile Kaplı İletken Küp (Kübik form)

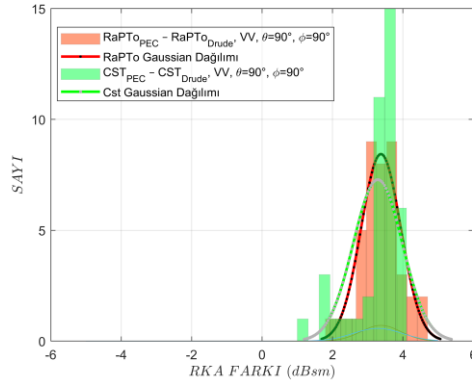
Drude ile kaplı mükemmel iletken küpün, $\epsilon_{\infty} = 1 F/m$, $\omega = 20\pi \times 10^9 \text{ rad/s}$, $\gamma = 20 \times 10^9 \text{ Hz}$ frekans dağıtıcı malzeme özelliklerinde, $5 \rightarrow 25 \text{ GHz}$ frekans bandında 0.5 GHz 'lik adımla, $x, y, z = 0.06 \text{ m}$ boyutunda, $d = 0.01 \text{ m}$ kaplama kalınlığında, dikey polarize ve $\theta_{i,o} = 90^\circ$ ve $\phi_{i,o} = 90^\circ$ gelen dalga ve gözlem açılarında oluşan dikey polarize monostatik RKA değerleri hesaplanmıştır. Radar kesit alanı değerleri Şekil 5.3.15 (a) Kartezyen grafik ile gösterilmiştir. RKA farkına ait değerler (b) Kartezyen, (c) histogram grafiği ile gösterilmiştir.



(a)



(b)



(c)

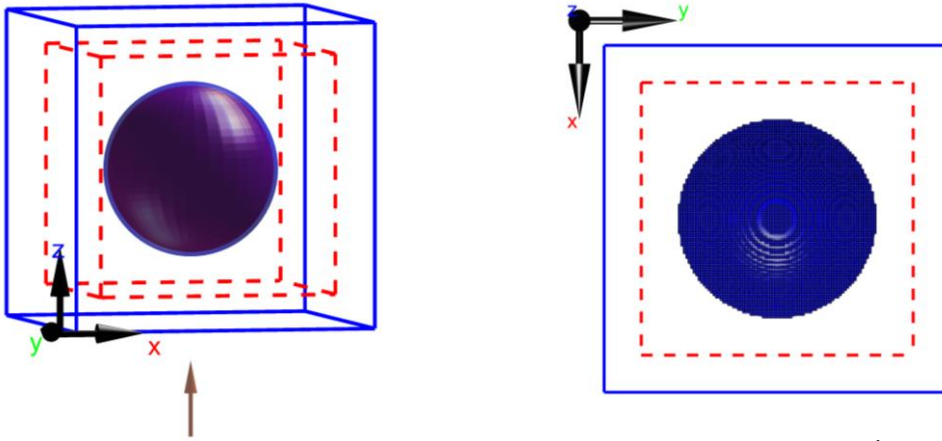
Şekil 5.3.15: Drude ile kaplı mükemmel iletken küpün, $\epsilon_{\infty} = 1 F/m$, $\omega = 20\pi \times 10^9 \text{ rad/s}$, $\gamma = 20 \times 10^9 \text{ Hz}$ frekans dağıtıcı malzeme özelliklerinde, $5 \rightarrow 25 \text{ GHz}$ frekans bandında 0.5 GHz 'lik adımla, $x, y, z = 0.06 \text{ m}$ boyutunda, $d = 0.01 \text{ m}$ kaplama kalınlığında, dikey polarize ve $\theta_{i,o} = 90^\circ$ ve $\phi_{i,o} = 90^\circ$ gelen dalga ve gözlem açılarında oluşan dikey polarize monostatik normalize RKA (a) Kartezyen, RKA farkı (b) Kartezyen, (c) histogram grafiği

Analiz edecek olursak;

Küp çarpışma (collision) frekansı 20 GHz ve plazma frekansı $20\pi \times 10^9$ rad/s olan frekans bağımlı bir malzeme ile 0.01 m kalınlığında mükemmel iletken malzeme üzerine kaplanmıştır. RKA değeri 41 adet frekans değerinde azalmıştır. Azalma en çok 5.5 GHz'de gerçekleşmiştir. Bu değer 4.6209 dBsm'dir. Ortalama RKA değeri 5 GHz ila 25 GHz aralığında düşmüştür. Bu değer 3.3764 dBsm olarak ölçülmüştür.

5.3.2.2 Drude Malzeme ile Kaplı Mükemmel İletken Küre (Monostatik RKA)

Analizde kullanılan küre Şekil 5.3.16'da gösterilmiştir. Kürenin kırmızı yüzeyi mükemmel iletken yüzey olduğu yeri gösterirken mavi olduğu kısım frekans dağıtıcı malzeme ile kaplı olduğu yeri göstermektedir. Kürenin yanında x , y , z eksenlerini gösteren oklar, gelen dalganın yönünü gösteren ok, problem uzayının sınırı ve aynı zamanda mükemmel uyumlu katmanın sınırı (mavi ve sürekli çizgi) ve toplam alan (içeride kalacak şekilde) ile saçılan alanın sınırı (kırmızı kesik çizgi) gösterilmiştir. Şekil 5.3.17'de kübik elemanlara dönüştürülmüş hali gösterilmiştir.

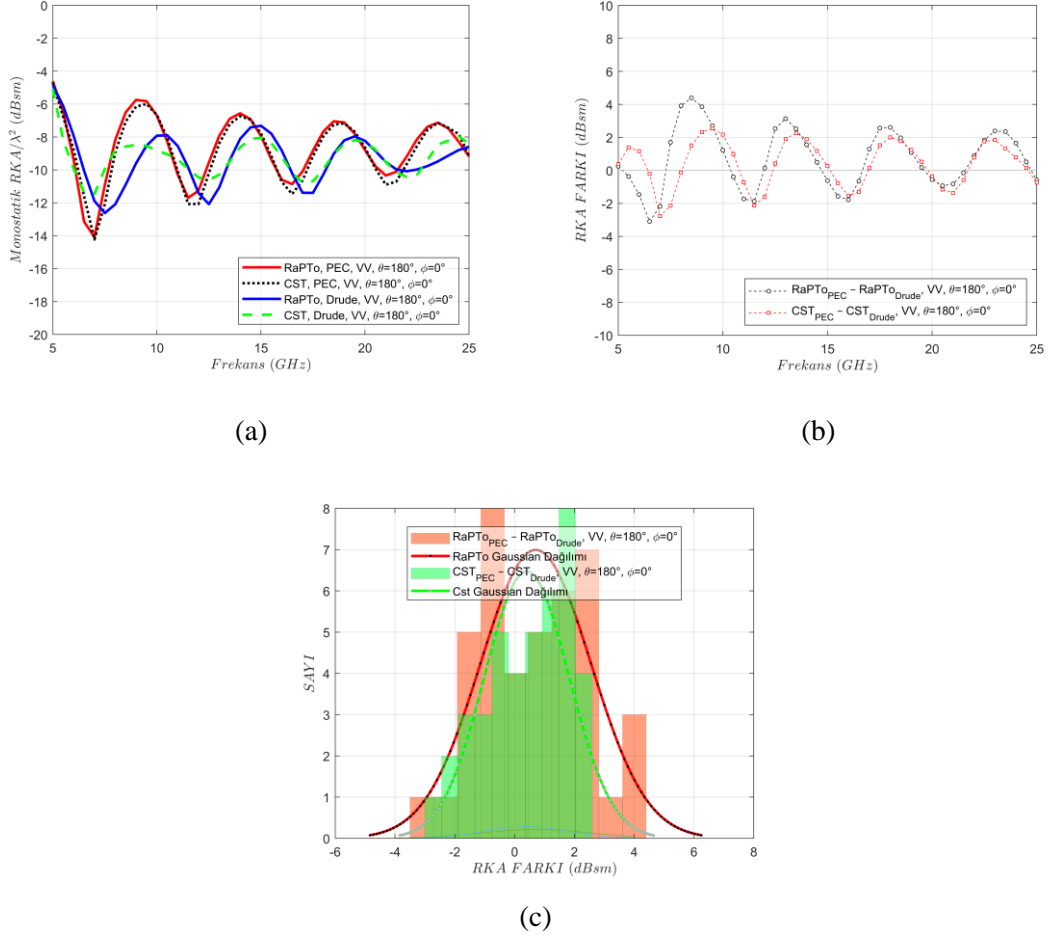


Şekil 5.3.16: Drude ile Kaplı İletken Küre

Şekil 5.3.17: Drude ile Kaplı İletken Küre (Kübik form)

Drude ile kaplı mükemmel iletken kürenin, $\epsilon_\infty = 1$ F/m, $\omega = 20\pi \times 10^9$ rad/s, $\gamma = 20 \times 10^9$ Hz frekans dağıtıcı malzeme özelliklerinde, 5 → 25 GHz frekans bandında 0.5 GHz'lik adımla, $r = 0.012$ m boyutunda, $d = 0.0006$ m kaplama kalınlığında, dikey

polarize ve $\theta_{i,o} = 180^\circ$ ve $\phi_{i,o} = 0^\circ$ gelen dalga ve gözlem açılarındaki oluşan dikey polarize monostatik RKA değerleri hesaplanmıştır. Radar kesit alanı değerleri Şekil 5.3.18 (a) Kartezyen grafik ile gösterilmiştir. RKA farkına ait değerler (b) Kartezyen, (c) histogram grafiği ile gösterilmiştir.



Şekil 5.3.18: Drude ile kaplı mükemmel iletken kürenin, $\epsilon_\infty = 1$ F/m , $\omega = 20\pi \times 10^9$ rad/s , $\gamma = 20 \times 10^9$ Hz frekans dağıtıcı malzeme özelliklerinde, $5 \rightarrow 25$ GHz frekans bandında 0.5 GHz 'lik adımla, $r = 0.012$ m boyutunda, $d = 0.0006$ m kaplama kalınlığında, dikey polarize ve $\theta_{i,o} = 180^\circ$ ve $\phi_{i,o} = 0^\circ$ gelen dalga ve gözlem açılarındaki oluşan dikey polarize monostatik normalize RKA (a) Kartezyen, RKA farkı (b) Kartezyen, (c) histogram grafiği

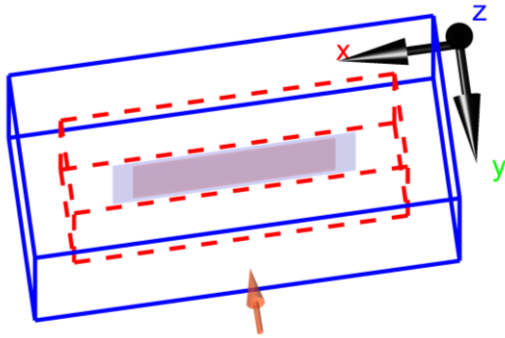
Analiz edecek olursak;

Küre çarpışma (collision) frekansı 20 GHz ve plazma frekansı $20\pi \times 10^9$ rad/s olan frekans bağımlı bir malzeme ile 0.0006 m kalınlığında mükemmel iletken malzeme üzerine kaplanmıştır. RKA değeri 16 adet frekans değerinde artmıştır. Artış en çok 6.5 GHz 'de

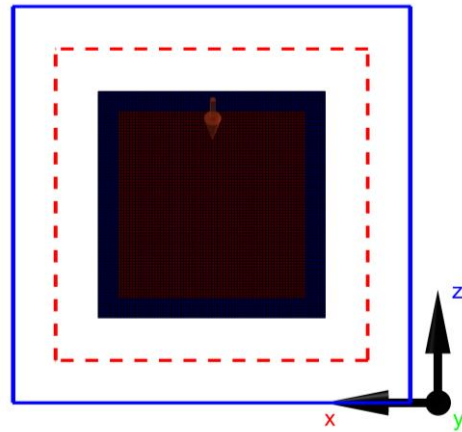
gerçekleşmiştir. Bu değer 3.0928 dBsm'dir. Ortalama RKA değeri 5 GHz ila 25 GHz aralığında düşmüştür. Bu değer 0.70737 dBsm olarak ölçülmüştür.

5.3.2.3 Drude Malzeme ile Kaplı Mükemmel İletken Levha (Monostatik RKA)

Analizde kullanılan levha Şekil 5.3.19'da gösterilmiştir. Levhanın kırmızı yüzeyi mükemmel iletken yüzey olduğu yeri gösterirken mavi olduğu kısım frekans dağıtıcı malzeme ile kaplı olduğu yeri göstermektedir. Levhanın yanında x , y , z eksenlerini gösteren oklar, gelen dalga yönünü gösteren ok, problem uzayının sınırı ve aynı zamanda mükemmel uyumlu katmanın sınırı (mavi ve sürekli çizgi) ve toplam alan (içeride kalacak şekilde) ile saçılan alanın sınırı (kırmızı kesik çizgi) gösterilmiştir. Şekil 5.3.20'de kübik elemanlara dönüştürülmüş hali gösterilmiştir.



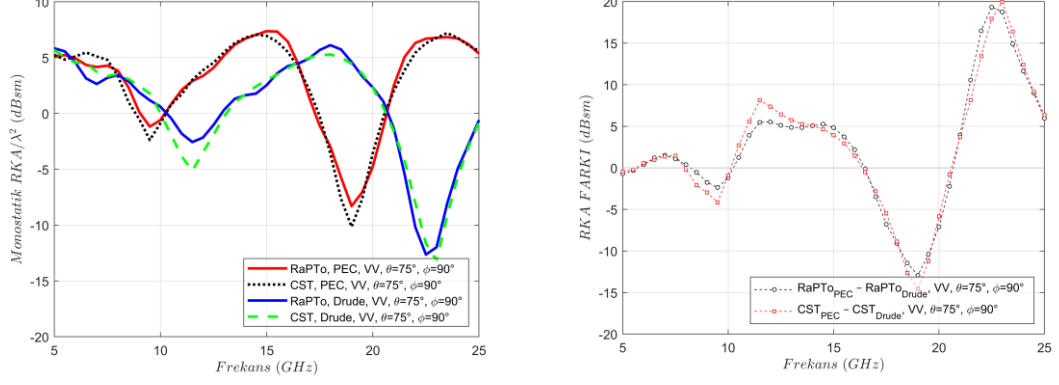
Şekil 5.3.19: Drude ile Kaplı İletken Levha



Şekil 5.3.20: Drude ile Kaplı İletken Levha (Kübik form)

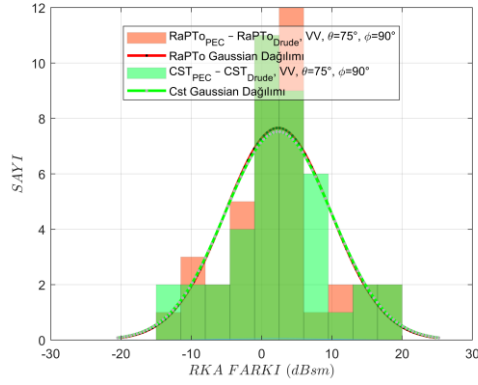
Drude ile kaplı mükemmel iletken levhanın, $\epsilon_{\infty} = 1 F/m$, $\omega = 20\pi \times 10^9 rad/s$, $\gamma = 20 \times 10^9 Hz$ frekans dağıtıcı malzeme özelliklerinde, $5 \rightarrow 25 GHz$ frekans bandında $0.5 GHz$ 'lik adımla, $x, z = 0.06 m$ boyutunda, $d = 0.01 m$ kaplama kalınlığında, dikey polarize ve $\theta_{i,o} = 75^\circ$ ve $\phi_{i,o} = 90^\circ$ gelen dalga ve gözlem açılarında oluşan dikey polarize monostatik RKA değerleri hesaplanmıştır. Radar kesit alanı değerleri Şekil

5.3.21 (a) Kartezyen grafik ile gösterilmiştir. RKA farkına ait değerler (b) Kartezyen, (c) histogram grafiği ile gösterilmiştir.



(a)

(b)



(c)

Şekil 5.3.21: Drude ile kaplı mükemmel iletken levhanın, $\epsilon_\infty = 1$ F/m , $\omega = 20\pi \times 10^9$ rad/s , $\gamma = 20 \times 10^9$ Hz frekans dağıtıcı malzeme özelliklerinde, $5 \rightarrow 25$ GHz frekans bandında 0.5 GHz 'lik adımla, $x, z = 0.06$ m boyutunda, $d = 0.01$ m kaplama kalınlığında, dikey polarize ve $\theta_{i,o} = 75^\circ$ ve $\phi_{i,o} = 90^\circ$ gelen dalga ve gözlem açılarında oluşan dikey polarize monostatik normalize RKA (a) Kartezyen, RKA farkı (b) Kartezyen, (c) histogram grafiği

Analiz edecek olursak;

Levha çarpışma (collision) frekansı 20 GHz ve plazma frekansı $20\pi \times 10^9$ rad/s olan frekans bağımlı bir malzeme ile 0.06 m kalınlığında mükemmel iletken malzeme üzerine kaplanmıştır. RKA değeri 26 adet frekans değerinde azalmıştır. En çok azalma 22.5 GHz 'de gerçekleşmiştir. Bu değer 19.3373 $dBsm$ 'dir. RKA değeri 15 adet frekans değerinde artmıştır. En çok artış 19 GHz 'de gerçekleşmiştir. Bu değer 12.914 $dBsm$ 'dir.

Ortalama RKA değeri 5 GHz ila 25 GHz aralığında düşmüştür. Bu değer 2.3624 dBsm olarak ölçülmüştür.

5.4. Drude Malzeme ile Kaplı Mükemmel İletken Karmaşık Cisimlerin RKA Sonuçları

Drude malzeme ile kaplı mükemmel iletken kanonik cisimlerin hem bistatik hem de monostatik RKA analizi yapıldıktan sonra karmaşık cisimlerin analizi yapılmıştır. Bistatik RKA analizi kısmında yüzde birine ölçeklendirilmiş F-177 Nighthawk uçağı kullanılırken monostatik RKA analizinde yine yüzde birine ölçeklendirilmiş F-16 Fighting Falcon uçağı kullanılmıştır. RaPTo sonuçları öncelikle CST ile alınan sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Daha sonra sadece RaPTo sonuçları kullanılarak kaplama kalınlığının ve çarpışma frekansının bistatik RKA üzerindeki etkisini anlayabilmek amacıyla karşılaştırmalar yapılmıştır. Karşılaştırmalar sonucunda çeşitli yorumlar ve istatistiksel analizler türetilmiş ve bu kazanımlardan son bölümde bahsedilmiştir.

5.4.1. Drude Malzeme ile Kaplı Mükemmel İletken F-117 Nighthawk Uçağının Bistatik RKA Sonuçları

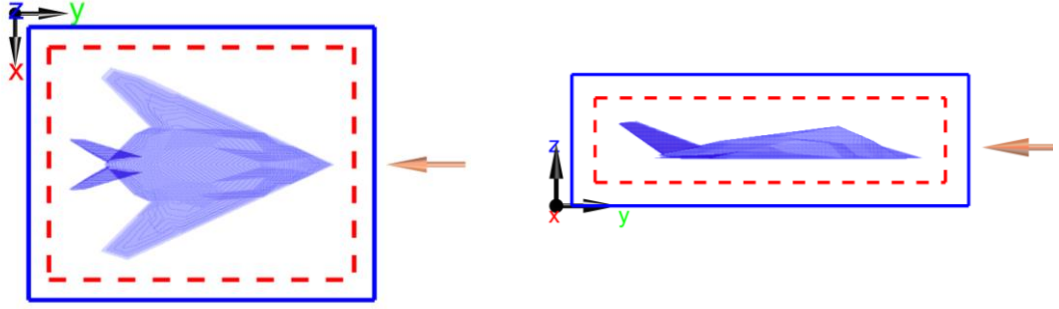
F-117'nin kaplamasına ait frekans dağıtıcı malzemenin, çarpışma frekansı ve kaplama kalınlığı değiştirilerek bistatik RKA değişimi analiz edilmiştir.

5.4.1.1 Kaplama Kalınlığı 0.1 mm ve Çarpışma Frekansı 10 GHz olan F-117

Analizde kullanılan F-117 Şekil 5.4.1'de kübik elemanlar formunda gösterilmiştir. Küpün kırmızı yüzeyi mükemmel iletken yüzey olduğu yeri gösterirken mavi olduğu kısım frekans dağıtıcı malzeme ile kaplı olduğu yeri göstermektedir. F-117'nin yanında x , y , z eksenlerini gösteren oklar, gelen dalganın yönünü gösteren ok, problem uzayının sınırı ve aynı zamanda mükemmel uyumlu katmanın sınırı (mavi ve sürekli çizgi) ve

toplam alan (içeride kalacak şekilde) ile saçılan alanın sınırı (kırmızı kesik çizgi) gösterilmiştir.

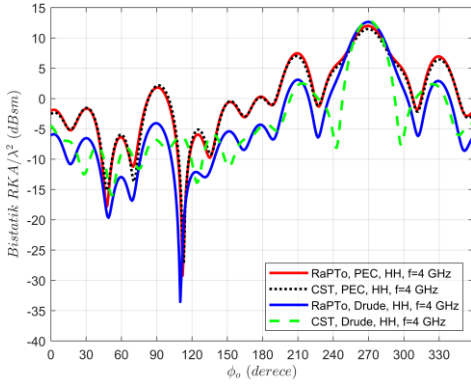
Drude ile kaplı mükemmel iletken F-117, $\epsilon_{\infty} = 1$ F/m , $\omega = 20\pi \times 10^9$ rad/s , $\gamma = 10 \times 10^9$ Hz frekans dağıtıcı malzeme özelliklerinde, aşağıdaki belirtilen frekans değerlerinde kullanılarak, $x = 14.23, y = 19.65, z = 2.381$ cm boyutunda, $d = 0.1$ mm kaplama kalınlığında, yatay polarize ve $\theta_i = 90^\circ$ ve $\phi_i = 90^\circ$ gelen dalga açılarında, $\theta_o = 90^\circ$ ve $\phi_o = 0^\circ \rightarrow 359^\circ$ 1'er derece gözlem açılarında oluşan yatay polarize bistatik RKA değerleri hesaplanmıştır.



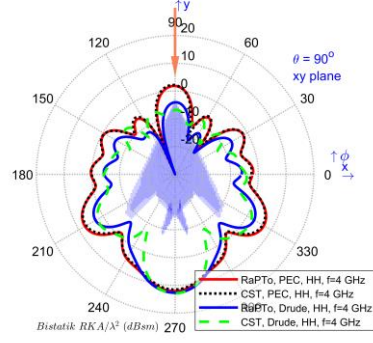
Şekil 5.4.1: Kaplama Kalınlığı 0.1 mm ve Çarpışma Frekansı 10 GHz olan F-117

1. Operasyon Frekansı 4 GHz iken;

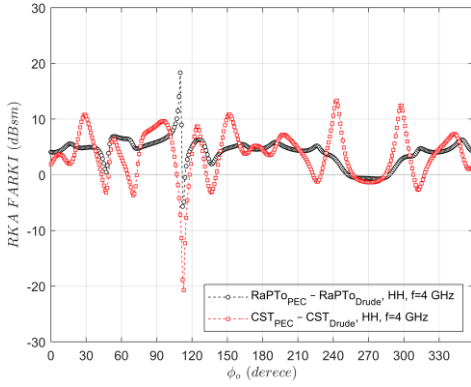
RKA değerleri Şekil 5.4.2 (a) Kartezyen grafik (b) polar grafik ile gösterilmiştir. RKA farkına ait değerler (c) Kartezyen, (d) histogram grafiği ile gösterilmiştir.



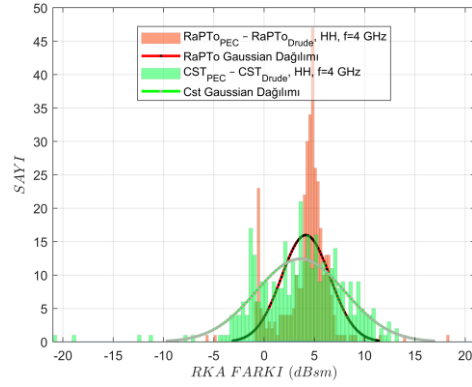
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 5.4.2: Drude ile kaplı mükemmel iletken F-117, $\epsilon_{\infty} = 1$, $\omega = 20\pi \times 10^9$ rad/s, $\gamma = 10 \times 10^9$ Hz frekans dağıtıcı malzeme özelliklerinde, 4 GHz frekans kullanılarak, $x = 14.23$, $y = 19.65$, $z = 2.381$ cm boyutunda, $d = 0.1$ mm kaplama kalınlığında, yatay polarize ve $\theta_i = 90^\circ$ ve $\phi_i = 90^\circ$ gelen dalga açılarında, $\theta_o = 90^\circ$ ve $\phi_o = 0^\circ \rightarrow 359^\circ$ 1'er derece gözlem açılarında oluşan yatay polarize bistatik normalize RKA (a) Kartezyen, (b) polar grafiği, RKA farkı (c) Kartezyen, (d) histogram grafiği

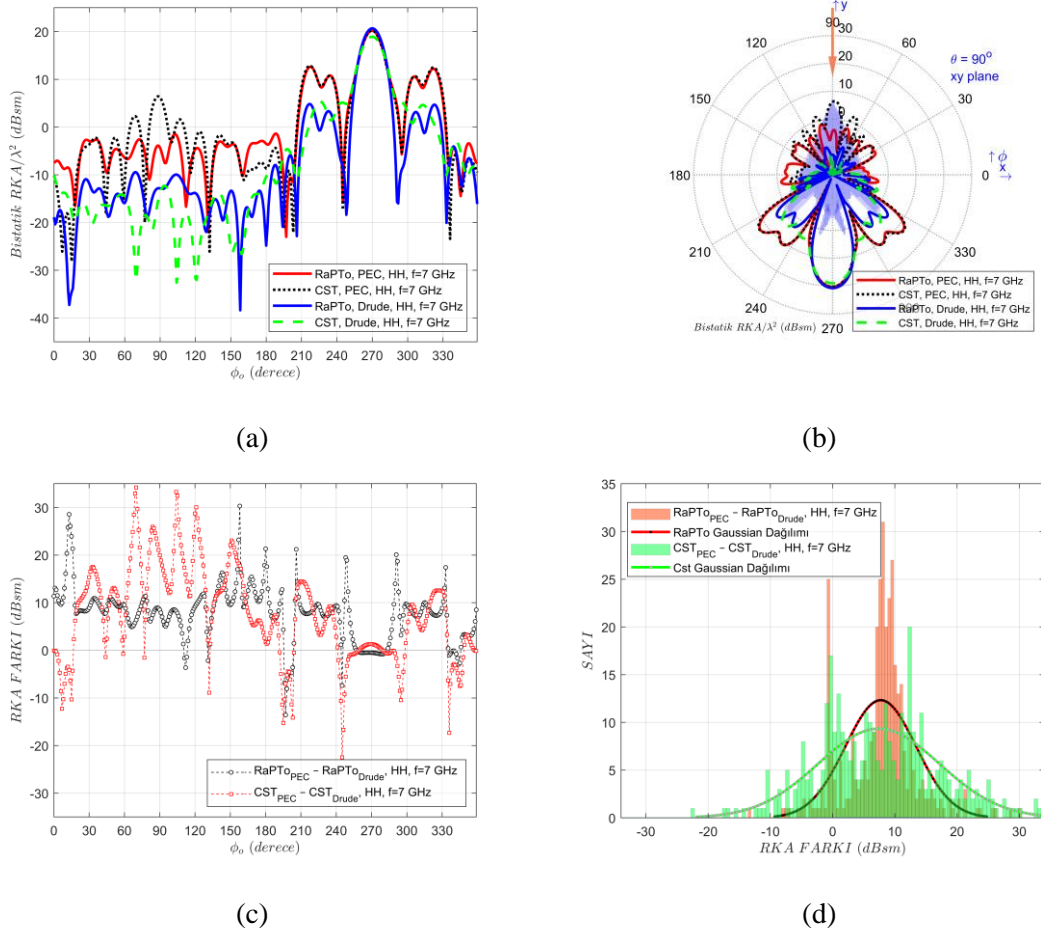
Analiz edecek olursak;

F-117 çarpışma frekansı 10 GHz ve plazma frekansı $20\pi \times 10^9$ rad/s olan frekans bağımlı bir malzeme ile 0.1 mm kalınlığında mükemmel iletken malzeme üzerine kaplanmıştır. Gelen dalga polarizasyonunun yatay ve frekansının 4 GHz olduğu durumda, yatay polarize RKA değerleri incelendiğinde 322 adet gözlem noktasında RKA değeri azalmıştır. Azalma miktarı 0.073593 ila 18.3418 dBsm aralığında ölçülmüştür. RKA azalması en çok 110. derecede en az 288. derecede gözlenmiştir. Ortalama RKA azalma miktarı 4.7289 dBsm'dir. RKA değerinin arttığı açı değerleri de olmuştur. RKA değeri 38 açıda artmıştır. Artış miktarı 0.07883 ila 5.6861 dBsm aralığında ölçülmüştür. RKA artışı

en çok 112. derecede en az 253. derecede olmuştur. Ortalama RKA artış miktarı 0.79726 dBsm'dir.

2. Operasyon Frekansı 7 GHz iken;

Radar kesit alanı değerleri Şekil 5.4.3 (a) Kartezyen grafik (b) polar grafik ile gösterilmiştir. RKA farkına ait değerler (c) Kartezyen, (d) histogram grafiği ile gösterilmiştir.



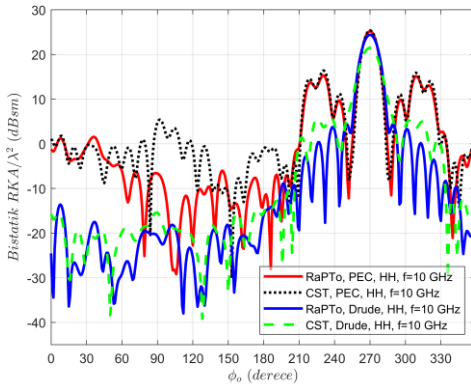
Şekil 5.4.3: Drude ile kaplı mükemmel iletken F-117, $\epsilon_\infty = 1$ F/m , $\omega = 20\pi \times 10^9$ rad/s , $\gamma = 10 \times 10^9$ Hz frekans dağıtıcı malzeme özelliklerinde, 7 GHz frekans kullanılarak, $x = 14.23$, $y = 19.65$, $z = 2.381$ cm boyutunda, $d = 0.1$ mm kaplama kalınlığında, yatay polarize ve $\theta_i = 90^\circ$ ve $\phi_i = 90^\circ$ gelen dalga açılarında, $\theta_o = 90^\circ$ ve $\phi_o = 0^\circ \rightarrow 359^\circ$ 1'er derece gözlem açılarındaki oluşan yatay polarize bistatik normalize RKA (a) Kartezyen, (b) polar grafiği, RKA farkı (c) Kartezyen, (d) histogram grafiği

Analiz edecek olursak;

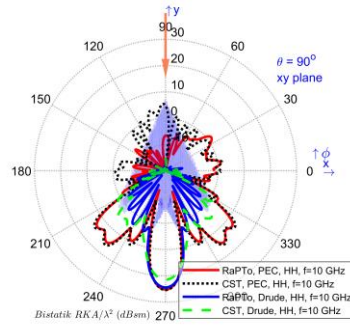
F-117 çarpışma frekansı 10 GHz ve plazma frekansı $20\pi \times 10^9$ rad/s olan frekans bağımlı bir malzeme ile 0.1 mm kalınlığında mükemmel iletken malzeme üzerine kaplanmıştır. Gelen dalga polarizasyonunun yatay ve frekansının 7 GHz olduğu durumda, RKA değerleri incelendiğinde 311 adet gözlem noktasında RKA değeri azalmıştır. Azalma miktarı 0.07381 ila 30.3111 dBsm aralığında ölçülmüştür. RKA azalması en çok 158. derecede en az 257. derecede gözlenmiştir. Ortalama RKA azalma miktarı 9.2538 dBsm'dir. RKA değerinin arttığı açı değerleri de olmuştur. RKA değeri 49 açıda artmıştır. Artış miktarı 0.093402 ila 13.5791 dBsm aralığında ölçülmüştür. RKA artışı en çok 197. derecede en az 340. derecede olmuştur. Ortalama RKA artış miktarı 1.8924 dBsm'dir.

3. Operasyon Frekansı 10 GHz iken;

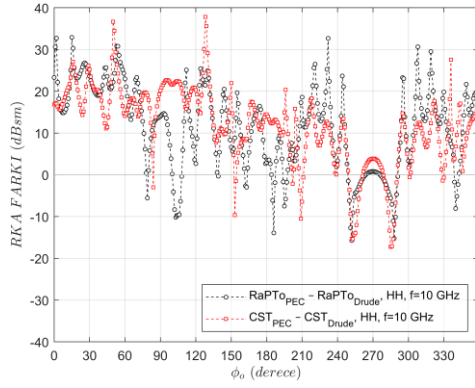
Radar kesit alanı değerleri Şekil 5.4.4 (a) Kartezyen grafik (b) polar grafik ile gösterilmiştir. RKA farkına ait değerler (c) Kartezyen, (d) histogram grafiği ile gösterilmiştir.



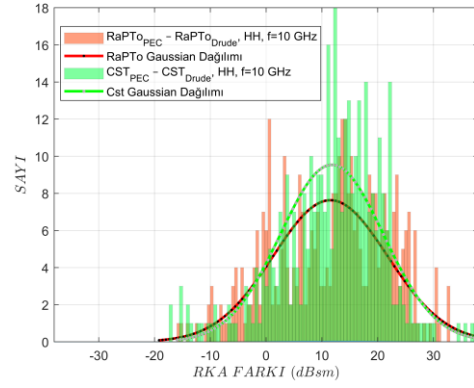
(a)



(b)



(c)



(d)

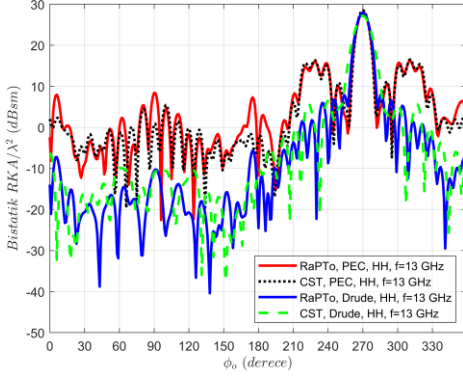
Şekil 5.4.4: Drude ile kaplı mükemmel iletken F-117, $\epsilon_{\infty} = 1$ F/m , $\omega = 20\pi \times 10^9$ rad/s , $\gamma = 10 \times 10^9$ Hz frekans dağıtıcı malzeme özelliklerinde, 10 GHz frekans kullanılarak, $x = 14.23$, $y = 19.65$, $z = 2.381$ cm boyutunda, $d = 0.1$ mm kaplama kalınlığında, yatay polarize ve $\theta_i = 90^\circ$ ve $\phi_i = 90^\circ$ gelen dalga açılarında, $\theta_o = 90^\circ$ ve $\phi_o = 0^\circ \rightarrow 359^\circ$ 1'er derece gözlem açılarında oluşan yatay polarize bistatik normalize RKA (a) Kartezyen, (b) polar grafiği, RKA farkı (c) Kartezyen, (d) histogram grafiği

Analiz edecek olursak;

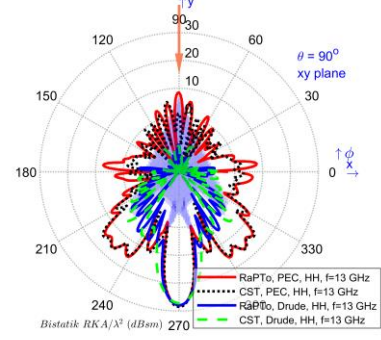
F-117 çarpışma frekansı 10 GHz ve plazma frekansı $20\pi \times 10^9$ rad/s olan frekans bağımlı bir malzeme ile 0.1 mm kalınlığında mükemmel iletken malzeme üzerine kaplanmıştır. Gelen dalga polarizasyonunun yatay ve frekansının 10 GHz olduğu durumda, RKA değerleri incelendiğinde 307 adet gözlem noktasında RKA değeri azalmıştır. Azalma miktarı 0.015136 ila 32.9103 dBsm aralığında ölçülmüştür. RKA azalması en çok 15. derecede en az 276. derecede gözlenmiştir. Ortalama RKA azalma miktarı 14.387 dBsm'dir. RKA değerinin arttığı açı değerleri de olmuştur. RKA değeri 53 açıda artmıştır. Artış miktarı 0.22525 ila 15.7377 dBsm aralığında ölçülmüştür. RKA artışı en çok 252. derecede en az 263. derecede olmuştur. Ortalama RKA artış miktarı 5.0812 dBsm'dir.

4. Operasyon Frekansı 13 GHz iken;

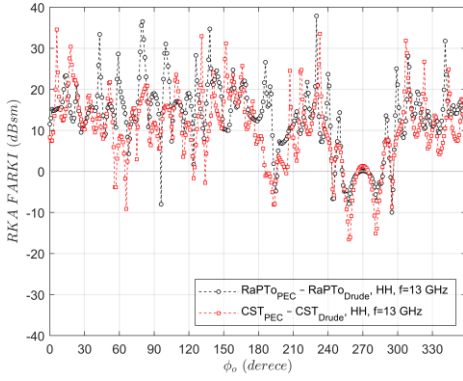
Radar kesit alanı değerleri Şekil 5.4.5 (a) Kartezyen grafik (b) polar grafik ile gösterilmiştir. RKA farkına ait değerler (c) Kartezyen, (d) histogram grafiği ile gösterilmiştir.



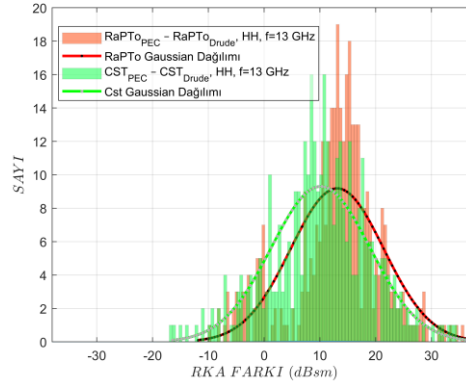
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 5.4.5: Drude ile kaplı mükemmel iletken F-117, $\epsilon_{\infty} = 1$, $\omega = 20\pi \times 10^9$ rad/s, $\gamma = 10 \times 10^9$ Hz frekans dağıtıcı malzeme özelliklerinde, 13 GHz frekans kullanılarak, $x = 14.23$, $y = 19.65$, $z = 2.381$ cm boyutunda, $d = 0.1$ mm kaplama kalınlığında, yatay polarize ve $\theta_i = 90^\circ$ ve $\phi_i = 90^\circ$ gelen dalga açıları, $\theta_o = 90^\circ$ ve $\phi_o = 0^\circ \rightarrow 359^\circ$ 1'er derece gözlem açıları, oluşan yatay polarize bistatik normalize RKA (a) Kartezyen, (b) polar grafiği, RKA farkı (c) Kartezyen, (d) histogram grafiği

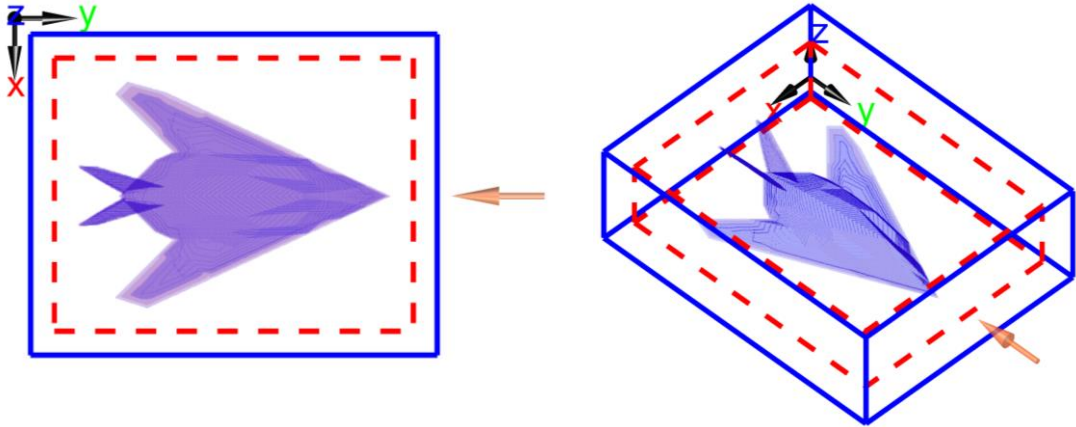
Analiz edecek olursak;

F-117 çarpışma frekansı 10 GHz ve plazma frekansı $20\pi \times 10^9$ rad/s olan frekans bağımlı bir malzeme ile 0.1 mm kalınlığında mükemmel iletken malzeme üzerine kaplanmıştır. Gelen dalga polarizasyonunun yatay ve frekansının 13 GHz olduğu durumda, RKA değerleri incelendiğinde 320 adet gözlem noktasında RKA değeri azalmıştır. Azalma miktarı 0.026931 ila 37.8933 dBsm aralığında ölçülmüştür. RKA azalması en çok 230. derecede en az 268. derecede gözlenmiştir. Ortalama RKA azalma miktarı 15.1603 dBsm'dir. RKA değerinin arttığı açı değerleri de olmuştur. RKA değeri 40 açıda artmıştır.

Artış miktarı 0.028223 ila 9.9772 dBsm aralığında ölçülmüştür. RKA artışı en çok 295. derecede en az 273. derecede olmuştur. Ortalama RKA artış miktarı 3.3286 dBsm'dir.

5.4.1.2 Kaplama Kalınlığı 0.2 mm ve Çarpışma Frekansı 10 GHz olan F-117

Analizde kullanılan F-117 Şekil 5.4.6'da kübik elemanlar formunda gösterilmiştir. Küpün kırmızı yüzeyi mükemmel iletken yüzey olduğu yeri gösterirken mavi olduğu kısım frekans dağıtıcı malzeme ile kaplı olduğu yeri göstermektedir. F-117'nin yanında x , y , z eksenlerini gösteren oklar, gelen dalganın yönünü gösteren ok, problem uzayının sınırı ve aynı zamanda mükemmel uyumlu katmanın sınırı (mavi ve sürekli çizgi) ve toplam alan (içeride kalacak şekilde) ile saçılan alanın sınırı (kırmızı kesik çizgi) gösterilmiştir.

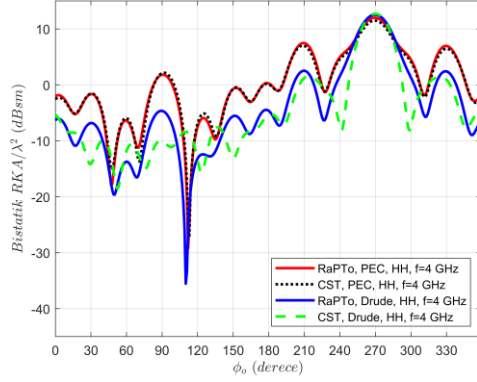


Şekil 5.4.6: Kaplama Kalınlığı 0.2 mm ve Çarpışma Frekansı 10 GHz olan F-117

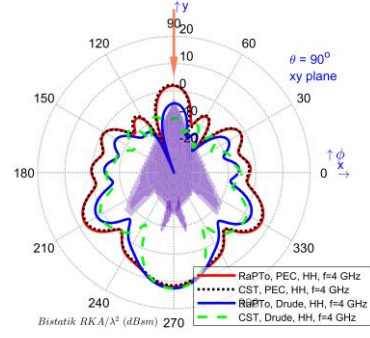
Drude ile kaplı mükemmel iletken F-117, $\epsilon_{\infty} = 1 F/m$, $\omega = 20\pi \times 10^9 rad/s$, $\gamma = 10 \times 10^9 Hz$ frekans dağıtıcı malzeme özelliklerinde, aşağıdaki belirtilen frekans değerlerinde kullanılarak, $x = 14.23, y = 19.65, z = 2.381 cm$ boyutunda, $d = 0.2 mm$ kaplama kalınlığında, yatay polarize ve $\theta_i = 90^\circ$ ve $\phi_i = 90^\circ$ gelen dalga açılarında, $\theta_o = 90^\circ$ ve $\phi_o = 0^\circ \rightarrow 359^\circ$ 1'er derece gözlem açılarında oluşan yatay polarize bistatik RKA değerleri hesaplanmıştır.

1. Operasyon Frekansı 4 GHz iken;

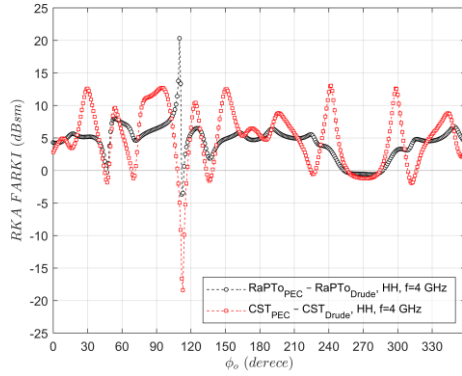
RKA değerleri Şekil 5.4.7 (a) Kartezyen grafik (b) polar grafik ile gösterilmiştir. RKA farkına ait değerler (c) Kartezyen, (d) histogram grafiği ile gösterilmiştir.



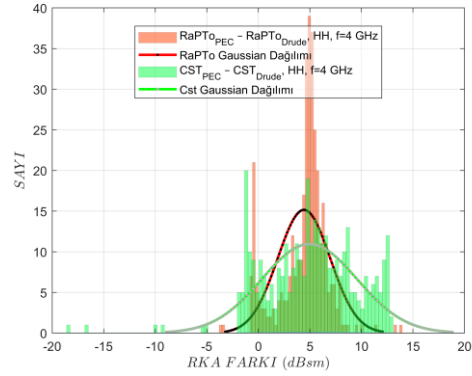
(a)



(b)



(c)



(d)

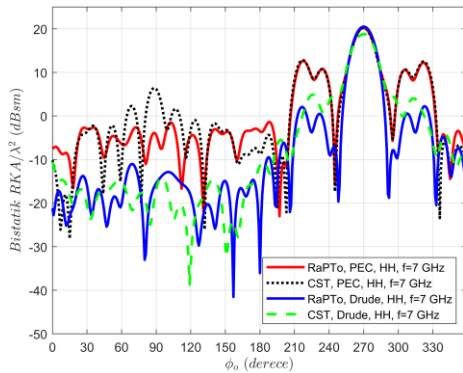
Şekil 5.4.7: Drude ile kaplı mükemmel iletken F-117, $\epsilon_{\infty} = 1$, $\omega = 20\pi \times 10^9$ rad/s, $\gamma = 10 \times 10^9$ Hz frekans dağıtıcı malzeme özelliklerinde, 4 GHz frekans kullanılarak, $x = 14.23$, $y = 19.65$, $z = 2.381$ cm boyutunda, $d = 0.2$ mm kaplama kalınlığında, yatay polarize ve $\theta_i = 90^\circ$ ve $\phi_i = 90^\circ$ gelen dalgaların açılarında, $\theta_o = 90^\circ$ ve $\phi_o = 0^\circ \rightarrow 359^\circ$ 1'er derece gözlem açıları arasında oluşan yatay polarize bistatik normalize RKA (a) Kartezyen, (b) polar grafiği, RKA farkı (c) Kartezyen, (d) histogram grafiği

F-117 çarpışma frekansı 10 GHz ve plazma frekansı $20\pi \times 10^9$ rad/s olan frekans bağımlı bir malzeme ile 0.2 mm kalınlığında mükemmel iletken malzeme üzerine kaplanmıştır. Gelen dalganın polarizasyonunun yatay ve frekansının 4 GHz olduğu durumda, RKA

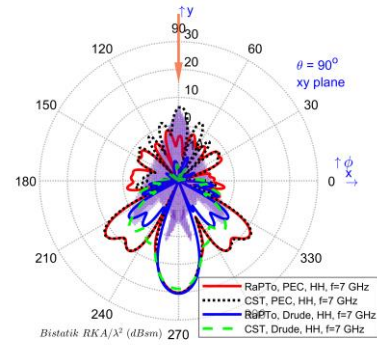
değerleri incelendiğinde 324 adet gözlem noktasında RKA değeri azalmıştır. Azalma miktarı 0.01309 ila 20.3314 dBsm aralığında ölçülmüştür. RKA azalması en çok 110. derecede en az 287. derecede gözlenmiştir. Ortalama RKA azalma miktarı 4.9891 dBsm'dir. RKA değerinin arttığı açı değerleri de olmuştur. RKA değeri 36 açıda artmıştır. Artış miktarı 0.10753 ila 3.681 dBsm aralığında ölçülmüştür. RKA artışı en çok 112. derecede en az 254. derecede olmuştur. Ortalama RKA artış miktarı 0.64126 dBsm'dir.

2. Operasyon Frekansı 7 GHz iken;

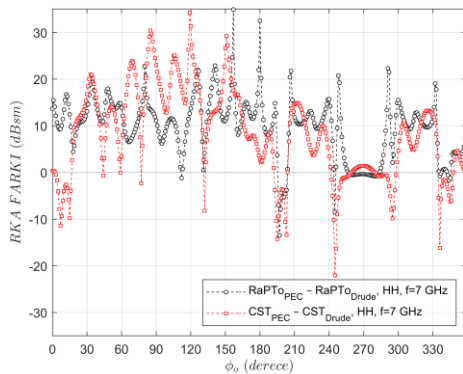
Radar kesit alanı değerleri Şekil 5.4.8 (a) Kartezyen grafik (b) polar grafik ile gösterilmiştir. RKA farkına ait değerler (c) Kartezyen, (d) histogram grafiği ile gösterilmiştir.



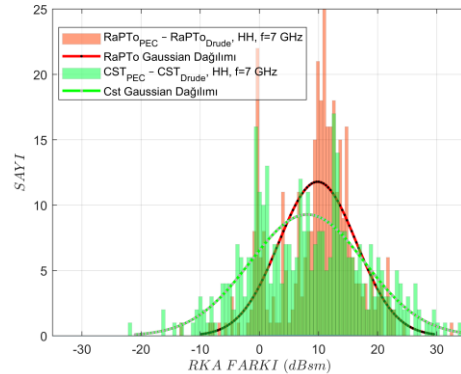
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 5.4.8: Drude ile kaplı mükemmel iletken F-117, $\epsilon_\infty = 1$, $\omega = 20\pi \times 10^9$ rad/s, $\gamma = 10 \times 10^9$ Hz frekans dağıtıcı malzeme özelliklerinde, 7 GHz frekans kullanılarak, $x =$

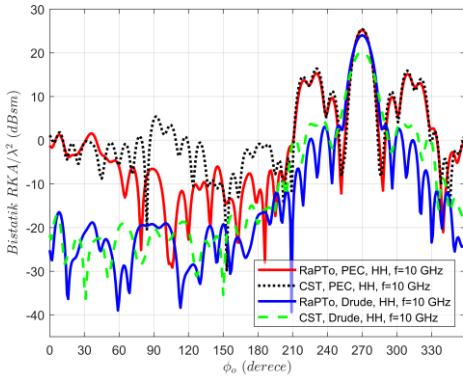
14.23, $y = 19.65, z = 2.381 \text{ cm}$ boyutunda, $d = 0.2 \text{ mm}$ kaplama kalınlığında, yatay polarize ve $\theta_i = 90^\circ$ ve $\phi_i = 90^\circ$ gelen dalga açılarında, $\theta_o = 90^\circ$ ve $\phi_o = 0^\circ \rightarrow 359^\circ$ 1'er derece gözlem açılarında oluşan yatay polarize bistatik normalize RKA (a) Kartezyen, (b) polar grafiği, RKA farkı (c) Kartezyen, (d) histogram grafiği

Analiz edecek olursak;

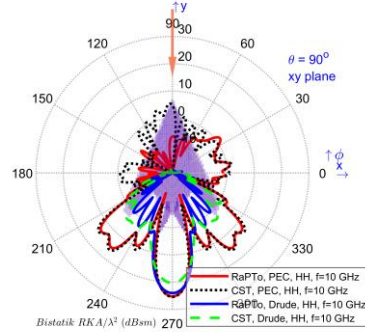
F-117 çarpışma frekansı 10 GHz ve plazma frekansı $20\pi \times 10^9 \text{ rad/s}$ olan frekans bağımlı bir malzeme ile 0.2 mm kalınlığında mükemmel iletken malzeme üzerine kaplanmıştır. Gelen dalga polarizasyonunun yatay ve frekansının 7 GHz olduğu durumda, RKA değerleri incelendiğinde 318 adet gözlem noktasında RKA değeri azalmıştır. Azalma miktarı 0.17506 ila 34.9025 dBsm aralığında ölçülmüştür. RKA azalması en çok 157. derecede en az 284. derecede gözlenmiştir. Ortalama RKA azalma miktarı 11.3935 dBsm'dir. RKA değerinin arttığı açı değerleri de olmuştur. RKA değeri 42 açıda artmıştır. Artış miktarı 0.16829 ila 13.471 dBsm aralığında ölçülmüştür. RKA artışı en çok 197. derecede en az 257. derecede olmuştur. Ortalama RKA artış miktarı 1.856 dBsm'dir.

3. Operasyon Frekansı 10 GHz iken;

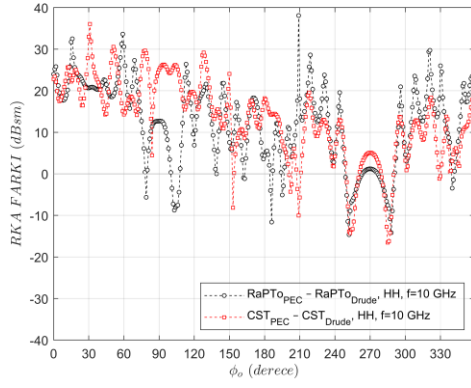
Radar kesit alanı değerleri Şekil 5.4.9 (a) Kartezyen grafik (b) polar grafik ile gösterilmiştir. RKA farkına ait değerler (c) Kartezyen, (d) histogram grafiği ile gösterilmiştir.



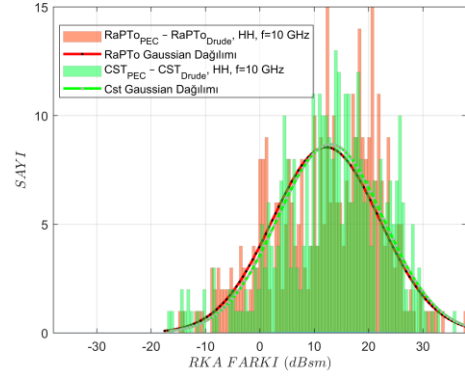
(a)



(b)



(c)



(d)

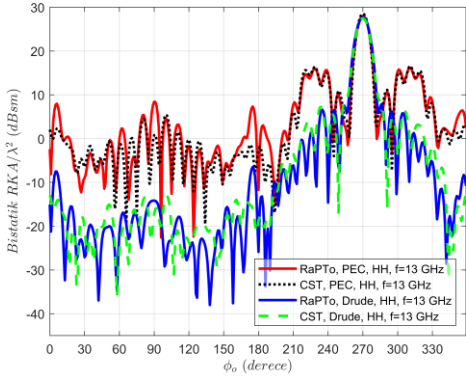
Şekil 5.4.9: Drude ile kaplı mükemmel iletken F-117, $\epsilon_\infty = 1$, $\omega = 20\pi \times 10^9$ rad/s, $\gamma = 10 \times 10^9$ Hz frekans dağıtıcı malzeme özelliklerinde, 10 GHz frekans kullanılarak, $x = 14.23$, $y = 19.65$, $z = 2.381$ cm boyutunda, $d = 0.2$ mm kaplama kalınlığında, yatay polarize ve $\theta_i = 90^\circ$ ve $\phi_i = 90^\circ$ gelen dalgaların açılarında, $\theta_o = 90^\circ$ ve $\phi_o = 0^\circ \rightarrow 359^\circ$ 1'er derece gözlem açılarında oluşan yatay polarize bistatik normalize RKA (a) Kartezyen, (b) polar grafiği, RKA farkı (c) Kartezyen, (d) histogram grafiği

Analiz edecek olursak;

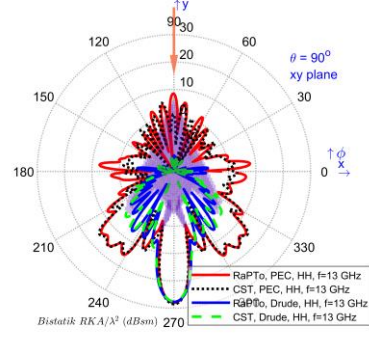
F-117 çarpışma frekansı 10 GHz ve plazma frekansı $20\pi \times 10^9$ rad/s olan frekans bağımlı bir malzeme ile 0.2 mm kalınlığında mükemmel iletken malzeme üzerine kaplanmıştır. Gelen dalganın polarizasyonunun yatay ve frekansının 10 GHz olduğu durumda, RKA değerleri incelendiğinde 315 adet gözlem noktasında RKA değeri azalmıştır. Azalma miktarı 0.0052524 ila 38.0965 dBsm aralığında ölçülmüştür. RKA azalması en çok 209. derecede en az 139. derecede gözlenmiştir. Ortalama RKA azalma miktarı 14.685 dBsm'dir. RKA değerinin arttığı açı değerleri de olmuştur. RKA değeri 45 açıda artmıştır. Artış miktarı 0.12459 ila 14.6378 dBsm aralığında ölçülmüştür. RKA artışı en çok 252. derecede en az 263. derecede olmuştur. Ortalama RKA artış miktarı 5.2299 dBsm'dir.

4. Operasyon Frekansı 13 GHz iken;

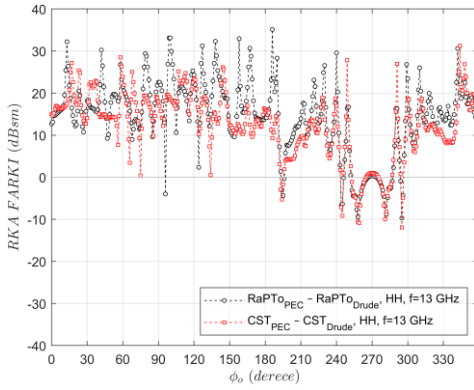
Radar kesit alanı değerleri Şekil 5.4.10 (a) Kartezyen grafik (b) polar grafik ile gösterilmiştir. RKA farkına ait değerler (c) Kartezyen, (d) histogram grafiği ile gösterilmiştir.



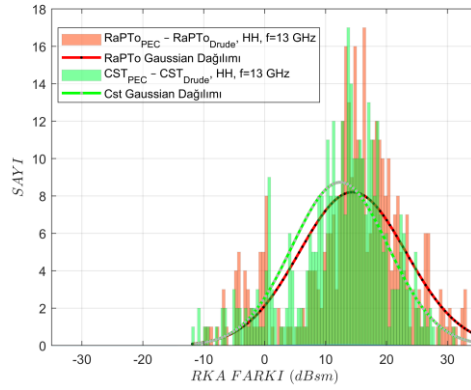
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 5.4.10: Drude ile kaplı mükemmel iletken F-117, $\epsilon_{\infty} = 1$, $F/m, \omega = 20\pi \times 10^9$ rad/s, $\gamma = 10 \times 10^9$ Hz frekans dağıtıcı malzeme özelliklerinde, 13 GHz frekans kullanılarak, $x = 14.23, y = 19.65, z = 2.381$ cm boyutunda, $d = 0.2$ mm kaplama kalınlığında, yatay polarize ve $\theta_i = 90^\circ$ ve $\phi_i = 90^\circ$ gelen dalgaların açılarında, $\theta_o = 90^\circ$ ve $\phi_o = 0^\circ \rightarrow 359^\circ$ 1'er derece gözlem açılarında oluşan yatay polarize bistatik normalize RKA (a) Kartezyen, (b) polar grafiği, RKA farkı (c) Kartezyen, (d) histogram grafiği

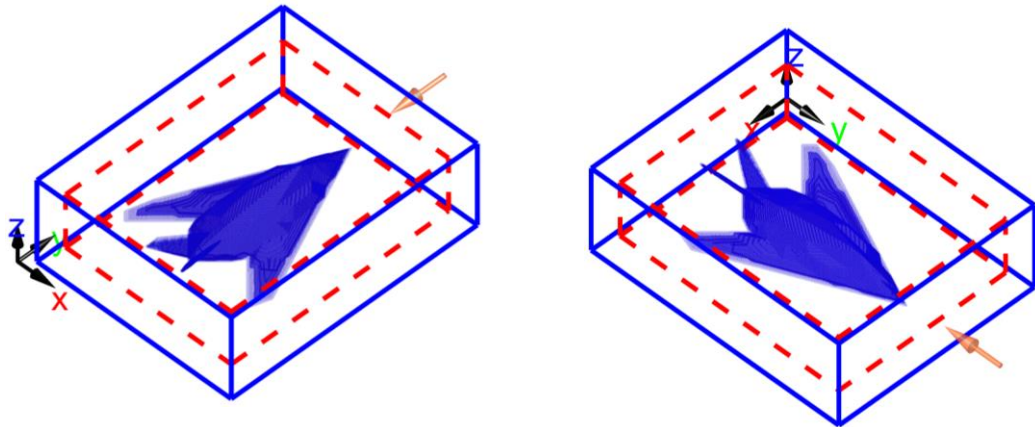
Analiz edecek olursak;

F-117 çarpışma frekansı 10 GHz ve plazma frekansı $20\pi \times 10^9$ rad/s olan frekans bağımlı bir malzeme ile 0.2 mm kalınlığında mükemmel iletken malzeme üzerine kaplanmıştır. Gelen dalganın polarizasyonunun yatay ve frekansının 13 GHz olduğu durumda, RKA değerleri incelendiğinde 322 adet gözlem noktasında RKA değeri azalmıştır. Azalma miktarı 0.0447 ila 35.1305 dBsm aralığında ölçülmüştür. RKA azalması en çok 186. derecede en az 267. derecede gözlenmiştir. Ortalama RKA azalma miktarı 16.57 dBsm'dir. RKA değerinin arttığı açı değerleri de olmuştur. RKA değeri 38 açıda artmıştır.

Artış miktarı 0.087013 ila 9.6873 dBsm aralığında ölçülmüştür. RKA artışı en çok 295. derecede en az 274. derecede olmuştur. Ortalama RKA artış miktarı 3.5479 dBsm'dir.

5.4.1.3 Kaplama Kalınlığı 0.4 mm ve Çarpışma Frekansı 10 GHz olan F-117

Analizde kullanılan F-117 Şekil 5.4.11'de kübik elemanlar formunda gösterilmiştir. Küpün kırmızı yüzeyi mükemmel iletken yüzey olduğu yeri gösterirken mavi olduğu kısım frekans dağıtıcı malzeme ile kaplı olduğu yeri göstermektedir. F-117'nin yanında x, y, z eksenlerini gösteren oklar, gelen dalga yönünü gösteren ok, problem uzayının sınırı ve aynı zamanda mükemmel uyumlu katmanın sınırı (mavi ve sürekli çizgi) ve toplam alan (içeride kalacak şekilde) ile saçılan alanın sınırı (kırmızı kesik çizgi) gösterilmiştir.

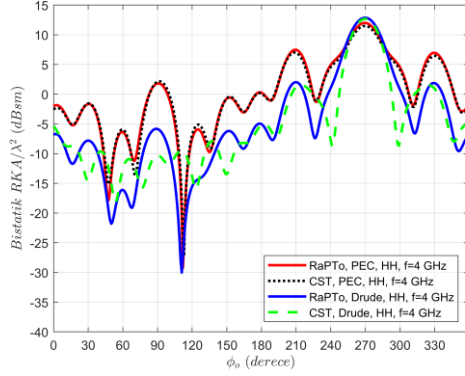


Şekil 5.4.11: Kaplama Kalınlığı 0.4 mm ve Çarpışma Frekansı 10 GHz olan F-117

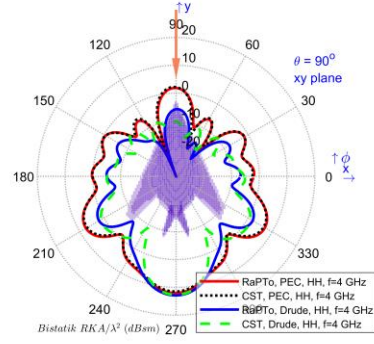
Drude ile kaplı mükemmel iletken F-117, $\epsilon_\infty = 1 F/m$, $\omega = 20\pi \times 10^9 \text{ rad/s}$, $\gamma = 10 \times 10^9 \text{ Hz}$ frekans dağıtıcı malzeme özelliklerinde, aşağıdaki belirtilen frekans değerlerinde kullanılarak, $x = 14.23, y = 19.65, z = 2.381 \text{ cm}$ boyutunda, $d = 0.4 \text{ mm}$ kaplama kalınlığında, yatay polarize ve $\theta_i = 90^\circ$ ve $\phi_i = 90^\circ$ gelen dalga açılarında, $\theta_o = 90^\circ$ ve $\phi_o = 0^\circ \rightarrow 359^\circ$ 1'er derece gözlem açılarında oluşan yatay polarize bistatik RKA değerleri hesaplanmıştır.

1. Operasyon Frekansı 4 GHz iken;

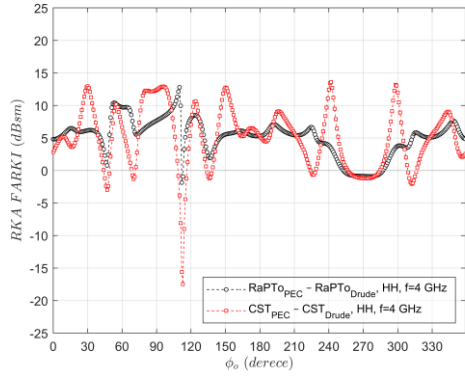
RKA değerleri Şekil 5.4.12 (a) Kartezyen grafik (b) polar grafik ile gösterilmiştir. RKA farkına ait değerler (c) Kartezyen, (d) histogram grafiği ile gösterilmiştir.



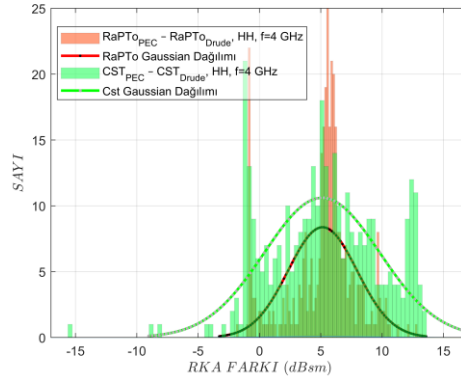
(a)



(b)



(c)



(d)

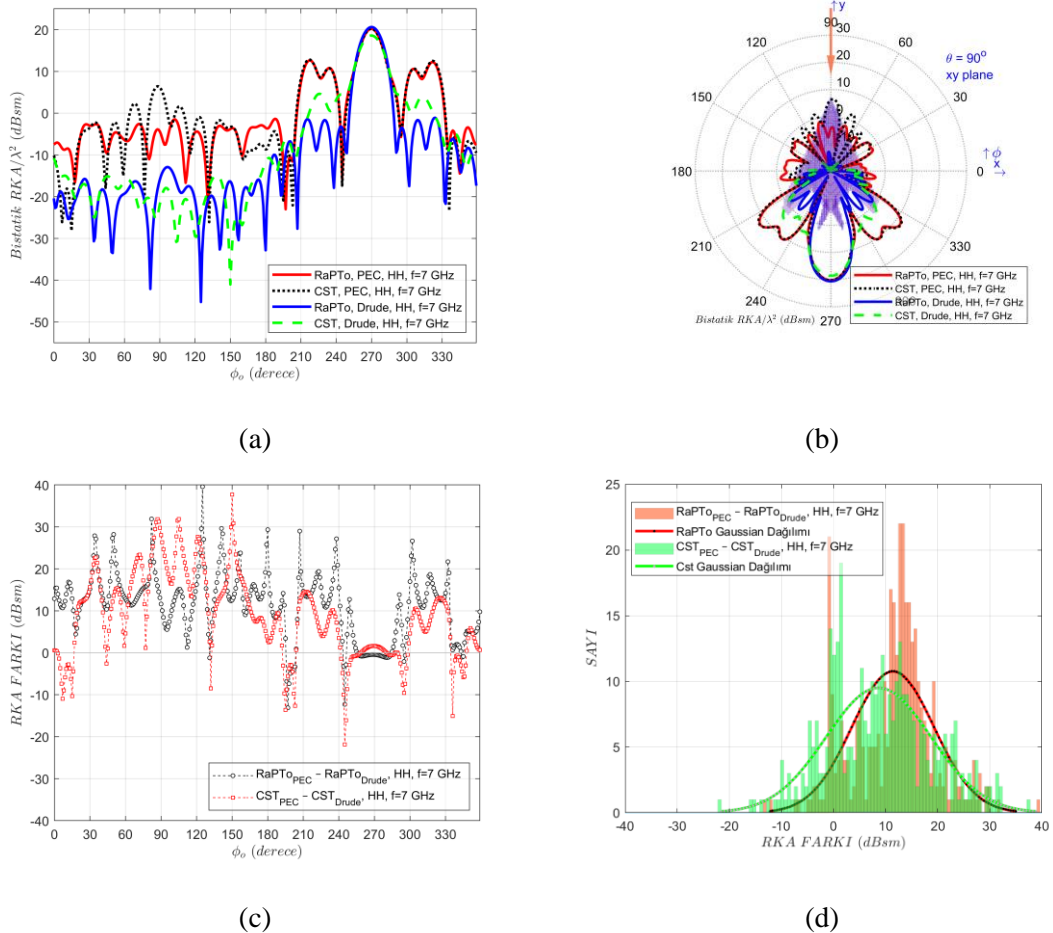
Şekil 5.4.12: Drude ile kaplı mükemmel iletken F-117, $\epsilon_{\infty} = 1$, $F/m, \omega = 20\pi \times 10^9$ rad/s, $\gamma = 10 \times 10^9$ Hz frekans dağıtıcı malzeme özelliklerinde, 4 GHz frekans kullanılarak, $x = 14.23, y = 19.65, z = 2.381$ cm boyutunda, $d = 0.4$ mm kaplama kalınlığında, yatay polarize ve $\theta_i = 90^\circ$ ve $\phi_i = 90^\circ$ gelen dalga açılarında, $\theta_o = 90^\circ$ ve $\phi_o = 0^\circ \rightarrow 359^\circ$ 1'er derece gözlem açılarında oluşan yatay polarize bistatik normalize RKA (a) Kartezyen, (b) polar grafiği, RKA farkı (c) Kartezyen, (d) histogram grafiği

F-117 çarpışma frekansı 10 GHz ve plazma frekansı $20\pi \times 10^9$ rad/s olan frekans bağımlı bir malzeme ile 0.4 mm kalınlığında mükemmel iletken malzeme üzerine kaplanmıştır. Gelen dalga polarizasyonunun yatay ve frekansının 4 GHz olduğu durumda, RKA

değerleri incelendiğinde 323 adet gözlem noktasında RKA değeri azalmıştır. Azalma miktarı 0.1175 ila 12.7916 dBsm aralığında ölçülmüştür. RKA azalması en çok 110. derecede en az 252. derecede gözlenmiştir. Ortalama RKA azalma miktarı 5.8221 dBsm'dir. RKA değerinin arttığı açı değerleri de olmuştur. RKA değeri 37 açıda artmıştır. Artış miktarı 0.055879 ila 1.8595 dBsm aralığında ölçülmüştür. RKA artışı en çok 112. derecede en az 287. derecede olmuştur. Ortalama RKA artışı miktarı 0.74509 dBsm'dir.

2. Operasyon Frekansı 7 GHz iken;

Radar kesit alanı değerleri Şekil 5.4.13 (a) Kartezyen grafik (b) polar grafik ile gösterilmiştir. RKA farkına ait değerler (c) Kartezyen, (d) histogram grafiği ile gösterilmiştir.



Şekil 5.4.13: Drude ile kaplı mükemmel iletken F-117, $\epsilon_{\infty} = 1$, $\omega = 20\pi \times 10^9$ rad/s, $\gamma = 10 \times 10^9$ Hz frekans dağıtıcı malzeme özelliklerinde, 7 GHz frekans kullanılarak, $x =$

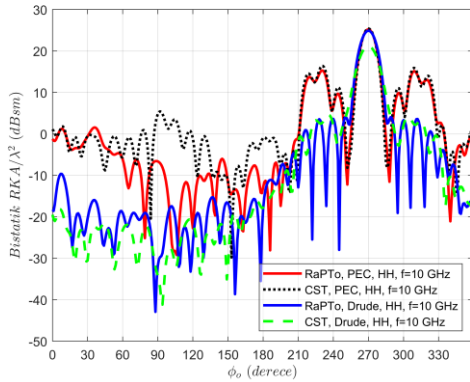
14.23, $y = 19.65, z = 2.381 \text{ cm}$ boyutunda, $d = 0.4 \text{ mm}$ kaplama kalınlığında, yatay polarize ve $\theta_i = 90^\circ$ ve $\phi_i = 90^\circ$ gelen dalga açılarında, $\theta_o = 90^\circ$ ve $\phi_o = 0^\circ \rightarrow 359^\circ$ 1'er derece gözlem açılarında oluşan yatay polarize bistatik normalize RKA (a) Kartezyen, (b) polar grafiği, RKA farkı (c) Kartezyen, (d) histogram grafiği

Analiz edecek olursak;

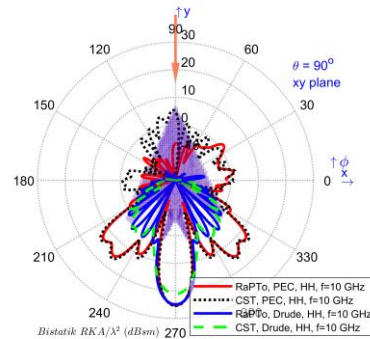
F-117 çarpışma frekansı 10 GHz ve plazma frekansı $20\pi \times 10^9 \text{ rad/s}$ olan frekans bağımlı bir malzeme ile 0.4 mm kalınlığında mükemmel iletken malzeme üzerine kaplanmıştır. Gelen dalga polarizasyonunun yatay ve frekansının 7 GHz olduğu durumda, RKA değerleri incelendiğinde 315 adet gözlem noktasında RKA değeri azalmıştır. Azalma miktarı 0.29303 ila 39.5671 dBsm aralığında ölçülmüştür. RKA azalması en çok 125. derecede en az 255. derecede gözlenmiştir. Ortalama RKA azalma miktarı 13.3179 dBsm'dir. RKA değerinin arttığı açı değerleri de olmuştur. RKA değeri 45 açıda artmıştır. Artış miktarı 0.26227 ila 13.1098 dBsm aralığında ölçülmüştür. RKA artışı en çok 197. derecede en az 256. derecede olmuştur. Ortalama RKA artış miktarı 2.0296 dBsm'dir.

3. Operasyon Frekansı 10 GHz iken;

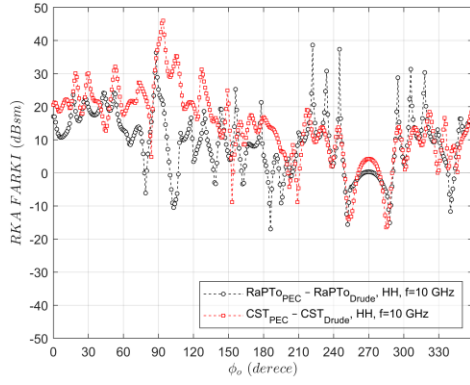
Radar kesit alanı değerleri Şekil 5.4.14 (a) Kartezyen grafik (b) polar grafik ile gösterilmiştir. RKA farkına ait değerler (c) Kartezyen, (d) histogram grafiği ile gösterilmiştir.



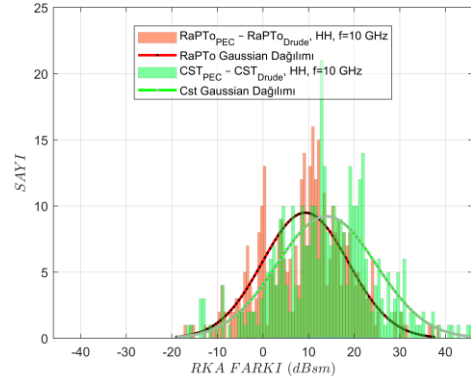
(a)



(b)



(c)



(d)

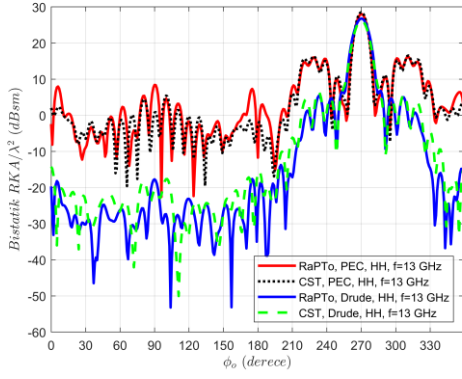
Şekil 5.4.14: Drude ile kaplı mükemmel iletken F-117, $\epsilon_\infty = 1$, $F/m, \omega = 20\pi \times 10^9$ rad/s, $\gamma = 10 \times 10^9$ Hz frekans dağıtıcı malzeme özelliklerinde, 10 GHz frekans kullanılarak, $x = 14.23, y = 19.65, z = 2.381$ cm boyutunda, $d = 0.4$ mm kaplama kalınlığında, yatay polarize ve $\theta_i = 90^\circ$ ve $\phi_i = 90^\circ$ gelen dalga açılarında, $\theta_o = 90^\circ$ ve $\phi_o = 0^\circ \rightarrow 359^\circ$ 1'er derece gözlem açılarında oluşan yatay polarize bistatik normalize RKA (a) Kartezyen, (b) polar grafiği, RKA farkı (c) Kartezyen, (d) histogram grafiği

Analiz edecek olursak;

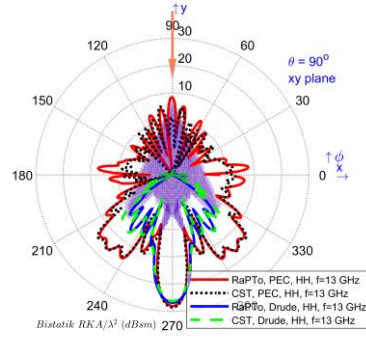
F-117 çarpışma frekansı 10 GHz ve plazma frekansı $20\pi \times 10^9$ rad/s olan frekans bağımlı bir malzeme ile 0.4 mm kalınlığında mükemmel iletken malzeme üzerine kaplanmıştır. Gelen dalga polarizasyonunun yatay ve frekansının 10 GHz olduğu durumda, RKA değerleri incelendiğinde 296 adet gözlem noktasında RKA değeri azalmıştır. Azalma miktarı 0.0031044 ila 38.6357 dBsm aralığında ölçülmüştür. RKA azalması en çok 222. derecede en az 274. derecede gözlenmiştir. Ortalama RKA azalma miktarı 12.33 dBsm'dir. RKA değerinin arttığı açı değerleri de olmuştur. RKA değeri 64 açıda artmıştır. Artış miktarı 0.036691 ila 16.9753 dBsm aralığında ölçülmüştür. RKA artışı en çok 186. derecede en az 78. derecede olmuştur. Ortalama RKA artış miktarı 4.8138 dBsm'dir.

4. Operasyon Frekansı 13 GHz iken;

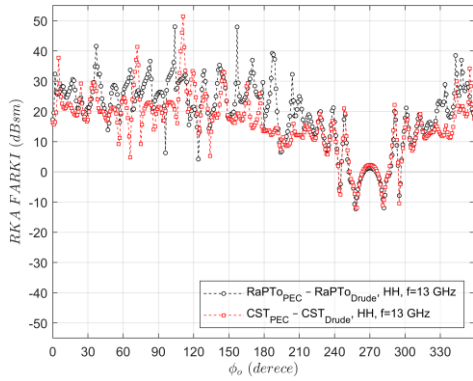
Radar kesit alanı değerleri Şekil 5.4.15 (a) Kartezyen grafik (b) polar grafik ile gösterilmiştir. RKA farkına ait değerler (c) Kartezyen, (d) histogram grafiği ile gösterilmiştir.



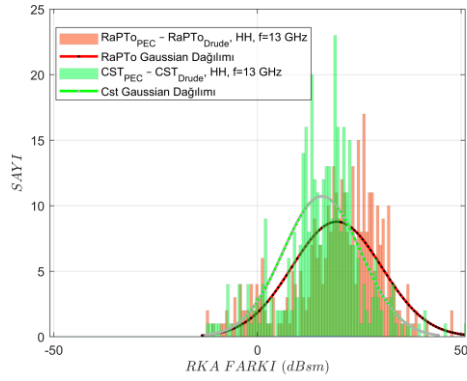
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 5.4.15: Drude ile kaplı mükemmel iletken F-117, $\epsilon_\infty = 1$, $F/m, \omega = 20\pi \times 10^9$ rad/s, $\gamma = 10 \times 10^9$ Hz frekans dağıtıcı malzeme özelliklerinde, 13 GHz frekans kullanılarak, $x = 14.23, y = 19.65, z = 2.381$ cm boyutunda, $d = 0.4$ mm kaplama kalınlığında, yatay polarize ve $\theta_i = 90^\circ$ ve $\phi_i = 90^\circ$ gelen dalga açıları, $\theta_o = 90^\circ$ ve $\phi_o = 0^\circ \rightarrow 359^\circ$ 1'er derece gözlem açıları oluşmuş yatay polarize bistatik normalize RKA (a) Kartezyen, (b) polar grafiği, RKA farkı (c) Kartezyen, (d) histogram grafiği

Analiz edecek olursak;

F-117 çarpışma frekansı 10 GHz ve plazma frekansı $20\pi \times 10^9$ rad/s olan frekans bağımlı bir malzeme ile 0.4 mm kalınlığında mükemmel iletken malzeme üzerine kaplanmıştır. Gelen dalga polarizasyonunun yatay ve frekansının 13 GHz olduğu durumda, RKA değerleri incelendiğinde 331 adet gözlem noktasında RKA değeri azalmıştır. Azalma miktarı 0.04407 ila 48.0016 dBsm aralığında ölçülmüştür. RKA azalması en çok 104. derecede en az 265. derecede gözlenmiştir. Ortalama RKA azalma miktarı 21.5866 dBsm'dir. RKA değerinin arttığı açı değerleri de olmuştur. RKA değeri 29 açıda artmıştır.

Artış miktarı 0.035839 ila 12.2801 dBsm aralığında ölçülmüştür. RKA artışı en çok 258. derecede en az 252. derecede olmuştur. Ortalama RKA artış miktarı 4.5209 dBsm'dir.

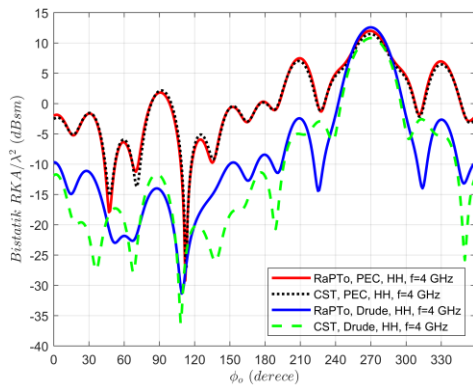
5.4.1.4 Kaplama Kalınlığı 0.1 mm ve Çarpışma Frekansı 200 GHz olan F-117

Analizde kullanılan F-117 Şekil 5.4.1’de gösterilen kübik elemanlar formuyla aynıdır.

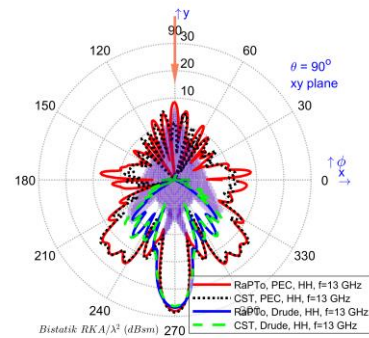
Drude ile kaplı mükemmel iletken F-117, $\epsilon_{\infty} = 1 F/m$, $\omega = 20\pi \times 10^9 \text{ rad/s}$, $\gamma = 200 \times 10^9 \text{ Hz}$ frekans dağıtıcı malzeme özelliklerinde, aşağıdaki belirtilen frekans değerlerinde kullanılarak, $x = 14.23, y = 19.65, z = 2.381 \text{ cm}$ boyutunda, $d = 0.1 \text{ mm}$ kaplama kalınlığında, yatay polarize ve $\theta_i = 90^\circ$ ve $\phi_i = 90^\circ$ gelen dalga açılarında, $\theta_o = 90^\circ$ ve $\phi_o = 0^\circ \rightarrow 359^\circ$ 1’er derece gözlem açıları oluşmuş yatay polarize bistatik RKA değerleri hesaplanmıştır.

1. Operasyon Frekansı 4 GHz iken;

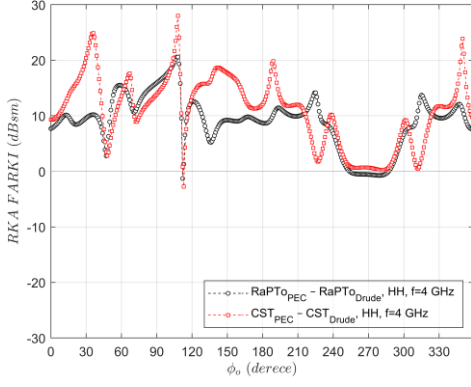
RKA değerleri Şekil 5.4.16 (a) Kartezyen grafik (b) polar grafik ile gösterilmiştir. RKA farkına ait değerler (c) Kartezyen, (d) histogram grafiği ile gösterilmiştir.



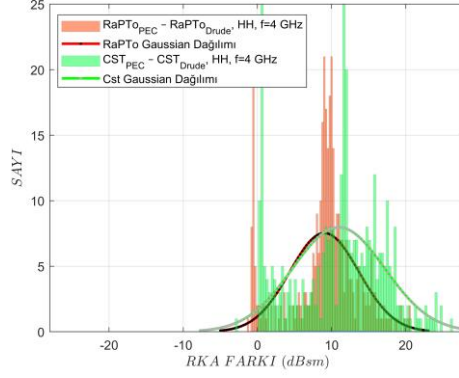
(a)



(b)



(c)



(d)

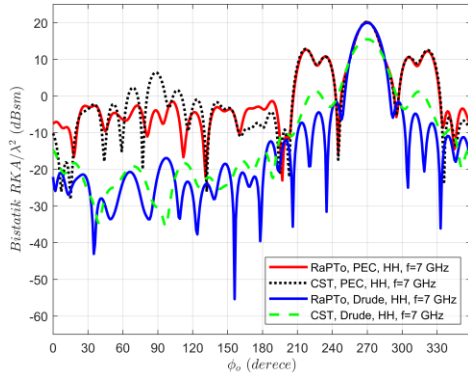
Şekil 5.4.16: Drude ile kaplı mükemmel iletken F-117, $\epsilon_\infty = 1$, $F/m, \omega = 20\pi \times 10^9$ rad/s, $\gamma = 200 \times 10^9$ Hz frekans dağıtıcı malzeme özelliklerinde, 4 GHz frekans kullanılarak, $x = 14.23, y = 19.65, z = 2.381$ cm boyutunda, $d = 0.1$ mm kaplama kalınlığında, yatay polarize ve $\theta_i = 90^\circ$ ve $\phi_i = 90^\circ$ gelen dalga açılarında, $\theta_o = 90^\circ$ ve $\phi_o = 0^\circ \rightarrow 359^\circ$ 1'er derece gözlem açılarındaki oluşan yatay polarize bistatik normalize RKA (a) Kartezyen, (b) polar grafiği, RKA farkı (c) Kartezyen, (d) histogram grafiği

Analiz edecek olursak;

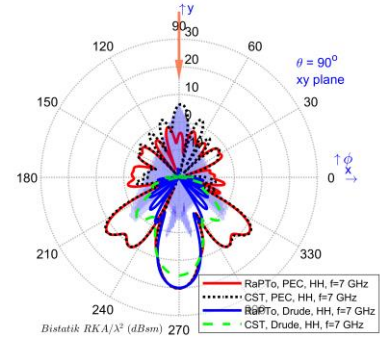
F-117 çarpışma frekansı 200 GHz ve plazma frekansı $20\pi \times 10^9$ rad/s olan frekans bağımlı bir malzeme ile 0.1 mm kalınlığında mükemmel iletken malzeme üzerine kaplanmıştır. Gelen dalga polarizasyonunun yatay ve frekansının 4 GHz olduğu durumda, RKA değerleri incelendiğinde 325 adet gözlem noktasında RKA değeri azalmıştır. Azalma miktarı 0.15002 ila 20.5847 dBsm aralığında ölçülmüştür. RKA azalması en çok 107. derecede en az 253. derecede gözlenmiştir. Ortalama RKA azalma miktarı 10.0497 dBsm'dir. RKA değerinin arttığı açı değerleri de olmuştur. RKA değeri 35 açıda artmıştır. Artış miktarı 0.033968 ila 1.2878 dBsm aralığında ölçülmüştür. RKA artışı en çok 112. derecede en az 287. derecede olmuştur. Ortalama RKA artış miktarı 0.54332 dBsm'dir.

2. Operasyon Frekansı 7 GHz iken;

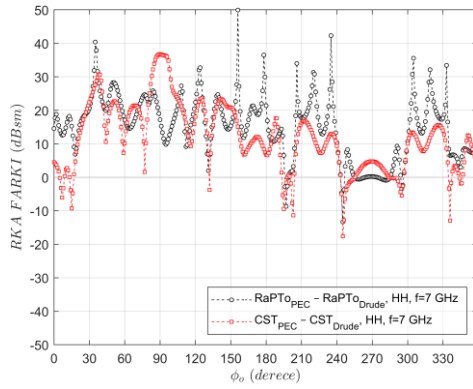
RKA değerleri Şekil 5.4.17 (a) Kartezyen grafik (b) polar grafik ile gösterilmiştir. RKA farkına ait değerler (c) Kartezyen, (d) histogram grafiği ile gösterilmiştir.



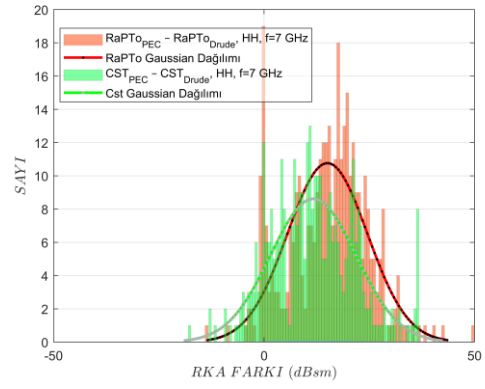
(a)



(b)



(c)



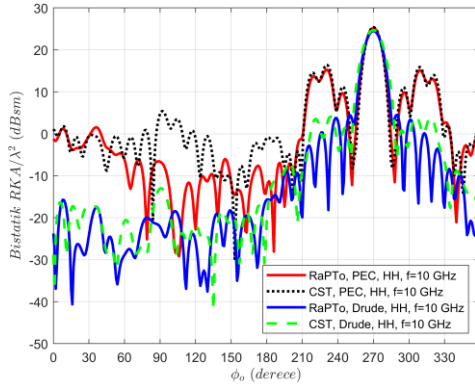
(d)

Şekil 5.4.17: Drude ile kaplı mükemmel iletken F-117, $\epsilon_{\infty} = 1$, $\omega = 20\pi \times 10^9$ rad/s, $\gamma = 200 \times 10^9$ Hz frekans dağıtıcı malzeme özelliklerinde, 7 GHz frekans kullanılarak, $x = 14.23$, $y = 19.65$, $z = 2.381$ cm boyutunda, $d = 0.1$ mm kaplama kalınlığında, yatay polarize ve $\theta_i = 90^\circ$ ve $\phi_i = 90^\circ$ gelen dalgalar açılarında, $\theta_o = 90^\circ$ ve $\phi_o = 0^\circ \rightarrow 359^\circ$ 1'er derece gözlem açılarında oluşan yatay polarize bistatik normalize RKA (a) Kartezyen, (b) polar grafiği, RKA farkı (c) Kartezyen, (d) histogram grafiği

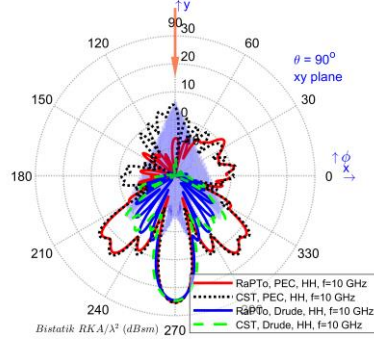
F-117 çarpışma frekansı 200 GHz ve plazma frekansı $20\pi \times 10^9$ rad/s olan frekans bağımlı bir malzeme ile 0.1 mm kalınlığında mükemmel iletken malzeme üzerine kaplanmıştır. Gelen dalgaların polarizasyonunun yatay ve frekansının 7 GHz olduğu durumda, RKA değerleri incelendiğinde 331 adet gözlem noktasında RKA değeri azalmıştır. Azalma miktarı 0.015976 ila 49.9355 dBsm aralığında ölçülmüştür. RKA azalması en çok 156. derecede en az 199. derecede gözlenmiştir. Ortalama RKA azalma miktarı 16.5357 dBsm'dir. RKA değerinin arttığı açı değerleri de olmuştur. RKA değeri 29 açıda artmıştır. Artış miktarı 0.0041782 ila 13.3243 dBsm aralığında ölçülmüştür. RKA artışı en çok 245. derecede en az 285. derecede olmuştur. Ortalama RKA artış miktarı 1.7507 dBsm'dir.

3. Operasyon Frekansı 10 GHz iken;

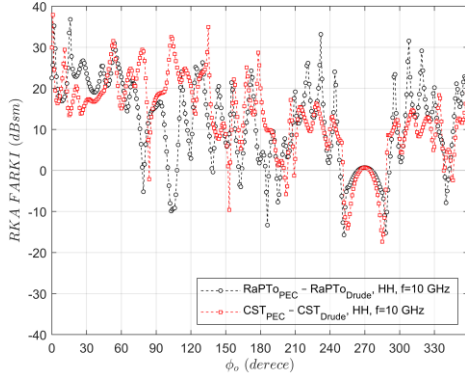
RKA değerleri Şekil 5.4.18 (a) Kartezyen grafik (b) polar grafik ile gösterilmiştir. RKA farkına ait değerler (c) Kartezyen, (d) histogram grafiği ile gösterilmiştir.



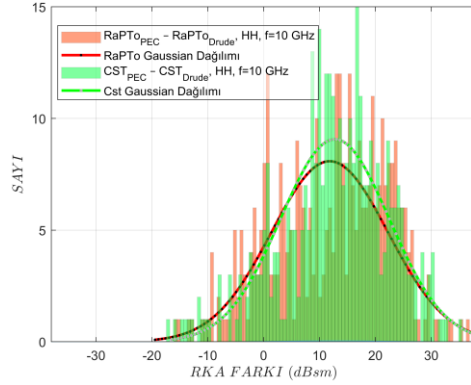
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 5.4.18: Drude ile kaplı mükemmel iletken F-117, $\epsilon_\infty = 1$, $F/m, \omega = 20\pi \times 10^9$ rad/s, $\gamma = 200 \times 10^9$ Hz frekans dağıtıcı malzeme özelliklerinde, 10 GHz frekans kullanılarak, $x = 14.23, y = 19.65, z = 2.381$ cm boyutunda, $d = 0.1$ mm kaplama kalınlığında, yatay polarize ve $\theta_i = 90^\circ$ ve $\phi_i = 90^\circ$ gelen dalga açılarında, $\theta_o = 90^\circ$ ve $\phi_o = 0^\circ \rightarrow 359^\circ$ 1'er derece gözlem açılarında oluşan yatay polarize bistatik normalize RKA (a) Kartezyen, (b) polar grafiği, RKA farkı (c) Kartezyen, (d) histogram grafiği

F-117 çarpışma frekansı 200 GHz ve plazma frekansı $20\pi \times 10^9$ rad/s olan frekans bağımlı bir malzeme ile 0.1 mm kalınlığında mükemmel iletken malzeme üzerine kaplanmıştır. Gelen dalga polarizasyonunun yatay ve frekansının 10 GHz olduğu durumda, RKA

değerleri incelendiğinde 306 adet gözlem noktasında RKA değeri azalmıştır. Azalma miktarı 0.046922 ila 36.7944 dBsm aralığında ölçülmüştür. RKA azalması en çok 16. derecede en az 108. derecede gözlenmiştir. Ortalama RKA azalma miktarı 14.777 dBsm'dir. RKA değerinin arttığı açı değerleri de olmuştur. RKA değeri 54 açıda artmıştır. Artış miktarı 0.0050078 ila 15.7125 dBsm aralığında ölçülmüştür. RKA artışı en çok 252. derecede en az 264. derecede olmuştur. Ortalama RKA artış miktarı 4.9296 dBsm'dir.

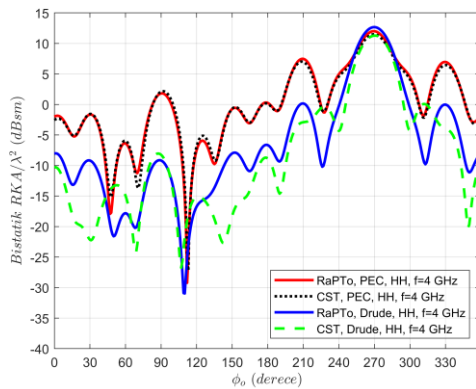
5.4.1.5 Kaplama Kalınlığı 0.1 mm ve Çarpışma Frekansı 500 GHz olan F-117

Analizde kullanılan F-117 Şekil 5.4.1'de gösterilen kübik elemanlar formuyla aynıdır.

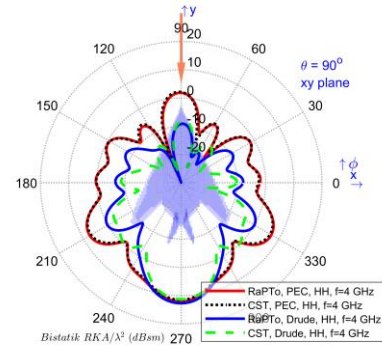
Drude ile kaplı mükemmel iletken F-117, $\varepsilon_\infty = 1$ F/m , $\omega = 20\pi \times 10^9$ rad/s , $\gamma = 500 \times 10^9$ Hz frekans dağıtıcı malzeme özelliklerinde, aşağıdaki belirtilen frekans değerlerinde kullanılarak, $x = 14.23, y = 19.65, z = 2.381$ cm boyutunda, $d = 0.1$ mm kaplama kalınlığında, yatay polarize ve $\theta_i = 90^\circ$ ve $\phi_i = 90^\circ$ gelen dalga açılarında, $\theta_o = 90^\circ$ ve $\phi_o = 0^\circ \rightarrow 359^\circ$ 1'er derece gözlem açılarında oluşan yatay polarize bistatik RKA değerleri hesaplanmıştır.

1. Operasyon Frekansı 4 GHz iken;

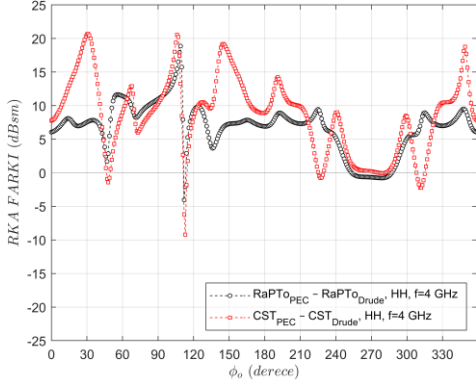
RKA değerleri Şekil 5.4.19 (a) Kartezyen grafik (b) polar grafik ile gösterilmiştir. RKA farkına ait değerler (c) Kartezyen, (d) histogram grafiği ile gösterilmiştir.



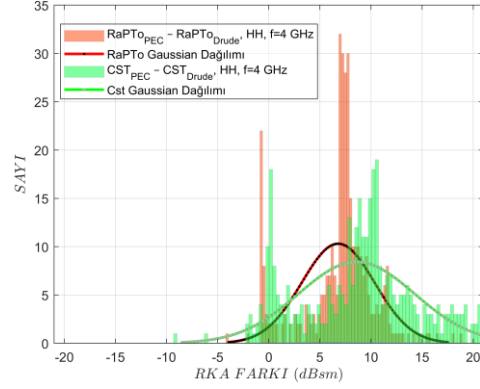
(a)



(b)



(c)



(d)

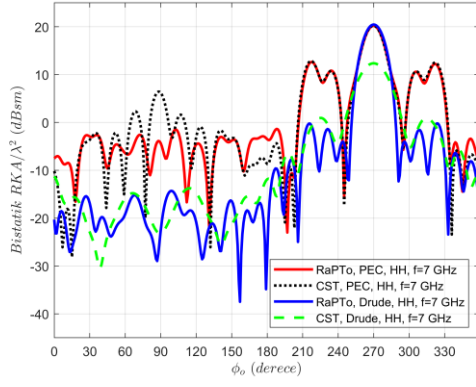
Şekil 5.4.19: Drude ile kaplı mükemmel iletken F-117, $\epsilon_{\infty} = 1$, $\omega = 20\pi \times 10^9$ rad/s, $\gamma = 500 \times 10^9$ Hz frekans dağıtıcı malzeme özelliklerinde, 4 GHz frekans kullanılarak, $x = 14.23$, $y = 19.65$, $z = 2.381$ cm boyutunda, $d = 0.1$ mm kaplama kalınlığında, yatay polarize ve $\theta_i = 90^\circ$ ve $\phi_i = 90^\circ$ gelen dalga açılarında, $\theta_o = 90^\circ$ ve $\phi_o = 0^\circ \rightarrow 359^\circ$ 1'er derece gözlem açılarında oluşan yatay polarize bistatik normalize RKA (a) Kartezyen, (b) polar grafiği, RKA farkı (c) Kartezyen, (d) histogram grafiği

Analiz edecek olursak;

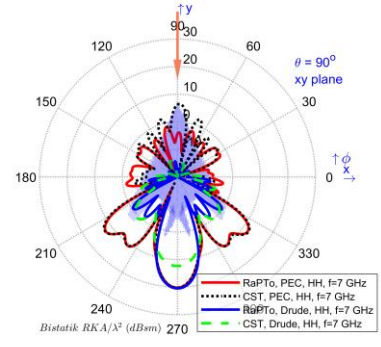
F-117 çarpışma frekansı 500 GHz ve plazma frekansı $20\pi \times 10^9$ rad/s olan frekans bağımlı bir malzeme ile 0.1 mm kalınlığında mükemmel iletken malzeme üzerine kaplanmıştır. Gelen dalga polarizasyonunun yatay ve frekansının 4 GHz olduğu durumda, RKA değerleri incelendiğinde 324 adet gözlem noktasında RKA değeri azalmıştır. Azalma miktarı 0.051933 ila 18.8723 dBsm aralığında ölçülmüştür. RKA azalması en çok 109. derecede en az 253. derecede gözlenmiştir. Ortalama RKA azalma miktarı 7.6278 dBsm'dir. RKA değerinin arttığı açı değerleri de olmuştur. RKA değeri 36 açıda artmıştır. Artış miktarı 0.064958 ila 4.0335 dBsm aralığında ölçülmüştür. RKA artışı en çok 112. derecede en az 287. derecede olmuştur. Ortalama RKA artışı miktarı 0.72498 dBsm'dir.

2. Operasyon Frekansı 7 GHz iken;

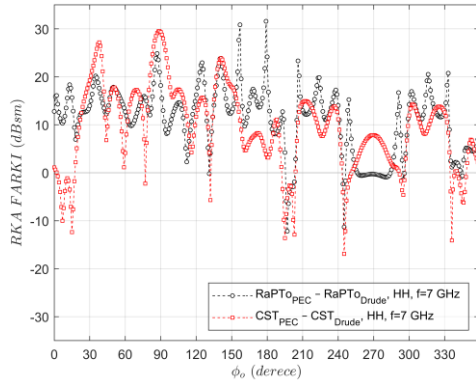
RKA değerleri Şekil 5.4.20 (a) Kartezyen grafik (b) polar grafik ile gösterilmiştir. RKA farkına ait değerler (c) Kartezyen, (d) histogram grafiği ile gösterilmiştir.



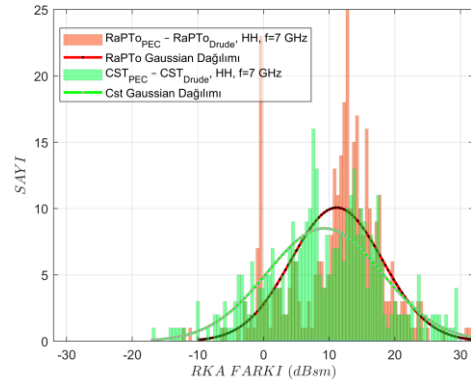
(a)



(b)



(c)



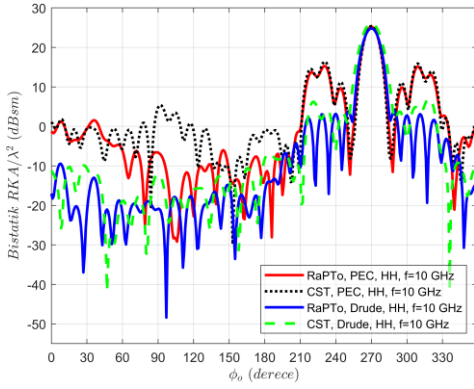
(d)

Şekil 5.4.20: Drude ile kaplı mükemmel iletken F-117, $\epsilon_{\infty} = 1$ F/m , $\omega = 20\pi \times 10^9$ rad/s , $\gamma = 500 \times 10^9$ Hz frekans dağıtıcı malzeme özelliklerinde, 7 GHz frekans kullanılarak, $x = 14.23$, $y = 19.65$, $z = 2.381$ cm boyutunda, $d = 0.1$ mm kaplama kalınlığında, yatay polarize ve $\theta_i = 90^\circ$ ve $\phi_i = 90^\circ$ gelen dalgaların açılarında, $\theta_o = 90^\circ$ ve $\phi_o = 0^\circ \rightarrow 359^\circ$ 1'er derece gözlem açıları arasında oluşan yatay polarize bistatik normalize RKA (a) Kartezyen, (b) polar grafiği, RKA farkı (c) Kartezyen, (d) histogram grafiği

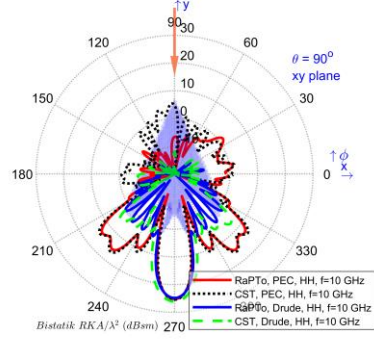
F-117 çarpışma frekansı 500 GHz ve plazma frekansı $20\pi \times 10^9$ rad/s olan frekans bağımlı bir malzeme ile 0.1 mm kalınlığında mükemmel iletken malzeme üzerine kaplanmıştır. Gelen dalganın polarizasyonunun yatay ve frekansının 7 GHz olduğu durumda, RKA değerleri incelendiğinde 316 adet gözlem noktasında RKA değeri azalmıştır. Azalma miktarı 0.027446 ila 31.5877 dBsm aralığında ölçülmüştür. RKA azalması en çok 179. derecede en az 256. derecede gözlenmiştir. Ortalama RKA azalma miktarı 12.9347 dBsm'dir. RKA değerinin arttığı açı değerleri de olmuştur. RKA değeri 44 açıda artmıştır. Artış miktarı 0.11033 ila 12.179 dBsm aralığında ölçülmüştür. RKA artışı en çok 197. derecede en az 296. derecede olmuştur. Ortalama RKA artış miktarı 1.6181 dBsm'dir.

3. Operasyon Frekansı 10 GHz iken;

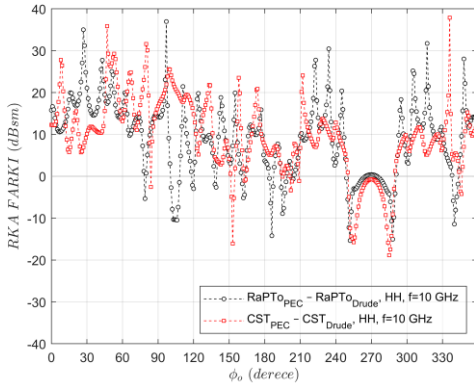
RKA değerleri Şekil 5.4.21 (a) Kartezyen grafik (b) polar grafik ile gösterilmiştir. RKA farkına ait değerler (c) Kartezyen, (d) histogram grafiği ile gösterilmiştir.



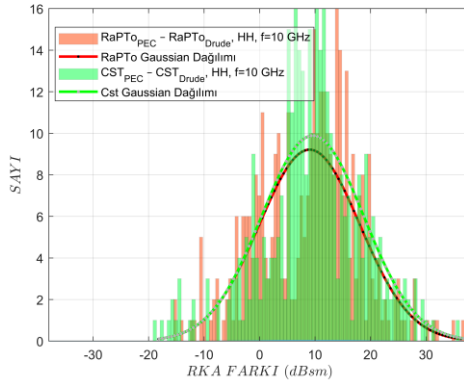
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 5.4.21: Drude ile kaplı mükemmel iletken F-117, $\epsilon_\infty = 1$, $F/m, \omega = 20\pi \times 10^9$ rad/s, $\gamma = 500 \times 10^9$ Hz frekans dağıtıcı malzeme özelliklerinde, 10 GHz frekans kullanılarak, $x = 14.23, y = 19.65, z = 2.381$ cm boyutunda, $d = 0.1$ mm kaplama kalınlığında, yatay polarize ve $\theta_i = 90^\circ$ ve $\phi_i = 90^\circ$ gelen dalga açılarında, $\theta_o = 90^\circ$ ve $\phi_o = 0^\circ \rightarrow 359^\circ$ 1'er derece gözlem açılarında oluşan yatay polarize bistatik normalize RKA (a) Kartezyen, (b) polar grafiği, RKA farkı (c) Kartezyen, (d) histogram grafiği

Analiz edecek olursak;

F-117 çarpışma frekansı 500 GHz ve plazma frekansı $20\pi \times 10^9$ rad/s olan frekans bağımlı bir malzeme ile 0.1 mm kalınlığında mükemmel iletken malzeme üzerine kaplanmıştır.

Gelen dalga polarizasyonunun yatay ve frekansının 10 GHz olduğu durumda, RKA değerleri incelendiğinde 295 adet gözlem noktasında RKA değeri azalmıştır. Azalma miktarı 0.11642 ila 36.9629 dBsm aralığında ölçülmüştür. RKA azalması en çok 97. derecede en az 274. derecede gözlenmiştir. Ortalama RKA azalma miktarı 12.0146 dBsm'dir. RKA değerinin arttığı açı değerleri de olmuştur. RKA değeri 65 açıda artmıştır. Artış miktarı 0.0035619 ila 15.3533 dBsm aralığında ölçülmüştür. RKA artışı en çok 252. derecede en az 265. derecede olmuştur. Ortalama RKA artış miktarı 4.6098 dBsm'dir.

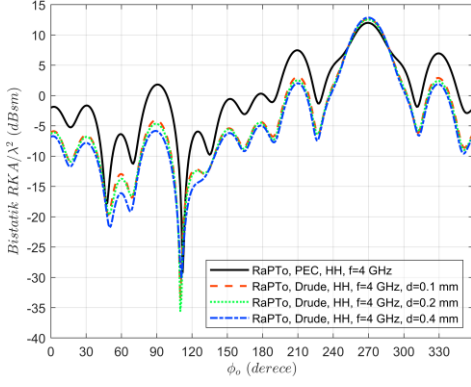
5.4.1.6 Kaplama Kalınlığı 0.1, 0.2, 0.4 mm ve Çarpışma Frekansı 10 GHz olan F-117

Bu kısımda kaplama kalınlığı göz önünde bulundurularak bistatik RKA değişimi analiz edilmiştir. Analizde kullanılan F-117 kaplama kalınlığına göre Şekil 5.4.1 ($d = 0.1 \text{ mm}$), Şekil 5.4.6 ($d = 0.2 \text{ mm}$) ve Şekil 5.4.11'de ($d = 0.4 \text{ mm}$) gösterilen kübik elemanlar formuyla aynıdır.

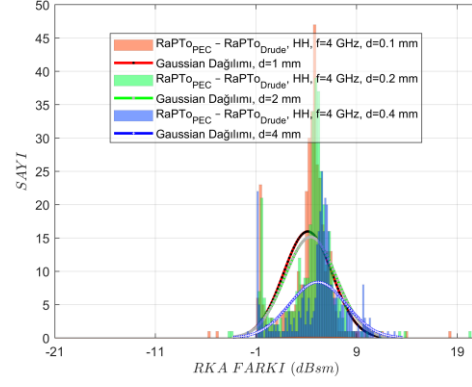
Drude ile kaplı mükemmel iletken F-117, $\epsilon_{\infty} = 1$, F/m , $\omega = 20\pi \times 10^9 \text{ rad/s}$, $\gamma = 10 \times 10^9 \text{ Hz}$ frekans dağıtıcı malzeme özelliklerinde, aşağıdaki belirtilen frekans değerlerinde kullanılarak, $x = 14.23$, $y = 19.65$, $z = 2.381 \text{ cm}$ boyutunda, $d = 0.1, 0.2, 0.4 \text{ mm}$ kaplama kalınlıklarında, yatay polarize ve $\theta_i = 90^\circ$ ve $\phi_i = 90^\circ$ gelen dalga açılarında, $\theta_o = 90^\circ$ ve $\phi_o = 0^\circ \rightarrow 359^\circ$ 1'er derece gözlem açılarında oluşan yatay polarize bistatik RKA değerleri hesaplanmıştır.

1. Operasyon Frekansı 4 GHz iken;

RKA değerleri Şekil 5.4.22 (a) Kartezyen grafik ile gösterilmiştir. RKA farkına ait değerler (b) histogram grafiği ile gösterilmiştir.



(a)

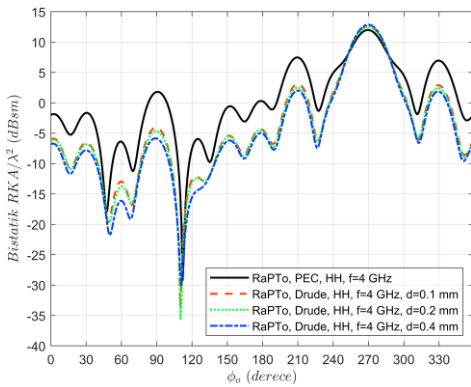


(b)

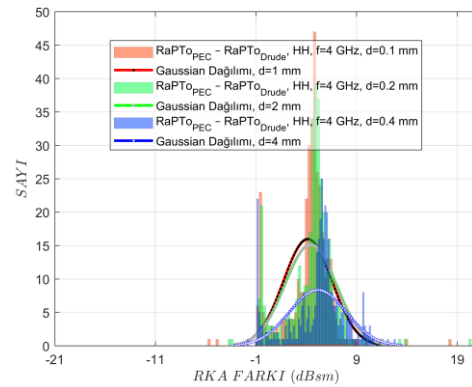
Şekil 5.4.22: Drude ile kaplı mükemmel iletken F-117, $\epsilon_\infty = 1 F/m$, $\omega = 20\pi \times 10^9 \text{ rad/s}$, $\gamma = 10 \times 10^9 \text{ Hz}$ frekans dağıtıcı malzeme özelliklerinde, 4 GHz frekans kullanılarak, $x = 14.23, y = 19.65, z = 2.381 \text{ cm}$ boyutunda, $d = 0.1, 0.2, 0.4 \text{ mm}$ kaplama kalınlıklarında, yatay polarize ve $\theta_i = 90^\circ$ ve $\phi_i = 90^\circ$ gelen dalga açılarında, $\theta_o = 90^\circ$ ve $\phi_o = 0^\circ \rightarrow 359^\circ$ 1'er derece gözlem açılarında oluşan yatay polarize bistatik normalize RKA (a) Kartezyen, (b) histogram grafiği

2. Operasyon Frekansı 4 GHz iken;

RKA değerleri Şekil 5.4.22 (a) Kartezyen grafik ile gösterilmiştir. RKA farkına ait değerler (b) histogram grafiği ile gösterilmiştir.



(a)



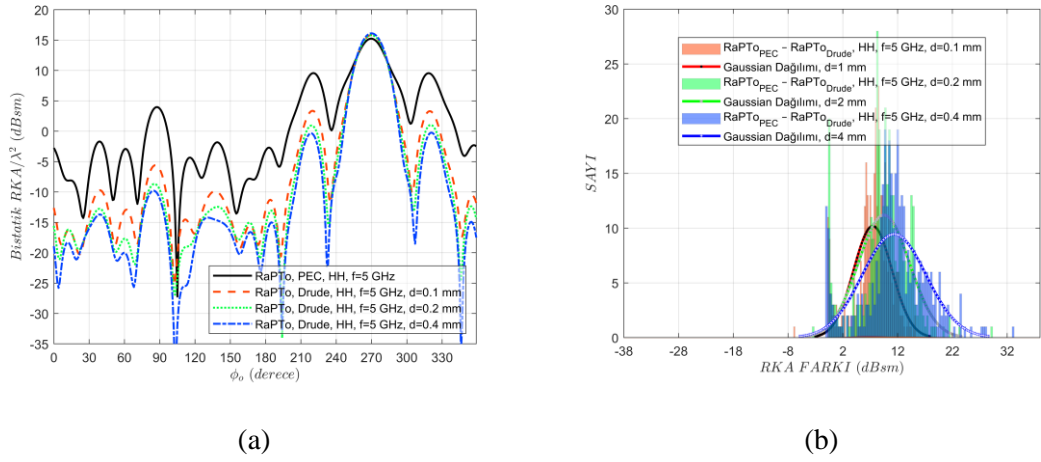
(b)

Şekil 5.4.23: Drude ile kaplı mükemmel iletken F-117, $\epsilon_\infty = 1 F/m$, $\omega = 20\pi \times 10^9 \text{ rad/s}$, $\gamma = 10 \times 10^9 \text{ Hz}$ frekans dağıtıcı malzeme özelliklerinde, 4 GHz frekans kullanılarak, $x = 14.23, y = 19.65, z = 2.381 \text{ cm}$ boyutunda, $d = 0.1, 0.2, 0.4 \text{ mm}$ kaplama kalınlıklarında, yatay polarize ve $\theta_i = 90^\circ$ ve $\phi_i = 90^\circ$ gelen dalga açılarında, $\theta_o = 90^\circ$ ve $\phi_o = 0^\circ \rightarrow 359^\circ$

1'er derece gözlem açılarında oluşan yatay polarize bistatik normalize RKA (a) Kartezyen, (b) histogram grafiği

3. Operasyon Frekansı 5 GHz iken;

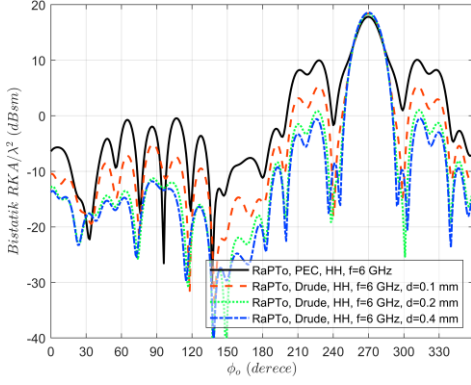
RKA değerleri Şekil 5.4.23 (a) Kartezyen grafik ile gösterilmiştir. RKA farkına ait değerler (b) histogram grafiği ile gösterilmiştir.



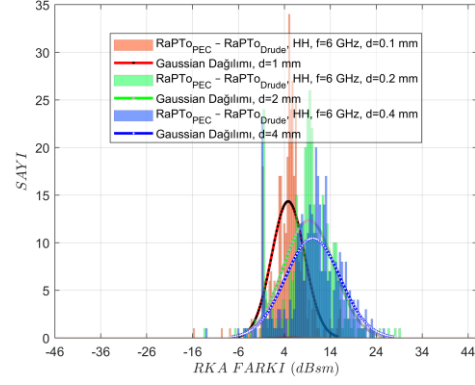
Şekil 5.4.24: Drude ile kaplı mükemmel iletken F-117, $\epsilon_{\infty} = 1 F/m$, $\omega = 20\pi \times 10^9 rad/s$, $\gamma = 10 \times 10^9 Hz$ frekans dağıtıcı malzeme özelliklerinde, 5 GHz frekans kullanılarak, $x = 14.23, y = 19.65, z = 2.381 cm$ boyutunda, $d = 0.1, 0.2, 0.4 mm$ kaplama kalınlıklarında, yatay polarize ve $\theta_i = 90^\circ$ ve $\phi_i = 90^\circ$ gelen dalga açılarında, $\theta_o = 90^\circ$ ve $\phi_o = 0^\circ \rightarrow 359^\circ$ 1'er derece gözlem açılarında oluşan yatay polarize bistatik normalize RKA (a) Kartezyen, (b) histogram grafiği

4. Operasyon Frekansı 6 GHz iken;

RKA değerleri Şekil 5.4.24 (a) Kartezyen grafik ile gösterilmiştir. RKA farkına ait değerler (b) histogram grafiği ile gösterilmiştir.



(a)

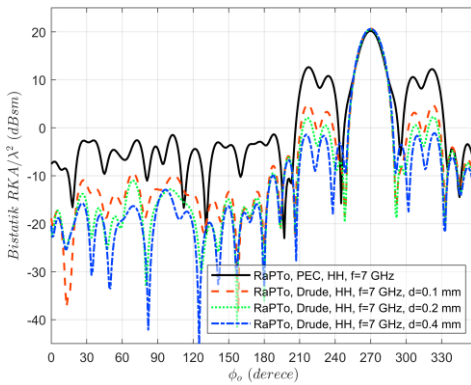


(b)

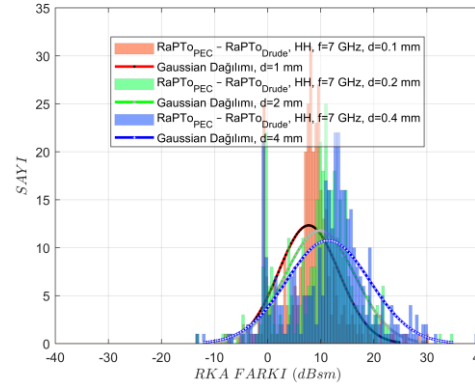
Şekil 5.4.25: Drude ile kaplı mükemmel iletken F-117, $\epsilon_\infty = 1 F/m$, $\omega = 20\pi \times 10^9 \text{ rad/s}$, $\gamma = 10 \times 10^9 \text{ Hz}$ frekans dağıtıcı malzeme özelliklerinde, 6 GHz frekans kullanılarak, $x = 14.23, y = 19.65, z = 2.381 \text{ cm}$ boyutunda, $d = 0.1, 0.2, 0.4 \text{ mm}$ kaplama kalınlıklarında, yatay polarize ve $\theta_i = 90^\circ$ ve $\phi_i = 90^\circ$ gelen dalga açılarında, $\theta_o = 90^\circ$ ve $\phi_o = 0^\circ \rightarrow 359^\circ$ 1'er derece gözlem açıları oluşmuş yatay polarize bistatik normalize RKA (a) Kartezyen, (b) histogram grafiği

5. Operasyon Frekansı 7 GHz iken;

RKA değerleri Şekil 5.4.25 (a) Kartezyen grafik ile gösterilmiştir. RKA farkına ait değerler (b) histogram grafiği ile gösterilmiştir.



(a)



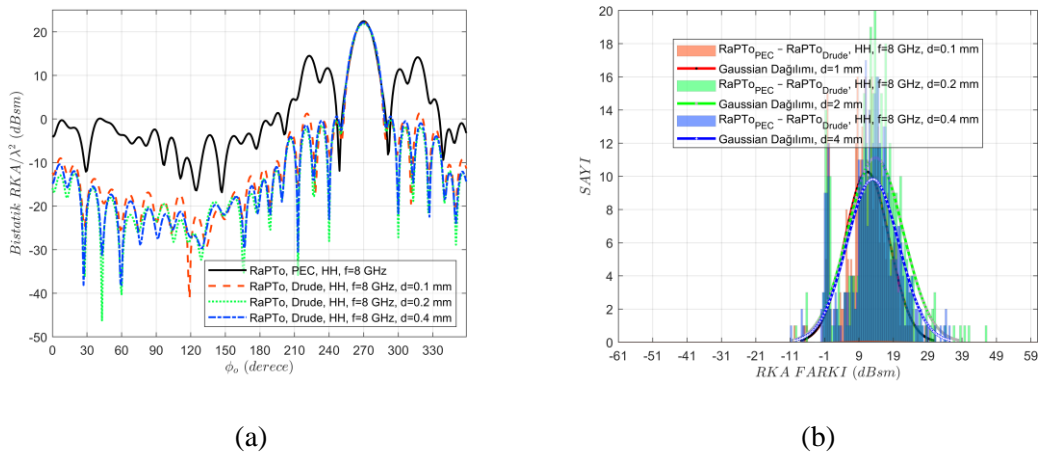
(b)

Şekil 5.4.26: Drude ile kaplı mükemmel iletken F-117, $\epsilon_\infty = 1 F/m$, $\omega = 20\pi \times 10^9 \text{ rad/s}$, $\gamma = 10 \times 10^9 \text{ Hz}$ frekans dağıtıcı malzeme özelliklerinde, 7 GHz frekans kullanılarak, $x = 14.23, y = 19.65, z = 2.381 \text{ cm}$ boyutunda, $d = 0.1, 0.2, 0.4 \text{ mm}$ kaplama kalınlıklarında,

yatay polarize ve $\theta_i = 90^\circ$ ve $\phi_i = 90^\circ$ gelen dalga açılarında, $\theta_o = 90^\circ$ ve $\phi_o = 0^\circ \rightarrow 359^\circ$ 1'er derece gözlem açılarında oluşan yatay polarize bistatik normalize RKA (a) Kartezyen, (b) histogram grafiği

6. Operasyon Frekansı 8 GHz iken;

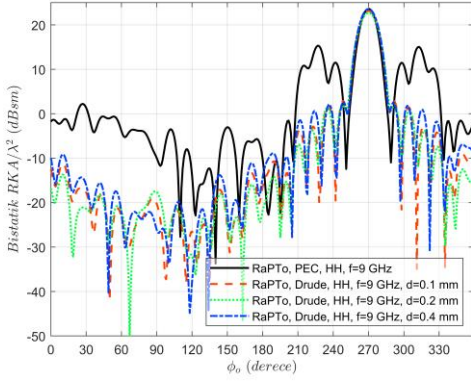
RKA değerleri Şekil 5.4.26 (a) Kartezyen grafik ile gösterilmiştir. RKA farkına ait değerler (b) histogram grafiği ile gösterilmiştir.



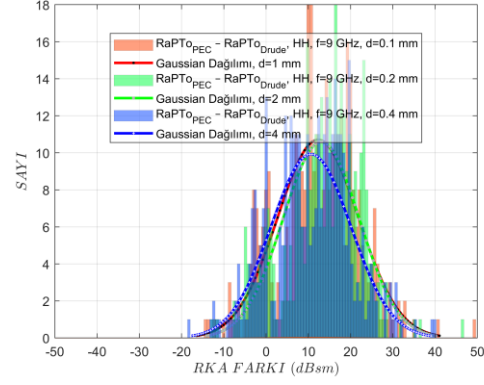
Şekil 5.4.27: Drude ile kaplı mükemmel iletken F-117, $\epsilon_\infty = 1$ F/m, $\omega = 20\pi \times 10^9$ rad/s, $\gamma = 10 \times 10^9$ Hz frekans dağıtıcı malzeme özelliklerinde, 8 GHz frekans kullanılarak, $x = 14.23, y = 19.65, z = 2.381$ cm boyutunda, $d = 0.1, 0.2, 0.4$ mm kaplama kalınlıklarında, yatay polarize ve $\theta_i = 90^\circ$ ve $\phi_i = 90^\circ$ gelen dalga açılarında, $\theta_o = 90^\circ$ ve $\phi_o = 0^\circ \rightarrow 359^\circ$ 1'er derece gözlem açılarında oluşan yatay polarize bistatik normalize RKA (a) Kartezyen, (b) histogram grafiği

7. Operasyon Frekansı 9 GHz iken;

RKA değerleri Şekil 5.4.27 (a) Kartezyen grafik ile gösterilmiştir. RKA farkına ait değerler (b) histogram grafiği ile gösterilmiştir.



(a)

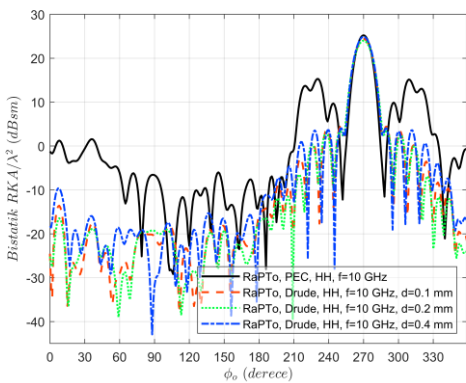


(b)

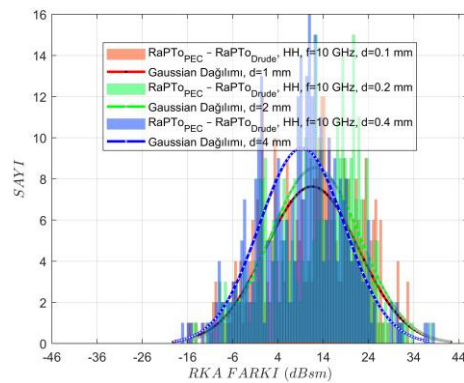
Şekil 5.4.28: Drude ile kaplı mükemmel iletken F-117, $\epsilon_\infty = 1$, $F/m, \omega = 20\pi \times 10^9$ rad/s, $\gamma = 10 \times 10^9$ Hz frekans dağıtıcı malzeme özelliklerinde, 9 GHz frekans kullanılarak, $x = 14.23, y = 19.65, z = 2.381$ cm boyutunda, $d = 0.1, 0.2, 0.4$ mm kaplama kalınlıklarında, yatay polarize ve $\theta_i = 90^\circ$ ve $\phi_i = 90^\circ$ gelen dalga açılarında, $\theta_o = 90^\circ$ ve $\phi_o = 0^\circ \rightarrow 359^\circ$ 1'er derece gözlem açılarında oluşan yatay polarize bistatik normalize RKA (a) Kartezyen, (b) histogram grafiği

8. Operasyon Frekansı 10 GHz iken;

RKA değerleri Şekil 5.4.28 (a) Kartezyen grafik ile gösterilmiştir. RKA farkına ait değerler (b) histogram grafiği ile gösterilmiştir.



(a)



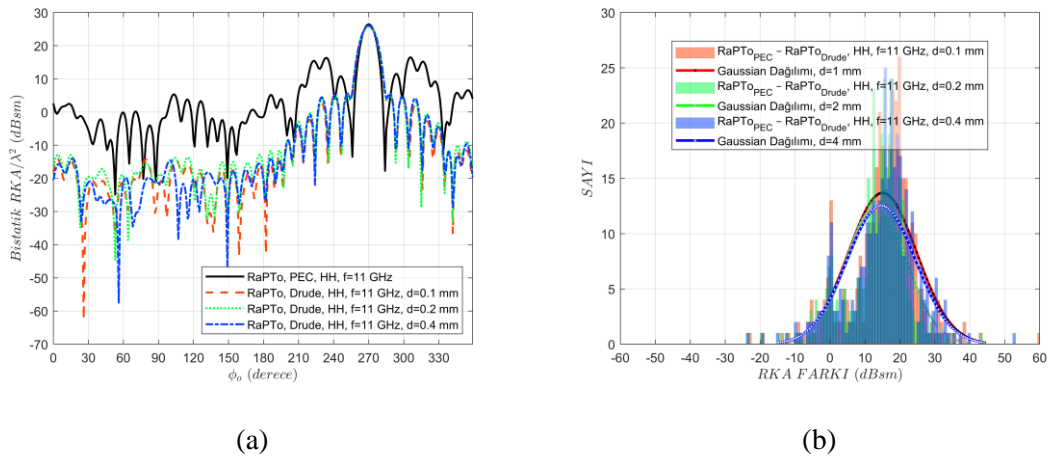
(b)

Şekil 5.4.29: Drude ile kaplı mükemmel iletken F-117, $\epsilon_\infty = 1$, $F/m, \omega = 20\pi \times 10^9$ rad/s, $\gamma = 10 \times 10^9$ Hz frekans dağıtıcı malzeme özelliklerinde, 10 GHz frekans kullanılarak, $x = 14.23, y = 19.65, z = 2.381$ cm boyutunda, $d = 0.1, 0.2, 0.4$ mm kaplama kalınlıklarında,

yatay polarize ve $\theta_i = 90^\circ$ ve $\phi_i = 90^\circ$ gelen dalga açılarında, $\theta_o = 90^\circ$ ve $\phi_o = 0^\circ \rightarrow 359^\circ$ 1'er derece gözlem açılarında oluşan yatay polarize bistatik normalize RKA (a) Kartezyen, (b) histogram grafiği

9. Operasyon Frekansı 11 GHz iken;

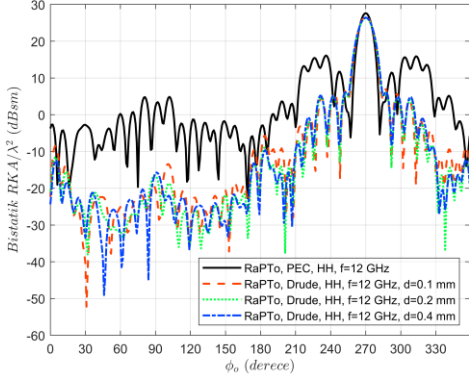
RKA değerleri Şekil 5.4.29 (a) Kartezyen grafik ile gösterilmiştir. RKA farkına ait değerler (b) histogram grafiği ile gösterilmiştir.



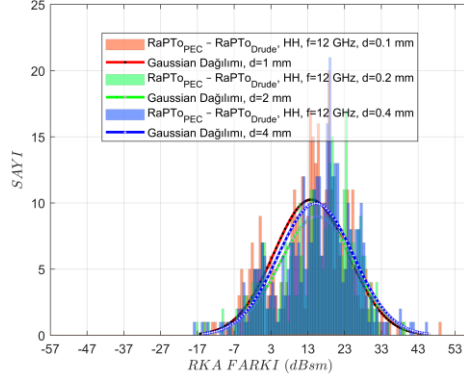
Şekil 5.4.30: Drude ile kaplı mükemmel iletken F-117, $\epsilon_\infty = 1$, $\omega = 20\pi \times 10^9$ rad/s, $\gamma = 10 \times 10^9$ Hz frekans dağıtıcı malzeme özelliklerinde, 11 GHz frekans kullanılarak, $x = 14.23$, $y = 19.65$, $z = 2.381$ cm boyutunda, $d = 0.1, 0.2, 0.4$ mm kaplama kalınlıklarında, yatay polarize ve $\theta_i = 90^\circ$ ve $\phi_i = 90^\circ$ gelen dalga açılarında, $\theta_o = 90^\circ$ ve $\phi_o = 0^\circ \rightarrow 359^\circ$ 1'er derece gözlem açılarında oluşan yatay polarize bistatik normalize RKA (a) Kartezyen, (b) histogram grafiği

10. Operasyon Frekansı 12 GHz iken;

RKA değerleri Şekil 5.4.30 (a) Kartezyen grafik ile gösterilmiştir. RKA farkına ait değerler (b) histogram grafiği ile gösterilmiştir.



(a)

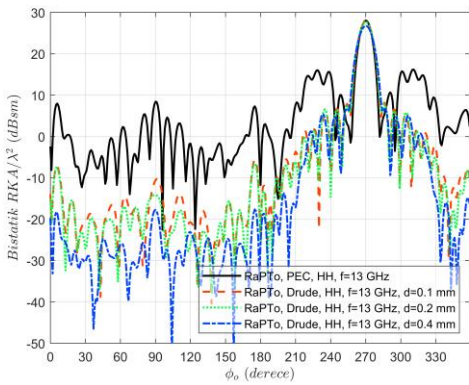


(b)

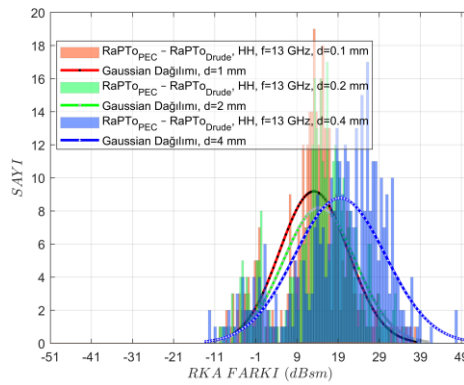
Şekil 5.4.31: Drude ile kaplı mükemmel iletken F-117, $\epsilon_\infty = 1$ F/m , $\omega = 20\pi \times 10^9$ rad/s , $\gamma = 10 \times 10^9$ Hz frekans dağıtıcı malzeme özelliklerinde, 12 GHz frekans kullanılarak, $x = 14.23$, $y = 19.65$, $z = 2.381$ cm boyutunda, $d = 0.1, 0.2, 0.4$ mm kaplama kalınlıklarında, yatay polarize ve $\theta_i = 90^\circ$ ve $\phi_i = 90^\circ$ gelen dalga açılarında, $\theta_o = 90^\circ$ ve $\phi_o = 0^\circ \rightarrow 359^\circ$ 1'er derece gözlem açıları oluşmuş yatay polarize bistatik normalize RKA (a) Kartezyen, (b) histogram grafiği

11. Operasyon Frekansı 13 GHz iken;

RKA değerleri Şekil 5.4.31 (a) Kartezyen grafik ile gösterilmiştir. RKA farkına ait değerler (b) histogram grafiği ile gösterilmiştir.



(a)



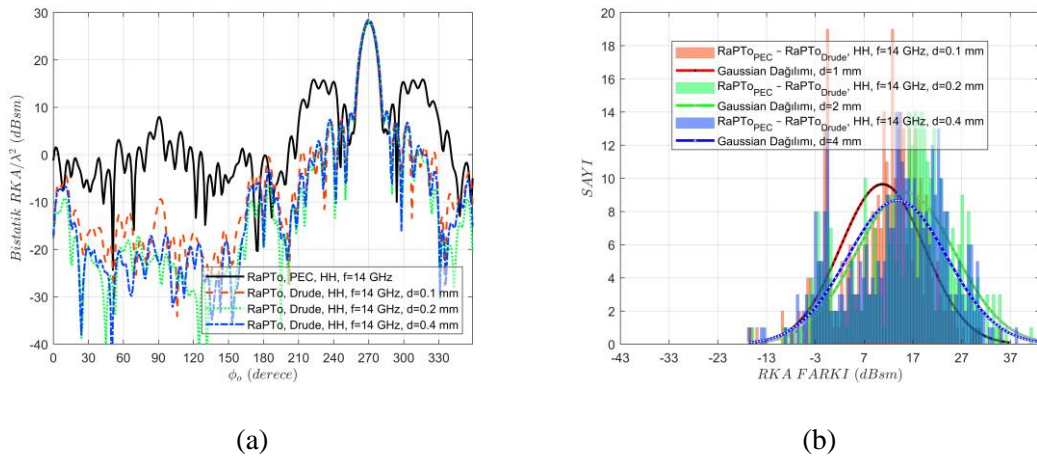
(b)

Şekil 5.4.32: Drude ile kaplı mükemmel iletken F-117, $\epsilon_\infty = 1$ F/m , $\omega = 20\pi \times 10^9$ rad/s , $\gamma = 10 \times 10^9$ Hz frekans dağıtıcı malzeme özelliklerinde, 13 GHz frekans kullanılarak, $x = 14.23$, $y = 19.65$, $z = 2.381$ cm boyutunda, $d = 0.1, 0.2, 0.4$ mm kaplama kalınlıklarında,

yatay polarize ve $\theta_i = 90^\circ$ ve $\phi_i = 90^\circ$ gelen dalga açılarında, $\theta_o = 90^\circ$ ve $\phi_o = 0^\circ \rightarrow 359^\circ$ 1'er derece gözlem açılarında oluşan yatay polarize bistatik normalize RKA (a) Kartezyen, (b) histogram grafiği

12. Operasyon Frekansı 14 GHz iken;

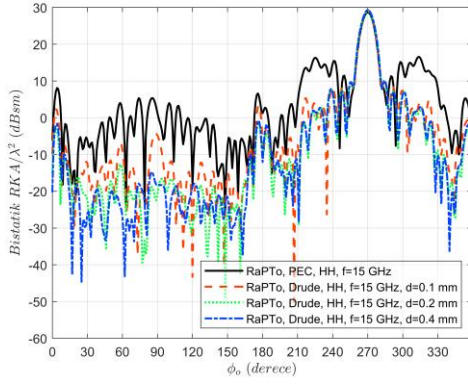
RKA değerleri Şekil 5.4.32 (a) Kartezyen grafik ile gösterilmiştir. RKA farkına ait değerler (b) histogram grafiği ile gösterilmiştir.



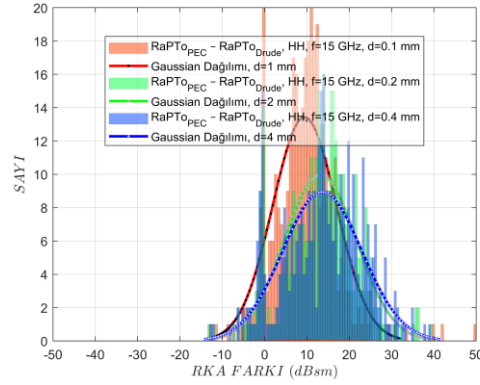
Şekil 5.4.33: Drude ile kaplı mükemmel iletken F-117, $\epsilon_\infty = 1$, $\omega = 20\pi \times 10^9$ rad/s, $\gamma = 10 \times 10^9$ Hz frekans dağıtıcı malzeme özelliklerinde, 14 GHz frekans kullanılarak, $x = 14.23$, $y = 19.65$, $z = 2.381$ cm boyutunda, $d = 0.1, 0.2, 0.4$ mm kaplama kalınlıklarında, yatay polarize ve $\theta_i = 90^\circ$ ve $\phi_i = 90^\circ$ gelen dalga açılarında, $\theta_o = 90^\circ$ ve $\phi_o = 0^\circ \rightarrow 359^\circ$ 1'er derece gözlem açılarında oluşan yatay polarize bistatik normalize RKA (a) Kartezyen, (b) histogram grafiği

13. Operasyon Frekansı 15 GHz iken;

RKA değerleri Şekil 5.4.33 (a) Kartezyen grafik ile gösterilmiştir. RKA farkına ait değerler (b) histogram grafiği ile gösterilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 5.4.34: Drude ile kaplı mükemmel iletken F-117, $\epsilon_\infty = 1$, $f = 15 \text{ GHz}$, $\omega = 20\pi \times 10^9 \text{ rad/s}$, $\gamma = 10 \times 10^9 \text{ Hz}$ frekans dağıtıcı malzeme özelliklerinde, 15 GHz frekans kullanılarak, $x = 14.23$, $y = 19.65$, $z = 2.381 \text{ cm}$ boyutunda, $d = 0.1, 0.2, 0.4 \text{ mm}$ kaplama kalınlıklarında, yatay polarize ve $\theta_i = 90^\circ$ ve $\phi_i = 90^\circ$ gelen dalga açılarında, $\theta_o = 90^\circ$ ve $\phi_o = 0^\circ \rightarrow 359^\circ$ 1'er derece gözlem açılarında oluşan yatay polarize bistatik normalize RKA (a) Kartezyen, (b) histogram grafiği

Histogram grafikleri analiz edildiğinde kaplama kalınlığı ve operasyon frekansına göre çıkan RKA değerlerinin ortalama değerleri ve standart sapma değerleri Çizelge 5.1'de gösterilmiştir. Burada hedefin tamamıyla iletken olduğu durumda hesaplanan RKA değeri ile Drude malzeme ile kaplama sonucunda hesaplanan RKA değeri birbirinden çıkarılmıştır. Bu yüzden pozitif ortalama değer RKA'nın azaldığını göstermektedir.

Çizelge 5.1. Kaplama Kalınlığına göre Normal RKA Dağılımı (Çarpışma Frekansı = 10 GHz)

Frekans (GHz)	Kaplama Kalınlığına göre Normal RKA Dağılımı (dBsm)					
	d* = 0.1 mm		d = 0.2 mm		d = 0.4 mm	
	Ortalama Değer	Standart Sapma	Ortalama Değer	Standart Sapma	Ortalama Değer	Standart Sapma
4	4.146	2.417	4.426	2.549	5.147	2.812
5	7.465	3.494	9.487	4.696	11.363	5.821
6	4.813	3.583	9.345	5.543	10.177	5.949
7	7.737	5.685	9.848	6.555	11.400	7.880
8	11.364	6.416	13.791	8.015	13.023	7.563
9	12.300	9.586	13.044	9.052	10.629	9.460

10	11.521	10.237	12.196	9.911	9.282	9.425
11	15.040	9.756	13.268	8.620	14.677	9.819
12	13.887	10.071	15.510	10.143	15.177	10.225
13	13.106	8.331	14.446	8.784	19.484	11.026
14	10.752	8.617	15.497	10.064	13.805	10.180
15	9.451	7.523	13.204	8.512	13.622	9.330

*: Kaplama kalınlığının sembolü olarak “d” kullanılmıştır.

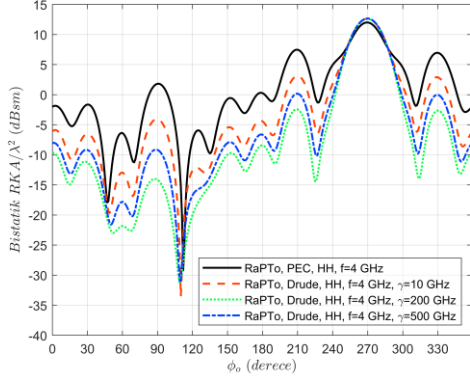
5.4.1.7 Kaplama Kalınlığı 0.1 mm ve Çarpışma Frekansı 10, 200, 500 GHz olan F-117

Bu kısımda çarpışma frekansı göz önünde bulundurularak bistatik RKA değişimi analiz edilmiştir. Analizde kullanılan F-117 Şekil 5.4.1’de gösterilen kübik elemanlar formuyla aynıdır.

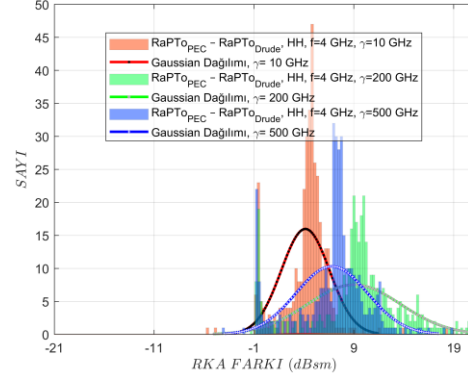
Drude ile kaplı mükemmel iletken F-117, $\epsilon_{\infty} = 1$ F/m , $\omega = 20\pi \times 10^9$ rad/s , $\gamma = 10, 200, 500$ GHz frekans dağıtıcı malzeme özelliklerinde, aşağıdaki belirtilen frekans değerlerinde kullanılarak, $x = 14.23, y = 19.65, z = 2.381$ cm boyutunda, $d = 0.1$ mm kaplama kalınlığında, yatay polarize ve $\theta_i = 90^\circ$ ve $\phi_i = 90^\circ$ gelen dalga açılarında, $\theta_o = 90^\circ$ ve $\phi_o = 0^\circ \rightarrow 359^\circ$ 1’er derece gözlem açılarındaki oluşan yatay polarize bistatik RKA değerleri hesaplanmıştır.

1. Operasyon Frekansı 4 GHz iken;

RKA değerleri Şekil 5.4.34 (a) Kartezyen grafik ile gösterilmiştir. RKA farkına ait değerler (b) histogram grafiği ile gösterilmiştir.



(a)

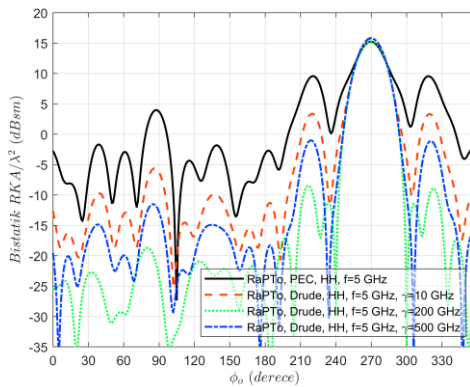


(b)

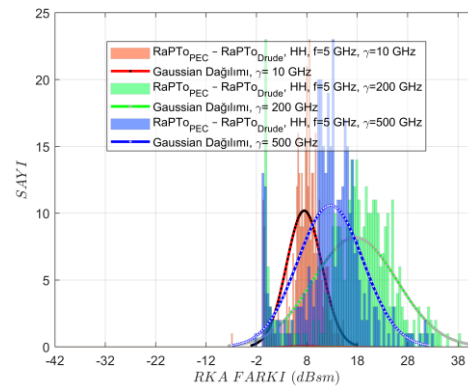
Şekil 5.4.35: Drude ile kaplı mükemmel iletken F-117, $\epsilon_{\infty} = 1 F/m, \omega = 20\pi \times 10^9 \text{ rad/s}$, $\gamma = 10, 200, 500 \text{ GHz}$ frekans dağıtıcı malzeme özelliklerinde, 4 GHz frekans kullanılarak, $x = 14.23, y = 19.65, z = 2.381 \text{ cm}$ boyutunda, $d = 0.1 \text{ mm}$ kaplama kalınlığında, yatay polarize ve $\theta_i = 90^\circ$ ve $\phi_i = 90^\circ$ gelen dalga açılarında, $\theta_o = 90^\circ$ ve $\phi_o = 0^\circ \rightarrow 359^\circ$ 1'er derece gözlem açılarında oluşan yatay polarize bistatik normalize RKA (a) Kartezyen, (b) histogram grafiği

2. Operasyon Frekansı 5 GHz iken;

RKA değerleri Şekil 5.4.35 (a) Kartezyen grafik ile gösterilmiştir. RKA farkına ait değerler (b) histogram grafiği ile gösterilmiştir.



(a)



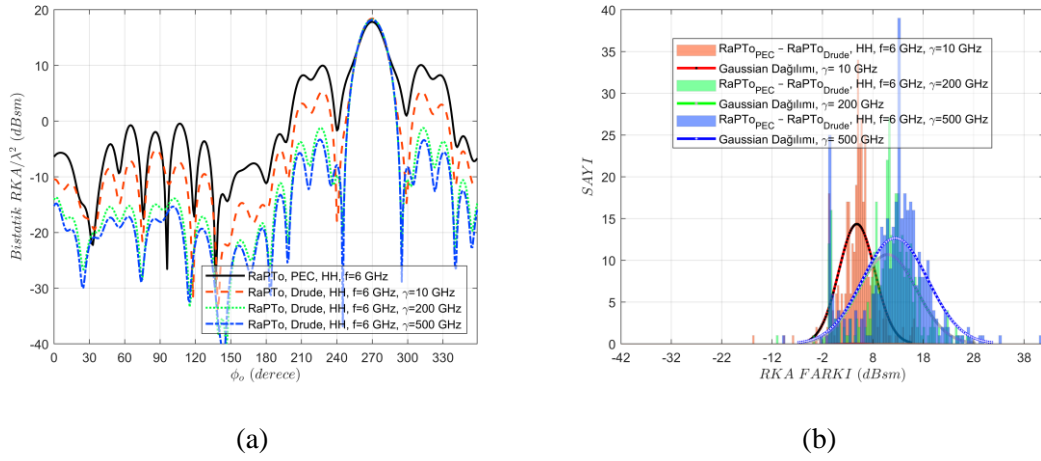
(b)

Şekil 5.4.36 : Drude ile kaplı mükemmel iletken F-117, $\epsilon_{\infty} = 1 F/m, \omega = 20\pi \times 10^9 \text{ rad/s}$, $\gamma = 10, 200, 500 \text{ GHz}$ frekans dağıtıcı malzeme özelliklerinde, 5 GHz frekans kullanılarak, $x = 14.23, y = 19.65, z = 2.381 \text{ cm}$ boyutunda, $d = 0.1 \text{ mm}$ kaplama kalınlığında, yatay

polarize ve $\theta_i = 90^\circ$ ve $\phi_i = 90^\circ$ gelen dalga açılarında, $\theta_o = 90^\circ$ ve $\phi_o = 0^\circ \rightarrow 359^\circ$ 1'er derece gözlem açılarında oluşan yatay polarize bistatik normalize RKA (a) Kartezyen, (b) histogram grafiği

3. Operasyon Frekansı 6 GHz iken;

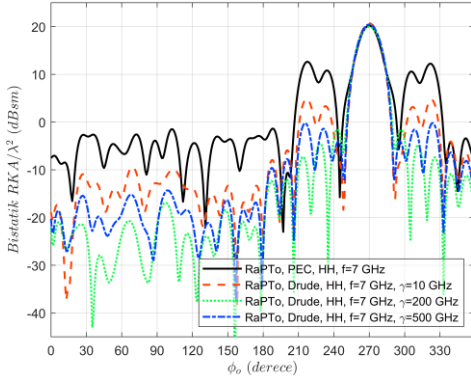
RKA değerleri Şekil 5.4.36 (a) Kartezyen grafik ile gösterilmiştir. RKA farkına ait değerler (b) histogram grafiği ile gösterilmiştir.



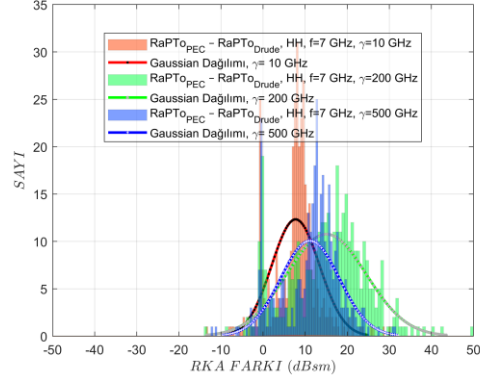
Şekil 5.4.37: Drude ile kaplı mükemmel iletken F-117, $\epsilon_\infty = 1$ F/m , $\omega = 20\pi \times 10^9$ rad/s , $\gamma = 10, 200, 500$ GHz frekans dağıtıcı malzeme özelliklerinde, 6 GHz frekans kullanılarak, $x = 14.23, y = 19.65, z = 2.381$ cm boyutunda, $d = 0.1$ mm kaplama kalınlığında, yatay polarize ve $\theta_i = 90^\circ$ ve $\phi_i = 90^\circ$ gelen dalga açılarında, $\theta_o = 90^\circ$ ve $\phi_o = 0^\circ \rightarrow 359^\circ$ 1'er derece gözlem açılarında oluşan yatay polarize bistatik normalize RKA (a) Kartezyen, (b) histogram grafiği

4. Operasyon Frekansı 7 GHz iken;

RKA değerleri Şekil 5.4.37 (a) Kartezyen grafik ile gösterilmiştir. RKA farkına ait değerler (b) histogram grafiği ile gösterilmiştir.



(a)

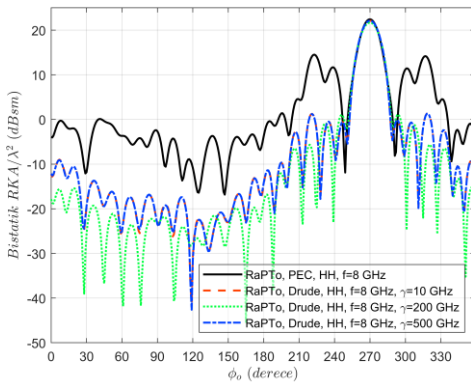


(b)

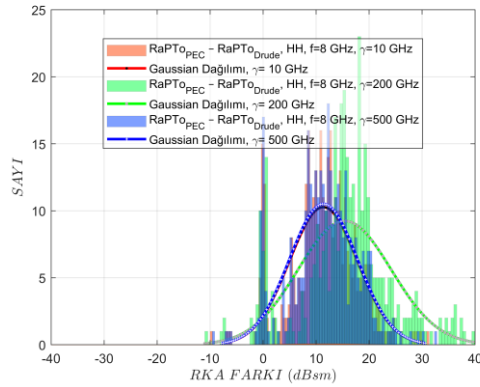
Şekil 5.4.38: Drude ile kaplı mükemmel iletken F-117, $\epsilon_{\infty} = 1$ F/m , $\omega = 20\pi \times 10^9$ rad/s , $\gamma = 10, 200, 500$ GHz frekans dağıtıcı malzeme özelliklerinde, 7 GHz frekans kullanılarak, $x = 14.23, y = 19.65, z = 2.381$ cm boyutunda, $d = 0.1$ mm kaplama kalınlığında, yatay polarize ve $\theta_i = 90^\circ$ ve $\phi_i = 90^\circ$ gelen dalga açılarında, $\theta_o = 90^\circ$ ve $\phi_o = 0^\circ \rightarrow 359^\circ$ 1'er derece gözlem açılarında oluşan yatay polarize bistatik normalize RKA (a) Kartezyen, (b) histogram grafiği

5. Operasyon Frekansı 8 GHz iken;

RKA değerleri Şekil 5.4.38 (a) Kartezyen grafik ile gösterilmiştir. RKA farkına ait değerler (b) histogram grafiği ile gösterilmiştir.



(a)



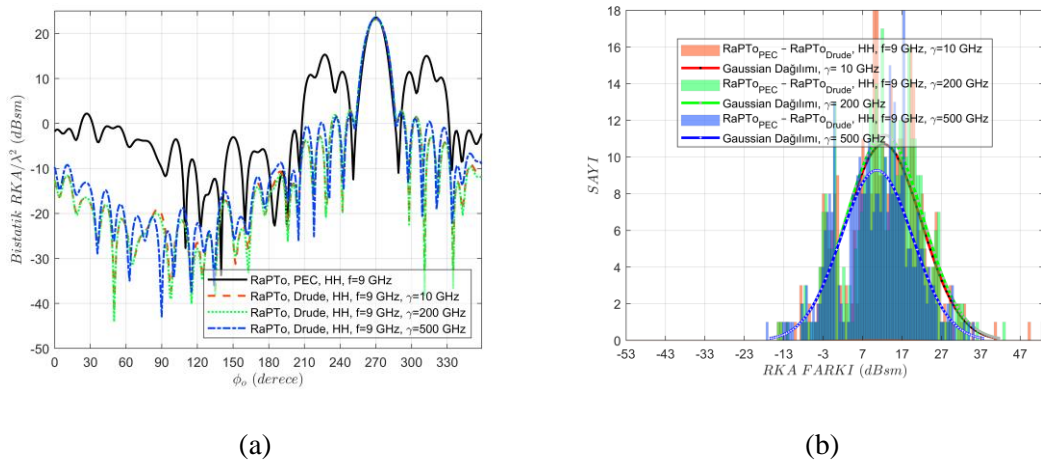
(b)

Şekil 5.4.39: Drude ile kaplı mükemmel iletken F-117, $\epsilon_{\infty} = 1$ F/m , $\omega = 20\pi \times 10^9$ rad/s , $\gamma = 10, 200, 500$ GHz frekans dağıtıcı malzeme özelliklerinde, 8 GHz frekans kullanılarak, $x = 14.23, y = 19.65, z = 2.381$ cm boyutunda, $d = 0.1$ mm kaplama kalınlığında, yatay

polarize ve $\theta_i = 90^\circ$ ve $\phi_i = 90^\circ$ gelen dalga açılarında, $\theta_o = 90^\circ$ ve $\phi_o = 0^\circ \rightarrow 359^\circ$ 1'er derece gözlem açılarında oluşan yatay polarize bistatik normalize RKA (a) Kartezyen, (b) histogram grafiği

6. Operasyon Frekansı 9 GHz iken;

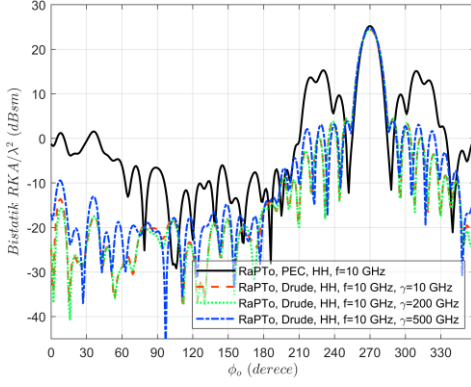
RKA değerleri Şekil 5.4.39 (a) Kartezyen grafik ile gösterilmiştir. RKA farkına ait değerler (b) histogram grafiği ile gösterilmiştir.



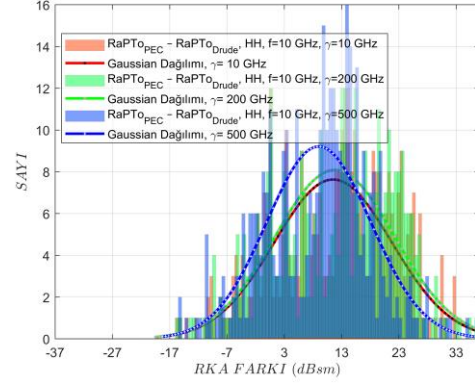
Şekil 5.4.40: Drude ile kaplı mükemmel iletken F-117, $\epsilon_\infty = 1$, $\omega = 20\pi \times 10^9$ rad/s, $\gamma = 10, 200, 500$ GHz frekans dağıtıcı malzeme özelliklerinde, 9 GHz frekans kullanılarak, $x = 14.23, y = 19.65, z = 2.381$ cm boyutunda, $d = 0.1$ mm kaplama kalınlığında, yatay polarize ve $\theta_i = 90^\circ$ ve $\phi_i = 90^\circ$ gelen dalga açılarında, $\theta_o = 90^\circ$ ve $\phi_o = 0^\circ \rightarrow 359^\circ$ 1'er derece gözlem açılarında oluşan yatay polarize bistatik normalize RKA (a) Kartezyen, (b) histogram grafiği

7. Operasyon Frekansı 10 GHz iken;

RKA değerleri Şekil 5.4.40 (a) Kartezyen grafik ile gösterilmiştir. RKA farkına ait değerler (b) histogram grafiği ile gösterilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 5.4.41: Drude ile kaplı mükemmel iletken F-117, $\epsilon_{\infty} = 1$, $F/m, \omega = 20\pi \times 10^9$ rad/s, $\gamma = 10, 200, 500$ GHz frekans dağıtıcı malzeme özelliklerinde, 10 GHz frekans kullanılarak, $x = 14.23, y = 19.65, z = 2.381$ cm boyutunda, $d = 0.1$ mm kaplama kalınlığında, yatay polarize ve $\theta_i = 90^\circ$ ve $\phi_i = 90^\circ$ gelen dalga açılarında, $\theta_o = 90^\circ$ ve $\phi_o = 0^\circ \rightarrow 359^\circ$ 1'er derece gözlem açıları oluşmuş yatay polarize bistatik normalize RKA (a) Kartezyen, (b) histogram grafiği

Histogram grafikleri analiz edildiğinde çarpışma frekansına ve operasyon frekansına göre çıkan RKA değerlerinin ortalama değerleri ve standart sapma değerleri Çizelge 5.2'de gösterilmiştir. Burada Çizelge 5.4.1'de olduğu gibi pozitif ortalama değer RKA'nın azaldığını göstermektedir.

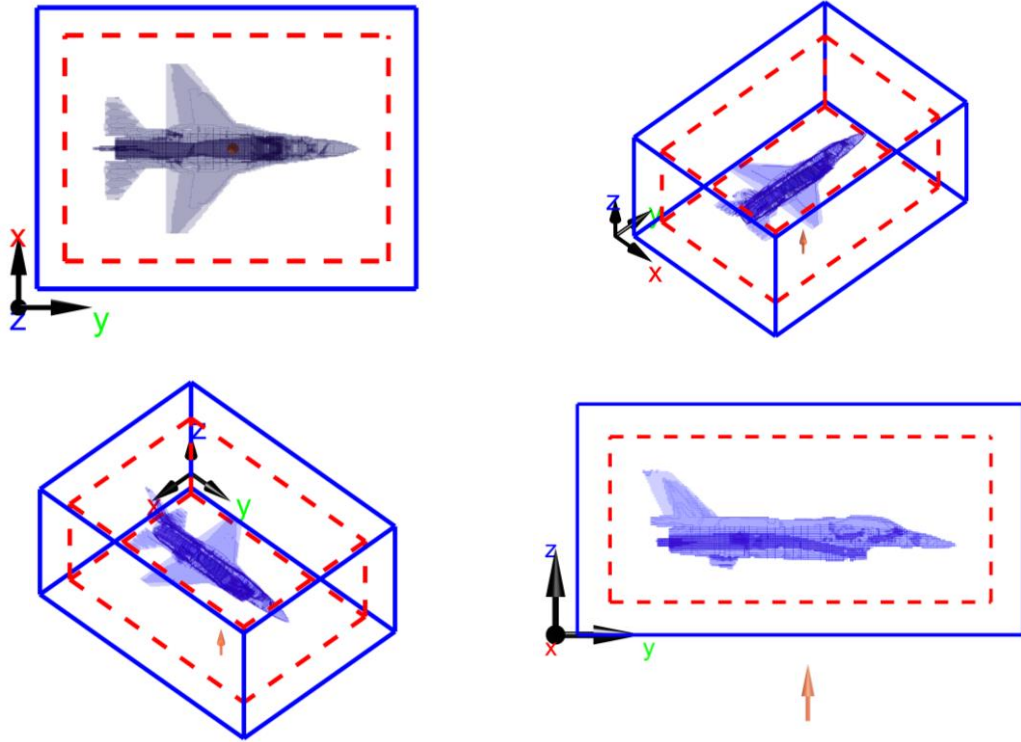
Çizelge 5.2. Çarpışma Frekansına göre Normal RKA Dağılımı (Kaplama Kalınlığı = 0.1 mm)

Frekans (GHz)	Çarpışma Frekansına göre Normal RKA Dağılımı (dBsm)					
	$\gamma^* = 10$ GHz		$\gamma = 200$ GHz		$\gamma = 500$ GHz	
	Ortalama Değer	Standart Sapma	Ortalama Değer	Standart Sapma	Ortalama Değer	Standart Sapma
4	4.146	2.417	9.020	4.672	6.793	3.580
5	7.465	3.494	17.555	8.329	12.684	6.509
6	4.813	3.583	10.921	5.744	12.432	6.497
7	7.737	5.685	15.063	9.485	11.156	6.976
8	11.364	6.416	15.375	8.794	11.388	6.429
9	12.300	9.586	12.599	9.659	10.615	9.097
10	11.521	10.237	11.821	10.425	9.013	9.087

*: Çarpışma frekansının sembolü olarak " γ " kullanılmıştır.

5.4.2. Drude Malzeme ile Kaplı Mükemmel İletken F-16 Fighting Falcon Uçağının Monostatik RKA Sonuçları

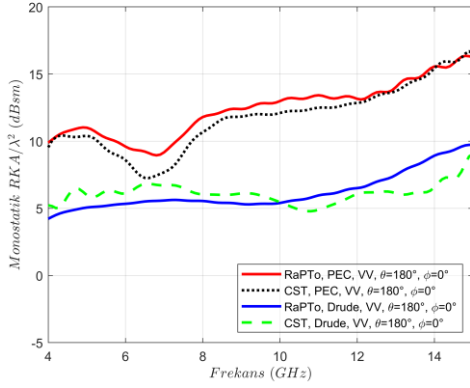
Analizde kullanılan F-16 Şekil 5.4.41’de kübik elemanlar formunda gösterilmiştir. Küpün kırmızı yüzeyi mükemmel iletken yüzey olduğu yeri gösterirken mavi olduğu kısım frekans dağıtıcı malzeme ile kaplı olduğu yeri göstermektedir. F-16’nın yanında x , y , z eksenlerini gösteren oklar, gelen dalganın yönünü gösteren ok, problem uzayının sınırı ve aynı zamanda mükemmel uyumlu katmanın sınırı (mavi ve sürekli çizgi) ve toplam alan (içeride kalacak şekilde) ile saçılan alanın sınırı (kırmızı kesik çizgi) gösterilmiştir.



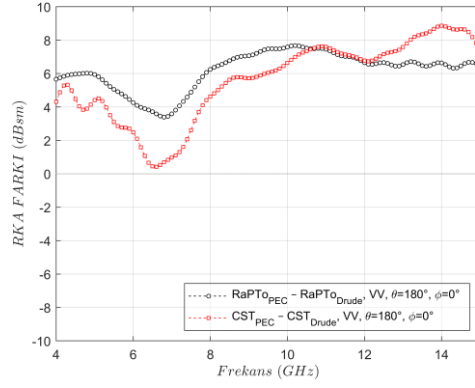
Şekil 5.4.42: Kaplama Kalınlığı 0.1 mm ve Çarpışma Frekansı 20 GHz olan F-16

Drude ile kaplı mükemmel iletken F-16, $\epsilon_{\infty} = 1$ F/m , $\omega = 20\pi \times 10^9$ rad/s , $\gamma = 20 \times 10^9$ Hz frekans dağıtıcı malzeme özelliklerinde, $4 \rightarrow 15$ GHz frekans bandında 0.1 GHz’lik adımla, $x = 9.14$, $y = 14.48$, $z = 2.381$ cm boyutunda, $d = 0.1$ mm kaplama kalınlığında, yatay polarize ve $\theta_{i,0} = 180^\circ$ ve $\phi_{i,0} = 0^\circ$ gelen dalga ve gözlem açılarında oluşan yatay polarize monostatik RKA değerleri hesaplanmıştır. Radar kesit alanı

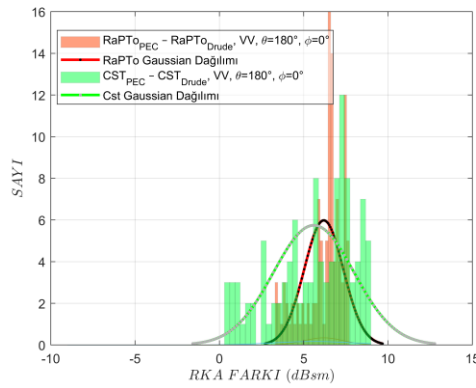
değerleri Şekil 5.4.42 (a) Kartezyen grafik ile gösterilmiştir. RKA farkına ait değerler (b) Kartezyen, (c) histogram grafiği ile gösterilmiştir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 5.4.43: Drude ile kaplı mükemmel iletken F-16, $\epsilon_\infty = 1 F/m$, $\omega = 20\pi \times 10^9 \text{ rad/s}$, $\gamma = 20 \times 10^9 \text{ Hz}$ frekans dağıtıcı malzeme özelliklerinde, $4 \rightarrow 15 \text{ GHz}$ frekans bandında 0.1 GHz 'lik adımla, $x = 9.14, y = 14.48, z = 2.381 \text{ cm}$ boyutunda, $d = 0.1 \text{ mm}$ kaplama kalınlığında, yatay polarize ve $\theta_{i,o} = 180^\circ$ ve $\phi_{i,o} = 0^\circ$ gelen dalga ve gözlem açılarında oluşan yatay polarize monostatik normalize RKA (a) Kartezyen, RKA farkı (b) Kartezyen, (c) histogram grafiği

F-16 çarpışma frekansı 20 GHz ve plazma frekansı $20\pi \times 10^9 \text{ rad/s}$ olan frekans bağımlı bir malzeme ile 0.1 mm kalınlığında mükemmel iletken malzeme üzerine kaplanmıştır. RKA değeri 111 adet frekans değerinde azalmıştır. En çok azalma 10.2 GHz 'de gerçekleşmiştir. Bu değer 7.6769 dBsm 'dir. Ortalama RKA değeri 4 GHz ila 15 GHz aralığında düşmüştür. Bu değer 6.1887 dBsm olarak ölçülmüştür.

6. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Sonuçlar incelendiği zaman RaPTo ile CST ve analitik sonuçlarla kanonik cisimler özelinde bulunan sonuçların büyük ölçüde benzerlik gösterdiği görülmektedir. Fakat cisimler ya da platformlar karmaşıklıkça RaPTo ile CST arasında bulunan sonuçların bazı açılarda farklılaştığı gözlenirken diğer açılarda benzerliğini koruduğu görülmektedir. Bu farklılaşmanın temel sebeplerinden biri RaPTo ile CST arasındaki Yee hücrelerinin boyutlarının ve sayılarının farklı olmasından dolayı olduğu değerlendirilmektedir. RaPTo aracı ile CST programının kübik eleman oluşturma algoritmasının farklı olduğu düşünülmektedir. Daha önce bölüm 3.4.'te anlatıldığı üzere FDTD tekniği, üç boyutlu problem geometrisini bir ızgara (mesh) oluşturmak için hücrelere böler. Bu ızgaranın her bir hücresine Yee hücresi denir. Dikdörtgen Yee hücreleri kullanarak ilgilenilen yapının yüzeyi ve iç geometrisi basamaklı veya merdivenli şekilde çözülür. Şekil geometrisini en iyi şekilde modellemek için çözünürlük yeterince hassas tutulup büyük sayılarda hücrelerle hesaplama yapılmalıdır. Modelin yeterince yüksek çözünürlükte örneklenip hücre oluşturulamaması sonucunda merdiven hataları (staircase error) oluşur. Merdiven hataları kümülatif şekilde artar. Bu yüzden RaPTo aracı ve CST programı ile bulunan sonuçların arasındaki farklılaşmanın temel sebebinin bu olduğu değerlendirilmektedir. Ayrıca CST zaman alanı çözücüsü dökümanları incelendiğince CST'nin kullandığı ızgara (mesh) tipinin altı yüzlü (hexahedral) olduğu belirtilmektedir [52]. Altı yüzlü ızgara tipinde Yee hücrelerinin kübik olma şartı yoktur. RaPTo'da ise ızgara tipi kübiktir. Izgara tipinde oluşacak farklılıkta RaPTo ve CST ile elde edilen sonuçlar arasında farklılaşmaya sebebiyet verebilir. Bunların yanında RaPTo ile CST aynı zaman adımı formülünü kullanmasına rağmen simülasyonu sonlandırma zamanları farklıdır. RaPTo ile belirlenen zaman sınırında simülasyon sonlandırılırken CST ile belli bir zaman sınırı tanımlanmamaktadır. Bunun yerine simülasyon sırasında, hesaplama alanı içerisindeki toplam enerji değeri sık sık hesaplanır ve simülasyon başladığından itibaren en yüksek seviyeli enerjiyle eşik seviyesi belirlenen enerji arasında ilişki kurulur. Örneğin -40 dB olarak bir eşik seviyesi belirlendiğinde simülasyon başladığı zamandan itibaren ölçülen en yüksek seviyeli enerjiye göre logaritmik olarak toplam enerji -40 dB seviyesine düştüğü zaman simülasyon otomatik olarak sonlandırılır [53]. RaPTo ve CST arasında simülasyon zamanlarının farklı olduğu düşünülerek yine alınan sonuçlar arasında farklılaşmanın olabileceği düşünülebilir. Bunların dışında CST programının frekans dağıtıcı ortam modellemesinde kullandığı formülasyon tam olarak bilinmemektedir.

RaPTo ile CST arasında kullanılacak modellerde farklı formülasyon kullanılması halinde sonuçlar arasında farkların oluşabileceği değerlendirilmektedir.

Frekans dağıtıcı malzemenin radar kesit alanı üzerindeki etkisini daha iyi anlayabilmek için RaPTo sonuçları ile çizelgeler oluşturulmuştur. Bölüm 5.4.1.6'dan elde edilmiş veriler kullanılarak, kaplama kalınlığının operasyon frekansına göre RKA üzerindeki etkisi Çizelge 6.1'de incelenmiştir. Burada kaplama kalınlığı ve operasyon frekansı değişken iken çarpışma frekansı sabittir. Bunların yanında gelen dalganın geliş yönünün tersine doğru saçılan dalganın RKA üzerindeki etkisini anlayabilmek adına sadece bu açılar aralığında hesaplanan RKA değerleri Çizelge 6.2'de incelenmiştir. Ayrıca gelen dalganın geliş yönünde saçılan dalganın RKA üzerindeki etkisini anlayabilmek için ileri saçılan yöndeki açılarda hesaplanan RKA değerleri Çizelge 6.3'te incelenmiştir.

Kaplama kalınlığının RKA üzerindeki etkini çizelge içerisinde gösterdikten sonra Bölüm 5.4.1.7'den elde edilmiş veriler kullanılarak, çarpışma frekansının operasyon frekansına göre RKA üzerindeki etkisi Çizelge 6.4'te incelenmiştir. Burada çarpışma frekansı ve operasyon frekansı değişken iken kaplama kalınlığı sabittir. Bunların yanında gelen dalganın geliş yönünün tersine doğru saçılan dalganın RKA üzerindeki etkisini anlayabilmek adına sadece bu açılar aralığında hesaplanan RKA değerleri Çizelge 6.5'te incelenmiştir. Ayrıca gelen dalganın geliş yönünde saçılan dalganın RKA üzerindeki etkisini anlayabilmek için ileri saçılan yöndeki açılarda hesaplanan RKA değerleri Çizelge 6.6'da incelenmiştir.

Çizelge 6.1. Kaplama Kalınlığının, Tüm Yönlerdeki F-117 RKA'sı Üzerindeki Etkisi

Tüm yönler (0 ila 359 derece arası 1'er derecelik adımlarla)													
Frekans (GHz)	Çarpışma Frekansı (GHz)	Plazma Frekansı (rad/s)	Kaplama kalınlığı (mm)	RKA değerinin azaldığı açı sayısı	RKA değerinin azalması (dBsm)		RKA değerinin maksimum azaldığı açı (°)	Ortalama RKA değerinin azalması (dBsm)	RKA değerinin arttığı açı sayısı	RKA değerinin artması (dBsm)		RKA değerinin maksimum arttığı açı (°)	Ortalama RKA değerinin artması (dBsm)
					Minimum	Maksimum				Minimum	Maksimum		
4	10	$20\pi \times 10^9$	0.1	322	0.074	18.342	110	4.729	38	0.079	5.686	112	0.797
4	10	$20\pi \times 10^9$	0.2	324	0.01309	20.3314	110	4.9891	36	0.10753	3.681	112	0.64126
4	10	$20\pi \times 10^9$	0.4	323	0.1175	12.7916	110	5.8221	37	0.055879	1.8595	112	0.74509
5	10	$20\pi \times 10^9$	0.1	335	0.032	15.305	102	8.077	25	0.113	6.989	105	0.739
5	10	$20\pi \times 10^9$	0.2	335	0.03744	29.2606	194	10.2383	25	0.11044	3.3032	105	0.57653
5	10	$20\pi \times 10^9$	0.4	334	0.038001	33.228	346	12.3019	26	0.17449	0.90535	274	0.70511
6	10	$20\pi \times 10^9$	0.1	323	0.116	16.248	140	5.568	37	0.038	15.793	96	1.776
6	10	$20\pi \times 10^9$	0.2	326	0.05255	29.3196	149	10.4776	34	0.16249	13.5983	96	1.5146
6	10	$20\pi \times 10^9$	0.4	324	0.22144	25.7706	303	11.4811	36	0.1041	13.1782	96	1.5587
7	10	$20\pi \times 10^9$	0.1	311	0.074	30.311	158	9.254	49	0.093	13.579	197	1.892
7	10	$20\pi \times 10^9$	0.2	318	0.17506	34.9025	157	11.3935	42	0.16829	13.471	197	1.856
7	10	$20\pi \times 10^9$	0.4	315	0.29303	39.5671	125	13.3179	45	0.26227	13.1098	197	2.0296
8	10	$20\pi \times 10^9$	0.1	337	0.023	31.242	119	12.249	23	0.032	9.624	249	1.595
8	10	$20\pi \times 10^9$	0.2	335	0.040053	46.2097	43	14.9398	25	0.017749	9.4936	249	1.6049
8	10	$20\pi \times 10^9$	0.4	331	0.049746	35.5962	213	14.3224	29	0.060745	10.7531	249	1.8058
9	10	$20\pi \times 10^9$	0.1	312	0.13	49.623	311	14.774	48	0.001	14.443	140	3.782
9	10	$20\pi \times 10^9$	0.2	322	0.026165	46.8085	67	15.0771	38	0.05435	12.7975	251	4.1805
9	10	$20\pi \times 10^9$	0.4	297	0.01209	40.2404	322	13.6908	63	0.0034222	18.1179	140	3.8059
10	10	$20\pi \times 10^9$	0.1	307	0.015	32.91	15	14.387	53	0.225	15.738	252	5.081

10	10	$20\pi \times 10^9$	0.2	315	0.0052524	38.0965	209	14.685	45	0.12459	14.6378	252	5.2299
10	10	$20\pi \times 10^9$	0.4	296	0.0031044	38.6357	222	12.33	64	0.036691	16.9753	186	4.8138
11	10	$20\pi \times 10^9$	0.1	327	0.26	60.196	26	17.06	33	0.024	22.708	284	4.97
11	10	$20\pi \times 10^9$	0.2	328	0.094777	43.5347	315	15.0682	32	0.19451	23.4061	284	5.1903
11	10	$20\pi \times 10^9$	0.4	327	0.094245	53.0473	56	16.6814	33	0.092534	23.7348	284	5.1905
12	10	$20\pi \times 10^9$	0.1	314	0.151	49.265	31	16.458	46	0.026	15.124	282	3.658
12	10	$20\pi \times 10^9$	0.2	327	0.12642	39.6543	338	17.5311	33	0.389	16.862	282	4.5138
12	10	$20\pi \times 10^9$	0.4	326	0.031772	45.5905	84	17.2451	34	0.032293	17.5292	282	4.6534
13	10	$20\pi \times 10^9$	0.1	320	0.027	37.893	230	15.16	40	0.028	9.977	295	3.329
13	10	$20\pi \times 10^9$	0.2	322	0.0447	35.1305	186	16.57	38	0.087013	9.6873	295	3.5479
13	10	$20\pi \times 10^9$	0.4	331	0.04407	48.0016	104	21.5866	29	0.035839	12.2801	258	4.5209
14	10	$20\pi \times 10^9$	0.1	297	0.005	35.055	106	13.695	63	0.045	16.627	294	3.124
14	10	$20\pi \times 10^9$	0.2	314	0.38849	41.5441	125	18.1676	46	0.059888	15.778	294	2.7329
14	10	$20\pi \times 10^9$	0.4	305	0.094621	38.4778	50	16.8748	55	0.30484	16.4025	294	3.2161
15	10	$20\pi \times 10^9$	0.1	317	0.111	49.989	207	11.036	43	0.014	12.761	246	2.234
15	10	$20\pi \times 10^9$	0.2	319	0.038669	39.5591	77	15.182	41	0.12555	13.0886	246	2.1899
15	10	$20\pi \times 10^9$	0.4	315	0.10133	39.215	99	15.8986	45	0.019094	12.8945	256	2.314

Çizelge 6.2. Kaplama Kalınlığının, Geri Saçılan Yönlerdeki F-117 RKA'sı Üzerindeki Etkisi

Geri saçılan yönler (0 ila 179 derece arası 1'er derecelik adımlarla)														
Frekans (GHz)	Çarpışma Frekansı (GHz)	Plazma Frekansı (rad/s)	Kaplama kalınlığı (mm)	RKA değerinin azaldığı açı sayısı	RKA değerinin azalması (dBsm)		RKA değerinin maksimum azaldığı açı (°)	Ortalama RKA değerinin azalması (dBsm)	RKA değerinin arttığı açı sayısı	RKA değerinin artması (dBsm)		RKA değerinin maksimum arttığı açı (°)	Ortalama RKA değerinin artması (dBsm)	Geri saçılan yönlerdeki değişim (90 °)
					Minimum	Maksimum				Minimum	Maksimum			
4	10	$20\pi \times 10^9$	0.1	177	0.468	18.342	110	5.268	3	0.481	5.686	112	3.675	-5.811
4	10	$20\pi \times 10^9$	0.2	177	0.27074	20.3314	110	5.544	3	0.28124	3.681	112	2.4745	-6.3957
4	10	$20\pi \times 10^9$	0.4	178	0.77926	12.7916	110	6.5396	2	0.92694	1.8595	112	1.3932	-7.5722
5	10	$20\pi \times 10^9$	0.1	179	0.759	15.305	102	8.571	1	6.989	6.989	105	6.989	-9.83
5	10	$20\pi \times 10^9$	0.2	179	3.9421	17.3492	101	10.5391	1	3.3032	3.3032	105	3.3032	-13.138
5	10	$20\pi \times 10^9$	0.4	180	3.8682	27.4381	103	12.5556	0	-	-	-	-	-14.5137
6	10	$20\pi \times 10^9$	0.1	168	0.116	16.248	140	5.626	12	0.539	15.793	96	4.456	-2.588
6	10	$20\pi \times 10^9$	0.2	171	0.20148	29.3196	149	10.9144	9	0.47853	13.5983	96	4.3139	-8.5973
6	10	$20\pi \times 10^9$	0.4	171	0.66396	23.093	114	11.487	9	0.44062	13.1782	96	4.1302	-9.2649
7	10	$20\pi \times 10^9$	0.1	176	1.142	30.311	158	10.226	4	1.41	3.629	112	2.202	-8.843
7	10	$20\pi \times 10^9$	0.2	179	0.45609	34.9025	157	12.6829	1	1.2087	1.2087	112	1.2087	-11.9264
7	10	$20\pi \times 10^9$	0.4	179	1.2867	39.5671	125	14.8023	1	1.2145	1.2145	131	1.2145	-13.1091
8	10	$20\pi \times 10^9$	0.1	180	3.68	31.242	119	13.638	0	-	-	-	-	-19.802
8	10	$20\pi \times 10^9$	0.2	180	5.14	46.2097	43	16.4816	0	-	-	-	-	-21.06
8	10	$20\pi \times 10^9$	0.4	180	4.6255	34.4404	60	15.7781	0	-	-	-	-	-22.3396
9	10	$20\pi \times 10^9$	0.1	176	0.541	41.02	50	16.613	4	1.716	14.443	140	5.597	-10.263
9	10	$20\pi \times 10^9$	0.2	178	0.058203	46.8085	67	17.0864	2	5.1569	12.2942	140	8.7255	-8.0962
9	10	$20\pi \times 10^9$	0.4	173	1.6742	39.1919	49	15.2281	7	0.028991	18.1179	140	5.4117	-15.8491
10	10	$20\pi \times 10^9$	0.1	168	0.169	32.91	15	16.594	12	0.325	10.179	103	5.814	-13.794

10	10	$20\pi \times 10^9$	0.2	170	0.0052524	33.6258	59	16.6333	10	0.94266	8.7463	103	5.4912	-12.6703
10	10	$20\pi \times 10^9$	0.4	166	0.59575	36.3558	88	13.7873	14	0.036691	10.494	103	4.8715	-28.878
11	10	$20\pi \times 10^9$	0.1	178	4.56	60.196	26	18.784	2	1.244	4.954	77	3.099	-14.465
11	10	$20\pi \times 10^9$	0.2	177	3.5495	33.6065	23	16.3891	3	0.23432	4.0662	77	1.5364	-8.9528
11	10	$20\pi \times 10^9$	0.4	180	0.094245	53.0473	56	18.8683	0	-	-	-	-	-10.4043
12	10	$20\pi \times 10^9$	0.1	173	0.151	49.265	31	18.756	7	0.096	9.393	6	2.778	-19.709
12	10	$20\pi \times 10^9$	0.2	178	0.42256	34.8044	32	19.8253	2	1.7116	6.2973	6	4.0044	-16.7601
12	10	$20\pi \times 10^9$	0.4	179	0.22851	45.5905	84	19.7116	1	5.9158	5.9158	6	5.9158	-16.9559
13	10	$20\pi \times 10^9$	0.1	179	1.689	36.523	80	16.871	1	8.004	8.004	96	8.004	-18.868
13	10	$20\pi \times 10^9$	0.2	179	2.3648	33.1348	100	18.5717	1	3.9803	3.9803	96	3.9803	-21.8427
13	10	$20\pi \times 10^9$	0.4	180	4.192	48.0016	104	25.851	0	-	-	-	-	-25.6376
14	10	$20\pi \times 10^9$	0.1	170	0.856	35.055	106	14.882	10	0.045	16.162	175	5.669	-18.251
14	10	$20\pi \times 10^9$	0.2	176	0.98263	41.5441	125	20.7771	4	1.5854	9.4473	175	5.3676	-28.1211
14	10	$20\pi \times 10^9$	0.4	173	0.094621	38.4778	50	19.6029	7	0.30484	14.2521	175	6.4453	-29.0723
15	10	$20\pi \times 10^9$	0.1	173	0.111	41.763	73	11.947	7	0.111	8.349	9	2.712	-7.121
15	10	$20\pi \times 10^9$	0.2	176	0.98371	39.5591	77	17.0645	4	2.0684	6.2522	9	3.3575	-25.205
15	10	$20\pi \times 10^9$	0.4	174	0.23206	39.215	99	18.3745	6	0.019094	6.0749	9	2.4266	-20.9779

Çizelge 6.3. Kaplama Kalınlığının, İleri Saçılan Yönlerdeki F-117 RKA'sı Üzerindeki Etkisi

İleri saçılan yönler (180 ila 359 derece arası 1'er derecelik adımlarla)														
Frekans (GHz)	Çarpışma Frekansı (GHz)	Plazma Frekansı (rad/s)	Kaplama kalınlığı (mm)	RKA değerinin azaldığı açı sayısı	RKA değerinin azalması (dBsm)		RKA değerinin maksimum azaldığı açı (°)	Ortalama RKA değerinin azalması (dBsm)	RKA değerinin arttığı açı sayısı	RKA değerinin artması (dBsm)		RKA değerinin maksimum arttığı açı (°)	Ortalama RKA değerinin artması (dBsm)	İleri saçılan yönlerdeki değişim (270 °)
					Minimum	Maksimum				Minimum	Maksimum			
4	10	$20\pi \times 10^9$	0.1	145	0.074	6.293	349	4.071	35	0.079	0.715	278	0.551	0.628
4	10	$20\pi \times 10^9$	0.2	147	0.01309	6.7102	349	4.321	33	0.10753	0.60424	278	0.4746	0.5294
4	10	$20\pi \times 10^9$	0.4	145	0.1175	7.6316	348	4.9414	35	0.055879	0.90508	276	0.70805	0.85967
5	10	$20\pi \times 10^9$	0.1	156	0.032	15.165	193	7.511	24	0.113	0.624	273	0.479	0.594
5	10	$20\pi \times 10^9$	0.2	156	0.03744	29.2606	194	9.8931	24	0.11044	0.60031	274	0.46292	0.56757
5	10	$20\pi \times 10^9$	0.4	154	0.038001	33.228	346	12.0054	26	0.17449	0.90535	274	0.70511	0.86417
6	10	$20\pi \times 10^9$	0.1	155	0.189	16.236	240	5.505	25	0.038	0.624	275	0.489	0.58
6	10	$20\pi \times 10^9$	0.2	155	0.05255	27.9371	301	9.9957	25	0.16249	0.63224	277	0.50684	0.5179
6	10	$20\pi \times 10^9$	0.4	153	0.22144	25.7706	303	11.4745	27	0.1041	0.8892	277	0.70155	0.7498
7	10	$20\pi \times 10^9$	0.1	135	0.074	21.332	180	7.986	45	0.093	13.579	197	1.865	0.471
7	10	$20\pi \times 10^9$	0.2	139	0.17506	32.5404	180	9.7329	41	0.16829	13.471	197	1.8718	0.30165
7	10	$20\pi \times 10^9$	0.4	136	0.29303	29.3331	180	11.3642	44	0.26227	13.1098	197	2.0481	0.41452
8	10	$20\pi \times 10^9$	0.1	157	0.023	29.923	311	10.656	23	0.032	9.624	249	1.595	-0.319
8	10	$20\pi \times 10^9$	0.2	155	0.040053	40.9551	213	13.1493	25	0.017749	9.4936	249	1.6049	-0.56959
8	10	$20\pi \times 10^9$	0.4	151	0.049746	35.5962	213	12.5872	29	0.060745	10.7531	249	1.8058	-0.29576
9	10	$20\pi \times 10^9$	0.1	136	0.13	49.623	311	12.393	44	0.001	13.489	251	3.617	-0.449
9	10	$20\pi \times 10^9$	0.2	144	0.026165	27.0589	312	12.5934	36	0.05435	12.7975	251	3.928	-0.87453
9	10	$20\pi \times 10^9$	0.4	124	0.01209	40.2404	322	11.5461	56	0.0034222	13.2531	251	3.6052	0.0034222
10	10	$20\pi \times 10^9$	0.1	139	0.015	32.664	232	11.72	41	0.225	15.738	252	4.867	-0.789

10	10	$20\pi \times 10^9$	0.2	145	0.19904	38.0965	209	12.4008	35	0.12459	14.6378	252	5.1552	-1.1929
10	10	$20\pi \times 10^9$	0.4	130	0.0031044	38.6357	222	10.4691	50	0.15232	16.9753	186	4.7976	-0.30998
11	10	$20\pi \times 10^9$	0.1	149	0.26	43.442	182	15	31	0.024	22.708	284	5.09	-0.717
11	10	$20\pi \times 10^9$	0.2	151	0.094777	43.5347	315	13.52	29	0.19451	23.4061	284	5.5683	-0.58615
11	10	$20\pi \times 10^9$	0.4	147	0.11709	37.261	224	14.0036	33	0.092534	23.7348	284	5.1905	-0.37395
12	10	$20\pi \times 10^9$	0.1	141	0.285	35.079	313	13.638	39	0.026	15.124	282	3.816	-0.843
12	10	$20\pi \times 10^9$	0.2	149	0.12642	39.6543	338	14.7904	31	0.389	16.862	282	4.5467	-1.2677
12	10	$20\pi \times 10^9$	0.4	147	0.031772	33.5367	207	14.2417	33	0.032293	17.5292	282	4.6152	-1.1609
13	10	$20\pi \times 10^9$	0.1	141	0.027	37.893	230	12.988	39	0.028	9.977	295	3.209	-0.106
13	10	$20\pi \times 10^9$	0.2	143	0.0447	35.1305	186	14.0643	37	0.087013	9.6873	295	3.5362	-0.30716
13	10	$20\pi \times 10^9$	0.4	151	0.04407	39.2429	187	16.5032	29	0.035839	12.2801	258	4.5209	-1.1968
14	10	$20\pi \times 10^9$	0.1	127	0.005	30.302	335	12.106	53	0.583	16.627	294	2.644	0.586
14	10	$20\pi \times 10^9$	0.2	138	0.38849	36.3409	331	14.8396	42	0.059888	15.778	294	2.4819	0.063993
14	10	$20\pi \times 10^9$	0.4	132	0.12705	35.0361	331	13.2993	48	0.33468	16.4025	294	2.7452	0.56968
15	10	$20\pi \times 10^9$	0.1	144	0.326	49.989	207	9.942	36	0.014	12.761	246	2.142	0.59
15	10	$20\pi \times 10^9$	0.2	143	0.038669	35.5837	211	12.8651	37	0.12555	13.0886	246	2.0637	0.27609
15	10	$20\pi \times 10^9$	0.4	141	0.10133	35.0038	211	12.8432	39	0.10134	12.8945	246	2.2967	0.59065

Çizelge 6.4. Çarpışma Frekansının, Tüm Yönlerdeki F-117 RKA'sı Üzerindeki Etkisi

Tüm yönler (0 ila 359 derece arası 1'er derecelik adımlarla)													
Frekans (GHz)	Çarpışma Frekansı (GHz)	Plazma Frekansı (rad/s)	Kaplama kalınlığı (mm)	RKA değerinin azaldığı açı sayısı	RKA değerinin azalması (dBsm)		RKA değerinin maksimum azaldığı açı (°)	Ortalama RKA değerinin azalması (dBsm)	RKA değerinin arttığı açı sayısı	RKA değerinin artması (dBsm)		RKA değerinin maksimum arttığı açı (°)	Ortalama RKA değerinin artması (dBsm)
					Minimum	Maksimum				Minimum	Maksimum		
4	10	$20\pi \times 10^9$	0.1	322	0.074	18.342	110	4.729	38	0.079	5.686	112	0.797
4	200	$20\pi \times 10^9$	0.1	325	0.15002	20.5847	107	10.0497	35	0.033968	1.2878	112	0.54332
4	500	$20\pi \times 10^9$	0.1	324	0.051933	18.8723	109	7.6278	36	0.064958	4.0335	112	0.72498
5	10	$20\pi \times 10^9$	0.1	335	0.032	15.305	102	8.077	25	0.113	6.989	105	0.739
5	200	$20\pi \times 10^9$	0.1	341	0.0030017	42.3173	185	18.5389	19	0.0085522	0.22617	278	0.11218
5	500	$20\pi \times 10^9$	0.1	334	0.044891	40.735	306	13.7107	26	0.040218	2.1537	105	0.49926
6	10	$20\pi \times 10^9$	0.1	323	0.116	16.248	140	5.568	37	0.038	15.793	96	1.776
6	200	$20\pi \times 10^9$	0.1	328	0.031962	27.2501	295	12.0843	32	0.084494	11.1879	96	1.0033
6	500	$20\pi \times 10^9$	0.1	329	0.14785	41.5285	245	13.6799	31	0.0086939	9.9818	96	0.81706
7	10	$20\pi \times 10^9$	0.1	311	0.074	30.311	158	9.254	49	0.093	13.579	197	1.892
7	200	$20\pi \times 10^9$	0.1	331	0.015976	49.9355	156	16.5357	29	0.0041782	13.3243	245	1.7507
7	500	$20\pi \times 10^9$	0.1	316	0.027446	31.5877	179	12.9347	44	0.11033	12.179	197	1.6181
8	10	$20\pi \times 10^9$	0.1	337	0.023	31.242	119	12.249	23	0.032	9.624	249	1.595
8	200	$20\pi \times 10^9$	0.1	337	0.035683	39.9283	165	16.5677	23	0.0058007	10.8503	249	2.098
8	500	$20\pi \times 10^9$	0.1	337	0.0075839	32.7482	119	12.2747	23	0.047186	9.5892	249	1.5997
9	10	$20\pi \times 10^9$	0.1	312	0.13	49.623	311	14.774	48	0.001	14.443	140	3.782
9	200	$20\pi \times 10^9$	0.1	312	0.047094	53.0218	311	15.09	48	0.080629	14.4661	140	3.5895
9	500	$20\pi \times 10^9$	0.1	300	0.017439	35.3513	218	13.4703	60	0.042204	17.2098	140	3.6588
10	10	$20\pi \times 10^9$	0.1	307	0.015	32.91	15	14.387	53	0.225	15.738	252	5.081
10	200	$20\pi \times 10^9$	0.1	306	0.046922	36.7944	16	14.777	54	0.0050078	15.7125	252	4.9296
10	500	$20\pi \times 10^9$	0.1	295	0.11642	36.9629	97	12.0146	65	0.0035619	15.3533	252	4.6098

Çizelge 6.5. Çarpışma Frekansının, Geri Saçılan Yönlerdeki F-117 RKA'sı Üzerindeki Etkisi

Frekans (GHz)	Çarpışma Frekansı (GHz)	Plazma Frekansı (rad/s)	Kaplama kalınlığı (mm)	RKA değerinin azaldığı açı sayısı	RKA değerinin azalması (dBsm)		RKA değerinin maksimum azaldığı açı (°)	Ortalama RKA değerinin azalması (dBsm)	RKA değerinin arttığı açı sayısı	RKA değerinin artması (dBsm)		RKA değerinin maksimum arttığı açı (°)	Ortalama RKA değerinin artması (dBsm)	Geri saçılan yöndeki değişim (90 °)
					Minimum	Maksimum				Minimum	Maksimum			
					Geri saçılan yönler (0 ila 179 derece arası 1'er derecelik adımlarla)									
4	10	$20\pi \times 10^9$	0.1	177	0.468	18.342	110	5.268	3	0.481	5.686	112	3.675	-5.811
4	200	$20\pi \times 10^9$	0.1	179	1.2823	20.5847	107	11.0309	1	1.2878	1.2878	112	1.2878	-15.7838
4	500	$20\pi \times 10^9$	0.1	178	1.6787	18.8723	109	8.472	2	2.0578	4.0335	112	3.0457	-10.8711
5	10	$20\pi \times 10^9$	0.1	179	0.759	15.305	102	8.571	1	6.989	6.989	105	6.989	-9.83
5	200	$20\pi \times 10^9$	0.1	180	5.391	33.8307	97	19.5774	0	-	-	-	-	-26.42
5	500	$20\pi \times 10^9$	0.1	179	6.061	31.961	5	13.982	1	2.1537	2.1537	105	2.1537	-16.2304
6	10	$20\pi \times 10^9$	0.1	168	0.116	16.248	140	5.626	12	0.539	15.793	96	4.456	-2.588
6	200	$20\pi \times 10^9$	0.1	174	0.36075	26.464	115	12.2905	6	0.25283	11.1879	96	3.2751	-12.4256
6	500	$20\pi \times 10^9$	0.1	176	0.14785	29.8953	144	13.6974	4	0.75614	9.9818	96	3.6133	-15.0899
7	10	$20\pi \times 10^9$	0.1	176	1.142	30.311	158	10.226	4	1.41	3.629	112	2.202	-8.843
7	200	$20\pi \times 10^9$	0.1	180	1.9822	49.9355	156	19.5377	0	-	-	-	-	-19.0415
7	500	$20\pi \times 10^9$	0.1	179	2.2713	31.5877	179	14.6377	1	0.18242	0.18242	131	0.18242	-20.9846
8	10	$20\pi \times 10^9$	0.1	180	3.68	31.242	119	13.638	0	-	-	-	-	-19.802
8	200	$20\pi \times 10^9$	0.1	180	10.3171	39.9283	165	18.9474	0	-	-	-	-	-20.6851
8	500	$20\pi \times 10^9$	0.1	180	3.7472	32.7482	119	13.6526	0	-	-	-	-	-19.7584
9	10	$20\pi \times 10^9$	0.1	176	0.541	41.02	50	16.613	4	1.716	14.443	140	5.597	-10.263
9	200	$20\pi \times 10^9$	0.1	176	1.7884	43.0465	50	17.0294	4	1.7151	14.4661	140	5.6227	-11.732
9	500	$20\pi \times 10^9$	0.1	174	1.1124	32.9588	90	14.9116	6	0.40139	17.2098	140	5.8012	-27.4998
10	10	$20\pi \times 10^9$	0.1	168	0.169	32.91	15	16.594	12	0.325	10.179	103	5.814	-13.794
10	200	$20\pi \times 10^9$	0.1	169	0.046922	36.7944	16	16.9889	11	0.38544	9.8947	103	6.2311	-15.2461
10	500	$20\pi \times 10^9$	0.1	164	0.74003	36.9629	97	13.5316	16	1.455	10.4668	106	5.458	-14.4656

Çizelge 6.6. Çarpışma Frekansının, İleri Saçılan Yönlerdeki F-117 RKA'sı Üzerindeki Etkisi

İleri saçılan yönler (180 ila 359 derece arası 1'er derecelik adımlarla)														
Frekans (GHz)	Çarpışma Frekansı (GHz)	Plazma Frekansı (rad/s)	Kaplama kalınlığı (mm)	RKA değerinin azaldığı açı sayısı	RKA değerinin azalması (dBsm)		RKA değerinin maksimum azaldığı açı (°)	Ortalama RKA değerinin azalması (dBsm)	RKA değerinin arttığı açı sayısı	RKA değerinin artması (dBsm)		RKA değerinin maksimum arttığı açı (°)	Ortalama RKA değerinin artması (dBsm)	İleri saçılan yöndeki değişim (270 °)
					Minimum	Maksimum				Minimum	Maksimum			
4	10	$20\pi \times 10^9$	0.1	145	0.074	6.293	349	4.071	35	0.079	0.715	278	0.551	0.628
4	200	$20\pi \times 10^9$	0.1	146	0.15002	14.1422	225	8.8466	34	0.033968	0.73652	279	0.52143	0.56316
4	500	$20\pi \times 10^9$	0.1	146	0.051933	9.511	348	6.5986	34	0.064958	0.78133	279	0.58846	0.65729
5	10	$20\pi \times 10^9$	0.1	156	0.032	15.165	193	7.511	24	0.113	0.624	273	0.479	0.594
5	200	$20\pi \times 10^9$	0.1	161	0.0030017	42.3173	185	17.3778	19	0.0085522	0.22617	278	0.11218	0.048733
5	500	$20\pi \times 10^9$	0.1	155	0.044891	40.735	306	13.3974	25	0.040218	0.58501	275	0.43308	0.51803
6	10	$20\pi \times 10^9$	0.1	155	0.189	16.236	240	5.505	25	0.038	0.624	275	0.489	0.58
6	200	$20\pi \times 10^9$	0.1	154	0.031962	27.2501	295	11.8513	26	0.084494	0.64991	278	0.47899	0.45339
6	500	$20\pi \times 10^9$	0.1	153	0.20787	41.5285	245	13.6598	27	0.0086939	0.60389	279	0.40281	0.34113
7	10	$20\pi \times 10^9$	0.1	135	0.074	21.332	180	7.986	45	0.093	13.579	197	1.865	0.471
7	200	$20\pi \times 10^9$	0.1	151	0.015976	42.309	235	12.9571	29	0.0041782	13.3243	245	1.7507	-0.24018
7	500	$20\pi \times 10^9$	0.1	137	0.027446	24.1751	180	10.7096	43	0.11033	12.179	197	1.6515	0.24668
8	10	$20\pi \times 10^9$	0.1	157	0.023	29.923	311	10.656	23	0.032	9.624	249	1.595	-0.319
8	200	$20\pi \times 10^9$	0.1	157	0.035683	37.145	188	13.8393	23	0.0058007	10.8503	249	2.098	-0.73686
8	500	$20\pi \times 10^9$	0.1	157	0.0075839	30.3342	311	10.695	23	0.047186	9.5892	249	1.5997	-0.3035
9	10	$20\pi \times 10^9$	0.1	136	0.13	49.623	311	12.393	44	0.001	13.489	251	3.617	-0.449
9	200	$20\pi \times 10^9$	0.1	136	0.047094	53.0218	311	12.5803	44	0.080629	13.4074	251	3.4047	-0.36511
9	500	$20\pi \times 10^9$	0.1	126	0.017439	35.3513	218	11.4799	54	0.042204	12.8847	251	3.4207	-0.083127
10	10	$20\pi \times 10^9$	0.1	139	0.015	32.664	232	11.72	41	0.225	15.738	252	4.867	-0.789
10	200	$20\pi \times 10^9$	0.1	137	0.17952	33.1618	232	12.0486	43	0.0050078	15.7125	252	4.5967	-0.69713
10	500	$20\pi \times 10^9$	0.1	131	0.11642	31.7377	317	10.1154	49	0.0035619	15.3533	252	4.3328	-0.39517

Yapılan istatistiksel analizler sonucunda özellikle geri saçılan yöndeki Radar Kesit Alanı, RKA azaltıcı malzeme ile kaplanmasıyla gözle görülür ölçüde düşmüştür. Frekansa bağlı olarak RKA azalma oranları da değişmektedir. Çarpışma (Collision) frekansının artmasıyla da RKA azalmıştır. Her ne kadar çarpışma frekansının artırılmasıyla gelen dalganın plazma içinde nüfuz etmesi ve bükülmesi arttırılsa da daha sık çarpışmalar elektronların dönme hareketini bozar ve dolayısıyla rezonans emilimini azaltır. Çıkan sonuçlara bakınca çarpışma frekansı belirli bir değerden büyük olduğunda zayıflama etkisinin azalacağını göstermiştir. Bu halde malzemenin çarpışma frekansının makul rejimlerinin RKA'yı büyük ölçüde azaltabileceğini göstermektedir. Çizelgeler incelendiği zaman gelen dalga frekansının çarpışma frekansına yaklaştığı değerlerde RKA değerinin azaldığı gözlenmiştir. Operasyon frekansının çarpışma frekansından büyük olduğu durumlarda ise, belirli frekanslardan sonra RKA'daki azalma miktarının düştüğü gözlenmiştir. Yine benzer bir yorum ile operasyon frekansı, RKA'nın büyük ölçüde azalabileceği göz önünde bulundurularak uygun aralıklarda seçilmelidir. Ayrıca RKA azaltıcı malzemenin kalınlığının artması da azalan RKA ile sonuçlanmıştır. Çarpışma frekansının belirli bir değerden büyük olması sonucunda RKA değerindeki düşüş miktarının azaldığı gözlemine benzer bir durumu kaplama kalınlığı için de söyleyebiliriz. Öyle ki operasyon frekansı, çarpışma frekansına yakın olduğu değerlerde kaplama kalınlığının belirli bir değerden sonra RKA değerindeki azalma miktarı artmak yerine düşmüştür. Yine çarpışma frekansında olduğu gibi kaplama kalınlığı için de uygun değerlerin kullanılması gerekmektedir. Geri ve ileri saçılan yönlerdeki RKA değerlerine bakınca geri saçılan yönde ileri saçılan yöne göre daha çok RKA azalmıştır. Fakat bazı sonuçlarda RKA değerlerinin hem geri hem de ileri saçılan yönde arttığı gözlemlenmektedir. Geri saçılan yönde ileri saçılan yöne göre hem RKA azalması hem de RKA artışı daha fazladır. Fakat azalan RKA değeri artan RKA değerinden daha büyük olduğu için ortalama RKA değeri azalmıştır. Polar grafiklere bakınca dikkat çeken bir husus ise operasyon frekansının, çarpışma frekansına yakın olduğu değerlerde RKA simetrisinin bozulmasıdır. RKA simetrisini geri saçılan dalganın bozduğu açıkça gözükmektedir. Sonuç olarak operasyonel saha düşünüldüğünde, RKA azaltıcı malzeme ile kaplı platformun, hedef tespit ve takip radarlarına karşı geri saçılan yönde üstünlük kuracağı değerlendirilmektedir.

Diğer tartışılması gereken konu ise FDTD tekniğinin zayıflığından ötürü ortaya çıkan bir husustur. Bu husus elektriksel olarak büyük ($L \geq 10\lambda$) olan cisimlerin analizi için daha fazla hafızaya ve zamana ihtiyaç duymasındır. Bu dezavantajın üstesinden gelmek için literatürde hedefin ya da platformun ölçeklendirilerek daha küçük boyutlarda analiz edilmesi önerilmiştir. Daha küçük boyutlu hedeflerin RKA değerleri tahmin edildikten sonra elde edilen sonuç ile gerçek boyutlarda elde edilmesi gereken sonuç arasında bir köprü kurulmuştur. Analizde kullanılan malzeme mükemmel iletken olduğu zaman ölçeklendirilmiş hedefin RKA değerinden ölçeklendirilmemiş hedefin RKA değeri aşağıdaki gibi bulunabilir [54], [55], [56]:

$$\sigma'(m^2) \cong \sigma(m^2) \frac{1}{s^2} \quad (6.1)$$

Burada σ' ölçeklendirme sonucu oluşan RKA değerini, σ ölçeklendirme olmadan gerçek ölçülerde elde edilen RKA değerini ve $1/s$ ölçeklendirme faktörünü temsil etmektedir. Denklem (6.1) $1 m^2$ referans değeriyle lineer şekilde ifade etmektedir. Ayrıca bu RKA değerlerinin aynı frekans değerlerinde olduğu varsayılmıştır.

Denklem (6.1) logaritmik olarak düzenlenerek aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\begin{aligned} 10 \log_{10} \left(\frac{\sigma'(m^2)}{1 (m^2)} \right) &\cong 10 \log_{10} \left(\frac{\sigma(m^2)}{1 (m^2)} \frac{1}{s^2} \right) \\ 10 \log_{10} \left(\frac{\sigma(m^2)}{1 (m^2)} \right) &\cong 10 \log_{10} \left(\frac{\sigma'(m^2)}{1 (m^2)} \right) + 20 \log_{10}(s) \\ \sigma(dBsm) &\cong \sigma'(dBsm) + 20 \log_{10}(s) \end{aligned} \quad (6.2)$$

Örnek verecek olursak yüzde birine ölçeklendirilmiş ($s = 100$) mükemmel iletken hedefin gerçek boyutlarındaki RKA değerini tahmin etmek için ölçeklendirme sonucunda elde edilen RKA değerinin üzerine 40 dB'lik bir ekleme yapılmalıdır.

Analizlerde mükemmel iletken yerine frekans dağıtıcı malzeme kullanıldığı zaman ölçeklendirilmiş ve frekans dağıtıcı malzeme ile kaplanmış cismin gerçek ölçeğindeki

RKA değerini tahmin etmek için aşağıdaki denklemin kullanılabilceği [8]'de belirtilmiştir:

$$\sigma(m^2) \cong \sigma'(m^2) s^2 \left(\frac{|R|^2}{|R'|^2} \right) \quad (6.3)$$

Burada σ' leklendirme sonucu oluşan RKA değerini, σ ölçeklendirme olmadan gerçek ölçülerde elde edilen RKA değerini ve $1/s$ ölçeklendirme faktörünü, R' leklendirme sonrası oluşan Fresnel yansımaya katsayısını ve R leklendirme olmadan var olan Fresnel yansımaya katsayısını ifade etmektedir. Denklem (6.3)'te tüm deęiŐkenlerin aynı frekans değerinde hesaplandığı varsayılmıştır.

Tez kapsamında kompleks cisimlerin RKA tahmini yapılması amacıyla ölçeklendirme kullanılmıştır. Gelecek çalışmalarda denklem (6.1) – (6.3) kullanılarak ölçeklendirilmiş hedeflerden gerçek boyutlardaki hedeflerin RKA değeri tahmin edilebilir. Ayrıca CST rneğinde olduğu gibi simülasyon süresi otomatik olarak ayarlanarak daha doğru analizlerin yapılması sağlanabilir. Son olarak RaPTo için bir arayüz tasarımı oluŐturarak kullanıcı dostu bir program haline dönüŐtürülebilir.

7. KAYNAKLAR

- [1] A. Ishimaru, Electromagnetic wave propagation, radiation and scattering. London, England: Prentice-Hall, **1991**.
- [2] A. Taflove and S. Hagness, Computational electrodynamics: The finite-difference time-domain method, 3rd ed. Norwood, MA: Artech House, **2005**.
- [3] K. S. Kunz and R. J. Luebbers, The finite difference time domain method for electromagnetics. Boca Raton, FL: CRC Press, **1993**.
- [4] D. M. Sullivan, Z-transform theory and the FDTD method, IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 44, no. 1, pp. 28–34, **1996**.
- [5] E. F. Knott, A progression of high-frequency RCS prediction techniques, Proc. IEEE Inst. Electr. Electron. Eng., vol. 73, no. 2, pp. 252–264, **1985**.
- [6] M. N. O. Sadiku, Numerical Techniques in Electromagnetics, Second Edition, 2nd ed. London, England: CRC Press, **2000**.
- [7] O. Ozgun and M. Kuzuoglu, MATLAB-based finite element programming in electromagnetic modeling. New York, NY: CRC Press, **2018**.
- [8] S. Wanjun and Z. Hou, RCS prediction of objects coated by magnetized plasma via scale model with FDTD, IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol. 65, no. 6, pp. 1939–1945, **2017**.
- [9] F. L. Teixeira, Time-domain finite-difference and finite-element methods for Maxwell equations in complex media, IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 56, no. 8, pp. 2150–2166, **2008**.
- [10] A. Elsherbeni and V. Demir, The finite difference time domain method for electromagnetics: With MATLAB simulations, 2nd. Norwich, CT: SciTech Publishing, **2016**.
- [11] K. Yee, Numerical solution of initial boundary value problems involving maxwell's equations in isotropic media, IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 14, no. 3, pp. 302–307, **1966**.
- [12] M. El Hachemi, O. Hassan, K. Morgan, D. Rowse, and N. Weatherill, A low-order unstructured-mesh approach for computational electromagnetics in the time domain, Philos. Trans. A Math. Phys. Eng. Sci., vol. 362, no. 1816, pp. 445–469, **2004**.
- [13] T. Liebig, A. Rennings, S. Held, and D. Erni, openEMS – a free and open source equivalent-circuit (EC) FDTD simulation platform supporting cylindrical coordinates suitable for the analysis of traveling wave MRI applications: OPENEMS-A FREE AND OPEN SOURCE EC FDTD SIMULATION PLATFORM, Int. J. Numer. Model., vol. 26, no. 6, pp. 680–696, **2013**.

- [14] W. K. Gwarek, Analysis of an arbitrarily-shaped planar circuit a time-domain approach, *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 33, no. 10, pp. 1067–1072, **1985**.
- [15] I. J. Craddock, C. J. Railton, and J. P. McGeehan, Derivation and application of a passive equivalent circuit for the finite difference time domain algorithm, *IEEE Microw. Guid. Wave Lett.*, vol. 6, no. 1, pp. 40–42, **1996**.
- [16] G. Mur, Absorbing boundary conditions for the finite-difference approximation of the time-domain electromagnetic-field equations, *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. EMC-23, no. 4, pp. 377–382, **1981**.
- [17] J.P. Berenger, A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves, *J. Comput. Phys.*, vol. 114, no. 2, pp. 185–200, **1994**.
- [18] M. Kuzuoglu and R. Mittra, Frequency dependence of the constitutive parameters of causal perfectly matched anisotropic absorbers, *IEEE Microw. Guid. Wave Lett.*, vol. 6, no. 12, pp. 447–449, **1996**.
- [19] J.P. Berenger, Perfectly matched layer for the FDTD solution of wave-structure interaction problems, *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 44, no. 1, pp. 110–117, **1996**.
- [20] J.P. Berenger, Three-dimensional perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves, *J. Comput. Phys.*, vol. 127, no. 2, pp. 363–379, **1996**.
- [21] I. Örünç, Fiziksel Optik Yöntemiyle Üç Boyutlu Cisimlerin Radar Kesit Alanının Hesaplanması, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, **2021**.
- [22] G. Knott, J. Shaeffer, and M. Tuley, Radar Cross Section, Second Edition. Scitech, **2004**.
- [23] D. Jenn, Radar and Laser Cross Section Engineering, 2nd ed. Reston, VA: American Institute of Aeronautics & Astronautics, **2005**.
- [24] R. Richter, Aircraft Combat Survivability and Radar Cross Section (RCS), **2021**.
- [25] Ö. Özgün, Computational Methods in Electromagnetics, Hacettepe University, E.E.E. Lecturer Notes, **2018**.
- [26] L. Dou, 3D Finite Difference Time Domain Method for Anisotropic Materials, Masters Thesis, Concordia University, Montreal, Quebec, Canada, **2005**.
- [27] C. A. Balanis, Advanced Engineering Electromagnetics, 2nd ed. Chichester, England: John Wiley & Sons, **2012**.
- [28] D. M. Sullivan, Electromagnetic simulation using the FDTD method. Piscataway, NJ: IEEE Publications, **2000**.
- [29] W. V. Andrew, C. A. Balanis, and P. A. Tirkas, A comparison of the Berenger perfectly matched layer and the Lindman higher-order ABC's for the FDTD method, *IEEE Microw. Guid. Wave Lett.*, vol. 5, no. 6, pp. 192–194, **1995**.

- [30] J. C. Veihl and R. Mittra, An efficient implementation of Berenger's perfectly matched layer (PML) for finite-difference time-domain mesh truncation, *IEEE Microw. Guid. Wave Lett.*, vol. 6, no. 2, p. 94, **1996**.
- [31] S. D. Gedney, An anisotropic perfectly matched layer-absorbing medium for the truncation of FDTD lattices, *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 44, no. 12, pp. 1630–1639, **1996**.
- [32] J. Schneider and S. Hudson, A finite-difference time-domain method applied to anisotropic material, *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 41, no. 7, pp. 994–999, **1993**.
- [33] W. L. Stutzman and G. A. Thiele, *Antenna Theory and Design*, 2nd ed. Chichester, England: John Wiley & Sons, **1998**.
- [34] S. A. Schelkunoff, Some equivalence theorems of electromagnetics and their application to radiation problems, *Bell Syst. Tech. J.*, vol. 15, no. 1, pp. 92–112, **1936**.
- [35] R. F. Harrington, *Time-harmonic electromagnetic fields*. IEEE, **2001**.
- [36] R. M. Joseph, S. C. Hagness, and A. Taflove, Direct time integration of Maxwell's equations in linear dispersive media with absorption for scattering and propagation of femtosecond electromagnetic pulses, *Opt. Lett.*, vol. 16, no. 18, pp. 1412–1414, **1991**.
- [37] O. P. Gandhi, B.Q. Gao, and J.Y. Chen, A frequency-dependent finite-difference time-domain formulation for general dispersive media, *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 41, no. 4, pp. 658–665, **1993**.
- [38] T. Kashiwa and I. Fukai, A treatment by the FD-TD method of the dispersive characteristics associated with electronic polarization, *Microw. Opt. Technol. Lett.*, vol. 3, no. 6, pp. 203–205, **1990**.
- [39] M. Okoniewaki, M. Mrozowski, and M. A. Stuchly, Simple treatment of multi-term dispersion in FDTD, *IEEE Microw. Guid. Wave Lett.*, vol. 7, no. 5, pp. 121–123, **1997**.
- [40] Y. Takayama and W. Klaus, Reinterpretation of the auxiliary differential equation method for FDTD, *IEEE Microw. Wirel. Compon. Lett.*, vol. 12, no. 3, pp. 102–104, **2002**.
- [41] R. Luebbers, F. P. Hunsberger, K. S. Kunz, R. B. Standler, and M. Schneider, A frequency-dependent finite-difference time-domain formulation for dispersive materials, *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 32, no. 3, pp. 222–227, **1990**.
- [42] R. J. Luebbers and F. Hunsberger, FDTD for Nth-order dispersive media, *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 40, no. 11, pp. 1297–1301, **1992**.
- [43] D. F. Kelley and R. J. Luebbers, Piecewise linear recursive convolution for dispersive media using FDTD, *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 44, no. 6, pp. 792–797, **1996**.
- [44] F. L. Teixeira, W. C. Chew, M. Straka, M. L. Oristaglio, and T. Wang, Finite-difference time-domain simulation of ground penetrating radar on dispersive,

inhomogeneous, and conductive soils, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 36, no. 6, pp. 1928–1937, **1998**.

[45] R. Siushansian and J. Lovetri, Efficient evaluation of convolution integrals arising in fdtd formulations of electromagnetic dispersive media, *J. Electromagn. Waves Appl.*, vol. 11, no. 1, pp. 101–117, **1997**.

[46] D. M. Sullivan, Frequency-dependent FDTD methods using Z transforms, *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 40, no. 10, pp. 1223–1230, **1992**.

[47] N. Kaneda, B. Houshmand, and T. Itoh, FDTD analysis of dielectric resonators with curved surfaces, *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 45, no. 9, pp. 1645–1649, **1997**.

[48] Ö. Özgün, *Analytical Methods in Electromagnetics*, Hacettepe University, E.E.E. Lecturer Notes, **2018**.

[49] M. K. Berens, I. D. Flintoft, and J. F. Dawson, Structured Mesh Generation: Open-source automatic nonuniform mesh generation for FDTD simulation, *IEEE Antennas Propag. Mag.*, vol. 58, no. 3, pp. 45–55, **2016**.

[50] J. T. Olkkonen, *Finite difference time domain studies on sub-wavelength aperture structures: Dissertation*. Finland: VTT Publication, **2010**.

[51] A. Taflove, S. G. Johnson, and A. Oskooi, Eds., *Advances in FDTD computational electrodynamics: Photonics and nanotechnology*. Norwood, MA: Artech House, **2013**.

[52] Time domain solver overview, Mit.edu. [Online]. Available: https://space.mit.edu/RADIO/CST_online/mergedProjects/3D/special_overview/special_overview_fdtd_overview.htm. [Erişim tarihi: **01 Aralık 2023**].

[53] Time Domain Solver Parameters, Mit.edu. [Online]. Available: https://space.mit.edu/RADIO/CST_online/mergedProjects/3D/special_solvopt/special_solvopt_solver.htm. [Erişim tarihi: **01 Aralık 2023**].

[54] J. Zhao, Z. Wu, and Y. Li, Study on the scale relation of electromagnetic scattering from perfectly conducting target, in *Proceedings of 2014 3rd Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation*, **2014**.

[55] Y. Yamada, N. Michishita, and Q. D. Nguyen, Calculation and measurement methods for RCS of a scale model airplane, in *2014 International Conference on Advanced Technologies for Communications (ATC 2014)*, **2014**.

[56] N. Michishita, N. Q. Dinh, and Y. Yamada, Simulation and measurement methods for RCS estimations of a scale model airplane, *REV J. Electron. Commun.*, vol. 5, no. 1–2, **2016**.