

**DÖNÜŞÜM ELEKTROMANYETİĞİ KAVRAMINA DAYANAN
RADAR KESİT ALANI AZALTMA TEKNİKLERİNİN
GELİŞTİRİLMESİ**

**DEVELOPMENT OF RADAR CROSS SECTION
REDUCTION TECHNIQUES BASED ON THE CONCEPT OF
TRANSFORMATION ELECTROMAGNETICS**

CANBERK PAY

PROF. DR. ÖZLEM ÖZGÜN
Tez Danışmanı

Hacettepe Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı için Öngördüğü
YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak hazırlanmıştır.

2018

CANBERK PAY’ ın hazırladığı “Dönüşüm Elektromanyetiği Kavramına Dayanan Radar Kesit Alanı Azaltma Tekniklerinin Geliştirilmesi” adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından ELEKTRİK VE ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI’ nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

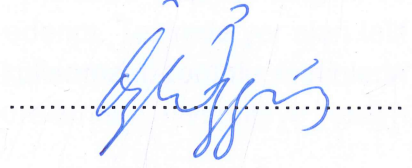
Prof. Dr. Mustafa KUZUOĞLU

Başkan



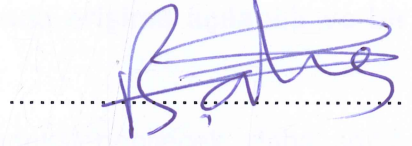
Prof. Dr. Özlem ÖZGÜN

Danışman



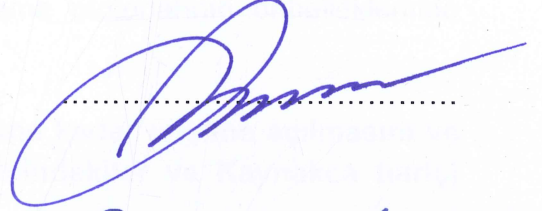
Prof. Dr. Birsen SAKA TANATAR

Üye



Prof. Dr. Çiğdem Seçkin GÜREL

Üye



Prof. Dr. Adnan KÖKSAL

Üye



Bu tez Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak onaylanmıştır.

Prof. Dr. Menemşe GÜMÜŞDERELİOĞLU

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

YAYINLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI BEYANI

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin/raporumun tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kağıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma iznini Hacettepe Üniversitesine verdiğimi bildiririm. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezimin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları bana ait olacaktır.

Tezin kendi orijinal çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

☒ **Tezimin/Raporumun tamamı dünya çapında erişime açılabilir ve bir kısmı veya tamamının fotokopisi alınabilir.**

(Bu seçenekle teziniz arama motorlarında indekslenebilecek, daha sonra tezinizin erişim statüsünün değiştirilmesini talep etseniz ve kütüphane bu talebinizi yerine getirse bile, tezinin arama motorlarının önbelleklerinde kalmaya devam edebilecektir.)

☐ **Tezimin/Raporumun 15.05.2020 tarihine kadar erişime açılmasını ve fotokopi alınmasını (İç Kapak, Özet, İçindekiler ve Kaynakça hariç) istemiyorum.**

(Bu sürenin sonunda uzatma için başvuruda bulunmadığım takdirde, tezimin/raporumun tamamı her yerden erişime açılabilir, kaynak gösterilmek şartıyla bir kısmı ve ya tamamının fotokopisi alınabilir)

☐ **Tezimin/Raporumun tarihine kadar erişime açılmasını istemiyorum, ancak kaynak gösterilmek şartıyla bir kısmı veya tamamının fotokopisinin alınmasını onaylıyorum.**

☐ **Serbest Seçenek/Yazarın Seçimi**

15 / 05 / 2018



Canberk PAY

ETİK

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada,

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin bir bölümünü bu üniversitede veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

15/05/2018



CANBERK PAY

ÖZET

DÖNÜŞÜM ELEKTROMANYETİĞİ KAVRAMINA DAYANAN RADAR KESİT ALANI AZALTMA TEKNİKLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ

Canberk PAY

Yüksek Lisans, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Özlem ÖZGÜN

Mayıs 2018, 85 sayfa

Uçak, gemi gibi cisimlerin Radar Kesit Alanı (RKA) değerinin azaltılarak radar tarafından tespit edilme ihtimalinin azaltılması radar ve elektronik harp uygulamalarında önemli bir meseledir. Koordinat dönüşümü yaklaşımı ile cisim etrafına tasarlanan bir malzeme ortamı ile etkin bir şekilde RKA azaltmak mümkündür. Ancak bu yöntem ile tasarlanan ortamların malzeme parametreleri yön-bağımlıdır ve bu nedenle fiziksel olarak gerçekleşmesi zordur. Bu tezde, koordinat dönüşümü yaklaşımına dayanan, ancak bu yöntemle tasarlanan yapay yön-bağımlı malzemeler yerine yön-bağımsız ve fiziksel olarak gerçekleşmesi kolay dielektrik malzemeler kullanılmasını amaçlayan bir RKA azaltma yöntemi sunulmaktadır. Bu yöntemde, belirli bir cisim yön-bağımsız dielektrik katmanlar ile kaplanmakta ve bu katmanlarla kaplanmış cismin RKA değerinin dönüşüm elektromanyetiği ile

hesaplanan ortam ile kaplanmış cismin RKA değerine eşdeğer olmasını sağlayan malzeme parametreleri genetik optimizasyon tekniği ile belirlenmektedir. Benzetimler, sonlu elemanlar yöntemi ile yapılmaktadır.

Anahtar kelimeler: Koordinat dönüşümü, radar kesit alanı azaltma, metamateryaller, genetik algoritması.



ABSTRACT

DEVELOPMENT OF RADAR CROSS SECTION REDUCTION TECHNIQUES BASED ON THE CONCEPT OF TRANSFORMATION ELECTROMAGNETICS

Canberk PAY

**Master of Science, Department of Electrical and Electronics
Engineering**

Supervisor: Prof. Dr. Özlem ÖZGÜN

May 2018, 85 pages

Reduction of Radar Cross Section (RCS) of objects, such as airplanes and ships, is an important issue in radar and electronic warfare applications. RCS reduction can effectively be achieved by using the coordinate transformation technique which designs a transformation medium around the object. However, the material parameters of such media are anisotropic and spatially-varying, which make their realizations challenging. In this study, an RCS reduction technique is presented, which employs isotropic and physically-realizable dielectric layers coated over the object. The material parameters of these layers are obtained by using the genetic optimization technique in such a way that RCS of the object coated by isotropic

dielectric layers mimics the RCS of the object coated by the anisotropic transformation medium that is designed by using the coordinate transformation technique. Simulations are performed by the finite element method.

Keywords: Coordinate transformation, radar cross section reduction, metamaterials, genetic algorithm.



TEŞEKKÜR

Yüksek lisanstaki ilk dönemimden son dönemime kadar her mailime bıkmadan yanıt veren, bana her rica ettiğimde zaman ayıran, sorduğum soruları sabırla cevaplayan, birçok yerde bana destek olan değerli danışman hocam Prof. Dr. Özlem Özgün'e, hayatımın her anında yanımda olup arkamda duran canım anne ve babama, lisans ve yüksek lisans boyunca hep birlikte olduğum değerli arkadaşlarım Göksu Yamaç, Emir Artık, Efe Ilıcak, Çağan Alkan, Ahmet Önal, Yasin Çakılcı ve Av. Hazal Köse'ye teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER	vi
ŞEKİLLER	viii
ÇİZELGELER	xi
SÖZLÜK	xiii
1. GİRİŞ	1
1.1 Literatürde RKA Azaltma	1
1.1.1 Fiziksel Şekillendirme ile RKA Azaltma	1
1.1.2 Radar Sönümleyici Malzemeler Yardımıyla RKA Azaltma	2
1.1.3 Aktif RKA Azaltma	8
1.2 Elektromanyetik Saçılma Problemlerinin Çözüm Yöntemleri	9
1.2.1 Analitik Yöntemler	10
1.2.2 Nümerik Yöntemler	11
1.3 Koordinat Dönüşümü Tekniği	14
1.4 Tezin Amacı	15
2. FORMÜLASYON	19
2.1 Koordinat Dönüşümü	19
2.2 Sonlu Elemanlar Yöntemi Formülasyonu	22
2.3 RKA Hesaplama	35
3. OPTİMİZASYON YÖNTEMLERİ	40
3.1 Genetik Algoritma	41

3.1.1 Popölasyon Oluşturma.....	42
3.1.2 En İyi İki Ebeveynin Seçilmesi	43
3.1.3 Parça Değişimi ve Mutasyon	43
3.1.4 Elitizm	44
4. BENZETİM SONUÇLARI.....	45
4.1 Monostatik RKA Azalması İçin Yapılan alışmalar	45
4.1.1 1-3 GHz Bandında Yapılan Optimizasyon Sonuçları	45
4.1.2 2-4 GHz Bandında Yapılan Optimizasyon Sonuçları	50
4.1.3 3-5 GHz Bandında Yapılan Optimizasyon Sonuçları	56
4.1.4 6-10 GHz Bandında Yapılan Optimizasyon Sonuçları	62
4.2 Bistatik RKA Azalması İçin Yapılan alışmalar.....	68
5. GERÇEK MALZEMELER İLE YAPILAN BENZETİM SONUÇLARI	73
6. SONUÇ	80
KAYNAKLAR.....	82
ÖZGEçMİş	84

ŞEKİLLER

Şekil-1.1 Fiziksel Şekillendirme İle RKA Azaltılması [3]	2
Şekil-1.2 Yansımasız Oda (Piramit Şeklindeki Dalga Sönümleyici) [3].....	3
Şekil-1.3 Aşamalı Yüzeyler ile Elde Edilen Malzemeler [2]	3
Şekil-1.4 Katman Uyumlama ile Malzeme Tasarımı [2]	4
Şekil-1.5 Dallenbach Katmanı [2]	5
Şekil-1.6 Salisbury Ekranı [2]	6
Şekil-1.7 Jaumann Katmanları [2]	7
Şekil-1.8 Analog Devre Tabanlı Malzeme Tasarımı [2]	7
Şekil-1.9 Aktif RKA Azaltma Devresi	9
Şekil-1.10 Matris Temelli Nümerik Yöntemlerin Uygulama Adımları	12
Şekil-1.11 Sonlu Elemanlar Yönteminde Üçgen Elemanlarla Ayırıklaştırma [7]	13
Şekil-1.12 Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Elde Edilen Yüzey Akımları [8]	14
Şekil-1.13 Koordinat Dönüşümü ile RKA Azaltma	15
Şekil-1.14 Tezin İlk Kısımında Yapılan Çalışma Özeti	16
Şekil-1.15 Koordinat Dönüşümü Sonrası Yeni Koordinatlar ile Oluşturulan Örgü	16
Şekil-1.16 Tezde Yapılan İkinci Çalışma	17
Şekil-1.17 Genetik Algoritma İçin Oluşturulan Örgü Yapısı	17
Şekil-2.1 Koordinat Dönüşümü ile Radar Kesit Alanı Azaltma Yöntemi	19
Şekil-2.2 Koordinat Dönüşümü Tekniği	20
Şekil-2.3 Koordinat Dönüşümü Öncesi Oluşturulan Örgü	20
Şekil-2.4 Isoparametrik Eşleştirme	26
Şekil-2.5 Huygens Prensibi. (a) Orijinal Problem, (b) Eşdeğer Problem [12].....	36
Şekil-2.6 RKA Hesaplama ve Huygens Sınır Düğüm Noktaları	37
Şekil-2.7 Kare Cisim Üzerinden Saçılan Elektrik Alan. a) Koordinat dönüşümü ile elde edilen yeni koordinatlar ile yapılan analiz, b) Koordinat dönüşümü prensibine göre tanımlanan dönüşüm ortamı ile yapılan analiz	39
Şekil-2.8 İletken Kare Cisim için RKA Değerlerinin İki Farklı Senaryoda Karşılaştırılması	40
Şekil-3.1 Genetik Algoritma Akış Şeması	43
Şekil-3.2 Parça Değişimi Özeti	45

Şekil-4.1 1-3 GHz Bandında Çapı 50 cm Olan İletken Silindirik Cisim	47
Şekil-4.2 1-3 GHz Bandında Çapı 20 cm Olan İletken Silindirik Cisim	49
Şekil-4.3 1-3 GHz Bandında Çapı 10 cm Olan İletken Silindirik Cisim	50
Şekil-4.4 2-4 GHz Bandında Çapı 50 cm Olan İletken Silindirik Cisim	52
Şekil-4.5 2-4 GHz Bandında Çapı 10 cm Olan İletken Silindirik Cisim	53
Şekil-4.6 2-4 GHz Bandında Çapı 5 cm Olan İletken Silindirik Cisim	55
Şekil-4.7 2-4 GHz Bandında Çapı 5 cm Olan İletken Silindirik Cisim	56
Şekil-4.8 3-5 GHz Bandında Çapı 50 cm Olan İletken Silindirik Cisim	58
Şekil-4.9 3-5 GHz Bandında Çapı 20 cm Olan İletken Silindirik Cisim	59
Şekil-4.10 3-5 GHz Bandında Çapı 10 cm Olan İletken Silindirik Cisim	61
Şekil-4.11 3-5 GHz Bandında Çapı 5 cm Olan İletken Silindirik Cisim	62
Şekil-4.12 6-10 GHz Çapı 50 cm Olan İletken Silindirik Cisim.....	64
Şekil-4.13 6-10 GHz Çapı 20 cm Olan İletken Silindirik Cisim.....	65
Şekil-4.14 6-10 GHz Çapı 10 cm Olan İletken Silindirik Cisim.....	67
Şekil-4.15 6-10 GHz Çapı 5 cm Olan İletken Silindirik Cisim.....	68
Şekil-4.16 3 GHz'de 10 cm Çaplı İletken Silindirik Cisim İçin Yapılan Benzetim Sonucu	70
Şekil-4.17 3 GHz'de 10 cm Çaplı İletken Silindirik Cisim İçin Yapılan Benzetim Sonucu	71
Şekil-4.18 3 GHz'de 40 cm Kenar Uzunluğuna Sahip İletken Kare Kesitli Silindirik Cisim İçin Yapılan Benzetim Sonucu.....	73
Şekil-5.1 2-4 GHz Bandında Çapı 20 cm Olan İletken Dairesel Kesitli Silindirik Cisim İçin Gerçek Malzeme ve Optimizasyon Sonucu Elde Edilen Malzeme İle Yapılan Benzetim Sonucu	75
Şekil-5.2 2-4 GHz Bandında Çapı 20 cm Olan İletken Dairesel Kesitli Silindirik Cisim İçin Gerçek Malzeme İle Yapılan Benzetim Sonucu	76
Şekil-5.3 3-5 GHz Bandında Çapı 50 cm Olan İletken Dairesel Kesitli Silindirik Cisim İçin Gerçek Malzeme ve Optimizasyon Sonucu Elde Edilen Malzeme İle Yapılan Benzetim Sonucu	77

Şekil-5.4 3-5 GHz Bandında Çapı 50 cm Olan İletken Dairesel Kesitli Silindirik Cisim İçin Gerçek Malzeme İle Yapılan Benzetim Sonucu	78
Şekil-5.5 6-10 GHz Bandında Çapı 5 cm Olan İletken Dairesel Kesitli Silindirik Cisim İçin Gerçek Malzeme ve Optimizasyon Sonucu Elde Edilen Malzeme İle Yapılan Benzetim Sonucu	79
Şekil-5.6 6-10 GHz Bandında Çapı 5 cm Olan İletken Dairesel Kesitli Silindirik Cisim İçin Gerçek Malzeme İle Yapılan Benzetim Sonucu	80



ÇİZELGELER

Çizelge-1.1 Matematiksel Modelleme Yöntemleri.....	10
Çizelge-2.1 Örnek Benzetim Çalışmasında Kullanılan Parametreler	38
Çizelge-3.1 Optimizasyon Yöntemleri	41
Çizelge-4.1 1-3 GHz Bandında Çapı 50 cm Olan İletken Silindirik Cisim İçin Elde Edilen Sonuçlar	46
Çizelge-4.2 1-3 GHz Bandında Çapı 20 cm Olan İletken Silindirik Cisim İçin Elde Edilen Sonuçlar	48
Çizelge-4.3 1-3 GHz Bandında Çapı 10 cm Olan İletken Silindirik Cisim İçin Elde Edilen Sonuçlar	49
Çizelge-4.4 2-4 GHz Bandında Çapı 50 cm Olan İletken Silindirik Cisim İçin Elde Edilen Sonuçlar	51
Çizelge-4.5 2-4 GHz Bandında Çapı 20 cm Olan İletken Silindirik Cisim İçin Elde Edilen Sonuçlar	52
Çizelge-4.6 2-4 GHz Bandında Çapı 10 cm Olan İletken Silindirik Cisim İçin Elde Edilen Sonuçlar	54
Çizelge-4.7 2-4 GHz Bandında Çapı 5 cm Olan İletken Silindirik Cisim İçin Elde Edilen Sonuçlar	55
Çizelge-4.8 3-5 GHz Bandında Çapı 50 cm Olan İletken Silindirik Cisim İçin Elde Edilen Sonuçlar	57
Çizelge-4.9 3-5 GHz Bandında Çapı 20 cm Olan İletken Silindirik Cisim İçin Elde Edilen Sonuçlar	58
Çizelge-4.10 3-5 GHz Bandında Çapı 10 cm Olan İletken Silindirik Cisim İçin Elde Edilen Sonuçlar	60
Çizelge-4.11 3-5 GHz Bandında Çapı 5 cm Olan İletken Silindirik Cisim İçin Elde Edilen Sonuçlar	61
Çizelge-4.12 6-10 GHz Bandında Çapı 50 cm Olan İletken Silindirik Cisim İçin Elde Edilen Sonuçlar	63
Çizelge-4.13 6-10 GHz Bandında Çapı 20 cm Olan İletken Silindirik Cisim İçin Elde Edilen Sonuçlar	64

Çizelge-4.14 6-10 GHz Bandında Çapı 10 cm Olan İletken Silindirik Cisim İçin Elde Edilen Sonuçlar	66
Çizelge-4.15 6-10 GHz Bandında Çapı 5 cm Olan İletken Silindirik Cisim İçin Elde Edilen Sonuçlar	67
Çizelge-4.16 3 GHz'de 10 cm Çaplı İletken Silindirik Cisim İçin Elde Edilen Sonuçlar	69
Çizelge-4.17 3 GHz'de 10 cm Çaplı İletken Silindirik Cisim ile 5 cm Kenar Uzunluğundaki İletken Kare Cisim İçin Elde Edilen Sonuçlar	70
Çizelge-4.18 3 GHz'de 40 cm Çaplı İletken Silindirik Cisim ile 10 cm Kenar Uzunluğundaki İletken Kare Cisim İçin Elde Edilen Sonuçlar	72
Çizelge-5.1 2-4 GHz Bandında Çapı 20 cm Olan İletken Dairesel Kesitli Silindirik Cisim İçin Elde Edilen Sonuçlar.....	74
Çizelge-5.2 3-5 GHz Bandında Çapı 50 cm Olan İletken Dairesel Kesitli Silindirik Cisim İçin Elde Edilen Sonuçlar.....	76
Çizelge-5.3 6-10 GHz Bandında Çapı 50 cm Olan İletken Dairesel Kesitli Silindirik Cisim İçin Elde Edilen Sonuçlar.....	78

SÖZLÜK

Türkçe	İngilizce
Bistatik RKA Profili	Bistatic RCS Profile
Dielektrik Katman	Dielectric Layer
İsoparametrik Eşleme	Isoparametric Mapping
Kare Ortalama Karekök Hatası	Root Mean Square Error
Koordinat Dönüşümü	Coordinate Transformation
Monostatik RKA Profili	Monostatic RCS Profile
Mükemmel Uyumlu Katman	Perfectly Matched Layer
Parça Değişimi	Crossover
Radar Kesit Alanı	Radar Cross Section
Radar Kesit Alanı Azaltma	Radar Cross Section Reduction
Saçılma Problemi	Scattering Problem
Sonlu Elemanlar Yöntemi	Finite Element Method
Yansımaz Oda	Anechoic Chamber
Yön-Bağımlı	Anisotropic
Yön-Bağımsız	Isotropic
Zayıf Varyasyonel Formu	Weak Variational Form

1. GİRİŞ

Günümüzde, başta savunma sanayii olmak üzere biyomedikal, otomotiv ve robotik gibi sektörlerde, elektromanyetik ve uygulamaları önemli bir yer edinmiştir. Dünyada güçlü ülkeler, öz kaynaklarının büyük bir kısmını savunma sanayiinde elektronik harp için kullanmaktadır. Elektronik harp, içerisinde birçok farklı amaç için uygulama bulundurmaktadır. Bunlardan başlıcaları radarda görünmezlik, sinyal karıştırıcılar, hedef şaşırtma, dost-düşman tanıma sistemleridir.

İkinci Dünya Savaşı esnasında ve sonrasında radar sistemlerinde kaydedilen gelişmeler, elektromanyetik dalgalar ile çeşitli malzemeler arasındaki etkileşimlerin keşfedilmesinde önemli rol oynamıştır. Bu keşiflerin bir sonucu olarak ise bilim insanları, cisimlerden geri yansıyan elektromanyetik dalgaları azaltmanın yollarını araştırmaya başlamışlardır [1]. Radarda görünmezlik teknolojisi, 1970'lerden günümüze birçok bilim insanının ilgisini çeken, üzerinde büyük araştırmalar yapılan, sayısız makale ve çalışma içeren, savunma sanayii şirketleri tarafından yüklü miktarlarda kaynak ayrılan bir alan haline gelmiştir.

1.1 Literatürde RKA Azaltma

Radar kesit alanı azaltma teknikleri üç ana başlık içerisinde incelenebilmektedir. Bunlar;

- 1) Fiziksel şekillendirme ile RKA azaltma
- 2) Radar sönümleyici malzemeler yardımıyla RKA azaltma
- 3) Aktif RKA azaltma

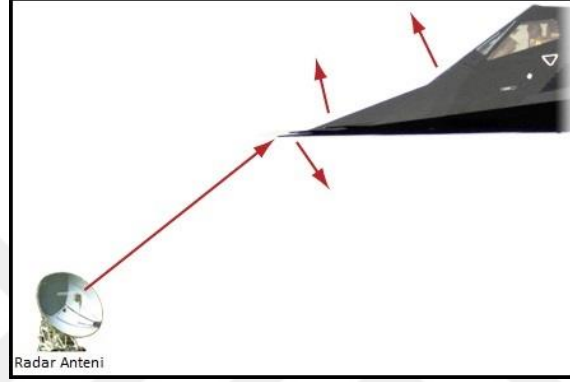
olarak gösterilebilir [2]. Bu tezde yön-bağımsız kolay üretilebilir dielektrik malzemeler yardımıyla RKA azalması hedeflenmektedir.

1.1.1 Fiziksel Şekillendirme ile RKA Azaltma

Cisimleri şekillendirerek RKA azaltmak bilinen en temel ve en önemli yöntemlerden birisidir. Bu yöntemde, cisimlerin kenar ve uç noktaları sivri tutularak veya elektromanyetik dalga geliş yönünü değiştirecek şekilde tasarlanarak RKA azalması hedeflenmektedir. Ancak, günümüz teknolojisi göz önünde bulundurulduğunda, bu

şekillendirme sonrası cismin, gelen elektromanyetik dalgaları rastgele başka yönlerde doğru yansıması nedeniyle, bu yöntem, cismin bistatik radarlar tarafından algılanma olasılığını arttırmaktadır. Bu nedenle, cismin tespit edilebilme olanağı oluşmaktadır.

Şekil-1.1’de, şekillendirme yapılan cismin, üzerine gelen elektromanyetik dalgaları nasıl geri yansıttığı gösterilmektedir.



Şekil-1.1 Fiziksel Şekillendirme ile RKA Azaltılması [3]

1.1.2 Radar Sönümleyici Malzemeler Yardımıyla RKA Azaltma

Günümüzde radar sönümleyici malzemeler kullanarak RKA azaltma uygulamaları sıklıkla görülmektedir. Üç farklı yöntem uygulanarak, radar sönümleyici malzemeler ile RKA azaltma yapılabilmektedir. Aşağıda bu yöntemler belirtilmiştir.

- 1) Kademeli Ara Yüzeyler Yöntemi
- 2) Rezonant Malzemeler Yöntemi
- 3) Analog Devre Tabanlı Radar Sönümleyici Malzemeler Yöntemi

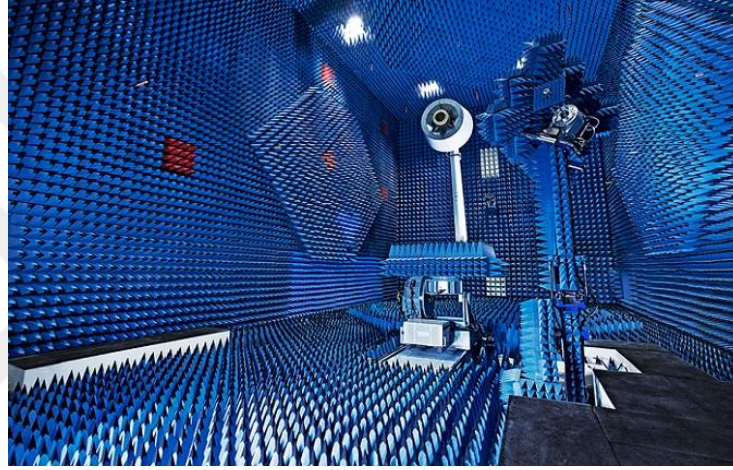
1.1.2.1 Kademeli Ara Yüzeyler Yöntemi

Bir yönde hareket eden elektromanyetik dalga bir yüzeye çarptığında, dalga'nın belirli bir kısmı geri yansımaktadır. Bu yansıma, dalga'nın hareket ettiği ortam ile çarptığı yüzey arasındaki empedans farkıyla doğru orantılıdır. Empedans farkı fazlaysa daha çok, azsa dalga'nın daha küçük bir bölümü geri yansımaktadır. Buradan hareketle üç çeşit empedans uyumlama tekniği bulunmaktadır. Bu teknikler:

- 1) Piramit şeklinde olan malzemeler ile empedans uyumlama
- 2) Aşamalı yüzeyler ile empedans uyumlama
- 3) Uyumlayan katman ile empedans ayarlama

1.1.2.1.1 Piramit Şeklinde Olan Malzemeler İle Empedans Uyumlama

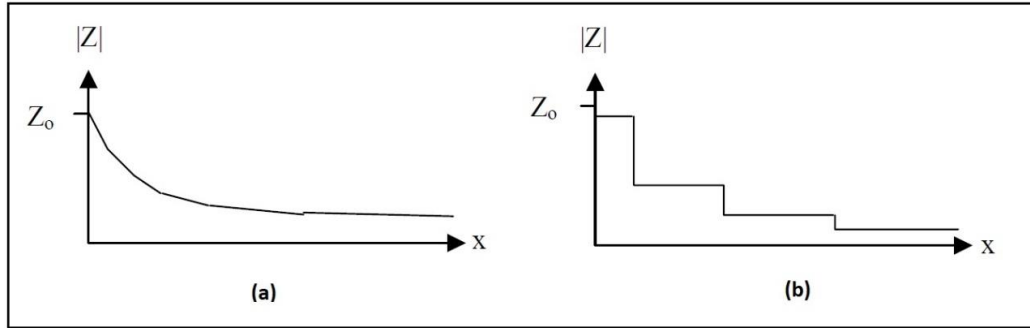
Elektromanyetik dalganın hareket ettiği ortam ile çarptığı yüzeyin arasında kademeli bir geçiş sağlamak amacıyla kullanılan bu malzemeler, bir dalgaboyu büyüklüğünde ve sıklığında olabilmektedir. Geniş frekans bandında sinyal gücünü 1000 kata kadar azaltabildikleri gibi, boyutlarının büyük olması nedeniyle kapladıkları yüzeyin kalınlaşmasına ve cisimlerin ağırlaşmasına yol açmaktadırlar. Günümüzde uygulandığı yerler yansısız odalardır (bknz. Şekil-1.2) [2].



Şekil-1.2 Yansısız Oda (Piramit Şeklindeki Dalga Sönümleyici) [3]

1.1.2.1.2 Aşamalı Yüzeyler ile Empedans Uyumlama

Levha şeklinde olan bu malzeme az kayıplı ve çok kayıplı bir malzemenin karışımıyla elde edilmektedir. Piramit şeklindeki malzemelere göre avantajları, daha ince ve hafif olmalarıdır. Öte yandan dezavantajları ise, işlev olarak piramit şeklindeki malzemelere oranla daha kötü bir performans göstermeleridir.

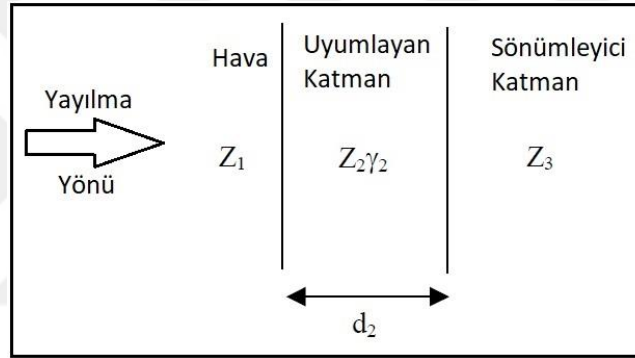


Şekil-1.3 Aşamalı Yüzeyler ile Elde Edilen Malzemeler [2]

Şekil-1.3(a)'da empedansları farklı yüzeyler arasındaki geçişin pürüzsüz, (b)'de ise basamaklar şeklinde olarak değişen durumu gösterilmektedir.

1.1.2.1.3 Uyumluyıcı Katman ile Empedans Ayarlama

Katman uyumlama tekniğı için yapılan malzemelerin temel amacı, katmanların kalınlıklarının azaltılması ve geçiş bölgesinde kademeli bir iletim sağlamaktır (bkz. Şekil-1.4). Katman uyumlama yapılırken, dalğanın geldiğı yönde ilk karşılaşıacağı yüzey ile dalga arasına bir katman koyularak geçiş bölgesi oluşturulmaktadır. Bu geçiş bölgesinin empedansı, hava ile elektromanyetik dalğanın ilk çarpacağı ortam arasında bir değeri almaktadır.



Şekil-1.4 Katman Uyumlama ile Malzeme Tasarımı [2]

Geçiş bölgesinin empedansı aşağıdaki formülde gösterildiğı gibi hesaplanmaktadır.

$$Z_2 = \sqrt{Z_1 Z_3} \quad (1.1)$$

Denklem 1.1'de yapılan empedans uyumlama tekniğı, mikrodalga frekanslarında, çeyrek dalga boyu kalınlığında uygulanarak elde edilmektedir. Çeyrek dalgaboyundaki dönüştürücüler %20 bant genişliğinde iyi performans sergileyebildikleri için bu teknik, geniş frekans bantlı uygulamalarda kullanışlı olmamaktadır. [2]

1.1.2.2 Rezonant Malzemeler Yöntemi

Rezonant malzemeler kullanılarak RKA azalması amaçlanan bu teknikte, dalğanın bulunduğu ortam ile ilk çarpacağı ortam arasında bir empedans uyumlaması yapılmamaktadır. Kullanılan malzemeler çok ince olduğundan empedans uyumlaması yapılamamaktadır. Bu yüzden, dalğanın çarptığı katmanda hem yansıma hem de iletim gözlemlenmektedir. Yüzeyin üzerinden karşıya geçen dalğanın ise, ilk yüzeyin

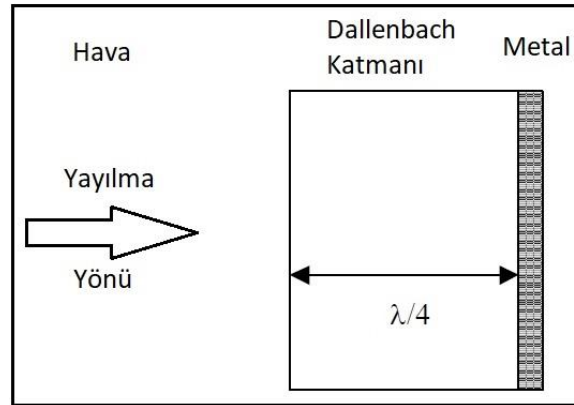
sonrasında bulunan iletken metal cisme çarpıp geri yansıması sağlanmaktadır. Burada hedeflenen, yansıyan ve iletilen dalgaların, kat ettikleri mesafeler ve yansdıkları yüzeylerden gelen faz farklarının ilk yüzeyin dışında birbirlerini sönümlemesidir. Eğer, ilk yüzeyden iletilen dalganın kat ettiği mesafe dalga boyunun yarısı ve katlarıysa, ilk yüzeyden yansıyan dalga ile fazları 180 derece zıt düşeceğinden, birbirlerini yok edeceklerdir [2].

Rezonant malzemeler ile üç çeşit RKA azaltma yapılabilir:

- 1) Dallenbach katmanı
- 2) Salisbury ekranı
- 3) Jaumann katmanları

1.1.2.2.1 Dallenbach Katmanı

Dallenbach katmanı, metal bir iletken yüzey üzerine konan, çeyrek dalga boyu kalınlığında homojen bir malzemedir (bkz. Şekil-1.5). Bu yöntem, elektromanyetik dalgaların birinci ve ikinci yüzeylerden yansımalarındaki etkileşimin yok edici etkisinden faydalanmaktadır. Geri yansıyan dalganın minimize edilebilmesi için, aşağıdaki şekilde de gösterildiği gibi, katmanın etki gösterdiği empedans değerinin, dalganın geldiği ortamdaki empedans değerine eşit olması gerekmektedir.

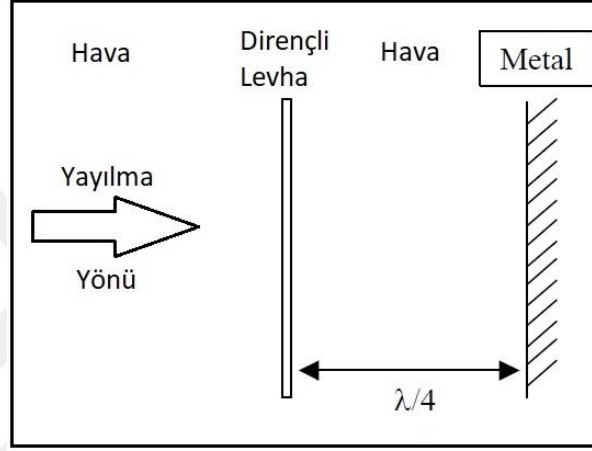


Şekil-1.5 Dallenbach Katmanı [2]

Bu problemdeki değişkenler, katmanın dielektrik sabiti, kaybının büyüklüğü ve katmanın kalınlığıdır. Yapılan çeşitli optimizasyonlar sonucunda, geniş bantlı bir tepki elde etmenin mümkün olmadığı, ancak çok sayıda katman ile bunun mümkün olabileceği anlaşılmaktadır [2].

1.1.2.2.2 Salisbury Ekranı

Salisbury, rezonant bir malzeme olmasına rağmen, diğer sönümleyici malzemelerde olduğu gibi dielektrik katsayısı ve kayıp parametrelerine bağlı olmayan, belirli bir direnç gösteren levha yardımıyla RKA azaltma hedeflenmiştir. Şekil-1.6'da görüldüğü gibi, dirençli bir levha ve metal cisim arasında çeyrek dalga boyunun tek çarpanları kalınlığı kadar hava boşluğu bırakılarak Salisbury ekranı oluşturulmaktadır.

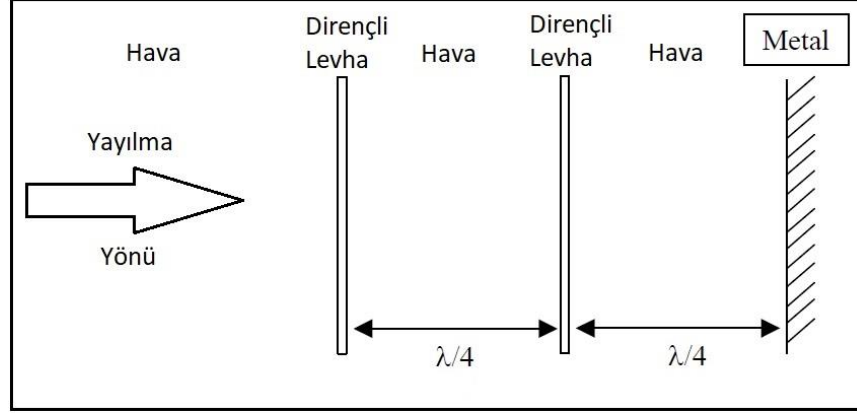


Şekil-1.6 Salisbury Ekranı [2]

Mikrodalga teorisi göz önüne alındığında, metalin kısa devre olduğu düşünülürse, çeyrek dalga boyu kalınlığındaki hava kısa devreyi dirençli levhanın bulunduğu noktada açık devreye dönüştürmektedir. Bu da, etkileyen empedansın dirençli levhanın empedansına denk geldiğini göstermektedir. Salisbury ekranı da çeyrek dalga boyu uzaklığında dirençli levha bulundurması nedeniyle, geniş bantlı uygulamalar için elverişli olmamaktadır [2].

1.1.2.2.3 Jaumann Katmanları

Jaumann katmanları, bir önceki kısımda anlatılan ve geniş bir frekans spektrumunu kapsamadığı söylenen Salisbury ekranının, frekans bandını genişletme amacıyla ortaya konan bir yöntemdir. Bu yöntemin temelinde, birden çok sayıda dirençli levha bulunmaktadır (bkznz. Şekil-1.7). Her bir levha arasında, Salisbury ekranında da olduğu gibi çeyrek dalga boyu kadar bir mesafe bulunmaktadır. Ayrıca, levhalar arasında yine hava boşluğu bırakılmıştır. Dalganın geliş yönüne en uzakta bulunan dirençli levha ve hava boşluğundan sonra, ortam metal iletken bir levha ile sonlandırılmaktadır.

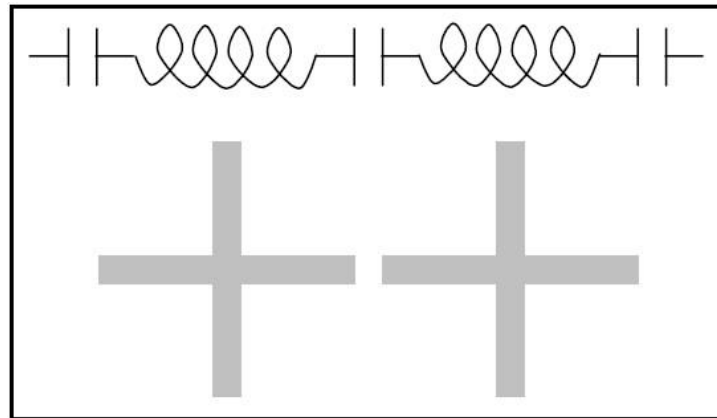


Şekil-1.7 Jaumann Katmanları [2]

Çok sayıda katman kullanılarak elde edilen yukarıdaki şekildeki yapı, geniş frekans bandında yüksek sönümlenme sağlayabilmektedir. Yapılan benzetimler sonucunda, 7-15 GHz bandında 30 dB kadar azalmaya varan yansıma elde edilebilmiştir [2]. Smith chart üzerinden de mikrodalga teorisi göz önünde bulundurularak empedansların nereden nereye gittiği rahatlıkla gözlemlenebilmektedir.

1.1.2.3 Analog Devre Tabanlı Radar Sönümleyici Malzemeler

Rezonant malzemelerle karşılaştırıldığında, bant genişliği ve dalga sönümlenme kabiliyetleri bakımından daha kullanışlı ve farklı yollardan kayıp getiren yöntemler uygulanabilmektedir. Salisbury ekranı ve Jaumann katmanlarında olduğu gibi saf direnç içeren plakalar kullanmak yerine, kapasitans ve endüktans terimlerini de içeren malzemeler yardımıyla, geniş bantlı radar sönümleyici malzemeler tasarlamak mümkün olabilmektedir.



Şekil-1.8 Analog Devre Tabanlı Malzeme Tasarımı [2]

Şekil-1.8’de görüldüğü gibi, iletim hattı teorisi yardımıyla, artı şeklindeki iki elemanın arasındaki boşluk, analog devre denkliği olarak kapasitansa dönüşmektedir. Uzunluklar ise endüktans olarak modellenebilmektedir. Bu sistemdeki kayıp ise, yukarıdaki şekildeki iletim hatlarını oluşturan maddenin iletkenliğinden meydana gelmektedir [2].

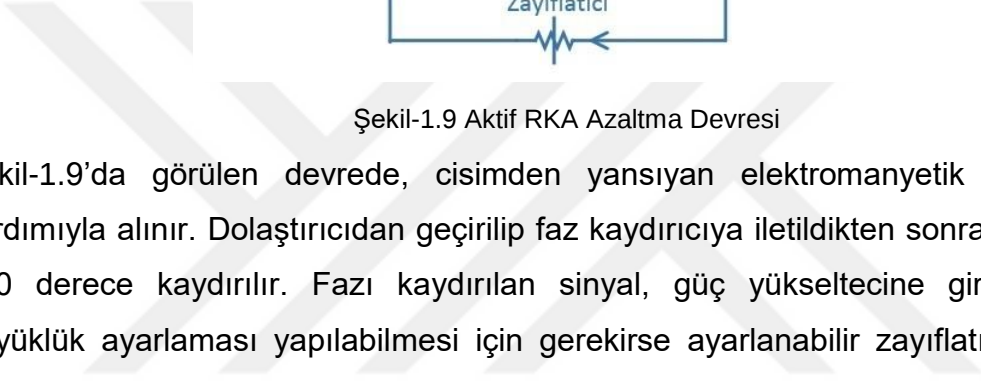
1.1.3 Aktif RKA Azaltma

Belirli bir cisim üzerinden saçılan elektromanyetik dalgaları gerçekçi bir şekilde sadeleştirebilmek için, hem büyüklük hem de faz açısından oluşabilecek hata oranını minimize etmek gerekmektedir. Aktif RKA azaltma yöntemlerinin, Bölüm 1.1.1 ve 1.1.2’de bahsedilen yöntemlerle karşılaştırıldığında belirgin avantajları ön plana çıkmaktadır. Aktif yöntemlerde, hedefi şekillendirmek veya hedefin çevresini radar sönümleyen malzemelerle kaplamak gerekmemektedir. Aktif yöntemler, frekans yükseldikçe RKA azaltmakta zorlanırken düşük frekanslarda pasif yöntemlere oranla daha etkili performans göstermektedir.

Aktif RKA azaltma yöntemi, yapay elektromanyetik alan yaratan, akıllı ve uyarlamalı bir tekniktir. Cisimden saçılan elektromanyetik dalga, uyarlamalı yöntemlerle üretilen alanla aynı büyüklükte fakat 180 derece faz farklı olmaktadır. Bu sayede, dalgalar birbirlerini sönümleyerek RKA azalması sağlamaktadır.

Aktif RKA azaltma, son derece karmaşık ve elde edilmesi güç bir tekniktir. Bu yöntem için, RF devre tasarımı, elektromanyetik dalga göndermek ve almak için antenler ve işlemci gücü gerekmektedir.

Şekil-1.9’da tipik bir aktif RKA azaltma RF devresi gösterilmektedir.



Şekil-1.9 Aktif RKA Azaltma Devresi

Şekil-1.9'da görülen devrede, cisimden yansıyan elektromanyetik dalga anten yardımıyla alınır. Dolaştırıcıdan geçirilip faz kaydırıcıya iletdikten sonra, sinyalin fazı 180 derece kaydırılır. Fazı kaydırılan sinyal, güç yükseltecine girmeden önce büyüklük ayarlaması yapılabilmesi için gerekirse ayarlanabilir zayıflatıcı yardımıyla zayıflatılır. Güç yükselteciden çıkan sinyal, hem büyüklük olarak yansıyan sinyale eşit hem de sönümleyebilmesi için fazı 180 derece kaymış durumda dolaştırıcıdan geçerek antenden havaya iletir. Böylece, birbirini sönümleyen sinyaller sayesinde RKA azalması gerçekleştirilmektedir [4].

1.2 Elektromanyetik Saçılma Problemlerinin Çözüm Yöntemleri

Elektromanyetikte saçılma problemlerinin karmaşıklığı nedeniyle, bu yöntemler analitik metotlarla çözülmesi zor bir hale gelmiştir. Günümüzde nümerik yöntemler sayesinde, birçok problem kesin sonuca yakın bir şekilde çözüm vermektedir.

Elektromanyetik saçılma problemlerinin çözüm yöntemleri aşağıdaki Çizelge-1.1’de özetlenmiştir.

Çizelge-1.1 Matematiksel Modelleme Yöntemleri

Analitik Yöntemler	Nümerik Yöntemler	Hibrit Yöntemler
Değişkenlere Ayırma Yöntemi	Momentler Yöntemi (MoM)	MoM-GTD
Green Fonksiyonu Yaklaşımları	Zamanda Sonlu Farklar (FDTD) Yöntemi	Sonlu Elemanlar -MoM
Uyumlu Eşleme	Sınır Eleman Yöntemi	Spektral Alan Yaklaşımı
Asimptotik Yöntemler (GO, PO, GTD, UTD)	Varyasyonel Yöntemler (Rayleigh-Ritz)	
Seri Açılım Yöntemi	İletim Hattı Yöntemi	
	Çizgiler Yöntemi	
	Eşlenik Gradyan Yöntemi	
	Monte Carlo Yöntemi	
	Sonlu Elemanlar Yöntemi	

Çizelge-1.1’de görüldüğü gibi, saçılma problemleri üç ana başlıkta toplanmaktadır. Bu tezde yapılan tüm benzetim çalışmaları sonlu elemanlar yöntemi ile yapılmaktadır.

1.2.1 Analitik Yöntemler

Elektromanyetikte çoğu basit ve karmaşık problemler, birden çok değişken içeren fonksiyonlar ve diferansiyel denklemler ile ifade edilmektedir. Bu tür denklemlere, kısmi diferansiyel denklemler denmektedir. Kısmi diferansiyel denklemlere örnek olarak, Laplace denklemi, Poisson denklemi, dalga denklemi (Helmholtz denklemi) ve zamana bağlı dalga denklemi verilebilir. Buradaki bütün denklemler aşağıdaki şekilde ifade edilebilmektedir.

$$Lf = g \quad (1.2)$$

Denklem 1.2’de, g değişkeni bilinen bir kaynak fonksiyonu, f bilinmeyen skalar bir fonksiyon, L ise diferansiyel bir operatördür [5].

Elektromanyetik problemlerin çözümü, ilgili diferansiyel denklemi direkt kullanarak bulunabildiği gibi, Green fonksiyonu yardımıyla integral denklem haline getirilerek de bulunabilmektedir. Integral denklem $L_I g = f$ şeklinde gösterilebilir. Burada, L_I integral operatörü temsil etmektedir. Elektromanyetikte son derece büyük bir öneme sahip olan Green fonksiyonu, elektromanyetik bir sistemin dürtü (impulse / delta) fonksiyonuna nasıl tepki verdiğini göstermektedir. Bu nedenle de, Green fonksiyonu bilindiği durumda, herhangi bir uyarıya/kaynağa verilecek tepki süperpozisyon ile bulunabilmektedir [5].

Ayrıca, analitik yöntemler sınıfına giren ışın optiği temeline dayanan asimptotik yöntemler, elektromanyetikte saçılma problemlerinde sıkça kullanılmaktadır. Asimptotik teknikler, yansıma, kırılma ve kırınım etkilerini hesaba katan ışın optiği temelli yöntemlerdir. Bu yöntemlerden sıkça kullanılanlar, GO (Geometrik Optik), GTD (Geometrik Kırınım Teorisi), UTD (Düzgün Kırınım Teorisi), PO (Fiziksel Optik) ve PTD (Fiziksel Optik Kırınım Teorisi)'dir [6].

1.2.2 Nümerik Yöntemler

Sınır değer problemleri, Denklem-1.2'de olduğu gibi ifade edilebilmektedir. Bu denklemin, bilgisayara bağlı çözümü ise ayrıklaştırma yöntemi ile yapılabilir. Bu işlem sonucunda, aşağıdaki denklemde olduğu gibi bir matris denklemi elde edilmektedir.

$$Ax = b \quad (1.3)$$

Denklem 1.3'de, A matrisi Denklem-1.2'deki L operatörüne, b vektörü ise uyarı/kaynak fonksiyonu olan g değişkenine denk gelmektedir. x vektörü, probleme özgü bilinmeyeni (örneğin, saçılan alanı) temsil etmektedir. Bu mantıkla çalışan birçok nümerik yöntem bulunmaktadır. Bunlardan başlıcaları, sonlu farklar yöntemi ve tez boyunca yapılan analizlerde kullanılan sonlu elemanlar yöntemidir. Bir diğer önemli yöntem olan momentler yöntemi ise, integral denklemin ayrıklaştırılması sonucu oluşan matris sisteminin çözümüne dayanan bir yöntemidir. Matris temelli bu yöntemlerin uygulama adımları Şekil-1.10'da özetlenmektedir.



Şekil-1.10 Matris Temelli Nümerik Yöntemlerin Uygulama Adımları

1.2.2.1 Momentler Yöntemi (MoM)

Momentler yöntemi, ağırlıklandırılmış kalıntı (weighted residual) yaklaşımına dayanan ve integral denklemlerinin çözülmesinde yaygın olarak kullanılan nümerik yöntemdir. Bu yöntemde, kalıntı aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$R = L_I(g) - f \quad (1.4)$$

Denklem 1.4'deki L_I , integral operatörü ifade etmektedir. Bu yöntem, kalıntının belirli ağırlık fonksiyonlarıyla içler çarpımı ifadesinin sıfıra eşitlenmesine dayanmaktadır. Bilinmeyenler, temel (basis) fonksiyonların bilinmeyen katsayılarla ağırlıklandırılmış toplamı şeklinde ifade edilmekte ve doğrusal bir matris denklemi elde edilmektedir. Matris denkleminin çözümünden, bilinmeyen katsayılar hesaplanmaktadır. Işıma ve saçılım problemlerinde, moment yönteminde elde edilen matrise genel olarak empedans matrisi (Z) adı verilmektedir. Denklem 1.5'in çözümünden bilinmeyen akım (I) değerleri bulunmaktadır.

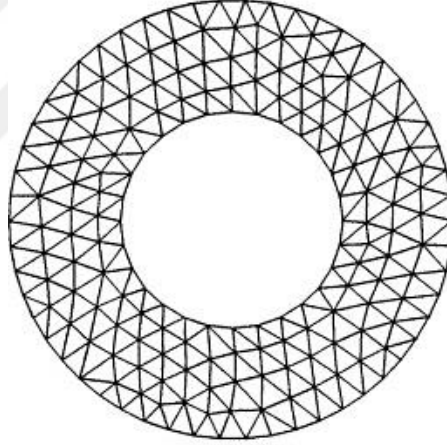
$$ZI = V \quad (1.5)$$

1.2.3.2 Sonlu Elemanlar Yöntemi

Bu tezdeki tüm benzetim çalışmaları, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi (SEY), kısmi diferansiyel denklemlerden oluşan sınır değer problemlerinin yaklaşık çözümü için geliştirilen varyasyonel bir yöntemdir.

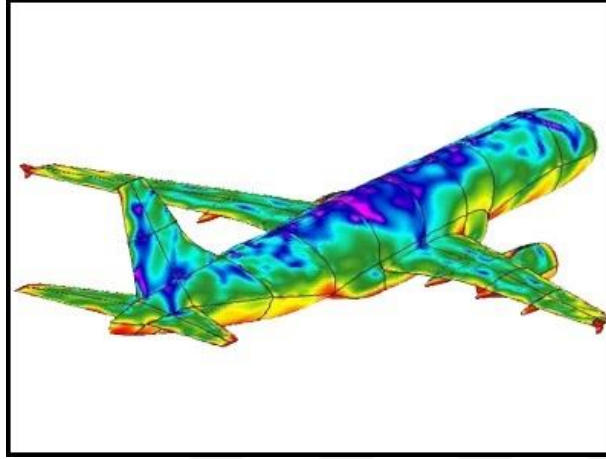
Sonlu elemanlar yönteminde çözülmek istenen problem, Denklem-1.2'de görüldüğü gibi ifade edilmektedir. Bu denklemdeki L , diferansiyel operatörü ifade etmektedir. SEY, problemin geometrisini belirli bir şekilde (örneğin, iki boyutta üçgen, dörtgen, üç boyutta dört yüzlü, altı yüzlü) sonlu elemanlara bölerek ayrıklaştırır.

Şekil-1.11'de, hesaplama bölgesinin üçgen elemanlarla ayrıklaştırılması gösterilmektedir.



Şekil-1.11 Sonlu Elemanlar Yönteminde Üçgen Elemanlarla Ayrıklaştırma [7]

Elemanlar, düğüm (node) diye adlandırılan noktalarla birleştirilir. Problemin sonunda, Denklem 1.3'deki gibi bir matris sistemi elde edilir. Sınır değer koşulları uygulandıktan ve matris sistemi çözüldükten sonra, problemin tanımına (TM_z veya TE_z) göre elektrik veya manyetik alanın düğüm noktalarındaki değerleri elde edilir. Akım değerleri, son işlem (post-processing) aşamasında bulunur. RKA hesaplaması ise, akım değerleri bulunduktan sonra uygulanacak olan birtakım yöntemler (Huygens prensibi gibi) ile bulunur. Şekil-1.12'de bir uçağın yüzeyi üzerinden akan akımların yoğunluğuna göre renklendirme yapılmıştır.



Şekil-1.12 Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Elde Edilen Yüzey Akımları [8]

1.3 Koordinat Dönüşümü Tekniği

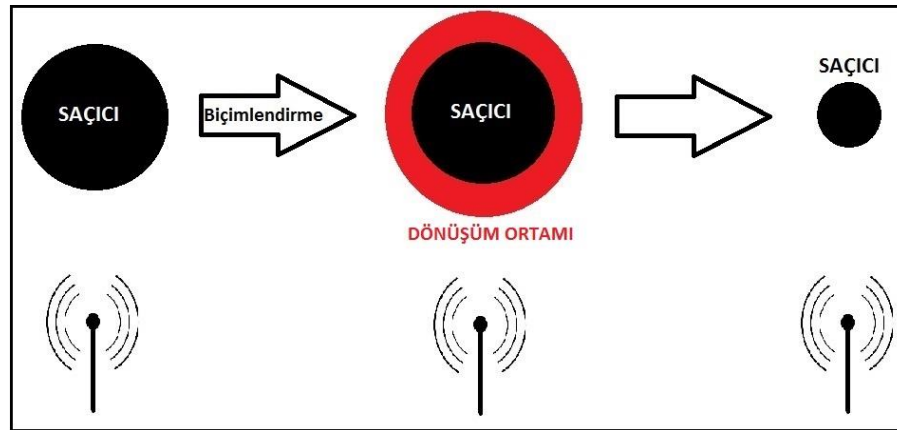
Dönüşüm elektromanyetiği yaklaşımı, Maxwell denklemlerinin koordinat dönüşümü sırasında şeklinin değişmemesi prensibine dayanır. Koordinat dönüşümü tekniği olarak da bilinen bu yaklaşım, belirli bir amaca uygun bir şekilde koordinat dönüşümü uygulanmış orijinal ortamı, Maxwell denklemlerinin sağlandığı yön-bağımlı bir ortam haline dönüştürür. 2006'da [9], dönüşüm optiği/elektromanyetiği prensibine dayanan yöntemle, elektromanyetik dalgaların özel metamalzeme katmanlar sayesinde kontrol edilebildiği vurgulanmıştır. Optik frekans bantlarından doğru akıma kadar olan spektrumda özel malzemelerin yardımıyla tasarımlarda esneklik kazanıldığından bahsedilmektedir. Kırılma indisinin negatif değerlere ulaşabildiği, doğada bulunmayan bu malzemeler yardımıyla elektromanyetik dalgaların istenilen doğrultuda hareketinin sağlandığı ve cisimler etrafında tasarlanan metamalzeme katmanlar yardımıyla cisimlerin dışarıdaki bir gözlemciye göre görünmez kılınabildiği gösterilmektedir. Yeniden şekillendirme yaklaşımı ise, koordinat dönüşümü tekniğine dayanan ve görünmezlik yaklaşımının genelleştirilmiş hali olan bir yaklaşımdır [10]. Bu yaklaşıma göre, herhangi bir cisim amaca uygun şekilde tasarlanmış yön-bağımlı katmanla kaplandığı takdirde, uzaydaki herhangi bir gözlemci onu şekli değiştirmiş bir cisim olarak algılamaktadır. Yeniden şekillendirme yaklaşımı, cismi olduğundan küçük gösterilmesi ve bu sayede cismin RKA değerinin azaltılması amacıyla da kullanılabilir. Ancak bu yaklaşım ile tasarlanan ortamların fiziksel gerçekleşmesi metamalzeme teknolojisi kullanarak mümkün olmakla birlikte fiziksel tasarımda bazı zorluklar

bulunmaktadır. En önemli zorluklardan biri, tasarlanan malzeme (elektrik ve manyetik geçirgenlik) parametrelerinin yön-bağımlı olması ve koordinat dönüşümü uygulanmasından dolayı konumsal olarak hızlı değişim gösterebilmesidir. Bu nedenle, bu tip yapay malzemelerin fiziksel tasarımını kolaylaştırmak için bir takım homojenleştirme yaklaşımlarının kullanılması gerekir.

1.4 Tezin Amacı

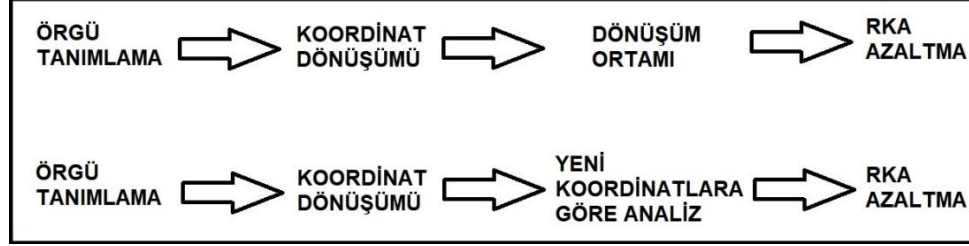
Bu tezde, yeniden şekillendirme yaklaşımına dayanan, ancak bu yöntemle tasarlanan yapay yön-bağımlı malzemeler yerine yön-bağımsız ve fiziksel tasarımı kolay dielektrik malzemeler kullanılmasını amaçlayan bir RKA azaltma tekniği sunulmaktadır. Dönüşüm elektromanyetiği ile tasarlanan yapay malzemelerin davranışına eşdeğer davranış gösteren katmanlı doğal malzemelerin tasarımı genetik algoritma ile yapılmaktadır. Bütün benzetimlerde RKA hesabı sonlu eleman yöntemi ile yapılmaktadır.

Tezde, temel olarak iki ana iş yapılmaktadır. Birinci kısımda, RKA azaltılmak istenen cismin çevresinde bir dönüşüm ortamı tanımlanmaktadır. Bu dönüşüm ortamındaki malzeme, koordinat dönüşümü esaslarına dayanarak elde edilmektedir. Dönüşüm ortamı tanımlandıktan sonra, saçıcının radar kesit alanının malzeme ortamı olmayan durumda gözlemlenen değere göre düşmesi hedeflenmektedir. Şekil-1.13’de koordinat dönüşümü esasına dayalı oluşturulan dönüşüm ortamı ve amacı özetlenmektedir.



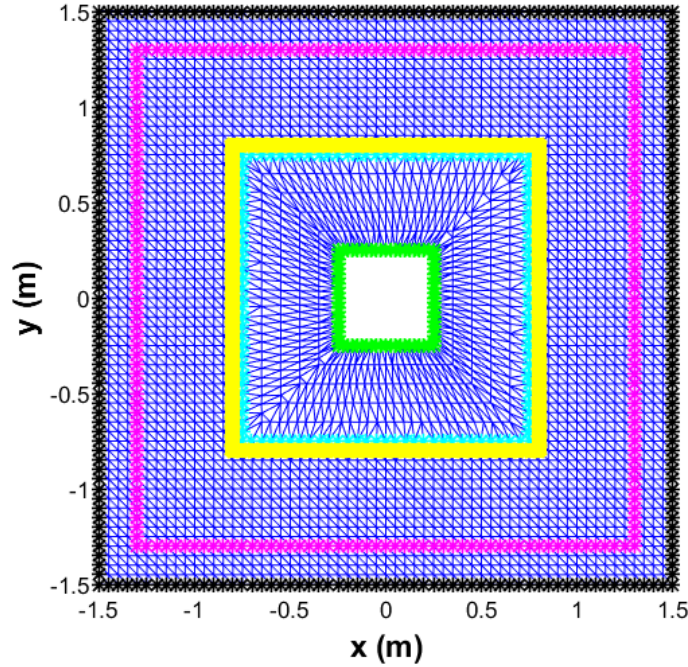
Şekil-1.13 Koordinat Dönüşümü ile RKA Azaltma

Dönüşüm ortamı ile elde edilen RKA azalması, dönüşüm ortamı olmadan, yalnızca koordinat dönüşümü sonrasında oluşturulan yeni koordinatlar ile test edildiğinde de aynı RKA azalmasına ulaşılabilmelidir. Bu durum Şekil 1.14’de özetlenmektedir.



Şekil-1.14 Tezin İlk Kısımında Yapılan Çalışma Özeti

Doğrusal koordinat dönüşümü sonrasında elde edilen yeni koordinatlara göre, Şekil-1.15’de görüldüğü bir örgü yaratılarak analiz yapıp aynı RKA azalmasına ulaştığı gözlemlenmektedir.

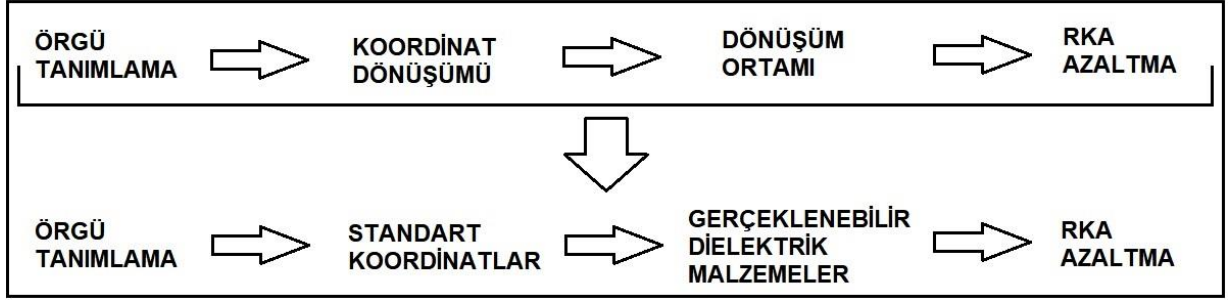


Şekil-1.15 Koordinat Dönüşümü Sonrası Yeni Koordinatlar ile Oluşturulan Örgü

Şekil-1.15’de mavi ve yeşil bölgeler arasında koordinat dönüşümü yapılmış örgü görülmektedir. Mavi sınır gerçek cismin geometrisini, yeşil sınır ise RKA’sı düşük olan cismin geometrisini ifade etmektedir. Sarı sınır, Huygens sınırını, pembe sınır ise Mükemmel Uyumlu Katman (Perfectly Matched Layer - PML) sınırını ifade etmektedir.

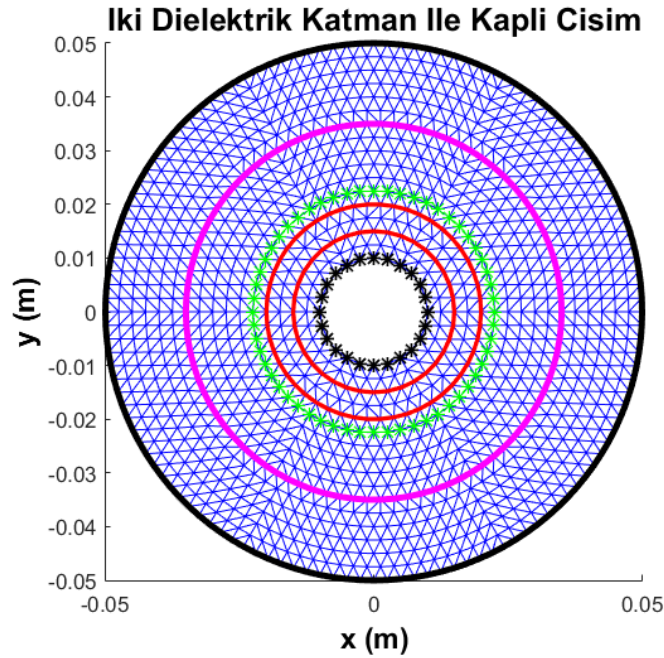
Tezin ikinci kısmında ise, ilk durumda yaratılan yön-bağımlı dönüşüm ortamı olmadan, saçıcının çevresini, laboratuvar ortamında gerçekleştirilebilir yön-bağımsız dielektrik malzemeler ile kaplayarak birinci kısımda elde edilen RKA azalması ile benzer sonuçlara ulaşmak amaçlanmaktadır.

Şekil-1.16'da tezde yapılan ikinci çalışma özetlenmektedir.



Şekil-1.16 Tezde Yapılan İkinci Çalışma

Şekil-1.16'da, ilk durum ile benzer RKA azalmasını elde edebilmek için genetik algoritması [11] kullanılmaktadır. Bu yöntem, dielektrik katmanların kalınlıklarını, dielektrik katsayılarını ve kayıp tanjantlarının en uygun değerlerini elde etmeye çalışmaktadır. Şekil-1.17'de genetik algoritmayı uygulamak için oluşturulan örgü çembersel cisim için gösterilmektedir.



Şekil-1.17 Genetik Algoritma İçin Oluşturulan Örgü Yapısı

Şekil-1.17’de, en içteki siyah sınır çembersel iletken saçıcıyı, art arda gösterilen kırmızı sınırlar çembersel saçıcı ile uyumlu dielektrik katmanları, yeşil sınır Huygens sınırını, pembe ile en dıştaki siyah sınırlar arasında kalan alan ise PML bölgesini göstermektedir.

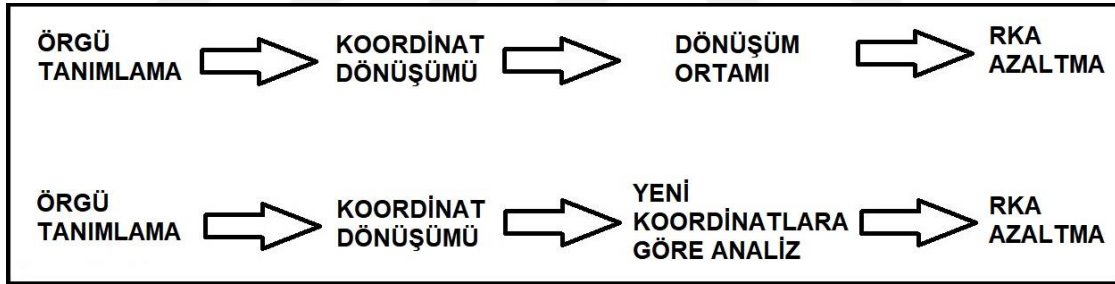
Aşağıda, Bölüm 2’de sonlu elemanlar tekniği ve koordinat dönüşümü tekniği formülasyonu verilmektedir. Bölüm 3’de genetik optimizasyon tekniği özetlenmektedir. Bölüm 4’de, geliştirilen MATLAB programlarıyla elde edilen nümerik sonuçlar sunulmaktadır. Bölüm 5’de ticari malzemeler ile elde edilen sonuçlar gösterilmektedir. Bölüm 6’da sonuç, değerlendirme ve gelecekte yapılabilecek çalışmalardan bahsedilmektedir.

2. FORMÜLASYON

2.1 Koordinat Dönüşümü

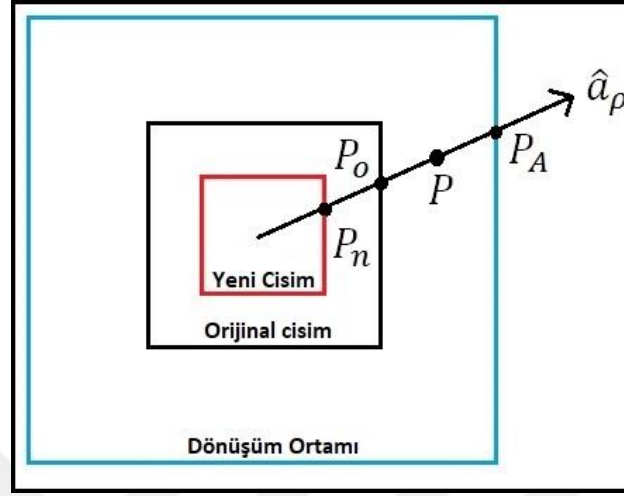
Giriş kısmında bahsedildiği gibi bu tezde temel olarak iki ana iş yapılmaktadır. Bunlardan birincisi koordinat dönüşümü yaparak yön bağımlı bir dönüşüm ortamı yaratıp RKA azaltması elde etmektir. Bu tekniğin uygulanabilir olması, Maxwell denklemlerinin koordinat dönüşümü altında şekil değiştirmeme özelliği sayesinde.

Şekil-2.1'de üstte gösterilen birinci durumda, koordinat dönüşümünün etkisini gösteren bir dönüşüm ortamı yaratılmakta ve Maxwell denklemleri bu yön-bağımlı ortam içinde standart koordinatlar ile çözülmektedir. Şekil-2.1'de altta gösterilen ikinci durumda ise, uygulanan koordinat dönüşümü sonrasında bir dönüşüm ortamı tanımlamaksızın dönüşüm yapıldıktan sonra elde edilen standart olmayan yeni koordinatlarla Maxwell denklemleri çözülmektedir. Bu iki durum birbirine eşdeğerdir ve aynı alan ve RKA değerlerini vermektedir.



Şekil-2.1 Koordinat Dönüşümü ile Radar Kesit Alanı Azaltma Yöntemi

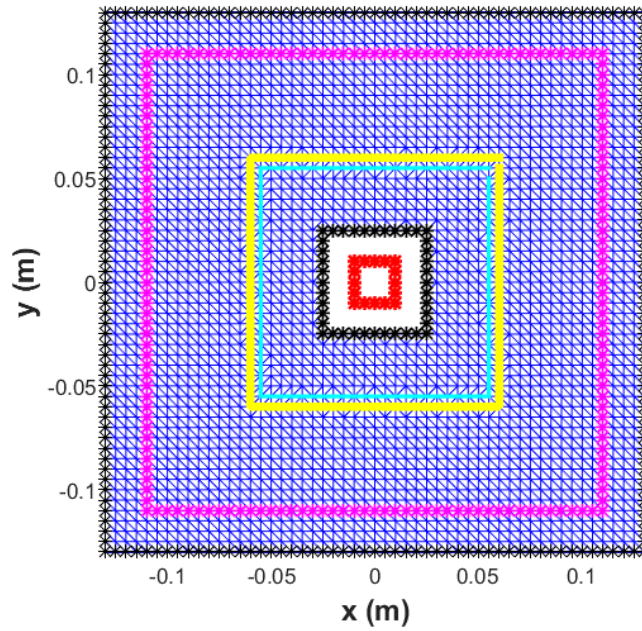
Şekil-2.2'de tanımlanan koordinat dönüşümü gösterilmektedir.



Şekil-2.2 Koordinat Dönüşümü Tekniği

Şekil-2.2'de siyah ile çizilen kare cisim orijinal olan ve RKA'sı azaltılmak istenen cismi temsil etmektedir. Orijinal cismin içerisindeki kırmızı kare cisim ise, hedeflenen RKA değerine sahip olan cisimdir. Orijinal cisim ile mavi ile belirtilen sınır arasındaki bölge ise yaratılan dönüşüm ortamını simgelemektedir.

Şekil-2.3'de yukarıda anlatılan duruma uygun örgü oluşturulmuştur.



Şekil-2.3 Koordinat Dönüşümü Öncesi Oluşturulan Örgü

Şekil-2.2'da olduğu gibi kırmızı, siyah ve mavi ile belirlenen bölgeler sırasıyla hedeflenen, orijinal ve dönüşüm ortamını temsil etmektedir. Sarı renkle belirtilen düğüm noktaları ise son aşamada RKA hesaplamak için kullanılacak olup Huygens sınırı olarak adlandırılmaktadır. Sarı düğüm noktaları ile pembe düğüm noktaları arasında kalan bölge Mükemmel Uyumlu Katman (Perfectly Matched Layer-PML) olarak adlandırılmaktadır. PML, elektromanyetik dalganın sönümlendirilmesi ve hesaplama alanının kısıtlanmasını sağlayan çok kullanışlı bir yöntemdir. Saçılan elektromanyetik dalgaların sonsuza kadar sönümlenerek gideceği düşünülürse, sonsuz büyüklükte bir matrisin çözülmesi gerekmektedir. PML sayesinde hesaplama alanı küçültülerek bilgisayarların çözebileceği büyüklüklerde matrisler oluşturulup çözüm elde edilebilmektedir.

Koordinat dönüşümü doğrusal bir dönüşüm aracılığı ile koordinatları normalde olduklarından farklı yerlere taşıyarak yapılmaktadır. Bu sayede, cisimler olduklarından daha büyük veya daha küçük algılanabilmektedir. Koordinat dönüşümü yaparak cisimlerin yalnızca boyutlarını değil şekillerini dahi değiştirmek mümkündür.

Aşağıdaki denklemde, yapılan doğrusal dönüşüm gösterilmektedir [10].

$$\tilde{\vec{r}} = \frac{\|\vec{r}_A - \vec{r}_n\|}{\|\vec{r}_A - \vec{r}_o\|} (\vec{r} - \vec{r}_o) + \vec{r}_n \quad (2.1)$$

Denklem 2.1'de $\vec{r}_A$ vektörü Şekil-2.2'deki P_A noktasını, $\vec{r}_o$ vektörü P_o noktasını ve $\vec{r}_n$ vektörü ise P_n noktasını ifade etmektedir. P_n noktası oluşturulmak istenen yeni cismin yüzeyindeki koordinatları temsil etmektedir. $\vec{r}$ vektörü ise dönüşüm ortamında yer alan bütün noktaları temsil ediyor olup P noktasına karşılık gelmektedir. Bu denklemde yer alan $\tilde{\vec{r}}$ vektörü, yeni koordinat düzlemine ait noktaları göstermektedir.

Denklem 2.1'de yapılan işlemde, hedef RKA azaltması olduğundan, dönüşüm ortamındaki tüm noktalar bulundukları konumlardan daha içerde bulunan noktalara karşılık gelecek şekilde taşınmaktadır. Böylece cismin olduğundan daha az bir RKA'ya sahipmiş gibi görülmesi hedeflenmektedir. Tam tersi durumda ise, amaç RKA arttırmak olursa, dönüşüm ortamındaki tüm noktalar bulundukları yerlerden daha dışarıda bulunan noktalara karşılık gelecek şekilde yerleştirilmelidir.

Bunların dışında, doğrusal olmayan dönüşümler uygulayarak, cisimleri oldukları şekillerden daha farklı şekillermiş gibi davranmalarını sağlamak da mümkündür. Denklem 2.1’de, $\vec{r}_n$ vektörü eğer $\vec{0}$ alınacak olursa, radar antenleri tarafından görünmez bir cisim elde etmek mümkün olmaktadır.

2.2 Sonlu Elemanlar Yöntemi Formülasyonu

Denklem 2.1’de anlatılan koordinat dönüşümü, yön bağımlı malzemelerin oluşmasına yol açmaktadır. Koordinat dönüşümünün yarattığı ortamın elektrik ve manyetik geçirkenlik tensörleri aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$\bar{\bar{\Lambda}} = (\det \bar{\bar{J}})(\bar{\bar{J}}^T \cdot \bar{\bar{J}})^{-1} \quad (2.2a)$$

$$\bar{\bar{\epsilon}} = \epsilon \bar{\bar{\Lambda}} \quad (2.2b)$$

$$\bar{\bar{\mu}} = \mu \bar{\bar{\Lambda}} \quad (2.2c)$$

Denklem 2.2a’da bulunan $\bar{\bar{J}}$, Jacobian matrisi, yeni oluşturulan koordinatların, eski koordinatlara göre değişimlerini gösteren kısmi türevler içeren bir matristir. ϵ ve μ değerleri ise orijinal ortam parametreleridir.

Aşağıdaki denklemde, Jacobian tensör matrisinin nasıl hesaplandığı gösterilmiştir.

$$\bar{\bar{J}} = \frac{\partial(\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z})}{\partial(x, y, z)} = \begin{bmatrix} \partial\tilde{x}/\partial x & \partial\tilde{x}/\partial y & \partial\tilde{x}/\partial z \\ \partial\tilde{y}/\partial x & \partial\tilde{y}/\partial y & \partial\tilde{y}/\partial z \\ \partial\tilde{z}/\partial x & \partial\tilde{z}/\partial y & \partial\tilde{z}/\partial z \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Üçgen elemanlar kullanıldığında ve zincir kuralı uygulandığında, 2.4’deki denklemlere ulaşılmaktadır [9].

$$\begin{bmatrix} \partial\tilde{x}/\partial x \\ \partial\tilde{x}/\partial y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_2 - x_1 & y_2 - y_1 \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \tilde{x}_2 - \tilde{x}_1 \\ \tilde{x}_3 - \tilde{x}_1 \end{bmatrix} \quad (2.4a)$$

$$\begin{bmatrix} \partial\tilde{y}/\partial x \\ \partial\tilde{y}/\partial y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_2 - x_1 & y_2 - y_1 \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \tilde{y}_2 - \tilde{y}_1 \\ \tilde{y}_3 - \tilde{y}_1 \end{bmatrix} \quad (2.4b)$$

Yukarıdaki denklemlerde yer alan $(\tilde{x}_i, \tilde{y}_i)$ çifti dönüşüm yapılmış olan koordinat düzlemine denk gelen noktaları, (x_i, y_i) çifti ise standart koordinat sistemindeki koordinatlara denk gelen noktaları temsil etmektedir.

Yapılacak olan benzetimler, TM_z durumunda z eksenini boyunca sonsuz uzunlukta olan iletken bir cisim için yapılacağından 2.3'deki denklem 2.5'de bulunan denkleme dönüşmektedir.

$$\bar{J} = \begin{bmatrix} \partial \tilde{x}/\partial x & \partial \tilde{x}/\partial y & 0 \\ \partial \tilde{y}/\partial x & \partial \tilde{y}/\partial y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Bu aşamadan sonra, dönüşüm ortamında bulunan malzeme tanımlamaları ve sonlu elemanlar formülasyonu gösterilmektedir.

Formülasyonun başlangıç noktası iki Maxwell denklemidir.

$$\vec{\nabla} \times \tilde{\vec{E}}(\vec{r}) = -j\omega\mu\bar{\bar{\Lambda}} \cdot \tilde{\vec{H}}(\vec{r}) \quad (2.6a)$$

$$\vec{\nabla} \times \tilde{\vec{H}}(\vec{r}) = j\omega\varepsilon\bar{\bar{\Lambda}} \cdot \tilde{\vec{E}}(\vec{r}) \quad (2.6b)$$

Denklem 2.6a ve 2.6b'de görülen $\bar{\bar{\Lambda}}$ tensörü ortam parametrelerini ifade eden tensör matrisidir.

Denklem 2.6a'daki $\tilde{\vec{H}}(\vec{r})$ manyetik alan vektörü yalnız bırakılırsa, Denklem 2.7 elde edilmektedir. Her iki tarafın da tensör matrisinin tersi ile çarpıldığı unutulmamalıdır.

$$\tilde{\vec{H}}(\vec{r}) = \frac{\bar{\bar{\Lambda}}^{-1} \cdot \vec{\nabla} \times \tilde{\vec{E}}(\vec{r})}{-j\omega\mu} \quad (2.7)$$

Denklem 2.7'de bulunan $\tilde{\vec{H}}(\vec{r})$ manyetik alan vektörü Denklem 2.6b'de yerine koyulduğunda, aşağıdaki denklem oluşmaktadır.

$$\vec{\nabla} \times \left(\bar{\bar{\Lambda}}^{-1} \cdot \vec{\nabla} \times \tilde{\vec{E}}(\vec{r}) \right) = -j\omega\mu \left(j\omega\varepsilon\bar{\bar{\Lambda}} \cdot \tilde{\vec{E}}(\vec{r}) \right) \quad (2.8)$$

Denklem 2.8'in, Helmholtz dalga denklemine benzer olduğu görülmektedir.

$$\left[\vec{\nabla} \times \left(\bar{\bar{\Lambda}}^{-1} \cdot \vec{\nabla} \times \tilde{\vec{E}}(\vec{r}) \right) \right] = \underbrace{(\omega^2\mu\varepsilon)}_{k^2} \bar{\bar{\Lambda}} \cdot \tilde{\vec{E}}(\vec{r}) \quad (2.9)$$

Denklem 2.9'da, $\omega^2\mu\varepsilon$ ifadesinin dalga sayısının karesine, k^2 , eşit olduğu belirtilmektedir.

$$\vec{\nabla} \times \left(\bar{\bar{\Lambda}}^{-1} \cdot \vec{\nabla} \times \tilde{\vec{E}}(\vec{r}) \right) = k^2 \bar{\bar{\Lambda}} \cdot \tilde{\vec{E}}(\vec{r}) \quad (2.10)$$

Denklem 2.10'da, formül orijinal dalga denklemine benzer bir forma dönüştürülmektedir. Burada, vektör benzerlikleri kullanılarak Denklem 2.11'e ulaşılmaktadır. Denklem 2.10'da $\bar{\bar{\Lambda}}$ tensörünün tersinden gelen determinantın karşıya atılması ile Denklem 2.11 elde edilmiştir.

$$\vec{\nabla} \cdot (\bar{\bar{\Lambda}}_t \cdot \vec{\nabla} E_z) + k^2 \det(\bar{\bar{\Lambda}}_t) \Lambda_{33} E_z = 0 \quad (2.11)$$

Denklem 2.11'deki $\bar{\bar{\Lambda}}_t$ tensörü, original $\bar{\bar{\Lambda}}$ tensörünün enine düzlemdeki bileşenidir ve 2x2'lik kare bir tensördür. $\bar{\bar{\Lambda}}_t$ tensörünün 2x2'lik kare bir tensör şeklinde yazılabilmesinin nedeni benzetim ortamında analiz edilen cismin z-yönünde sonsuz uzunlukta olduğunun kabul ediliyor olmasıdır.

Saçılım problemi formülasyonunda, toplam elektrik alan, saçılan elektrik alan ile gelen elektrik alanın toplamı şeklinde aşağıdaki gibi yazılmaktadır. Gelen dalga düzlem dalgadır.

$$\vec{E}^{toplam} = \vec{E}^{saçılan} + \vec{E}^{gelen} \quad (2.12)$$

Bunun sonucunda Denklem 2.11'de yer alan ifade Denklem 2.13'e dönüşmektedir.

$$\nabla^2 (E_z^{saçılan} + E_z^{gelen}) + k^2 \det(\bar{\bar{\Lambda}}_t) \Lambda_{33} (E_z^{saçılan} + E_z^{gelen}) = 0 \quad (2.13a)$$

$$\vec{\nabla} \cdot (\bar{\bar{\Lambda}}_t \cdot \vec{\nabla} E_z^{saçılan}) + k^2 \det(\bar{\bar{\Lambda}}_t) \Lambda_{33} E_z^{saçılan} = -f \quad (2.13b)$$

$$f = \vec{\nabla} \cdot (\bar{\bar{\Lambda}}_t \cdot \vec{\nabla} E_z^{gelen}) + k^2 \det(\bar{\bar{\Lambda}}_t) \Lambda_{33} E_z^{gelen} \text{ (yön bağımlı)} \quad (2.13c)$$

$$f = k_0^2 (\epsilon_r - 1) E_z^{gelen} \text{ (yön bağımsız)} \quad (2.13d)$$

Bu denklemdeki f terimi sadece dielektrik ortamlar içinde sıfırdan farklı bir değere sahiptir. Yön bağımsız dielektrik ortamda ve gelen dalganın düzlem dalga olduğu durumda, f terimi (2.13d) ile gösterilen basit forma indirgenmektedir. İletken cisim üzerinde, toplam elektrik alanın teğet bileşeninin sıfır olma koşulu sonucu, $E_z^{saçılan} = -E_z^{gelen}$ sınır koşulunun uygulanması gerekmektedir.

Bundan sonraki adımlarda, Denklem 2.13'deki diferansiyel denklemin zayıf varyasyonel formu (weak variational form) elde edilecektir.

Denklem 2.13b'deki denklemin, ağırlık fonksiyonu ile iç çarpımı sonucu aşağıdaki denklem oluşmaktadır.

$$\int w[\vec{\nabla} \cdot (\bar{\Lambda}_t \cdot \vec{\nabla} E_z^{saçılan}) + k^2 \det(\bar{\Lambda}_t) \Lambda_{33} E_z^{saçılan}] ds = - \int w f ds \quad (2.14)$$

Denklem 2.14'ü basitleştirebilmek için Denklem 2.15a'da bulunan vektör denkleğini kullanmak faydalı olmaktadır.

$$\vec{\nabla} \cdot (\psi \vec{A}) = \psi \vec{\nabla} \cdot \vec{A} + \vec{A} \cdot \vec{\nabla} \psi \quad (2.15a)$$

$$\vec{A} \rightarrow \bar{\Lambda}_t \cdot \vec{\nabla} E_z^{saçılan} \quad (2.15b)$$

$$\psi \rightarrow w \quad (2.15c)$$

Denklem 2.15a'da vektör denkleği Denklem 2.13b'de uygulandığında aşağıdaki ifade elde edilmektedir.

$$w \vec{\nabla} \cdot (\bar{\Lambda}_t \cdot \vec{\nabla} E_z^{saçılan}) = \vec{\nabla} \cdot (w \bar{\Lambda}_t \cdot \vec{\nabla} E_z^{saçılan}) - (\bar{\Lambda}_t \cdot \vec{\nabla} E_z^{saçılan}) \cdot (\vec{\nabla} w) \quad (2.16)$$

Denklem 2.16'daki eşitlik Denklem 2.15a'ya uygulandığında aşağıdaki Denklem 2.17 elde edilmektedir.

$$\begin{aligned} \int [(\bar{\Lambda}_t \cdot \vec{\nabla} E_z^{saçılan}) \cdot \vec{\nabla} w] ds + \underbrace{\int (w \bar{\Lambda}_t \cdot \vec{\nabla} E_z^{saçılan}) dl}_0 \\ - \int w k^2 \det(\bar{\Lambda}_t) \Lambda_{33} E_z^{saçılan} ds = \int w f ds \end{aligned} \quad (2.17)$$

Yukarıdaki denklemde gösterilen çizgi integralinin sıfıra eşit olmasının nedeni, örgü içinde kalan birbirine komşu elemanlarda bu terimlerin birbirini yok etmesidir. Bu terim sadece Neumann tipi sınır koşullarının uygulanması sırasında ele alınmalıdır.

Denklem 2.17'de en solda bulunan gradyan ve nokta çarpım işlemleri Denklem 2.18 ve 2.19'da anlatılmaktadır.

$$\begin{aligned} (\bar{\Lambda}_t \cdot \vec{\nabla} E_z^{saçılan}) &= \begin{bmatrix} \Lambda_{11} & \Lambda_{12} \\ \Lambda_{21} & \Lambda_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\partial E_z^{saçılan}}{\partial x} \\ \frac{\partial E_z^{saçılan}}{\partial y} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \Lambda_{11} \frac{\partial E_z^{saçılan}}{\partial x} + \Lambda_{12} \frac{\partial E_z^{saçılan}}{\partial y} \\ \Lambda_{21} \frac{\partial E_z^{saçılan}}{\partial x} + \Lambda_{22} \frac{\partial E_z^{saçılan}}{\partial y} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.18)$$

$$\begin{aligned}
& (\bar{\Lambda}_t \cdot \vec{\nabla} E_z^{saçılan}) \cdot \vec{\nabla} w \\
&= \left(\Lambda_{11} \frac{\partial E_z^{saçılan}}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial x} + \Lambda_{12} \frac{\partial E_z^{saçılan}}{\partial y} \frac{\partial w}{\partial x} \right) \\
&+ \left(\Lambda_{21} \frac{\partial E_z^{saçılan}}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial y} + \Lambda_{22} \frac{\partial E_z^{saçılan}}{\partial y} \frac{\partial w}{\partial y} \right)
\end{aligned} \tag{2.19}$$

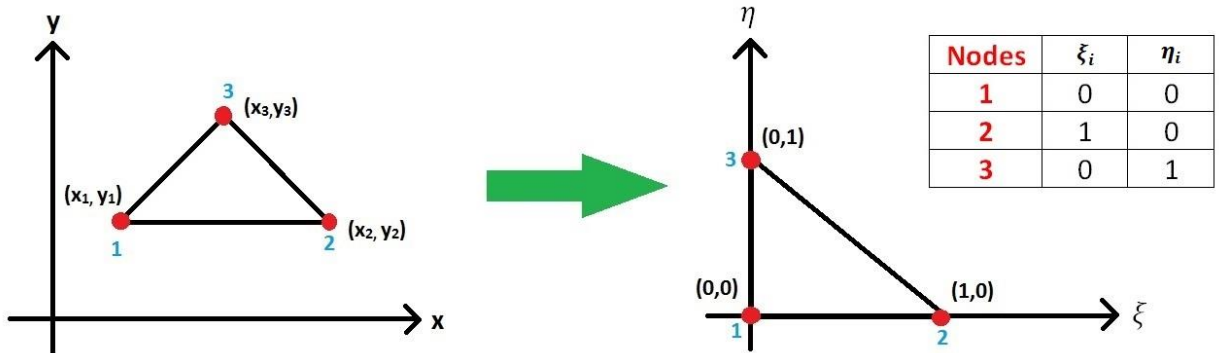
Üçgen elemanlar kullanılarak, elektrik alan aşağıdaki gibi yazılmaktadır.

$$E^e(x, y) = \sum_{i=1}^3 E_i^e N_i^e(x, y) \tag{2.20}$$

Bu denklemde, N_i^e eleman içindeki şekil fonksiyonlarını, E_i^e ise elektrik alanın düğüm noktalarındaki bilinmeyen değerlerini göstermektedir. Bu toplam ifadenin Denklem 2.17'de zayıf varyansyonel denklem içine koyulması gerekmektedir.

Sonlu elemanlar yönteminde Galerkin yöntemi uygulandığında, ağırlık fonksiyonu ile şekil fonksiyonunun aynı seçilmesi gerekmektedir.

Sonlu elemanlar yönteminde işlemleri kolaylaştırmak için integraller gerçek elemanlar yerine ana (master) eleman içinde hesaplanabilir. Bunun için, gerçek elemandaki koordinatların ana elemandaki koordinatlara dönüştürülmesi gerekmektedir. Bu yaklaşıma isoparametrik eşleştirme denilmektedir ve Şekil-2.4'de gösterilmektedir. Bu yaklaşım da bir çeşit koordinat dönüşümüdür ve tanımlanan Jacobian sayesinde her iki düzlemdeki koordinatlar birbirleriyle ilişkilendirilmektedir.



Şekil-2.4 Isoparametrik Eşleştirme

Şekil-2.4'de sonlu eleman olarak üçgen seçilmiştir. Hesaplama alanı içerisinde herhangi bir noktada bulunan bu eleman, (x_1, y_1) , (x_2, y_2) ve (x_3, y_3) , şeklin sağ

tarafında görüldüğü gibi başka bir koordinat düzleminde, ξ ve η , (0, 0), (1, 0) ve (0, 1) noktalarına karşılık gelecek şekilde eşleştirilmiştir.

Burada Jacobian, ξ ve η eksenlerinin, x ve y eksenlerine göre değişimini gösteren ifadedir. Aşağıdaki denklemde Jacobian tanımlanmıştır.

$$\bar{J} = \begin{bmatrix} \frac{dx}{d\xi} & \frac{dy}{d\xi} \\ \frac{dx}{d\eta} & \frac{dy}{d\eta} \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

Denklem 2.21’de, Jacobian matrisi içindeki kısmi türevlerin hesaplanması gerekmektedir. Bu türevlerin hesaplanabilmesi için, şekil fonksiyonları bilinmelidir. Şekil fonksiyonlarını aşağıdaki denklemde olduğu gibi polinom şeklinde yazmak mümkündür.

$$u^e(\varepsilon, \eta) = c_1 + c_2\xi + c_3\eta \quad (2.22)$$

Buradaki, u^e bilinmeyen (örneğin elektrik alanı) ifade etmektedir. Denklem 2.22 kullanılarak, Şekil-2.4’deki düğüm noktaları denklem içinde uygun yerlere yerleştirilirse tüm şekil fonksiyonları bulunabilir.

$$N_1(\varepsilon, \eta) = c_1 + c_2\xi + c_3\eta \rightarrow \boxed{N_1(\xi, \eta) = 1 - \xi - \eta} \quad (2.23a)$$

$$\text{Düğüm 1: } \xi = 0, \eta = 0 \rightarrow N_1(0,0) = c_1 = 1 \quad (2.23b)$$

$$\text{Düğüm 2: } \xi = 1, \eta = 0 \rightarrow N_1(1,0) = c_1 + c_2 = 0 \rightarrow c_2 = -1 \quad (2.23c)$$

$$\text{Düğüm 3: } \xi = 0, \eta = 1 \rightarrow N_1(0,1) = c_1 + c_3 = 0 \rightarrow c_3 = -1 \quad (2.23d)$$

$$N_2(\varepsilon, \eta) = c_1 + c_2\xi + c_3\eta \rightarrow \boxed{N_2(\xi, \eta) = \xi} \quad (2.24a)$$

$$\text{Düğüm 1: } \xi = 0, \eta = 0 \rightarrow N_2(0,0) = c_1 = 0 \quad (2.24b)$$

$$\text{Düğüm 2: } \xi = 1, \eta = 0 \rightarrow N_2(1,0) = c_1 + c_2 = 1 \rightarrow c_2 = 1 \quad (2.24c)$$

$$\text{Düğüm 3: } \xi = 0, \eta = 1 \rightarrow N_2(0,1) = c_1 + c_3 = 0 \rightarrow c_3 = 0 \quad (2.24d)$$

$$N_3(\xi, \eta) = c_1 + c_2\xi + c_3\eta \rightarrow \boxed{N_3(\xi, \eta) = \eta} \quad (2.25a)$$

$$\text{Düğüm 1: } \xi = 0, \eta = 0 \rightarrow N_3(0,0) = c_1 = 0 \quad (2.25b)$$

$$\text{Düğüm 2: } \xi = 1, \eta = 0 \rightarrow N_3(1,0) = c_1 + c_2 = 0 \rightarrow c_2 = 0 \quad (2.25c)$$

$$\text{Düğüm 3: } \xi = 0, \eta = 1 \rightarrow N_3(0,1) = c_1 + c_3 = 1 \rightarrow c_3 = 1 \quad (2.25d)$$

Denklem 2.23, 2.24 ve 2.25’de görüldüğü gibi, düğüm sayısının üç olması nedeniyle, üç adet şekil fonksiyonu ξ ve η cinsinden bulunmuştur.

Denklem 2.21'deki Jacobian'ın hesaplanması için gereken işlem, x ve y eksenlerini, ξ ve η eksenleri cinsinden ifade etmektir. Aşağıdaki denklemlerde bunun nasıl yapıldığı anlatılmaktadır.

$$x(\xi, \eta) = \sum_{i=1}^3 x_i^e N_i(\xi, \eta) \quad (2.26a)$$

$$y(\xi, \eta) = \sum_{i=1}^3 y_i^e N_i(\xi, \eta) \quad (2.26b)$$

Yukarıdaki denklemlerdeki toplama işlemleri tek tek yapıldıktan sonra aşağıdaki denklemlerdeki sonuçlar elde edilmiştir.

$$x = x_1^e + (x_2^e - x_1^e)\xi + (x_3^e - x_1^e)\eta \quad (2.27)$$

$$y = y_1^e + (y_2^e - y_1^e)\xi + (y_3^e - y_1^e)\eta \quad (2.28)$$

Denklem 2.27 ve 2.28'in sırasıyla ξ 'ye ve η 'ye göre türevleri alındığında aşağıdaki denklemlere ulaşılmaktadır.

$$\frac{dx}{d\xi} = x_2^e - x_1^e = x_{21}^e \quad (2.29a)$$

$$\frac{dx}{d\eta} = x_3^e - x_1^e = x_{31}^e \quad (2.29b)$$

$$\frac{dy}{d\xi} = y_2^e - y_1^e = y_{21}^e \quad (2.29c)$$

$$\frac{dy}{d\eta} = y_3^e - y_1^e = y_{31}^e \quad (2.29d)$$

Yukarıdaki denklemlerde elde edilen sonuçlarla birlikte, Denklem 21'deki Jacobian ifadesi kolayca hesaplanabilir bir hale gelmiştir.

$$\bar{J} = \begin{bmatrix} \frac{dx}{d\xi} & \frac{dy}{d\xi} \\ \frac{dx}{d\eta} & \frac{dy}{d\eta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_2^e - x_1^e & y_2^e - y_1^e \\ x_3^e - x_1^e & y_3^e - y_1^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{21}^e & y_{21}^e \\ x_{31}^e & y_{31}^e \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

Denklem 2.30'da Jacobian matrisinde bulunan elemanlar, orijinal durumdaki üçgen elemanın düğüm noktalarının koordinatlarının birbirleriyle olan farkı cinsinden ifade edilmektedir.

Denklem 2.31'de, şekil fonksiyonlarının türevleri arasındaki ilişki gösterilmektedir.

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial \xi} \\ \frac{\partial N_i}{\partial \eta} \end{bmatrix} = \bar{J} \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} \\ \frac{\partial N_i}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (2.31a)$$

$$\frac{\partial N_i}{\partial \xi} = \frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{dx}{d\xi} + \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{dy}{d\xi} \quad (2.31b)$$

$$\frac{\partial N_i}{\partial \eta} = \frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{dx}{d\eta} + \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{dy}{d\eta} \quad (2.31c)$$

Denklem 2.18 ve 2.19'da, şekil fonksiyonlarının, x 'e ve y 'ye göre türev ifadeleri yer almaktadır. Şekil fonksiyonları Denklem 2.23, 2.24 ve 2.25'de ξ ve η cinsinden bulunmuştur. Bu yüzden, şekil fonksiyonlarının x 'e ve y 'ye göre olan türevleri hesaplanmalıdır.

Denklem 2.32'de, 2.31a'daki denklemin her iki tarafı da soldan Jacobian matrisinin tersi ile çarpılarak, istenen türevler hesaplanabilir hale gelmiştir.

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} \\ \frac{\partial N_i}{\partial y} \end{bmatrix} = \bar{J}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial \xi} \\ \frac{\partial N_i}{\partial \eta} \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

Denklem 2.32'de, Jacobian matrisinin tersi Denklem 2.33'te gösterilmektedir.

$$\bar{J}^{-1} = \left(\frac{1}{\det(\bar{J})} \right) \begin{bmatrix} y_{31}^e & -y_{21}^e \\ -x_{31}^e & x_{21}^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{11}^* & J_{12}^* \\ J_{21}^* & J_{22}^* \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

Yukarıdaki denklemde, J_{11}^* , J_{12}^* , J_{21}^* ve J_{22}^* elemanları, Jacobian matrisinin tersinin elemanlarını ifade etmektedir. Denklem 2.34'de bu elemanlar hesaplanmaktadır.

$$J_{11}^* = \frac{y_{31}^e}{\det(\bar{J})}, \quad J_{12}^* = \frac{-y_{21}^e}{\det(\bar{J})}, \quad J_{21}^* = \frac{-x_{31}^e}{\det(\bar{J})}, \quad J_{22}^* = \frac{x_{21}^e}{\det(\bar{J})} \quad (2.34)$$

Denklem 2.32, açık formda yazıldığında aşağıdaki denklemlere ulaşılmaktadır.

$$\frac{\partial N_i}{\partial x} = J_{11}^* \frac{\partial N_i}{\partial \xi} + J_{12}^* \frac{\partial N_i}{\partial \eta} \quad (2.35a)$$

$$\frac{\partial N_i}{\partial y} = J_{21}^* \frac{\partial N_i}{\partial \xi} + J_{22}^* \frac{\partial N_i}{\partial \eta} \quad (2.35b)$$

Denklem 2.35'de sağ tarafta bulunan, şekil fonksiyonlarının ξ ve η eksenlerine göre türevlerini içeren ifadeler, 2.23a, 2.24a ve 2.25a'daki denklemlerin türevleri olarak bulunabilmektedir.

$$\frac{\partial N_1}{\partial \xi} = -1, \quad \frac{\partial N_2}{\partial \xi} = 1, \quad \frac{\partial N_3}{\partial \xi} = 0 \quad (2.36a)$$

$$\frac{\partial N_1}{\partial \eta} = -1, \quad \frac{\partial N_2}{\partial \eta} = 0, \quad \frac{\partial N_3}{\partial \eta} = 1 \quad (2.36b)$$

Denklem 2.36'da elde edilen sonuçlar, 0, 1 veya -1 gibi basit sayılar olup isoparametrik eşleştirmenin integral alırken sağladığı bir kolaylıktır.

Denklem 2.35'de bulunan şekil fonksiyonlarının ξ ve η koordinatlarına göre türevlerinin yerlerine Denklem 2.36'daki sayılar yerleştirildiğinde aşağıdaki ifadeler elde edilmiştir.

$$\frac{\partial N_1}{\partial x} = -J_{11}^* - J_{12}^* = \frac{y_{23}^e}{|J|} \quad (2.37a)$$

$$\frac{\partial N_1}{\partial y} = -J_{21}^* - J_{22}^* = \frac{x_{32}^e}{|J|} \quad (2.37b)$$

$$\frac{\partial N_2}{\partial x} = J_{11}^* = \frac{y_{31}^e}{|J|} \quad (2.37c)$$

$$\frac{\partial N_2}{\partial y} = J_{21}^* = \frac{x_{13}^e}{|J|} \quad (2.37d)$$

$$\frac{\partial N_3}{\partial x} = J_{12}^* = \frac{y_{12}^e}{|J|} \quad (2.37e)$$

$$\frac{\partial N_3}{\partial y} = J_{22}^* = \frac{x_{21}^e}{|J|} \quad (2.37f)$$

Denklem 2.37'deki ifadelerin paydasında bulunan ifade, Jacobian matrisinin determinantına eşittir ve Denklem 38'deki gibi hesaplanmaktadır.

$$\det(\bar{J}) = |J| = (x_{21}^e y_{31}^e) - (y_{21}^e x_{31}^e) \quad (2.38)$$

Eleman matrisinin oluşturulması için Denklem 17'nin çözümünün bulunması gereklidir. Denklem 2.38'e kadar yapılan işlemler sayesinde, eleman matrisi aşağıdaki gibi ifade edilebilir hale gelmiştir.

$$A_{ij}^e = \iint \left[\left(\Lambda_{11} \frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial N_j}{\partial x} + \Lambda_{12} \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial N_j}{\partial x} \right) + \left(\Lambda_{21} \frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial N_j}{\partial y} + \Lambda_{22} \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial N_j}{\partial y} \right) \right] dx dy \quad (2.39)$$

$$- k^2 \det(\bar{\Lambda}_t) \Lambda_{33} \iint N_i N_j dx dy$$

Denklem 2.39'da yer alan A_{ij}^e ile ifade edilen değişken, eleman matrisinin i 'inci satırının j 'inci sütunundaki elemanına denk gelmektedir. Formülasyonda Galerkin

prosedürü izlendiğinden yukarıdaki denklemde ağırlık fonksiyonlarının yerlerine de aynı şekil fonksiyonları yerleştirilmiştir.

Denklem 2.39'da, çıkarma işleminden önce yer alan ifadeye sol taraf, çıkarma işleminden sonra gelen kısma ise sağ taraf denilecektir.

Sol taraf denklemde şekil fonksiyonlarının x 'e ve y 'ye göre olan türevlerinin bulunduğu kısımlara sırasıyla Denklem 2.35a ve 2.35b yerleştirilecektir.

Yapılan bu yerine koyma işleminden sonra aşağıdaki Denklem 2.40 elde edilmektedir.

$$A_{ij(sol)}^e = \int_0^1 \int_0^{1-\eta} \left[\Lambda_{11} \left(J_{11}^* \frac{\partial N_i}{\partial \xi} + J_{12}^* \frac{\partial N_i}{\partial \eta} \right) \left(J_{11}^* \frac{\partial N_j}{\partial \xi} + J_{12}^* \frac{\partial N_j}{\partial \eta} \right) \right. \\ + \Lambda_{12} \left(J_{21}^* \frac{\partial N_i}{\partial \xi} + J_{22}^* \frac{\partial N_i}{\partial \eta} \right) \left(J_{11}^* \frac{\partial N_j}{\partial \xi} + J_{12}^* \frac{\partial N_j}{\partial \eta} \right) \\ + \Lambda_{21} \left(J_{11}^* \frac{\partial N_i}{\partial \xi} + J_{12}^* \frac{\partial N_i}{\partial \eta} \right) \left(J_{21}^* \frac{\partial N_j}{\partial \xi} + J_{22}^* \frac{\partial N_j}{\partial \eta} \right) \\ \left. + \Lambda_{22} \left(J_{21}^* \frac{\partial N_i}{\partial \xi} + J_{22}^* \frac{\partial N_i}{\partial \eta} \right) \left(J_{21}^* \frac{\partial N_j}{\partial \xi} + J_{22}^* \frac{\partial N_j}{\partial \eta} \right) \right] |J| d\xi d\eta \quad (2.40)$$

Yukarıdaki denklemde yer alan J_{11}^* , J_{12}^* , J_{21}^* ve J_{22}^* değerleri, Denklem 2.37'de bulunan değerler ile yer değiştirilmelidir. Bu denklemde, integral sınırları olarak Jacobian yardımıyla tanımlanan master elemandaki sınırlar dikkate alınmalıdır. Bu işlem yapılırken Şekil-2.4 göz önünde bulundurulmalıdır.

Sağ taraf terimi de aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$A_{ij(sağ)}^e = k^2 \det(\bar{\Lambda}_t) \Lambda_{33} \int_0^1 \int_0^{1-\eta} N_i N_j d\xi d\eta \quad (2.41)$$

Denklem 2.40 ve 2.41, sonlu elemanlar yönteminin en önemli basamağı olan, eleman matrisinin doldurulmasına ve sonrasında her düğüm noktasında saçılan ve toplam elektrik alanın bulunmasına yardımcı olacaktır. Bu denklemlerde, şekil fonksiyonlarının değerleri yerleştirilip belirlenen sınırlarda integraller alındığında, eleman matrisi oluşturulabilecektir.

Denklem 2.40'da, şekil fonksiyonları ve Jacobian matrisinin tersinin elemanları yerine, Denklem 2.38 ve 2.39'da bulunmuş olan değerler konulduğunda, eleman matrisinin elemanları aşağıdaki gibi hesaplanabilmektedir.

$$A_{11}^e(sol) = \iint_{00}^{11-\eta} \left[\Lambda_{11} \left(\frac{y_{23}^e}{|J|} \right) \left(\frac{y_{23}^e}{|J|} \right) + \Lambda_{12} \left(\frac{x_{32}^e}{|J|} \right) \left(\frac{y_{23}^e}{|J|} \right) + \Lambda_{21} \left(\frac{y_{23}^e}{|J|} \right) \left(\frac{x_{32}^e}{|J|} \right) + \Lambda_{22} \left(\frac{x_{32}^e}{|J|} \right) \left(\frac{x_{32}^e}{|J|} \right) \right] |J| d\xi d\eta \quad (2.42a)$$

$$A_{12}^e(sol) = \iint_{00}^{11-\eta} \left[\Lambda_{11} \left(\frac{y_{23}^e}{|J|} \right) \left(\frac{y_{31}^e}{|J|} \right) + \Lambda_{12} \left(\frac{x_{32}^e}{|J|} \right) \left(\frac{y_{23}^e}{|J|} \right) + \Lambda_{21} \left(\frac{y_{23}^e}{|J|} \right) \left(\frac{x_{13}^e}{|J|} \right) + \Lambda_{22} \left(\frac{x_{32}^e}{|J|} \right) \left(\frac{x_{13}^e}{|J|} \right) \right] |J| d\xi d\eta \quad (2.42b)$$

$$A_{13}^e(sol) = \iint_{00}^{11-\eta} \left[\Lambda_{11} \left(\frac{y_{23}^e}{|J|} \right) \left(\frac{y_{12}^e}{|J|} \right) + \Lambda_{12} \left(\frac{x_{32}^e}{|J|} \right) \left(\frac{y_{12}^e}{|J|} \right) + \Lambda_{21} \left(\frac{y_{23}^e}{|J|} \right) \left(\frac{x_{21}^e}{|J|} \right) + \Lambda_{22} \left(\frac{x_{32}^e}{|J|} \right) \left(\frac{x_{21}^e}{|J|} \right) \right] |J| d\xi d\eta \quad (2.42c)$$

$$A_{21}^e(sol) = \iint_{00}^{11-\eta} \left[\Lambda_{11} \left(\frac{y_{31}^e}{|J|} \right) \left(\frac{y_{23}^e}{|J|} \right) + \Lambda_{12} \left(\frac{x_{13}^e}{|J|} \right) \left(\frac{y_{23}^e}{|J|} \right) + \Lambda_{21} \left(\frac{y_{31}^e}{|J|} \right) \left(\frac{x_{32}^e}{|J|} \right) + \Lambda_{22} \left(\frac{x_{13}^e}{|J|} \right) \left(\frac{x_{32}^e}{|J|} \right) \right] |J| d\xi d\eta \quad (2.42d)$$

$$A_{22}^e(sol) = \iint_{00}^{11-\eta} \left[\Lambda_{11} \left(\frac{y_{31}^e}{|J|} \right) \left(\frac{y_{31}^e}{|J|} \right) + \Lambda_{12} \left(\frac{x_{13}^e}{|J|} \right) \left(\frac{y_{31}^e}{|J|} \right) + \Lambda_{21} \left(\frac{y_{31}^e}{|J|} \right) \left(\frac{x_{13}^e}{|J|} \right) + \Lambda_{22} \left(\frac{x_{13}^e}{|J|} \right) \left(\frac{x_{13}^e}{|J|} \right) \right] |J| d\xi d\eta \quad (2.42e)$$

$$A_{23}^e(sol) = \iint_{00}^{11-\eta} \left[\Lambda_{11} \left(\frac{y_{31}^e}{|J|} \right) \left(\frac{y_{12}^e}{|J|} \right) + \Lambda_{12} \left(\frac{x_{13}^e}{|J|} \right) \left(\frac{y_{12}^e}{|J|} \right) + \Lambda_{21} \left(\frac{y_{31}^e}{|J|} \right) \left(\frac{x_{21}^e}{|J|} \right) + \Lambda_{22} \left(\frac{x_{13}^e}{|J|} \right) \left(\frac{x_{21}^e}{|J|} \right) \right] |J| d\xi d\eta \quad (2.42f)$$

$$A_{31}^e(sol) = \iint_{00}^{11-\eta} \left[\Lambda_{11} \left(\frac{y_{12}^e}{|J|} \right) \left(\frac{y_{23}^e}{|J|} \right) + \Lambda_{12} \left(\frac{x_{21}^e}{|J|} \right) \left(\frac{y_{23}^e}{|J|} \right) + \Lambda_{21} \left(\frac{y_{12}^e}{|J|} \right) \left(\frac{x_{32}^e}{|J|} \right) + \Lambda_{22} \left(\frac{x_{21}^e}{|J|} \right) \left(\frac{x_{32}^e}{|J|} \right) \right] |J| d\xi d\eta \quad (2.42g)$$

$$A_{32(sol)}^e = \int_0^1 \int_0^{1-\eta} \left[\Lambda_{11} \left(\frac{y_{12}^e}{|J|} \right) \left(\frac{y_{31}^e}{|J|} \right) + \Lambda_{12} \left(\frac{x_{21}^e}{|J|} \right) \left(\frac{y_{31}^e}{|J|} \right) + \Lambda_{21} \left(\frac{y_{12}^e}{|J|} \right) \left(\frac{x_{13}^e}{|J|} \right) + \Lambda_{22} \left(\frac{x_{21}^e}{|J|} \right) \left(\frac{x_{13}^e}{|J|} \right) \right] |J| d\xi d\eta \quad (2.42h)$$

$$A_{33(sol)}^e = \int_0^1 \int_0^{1-\eta} \left[\Lambda_{11} \left(\frac{y_{12}^e}{|J|} \right) \left(\frac{y_{12}^e}{|J|} \right) + \Lambda_{12} \left(\frac{x_{21}^e}{|J|} \right) \left(\frac{y_{12}^e}{|J|} \right) + \Lambda_{21} \left(\frac{y_{12}^e}{|J|} \right) \left(\frac{x_{21}^e}{|J|} \right) + \Lambda_{22} \left(\frac{x_{21}^e}{|J|} \right) \left(\frac{x_{21}^e}{|J|} \right) \right] |J| d\xi d\eta \quad (2.42i)$$

Denklem 2.43'de, Denklem 2.42'de bulunan elemanların integrallerinin alınmış halleri yer almaktadır.

$$A_{11(sağ)}^e = \frac{1}{2|J|} (\Lambda_{11} y_{23}^{e^2} + \Lambda_{12} x_{32}^e y_{23}^e + \Lambda_{21} y_{23}^e x_{32}^e + \Lambda_{22} x_{32}^{e^2}) \quad (2.43a)$$

$$A_{12(sağ)}^e = \frac{1}{2|J|} (\Lambda_{11} y_{23}^e y_{31}^e + \Lambda_{12} x_{32}^e y_{31}^e + \Lambda_{21} y_{23}^e x_{13}^e + \Lambda_{22} x_{32}^e x_{13}^e) \quad (2.43b)$$

$$A_{13(sağ)}^e = \frac{1}{2|J|} (\Lambda_{11} y_{23}^e y_{12}^e + \Lambda_{12} x_{32}^e y_{12}^e + \Lambda_{21} y_{23}^e x_{21}^e + \Lambda_{22} x_{32}^e x_{21}^e) \quad (2.43c)$$

$$A_{21(sağ)}^e = \frac{1}{2|J|} (\Lambda_{11} y_{31}^e y_{23}^e + \Lambda_{12} x_{13}^e y_{23}^e + \Lambda_{21} y_{31}^e x_{32}^e + \Lambda_{22} x_{13}^e x_{32}^e) \quad (2.43d)$$

$$A_{22(sağ)}^e = \frac{1}{2|J|} (\Lambda_{11} y_{31}^{e^2} + \Lambda_{12} x_{13}^e y_{31}^e + \Lambda_{21} y_{31}^e x_{13}^e + \Lambda_{22} x_{13}^{e^2}) \quad (2.43e)$$

$$A_{23(sağ)}^e = \frac{1}{2|J|} (\Lambda_{11} y_{31}^e y_{12}^e + \Lambda_{12} x_{13}^e y_{12}^e + \Lambda_{21} y_{31}^e x_{21}^e + \Lambda_{22} x_{13}^e x_{21}^e) \quad (2.43f)$$

$$A_{31(sağ)}^e = \frac{1}{2|J|} (\Lambda_{11} y_{12}^e y_{23}^e + \Lambda_{12} x_{21}^e y_{23}^e + \Lambda_{21} y_{12}^e x_{32}^e + \Lambda_{22} x_{21}^e x_{32}^e) \quad (2.43g)$$

$$A_{32(sağ)}^e = \frac{1}{2|J|} (\Lambda_{11} y_{12}^e y_{31}^e + \Lambda_{12} x_{21}^e y_{31}^e + \Lambda_{21} y_{12}^e x_{13}^e + \Lambda_{22} x_{21}^e x_{13}^e) \quad (2.43h)$$

$$A_{33(sağ)}^e = \frac{1}{2|J|} (\Lambda_{11} y_{12}^{e^2} + \Lambda_{12} x_{21}^e y_{12}^e + \Lambda_{21} y_{12}^e x_{21}^e + \Lambda_{22} x_{21}^{e^2}) \quad (2.43i)$$

Eleman matrisinin sol taraf elemanlarının hepsi sonlu elemanın düğüm noktalarının orijinal koordinatları ve tensör matrisinin elemanları cinsinden yukarıdaki denklemde bulunmuştur.

Benzer işlemleri, Denklem 2.41'deki eleman matrisinin sağ taraf elemanlarına uygulandığında Denklem 2.44 elde edilmektedir.

$$A_{11(sağ)}^e = A_{22(sağ)}^e = A_{33(sağ)}^e = \frac{k^2 \det(\bar{\bar{\Lambda}}_t) \Lambda_{33}}{12} \quad (2.44a)$$

$$A_{12(sağ)}^e = A_{13(sağ)}^e = A_{21(sağ)}^e = A_{23(sağ)}^e = A_{31(sağ)}^e = A_{32(sağ)}^e \quad (2.44b)$$

$$= \frac{k^2 \det(\bar{\Lambda}_t) \Lambda_{33}}{24}$$

Denklem 2.44'de bulunan eleman matrisi sağ taraf elemanları yalnızca birer sabit sayıya denk gelmektedir.

Üçgen elemanlar için 3x3'lük eleman matrisinin görünümü aşağıdaki denklemde olduğu gibidir.

$$A_{ij}^e = A_{ij(sol)}^e - A_{ij(sağ)}^e, \quad 1 \leq i, j \leq 3 \quad (2.45)$$

Global eleman matrisi oluşturulurken dikkat edilmesi gereken hususlar bulunmaktadır. Eleman matrisleri, tüm elemanlar için oluşturulup art arda global matrise yerleştirilmelidir. Sonlu elemanlar yöntemi, yapısı itibarıyla seyrek eleman matrisi yapısından oluşmaktadır. Oluşturulan lokal eleman matrisleri, elemanların birbiriyle düğüm noktalarındaki bağlantısına uygun olarak global eleman matrisine yerleştirilmektedir. En sonda, $N \times N$ 'lik (N : örgü içindeki toplam düğüm sayısı) kare bir global matris elde edilmektedir.

Eleman matris denkleminin sağında bulunan b vektörünün elemanları da aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$b_j^e = \int_0^{1-\eta} \int_0^{1-\eta} N_j(\xi, \eta) f(\xi, \eta) |J| d\xi d\eta \quad (2.46)$$

Yön bağımsız dielektrik ortamda, b vektörünün elemanları aşağıdaki basit formda hesaplanabilir.

$$b_1^e = b_2^e = b_3^e = \frac{f^e |J|}{6} \quad (2.47)$$

3x3'lük lokal b^e vektörü, global matrisin oluşturulmasına benzer şekilde, elemanların birbiriyle düğüm noktalarındaki bağlantısına uygun olarak global b vektörüne yerleştirilmelidir.

Bu işlemler sonucunda aşağıdaki gibi bir global matris denklemi elde edilir.

$$Ax = b \quad (2.48)$$

Buradaki x vektörü, elektrik alanın düğüm noktalarındaki bilinmeyen değerlerini temsil eden vektördür. Denklem 2.48'deki doğrusal denklem sistemini çözmeden önce, mükemmel iletken cisim üzerinde $E_z^{saçılan} = -E_z^{gelen}$ sınır koşulu, Dirichlet tipi sınır koşulu olarak uygulanır. Yani cisim üzerindeki düğüm noktalarına karşılık gelen b vektörü elemanları, o noktadaki gelen dalga'nın negatif değeriyle yer değiştirilmelidir. Ayrıca, global matrisin düğüm noktalarına karşılık gelen satırları aşağıdaki gibi değiştirilmelidir.

$$A_{ij} = \begin{cases} 1, & j = i \text{ ise} \\ 0, & j \neq i \text{ ise} \end{cases} \quad (2.49)$$

Sınır koşullarının da uygulanmasından sonra, matris sistemi çözülerek bilinmeyen elektrik alan değerleri hesaplanır.

Burada bir önemli konu, Mükemmel Uyumlu Katman (Perfectly Matched Layer-PML)'in nasıl uygulandığıdır. Bu çalışmada Lokal-Uyumlu Mükemmel Uyumlu Katman (Locally-Conformal PML) yöntemi uygulanmıştır [11]. Bu yöntem, bir çeşit koordinat dönüşümü uygulaması olan karmaşık koordinat dönüşümü yaklaşımına dayanmaktadır. Dalga'nın PML bölgesinde sönümlenmesini sağlamak için, PML içindeki reel değerli koordinatlar uygun karmaşık değerli koordinatlarla yer değiştirilmektedir.

2.3 RKA Hesaplama

Radar Kesit Alanı (RKA), genel olarak bir cismin üzerinden saçılan elektromanyetik dalga gücünün, gelen dalga'nın gücüne oranıdır ve cismin belirli bir yöndeki yansıtıcılığını gösteren bir parametredir.

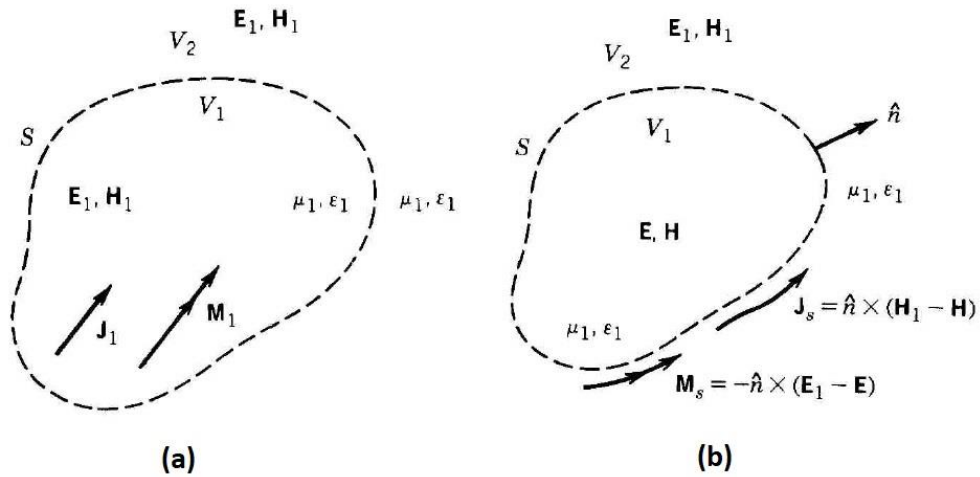
Aşağıdaki denklemde RKA ifade edilmektedir.

$$\sigma_{2D} = \lim_{r \rightarrow \infty} 2\pi r \left(\frac{|\vec{u}_{uzak}^{saçılan}|^2}{|\vec{u}_{gelen}|^2} \right) \quad (2.50)$$

Denklem 2.50'de u değişkeni, TM_z veya TE_z durumunda elektrik veya manyetik alanı temsil etmektedir. Eğer saçılan alan gelen dalga yönündeyse, hesaplanan RKA monostatik veya geri saçılma (backscattering) RKA olarak adlandırılmaktadır. Geri saçılma RKA değeri özellikle radar uygulamalarında önemli bir parametredir.

Denklem 2.50'den de anlaşılacağı üzere, bir cisim üzerinden ne kadar çok elektromanyetik dalgayı geri yansıtıyorsa radarda görünürlüğü de o kadar çok olmaktadır. Radarda görünürlük, cismin elektriksel büyüklüğüyle de doğru orantılıdır. Büyük cisimler elektromanyetik dalgalara daha çok, küçük cisimler ise daha az maruz kaldıkları için, üzerlerinden geri yansıtıkları güçler farklıdır. Bu yüzden de RKA değeri büyük cisimlerde daha fazla, küçük cisimlerde ise daha düşük hesaplanmaktadır.

RKA hesabı, Huygens prensibi kullanılarak yapılmaktadır. Huygens prensibi, elektromanyetik dalgaların cephe kısmında bulunan noktaların bir sonraki dalga için kaynak oluşturduğu ve elektromanyetik dalgaların bu şekilde hareket ettiklerini varsayar. Bu amaçla, cismin çevresinde kapalı bir alan seçilerek, yüzey üzerinde elektrik ve manyetik yüzey akımları oluşturulur (bknz. Şekil-2.5). Bu yüzey akımlarının Huygens sınırının dışında yarattığı alan değerleri, orijinal problemde gerçek kaynakların yarattığı alan değerleriyle aynıdır. Huygens sınırı üzerindeki eşdeğer akımlar kullanılarak uzak alandaki saçılan alan değerleri ve RKA hesaplanmaktadır.



Şekil-2.5 Huygens Prensibi. (a) Orijinal Problem, (b) Eşdeğer Problem [12]

Eşdeğer akımlardan yayılan uzak alandaki saçılan elektrik alan aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır [13].

$$\vec{E}_{uzak}^s(\vec{r}) = jk \frac{e^{-jkr}}{4\pi r} \iint \left[\frac{\hat{r} \times \vec{M}(\vec{r}')}{(r_x M_y - r_y M_x) \hat{a}_z} + \eta \hat{r} \times \left(\hat{r} \times \vec{J}(\vec{r}') \right) \right] e^{-jk(\vec{r}' \cdot \hat{r})} ds' \quad (2.51a)$$

$$\hat{r} = \hat{a}_x \cos \varphi + \hat{a}_y \sin \varphi \quad (2.51b)$$

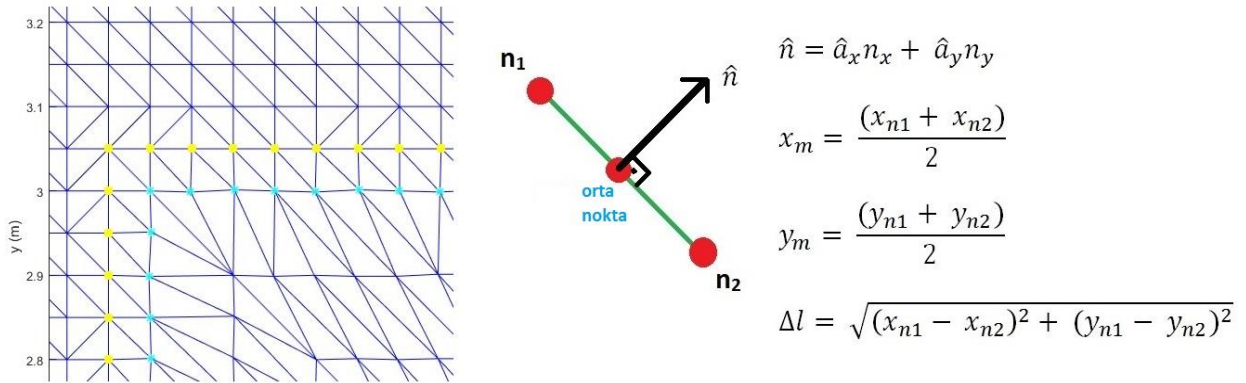
Denklem 2.51'deki integral kapalı Huygens sınırı üzerinden alındığında aşağıdaki denklem elde edilmektedir [13].

$$E_{z,uzak}^s = \sqrt{\frac{k}{8\pi r}} e^{j\pi/4} e^{-jkr} \sum_{i=1}^M (n_x \cos \varphi + n_y \sin \varphi) E_z^{(i)} e^{jk(x_m^{(i)} \cos \varphi + y_m^{(i)} \sin \varphi)} \Delta l^{(i)} \quad (2.52a)$$

$$+ \eta \sqrt{\frac{k}{8\pi r}} e^{-j3\pi/4} e^{-jkr} \sum_{i=1}^M J_z^{(i)} e^{jk(x_m^{(i)} \cos \varphi + y_m^{(i)} \sin \varphi)} \Delta l^{(i)} \quad (2.52b)$$

$$E_z^{(i)} = E_{z,orta} = (E_{z|dügüm1} + E_{z|dügüm2})/2$$

Denklem 2.52a'da bulunan $E_z^{(i)}$ değişkeni Denklem 2.52b'de detaylı olarak gösterilmektedir. $E_z^{(i)}$ Huygens sınırında bulunan elemanın köşelerindeki elektrik alanın ortalamaları olarak hesaplanmaktadır. Denklem 2.52'de elde edilen bir takım değişkenlerin açıklamaları Şekil-2.6'da gösterilmektedir.



Denklem 2.52'de, belirli bir uzaklıkta, r , bir yüzey akımının üzerinden saçtığı elektrik alanın değeri bulunabilmektedir. Daha önceden belirlenen ve iletken cismin tüm noktalarıyla temas eden kapalı bir yüzeyin seçimi Şekil-2.6'de sarı ile gösterilen noktalar ile yapılmıştır. Bu şekilde bulunan mavi noktalar ise cisim ile dielektrik katmanları veya dönüşüm ortamını içeren bölgenin sınırındır. Sınır değer koşullarını daha iyi uygulayabilmek ve hesaplama yapılacak alanı daha kısıtlı tutabilmek adına, Huygens sınırı, mavi sınırın hemen dışında seçilmiştir.

Denklem 2.52'de bulunan $\Delta l^{(i)}$ terimi, Huygens sınırı üzerinde bulunan i 'ninci elemanın, tam olarak Huygens sınırı üzerinde yer alan kenar uzunluğunu göstermektedir. Yine bu denklemde olan $x_m^{(i)}$ ve $y_m^{(i)}$ terimleri, i 'ninci elemanın, Huygens sınırı üzerinde yer alan iki düğüm noktasının orta noktasını ifade etmektedir. Buradaki, $\hat{n}$ birim vektörü ise, bulunan orta noktaya dik olan normal vektördür. Burada yer alan toplama işlemi, tüm Huygens sınırı üzerinde yer alan elemanlar için yapıp toplandığında ise, istenen r uzaklığındaki radar kesit alanı bulunabilmektedir.

Denklem 2.52a'daki $J_z^{(i)}$ yüzey akım vektörü, i 'ninci Huygens sınırı elemanında hesaplanan elektrik akım yoğunluğunu temsil etmektedir. Bu ifade, Denklem 2.53 ve 2.54'de gösterildiği gibi bulunmaktadır.

$$\vec{J} = \hat{n} \times \vec{H} = \hat{n} \times \left[-\frac{1}{j\omega\mu} \vec{\nabla} \times \vec{E} \right] = -\frac{1}{j\omega\mu} \hat{n} \times \vec{\nabla} \times \vec{E} \quad (2.53a)$$

$$\hat{n} = \hat{a}_x n_x + \hat{a}_y n_y \quad (2.53b)$$

Denklem 2.54'de $\hat{n} \times \vec{\nabla} \times \vec{E}$ vektörel çarpım işlemi ayrıntılı gösterilmektedir.

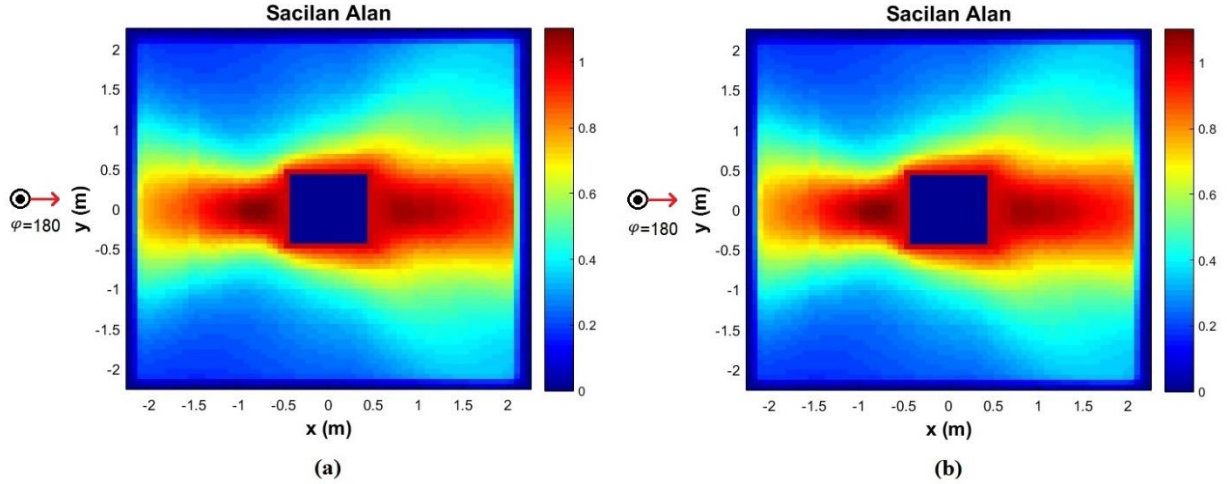
$$\hat{n} \times \vec{\nabla} \times \vec{E} = \left(-n_x \frac{dE_z}{dx} - n_y \frac{dE_z}{dy} \right) \hat{a}_z \quad (2.54)$$

Çizelge-2.1'de örnek bir benzetim çalışmasına ait parametreler listelenmiştir.

Çizelge-2.1 Örnek Benzetim Çalışmasında Kullanılan Parametreler

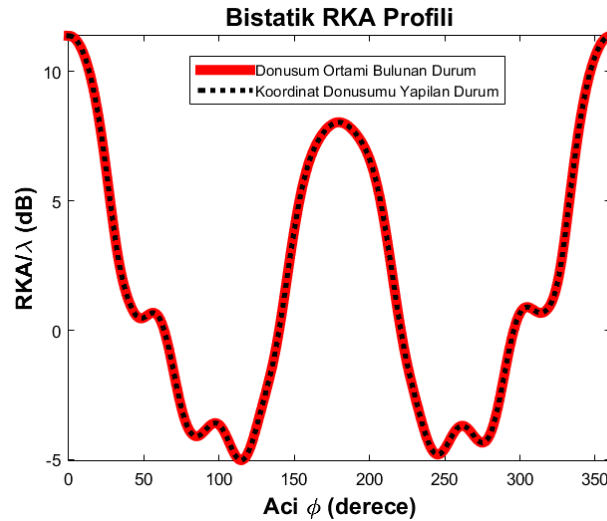
Frekans	300 MHz
Dalga boyu	1 m
Sonlu Eleman Boyutu	2.5 cm
İletken Cismin Şekli	Kare
Orijinal İletken Cismin Kenar Uzunluğu	1 m
Yeni İletken Cismin Kenar Uzunluğu	0.5 m
Dalganın Geliş Açısı	Sol taraftan ($\varphi^{gelen} = 180^\circ$)

Çizelge-2.1'de belirtilen bilgilere göre yapılan benzetim çalışmasına göre yapılan elektrik alan haritaları Şekil-2.7'de gösterilmektedir.



Şekil-2.7 Kare Cisim Üzerinden Saçılan Elektrik Alan. a) Koordinat dönüşümü ile elde edilen yeni koordinatlar ile yapılan analiz, b) Koordinat dönüşümü prensibine göre tanımlanan dönüşüm ortamı ile yapılan analiz

Şekil-2.7(a)'da, koordinat dönüşümü uygulandıktan sonra, herhangi bir dönüşüm ortamı tanımlamadan değişen koordinatlarla yapılan analizin sonucu, Şekil-2.7(b)'de ise, koordinat dönüşümü yapıldıktan sonra, dönüşüm ortamı tanımlanıp standart koordinatlarla yapılan analizin sonucu yer almaktadır. Şekil-2.8'de ise RKA değerleri karşılaştırılmaktadır. Şekil-2.8'deki grafikten de anlaşıldığı gibi analizi yapılan iki farklı durumun RKA değerleri birbiriyle çok benzer sonuçlar göstermektedir. Bu iki benzetimin eşdeğer sonuçlar vermesi, Maxwell denklemlerinin koordinat dönüşümü altında şekil değiştirmeme özelliğinin bir sonucudur.



Şekil-2.8 İletken Kare Cisim için RKA değerlerinin İki Farklı Senaryoda Karşılaştırılması

3. OPTİMİZASYON YÖNTEMLERİ

Mühendisler, tasarladıkları ürünün diğer ürünlerle kıyaslandığında fiyat, performans gibi özelliklerinin daha iyi olması için uğraşırlar. Yaptıkları tasarımın en iyisini ortaya çıkarmaya çalışırlar. En iyiyi bulma işlemine optimizasyon denir.

Günümüzde optimizasyon büyük önem kazanmıştır. Bu tezde de tasarlanacak olan dielektrik katmanların elektriksel özellikleri optimizasyon ile bulunarak, cismin radar kesit alanı küçültülmeye çalışılmaktadır.

Çizelge-3.1’de çeşitli optimizasyon teknikleri gösterilmektedir.

Çizelge-3.1 Optimizasyon Yöntemleri

Optimizasyon Yöntemleri	
Lokal Teknikler	Global Teknikler
Eşlenik Gradyan Yöntemi	Rastgele Yürüme
Newton Yöntemi	Benzetilmiş Tavlama
Quasi Newton Yöntemi	Parçacık Sürü Algoritması
Simplex Yöntemi	Karınca Kolonisi Yöntemi
En Dik Azalış Yöntemi	Genetik Algoritma (GA)

Yukarıdaki tablo göz önünde bulundurulduğunda, optimizasyon yöntemleri lokal ve global olmak üzere iki başlık altında incelenmektedir.

Temel olarak bir optimizasyon problemi, aşağıdaki gibi bir fonksiyonu belirli kısıtlamalar altında azaltmak ya da arttırmak için yapılan işlemler olarak tanımlanmaktadır.

Bir minimizasyon problem Denklem 3.1’de olduğu gibi ifade edilebilmektedir.

$$\begin{aligned} \min_{\bar{x}} \quad & f(\bar{x}) \\ \text{s.t.} \quad & g_i(\bar{x}) \leq 0, \quad i = 1, \dots, m \\ & h_i(\bar{x}) = 0, \quad i = 1, \dots, l \\ & \bar{x} \in X \end{aligned} \tag{3.1}$$

Yukarıdaki denklemde $g_i(\bar{x})$ eşitsizlik kısıtlamaları, $h_i(\bar{x})$ ise eşitlik kısıtlamaları olarak adlandırılmaktadır.

Bu tezde, koordinat dönüşümü ile elde edilen RKA değerine, dielektrik katmanlı problem ile yapılan benzetim sonucunda ulaşılmaya çalışılacaktır. Burada maliyet fonksiyonu, bahsedilen iki sonuç arasındaki kare ortalama karekök hatası ile hesaplanmaktadır. Denklem 3.2’de maliyet fonksiyonunun hesaplanması gösterilmektedir.

$$\text{Maliyet Fonksiyonu} = \sum_i ||E_z^{KD}(i) - E_z^{DK}(i)||_2 \quad (3.2)$$

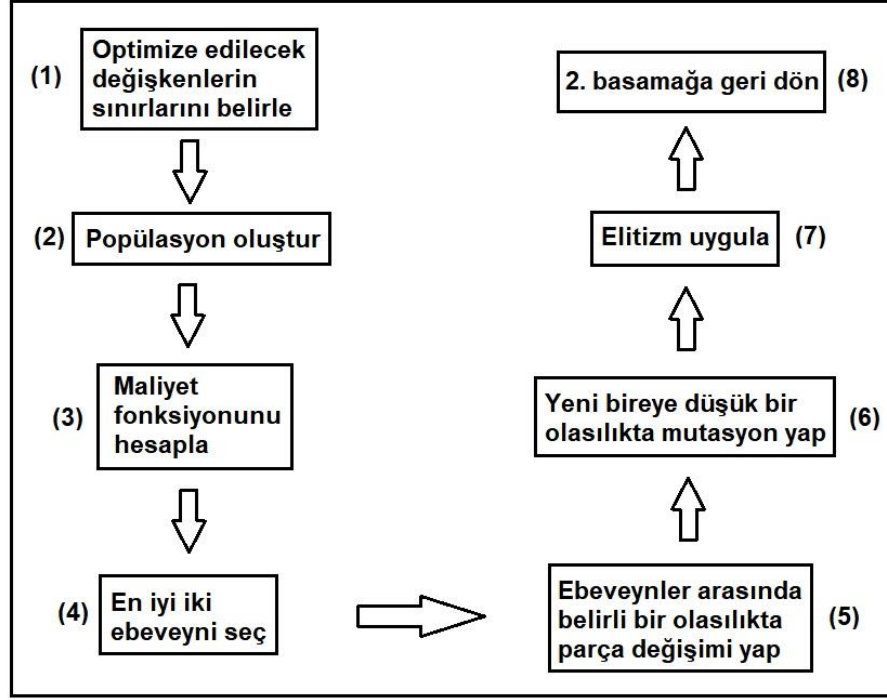
Denklem 3.2’deki E_z^{KD} değişkeni, koordinat dönüşümü sonrasında elde edilen saçılan elektrik alanı, E_z^{DK} ise dielektrik katmanlı yapı ile yapılan analiz sonucunda saçılan elektrik alanı temsil etmektedir. Denklem 3.2’deki toplama işlemi, monostatik RKA hesaplaması yapıldığında frekans örnekleme sayısı kadar, bistatik RKA hesaplaması yapıldığında 360 kere tekrar etmektedir.

3.1 Genetik Algoritma

Genetik algoritma, ilk olarak John H. Holland [14] tarafından 1992 yılında ortaya konmuştur. Bu tarihten sonra ise günümüze gelene kadar çeşitli çalışmalarda karşımıza çıkmıştır.

Genetik algoritma optimizasyonları, deterministik olmayan, doğada rastlanan genel prensipleri baz alarak tasarlanmış bir algoritmadır. Temel mantığı, doğanın yaşam kurallarına dayanmaktadır. Genetik algoritma, içerisinde doğma, üreme ve doğal seleksiyon gibi birçok yaşamsal kuralları barındırmaktadır.

Şekil-3.1’de genetik algoritmanın çalışma prensipleri anlatılmaktadır.



Şekil-3.1 Genetik Algoritma Akış Şeması

Şekil-3.1’de özetlenen genetik algoritmada, optimizasyonun durma kriteri farklı şekillerde seçilebilmektedir. Optimizasyon, belirli bir iterasyon sayısı sonrasında veya 3. adımdaki maliyet fonksiyonu hesaplaması sonrasında hedeflenen değere yaklaşma miktarına göre durdurulabilir.

Genetik algoritmasının başlıca önemli özellikleri aşağıda detaylı olarak anlatılmaktadır.

3.1.1 Popülasyon Oluşturma

Bu tezde, optimize edilecek değerler dielektrik katmanlara ait parametreler (dielektrik katsayısı, kayıp tanjantı) olduğundan, belirlenen değer aralığında istenen sayı kadar popülasyon oluşturulmaktadır. Optimizasyon başlamadan önce, parametrelerin üst ve alt sınır değerleri belirlenir ve her bir katman için seçilen popülasyon sayısı kadar rastgele bir bit dizisi oluşturulur. 0 veya 1’den oluşan bu dizinin her birinin kaç bit içereceği belirlenen üst ve alt sınırlarını kapsayacak şekilde seçilmelidir. Belirli sayıda bitlerden oluşan diziye kromozom denmektedir. Aşağıdaki denklem uygulanmadan önce, ikilik sayma sisteminde oluşturulan sayılar, onluk sayma sistemine dönüştürülür. Ardından Denklem 3.3 uygulanır.

$$\text{dielektrik katsayısı} = D_{10} \left(\frac{L_{üst} - L_{alt}}{2^{gen\ sayısı} - 1} \right) + L_{alt} \quad (3.3)$$

Yukarıdaki denklemde $L_{üst}$, dielektrik katmanının alacağı maksimum değer, L_{alt} ise minimum değerdir. Gen sayısı, bir kromozomdaki bit sayısını ifade etmektedir. D_{10} ise, oluşturulan bit dizisinin onluk sayma sistemine çevrildiğindeki karşılığıdır. Denklem 3.3’de yapılan işlemde, rastgele oluşturulan popülasyondaki bit dizileri, gerçek sayılara karşılık gelecek şekilde biçimlendirilmektedir. Denklem 3.3 sayesinde, oluşturulan bit dizisindeki bitlerin hepsinin sıfır olması durumunda minimum dielektrik katsayısı, bitlerin hepsinin bir olduğu durumda ise maksimum dielektrik katsayısı elde edilmektedir.

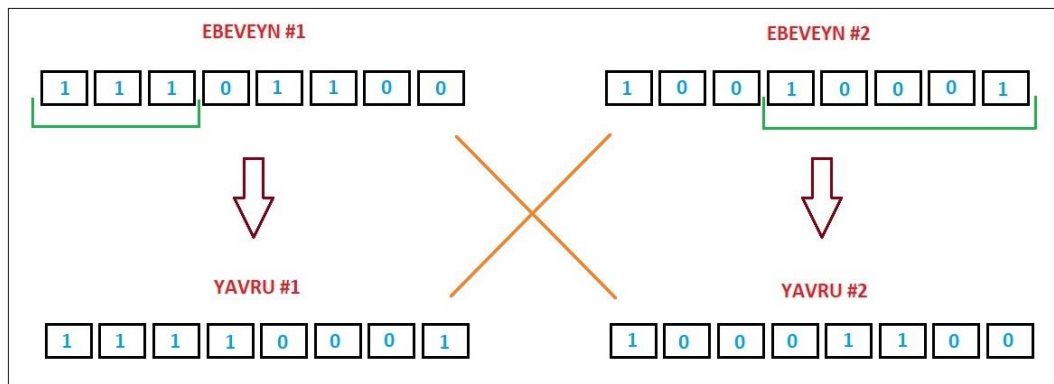
3.1.2 En İyi İki Ebeveynin Seçilmesi

Optimizasyon öncesinde, belirlenen sayı kadar popülasyon oluşturulmaktadır. Popülasyon sayısının artması, uygun sonucu bulma olasılığını arttırdığı gibi, hesaplama bakımından da küçük sayılı durumlara göre daha fazla bir yük getirmektedir. Her bir dielektrik katman için oluşturulan popülasyonların maliyetlerinin hedeflenen duruma göre hesaplanması gerekmektedir. Bu hesaplamalardan sonra, hedeflenen değere en yakın elde edilen iki ebeveyn seçilerek parça değişimi uygulanır ve kalıtları yeni nesillere aktarılır.

3.1.3 Parça Değişimi ve Mutasyon

Elde edilen en iyi iki ebeveyn birbirleriyle eşleştirilir ve rastgele seçilen bir noktadan parçaları değiştirilir.

Şekil-3.2’de bu durum özetlenmektedir.



Şekil-3.2 Parça Değişimi Özeti

Yukarıdaki şekilde de görüldüğü gibi, kromozomların sırasıyla 3. ve 5. bitlerine denk gelen noktalardan parça değişimi yapılmıştır. İlk ebeveynin ilk üç biti ile 2. ebeveynin son 5 biti ilk yavruya aktarılmıştır. 2. yavru ise, ilk ebeveynin son 5 biti ile ikinci ebeveynin ilk 3 bitini almıştır. Böylelikle iki ebeveyn, parça değişimi yaparak iki yavru oluşturmuşlardır.

Parça değişimi yapıldıktan sonra, çok küçük bir olasılıkla mutasyon işlemi uygulanmaktadır. Meydana gelen iki yavrunun rastgele seçilen bir bitinin tersi alınarak bu işlem gerçekleştirilmektedir. Böylelikle kalıtsal çeşitlilik arttırılmaktadır.

3.1.4 Elitizm

Doğadaki karşılığı doğal seleksiyon olan elitizm, genetik algoritmada fonksiyonun minimize edilmesi aşamasında büyük önem taşımaktadır. Parça değişimi ve mutasyon yapılarak kalıtsal çeşitlilik sağlandıktan sonra, oluşan yeni yavruların, en büyük maliyet fonksiyonuna sahip olan ebeveynlerin yerlerine yerleştirilerek popülasyonun güçlendirilmesi amaçlanmaktadır. Bu şekilde, maliyet fonksiyonunun giderek azalması ve hedeflenen yakınsama komşuluğuna ulaşması hedeflenmektedir.

4. BENZETİM SONUÇLARI

Bu tezde, benzetim ortamında çeşitli boyutlarda cisimler için analizler yapılmıştır. Çapı 15λ uzunluğa varan iletken cisimler ile benzetimler yapılmış RKA azalması elde edilmesi hedeflenmiştir. Hem monostatik hem bistatik RKA ele alınmıştır.

4.1 Monostatik RKA Azalması İçin Yapılan Çalışmalar

Bu kısımda, farklı frekans bantlarında yapılan monostatik RKA azalması çalışmaları sunulmaktadır.

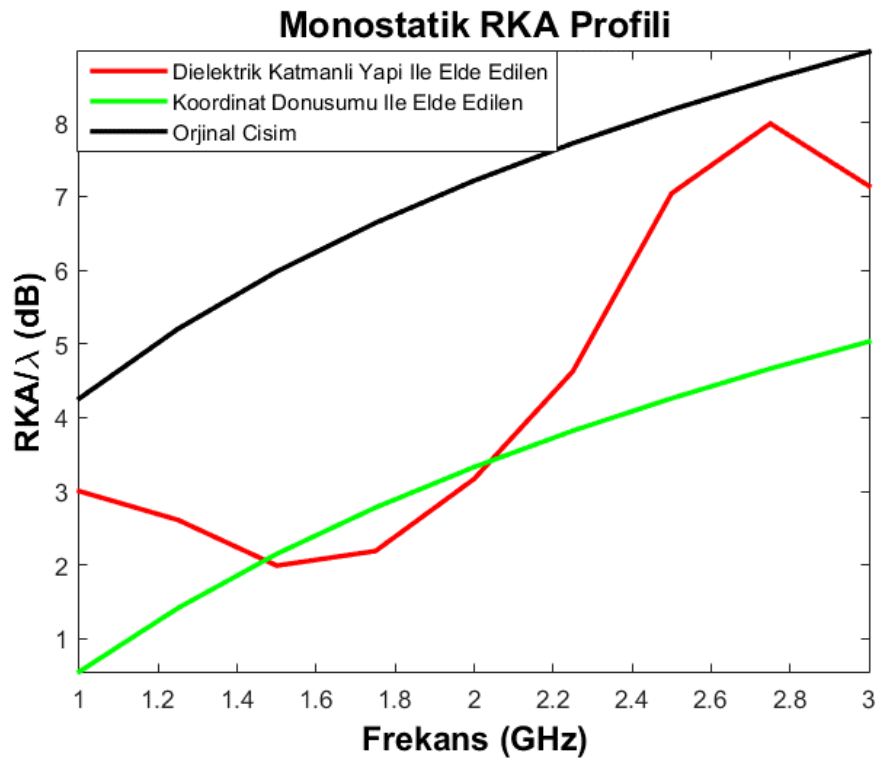
4.1.1 1-3 GHz Bandında Yapılan Optimizasyon Sonuçları

Çizelge-4.1’de çapı 50 cm olan iletken çembersel kesitli silindirik cisim için yapılan benzetim çalışmalarının detayları özetlenmektedir.

Çizelge-4.1 1-3 GHz Bandında Çapı 50 cm Olan İletken Çembersel Kesitli Silindirik Cisim İçin Elde Edilen Sonuçlar

Frekans Bandı	1-3 GHz
Frekans Örnekleme Sayısı	9 (250 MHz aralıklı)
Dalga boyu	10 cm (3 GHz’de)
Sonlu Eleman Boyutu	$\lambda_{\min}/20$ (5 mm)
İletken Cismin Şekli	Çembersel Kesitli Silindir
Orijinal İletken Cismin Çapı	50 cm
Yeni İletken Cismin Çapı	20 cm
Popülasyon Sayısı	30
Gen Sayısı	6
Parça Değişimi Olasılığı	%90
Mutasyon Olasılığı	%1
İterasyon Sayısı	30
Dielektrik Katman Sayısı	3
Dielektrik Katman Kalınlıkları (içten dışa)	2 cm, 2 cm, 2 cm
Katmanların Dielektrik Katsayıları (içten dışa)	1.6, 9, 1.6
Katmanların Kayıp Tanjantları (içten dışa)	0.092, 0.02, 0.007
Dalga Açısının Geliş Açısı	$\varphi = 180^\circ$ (sol taraftan)

1-3 GHz bandında, çapı 50 cm olan iletken çembersel kesitli silindirik cismin RKA değeri çapı 20 cm olan iletken çembersel kesitli silindirik cismin RKA değerine düşürülmeye çalışılmıştır. Siyah çizgi ile gösterilen orijinal cismin RKA değeri, yeşil ile gösterilen çizgi ise koordinat dönüşümü ile elde edilen ve çapı 20 cm olan iletken silindirik cismin monostatik RKA profilini temsil etmektedir. 1-3 GHz bandı boyunca bakıldığında, dielektrik katmanlı yapı ile tüm frekanslarda orijinal cismin RKA değerinden çok daha düşük bir RKA değeri elde edilmiştir. Bazı frekanslarda, hedeflenen cisimden bile daha düşük RKA değerleri gözlemlenmektedir.



Şekil-4.1 1-3 GHz Bandında Çapı 50 cm Olan İletken Çembersel Kesitli Silindirik Cisim

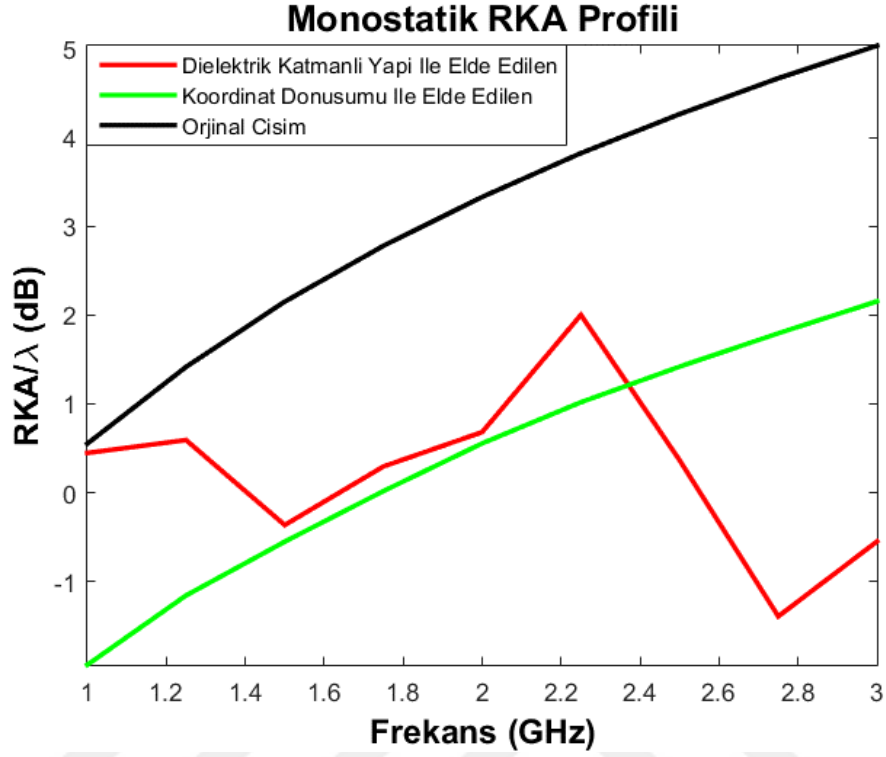
Çizelge-4.2’de çapı 20 cm olan iletken çembersel kesitli silindirik cisim için yapılan benzetim çalışmalarının detayları özetlenmektedir.

Çizelge-4.2 1-3 GHz Bandında Çapı 20 cm Olan İletken Çembersel Kesitli Silindirik Cisim İçin Elde Edilen Sonuçlar

Frekans Bandı	1-3 GHz
Frekans Örnekleme Sayısı	9 (250 MHz aralıklı)

Dalga boyu	10 cm (3 GHz'de)
Sonlu Eleman Boyutu	$\lambda_{\min}/40$ (2.5 mm)
İletken Cismin Şekli	Çembersel Kesitli Silindir
Orijinal İletken Cismin Çapı	20 cm
Yeni İletken Cismin Çapı	10 cm
Popülasyon Sayısı	50
Gen Sayısı	6
Parça Değişimi Olasılığı	%90
Mutasyon Olasılığı	%1
İterasyon Sayısı	20
Dielektrik Katman Sayısı	4
Dielektrik Katman Kalınlıkları (içten dışa)	2 cm, 1 cm, 1 cm, 1 cm
Katmanların Dielektrik Katsayıları (içten dışa)	1.2, 10, 4.13, 3.43
Katmanların Kayıp Tanjantları (içten dışa)	0.06, 0.07, 0.002, 0.053
Dalga Geliş Açısı	$\varphi = 180^\circ$ (sol taraftan)

1-3 GHz bandında, çapı 20 cm olan iletken çembersel kesitli silindirik cismin RKA değeri çapı 10 cm olan iletken çembersel kesitli silindirik cismin RKA değerine düşürülmeye çalışılmıştır. Şekil-4.2'de görüldüğü gibi, tüm frekans bandı boyunca bakıldığında, dielektrik katmanlı yapı ile hedeflenen RKA değerlerinden daha düşük değerler elde edilmiştir. 1.25 GHz sonrasında RKA azalmasının daha kuvvetli olduğu gözlemlenmektedir.



Şekil-4.2 1-3 GHz Bandında Çapı 20 cm Olan İletken Çembersel Kesitli Silindirik Cisim

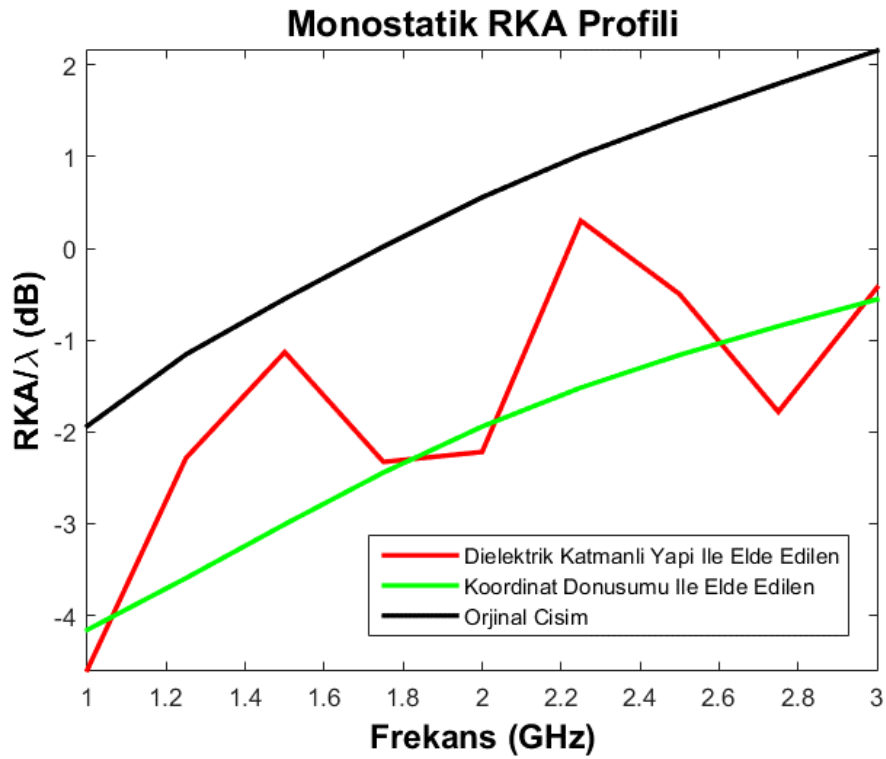
Çizelge-4.3’de çapı 10 cm olan iletken çembersel kesitli silindirik cisim için yapılan benzetim çalışmalarının detayları özetlenmektedir.

Çizelge-4.3 1-3 GHz Bandında Çapı 10 cm Olan İletken Çembersel Kesitli Silindirik Cisim İçin Elde Edilen Sonuçlar

Frekans Bandı	1-3 GHz
Frekans Örnekleme Sayısı	9 (250 MHz aralıklı)
Dalga boyu	10 cm (3 GHz’de)
Sonlu Eleman Boyutu	$\lambda_{min}/30$ (3.3 mm)
İletken Cismin Şekli	Çembersel Kesitli Silindir
Orijinal İletken Cismin Çapı	10 cm
Yeni İletken Cismin Çapı	5 cm
Popülasyon Sayısı	50
Gen Sayısı	6
Parça Değişimi Olasılığı	%90
Mutasyon Olasılığı	%1

İterasyon Sayısı	20
Dielektrik Katman Sayısı	4
Dielektrik Katman Kalınlıkları (içten dışa)	3 cm, 2 cm, 1 cm, 2 cm
Katmanların Dielektrik Katsayıları (içten dışa)	1.6, 9.1, 8.2, 3.6
Katmanların Kayıp Tanjantları (içten dışa)	0.05, 0.03, 0.02, 0.03
Dalganın Geliş Açısı	$\varphi = 180^\circ$ (sol taraftan)

1-3 GHz bandında, çapı 10 cm olan iletken çembersel kesitli silindirik cismin RKA değeri çapı 5 cm olan iletken çembersel kesitli silindirik cismin RKA değerine düşürülmeye çalışılmıştır. Şekil-4.3’de görüldüğü gibi, tüm frekans bandı boyunca bakıldığında, dielektrik katmanlı yapı ile orijinal cisme göre daha düşük RKA değerleri elde edilmiştir.



Şekil-4.3 1-3 GHz Bandında Çapı 10 cm Olan İletken Çembersel Kesitli Silindirik Cisim

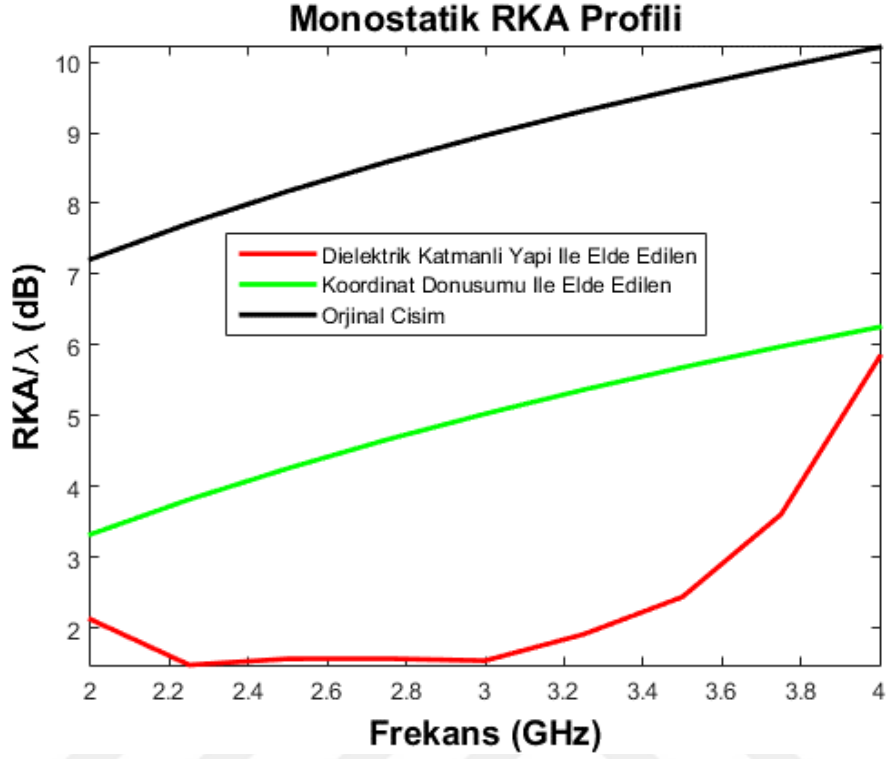
4.1.2 2-4 GHz Bandında Yapılan Optimizasyon Sonuçları

Çizelge-4.4'de çapı 50 cm olan iletken çembersel kesitli silindirik cisim için yapılan benzetim çalışmalarının detayları özetlenmektedir.

Çizelge-4.4 2-4 GHz Bandında Çapı 50 cm Olan İletken Çembersel Kesitli Silindirik Cisim İçin Elde Edilen Sonuçlar

Frekans Bandı	2-4 GHz
Frekans Örnekleme Sayısı	5 (500 MHz aralıklı)
Dalga boyu	7.5 cm (4 GHz'de)
Sonlu Eleman Boyutu	$\lambda_{\min}/40$ (1.875 mm)
İletken Cismin Şekli	Çembersel Kesitli Silindir
Orijinal İletken Cismin Çapı	50 cm
Yeni İletken Cismin Çapı	20 cm
Popülasyon Sayısı	20
Gen Sayısı	6
Parça Değişimi Olasılığı	%90
Mutasyon Olasılığı	%1
İterasyon Sayısı	30
Dielektrik Katman Sayısı	2
Dielektrik Katman Kalınlıkları (içten dışa)	2 cm, 1 cm
Katmanların Dielektrik Katsayıları (içten dışa)	1.34, 9.16
Katmanların Kayıp Tanjantları (içten dışa)	0.0989, 0.0651
Dalga'nın Geliş Açısı	$\varphi = 180^\circ$ (sol taraftan)

2-4 GHz bandında, çapı 50 cm olan iletken çembersel kesitli silindirik cismin RKA değeri çapı 20 cm olan iletken çembersel kesitli silindirik cismin RKA değerine düşürülmeye çalışılmıştır. Şekil-4.4'de görüldüğü gibi, tüm frekans bandı boyunca bakıldığında, dielektrik katmanlı yapı ile hedeflenen RKA değerlerinden daha düşük RKA değerleri elde edilmiştir.



Şekil-4.4 2-4 GHz Bandında Çapı 50 cm Olan İletken Çembersel Kesitli Silindirik Cisim

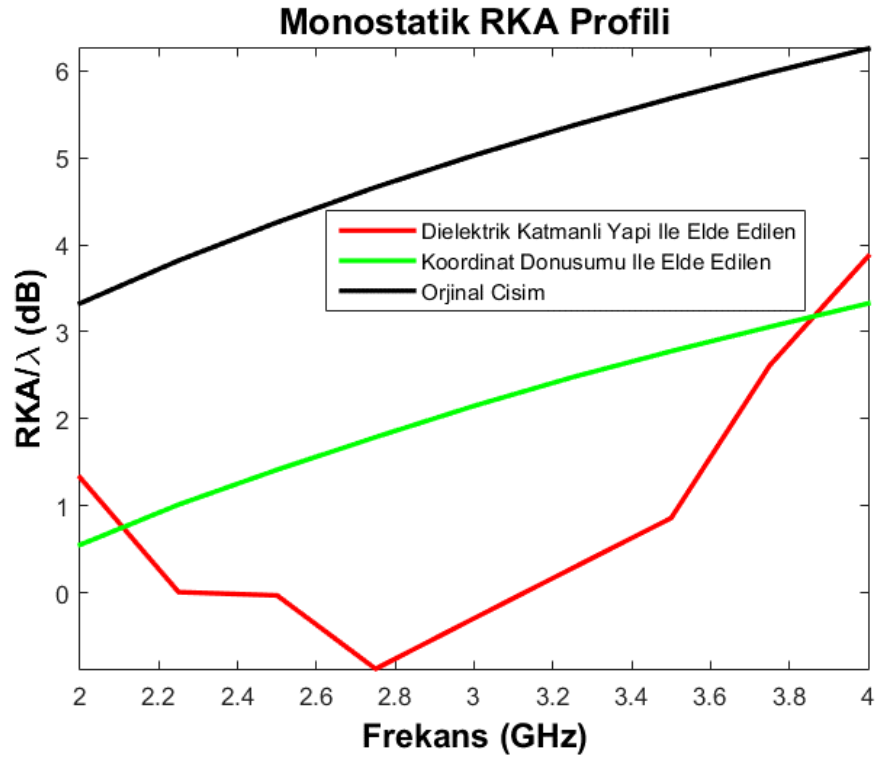
Çizelge-4.5’de çapı 20 cm olan iletken çembersel kesitli silindirik cisim için yapılan benzetim çalışmalarının detayları özetlenmektedir.

Çizelge-4.5 2-4 GHz Bandında Çapı 20 cm Olan İletken Çembersel Kesitli Silindirik Cisim İçin Elde Edilen Sonuçlar

Frekans Bandı	2-4 GHz
Frekans Örnekleme Sayısı	9 (250 MHz aralıklı)
Dalga boyu	7.5 cm (4 GHz’de)
Sonlu Eleman Boyutu	$\lambda_{min}/40$ (1.875 mm)
İletken Cismin Şekli	Çembersel Kesitli Silindir
Orijinal İletken Cismin Çapı	20 cm
Yeni İletken Cismin Çapı	10 cm
Popülasyon Sayısı	30
Gen Sayısı	6
Parça Değişimi Olasılığı	%90
Mutasyon Olasılığı	%1

İterasyon Sayısı	30
Dielektrik Katman Sayısı	3
Dielektrik Katman Kalınlıkları (içten dışa)	1 cm, 1 cm, 1 cm
Katmanların Dielektrik Katsayıları (içten dışa)	1.34 , 2.04, 6.65
Katmanların Kayıp Tanjantları (içten dışa)	0.048, 0.0123, 0.0148
Dalgaın Geliş Açısı	$\varphi = 180^\circ$ (sol taraftan)

2-4 GHz bandında, çapı 20 cm olan iletken çembersel kesitli silindirik cismin RKA değeri çapı 10 cm olan iletken çembersel kesitli silindirik cismin RKA değerine düşürülmeye çalışılmıştır. Şekil-4.5’de görüldüğü gibi, tüm frekans bandı boyunca bakıldığında, 3 adet dielektrik katmanlı yapı ile hedeflenen RKA azalması gerçekleştirilmiştir.



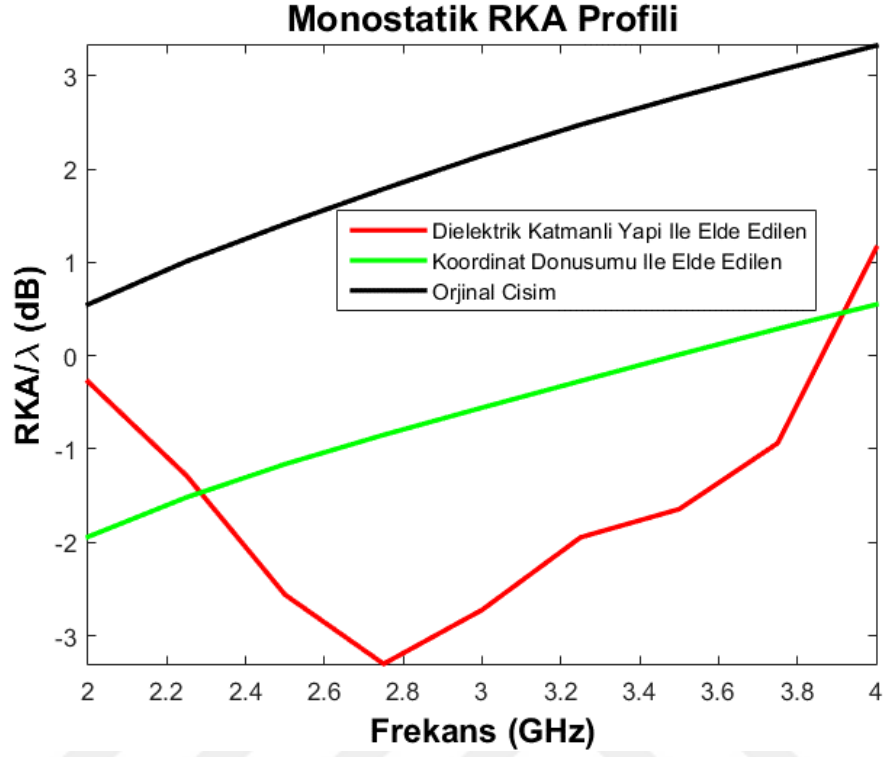
Şekil-4.5 2-4 GHz Bandında Çapı 10 cm Olan İletken Çembersel Kesitli Silindirik Cisim

Çizelge-4.6'da çapı 10 cm olan iletken çembersel kesitli silindirik cisim için yapılan benzetim çalışmalarının detayları özetlenmektedir.

Çizelge-4.6 2-4 GHz Bandında Çapı 10 cm Olan İletken Çembersel Kesitli Silindirik Cisim İçin Elde Edilen Sonuçlar

Frekans Bandı	2-4 GHz
Frekans Örnekleme Sayısı	9 (250 MHz aralıklı)
Dalga boyu	7.5 cm (4 GHz'de)
Sonlu Eleman Boyutu	$\lambda_{min}/40$ (1.875 mm)
İletken Cismin Şekli	Çembersel Kesitli Silindir
Orijinal İletken Cismin Çapı	10 cm
Yeni İletken Cismin Çapı	5 cm
Popülasyon Sayısı	30
Gen Sayısı	6
Parça Değişimi Olasılığı	%90
Mutasyon Olasılığı	%1
İterasyon Sayısı	30
Dielektrik Katman Sayısı	3
Dielektrik Katman Kalınlıkları (içten dışa)	1 cm, 1 cm, 1 cm
Katmanların Dielektrik Katsayıları (içten dışa)	2, 13, 1.2
Katmanların Kayıp Tanjantları (içten dışa)	0.0177 , 0.0184, 0.0124
Dalganın Geliş Açısı	$\varphi = 180^\circ$ (sol taraftan)

2-4 GHz bandında, çapı 10 cm olan iletken çembersel kesitli silindirik cismin RKA değeri çapı 5 cm olan iletken çembersel kesitli silindirik cismin RKA değerine düşürülmeye çalışılmıştır. Şekil-4.6'da görüldüğü gibi, tüm frekans bandı boyunca bakıldığında, 3 adet dielektrik katmanlı yapı ile hedeflenen RKA azalması gerçekleştirilmiştir. 2.4-3.8 GHz aralığında ise hedeflenen RKA azalmasından daha büyük bir düşüş görülmektedir.



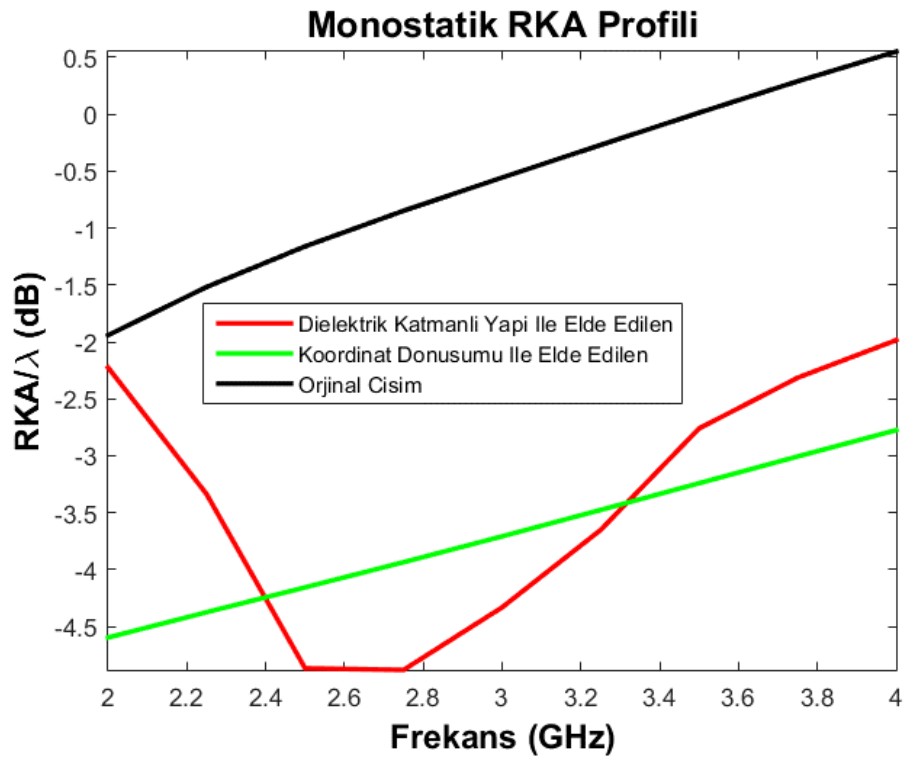
Çizelge-4.7’de çapı 5 cm olan iletken çembersel kesitli silindirik cisim için yapılan benzetim çalışmalarının detayları özetlenmektedir.

Çizelge-4.7 2-4 GHz Bandında Çapı 5 cm Olan İletken Çembersel Kesitli Silindirik Cisim İçin Elde Edilen Sonuçlar

Frekans Bandı	2-4 GHz
Frekans Örnekleme Sayısı	9 (250 MHz aralıklı)
Dalga boyu	7.5 cm (4 GHz’de)
Sonlu Eleman Boyutu	$\lambda_{min}/40$ (1.875 mm)
İletken Cismin Şekli	Çembersel Kesitli Silindir
Orijinal İletken Cismin Çapı	5 cm
Yeni İletken Cismin Çapı	2 cm
Popülasyon Sayısı	50
Gen Sayısı	6
Parça Değişimi Olasılığı	%90
Mutasyon Olasılığı	%1

İterasyon Sayısı	20
Dielektrik Katman Sayısı	3
Dielektrik Katman Kalınlıkları (içten dışa)	1 cm, 1 cm, 1 cm
Katmanların Dielektrik Katsayıları (içten dışa)	1.5, 9, 2.2
Katmanların Kayıp Tanjantları (içten dışa)	0.0014 , 0.01, 0.0293
Dalganın Geliş Açısı	$\varphi = 180^\circ$ (sol taraftan)

2-4 GHz bandında, çapı 5 cm olan iletken çembersel kesitli silindirik cismin RKA değeri çapı 2 cm olan iletken çembersel kesitli silindirik cismin RKA değerine düşürülmeye çalışılmıştır. Şekil-4.7’de görüldüğü gibi, tüm frekans bandı boyunca bakıldığında, 3 adet dielektrik katmanlı yapı ile hedeflenen RKA azalması gerçekleştirilmiştir. 2.4-3.2 GHz bandında ise hedeflenen RKA azalmasından daha büyük bir düşüş gözlemlenmektedir.



Şekil-4.7 2-4 GHz Bandında Çapı 5 cm Olan İletken Çembersel Kesitli Silindirik Cisim

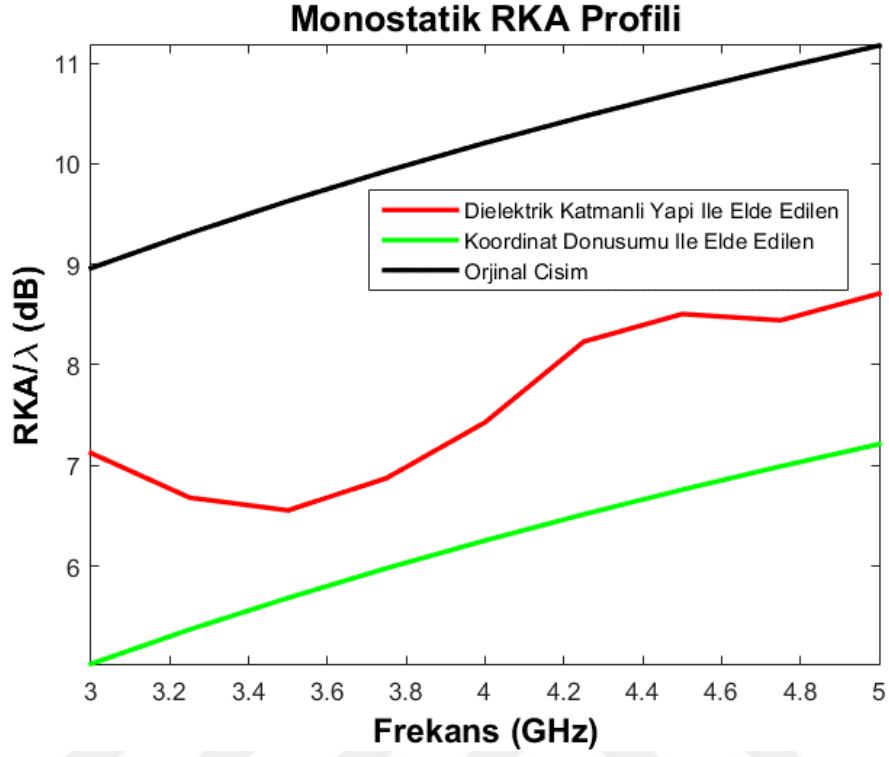
4.1.3 3-5 GHz Bandında Yapılan Optimizasyon Sonuçları

Çizelge-4.8'de çapı 50 cm olan iletken çembersel kesitli silindirik cisim için yapılan benzetim çalışmalarının detayları özetlenmektedir.

Çizelge-4.8 3-5 GHz Bandında Çapı 50 cm Olan İletken Çembersel Kesitli Silindirik Cisim İçin Elde Edilen Sonuçlar

Frekans Bandı	3-5 GHz
Frekans Örnekleme Sayısı	9 (250 MHz aralıklı)
Dalga boyu	6 cm (5 GHz'de)
Sonlu Eleman Boyutu	$\lambda_{min}/20$ (3 mm)
İletken Cismin Şekli	Çembersel Kesitli Silindir
Orijinal İletken Cismin Çapı	50 cm
Yeni İletken Cismin Çapı	20 cm
Popülasyon Sayısı	30
Gen Sayısı	6
Parça Değişimi Olasılığı	%90
Mutasyon Olasılığı	%1
İterasyon Sayısı	20
Dielektrik Katman Sayısı	2
Dielektrik Katman Kalınlıkları (içten dışa)	1 cm, 1 cm
Katmanların Dielektrik Katsayıları (içten dışa)	2.2, 5.1
Katmanların Kayıp Tanjantları (içten dışa)	0.016, 0.029
Dalga'nın Geliş Açısı	$\varphi = 180^\circ$ (sol taraftan)

3-5 GHz bandında, çapı 50 cm olan iletken çembersel kesitli silindirik cismin RKA değeri çapı 20 cm olan iletken çembersel kesitli silindirik cismin RKA değerine düşürülmeye çalışılmıştır. Şekil-4.8'de görüldüğü gibi, tüm frekans bandı boyunca bakıldığında, 2 adet dielektrik katmanlı yapı ile hedeflenen RKA azalmasına yakın bir sonuç elde edilmiştir.



Şekil-4.8 3-5 GHz Bandında Çapı 50 cm Olan İletken Çembersel Kesitli Silindirik Cisim

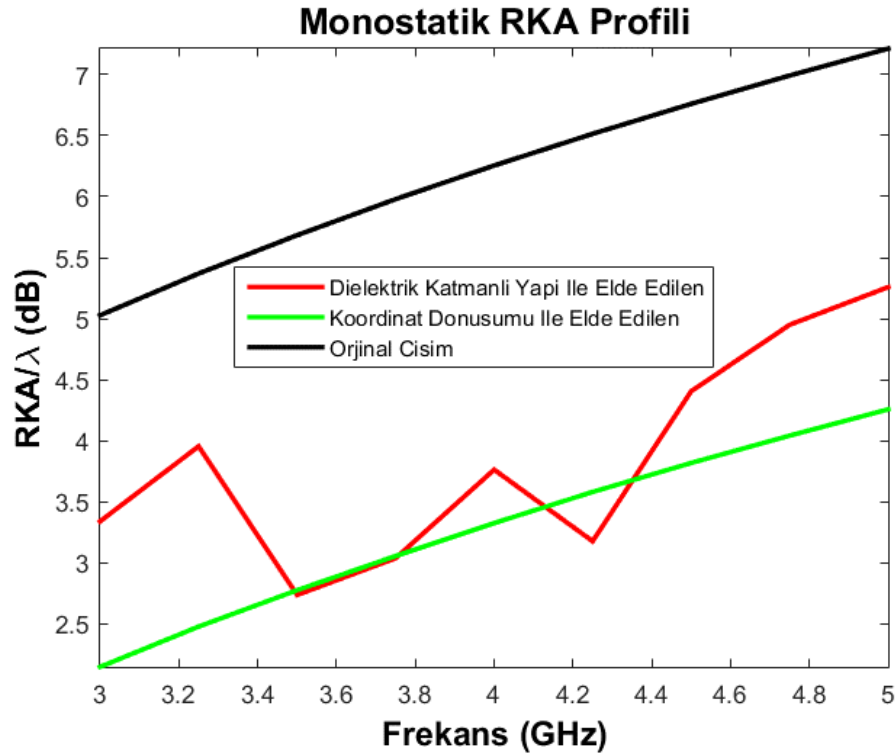
Çizelge-4.9'da çapı 20 cm olan iletken çembersel kesitli silindirik cisim için yapılan benzetim çalışmalarının detayları özetlenmektedir.

Çizelge-4.9 3-5 GHz Bandında Çapı 20 cm Olan İletken Çembersel Kesitli Silindirik Cisim İçin Elde Edilen Sonuçlar

Frekans Bandı	3-5 GHz
Frekans Örnekleme Sayısı	9 (250 MHz aralıklı)
Dalga boyu	6 cm (5 GHz'de)
Sonlu Eleman Boyutu	$\lambda_{min}/20$ (3 mm)
İletken Cismin Şekli	Çembersel Kesitli Silindir
Orijinal İletken Cismin Çapı	20 cm
Yeni İletken Cismin Çapı	10 cm
Popülasyon Sayısı	50
Gen Sayısı	6
Parça Değişimi Olasılığı	%90
Mutasyon Olasılığı	%1

İterasyon Sayısı	30
Dielektrik Katman Sayısı	2
Dielektrik Katman Kalınlıkları (içten dışa)	1 cm, 1 cm
Katmanların Dielektrik Katsayıları (içten dışa)	2.2, 5.4
Katmanların Kayıp Tanjantları (içten dışa)	0.09, 0.012
Dalganın Geliş Açısı	$\varphi = 180^\circ$ (sol taraftan)

3-5 GHz bandında, çapı 20 cm olan iletken çembersel kesitli silindirik cismin RKA değeri çapı 10 cm olan iletken çembersel kesitli silindirik cismin RKA değerine düşürülmeye çalışılmıştır. Şekil-4.9’da görüldüğü gibi, tüm frekans bandı boyunca bakıldığında, 2 adet dielektrik katmanlı yapı ile hedeflenen RKA azalmasına çok yakın bir sonuç elde edilmiştir.



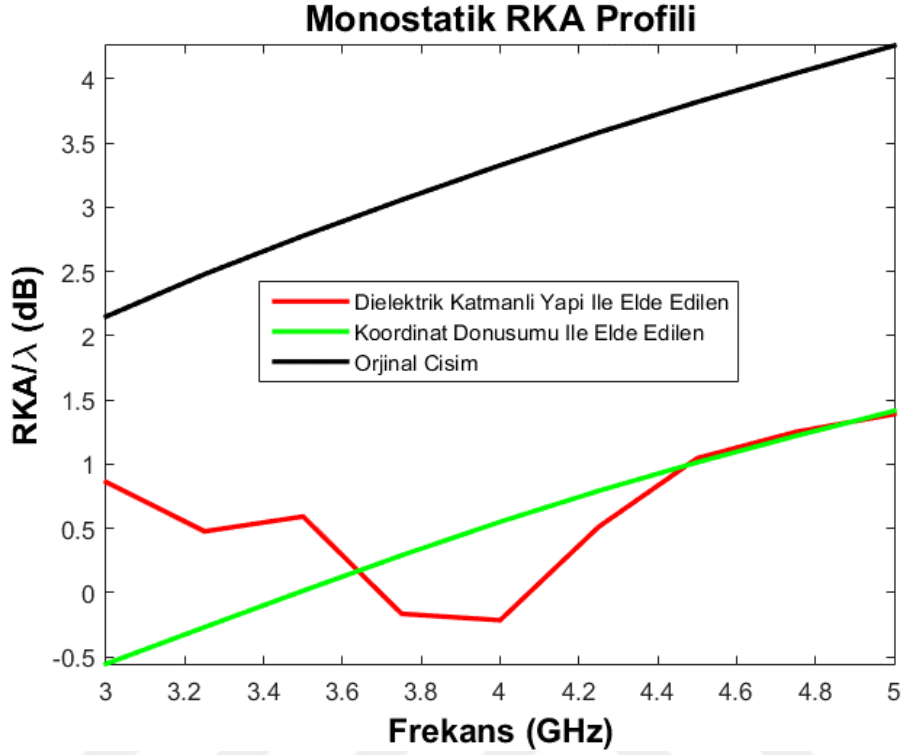
Şekil-4.9 3-5 GHz Bandında Çapı 20 cm Olan İletken Çembersel Kesitli Silindirik Cisim

Çizelge-4.10’da çapı 10 cm olan iletken çembersel kesitli silindirik cisim için yapılan benzetim çalışmalarının detayları özetlenmektedir.

Çizelge-4.10 3-5 GHz Bandında Çapı 10 cm Olan İletken Çembersel Kesitli Silindirik Cisim İçin Elde Edilen Sonuçlar

Frekans Bandı	3-5 GHz
Frekans Örnekleme Sayısı	9 (250 MHz aralıklı)
Dalga boyu	6 cm (5 GHz'de)
Sonlu Eleman Boyutu	$\lambda_{\min}/40$ (1.5 mm)
İletken Cismin Şekli	Çembersel Kesitli Silindir
Orijinal İletken Cismin Çapı	10 cm
Yeni İletken Cismin Çapı	5 cm
Popülasyon Sayısı	50
Gen Sayısı	6
Parça Değişimi Olasılığı	%90
Mutasyon Olasılığı	%1
İterasyon Sayısı	30
Dielektrik Katman Sayısı	3
Dielektrik Katman Kalınlıkları (içten dışa)	1 cm, 1 cm, 0.5 cm
Katmanların Dielektrik Katsayıları (içten dışa)	1.6, 4.5, 1.6
Katmanların Kayıp Tanjantları (içten dışa)	0.02, 0.04, 0.02
Dalganın Geliş Açısı	$\varphi = 180^\circ$ (sol taraftan)

3-5 GHz bandında, çapı 10 cm olan iletken çembersel kesitli silindirik cismin RKA değeri çapı 5 cm olan iletken çembersel kesitli silindirik cismin RKA değerine düşürülmeye çalışılmıştır. Şekil-4.10'da görüldüğü gibi, tüm frekans bandı boyunca bakıldığında, 3 adet dielektrik katmanlı yapı ile hedeflenen RKA azalmasına çok yakın bir sonuç elde edilmiştir.



Şekil-4.10 3-5 GHz Bandında Çapı 10 cm Olan İletken Çembersel Kesitli Silindirik Cisim

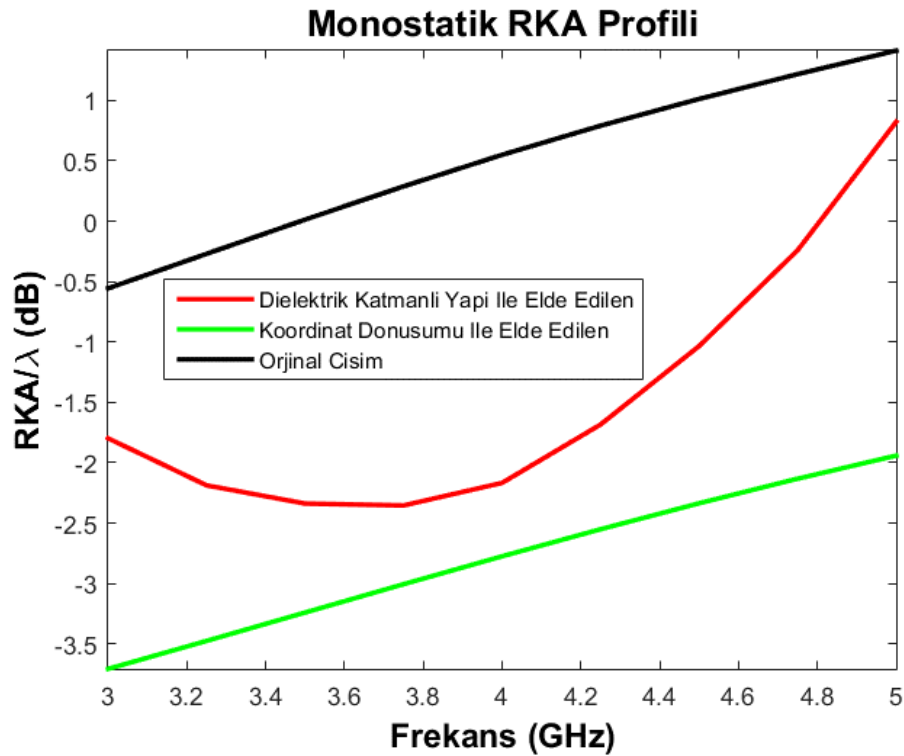
Çizelge-4.11’de çapı 5 cm olan iletken çembersel kesitli silindirik cisim için yapılan benzetim çalışmalarının detayları özetlenmektedir.

Çizelge-4.11 3-5 GHz Bandında Çapı 5 cm Olan İletken Çembersel Kesitli Silindirik Cisim İçin Elde Edilen Sonuçlar

Frekans Bandı	3-5 GHz
Frekans Örnekleme Sayısı	9 (250 MHz aralıklı)
Dalga boyu	6 cm (5 GHz’te)
Sonlu Eleman Boyutu	$\lambda_{min}/40$ (1.5 mm)
İletken Cismin Şekli	Çembersel Kesitli Silindir
Orijinal İletken Cismin Çapı	5 cm
Yeni İletken Cismin Çapı	2 cm
Popülasyon Sayısı	50
Gen Sayısı	6
Parça Değişimi Olasılığı	%90
Mutasyon Olasılığı	%0.1

İterasyon Sayısı	30
Dielektrik Katman Sayısı	2
Dielektrik Katman Kalınlıkları (içten dışa)	2.5 cm, 0.5 cm
Katmanların Dielektrik Katsayıları (içten dışa)	1.2, 3.5
Katmanların Kayıp Tanjantları (içten dışa)	0.02, 0.04
Dalganın Geliş Açısı	$\varphi = 180^\circ$ (sol taraftan)

3-5 GHz bandında, çapı 5 cm olan iletken çembersel kesitli silindirik cismin RKA değeri çapı 2 cm olan iletken çembersel kesitli silindirik cismin RKA değerine düşürülmeye çalışılmıştır. Şekil-4.11’de görüldüğü gibi, tüm frekans bandı boyunca bakıldığında, 2 adet dielektrik katmanlı yapı ile orijinal cismin altında bir RKA profili elde edilmiştir.



Şekil-4.11 3-5 GHz Bandında Çapı 5 cm Olan İletken Çembersel Kesitli Silindirik Cisim

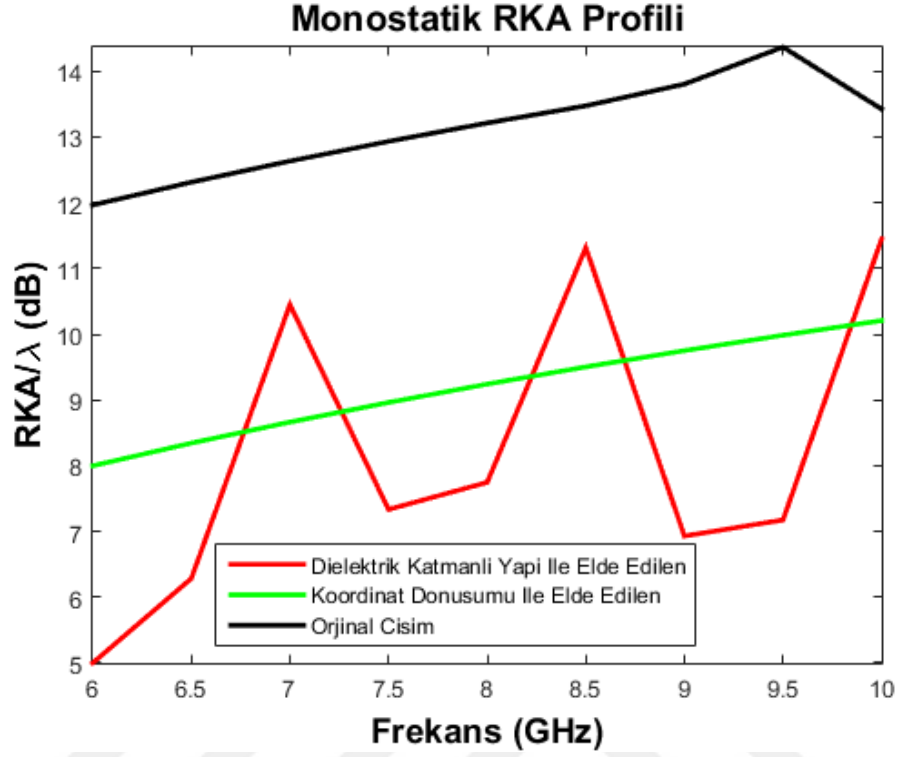
4.1.4 6-10 GHz Bandında Yapılan Optimizasyon Sonuçları

Çizelge-4.12’te çapı 50 cm olan iletken çembersel kesitli silindirik cisim için yapılan benzetim çalışmalarının detayları gösterilmektedir.

Çizelge-4.12 6-10 GHz Bandında Çapı 50 cm Olan İletken Çembersel Kesitli Silindirik Cisim İçin Elde Edilen Sonuçlar

Frekans Bandı	6-10 GHz
Frekans Örnekleme Sayısı	9 (500 MHz aralıklı)
Dalga boyu	3 cm (10 GHz’de)
Sonlu Eleman Boyutu	$\lambda_{\min}/20$ (1.5 mm)
İletken Cismin Şekli	Çembersel Kesitli Silindir
Orijinal İletken Cismin Çapı	50 cm
Yeni İletken Cismin Çapı	20 cm
Popülasyon Sayısı	20
Gen Sayısı	6
Parça Değişimi Olasılığı	%90
Mutasyon Olasılığı	%0.1
İterasyon Sayısı	20
Dielektrik Katman Sayısı	3
Dielektrik Katman Kalınlıkları (içten dışa)	1 cm, 2 cm, 1 cm
Katmanların Dielektrik Katsayıları (içten dışa)	1.20, 9.44, 7.49
Katmanların Kayıp Tanjantları (içten dışa)	0.0605, 0.0625, 0.0697
Dalgaın Geliş Açısı	$\varphi = 180^\circ$ (sol taraftan)

6-10 GHz bandında, çapı 5 cm olan iletken çembersel kesitli silindirik cismin RKA değeri çapı 2 cm olan iletken çembersel kesitli silindirik cismin RKA değerine düşürülmeye çalışılmıştır. Şekil-4.12’de görüldüğü gibi, tüm frekans bandı boyunca bakıldığında, orijinal cisimden daha düşük RKA değerleri elde edilmiştir.



Şekil-4.12 6-10 GHz Çapı 50 cm Olan İletken Çembersel Kesitli Silindirik Cisim

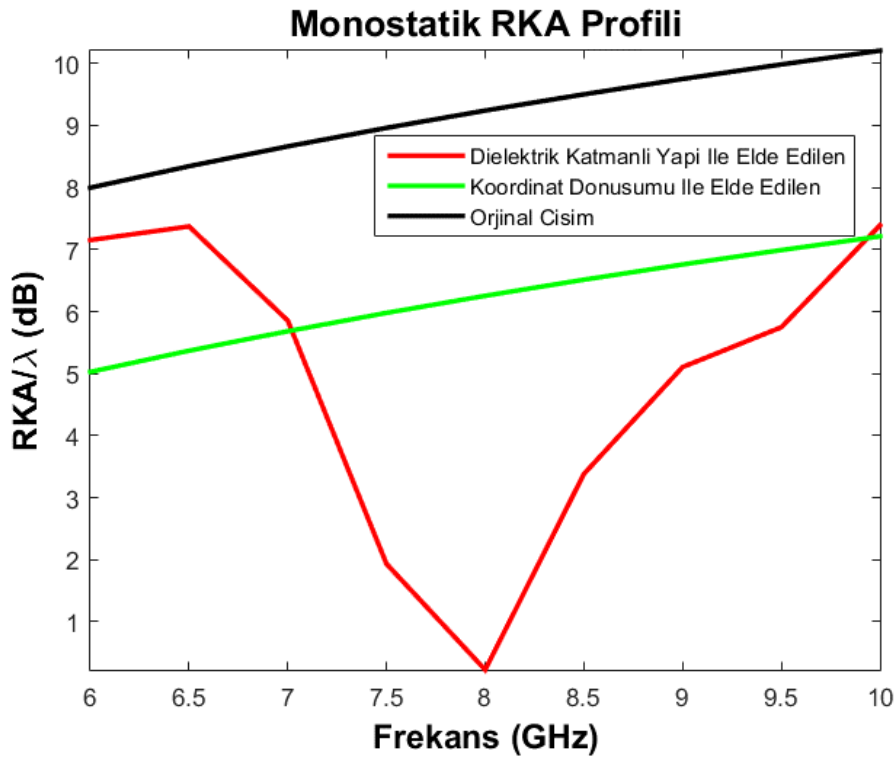
Çizelge-4.13’de çapı 20 cm olan iletken çembersel kesitli silindirik cisim için yapılan benzetim çalışmalarının detayları gösterilmektedir.

Çizelge-4.13 6-10 GHz Bandında Çapı 20 cm Olan İletken Çembersel Kesitli Silindirik Cisim İçin Elde Edilen Sonuçlar

Frekans Bandı	6-10 GHz
Frekans Örnekleme Sayısı	9 (500 MHz aralıklı)
Dalga boyu	3 cm (10 GHz’te)
Sonlu Eleman Boyutu	$\lambda_{min}/20$ (1.5 mm)
İletken Cismin Şekli	Çembersel Kesitli Silindir
Orijinal İletken Cismin Çapı	20 cm
Yeni İletken Cismin Çapı	10 cm
Popülasyon Sayısı	20
Gen Sayısı	6
Parça Değişimi Olasılığı	%90
Mutasyon Olasılığı	%0.1

İterasyon Sayısı	20
Dielektrik Katman Sayısı	3
Dielektrik Katman Kalınlıkları (içten dışa)	1 cm, 1 cm, 1 cmn
Katmanların Dielektrik Katsayıları (içten dışa)	1.2, 6.9, 1.5
Katmanların Kayıp Tanjantları (içten dışa)	0.02, 0.05, 0.01
Dalgaın Geliş Açısı	$\varphi = 180^\circ$ (sol taraftan)

6-10 GHz bandında, çapı 20 cm olan iletken çembersel kesitli silindirik cismin RKA değeri çapı 10 cm olan iletken çembersel kesitli silindirik cismin RKA değerine düşürülmeye çalışılmıştır. Şekil-4.13’de görüldüğü gibi, tüm frekans bandı boyunca bakıldığında, orijinal cisimden daha düşük bir RKA profili elde edilmiştir. 7-9.5 GHz arasında ise, hedeflenen RKA profilinden daha düşük değerler gözlemlenmiştir.



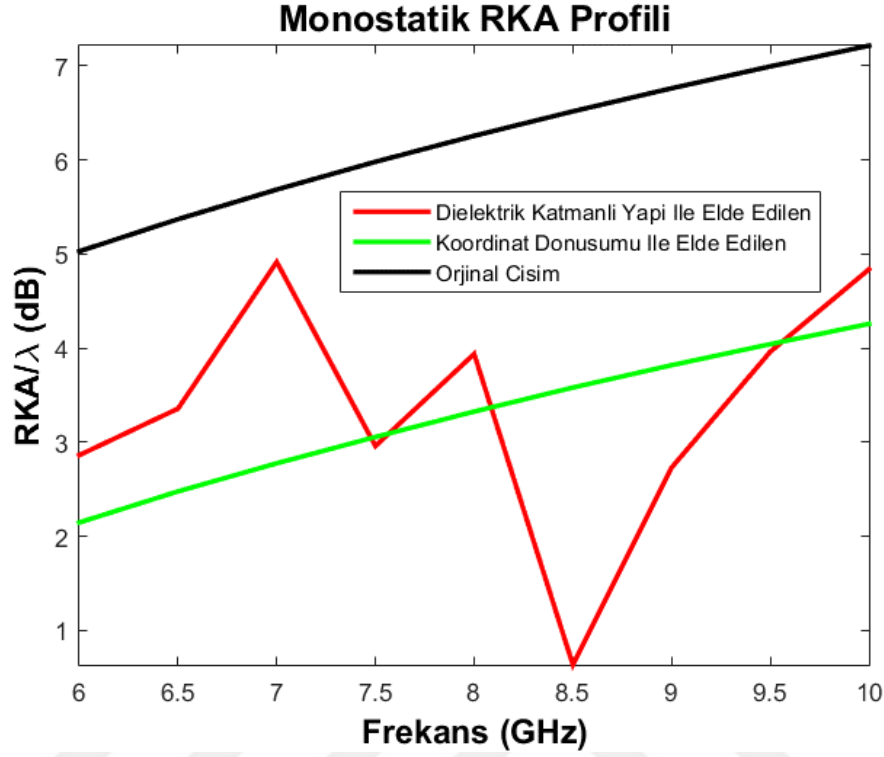
Şekil-4.13 6-10 GHz Çapı 20 cm Olan İletken Çembersel Kesitli Silindirik Cisim

Çizelge-4.14’de çapı 10 cm olan iletken çembersel kesitli silindirik cisim için yapılan benzetim çalışmalarının detayları gösterilmektedir.

Çizelge-4.14 6-10 GHz Bandında Çapı 10 cm Olan İletken Çembersel Kesitli Silindirik Cisim İçin Elde Edilen Sonuçlar

Frekans Bandı	6-10 GHz
Frekans Örnekleme Sayısı	9 (500 MHz aralıklı)
Dalga boyu	3 cm (10 GHz'de)
Sonlu Eleman Boyutu	$\lambda_{\min}/30$ (1 mm)
İletken Cismin Şekli	Çembersel Kesitli Silindir
Orijinal İletken Cismin Çapı	10 cm
Yeni İletken Cismin Çapı	5 cm
Popülasyon Sayısı	30
Gen Sayısı	6
Parça Değişimi Olasılığı	%90
Mutasyon Olasılığı	%0.1
İterasyon Sayısı	20
Dielektrik Katman Sayısı	3
Dielektrik Katman Kalınlıkları (içten dışa)	1 cm, 1 cm, 1 cm
Katmanların Dielektrik Katsayıları (içten dışa)	1.2, 5.5, 2.2
Katmanların Kayıp Tanjantları (içten dışa)	0.02, 0.07, 0.01
Dalganın Geliş Açısı	$\varphi = 180^\circ$ (sol taraftan)

6-10 GHz bandında, çapı 10 cm olan iletken çembersel kesitli silindirik cismin RKA değeri çapı 5 cm olan iletken çembersel kesitli silindirik cismin RKA değerine düşürülmeye çalışılmıştır. Şekil-4.14'de görüldüğü gibi, tüm frekans bandı boyunca bakıldığında, orijinal cisimden daha düşük bir RKA profili elde edilmiştir. 8-9.5 GHz bandında ise hedeflenen RKA azalmasından daha fazla bir azalma gözlemlenmiştir.



Şekil-4.14 6-10 GHz Çapı 10 cm Olan İletken Çembersel Kesitli Silindirik Cisim

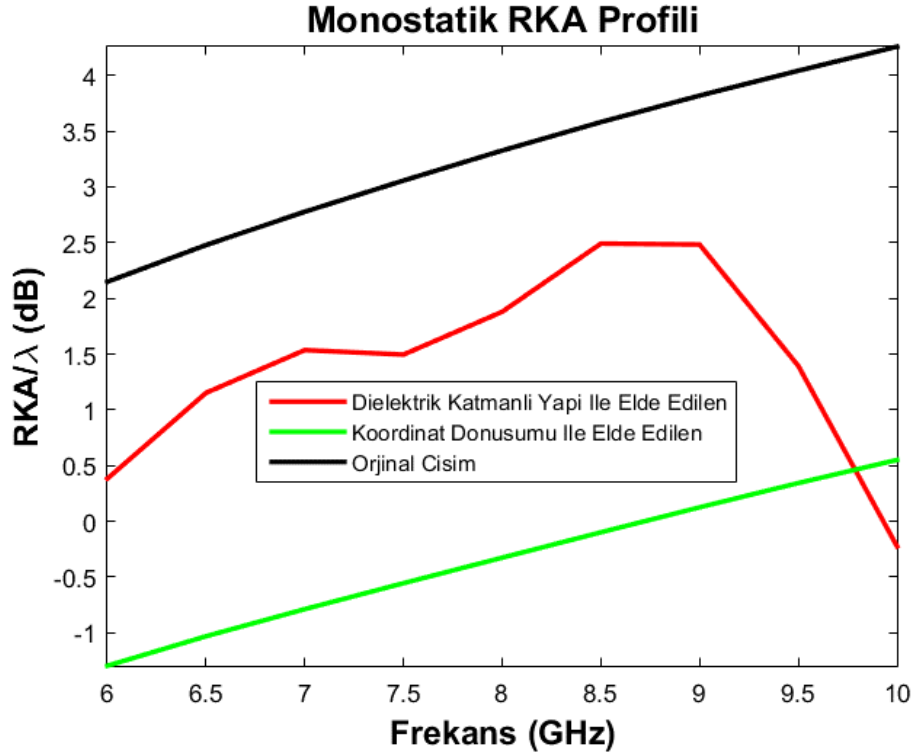
Çizelge-4.15’de çapı 5 cm olan iletken çembersel kesitli silindirik cisim için yapılan benzetim çalışmalarının detayları gösterilmektedir.

Çizelge-4.15 6-10 GHz Bandında Çapı 5 cm Olan İletken Çembersel Kesitli Silindirik Cisim İçin Elde Edilen Sonuçlar

Frekans Bandı	6-10 GHz
Frekans Örnekleme Sayısı	9 (500 MHz aralıklı)
Dalga boyu	3 cm (10 GHz’de)
Sonlu Eleman Boyutu	$\lambda_{min}/30$ (1 mm)
İletken Cismin Şekli	Çembersel Kesitli Silindir
Orijinal İletken Cismin Çapı	5 cm
Yeni İletken Cismin Çapı	2 cm
Popülasyon Sayısı	50
Gen Sayısı	6
Parça Değişimi Olasılığı	%90

Mutasyon Olasılığı	%0.1
İterasyon Sayısı	20
Dielektrik Katman Sayısı	3
Dielektrik Katman Kalınlıkları (içten dışa)	0.5 cm, 0.5 cm, 0.5 cm
Katmanların Dielektrik Katsayıları (içten dışa)	1.2, 6.6, 3
Katmanların Kayıp Tanjantları (içten dışa)	0.001, 0.01, 0.003
Dalganın Geliş Açısı	$\varphi = 180^\circ$ (sol taraftan)

6-10 GHz bandında, çapı 5 cm olan iletken çembersel kesitli silindirik cismin RKA değeri çapı 2 cm olan iletken çembersel kesitli silindirik cismin RKA değerine düşürülmeye çalışılmıştır. Şekil-4.15’de görüldüğü gibi, tüm frekans bandı boyunca bakıldığında, orijinal cisimden daha düşük bir RKA profili elde edilmiştir.



Şekil-4.15 6-10 GHz Çapı 5 cm Olan İletken Çembersel Kesitli Silindirik Cisim

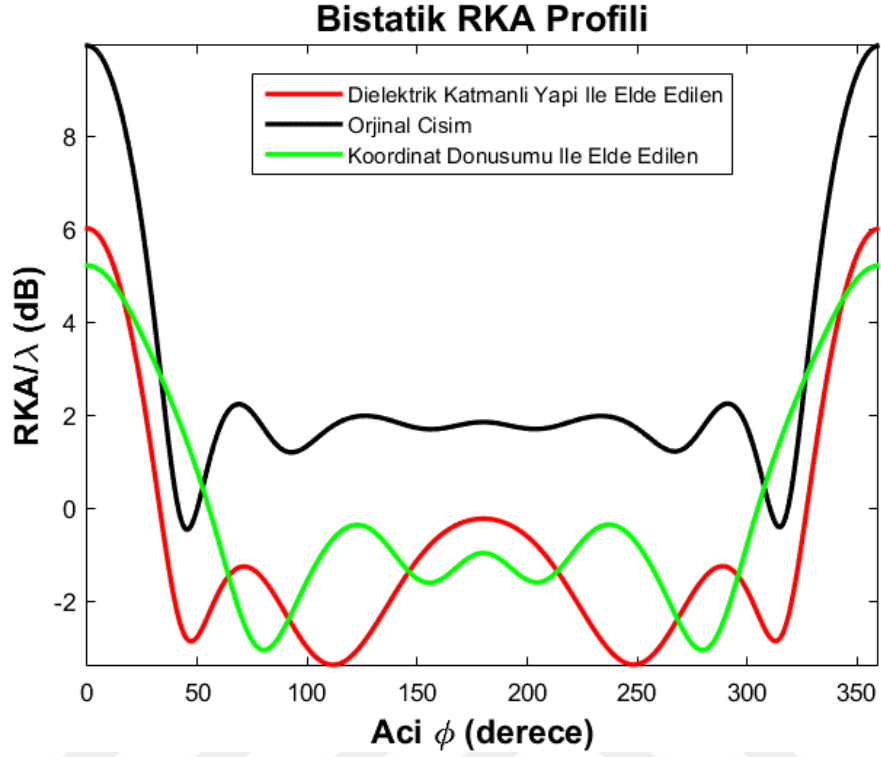
4.2 Bistatik RKA Azalması İçin Yapılan Çalışmalar

Tezin ana amacı, monostatik RKA azalması olmasına rağmen, belirli şekildeki iletken cisimlerin bistatik RKA azalmasını sağlamak amacıyla da çeşitli benzetimler yapılmıştır. Bu benzetimler sonucunda, her boyut ve şekil için koordinat dönüşümü sonrasında elde edilen düşük RKA profillerine benzer RKA azalmasının tüm açılarda aynı iyi performansı göstermesinin zor olduğu gözlemlenmiştir. Aşağıda bir takım başarılı benzetim sonuçları sunulmuştur.

Çizelge-4.16'da çapı 10 cm iletken çembersel kesitli silindirik cisim için yapılan benzetim çalışmalarının detayları gösterilmektedir.

Çizelge-4.16 3 GHz'de 10 cm Çaplı İletken Çembersel Kesitli Silindirik Cisim İçin Elde Edilen Sonuçlar

Çalışma Frekansı	3 GHz
Dalga boyu	10 cm
Sonlu Eleman Boyutu	$\lambda_{min}/60$ (1.7 mm)
Katman İçinde Sonlu Eleman Boyutu	$\lambda_{min}/240$ (0.425 mm)
İletken Cismin Şekli	Çembersel Kesitli Silindir
Orijinal İletken Cismin Çapı	10 cm
Yeni İletken Cismin Çapı	5 cm
Popülasyon Sayısı	30
Gen Sayısı	6
Parça Değişimi Olasılığı	%90
Mutasyon Olasılığı	%0.1
İterasyon Sayısı	100
Dielektrik Katman Sayısı	2
Dielektrik Katman Kalınlıkları (içten dışa)	3.4 mm, 3.4 mm
Katmanların Dielektrik Katsayıları (içten dışa)	6.9, 8
Katmanların Kayıp Tanjantları (içten dışa)	0.003, 0.002
Dalga Açısının Geliş Açısı	$\varphi = 180^\circ$ (sol taraftan)



Şekil-4.16 3 GHz'de 10 cm Çaplı İletken Çembersel Kesitli Silindirik Cisim İçin Yapılan Benzetim Sonucu

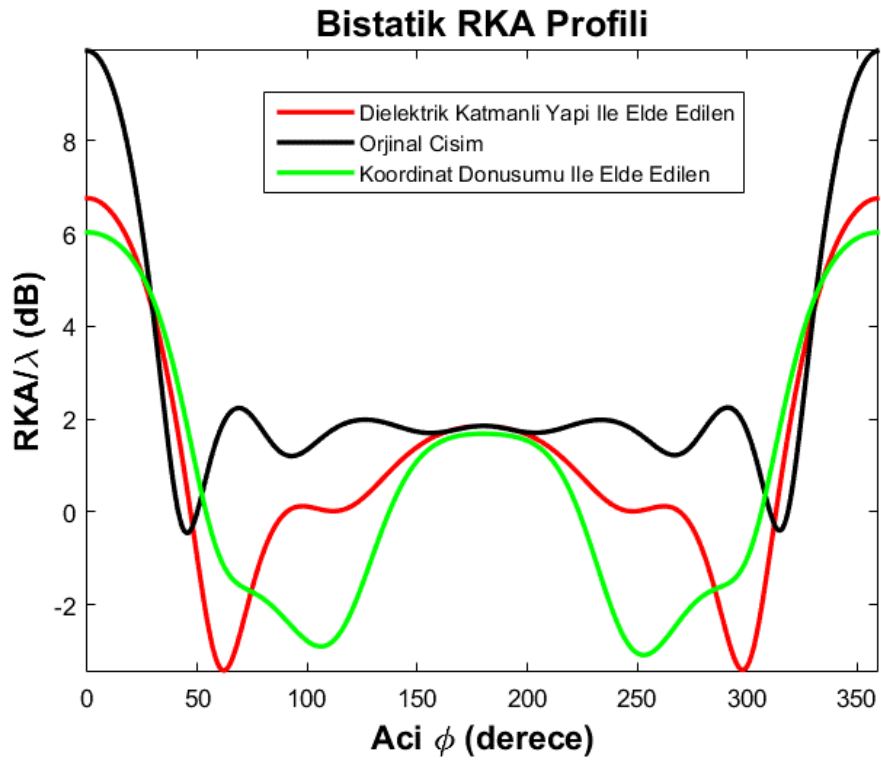
10 cm çaplı iletken çembersel kesitli silindirik cismin RKA değerinin, çapı 5 cm olan iletken çembersel kesitli silindirik cismin RKA değerine azalması için optimizasyon yapılmıştır. Şekil-4.16'da görüldüğü gibi 2 adet dielektrik katmanlı yapı kullanılarak koordinat dönüşümü ile elde edilen sonuca benzer bir sonuç elde edilmiştir. Tüm açılarda gözlemlenen RKA değeri, orijinal cismin RKA değerinin altında kalmıştır.

10 cm çapındaki iletken silindirik cismin bistatik RKA profili, kenar uzunluğu 5 cm olan bir kareye benzetilmeye çalışılmıştır. Çizelge-4.17'de bu durum için yapılan optimizasyon özetlenmektedir.

Çizelge-4.17 3 GHz'de 10 cm Çaplı İletken Çembersel Kesitli Silindirik Cisim ile 5 cm Kenar Uzunluğundaki İletken Kare Kesitli Silindirik Cisim İçin Elde Edilen Sonuçlar

Çalışma Frekansı	3 GHz
Dalga boyu	10 cm
Sonlu Eleman Boyutu	$\lambda_{min}/60$ (1.7 mm)
Katman İçinde Sonlu Eleman Boyutu	$\lambda_{min}/120$ (0.85 mm)

İletken Cismin Şekli	Çembersel Kesitli Silindir
Yeni İletken Cismin Şekli	Kare Kesitli Silindir
Orijinal İletken Cismin Çapı	10 cm
Yeni İletken Cismin Kenar Uzunluğu	5 cm
Popülasyon Sayısı	100
Gen Sayısı	6
Parça Değişimi Olasılığı	%90
Mutasyon Olasılığı	%0.1
İterasyon Sayısı	30
Dielektrik Katman Sayısı	4
Dielektrik Katman Kalınlıkları (içten dışa)	3.4 mm, 3.4 mm, 1.7 mm, 1.7 mm
Katmanların Dielektrik Katsayıları (içten dışa)	9, 5.2, 9.3, 1.5
Katmanların Kayıp Tanjantları (içten dışa)	0.02, 0.08, 0.04, 0.04
Dalganın Geliş Açısı	$\varphi = 180^\circ$ (sol taraftan)



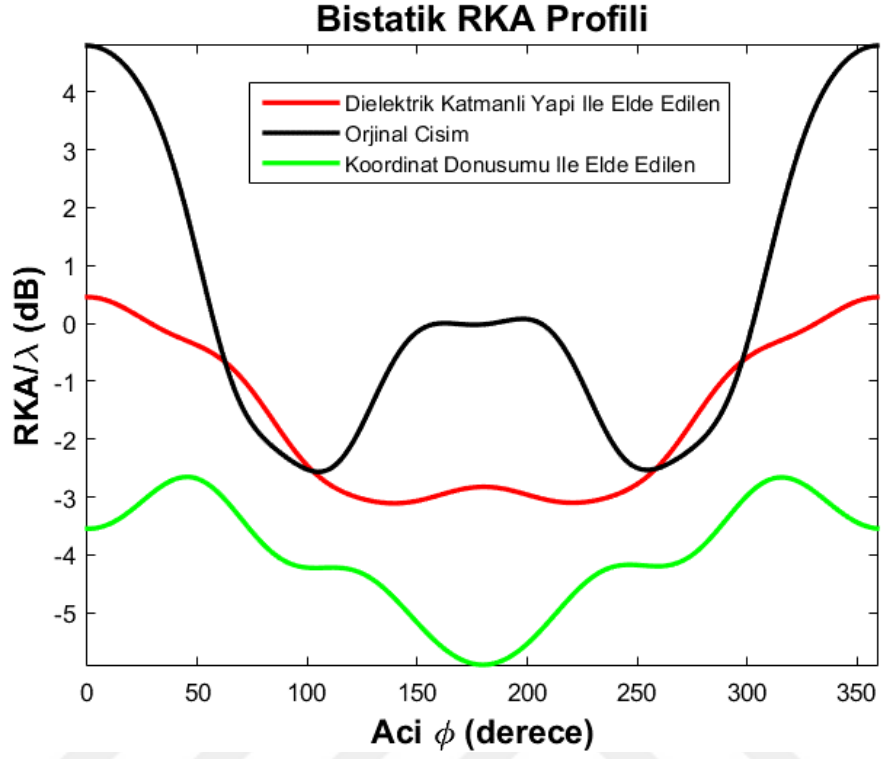
Şekil-4.17 3 GHz'de 10 cm Çaplı İletken Çembersel Kesitli Silindirik Cisim İçin Yapılan Benzetim Sonucu

Yapılan optimizasyon sonucunda 4 adet dielektrik katmanlı yapı kullanılarak koordinat dönüşümü ile elde edilen sonuca benzer bir sonuç elde edilmiştir. Elde edilen katmanlı yapı ile, 10 cm çapındaki iletken silindirik bir cisim, bistatik bir anten tarafından 5 cm kenar uzunluğundaki bir kare gibi algılanmaktadır.

40 cm kenar uzunluğuna sahip kare kesitli silindirik iletken bir cismin bistatik RKA profili, kenar uzunluğu 10 cm olan bir kare kesitli silindirik cisme benzetilmeye çalışılmıştır. Çizelge-4.18’de bu durum için yapılan optimizasyon özetlenmektedir.

Çizelge-4.18 3 GHz’te 40 cm Çaplı İletken Kare Kesitli Silindirik Cisim ile 10 cm Kenar Uzunluğundaki İletken Kare Kesitli Silindirik Cisim İçin Elde Edilen Sonuçlar

Çalışma Frekansı	3 GHz
Dalga boyu	10 cm
Sonlu Eleman Boyutu	$\lambda_{min}/60$ (1.7 mm)
Katman İçinde Sonlu Eleman Boyutu	$\lambda_{min}/120$ (0.85 mm)
İletken Cismin Şekli	Kare Kesitli Silindir
Yeni İletken Cismin Şekli	Kare Kesitli Silindir
Orijinal İletken Cismin Çapı	40 cm
Yeni İletken Cismin Kenar Uzunluğu	10 cm
Popülasyon Sayısı	50
Gen Sayısı	6
Parça Değişimi Olasılığı	%90
Mutasyon Olasılığı	%0.1
İterasyon Sayısı	20
Dielektrik Katman Sayısı	4
Dielektrik Katman Kalınlıkları (içten dışa)	5.1 mm, 3.4 mm, 3.4 mm
Katmanların Dielektrik Katsayıları (içten dışa)	8.9, 5.2, 1.2
Katmanların Kayıp Tanjantları (içten dışa)	0.07, 0.09, 0.07
Dalganın Geliş Açısı	$\varphi = 180^\circ$ (sol taraftan)



Şekil-4.18 3 GHz'de 40 cm Kenar Uzunluğuna Sahip İletken Kare Kesitli Silindirik Cisim İçin Yapılan Benzetim Sonucu

Yapılan optimizasyon sonucunda 3 adet dielektrik katmanlı yapı kullanılarak koordinat dönüşümü ile elde edilen sonuca yaklaşan bir sonuç elde edilmiştir. Elde edilen katmanlı yapı ile, 50 cm kenar uzunluğundaki iletken kare kesitli silindirik bir cisim, bistatik bir anten tarafından 10 cm kenar uzunluğundaki kare kesitli silindirik bir cisim gibi algılanabilmektedir.

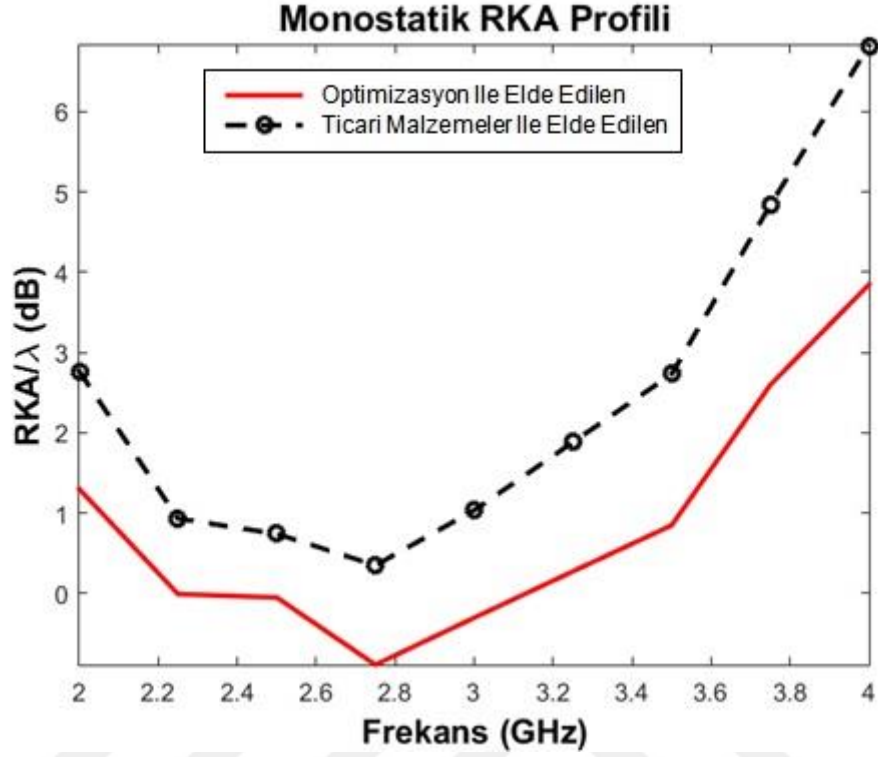
5. GERÇEK MALZEMELER İLE YAPILAN BENZETİM SONUÇLARI

Bölüm 4’de MATLAB programları ile geliştirilen benzetim sonuçları sunulmaktadır. Bu bölümde bulunan malzemeler laboratuvar ortamında birebir bulunmamaktadır. Bu yüzden piyasa araştırılması yapıp, optimizasyon sonucu elde edilen malzeme özelliklerine en yakınları bulunmuştur. Bu bölümde, ticari malzemeler ile yapılan benzetim sonuçları sunulmaktadır.

Çizelge-5.1’de çapı 20 cm olan iletken çembersel kesitli silindirik cisim için yapılan benzetim çalışmalarının detayları özetlenmektedir.

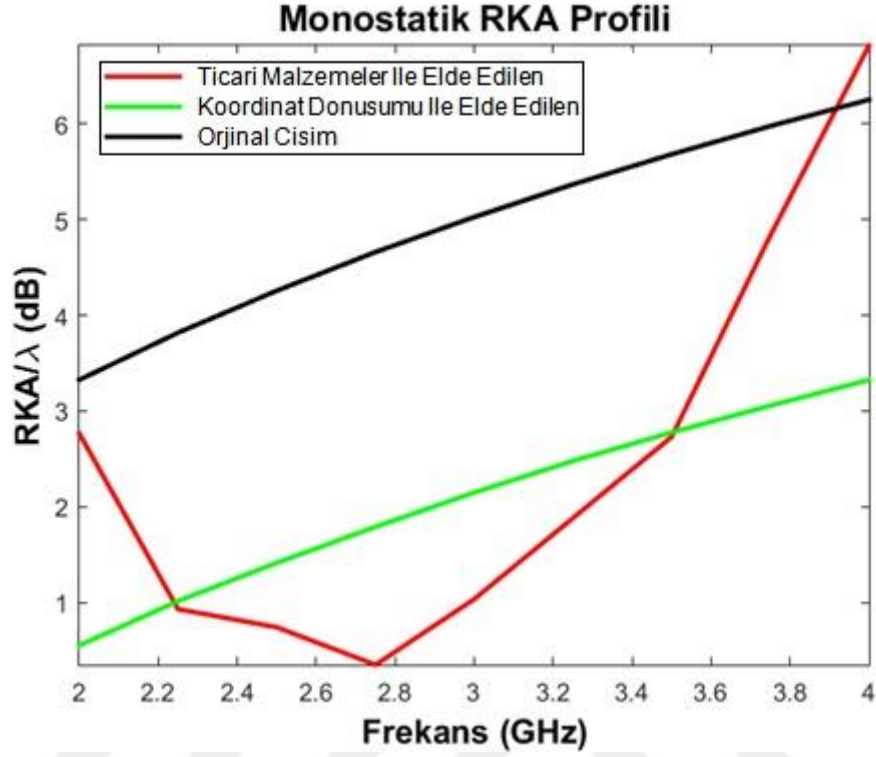
Çizelge-5.1 2-4 GHz Bandında Çapı 20 cm Olan İletken Çembersel Kesitli Silindirik Cisim İçin Elde Edilen Sonuçlar

Frekans Bandı	2-4 GHz
Frekans Örnekleme Sayısı	9 (250 MHz aralıklı)
Dalga boyu	7.5 cm (4 GHz’te)
Sonlu Eleman Boyutu	$\lambda_{min}/40$ (1.875 mm)
İletken Cismin Şekli	Çembersel Kesitli Silindir
Orijinal İletken Cismin Çapı	20 cm
Yeni İletken Cismin Çapı	10 cm
Dielektrik Katman Sayısı	3
Dielektrik Katman Kalınlıkları (içten dışa)	1 cm, 1 cm, 1 cm
Katmanların Dielektrik Katsayıları (içten dışa)	1.34, 2.04, 6.65
Katmanların Kayıp Tanjantları (içten dışa)	0.048, 0.0123, 0.0148
Ticari Katmanların Katsayıları (içten dışa)	2, 2, 6.15
Ticari Katmanların Kayıp Tanjantları (içten dışa)	0.0021, 0.0021, 0.0027
Malzemenin Bulunduğu Firma	Rogers [15] [16]
Kullanılan Malzemeler (içten dışa)	RT5880LZ, RT6006
Dalganın Geliş Açısı	$\varphi = 180^\circ$ (sol taraftan)



Şekil-5.1 2-4 GHz Bandında Çapı 20 cm Olan İletken Çembersel Kesitli Silindirik Cisim İçin Gerçek Malzeme ve Optimizasyon Sonucu Elde Edilen Malzeme ile Yapılan Benzetim Sonucu

Şekil-5.1'de çapı 20 cm olan iletken çembersel kesitli silindirik cisim için gerçek malzemeler ile yapılan ve optimizasyon sonucu elde edilen malzemeler ile yapılan benzetim sonuçları gösterilmektedir. Ticari malzemeler ile yapılan benzetim sonucunun 2-4 GHz bandı boyunca, optimizasyon sonucu elde edilen malzemeler ile yapılan benzetimden 1.5 dB daha yüksek RKA'na sahip olduğu gözlemlenmektedir. Buna rağmen, Şekil-5.2'de de görüldüğü gibi, ticari malzemeler ile yapılan analizdeki RKA'nın orijinal cismin, 3.8 GHz'den önceki frekans bandında, RKA'ndan daha az olduğu gözlemlenmektedir.



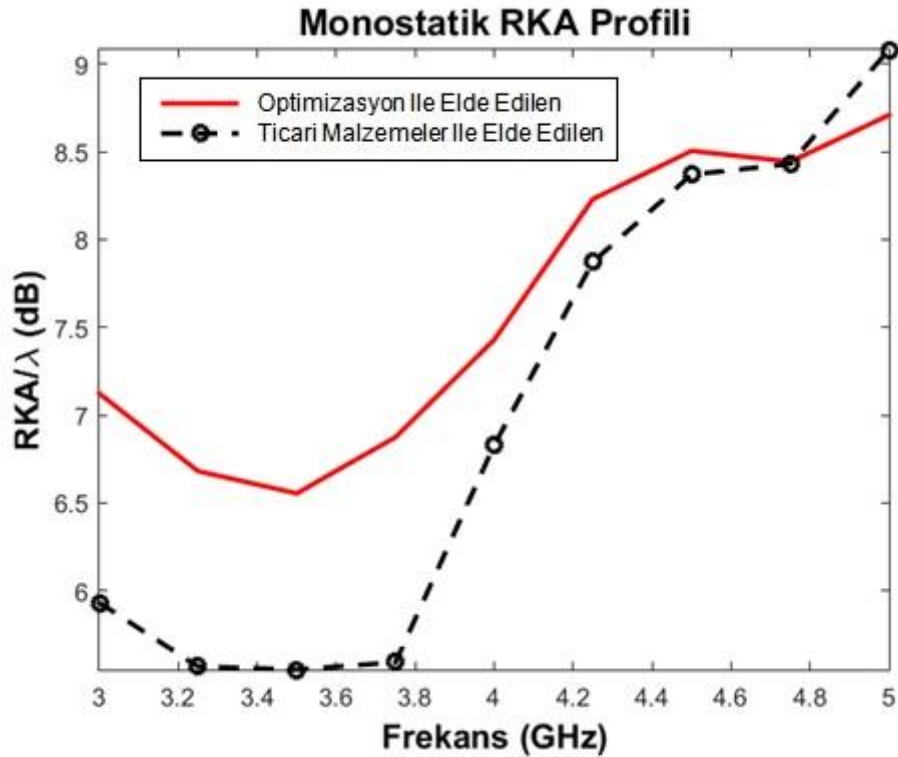
Şekil-5.2 2-4 GHz Bandında Çapı 20 cm Olan İletken Çembersel Kesitli Silindirik Cisim İçin Gerçek Malzeme İle Yapılan Benzetim Sonucu

Çizelge-5.2’de çapı 50 cm olan iletken çembersel kesitli silindirik cisim için yapılan benzetim çalışmalarının detayları özetlenmektedir.

Çizelge-5.2 3-5 GHz Bandında Çapı 50 cm Olan İletken Çembersel Kesitli Silindirik Cisim İçin Elde Edilen Sonuçlar

Frekans Bandı	3-5 GHz
Frekans Örnekleme Sayısı	9 (250 MHz aralıklı)
Dalga boyu	6 cm (5 GHz’de)
Sonlu Eleman Boyutu	$\lambda_{min}/20$ (3 mm)
İletken Cismin Şekli	Çembersel Kesitli Silindir
Orijinal İletken Cismin Çapı	50 cm
Yeni İletken Cismin Çapı	20 cm
Dielektrik Katman Sayısı	2
Dielektrik Katman Kalınlıkları (içten dışa)	1 cm, 1 cm
Katmanların Dielektrik Katsayıları (içten dışa)	2.2, 5.1

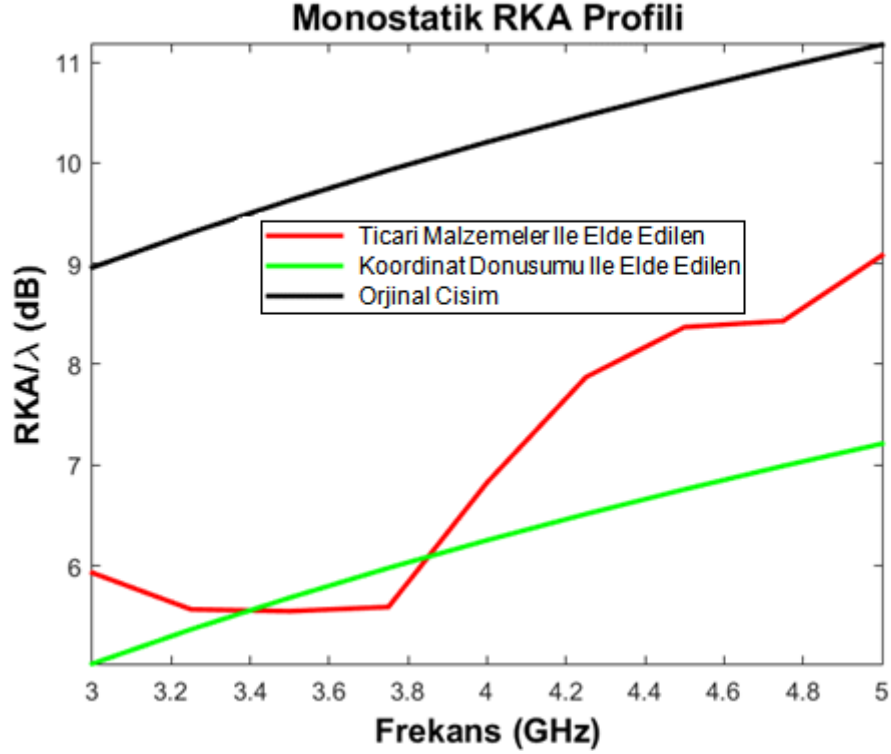
Katmanların Kayıp Tanjantları (içten dışa)	0.016, 0.029
Ticari Katmanların Dielektrik Katsayıları (içten dışa)	2.2, 6.15
Ticari Katmanların Kayıp Tanjantları (içten dışa)	0.0009, 0.0027
Malzemenin Bulunduğu Firma	Rogers [17] [16]
Kullanılan Malzemeler (içten dışa)	RT5880, RT6006
Dalga'nın Geliş Açısı	$\varphi = 180^\circ$ (sol taraftan)



Şekil-5.3 3-5 GHz Bandında Çapı 50 cm Olan İletken Çembersel Kesitli Silindirik Cisim İçin Gerçek Malzeme ve Optimizasyon Sonucu Elde Edilen Malzeme İle Yapılan Benzetim Sonucu

Şekil-5.3'de çapı 50 cm olan iletken çembersel kesitli silindirik cisim için gerçek malzemeler ile yapılan ve optimizasyon sonucu elde edilen malzemeler ile yapılan benzetim sonuçları gösterilmektedir. Ticari malzemeler ile yapılan benzetim sonucunun 3-5 GHz bandı boyunca, optimizasyon sonucu elde edilen malzemeler ile yapılan benzetimden daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmektedir. Yalnızca 4.8-5

GHz bandında gerçek malzemeler ile yapılan analizin RKA, optimizasyon ile bulunan malzemeler ile yapılan benzetimin RKA'ndan yüksek çıkmaktadır. Şekil-5.4'de görüldüğü gibi, ticari malzemeler ile yapılan analizdeki RKA'nın orijinal cismin RKA'ndan daha az olduğu gözlemlenmektedir.



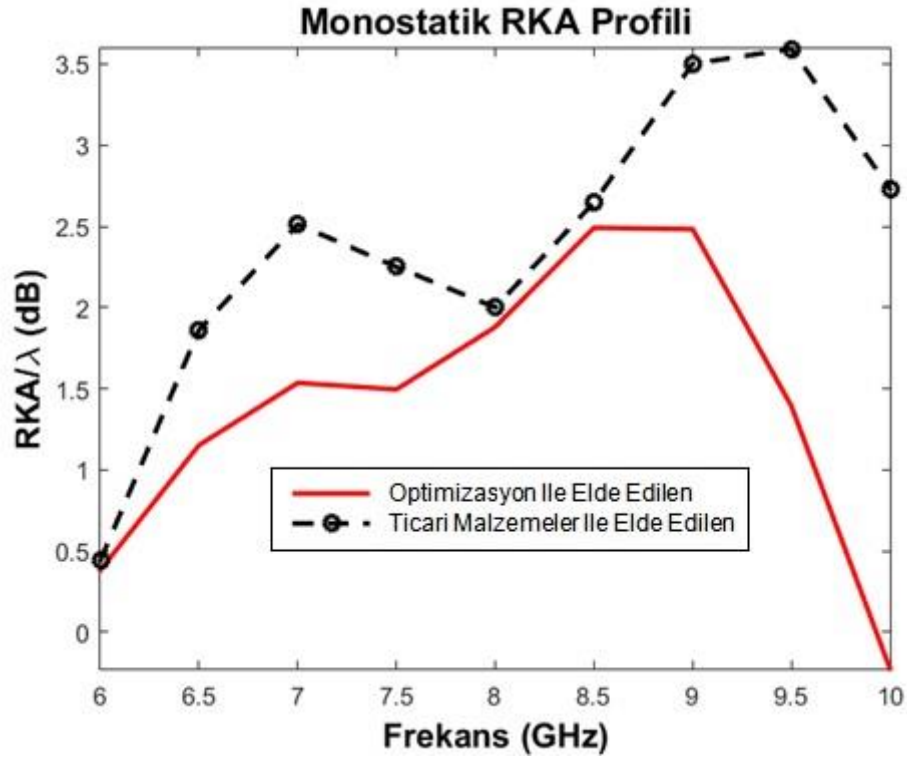
Şekil-5.4 3-5 GHz Bandında Çapı 50 cm Olan İletken Çembersel Kesitli Silindirik Cisim İçin Gerçek Malzeme İle Yapılan Benzetim Sonucu

Çizelge-5.3'de çapı 5 cm olan iletken çembersel kesitli silindirik cisim için yapılan benzetim çalışmalarının detayları özetlenmektedir.

Çizelge-5.3 6-10 GHz Bandında Çapı 5 cm Olan İletken Çembersel Kesitli Silindirik Cisim İçin Elde Edilen Sonuçlar

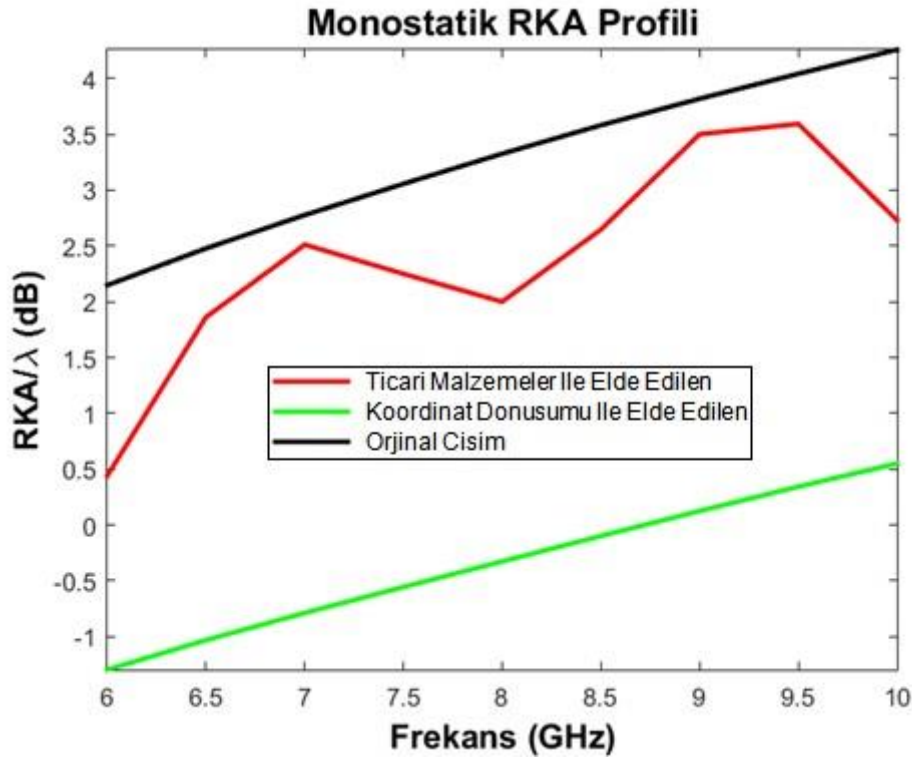
Frekans Bandı	6-10 GHz
Frekans Örnekleme Sayısı	9 (500 MHz aralıklı)
Dalga boyu	3 cm (10 GHz'de)
Sonlu Eleman Boyutu	$\lambda_{\min}/30$ (1 mm)
İletken Cismin Şekli	Çembersel Kesitli Silindir
Orijinal İletken Cismin Çapı	5 cm

Yeni İletken Cismin Çapı	2 cm
Dielektrik Katman Sayısı	3
Dielektrik Katman Kalınlıkları (içten dışa)	0.5 cm, 0.5 cm, 0.5 cm
Katmanların Dielektrik Katsayıları (içten dışa)	1.2, 6.6, 3
Katmanların Kayıp Tanjantları (içten dışa)	0.001, 0.01, 0.003
Ticari Katmanların Dielektrik Katsayıları (içten dışa)	2, 10.2, 3
Ticari Katmanların Kayıp Tanjantları (içten dışa)	0.0021, 0.0023, 0.001
Malzemenin Bulunduğu Firma	Rogers [15] [16] [18]
Kullanılan Malzemeler (içten dışa)	RT5880LZ, RT6010.2LM, RO3003
Dalganın Geliş Açısı	$\varphi = 180^\circ$ (sol taraftan)



Şekil-5.5 6-10 GHz Bandında Çapı 5 cm Olan İletken Çembersel Kesitli Silindirik Cisim İçin Gerçek Malzeme ve Optimizasyon Sonucu Elde Edilen Malzeme İle Yapılan Benzetim Sonucu

Şekil-5.5'de çapı 5 cm olan iletken çembersel kesitli silindirik cisim için gerçek malzemeler ile yapılan ve optimizasyon sonucu elde edilen malzemeler ile yapılan benzetim sonuçları gösterilmektedir. Ticari malzemeler ile yapılan benzetim sonucunun 6-10 GHz bandı boyunca, optimizasyon sonucu elde edilen malzemeler ile yapılan benzetimden daha kötü sonuçlar verdiği gözlemlenmektedir. Özellikle bant sonunda 4 dB'e varan farklar görülmektedir. Şekil-5.6'da görüldüğü gibi, ticari malzemeler ile yapılan analizdeki RKA'nın orijinal cismin RKA'ndan daha az olduğu gözlemlenmektedir.



Şekil-5.6 6-10 GHz Bandında Çapı 5 cm Olan İletken Çembersel Kesitli Silindirik Cisim İçin Gerçek Malzeme ile Yapılan Benzetim Sonucu

6. SONUÇ

Bu tezde temel olarak iki ana iş yapılmıştır. İlk olarak, koordinat dönüşümü esaslarına bağlı olarak oluşturulan dönüşüm ortamı, saçıcının şekliyle uygun olarak saçıcının çevresine yerleştirilmiştir. Bu durumda, dönüşüm ortamı olmayan duruma oranla daha düşük bir RKA elde edilmesi hedeflenmiştir. Oluşturulan dönüşüm ortamı, gelen dalganın yönüne bağlı olup, laboratuvarda üretilmesi zor düzensiz ve yön bağımlı olmaktadır. Dönüşüm ortamı, özellikle saçıcının sınırlarında gelen elektromanyetik dalganın çok hızlı hareket etmesine sebebiyet vermektedir.

Tezin ikinci ve temel kısmında ise, saçıcının çevresini, gelen dalganın yönünden bağımsız, düzenli ve yön bağımsız dielektrik katmanlar ile kaplayarak RKA azalması elde edilmesi hedeflenmiştir. Dielektrik katmanların laboratuvar ortamında üretilebilir olması, tezin gerçekleştirilmesini somutlaştırmaktadır. Burada kullanılacak olan dielektrik katmanların, kalınlıkları, dielektrik katsayıları ve kayıp tanjantları, Genetik Algoritma kullanılarak optimizasyon ile bulunmuştur.

Tezde, monostatik RKA azalması hedeflenmiştir. 1 GHz'den 10 GHz'e kadar çeşitli boyutlarda saçıcı cisimler için benzetim ve optimizasyon çalışmaları yapılmıştır. 15λ çaplara varan cisimler üzerinde yapılan benzetimlerde, 1-3 GHz, 2-4 GHz, 3-5 GHz ve 6-10 GHz gibi çeşitli ve geniş frekans bantlarında ciddi RKA azalmaları elde edilmiştir. Bölüm 4'de elde edilen monostatik RKA azalmadaki başarı, Bölüm 5'de gerçek dielektrik katmanlar kullanılarak yapılan benzetimlerde gözlemlenen sonuçlarla perçinlenmiştir. Yansımasız odaların içinde, Bölüm 5'de belirtilen boyutlarda saçıcılar ile ticari malzemeler kullanılarak analizler yapılabilecektir.

Tezin asıl amacının monostatik RKA azalması olmasına rağmen, bistatik RKA azalması için de çeşitli benzetimler yapılmıştır. Belirli frekanslarda, rastgele seçilen bir açıdan gönderilen elektromanyetik dalganın, 0'dan 360 dereceye kadar olan açılarda RKA azalması elde edilmesi için çalışmalar yapılmıştır. Bu benzetimler sonucunda, her boyut ve şekil için koordinat dönüşümü sonrasında elde edilen düşük RKA profiline benzer RKA azalmasının tüm açılarda aynı iyi performansı göstermesinin zor olduğu gözlemlenmiştir. Bistatik radar antenlerinin artık günümüzde sıkça yer aldığı düşünüldüğünde, monostatik RKA azalmasında elde edilen başarının benzerinin

bistatik RKA azalmasında da elde edilmesi gelecekteki çalışmalarda amaçlanmaktadır.



KAYNAKLAR

- [1] Gaylor K., “Radar Absorbing Materials – Mechanisms and Materials,” DSTO Materials Research Laboratory, Avustralya, 1989.
- [2] Saville, P., “Review of Radar Absorbing Materials.” Defence R&D Canada, Jan. 2005.
- [3] Contributors, HowStuffWorks.com. “How Does Stealth Technology Work?” HowStuffWorks Science, HowStuffWorks, 8 Mar. 2018, science.howstuffworks.com/question69.htm.
- [4] Sheng X., Xu Y. “Analyzing Active Cancellation Stealth.” *Microwaves & Radio Frequency*, 13 Aug. 2014, www.mwrf.com/systems/analyzing-active-cancellation-stealth.
- [5] Bouche, Daniel. *Asymptotic Methods in Electromagnetics*. Springer, 2012.
- [6] Banazılı C. “Finite Element Analysis.” *FEA Solidwork*, 1 Jan. 1970, cihanfea.blogspot.com.tr/2016/01/finite-element-analysis-efficiently.html.
- [7] “Read ‘Large-Scale Structures in Acoustics and Electromagnetics: Proceedings of a Symposium’ at NAP.edu.” National Academies Press: OpenBook, www.nap.edu/read/5019/chapter/9#140.
- [8] “Modeling an RF Anechoic Chamber Using Periodic Structures.” COMSOL Multiphysics®, www.comsol.com/blogs/modeling-rf-anechoic-chamber-using-periodic-structures/.
- [9] Pendry, J. B. “Controlling Electromagnetic Fields.” *Science*, vol. 312, no. 5781, 2006, pp. 1780–1782., doi:10.1126/science.1125907.
- [10] Ozgun O., Kuzuoglu M., “Electromagnetic Metamorphosis: Reshaping Scatterers via Conformal Anisotropic Metamaterial Coatings,” *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 49, no. 10, pp. 2386-2392, 2007.

- [11] Ozgun O., Kuzuoglu M., "Non-Maxwellian Locally-conformal PML Absorbers for Finite Element Mesh Truncation," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 55, no. 3, pp. 931-937, 2007.
- [12] Balanis, C. A. *Antenna Theory: Analysis and Design*. John Wiley & Sons, 2005.
- [13] Özgün Ö. "Lecture 10: 2-D FEM (Time-Harmonic Analysis)". 28 Apr. 2018, Ankara.
- [14] Holland J.H., Genetic Algorithms, www.econ.iastate.edu/tesfatsi/holland.GAIntro.htm.
- [15] RT/Duroid® 5880LZ Laminates, www.rogerscorp.com/acs/products/33/RT-duroid-5880LZ-Laminates.aspx.
- [16] RT/Duroid® 6006 & 6010 Laminates, www.rogerscorp.com/acs/products/36/RT-duroid-6006-6010-Laminates.aspx.
- [17] RT/Duroid® 5880 Laminates, www.rogerscorp.com/acs/products/32/RT-duroid-5880-Laminates.aspx.
- [18] RO3003™ Laminates, www.rogerscorp.com/acs/products/42/RO3003-Laminates.aspx.

ÖZGEÇMİŞ

Kimlik Bilgileri

Adı Soyadı : Canberk PAY

Doğum Yeri : Ankara

Medeni Hali : Bekar

E-posta : canberkpay91@gmail.com

Adresi : Mutlukent Mahallesi 2002. Sokak No:2/12 Çankaya/Ankara 06800

Eğitim

Lisans : İHSAN DOĞRAMACI BİLKENT ÜNİVERSİTESİ ELEKTRİK VE ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ (2010-2015)

Yabancı Dil ve Düzeyi

İngilizce - İyi

İş Deneyimi:

02.2015 – 07.2016

RFTR Elektronik Arge (RF Tasarım Mühendisi)

07.2016 – 03.2017

Havelsan Ehsim A.Ş (RF Tasarım Mühendisi)

05.2017 –

Aselsan Elektronik Sanayi A.Ş (RF Tasarım Mühendisi)

Deneyim Alanları

RF/Mikrodalga Güç Yükselteç Mimarileri

Tezden Üretilmiş Projeler ve Bütçesi

-

Tezden Üretilmiş Yayınlar

-

Tezden Üretilmiş Tebliğ ve/veya Poster Sunumu ile Katıldığı Toplantılar

-





HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS/DOKTORA TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU

HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI BAŞKANLIĞI'NA

Tarih: 15/05/2018

Tez Başlığı / Konusu: DÖNÜŞÜM ELEKTROMANYETİĞİ KAVRAMINA DAYANAN RADAR KESİT ALANI AZALTMA TEKNİKLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ

Yukarıda başlığı/konusu gösterilen tez çalışmamın a) Kapak sayfası, b) Giriş, c) Ana bölümler d) Sonuç kısımlarından oluşan toplam 85 sayfalık kısmına ilişkin, 08/05/2018 tarihinde şahsım/tez danışmanım tarafından Turnitin adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı %5 'tir.

Uygulanan filtrelemeler:

- 1- Kaynakça hariç
- 2- Alıntılar hariç/dâhil
- 3- 5 kelimedenden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Çalışması Orjinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Uygulama Esasları'nı inceledim ve bu Uygulama Esasları'nda belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Gereğini saygılarımla arz ederim.

Adı Soyadı: Canberk PAY
Öğrenci No: N14228863
Anabilim Dalı: Elektrik ve Elektronik Mühendisliği
Programı: Elektrik ve Elektronik Mühendisliği – Yüksek Lisans
Statüsü: ☒ Y.Lisans ☐ Doktora ☐ Bütünleşik Dr.

Tarih ve İmza

18.05.2018

Can Pay

DANIŞMAN ONAYI

UYGUNDUR.

Özlem Özgen

Prof. Dr. Özlem ÖZGEN

(Unvan, Ad Soyad, İmza)