

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ BİLİŞİM ENSTİTÜSÜ

**MİKRODALGA FREKANSLARINDA İNCE VE GENİŞ BANTLI
ELEKTROMAGNETİK SOĞURUCU TASARIMI İÇİN OPTİMİZASYON
YAKLAŞIMI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Kadir Orkun MISIR

İletişim Sistemleri Anabilim Dalı

Uydu Haberleşmesi ve Uzaktan Algılama Programı

HAZİRAN 2019

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ BİLİŞİM ENSTİTÜSÜ

**MİKRODALGA FREKANSLARINDA İNCE VE GENİŞ BANTLI
ELEKTROMAGNETİK SOĞURUCU TASARIMI İÇİN OPTİMİZASYON
YAKLAŞIMI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Kadir Orkun MISIR
(705091015)**

İletişim sistemleri Anabilim Dalı

Uydu Haberleşmesi ve Uzaktan Algılama Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Murat Tayfun GÜNEL

HAZİRAN 2019

İTÜ, Bilişim Enstitüsü'nün 705091015 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Kadir Orkun MISIR, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "MİKRODALGA FREKANSLARINDA İNCE VE GENİŞ BANTLI ELEKTROMAGNETİK SOĞURUCU TASARIMI İÇİN OPTİMİZASYON YAKLAŞIMI" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. M. Tayfun GÜNEL**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Sedef KENT PINAR**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Mustafa Emre AYDEMİR
İstanbul Esenyurt Üniversitesi

Teslim Tarihi : **30 Nisan 2019**
Savunma Tarihi : **13 Haziran 2019**



Aileme ve arkadaşlarıma,





ÖNSÖZ

Yaptığım tez çalışmasında, her aşamasında bana desteklerini veren başta tez danışmanım Prof. Dr. M. Tayfun Günel'e ve desteklerinden ötürü Araştırma Görevlisi Mahmud Esad Yiğit'e ayrıca yüksek lisans çalışmalarına devam etmemi sağlayan çalıştığım kurum Türk Hava Yolları Teknik AŞ.'ye sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Nisan 2019

Kadir Orkun Mısıır
(Elektrik-Elektronik Mühendisi)



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	vii
KISALTMALAR	xi
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ	xv
ŞEKİL LİSTESİ	xvii
ÖZET	xix
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı.....	3
1.2 Literatür Araştırması	4
2. MİKRODALGA SOĞURUCULAR	7
2.1 Mikrodalga Soğurucu Kullanım Alanları ve Görevleri.....	7
2.2 İletken Olan Sınır Düzlemine Dik Gelen Dalga	8
2.3 İletken Sınır Düzlemine Eğik Açıyla Gelen Dalga	10
2.3.1 Dik kutuplanma	10
2.3.2 Paralel kutuplanma	12
2.4 Dielektrik Sınır Düzlemine Dik Geliş	14
2.5 Çok Katmanlı Dielektrik Arayüze Dik Gelen Dalga.....	17
2.6 Dielektrik Arayüze Eğik Gelen Dalga.....	18
2.6.1 Dik kutuplanma	19
2.6.2 Paralel kutuplanma	20
2.7 Çok Katmanlı Mikrodalga Soğurucu Modeli	20
2.7.1 Çok katmanlı dielektrik yapının empedans modeli.....	21
2.7.2 Chew's formülü.....	22
3. GENETİK ALGORİTMA	23
3.1 Genetik Algoritmanın Temel Kavramları.....	23
3.1.1 Genetik algoritma yapı taşları	23
3.1.1.1 Gen.....	24
3.1.1.2 Kromozom.....	24
3.1.1.3 Popülasyon	24
3.1.2 Genetik algoritma akış şeması	24
3.1.3 Genetik algoritma kodlama teknikleri	25
3.1.3.1 İkili kodlama.....	25
3.1.3.2 Permütasyon kodlama.....	25
3.1.3.3 Değer kodlama.....	25
3.1.3.4 Ağaç kodlama	25
3.2 Genetik Algoritma İşlemleri	26
3.2.1 Doğal seçim (seleksiyon).....	26
3.2.1.1 Rulet seçilimi.....	26
3.2.1.2 Sıralı seçim.....	26
3.2.1.3 Turnuva seçilimi	27

3.2.2 Çaprazlama (crossover).....	27
3.2.3 Mutasyon	28
4. ÇOK KATMANLI MİKRODALGA SOĞURUCU TASARIMI	29
4.1 Sürekli Genetik Algoritma Kullanılarak Çok Katmanlı Mikrodalga Soğurucu Tasarımı.....	30
4.2 Optimizasyon Adımları	31
4.2.1 İlk popülasyon oluşturma	31
4.2.2 Paralel ve dik kutuplanmada toplam yansıma katsayısı hesabı	32
4.2.3 Uygunluk fonksiyonu hesaplanması	32
4.2.4 SGA işlemleri	33
4.2.4.1 Doğal seçim (seleksiyon)teknigi.....	33
4.2.4.2 Çaprazlama tekniği.....	33
4.2.4.3 Mutasyon tekniği.....	33
4.3 Kullanılan malzemeler	33
4.4 Matlab Arayüzü (GUI).....	35
4.5 Optimizasyon Sonuçları	37
4.5.1 Dört katmanlı mikrodalga soğurucu.....	37
4.5.1.1 Tasarım-1	37
4.5.1.2 Tasarım-2	41
4.5.1.3 Tasarım-3	43
4.5.2 Beş katmanlı mikrodalga soğurucu.....	45
4.5.2.1 Tasarım-4	45
4.5.2.2 Tasarım-5	47
4.5.3 Üç katmanlı mikrodalga soğurucu	49
4.5.3.1 Tasarım-6	49
4.5.3.2 Tasarım-7	51
4.5.4 Yedi katmanlı mikrodalga soğurucu tasarımı.....	52
4.5.4.1 Tasarım-8	52
4.5.4.2 Tasarım-9	54
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	57
KAYNAKLAR.....	61
ÖZGEÇMİŞ.....	65

KISALTMALAR

EMG	: Elektromanyetik girişim
MS	: Mikrodalga Soğurucu
RKA	: Radar Kesit Alanı
SGA	: Sürekli Genetik Algoritma
dB	: Desibel
MM	: Mili Metre
GHz	: Giga Hertz
EMI	: Electromagnetic Interference
RCS	: Radar Cross Section
CGA	: Continious Genetic Algorithm
GA	: Genetik Algoritma
EMU	: Elektromanyetik Uyumluluk
WDO	: Wind Driven Optimization
PSO	: Parçacık Sürü Optimizasyonu
ES	: Elektromanyetik Soğurucu
ESM	: Elektromanyetik Soğurucu Malzeme
LSA	: Lighting Search Algorithm
BLSA	: Binary Lighting Search Algorithm
BLSA-SA	: Binary Lighting Search Algorithm – Simulated Annealing
CFO	: Central Force Optimization
DE	: Differantial Evaluation
MLPSO	: Modifiye Lokal Parçacık Sürü Optimizasyonu
RTCA-DO	: Radio Technical Commission for Aeronautics Documents
AHR	: Ayrık Halka Rezanatörü



SEMBOLLER

c	: Işık Hızı
k_i	: i. Ortamın Dalga Sayısı
f	: Frekans
σ	: Radar Kesit Alanı
θ	: Dalganın Geliş Açısı
ϵ_0	: Havanın Elektriksel Geçirgenliği
μ_0	: Havanın Manyetik Geçirgenliği
ϵ_r	: Ortamın Bağıl Elektrik Geçirgenlik Katsayısı
μ_r	: Ortamın Bağıl Manyetik Geçirgenlik Katsayısı
L	: Katman Kalınlığı
R	: Menzil
$R_{i,i+1}$: Katmanların toplam yansıma katsayısı
$r_{i,i+1}$: Katmanlar arası yansıma katsayısı



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1 : Soğurucu malzemelerin türü ve özellikleri.	3
Çizelge 3.1 : Mutasyon teknikleri.	28
Çizelge 4.1 : Doğrulama örneği için kullanılan malzemeler ve kalınlıkları[19].	30
Çizelge 4.2 : Popülasyon oluşturulması.	31
Çizelge 4.3 : Kullanılan malzemelerin bağıl manyetik ve bağıl dielektrik geçirgenlik sabitleri çizelgesi [19, 21, 23].	34
Çizelge 4.4 : Farklı geliş açıları için girdi değerleri.....	37
Çizelge 4.5 : Tasarım-1 ve diğer tekniklerin karşılaştırılması.	40
Çizelge 4.6 : Tasarım-2 ve diğer tasarımların karşılaştırılması.	42
Çizelge 4.7 : Tasarım-3 ve diğer tasarımların değerleri.	44
Çizelge 4.8 : Dik geliş açısı için girdi değerleri.	45
Çizelge 4.9 : Tasarım-4 ve diğer tasarımın değerleri.	46
Çizelge 4.10 : Tasarım-5 ve diğer tasarımların değerleri.	48
Çizelge 4.11 : Tasarım-6 ve diğer tekniklerin dik geliş için karşılaştırması.	50
Çizelge 4.12 : Tasarım-7'nin eğik geliş için değerleri.	51
Çizelge 4.13 : Tasarım-8 ve diğer tekniklerin dik geliş için karşılaştırılması	53
Çizelge 4.14 : Tasarım-9'un eğik geliş açıları için değerleri.	55



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Elektromanyetik soğurucu yapının fonksiyonel çalışması.....	2
Şekil 2.1 : Mükemmel iletken ortama dik gelen ve yansıyan dalga.....	9
Şekil 2.2 : Mükemmel iletken sınıra Dik kutuplanmış dalganın eğik açı ile geliş ve Yansıması.....	10
Şekil 2.3 : Paralel kutuplanma elektrik ve manyetik alan gösterimi.....	12
Şekil 2.4 : Dielektrik sınıra dik açı ile gelen dalganın yansıma ve iletimi.....	14
Şekil 2.5 : Çoklu dielektrik arayüzüne normal gelen dalganın yansıması ve iletimi.....	17
Şekil 2.6 : Çok katmanlı mikrodalga soğurucu yapısı.....	21
Şekil 3.1 : Genetik algoritma akış şeması.....	24
Şekil 3.2 : Kromozomların ikili kodlanması.....	25
Şekil 3.3 : Permütasyon kodlama.....	25
Şekil 3.4 : Değer kodlama.....	25
Şekil 3.5 : Ağaç kodlama.....	26
Şekil 3.6 : Tek noktalı çaprazlama.....	27
Şekil 3.7 : Çift noktalı çaprazlama.....	27
Şekil 4.1 : Farklı kutuplanma ve geliş açısına göre frekans-yansıma grafiği [19].....	29
Şekil 4.2 : Çok katmanlı mikrodalga soğurucu tasarımı akış şeması.....	30
Şekil 4.3 : Girdi arayüzü.....	36
Şekil 4.4 : Çıktı arayüzü.....	36
Şekil 4.5 : 4 katmanlı 2-8 Ghz yansıma-frekans grafiği.....	38
Şekil 4.6 : Tasarım-1 maliyet-iterasyon grafiği.....	38
Şekil 4.7 : 4 Katmanlı 8-12 Ghz yansıma-frekans grafiği.....	41
Şekil 4.8 : 2-18 Ghz 4 katmanlı frekans yansıma grafiği.....	43
Şekil 4.9 : 2-18 Ghz 5 katmanlı yapıya eğik gelen dalganın frekans yansıma grafiği.....	45
Şekil 4.10 : 2-8 Ghz 5 katmanlı yapıya dik gelen dalganın frekans-yansıma grafiği.....	47
Şekil 4.11 : 0.85-5.4 Ghz 3 katmanlı yapının dik geliş için frekans-yansıma grafiği.....	49
Şekil 4.12 : 0.85-5.4 Ghz 3 katmanlı yapının eğik geliş için frekans-yansıma grafiği.....	51
Şekil 4.13 : 0.1-20 Ghz 7 katmanlı yapının dik geliş için frekans-yansıma grafiği.....	52
Şekil 4.14 : 0.1-20 Ghz 7 katmanlı tasarımın eğik geliş açıları için frekans-yansıma grafiği.....	54



MİKRODALGA FREKANSLARINDA İNCE VE GENİŞ BANTLI ELEKTROMAGNETİK SOĞURUCU TASARIMI İÇİN OPTİMİZASYON YAKLAŞIMI

ÖZET

Günümüzde hızla gelişen teknolojinin insanlığa sunduğu birçok yeni teknik ve buluşlar gerek askeri gerekse sivil alanda hayatı kolaylaştırmıştır. Özellikle 2. Dünya savaşının son fazında ve sonraki dönemlerde, savaş öncesi döneme göre başta savunma ve havacılık olmak üzere bilimin her dalında çeşitli ölçeklerde yeni teknik ve cihazlar bulunmuştur. Söz konusu buluşlardan mikrodalga soğurucu malzemeler bunlardan bir tanesidir. Gelişen teknoloji dünyasında analog dünyadan dijital dünyaya geçiş hız kazanarak artması yeni cihaz ve sistemlerin kapasite ve performans artışını sağlamaktadır. Performans ve kapasite artışı da doğal sonuç olarak yüksek çalışma frekansına ihtiyaç duyulduğu için elektromanyetik girişim de (EMG) artmaktadır. Bu girişimin artması cihaz ve sistemlerin çalışmasını olumsuz etkilediği için mikrodalga soğurucu yapılara gün geçtikçe artan bir talep yaratmıştır.

Mikrodalga soğurucular (MS) savunma, havacılık, tıp, kablolu-kablosuz haberleşme gibi birçok alanda EMG'yi azaltmak amacıyla kullanılmaktadır. Savunma ve havacılık dünyasında mikrodalga soğurucu kullanımının iki amacı vardır. Bu amaçlardan ilki görünmezlik, düşman tarafından tespit edilebilirliği zorlaştırmak, ikincisi sistem ve cihazların performansını etkilememesi için EMG'yi azaltmaktır. Savunma ve havacılık dünyasında aktif uzaktan algılama sistemi olan radarların hedef tespitini zorlaştırmak amacıyla çeşitli yeni nesil hava platformlarında da kullanılmaktadır. Bu platformlara havacılık dünyasından somut örnek olarak F-117 (Kabus), F-22 (Yırtıcı Kuş) ve B-2 (Hayalet) 5. nesil radara yakalanmayan savaş uçakları örnek verilebilir.

Radarin belli miktarda gönderdiği enerjinin hedefe çarpıp geri dönmesiyle çıkan sonuç eşik değerinden yüksekse hedef tespiti yapılabilmekte, eğer bu oran eşik değerinin altında ise hedef radar tarafından tespit edilememektedir. Genel radar denkleminin hedef ve radar sistemi olarak iki tür girdisi vardır. Hedefle ilgili tek girdi parametresi radar kesit alanıdır (RKA), diğer girdiler ise tamamen uzaktan algılama sisteminin yani radarın teknik kapasite ve performansına bağlıdır. Hedefin RKA'sı ne kadar küçükse ekosu da küçük olacağı için ekosunun enerjisi, gönderilen dalga enerji oranı eşik değerinin altında ise hedef tespit edilememektedir. Söz konusu bu oranı düşürmek için kullanılan tekniklerden bir tanesi de MS yapıların yeni nesil hava platformlarında kullanılmasıdır. Örnek verilen 5. nesil savaş uçaklarında uygulanan teknikte de uçağın RKA'sı azaltıldığı için ekonun enerjisi düşük değerde radar antenine geldiği için eşik değerinin altında kalarak hedef düşman radarında gözükmemektedir. Daha basit anlatımla 5. nesil savaş uçaklarının RKA'sı kendisinden binlerce kat küçük olan kuşlarla yaklaşık aynı değerdedir. Diğer teknik ise platformun şekil ve geometrisinin çeşitli hesaplamalar yapılarak değiştirilmesi ile RKA'nın düşürülmesi yapılabilmektedir. Ancak söz konusu platform hava aracı

olduğu için aerodinamik faktörler dikkate alındığında hava platformunun şekil ve geometrisinin tasarimsal olarak değiştirilmesi zor ve maliyetli olmaktadır. Böyle bir teknik yaklaşım F-117 uçağında denenmiştir. Uçağın yapısı diğer jet uçaklarına göre pek yuvarlak hatlara sahip olmaması ve parçaların birbiri ile belli açılar yapması yüzünden grafit örgülü bir yapıya sahip olması nedeniyle uçağın maksimum sürati 1 mach altında olup hız sınıflandırması olarak transonik sürate sahiptir. Sürekli uçuşa elverişliliğini sağlamak için radio technical commission for aeronautics - documents (RTCA-DO178) ve (RTCA-DO254) rehber dökümanlarına uyum sağlayan birçok ekstra yazılım ve donanımla desteklenmiştir. Bunun sonucunda uçağın operasyon, tasarım ve test maliyetlerini çok arttırmaktadır. Bu tür hava araçlarının tasarımı yapılırken diğer pek çok alanda olduğu gibi optimizasyona ihtiyaç duyulması birçok farklı mekanizma ve formülasyon üzerinden çalışan optimizasyon tekniklerini doğurmuştur.

Mikrodalga soğurucu tasarımı yapılırken optimizasyon için kullanılan performansı, algoritması, çevresel girdi verileri ve kodlaması farklı çeşitli teknikler literatürde mevcuttur. Bu tekniklerden bazıları wind driven optimization (WDO), parçacık sürü optimizasyonu (PSO), genetik algoritma (GA), differential evaluation (DE), central force optimization (CFO), binary lightning search algorithm (BLSA) gibi literatürde çeşitli optimizasyon teknikleri olup istenen amaçlara istinaden kullanılmaktadır.

Yapılan tez çalışmasında sürekli genetik algoritma (SGA) optimizasyon tekniği kullanılarak mikrodalga soğurucu tasarımlarının minimum yansıma katsayılarını ve toplam katman kalınlıklarını azaltmak amaçlanmıştır. SGA tekniğinde ortak girdiler frekans değeri, paralel ve dik kutuplanma türü, dalganın geliş açısı ve herbir katmanın kalınlık değerinden oluşmaktadır. Yapılan çok katmanlı 9 adet tasarımda gelen dalganın dik ve paralel kutuplanma için farklı frekans aralıkları, farklı geliş açıları ve farklı katman sayıları için SGA tekniği kullanılarak optimizasyon yapılmıştır. Minimum yansıma katsayısı ve katmanların toplam kalınlığının minimize edilmesi amaçlanmıştır. Literatürde verilen diğer tekniklerin sonuçları, eğik geliş açıları için minimum ve maksimum yansıma katsayıları, toplam katman kalınlığı, dik geliş açısı için minimum yansıma katsayısı ve toplam katman kalınlığı SGA için elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma yapılan diğer tüm tekniklerde her iki kutuplanma türünde de belli büyüklükten fazla geliş açısı için literatürde karşılaştırma verisi bulunmamıştır.

SGA optimizasyonunda, kromozomların genleri (her tabakanın kalınlığı) 0.1-2 mm arasında kalacak şekilde rastgele değerler ile ilk popülasyon oluşturulmuştur. Doğal seçim tekniği için sıralı seçim yapıлып en düşük maliyetlerin hayatta kalması amaçlanmıştır. Çaprazlama tekniğinde çift noktalı çaprazlama tekniği, mutasyon tekniğinde pozisyona göre mutasyon tekniği uygulanarak her iterasyonda girdileri yansıma katsayısı ve toplam katman kalınlığı olan maliyet fonksiyonu minimize etmek amaçlanmıştır. Söz konusu SGA teknikleri 4. bölümde detaylı olarak anlatılmıştır. Eğik geliş açıları için yapılan tasarımlarda belli değerden büyük geliş açısında minimum yansıma katsayılarının desibel (dB) olarak küçük olmadığı gözlemlenmiştir. Buna ek olarak her iki kutuplanma için frekans-yansıma katsayısı sonuçlarından aynı açı değerleri için yansıma katsayısı değerlerinin minimum-maksimum farklarının azaldığı gözlemlenmiştir. Tek katmanlı soğurucu tasarımı yapılmamasının nedeni, optimizasyonda malzeme çeşitliliğini arttırıp, farklı malzemelerin frekansa göre değişen elektrik ve manyetik geçirgenliklerinin değişimlerinden yararlanılmasıdır.

MATLAB programını çalıştırmak için 8. nesil i5 işlemcili 256 GB SSD, 8 GB RAM özellikleri olan dizüstü bilgisayar kullanılmıştır. SGA tekniğinde bilgisayarın donanım özellikleri yanında frekans, açılma aralığı ve bu parametrelerin arttırım aralığı, kullanılan katman sayısı, popülasyon büyüklüğü, çaprazlama, mutasyon oranı ve iterasyon sayısının arttırılması hesaplama zamanını arttırmaktadır.





OPTIMIZATION APPROACH TO THE DESIGN OF THIN AND BROADBAND ELECTROMAGNETIC ABSORBER FOR MICROWAVE FREQUENCIES

SUMMARY

Nowadays, many new techniques and inventions offered to humanity by rapidly developing technology have made life easier in both military and civilian areas. Especially in the last phase of World War II and in the following periods, new techniques and devices have been found in various scales in all branches of science, especially defense and aerospace. One of these inventions, microwave absorber materials are one of them. In the developing world of technology, the transition from analog world to digital world is gaining momentum, thus increasing the capacity and performance of new devices and systems. Electromagnetic interference (EMI) increases as performance and capacity increase naturally result in high operating frequency. As the increase of this interference has negatively affected the operation of the devices and systems, it has created an increasing demand for microwave absorber structures.

Microwave absorbers (MA) are used to reduce EMI in many areas such as defense, aerospace, medicine, wired-wireless communication. The use of microwave absorbers in the world of defense and aviation has two purposes. The first of these aims is to increase the invisibility, the difficulty of detecting by the enemy, and the second to reduce the EMI in order not to affect the performance of the systems and devices. It is also used in various new generation aerial platforms in order to make the target detection of radar which is active remote sensing system in the world of defense and aviation. For example, F-117 (Stealth), F-22 (Raptor) and B2 (Phantom) warplanes of the 5th generation are not caught by radar.

The operating principle of the radar is proportional to the target's reflected energy by sending a certain amount of energy to the target, the target can be determined if the ratio is higher than the threshold, if the ratio is below the threshold value it can not be detected. The general radar equation has two types of input as the target and radar system, the only input parameter related to the target is the radar cross-sectional area (RCS), while the other inputs depend entirely on the technical capacity and performance of the remote sensing system, namely the radar. The smaller the RCS of the target, the echo will be smaller, because the energy of the echo is below the threshold of energy. One of the techniques used to reduce this ratio is the use of MA structures in the new generation of air platforms. Since the RCS of the 5th generation combat aircraft is reduced, the energy of the echo does not appear in the enemy radar because the energy of the echo reaches with the low value to radar antenna. The other technique is to reduce the RCS by changing the shape and geometry of the platform by performing various calculations, but since the aforementioned platform is an air vehicle, it is difficult and costly to change the shape and geometry of the aerial platform when aerodynamic factors are taken into account.

Such a technical approach has been tested in the F-117 aircraft, because the structure of the aircraft has a graphite braided structure due to the fact that the parts which do not have very rounded lines compared to other jet planes have certain angles with each other. Because of this design, the maximum speed of the F-117 fighter bomber is less than 1 mach, the aircraft is classified as transonic (very close to sound barrier but not exceed sound speed further more no sonic boom) aircraft in the speed classification.

For continuous airworthiness of these type of aircraft needed some extra certification which are radio technical commission for aeronautics – documents (RTCA- DO178) and (RTCA-DO254) are supplemented by a number of additional software and hardware adapters. As a result, the operation costs of the aircraft have increased a lot. When designing such aircraft, the need for optimization, as in many other areas, has led to optimization techniques that operate over many different mechanisms and formulations. Due to the fact that the current costs are higher, other techniques are used to replace the microwave absorber material that reduce the radar footprint on large platforms such as ships. Some of these techniques include designing the ship's geometry and shape as precisely as possible, such as the French La-Fayette frigate, but on ships with more lengths, ships can escape water from the sea with water hoses along the ship's hull to escape radar detection. Firstly, when the processing costs of microwave absorbing materials used in the fifth generation combat aircraft are reduced by the developing technology, it can become more suitable for use on military platforms which include larger and much more metal than aircraft.

There are various different techniques for optimization in the literature when designing microwave absorber. Some of optimization techniques in literature are wind driven optimization (WDO), particle swarm optimization (PSO), genetic algorithm (GA), central force optimization (CFO), and binary lightning search algorithm (BLSA). They are used according to the desired purposes. Common inputs of the CGA and other optimization techniques are frequency range, type of polarization and angle of incidence.

In this thesis, it is aimed to decrease the minimum reflection coefficients and total layer thickness of the microwave absorber designs by using continuous genetic algorithm (CGA) optimization technique. In CGA technique common inputs consist of frequency range, parallel - vertical polarization type, wave's angle of incidence and thickness values of each layer. Minimum reflection coefficient and total layer thickness obtained by CGA in this thesis are compared with the results obtained by some other optimization methods given in literature.

The permutation technique for coding in the CGA optimization, the genes of the chromosomes in the first population formation (the thickness of each layers) are formed with random values in the range of 0.1-2 mm. It is intended to minimize the cost function. CGA technique is described in detail in Chapter 4. Another important point in the optimization is the double point crossing technique. In order for the crossover to work efficiently, the number of the population number should be even. When an odd number is entered, one of the individuals will always be out of crossing. The reason why single-layer design is not preferred is that it is not suitable for crossing. In addition, three, four, five and seven layered designs were made in order to benefit from materials with varying magnetic and relative dielectric constant with respect to frequency.

Computer used for running MATLAB has the 8th generation i5 processor, 256 GB SSD and 8 GB RAM. The parameters like frequency range, angle range, number of layers, size of population, number of iterations, increment of crossing and mutation rate affect performance and computation time of CGA as well as hardware specifications.

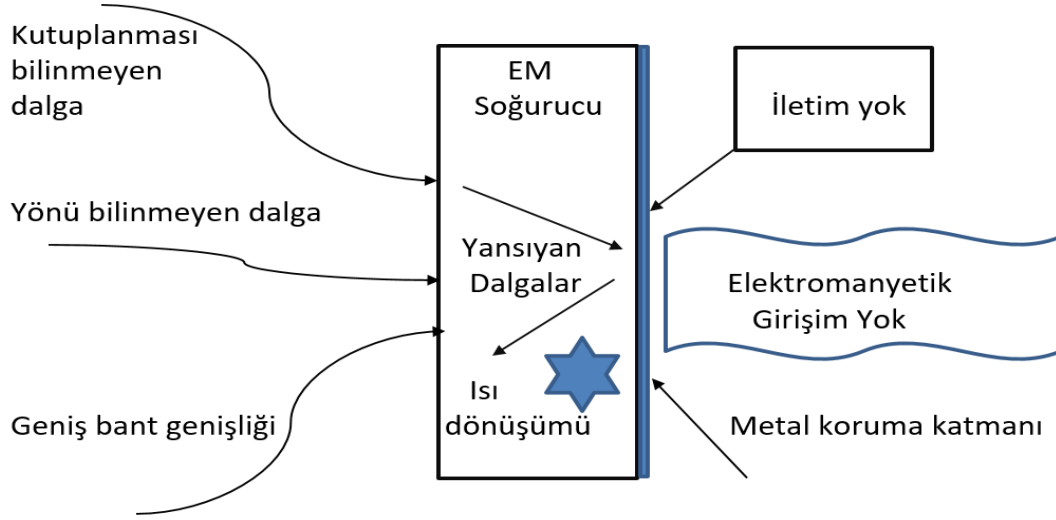


1. GİRİŞ

Hızla gelişen teknoloji dünyasında elektromanyetik dalgalar sayesinde kablosuz haberleşme, kablolu haberleşmeye göre yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu bağlamda elektromanyetik dalgaların, diğer elektromanyetik dalgalar ile oluşturduğu elektromanyetik girişim (EMG) ilk üç sıradaki çevresel kirlilik olan hava, su ve gürültü kirliliğinden sonra gelmektedir [1]. Elektromanyetik dalgalar, dalga türüne göre canlı organizmalara zarar verdikleri gibi çeşitli sistem ve cihazlara da zarar vermektedirler. Bu problemleri ortadan kaldırmanın yollarından biri de elektromanyetik soğurucu malzemelerin (ESM) kullanılmasıdır. ESM'lere, sistem ve cihazların çalışma frekanslarında artış olduğu için son yıllarda giderek artan bir talep oluşmuştur. ESM'ler doğada bulunmayan, yapay olarak elde edilen homojen yapıya sahip maddelerdir[2]. Bu malzemelerin karakteristik özelliklerinde ihtiva yapısından ziyade yapının sahip olduğu şekli, geometrisi ve boyutu önemlidir[3]. ESM yapıların, yapısal parametreleri uygun ayarlanarak ayrı ayrı dielektrik sabiti ve manyetik geçirgenliği kullanım amacına yönelik olarak ayarlanabilmektedir. Çift negatif davranış, sol el davranışı, negatif kırılma indeksi, negatif faz hızı ve geri dalga yayılımı gibi sıradışı özellikleri nedeniyle ESM'ler birçok bilimadaminin tarihte ve günümüzde ilgisini çekmişlerdir[4].

Elektromanyetik soğurucular (ES), gelen elektromanyetik dalganın enerjisini ısıya çevirerek yansıyan dalganın enerjisini büyük oranda zayıflatarak, yansıyan dalganın enerjisinde azalma meydana getirmektedir. ES malzemenin: yönü, kutuplanması ve bant genişliği belli olmayan elektromanyetik kaynaklardan gelen elektromanyetik dalgalara karşı davranışı şekil 1.1'de gösterilmiştir. Şekil 1.1'de kutuplanması bilinmeyen dalga hava olaylarından bulut, şimşek, yıldırım iken yönü bilinmeyen dalga kaynağı ise yüksek gerilim hattı, trafo, priz gibi kasti amacı olmayan elektriksel kaynaklar ve geniş bant genişliği olan dalga kaynağı ise cep telefonu, uydu anteni, radyo, televizyon gibi kaynaklardır[5]. Dielektrik arayüz malzemesi giriş direncini düzenlenmesini sağlarken ayrıca yapının havanın direnciyle uyum göstermesini sağlamaktır. Yapıya giren dalga metal koruyucu ile çevrelenmiş

dielektrik arayüz malzeme içinde ilerlerken ve yapı içinde yansırken kaybettiği gücü ısı enerjisine dönüştürmektedir[6].



Şekil 1.1 : Elektromanyetik soğurucu yapının fonksiyonel çalışması.

Elektromanyetik soğurucu içinde manyetik alanın oluşturduğu elektrik alanın aktive ettiği yüzey yükleri rezonans emilimine neden olmaktadır. Gelen dalganın elektrik ve manyetik alanın oluşturduğu harmonik dalgaların eşelenmesi ile dalgalar oluşmaktadır bunun sonucunda dönen ve paralel olmayan dalgalar yapı içinde oluşturulmaktadır. Dönen dalgalar, manyetik tepkiyi oluşturmuşken, paralel olmayan dalgalar elektrik alanı oluşturmuştur. Bu güçlü eşlenme bağlantı, elektrik ve manyetik rezonans oluşumunu aynı zaman ve aynı rezonansa neden olarak elektromanyetik alanı arttırmaktadır. Hava ile empedans uyumu sağlandığında, bu artan elektromanyetik alan rezonanstaki elektromanyetik dalganın yaklaşık olarak tamamen sönmülmesini sağlanmıştır. Özetle, gelen enerjinin tümü malzeme içinde tutularak yansıma minimuma indirilip (yaklaşık sıfır), dalganın enerjisi soğurularak mükemmel emilimi sağlayan yapı oluşturulmuştur [5,7,8]. Tarihsel süreçte, ilk mükemmel ES mikrodalga bandında Landy tarafından tezahür edilmesi metamateryallerin, elektromanyetik tayf içinde mikrodalgadan optik banda kadar geliştirilmesini amaçlayan birçok bilimsel çalışmanın yapılmasını sağlamıştır[9]. Örnek olarak Salisbury ekranı radar soğurucu maddeler için en eski buluştur. Salisbury ekranı yapı olarak dalga boyunun dörtte bir kalınlığında kayıpsız dielektrik malzeme ile dolu iletken düzlemi olan ince parlak bir ekrandan oluşmaktadır[5,10].

Dielektrik, manyetik, manyetik-dielektrik malzemeler kullanılarak tek ve çok katmanlı elektromanyetik soğurucu yapı yapılmaktadır. Dielektrik malzeme

kullanılan yapılar manyetik malzeme kullanılan yapılardan daha kalındır bunun nedeni dielektrik malzemelerin manyetik özelliklerinin olmaması, soğurucu görevi yapan mekanizmanın dielektriklerden oluşması ve elektriksel geçirgenliklerinin gerçel ve sanal kısımlarının küçük değere sahip iken manyetik malzemelerde, manyetik geçirgenliğin ve elektriksel geçirgenliğin, gerçel kısımlarının genliğinin büyük olmasından kaynaklanmaktadır. Hibrit manyetik-dielektrik malzemelerin kullanıldığı soğurucu yapılar dielektrik ve manyetik malzemenin avantajlarını birleştirdiği için verimli, ince ve sönümledikleri bant genişliği daha büyüktür. Yüksek frekans için 100 Mhz-20 Ghz aralığında dielektrik soğurucular, daha düşük frekanslar 30 Mhz-10 Ghz için manyetik soğurucular ve geniş bant elektromanyetik uyumluluk (EMU) 30 Mhz-20 Ghz frekans aralığında manyeto-dielektrik malzemeler kullanılmaktadır [11]. Bu malzemelerin özelliklerini çizelge 1.1 'de gösterilmiştir[5].

Çizelge 1.1 : Soğurucu malzemelerin türü ve özellikleri.

Malzeme Türü	Özellikler
Dielektrik	Ucuz, hafif, geniş bantlı (Yüksek frekanslar için uygun değil)
Manyetik	İnce, geniş bant, yüksek manyetik kayıplı, maliyetli (Düşük frekanslar uygun değil)
Manyeto- dielektrik	En ince, en büyük bant genişliği, ağır, maliyetli, yüksek frekans için uygun değil.

Kompozit malzeme kullanımı, amaçlanan bant genişliğinde elektromanyetik dalgaya sönümleme yaparken dezavantaj olarak malzeme minimum kalınlıkta olmamaktadır. Kalınlıktan dolayı bazı optimizasyon teknikleri genetik algoritma (GA), parçacık sürü optimizasyonu PSO gibi tekniklerle yüksek bant genişliğinde, ucuz ve minimum kalınlıkta soğurucu malzeme yapısı elde edilebilmektedir[12].

1.1 Tezin Amacı

Günümüzde savunma ve havacılık sektörünün önemli bir birleşeni olan gizlilik yani platformların görünmezliğini sağlama konusunda da birçok çalışmalar yapılmaktadır.

Bu çalışmalardan biri de çeşitli mikrodalga soğurucu malzemelerin kullanılarak platformların kaplanmasıdır. Mikrodalga soğurucular özellikle savunma sektöründe savaş araç ve gereçlerini, uçak, füze, tank gibi araçların radar kesit alanını (RKA) düşürerek düşman radar sistemleri tarafından tespit edilmesini zorlaştırmaktadır. Mikrodalga soğurucular doğada bulunmadığı için bazı teknik işlemler yardımıyla yapay olarak elde edilmektedir. Mekanizma olarak çok katmanlı mikrodalga soğurucular dik veya paralel kutuplanmış olarak gelen elektromanyetik dalgayı, en alt katmandaki mükemmel iletken (Mİ) yansıtıp yapı içinde ısı enerjisine çevirerek gelen dalgayı zayıflamaya uğratar ve çok az bir kısmını yansıtır. Bu sayede RKA küçüldüğü için hedefin tespit edilmesi zorlaşmaktadır.

Tasarım yapılırken yansıma katsayısını ve katman kalınlığını SGA yöntemi ile optimize ederken kullanılan bazı parametreler vardır. Bu parametreler çok katmanlı yapıyı oluşturan malzemelerin kendi arasında sıralanması, gelen dalganın frekansı, dalganın geliş açısı ve dalganın kutuplanmasıdır. Yapılan tasarımlar kapsamında geliş açısı dik ve eğik, kutuplanması dik veya paralel olan çok katmanlı mikrodalga soğurucu yapıya gelen dalganın yansımasını ve yapının katman kalınlığını minimize etmek amaçlanmıştır.

Mikrodalga soğurucu malzemelerle tasarım yapılırken farklı malzemelerin elektrik ve(ya) manyetik geçirgenliği frekansa göre değiştiği için yansıma katsayısını, katman kalınlığını etkilemektedir. Verimsizliğinden dolayı tek katmanlı mikrodalga soğurucu tasarım yerine çok katmanlı farklı malzemelerin oluşturduğu tasarımlarda yansıma katsayısı ve toplam katman kalınlığının SGA optimizasyon tekniği kullanılarak minimize edilmesi amaçlanmıştır.

1.2 Literatür Araştırması

Tarihte metalmalzemelerin, elektromanyetik soğurucu olarak kullanımı ilk olarak 2008 yılında Landy tarafından yapılmıştır[8]. Landy'nin yaptığı deneyde tasarlanan soğurucu malzeme %100'e yakın sönümlenme sağlamıştır. Wang tarafından 2009 yılında kutuplanma türünü dikkate almadan çeşitli geliş açıları için araştırma yapılmıştır[5]. 2011 yılında Cheng, mükemmel soğurucu için ayrık halka rezonatör (AHR) konseptini kullanmıştır. Bhattacharyya, 2013 yılında farklı boyutlardaki benzer yapıları birleştirerek 3 bantlı sönümleyici elde etmiştir[5,13]. Buna benzer olarak ortak merkezli kareler ve dairesel halkaların dizilimi Bian ve Ayop tarafından

yapılmıştır[14,15]. Efektif ortam teorisi (EOT), metamalzemenin davranışlarını araştıran ilk önemli araştırmalardan biridir[16]. Empedans eşleme prensibi, ES yapıların davranışları hakkında yapılan araştırmalardan biridir. Soğurucu malzemenin katmanları arasındaki etkileşimi dikkate almayan iletim hattı modeli, sınıra normal açı (dik açı) ile gelen elektromanyetik dalganın olduğu durumlarda işlevseldir[17]. Mikrodalga soğurucu yapı tasarımında birçok mevcut optimizasyon tekniği bulunmaktadır. Bu tekniklerden wind driven optimisation (WDO) tekniği ile yapılan tasarımlarda her iki kutuplanma türü için dik ve eğik geliş açılarında farklı frekans bantlarında $0^{\circ} - 60^{\circ}$ derece aralığında optimizasyon yapılarak yapının maksimum yansıtma katsayısını ve katman kalınlıklarını minimize etme amaçlanmıştır[18]. Differential evaluation tekniğinde paralel kutuplanma (TM modu) için çok katmanlı mikrodalga soğurucu yapının özyinemeli hesaplama yapan Chew's formülünde yapının yansıtma katsayısının elektrik alan yerine manyetik alana bağlı olduğunu belirtirken ayrıca dik geliş açısı için paralel ve dik kutuplanmada yapının aynı yansıtma katsayısını verdiği belirtilmektedir[19]. Parçacık sürü optimizasyonu(PSO) tekniğinde paralel ve dik kutuplanma için farklı frekans aralıklarında ve geliş açısında katmanlara uygun malzeme seçilerek maksimum yansıtma katsayısını minimize etmek amaçlanmıştır. PSO tekniğinde yapılan tasarımlarda her açı ve kutuplanma türü için ayrı tasarımlar yapılmıştır[20]. Binary lightning search algoritması- simulated annealing (BLSA-SA) tekniği lightning search algoritmasının (LSA) ikili tabandaki değişkenli halidir, bu teknikte farklı eğik geliş açıları için tasarım yapılmamış olup dik geliş açısı için belli frekans aralığında yansıtma katsayısını minimize etmeyi amaçlamıştır. Bu teknikte 20 bağımsız deneme yapılmış olup standart sapmanın en az beş katmalı mikro dalga soğurucu tasarımında olduğu ifade edilmiştir. Mekanizma olarak Chew's metodu yerine dik geliş açısı için optimizasyon yapıldığından, iletim hattı empedans modelini metot olarak kullanmıştır[21]. Genetik algoritma (GA) iletim hattı teoremi tekniği ile dik ve eğik geliş açısı için optimizasyon yapılırken diğer bahsedilen tekniklere göre yapılan karşılaştırmalarda bulunan sonuçların hem yansıtma katsayısı hem de soğurucu yapının toplam kalınlığı yüksek çıkması bu tekniğin verimli olmadığını göstermektedir. Dik geliş, 8-12 GHz frekans aralığında maksimum yansıtma katsayısı için en iyi sonuç 4 katmanlı tasarımda toplam 4.1933 mm kalınlığında ve maksimum yansıtma katsayısı -17.02 dB bulunmuştur[22]. Central force optimization (CFO) tekniğinde dik geliş için geniş bantlı çok katmanlı mikrodalga soğurucu tasarımlar tasarlanmıştır[23].



2. MİKRODALGA SOĞURUCULAR

Elektromanyetik tayfa bakıldığında frekans ve dalga boyuna göre UHF, VHF, X ışınları, gama ışınları gibi birçok dalga türlerinden biride mikrodalgadır. Mikrodalganın bant genişliği 300Mhz-300GHz aralığında dalga boyu ise 1mm-1m aralığındadır. Mikrodalga soğurucular sivil amaçlı kullanımlarının yanında savunma ve havacılık alanında da çok önemli kullanım alanına sahiptir. Günümüz gelişen savunma ve havacılık alanında görünmezlik teknik tabirle aktif ve pasif uzaktan algılama yöntemlerini bertaraf etmek için yansıtmayı azalttıklarından mikrodalga soğurucu yapılar askeri platformlara uygulanmaktadır. Aktif uzaktan algılama sistemi olan radarın çalışma prensibi gönderilen belli güçteki enerjinin değeri ile ekosunun enerjisini oranlayıp, radar eşik değerinin üstündeyse hedefin tespit edilmesini sağlar bu oran radar eşik değerini altındaysa hedef tespit edilemez. Genel radar denklemini denklem 2.1’de ifade edilmiştir[24,25].

$$\sigma = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \frac{|E_r|^2}{|E_i|^2} \quad \text{veya} \quad p_r = \frac{p_s}{4\pi R^2} G \sigma \quad (2.1)$$

Burada; E_i radarın gönderdiği elektrik alan, E_r hedeften yansıyan elektrik alanı, P_r yansıyan gücü, P_s gönderilen güç, G anten kazancını, R anten-hedef arası uzaklığı ve σ radar kesit alanını temsil etmektedir.

2.1 Mikrodalga Soğurucu Kullanım Alanları ve Görevleri

Frekansa göre değişen dalga boyları sebebiyle mikrodalga soğurucular tıp, fen bilimleri, kablolu-kablosuz haberleşme, savunma, havacılık gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Gelişen teknoloji ışığında sistemlerin kapasitesi arttığı için çevre ve diğer sistemlerle girişime girdiği için soğurucu malzeme kullanımı gereklilik göstermiştir. Bir malzemenin soğurucu bir özellikte olması için gelen dalgayı zayıflatması ve zayıflattığı enerjiiyi ısı enerjisine çevirmesi ya da gelen enerjiiyi direk dağıtma mekanizmasıyla çalışmaktadır. Soğurucu malzeme bunu yaparken ohmik kutuplanma ve manyetik kutuplaşma kayıplarından faydalanarak yapılmaktadır

[5,18,21]. Soğurucular ilk kullanım alanı olarak radarların performanslarını artırmak ve kamufle etmek için kullanılmıştır, daha sonraları gelişen teknolojiye paralel olarak sistemlerin ve cihazların kapasiteleri arttırıldığı için elektromanyetik tayftaki farklı frekans bantlarında da askeri ve sivil çalışma alanlarında amaca göre kullanılmıştır[5,26-28]. Savunma ve havacılık sektöründe, görünmezlik ve radar kesit alanının (RKA) azaltılması [29-32] mikrodalga soğurucular için önemli bir çalışma alanı olmuştur. Görünmezlik teknolojisinde, RKA'nın azaltımının önemli bir yer tutmasının nedeni radar denkleminde σ 'nın hedefe bağlı ve hedefin değiştirilebilen tek parametre olmasındandır. Son yıllarda hafif olması ve hava araçlarının aerodinamik unsurları da dikkate alındığında hava platformlarına kolay uygulanabilirliği sayesinde polimer içeren malzemelerin kullanılması [33] RKA'yı azaltmaktadır. Mikrodalga soğurucu malzemelerin diğer kullanım alanları mikrodalga birleşen içeren filtreler, ışınımölçer [21], termal saçıcı [34] ve yükselteçtir[35]. Haberleşme dünyası da mikrodalga soğurucu malzemeler 4G haberleşme, uydu haberleşmesi, uzak mesafe radyo haberleşmesi, yüksek hızlı kablosuz iletişim ve cep telefonları[5,36,37]. Mikrodalga soğurucu malzemelerin askeri ve sivil alandaki uygulamalarda kullanılmasındaki amaç askeri uygulamalar için tespit edilememenin yanında, sivil uygulama alanları için de sistem ve cihazların elektromanyetik girişimini azaltması başlıca görevidir.

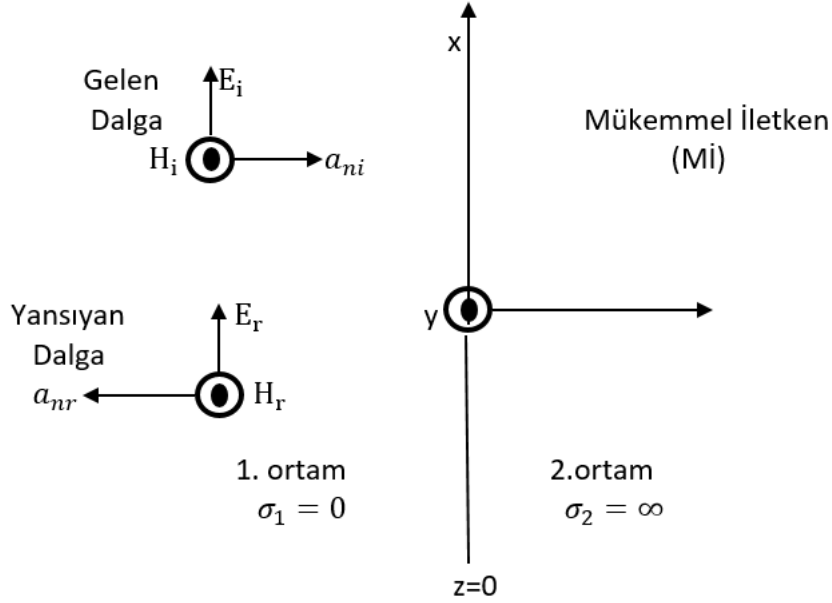
2.2 İletken Olan Sınır Düzlemine Dik Gelen Dalga

Pratikte elektromanyetik dalgalar sınırlandırılmış ortamlarda hareket ederler, bu hareketleri esnasında her bir ortamın empedansı farklı olduğu için yansımaya uğrarlar. Elektromanyetik dalgalar hareketleri boyunca elektrik alan, manyetik alan ve yayılım yönleri sürekli olarak birbirlerine diktir. Şekil 2.1 'de mükemmel iletken ortama dik olarak gelen düzlem dalga gösterilmiştir.

E_i, H_i elektrik ve manyetik alana sahip dalga kayıpsız olan 1. ortamda, +Z yönünde ilerlerken dik açıyla düzlemsel olan iletken sınıra geldiğinde yansımaya uğramaktadır. Denklem 2.2 ve 2.3' de sırasıyla elektrik alanın ve manyetik alanın fazör hali gösterilmiştir [38].

$$\vec{E}_1(z) = \vec{a}_x E_{i0} e^{-j\beta_1 z} \quad (2.2)$$

$$\vec{H}_1(z) = \vec{a}_y \frac{E_{i0}}{\eta_1} e^{-j\beta_1 z} \quad (2.3)$$



Şekil 2.1 : Mükemmel iletken ortama dik gelen ve yansıyan dalga.

Denklem 2.2 ve 2.3' de sırasıyla E_i , sınıra gelen dalganın elektrik alan vektörünü, E_{i0} gelen dalganın elektrik alanının genliğini, β_1 ise ortamdaki dalgasayısını, H_i gelen dalganın manyetik alan vektörünü son olarak η_1 ise ortamın empedansını temsil etmektedir. İkinci ortam mükemmel iletken yapıya sahip olduğu için ($z > 0$) elektrik ve manyetik alan ($E_2, H_2 = 0$ olduğundan) vektörü oluşmadığı için gelen dalga yansımaya uğrayacaktır. Sınıra gelen dalga yansımaya uğrayarak şekil 2.1' de gösterildiği gibi yayılıma devam edecektir. Yansıyan dalganın elektrik alan şiddeti denklem 2.4' te ifade edilmiştir[38].

$$\vec{E}_r(z) = \vec{a}_x E_{r0} e^{+j\beta_1 z} \quad (2.4)$$

Denklem 2.4' te E_r , yansıyan dalganın elektrik alan şiddetini, E_{r0} , yansıyan dalganın genliğini ifade etmektedir. Yansıyan dalganın manyetik alan şiddeti de denklem 2.3' de ifade edildiği gibi elektrik alan şiddeti ile bağıntılıdır. Yansıyan dalganın manyetik alan şiddetini denklem 2.5' te ifade edilmiştir[38].

$$\vec{H}_r = \vec{a}_y \frac{E_{i0}}{\eta} e^{+j\beta_1 z} \quad (2.5)$$

Denklem 2.5' te H_r , yansıyan dalganın manyetik alan şiddetini göstermektedir. 1. ortamdaki dalganın toplam elektrik alan ve manyetik alan şiddetini sırasıyla denklem 2.6 ve 2.7' de ifade edilmiştir[38].

$$\vec{E}_1(z) = -\vec{a}_x 2jE_{10} \sin\beta_1 z \quad (2.6)$$

$$\vec{H}_1(z) = \vec{a}_y 2 \frac{E_{10}}{n_1} \cos\beta_1 z \quad (2.7)$$

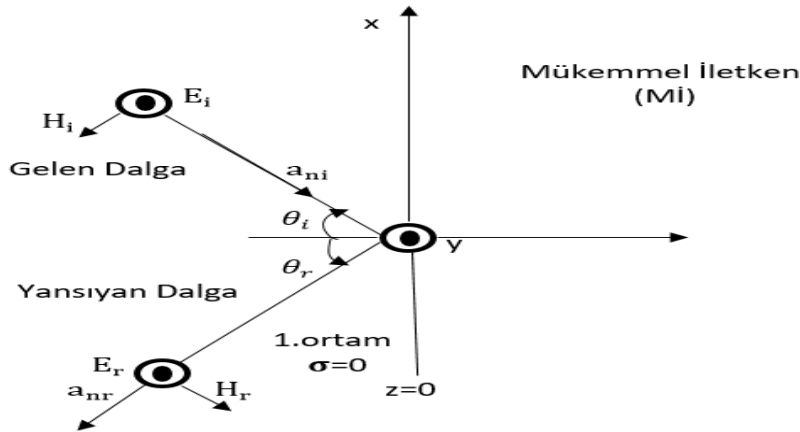
Gelen dalganın, ikinci ortama geçemediği için bu koşulda olan dalgaya duran dalga olarak ifade edilmektedir. Denklem 2.6' daki E_1 , gelen ve yansıyan dalganın oluşturmuş olduğu toplam elektrik alan şiddetini, denklem 2.7' deki H_1 , ise gelen ve yansıyan dalganın oluşturmuş olduğu toplam manyetik alan şiddetini vermektedir.

2.3 İletken Sınır Düzlemine Eğik Açıyla Gelen Dalga

Yüzeyin normaline göre belli bir açıyla düzlemsel olan iletken sınırına gelen düzlem dalganın yansımasının bir ölçütüde gelen dalganın kutuplanmasına bağlıdır. Sınıra gelen E_i elektrik alan vektörü sınıra belli bir açı ile elektrik alanın hareket düzlemine göre dik kutuplanma ve paralel kutuplanma olarak iki şekilde gelmektedir.

2.3.1 Dik kutuplanma

Elektrik alanın geliş düzlemine dik olduğu durumda dik kutuplanma diğer adıyla TM modu da denilmektedir. Şekil 2.2' de düzlem dalganın mükemmel iletken sınıra elektrik alanın dik olarak gelişi görülmektedir.



Şekil 2.2 : Mükemmel iletken sınıra dik kutuplanmış dalganın eğik açı ile gelişi ve yansıması.

Şekil 2.2’de dik kutuplanmış dalga gösterilmiştir. Dalganın yönü yani ilerleme vektörü iki adet birleşenden oluşmaktadır. Gelen ve yansıyan dalganın ilerleme vektörünün iki adet (x ve z) eksenlerinde birleşenleri vardır. Bunu formülasyon olarak sınıra eğik açı ile gelen dalga için denklem 2.8’ de ifade edilmektedir.

$$\vec{a}_i = \vec{a}_x \sin(\theta_i) + \vec{a}_z \cos(\theta_i) \quad (2.8)$$

Yukarda yazılan denklem 2.8’ de (Şekil 2.2’de $\theta_i = \theta_r$) olduğu için θ_i açısı gelen ve yansıyan dalganın sınırın normali ile yaptığı açığı temsil etmektedir.

Gelen dalganın, elektrik ve manyetik alan şiddetleri sırasıyla denklem 2.9 ve 2.10’ da gösterilmiştir.

$$\vec{E}_1(x, z) = \vec{a}_y E_{i0} e^{-j\beta_1(x\sin(\theta_i)+z\cos(\theta_i))} \quad (2.9)$$

$$\vec{H}_1(x, z) = \frac{E_{i0}}{\eta_1} (\vec{a}_x \cos(\theta_i) + \vec{a}_z \sin(\theta_i)) e^{-j\beta_1(x\sin(\theta_i)+z\cos(\theta_i))} \quad (2.10)$$

Denklem 2.9’ de E_i, E_{i0} sırasıyla elektrik alan şiddetini, elektrik alan genliğini temsil etmektedir. Diğer denklem 2.10’ da ise H_i, η_i sırasıyla manyetik alan şiddetini ve ortamın empedansını temsil etmektedir. Sınır Mİ olduğu için 2. ortamda elektrik ve manyetik alan oluşmamaktadır. Yansıyan dalganın sınır koşulları, elektrik alan ve manyetik alan şiddetleri sırasıyla denklem 2.11, 2.12 ve 2.13’de gösterilmiştir[38].

$$\vec{E}_1(x, 0) = \vec{E}_i(x, 0) + \vec{E}_r(x, 0) \quad (2.11a)$$

$$\vec{E}_1(x, 0) = \vec{a}_y (E_{i0} e^{-j\beta_1 x \sin(\theta_1)} + E_{r0} e^{-j\beta_1 x \sin(\theta_r)}) = 0 \quad (2.11b)$$

Gelen ve yansıyan dalganın yüzey normali ile yaptığı açı $\theta_i = \theta_r$ olduğu için $E_{i0} = -E_{r0}$ olduğu denklem 2.10’da gösterilmiştir. Yansıyan dalganın elektrik alan şiddetinin gelen dalga cinsinden ifadesi denklem 2.12’de gösterilmiştir[38].

$$\vec{E}_r(x, z) = -\vec{a}_y E_{i0} e^{-j\beta_1(x\sin(\theta_i)-z\cos(\theta_i))} \quad (2.12)$$

Yansıyan dalganın manyetik alan şiddetini denklem 2.13’ de gösterilmiştir[38].

$$\vec{H}_r(x, z) = \frac{E_{i0}}{\eta_1} (\vec{a}_x \cos(\theta_i) - \vec{a}_z \sin(\theta_i)) e^{-j\beta_1(x\sin(\theta_i)-z\cos(\theta_i))} \quad (2.13)$$

H_r denklem 2.13’de yansıyan dalganın manyetik alan şiddetini göstermektedir. Diğer parametreler önceki denklemlerde açıklanmıştır.

1.ortam için gelen ve yansıyan dalgaların toplamı ile elektrik ve manyetik alan şiddeti elde edilir. Denklem 2.14 ve 2.15 sırasıyla toplam elektrik alan ve manyetik alan şiddetini ifade etmektedir[38].

$$\vec{E}_1(x, z) = \vec{E}_i(x, z) + \vec{E}_r(x, z) \quad (2.14a)$$

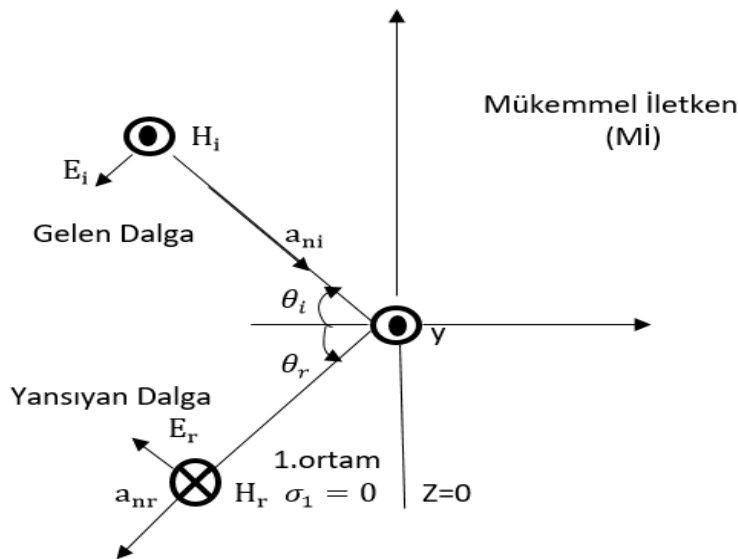
$$\vec{E}_1(x, z) = -\vec{a}_y 2jE_{i0} \sin(\beta_1 z \cos(\theta_i)) e^{-j\beta_1 x \sin(\theta_i)} \quad (2.14b)$$

$$\vec{H}_1(x, z) = -2 \frac{E_{i0}}{n_1} \left[\vec{a}_x \cos(\theta_i) \cos(\beta_1 z \cos(\theta_i)) e^{-j\beta_1 x \sin(\theta_i)} + \vec{a}_z \sin(\theta_i) \sin(\beta_1 z \cos(\theta_i)) e^{-j\beta_1 x \sin(\theta_i)} \right] \quad (2.15)$$

Denklemlerdeki E_1, H_1 sırasıyla 1.ortamın elektrik alan ve manyetik alan şiddetini vermektedir. E_{i0}, β_1 ve n_1 sırasıyla gelen dalganın elektrik alan genliğini, 1.ortamın dalga sayısını ve n_1 ise ortamın empedansını göstermektedir.

2.3.2 Paralel kutuplanma

Paralel kutuplanma diğer bir adıyla (TE modu) gelen elektrik alanının yayılım düzlemine paralel olmasıdır. Şekil 2.3’te paralel kutuplanma (TE modu) gösterilmiştir.



Şekil 2.3 : Paralel kutuplanma elektrik ve manyetik alan gösterimi.

Şekil 2.3'te gösterildiği gibi E_i, E_r gelen ve yansıyan elektrik alanların x ve z eksenlerinde birleşeni olduğu görülmektedir.

Gelen dalganın elektrik ve manyetik alan şiddetini sırasıyla denklem 2.16 ve 2.17'de gösterilmiştir[38].

$$\vec{E}_i(x, z) = E_{i0}(a_x \cos(\theta_i) - a_z \sin(\theta_i))e^{-j\beta_1(x\sin(\theta_i)+z\cos(\theta_i))} \quad (2.16)$$

$$\vec{H}_i(x, z) = \vec{a}_y \frac{E_{i0}}{\eta_1} e^{-j\beta_1(x\sin(\theta_i)+z\cos(\theta_i))} \quad (2.17)$$

Yansıyan dalga için elektrik alan ve manyetik alan fazörleri sırasıyla denklem 2.18 ve 2.19' de gösterilmiştir[38].

$$\vec{E}_r(x, z) = E_{r0}(a_x \cos(\theta_r) + a_z \sin(\theta_r))e^{-j\beta_1(x\sin(\theta_r)-z\cos(\theta_r))} \quad (2.18)$$

$$\vec{H}_r(x, z) = -\vec{a}_y \frac{E_{r0}}{\eta_1} e^{-j\beta_1(x\sin(\theta_r)-z\cos(\theta_r))} \quad (2.19)$$

Denklem 2.16 ve 2.18'deki parametreler sırasıyla denklem 2.17 ve 2.19' da da kullanılmıştır. Sınırdaki $M\vec{I}$ olduğu için $E_{ix}(x, 0) + E_{rx}(x, 0) = 0$ dir. 1. ortam için toplam elektrik ve manyetik alanı denklem 2.20 ve 2.21'de sırasıyla ifade edilmiştir [38].

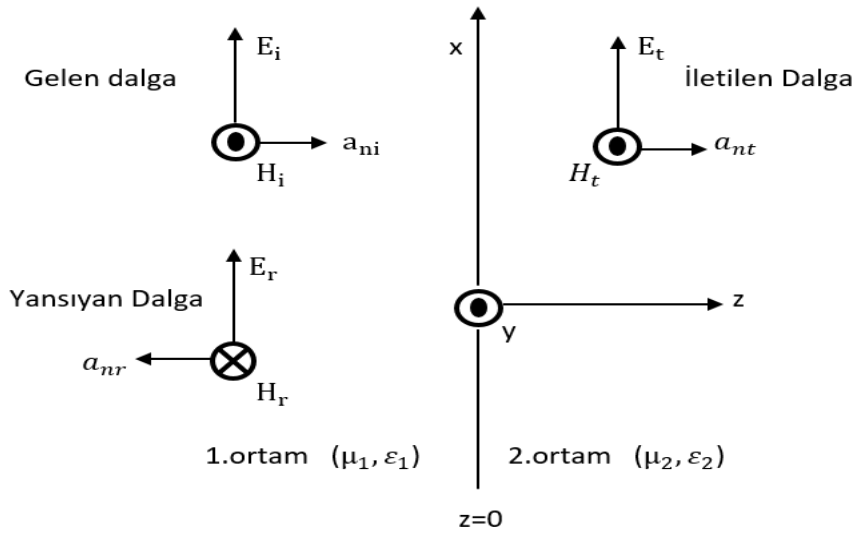
$$\vec{E}_1(x, z) = -2E_{i0}[\vec{a}_x] \cos(\theta_i) \sin(\beta_1 z \cos(\theta_i)) + \vec{a}_z \sin(\theta_i) \cos(\beta_1 z \cos(\theta_i)) e^{-j\beta_1 x \sin(\theta_i)} \quad (2.20)$$

$$\vec{H}_1(x, z) = \vec{a}_y 2 \frac{E_{i0}}{\eta_1} \cos(\beta_1 z \cos(\theta_i)) e^{-j\beta_1 x \sin(\theta_i)} \quad (2.21)$$

Denklem 2.20 ve 2.21'deki parametreler E_1, H_1 sırasıyla 1. Ortamdaki toplam elektrik ve manyetik alanı, E_{i0}, η_1, β_1 ve θ_i sırasıyla gelen dalganın elektrik alan genliğini, 1. ortamın empedansı, 1. Ortamın dalga sayısı ve gelen dalganın sınırın normaline ile yaptığı açıdır.

2.4 Dielektrik Sınır Düzlemine Dik Geliş

Bir dielektrik ortamdan, farklı elektriksel ve manyetik geçirgenliği olan dielektrik ortama sınıra dik gelen elektromanyetik dalga diğer dielektrik ortam olan 2.ortamla empedans uyumsuzluğu olduğu için gelen dalga, iletme ve yansımaya uğrayarak iki farklı dalgaya ayrılmaktadır. 2.ortama iletilen dalga vasıtasıyla bir elektromanyetik enerji transferi yapılmaktadır. +z yönünde ilerleyen bir düzlem dalganın iletim ve yansımaları şekil 2.4'te gösterilmiştir.



Şekil 2.4 : Dielektrik sınıra dik açı ile gelen dalganın yansıma ve iletimi.

Gelen dalga için elektrik alan ve manyetik alan fazörlerini denklem 2.22 ve 2.23' de ifade edilmiştir[38].

$$\vec{E}_1(z) = \vec{a}_x E_{i0} e^{-j\beta_1 z} \quad (2.22)$$

$$\vec{H}_1(z) = \vec{a}_y \frac{E_{i0}}{\eta} e^{-j\beta_1 z} \quad (2.23)$$

Yansıyan dalga için elektrik ve manyetik alan fazörlerini denklem 2.24 ve 2.25'te sırasıyla ifade edilmiştir[38].

$$\vec{E}_r(z) = \vec{a}_x E_{r0} e^{+j\beta_1 z} \quad (2.24)$$

$$\vec{H}_r(z) = -\vec{a}_y \frac{E_{r0}}{\eta_1} e^{j\beta_1 z} \quad (2.25)$$

İletilen dalganın elektrik ve manyetik alan fazörü denklem 2.26 ve 2.27' de ifade edilmiştir[38].

$$\vec{E}_t(z) = \vec{a}_x E_{t0} e^{-j\beta_2 z} \quad (2.26)$$

$$\vec{H}_t(z) = \vec{a}_y \frac{E_{t0}}{\eta_2} e^{-j\beta_2 z} \quad (2.27)$$

Denklem 2.24, 2.25, 2.26 ve 2.27' daki parametreler E_{r0}, E_{t0} sırasıyla yansıyan dalganın elektrik alan genliğini, iletilen dalganın elektrik alan genliğini ifade etmektedir. Denklem 2.27'deki η_2 ise 2. ortamın empedansını ifade etmektedir. Elektrik ve manyetik alan sınır koşullarını kullanarak E_r, E_t katsayılarını bulmak için $z=0$ ' da denklem 2.28 ve 2.29' da sırasıyla elektrik ve manyetik alan sınır denklemleri ifade edilmiştir[38].

$$\vec{E}_i(0) + \vec{E}_r(0) = \vec{E}_t(0) \quad (2.28)$$

$$\vec{H}_i(0) + \vec{H}_r(0) = \vec{H}_t(0) \quad \text{veya} \quad \frac{1}{\eta_1} (E_{i0} - E_{r0}) = \frac{E_{r0}}{\eta_2} \quad (2.29)$$

Denklem 2.28'i η_1, η_2 ortamların empedans değerleri üstünden denklem 2.30 ve 2.31' de sırasıyla yansıma E_{r0} ve iletilen elektrik alanların E_{t0} ifade edilmiştir.

$$E_{r0} = \frac{\eta_2 - \eta_1}{\eta_2 + \eta_1} E_{i0} \quad (2.30)$$

$$E_{t0} = \frac{2\eta_2}{\eta_2 + \eta_1} E_{i0} \quad (2.31)$$

Yansıma ve iletim katsayısını gelen dalgaya göre oranlandığında yansıma ve iletim katsayısı bulunmaktadır. Yansıma ve iletim katsayısını sırasıyla denklem 2.32 ve 2.33'de ifade edilmiştir[38].

$$\Gamma = \frac{E_{r0}}{E_{i0}} = \frac{\eta_2 - \eta_1}{\eta_2 + \eta_1} \quad (2.32)$$

$$T = \frac{E_{r0}}{E_{i0}} = \frac{2\eta_2}{\eta_2 + \eta_1} \quad (2.33)$$

Denklem 2.32’de yansıma katsayısı eğer $\eta_2 < \eta_1$ koşulunda ise yansıma katsayısı negatif çıkmaktadır, iletim katsayısı ise her daim pozitif elde edilmektedir. Yansıma ve iletim katsayısı arasındaki bağıntı denklem 2.34’de ifade edilmiştir[38].

$$1 + \Gamma = T \quad (2.34)$$

Şekil 2.4’ teki ikinci ortam Mİ ise $n_2=0$ ise denklem 2.32’deki $\Gamma = -1$ ve denklem 2.33’deki $T = 0$ olduğu için gelen dalganın hepsi yansımaya uğrayacak olup, duran dalga 1 numaralı ortamda olacaktır. Eğer ikinci ortamda Mİ yok ise kısmi yansımalar meydana gelmiş olacaktır. Bu olaya bağlı olarak 1. ortamdaki toplam elektrik alanı denklem 2.35’te ifade edilmiştir[38].

$$\vec{E}_1(z) = \vec{E}_i(z) + \vec{E}_r(z) = \vec{a}_x E_{i0} (e^{-j\beta_1 z} + \Gamma e^{j\beta_1 z}) \quad (2.35a)$$

$$= \vec{a}_x E_{i0} [(1 + \Gamma)e^{-j\beta_1 z} + \Gamma(e^{j\beta_1 z} - e^{-j\beta_1 z})] \quad (2.35b)$$

$$= \vec{a}_x E_{i0} [(1 + \Gamma)e^{-j\beta_1 z} + \Gamma(2J \sin(\beta_1 z))] \quad (2.35c)$$

Denklem 2.35’ü, denklem 2.34 bağıntısını kullanarak düzenlendiğinde 1. ortamdaki elektrik alanı denklem 2.36’ daki gibi ifade edilmiştir[38].

$$\vec{E}_1(z) = \vec{a}_x E_{i0} [Te^{-j\beta_1 z} + \Gamma(2J \sin(\beta_1 z))] \quad (2.36)$$

Denklem 2.36’da birinci ortamdaki elektrik alan iki birleşenden oluşmaktadır: iletilen dalga, genliği $Te^{-j\beta_1 z}$ olan ve duran dalga, genliği $2\Gamma e_{i0}$ gösterilmiştir. Elektrik alan şiddetinin maksimumu ile minimumu arasındaki oran duran dalga oranını (DDO) vermektedir. Denklem 2.37’de bu oran ifade edilmiştir[38].

$$S = \frac{|E|_{\max}}{|E|_{\min}} = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad (2.37)$$

Yansımayı, DDO olarak denklem 2.38’de ifade edilmiştir[38].

$$|\Gamma| = \frac{S - 1}{S + 1} \quad (2.38)$$

Denklem 2.38’de Γ ’nin değeri (-1)’den (+1) arasında değerler alırken, S’nin yani DDO (+1)’den ∞ kadar değer almaktadır. 1. ortamın manyetik alan şiddetini gelen ve

yansıyan olarak denklem 2.23 ve 2.25'i birleştirilip denklem 2.39'de ifade edilmiştir[38].

$$\vec{H}_1(z) = \vec{a}_y \frac{E_{i0}}{\eta_1} (e^{-j\beta_1 z} - \Gamma e^{j\beta_1 z}) \quad (2.39a)$$

$$= \vec{a}_y \frac{E_{i0}}{\eta_1} e^{-j\beta_1 z} (1 - \Gamma e^{j\beta_1 z}) \quad (2.39b)$$

2. ortam için elektrik alan şiddetini +z yönünde ilerleyen dalga için denklem 2.26 ve 2.33 kullanılarak denklem 2.40'da ifade edilmiştir[38].

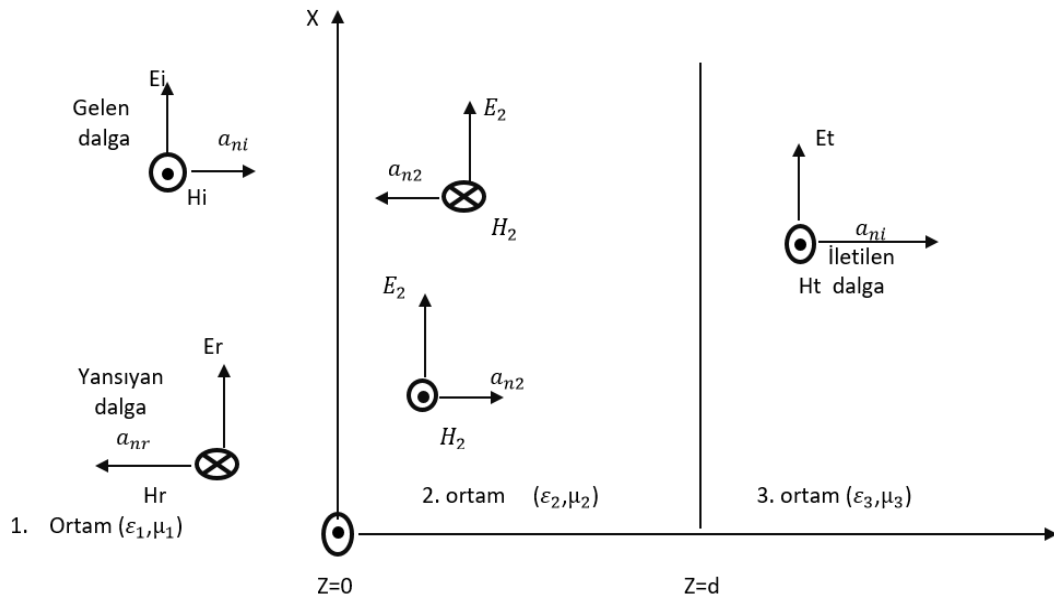
$$\vec{E}_t(z) = \vec{a}_x T E_{i0} e^{-j\beta_2 z} \quad (2.40)$$

Denklem 2.27 ve 2.33'ü kullanılarak iletilen dalganın manyetik alanını denklem 2.41'de ifade edilmiştir[38].

$$\vec{H}_1(z) = \vec{a}_y \frac{T}{\eta_2} E_{i0} e^{-j\beta_2 z} \quad (2.41)$$

2.5 Çok Katmanlı Dielektrik Arayüze Dik Gelen Dalga

Bazı durumlarda, dalga çok katmanlı dielektrik ortama farklı temel parametreler ile gelebilmektedir. Şekil 2.5'te 1. Ortamda bulunan +z yönünde ilerleyen düzgün düzlem dalganın çok katmanlı dielektrik arayüzüne normal gelişi gösterilmiştir.



Şekil 2.5 : Çoklu dielektrik arayüzüne normal gelen dalganın yansıması ve iletimi.

Şekil 2.5'te gösterildiği gibi 3 katmanlı dielektrik malzeme yapısına 1. ortamda +z yönünde paralel (TM modunda) kutuplanmış düzgün düzlem dalga $z=0$ noktasında 2. ortam ile oluşturduğu sınıra dik olarak gelmektedir. 2. ortamın, kalınlığı ve 3.ortam ile $z=d$ 'de yaptığı sınır sonsuz kabul edilerek yansımanın $z=0$ ve $z=d$ noktasında olmuştur. 1. ortamın toplam elektrik alan şiddeti, gelen elektrik alan ile yansıyan elektrik alan şiddetinin toplamına eşittir. Denklem 2.42'de 1. ortamın toplam elektrik alanını gösterilmiştir[38].

$$\vec{E}_1 = \vec{a}_x (E_{i0} e^{-j\beta_1 z} + E_{r0} e^{j\beta_1 z}) \quad (2.42)$$

1. ortam için denklem 2.42'de bulunan elektrik alan şiddetini kullanarak, manyetik alan şiddetini denklem 2.43'de ifade edilmiştir[38].

$$\vec{H}_1 = \vec{a}_y \frac{1}{\eta_1} (E_{i0} e^{-j\beta_1 z} - E_{r0} e^{j\beta_1 z}) \quad (2.43)$$

2. ortamda $z=0$ ve $z=d$ 'de iki kere yansıma meydana gelmesi, ileri geri dalga türlerini meydana getirmektedir. Denklem 2.44'te elektrik alan şiddetini, denklem 2.45'te ise 2. ortamın manyetik alan şiddeti ifade edilmiştir[38].

$$\vec{E}_2 = \vec{a}_x (E_2^+ e^{-j\beta_2 z} + E_2^- e^{j\beta_2 z}) \quad (2.44)$$

$$\vec{H}_2 = \vec{a}_y \frac{1}{\eta_2} (E_2^+ e^{-j\beta_2 z} - E_2^- e^{j\beta_2 z}) \quad (2.45)$$

3. ortamda ise sadece iletilen dalga olduğu için elektrik alan şiddetini denklem 2.46'da manyetik alan şiddetini ise denklem 2.47'de gösterilmiştir[38].

$$\vec{E}_3 = \vec{a}_x E_3^+ e^{-j\beta_3 z} \quad (2.46)$$

$$\vec{H}_3 = \vec{a}_y \frac{E_3^+}{\eta_3} e^{-j\beta_3 z} \quad (2.47)$$

2.6 Dielektrik Arayüze Eğik Gelen Dalga

İki dielektrik malzemenin oluşturduğu 1.ortamda (ϵ_1, μ_1) , 2.ortamda (ϵ_2, μ_2) değerlerine sahip olan farklı malzemeler için sınıra herhangi bir θ_i açısıyla gelen

dalganın iletim ve yansıması elektrik alanın kutuplanmasına göre ifadesi değişmektedir.

2.6.1 Dik kutuplanma

Dielektrik sınıra dik kutuplanmış dalga için dalganın bir kısmı yansırken, bir kısmı ise 2. Ortama iletilmektedir. 1.ortamda gelen ve yansıyan dalga bulunmaktadır. 1. Ortamdaki gelen dalganın elektrik alan şiddetini denklem 2.48’de ve manyetik alan şiddetini denklem 2.49’de ifade edilmiştir[38].

$$\vec{E}_1(x, z) = \vec{a}_y E_{i0} e^{-j\beta_1(x\sin\theta_i + z\cos\theta_i)} \quad (2.48)$$

$$\vec{H}_1(x, z) = \frac{E_{i0}}{\eta_1} (-\vec{a}_x \cos\theta_i + \vec{a}_z \sin\theta_i) e^{-j\beta_1(x\sin\theta_i + z\cos\theta_i)} \quad (2.49)$$

Yansıyan dalga içinse elektrik alan şiddetini denklem 2.50’de, manyetik alan şiddetini ise denklem 2.51’de ifade edilmiştir[38].

$$\vec{E}_r(x, z) = \vec{a}_y E_{r0} e^{-j\beta_1(x\sin\theta_r - z\cos\theta_r)} \quad (2.50)$$

$$\vec{H}_r(x, z) = \frac{E_{r0}}{\eta_1} (\vec{a}_x \cos\theta_r + \vec{a}_z \sin\theta_r) e^{-j\beta_1(x\sin\theta_r - z\cos\theta_r)} \quad (2.51)$$

Aynı şekilde 2.ortama iletilen dalga için elektrik alan şiddetini denklem 2.52’de , manyetik alan şiddetini denklem 2.53’de ifade edilmiştir[38].

$$\vec{E}_t(x, z) = \vec{a}_y E_{t0} e^{-j\beta_2(x\sin\theta_t + z\cos\theta_t)} \quad (2.52)$$

$$\vec{H}_t(x, z) = \frac{E_{t0}}{\eta_2} (\vec{a}_x \cos\theta_t + \vec{a}_z \sin\theta_t) e^{-j\beta_2(x\sin\theta_t + z\cos\theta_t)} \quad (2.53)$$

Dik kutuplanma için pratik olarak yansıma katsayısını denklem 2.54’te, iletim katsayısını denklem 2.55’te ifade edilmiştir[38].

$$\Gamma_{\perp} = \frac{E_{r0}}{E_{i0}} = \frac{(\eta_2/\cos\theta_t) - (\eta_1/\cos\theta_i)}{(\eta_2/\cos\theta_t) + (\eta_1/\cos\theta_i)} \quad (2.54)$$

$$T_{\perp} = \frac{E_{t0}}{E_{i0}} = \frac{2(\eta_2/\cos\theta_t)}{(\eta_2/\cos\theta_t) + (\eta_1/\cos\theta_i)} \quad (2.55)$$

2.6.2 Paralel kutuplanma

İki dielektrik malzeme arasındaki sınıra paralel kutuplanmış dalgada da yansıyan ve iletilen dalga olacaktır.

1. ortam için gelen dalganın elektrik alan şiddeti denklem 2.56'da, manyetik alan şiddeti denklem 2.57'de gösterilmiştir[38].

$$\vec{E}_i(x, z) = E_{i0}(\vec{a}_x \cos\theta_i - \vec{a}_z \sin\theta_i)e^{-j\beta_1(x\sin\theta_i + z\cos\theta_i)} \quad (2.56)$$

$$\vec{H}_i(x, z) = \vec{a}_y \frac{E_{i0}}{\eta_1} e^{-j\beta_1(x\sin\theta_i + z\cos\theta_i)} \quad (2.57)$$

1. ortamdaki yansıyan dalganın elektrik alan şiddeti denklem 2.58'de, manyetik alan şiddeti ise denklem 2.59'da ifade edilmiştir[38].

$$\vec{E}_r(x, z) = E_{r0}(\vec{a}_x \cos\theta_r - \vec{a}_z \sin\theta_r)e^{-j\beta_1(x\sin\theta_r - z\cos\theta_r)} \quad (2.58)$$

$$\vec{H}_r(x, z) = -\vec{a}_y \frac{E_{r0}}{\eta_1} e^{-j\beta_1(x\sin\theta_r - z\cos\theta_r)} \quad (2.59)$$

2. ortama iletilen dalga için elektrik alan şiddeti denklem 2.60'da, manyetik alan şiddeti denklem 2.61'da ifade edilmiştir [38].

$$\vec{E}_t(x, z) = E_{t0}(\vec{a}_x \cos\theta_t - \vec{a}_z \sin\theta_t)e^{-j\beta_1(x\sin\theta_t + z\cos\theta_t)} \quad (2.60)$$

$$\vec{H}_t(x, z) = \vec{a}_y \frac{E_{t0}}{\eta_2} e^{-j\beta_1(x\sin\theta_t + z\cos\theta_t)} \quad (2.61)$$

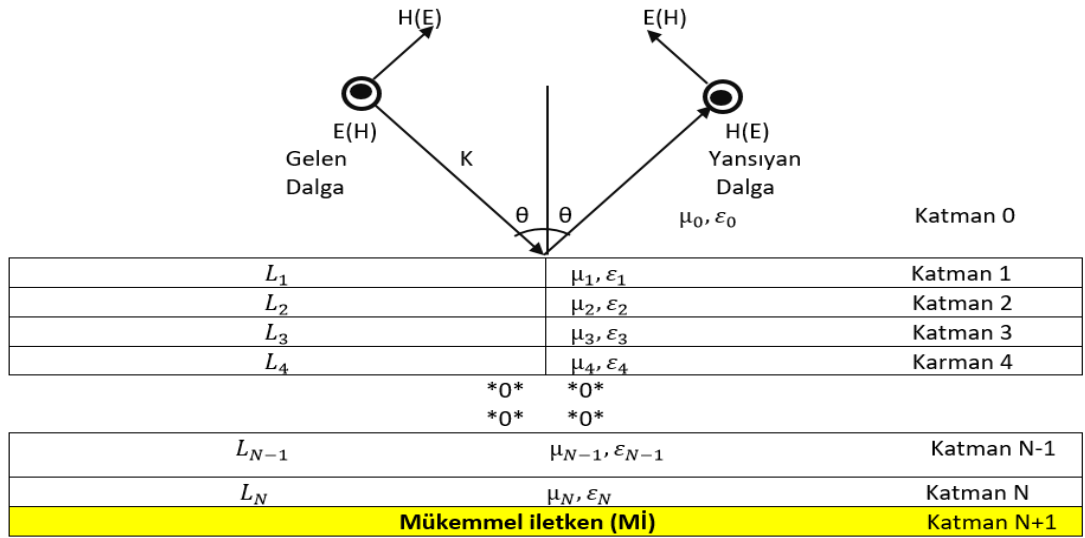
Pratik olarak yansıma katsayısını denklem 2.62'de, iletim katsayısını ise denklem 2.63'de ifade edilmiştir[38].

$$\Gamma_{\parallel} = \frac{E_{r0}}{E_{i0}} = \frac{(\eta_2 \cos\theta_t) - (\eta_1 \cos\theta_i)}{(\eta_2 \cos\theta_t) + (\eta_1 \cos\theta_i)} \quad (2.62)$$

$$T_{\parallel} = \frac{E_{t0}}{E_{i0}} = \frac{2(\eta_2 \cos\theta_i)}{(\eta_2 \cos\theta_t) + (\eta_1 \cos\theta_i)} \quad (2.63)$$

2.7 Çok Katmanlı Mikrodalga Soğurucu Modeli

Çok katmanlı mikrodalga soğurucu yapısı genel olarak şekil 2.6'da gösterilmiştir.



Şekil 2.6 : Çok katmanlı mikrodalga soğurucu yapısı.

Şekil 2.6'daki yapı N+1 tane katmandan oluşmaktadır, yapıda N tane farklı adet mikrodalga soğurucu malzeme kullanılmıştır. N+1. katmanda ise mükemmel iletken malzeme konmuştur. Bu yapıda L malzemenin kalınlığını, K dalga sayısını, μ ve ϵ ise sırasıyla her bir malzemenin manyetik ve elektrik geçirgenliğini temsil etmektedir [18]. Bu yapıda gelen dalganın yansımısını hesaplamak için Chew's formülü kullanılmaktadır [19].

2.7.1 Çok katmanlı dielektrik yapının empedans modeli

Çoklu dielektrik malzemelerden oluşan yapılarda şekil 2.5'de gösterildiği gibi, toplamsal alan dalga direnci sorunların çözümünde kullanışlı bir yöntemdir. 2. ortamda $z=0$ ve $z=d$ sınırında çoklu yansıma olduğu için $+z$ ve $-z$ yönünde ilerleyen iki dalga grubu oluşmaktadır. 2. ortamın, 1. ortamla toplam alanın $z=0$ sınırında yaptığı direnç denklem 2.64'te ifade edilmiştir[38].

$$Z_2(0) = \eta_2 \frac{\eta_3 \cos(\beta_2 d) + j\eta_2 \sin(\beta_2 d)}{\eta_2 \cos(\beta_2 d) + j\eta_3 \sin(\beta_2 d)} \quad (2.64)$$

$z=0$ noktasında, 1. ortamda süreksizlik oluşurken yansıma katsayısı gelen dalga için denklem 2.65'te ifade edilmiştir.

$$\begin{aligned} \Gamma_0 &= \frac{E_{r0}}{E_{i0}} = -\frac{H_{r0}}{H_{i0}} \\ &= \frac{Z_2(0) - \eta_1}{Z_2(0) + \eta_1} \end{aligned} \quad (2.65)$$

2.7.2 Chew's formülü

Chew's formülü şekil 2.6'daki gelen dalga çok katmanlı mikrodalga soğurucu yapısının içine girerek kullanılan malzemelerin karakteristiğine göre yapı içinde belli miktar sönülmeye uğrayıp M_i 'den yansıyarak soğurucu yapı içinde ilerleyip hava ortamına iletilmektedir. Her malzemenin yapısı farklı olduğu için k_i dalga sayısı her malzemede değişiklik göstermektedir, denklem 2.66'da k_i dalga sayısı ifade edilmiştir [18,19].

$$k_i = 2\pi f \sqrt{\mu_i \varepsilon_i - \mu_0 \varepsilon_0 \sin^2(\theta)} \quad (2.66)$$

Denklem 2.66'da f , gelen dalganın frekansını, θ gelen dalganın yüzeyin normali ile yaptığı açıyı, k_i , μ_i ve ε_i sırasıyla herbir katmandaki malzemenin dalga sayısını, manyetik geçirgenliğini ve elektrik geçirgenliğini temsil etmektedir. Gelen dalganın paralel kutuplanma (TM) ve dik kutuplanmasına (TE) göre Şekil 2.6'daki malzemeler arasındaki yansıma katsayıları için farklı formüller kullanılmaktadır. Paralel kutuplanma için malzemeler arasındaki yansıma katsayısı denklem 2.67'de denklem 2.68'de de dik kutuplanma için malzemeler arası yansıma katsayısı ifade edilmiştir [18,19].

$$r_{i,i+1} = \frac{\varepsilon_{i+1}k_i - \varepsilon_i k_{i+1}}{\varepsilon_{i+1}k_i + \varepsilon_i k_{i+1}} \quad i < N \quad (2.67)$$

$$r_{i,i+1} = \frac{\mu_{i+1}k_i - \mu_i k_{i+1}}{\mu_{i+1}k_i + \mu_i k_{i+1}} \quad i < N \quad (2.68)$$

Denklem 2.67 ve 2.68'deki $r_{i,i+1}$ iki katman arasındaki yansıma katsayısını ifade etmektedir. Hava ile mikrodalga soğurucu yapının arasındaki toplam yansıma katsayısını, özyinemeli hesaplayan Chew's formülü denklem 2.69'da ifade edilmiştir [18,19,23].

$$R_{i,j+1} = \frac{r_{i,i+1} + R_{i,j+1} e^{(-2jk_{i+1}L_{i+1})}}{1 + r_{i,i+1} R_{i,j+1} e^{(-2jk_{i+1}L_{i+1})}} \quad i=0,1,2,\dots,N \quad (2.69)$$

Mikrodalga soğurucu malzeme olan son katmanı ile mükemmel iletken ($R_{N,N+1}$) arasındaki yansıma katsayısı paralel kutuplanmada +1, dik kutuplanmada ise -1 alınmıştır [19].

3. GENETİK ALGORİTMA

Genetik algoritma tekniğinin ilk ortaya çıkması 1970’li yılların ilk yarısında John Holland, tarafından evrim mekanizmasının birleşenlerini oluşturan doğal seçim, modifikasyon, çarpazlama işlemleri sonunda ata bireylerden nitelik olarak daha üstün yeni bireylerin elde edildiğinin fark edilmesi üzerine geliştirilen bilimsel metodun adına “Genetik algoritma” ismi verilmiştir. Genetik algoritma herhangi bir konu için problem çözümünün başında ya da ilerki safhalarda karşılaşılabilecek sorunlara çözüm kümesi içinde en uygun çözüm kümesini (en iyisini) olasılık aksiyomlarını kullanarak iterasyon - maliyet fonksiyonunu oluşturarak bulmaya yarayan optimizasyon tekniğidir. Her yeni iterasyonda yeni oluşan nesillere gen aktarımı devam ettiği müddetçe doğal seçilime bağlı (Natural selection) kötü çözümler kümesi çeşitli doğal seçim teknikleri kullanılarak elimine edilerek, popülasyonda kalan iyi çözümler için daha iyi çözümler ortaya çıkarma eğiliminde olan bir optimizasyon tekniğidir.

Genetik algoritmaların, temel mekanizmaları olasılık aksiyomlarını üzerinden işletildiği için, performans kalitesini tahmin etmek zordur. Genetik algoritmaların, diğer optimizasyon tekniklerine göre bir pozitif avantajı da çözüm kümesinde en iyi yerel çözümler yerine global çözüm kümesine odaklanması GA’ların başlıca özelliklerindedir. Global çözüm kümesi üstünden çalışılması GA’ların diğer optimizasyon tekniklerine göre hızlı çalışmasını sağlamaktadır [39-40].

3.1 Genetik Algoritmanın Temel Kavramları

3.1.1 Genetik algoritma yapı taşları

Sakladığı veri boyutuna göre genetik algoritma küçükten büyüğe doğru gen, kromozom ve popülasyondan oluşmaktadır. Bu kavramlar özetle açıklanmıştır [39-40].

3.1.1.1 Gen

Genetik algoritmanın en küçük yapı taşı oluşturulan ve anlamlı veri barındıran en küçük yapı taşıdır. Aynı türdeki genlerin bir araya gelmesiyle kromozom yapısı meydana gelmektedir. Bir geni alfanumerik (A,C,4,8..) gibi ifade edilebildiği gibi mantıksal ifade biçimi olan 0 veya 1'lerle ifade edilebilen bit serisinden olabilmektedir.

3.1.1.2 Kromozom

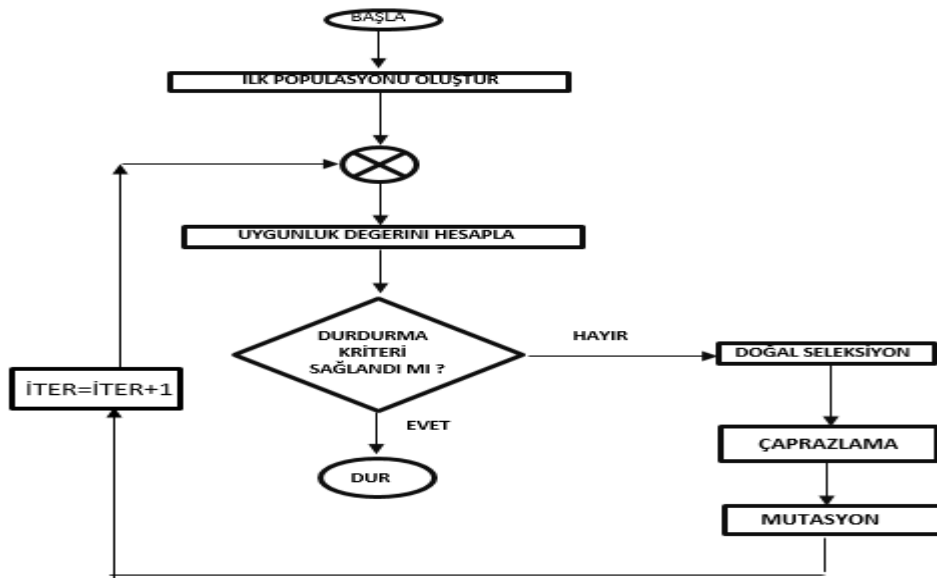
Kromozom, birden fazla aynı tür geni barındıran ve bu sayede problemin tüm bilgilerini içeren genetik algoritma yapı taşıdır. Kromozom yapısı, popülasyondaki bireylere karşılık gelmektedir. Kromozomların herbiri optimize edilecek problemin çözüm kümesi adaydır. Kromozomlara örnek olarak bir silindirde yarıçap, yükseklik (010,100) gibi mantıksal değerlerden oluşan genler kromozomu oluşturmaktadır.

3.1.1.3 Popülasyon

Kromozomların oluşturduğu kümenin ismine popülasyon denilmektedir. Optimize edilecek problem için aday çözüm kümesini barındırır. Popülasyon sayısının sabit tutulmasının nedeni her bir iterasyonda zayıf bireyler elenir güçlü olanların hayatta kalması amaçlanmıştır.

3.1.2 Genetik algoritma akış şeması

Genetik algoritmanın, akış şeması şekil 3.1'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1 : Genetik algoritma akış şeması.

3.1.3 Genetik algoritma kodlama teknikleri

Kromozomların kullanılmasıyla elde edilen çözüm kümesinde verilerin kodlama biçimlerinin nasıl yapılacağını ifade etmektedir [39].

3.1.3.1 İkili kodlama

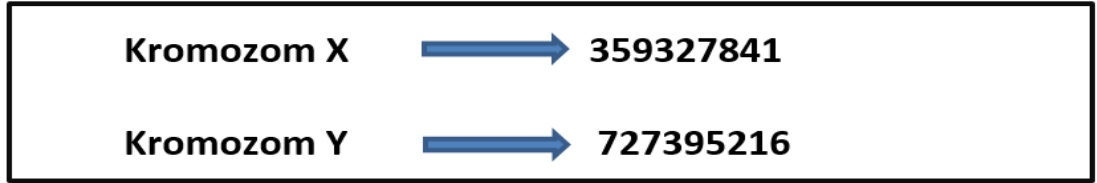
İkili kodlamada kromozom içindeki genlerin değerleri 0 ve 1 ile ifade edilir. Şekil 3.2’de ikili kodlanmış kromozomlar gösterilmiştir.



Şekil 3.2 : Kromozomların ikili kodlanması.

3.1.3.2 Permütasyon kodlama

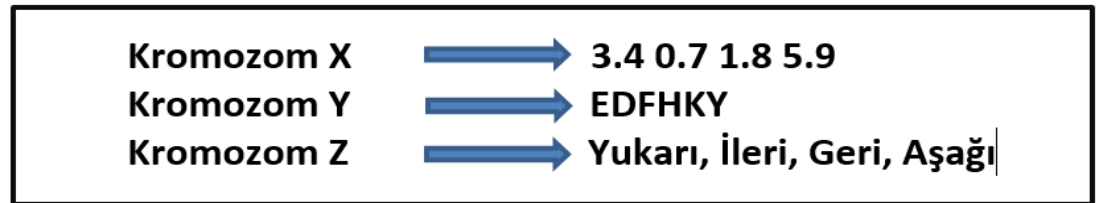
Permütasyon kodlaması, optimize edilecek problemde sıralamaya yönelik işlem varsa kullanılır. Permütasyon kodlamaya örnek olarak gezgin satıcı problemi verilir. Şekil 3.3’te permütasyon kodlama gösterilmiştir.



Şekil 3.3 : Permütasyon kodlama.

3.1.3.3 Değer kodlama

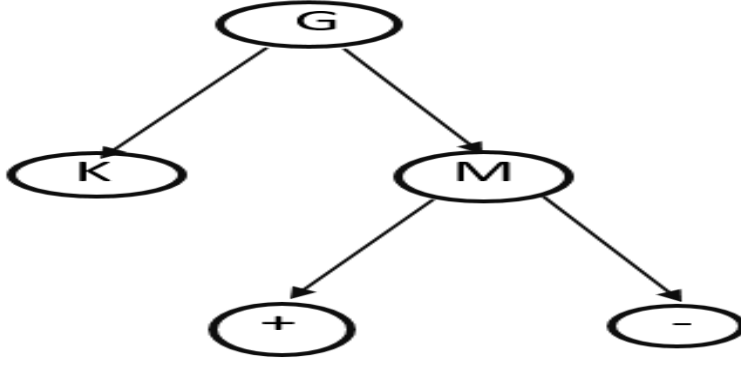
Optimize edilecek problemde reel sayılar yanında, karmaşık (kompleks) sayı varsa kullanılır. Şekil 3.4’te değer kodlama gösterilmiştir.



Şekil 3.4 : Değer kodlama.

3.1.3.4 Ağaç kodlama

Dinamik olan veri ve problemlerin çözümü için kullanılır. Şekil 3.5’te ağaç kodlama gösterilmiştir.



Şekil 3.5 : Ağaç kodlama.

3.2 Genetik Algoritma İşlemleri

Genetik algoritma optimize edilecek probleme sırasıyla doğal seleksiyon (seçilim), çaprazlama (crossover) ve mutasyon gibi 3 adet sıralı işlem dizisinden geçmektedir.

3.2.1 Doğal seçilim (seleksiyon)

Herbir iterasyonda, çaprazlama ve mutasyon işlemine girmeden önce popülasyondaki iyi olan bireylerin hayattta kalması ve bu bireylerin diğer iterasyon(lar)da daha iyi üstün bireyler olması GA tarafından hedeflenmektedir. Doğal seçilimde kullanılan seçim teknikleri rulet seçilimi, turnuva seçilimi ve sıralı seçilimdir. Doğal seçilim (seleksiyon) yöntemlerinin hepsinde optimize edilen problemin, uygunluk fonksiyonundan çıkan sonuçta değeri iyi olan, maliyeti en az olan bireylerin yaşama şansını daha yüksek tutmak ve uygun olmayan bireyleri elemek için doğal seçilim yapılmaktadır [39,40].

3.2.1.1 Rulet seçilimi

Bu doğal seçilim yönteminde herbir bireyin uygunluk fonksiyonundan çıkan değeri, popülasyondaki tüm bireylerin uygunluk değeri toplamına oranlanır. Burada bir olasılık hesabı mevcuttur. Özet olarak toplam uygunluk değerine daha yakın uygunluk değerine sahip bireylerin hayatta kalma olasılığının artırılması hedeflenmektedir.

3.2.1.2 Sıralı seçilim

Uygunluk fonksiyonundan çıkan değerlere göre en kötü uygunluğa sahip bireye düşük değer verilirken daha iyi olan bireylere daha yüksek değer verilerek, çok daha iyi olan bireye ise yüksek sayı değeri verilir.

3.2.1.3 Turnuva seçilimi

Popülasyon içinde rastgele N adet (2,4,7) bireyler seçilerek, uygunluk değeri en yüksek olanın seçilmesi hayatta kalması hedeflenir.

3.2.2 Çaprazlama (crossover)

Önceki nesildeki kromozomun parçası olan gen ya da genlerin yeri değiştirilerek, yeni nesilde oluşan yavru kromozomlarda uygunluk değeri daha yüksek bireyler elde etmek için uygulanmaktadır. Çaprazlama tekniği olarak Tek noktalı ve çift noktalı çaprazlama teknikleri mevcuttur. Tek noktalı çaprazlamada kromozomlar arasında belli bir tek noktadan sonra genler yer değiştirir. Şekil 3.6' da tek noktalı çaprazlama gösterilmiştir. Çift noktalı çaprazlamada, kromozom içindeki gen dizinlerinin belirlenmiş iki noktanın arasında kalan bit dizinlerinin yer değiştirmesidir. Şekil 3.7'de ikili kodlanmış kromozomların çift noktalı çaprazlanması gösterilmiştir [39,40].

Kromozom 1: 11001|0101100111

Kromozom 2: 10100|0101101101

Çocuk 1: 101000101100111

Çocuk 2: 110010101101101

Şekil 3.6 : Tek noktalı çaprazlama.

Kromozom 1: 11001|01011|00111

Kromozom 2: 10100|11001|01101

Çocuk 1: 110011100100111

Çocuk 2: 101000101101101

Şekil 3.7 : Çift noktalı çaprazlama.

3.2.3 Mutasyon

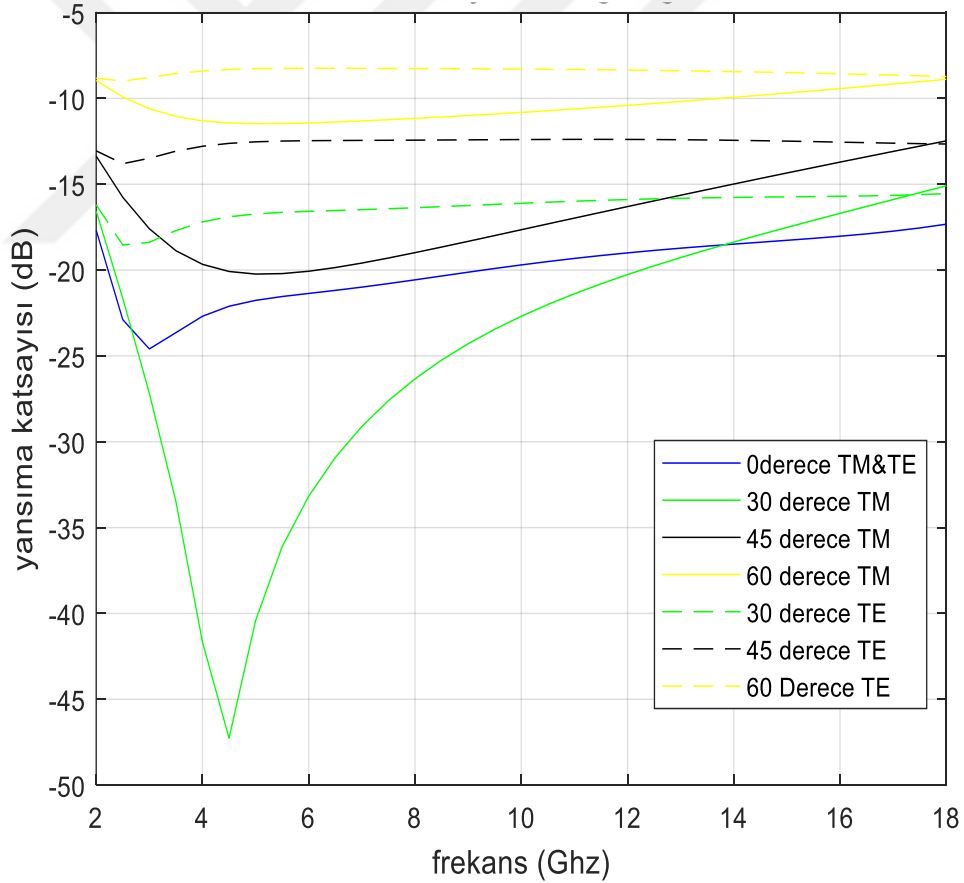
Mutasyon operatörü kromozomların içindeki genlerde, genetik çeşitliliği arttırmak için olasılık aksiyonları kullanılarak değişiklik yapılmasına imkan veren operatördür. Mutasyon teknikleri olarak eklemeli mutasyon, evirme mutasyonu, yer değiştirmeli mutasyon, takaslı mutasyon ve terslemeli mutasyon tekniklerinden bahsedilmektedir. Çizelge 3.1’de, yukarıda anlatılan mutasyon tekniklerinin mekanizması gösterilmiştir[41,42].

Çizelge 3.1 : Mutasyon teknikleri.

Mutasyon Tipi	Kodlama Türü	Örnek
Eklemeli Mutasyon	Permütasyon Kodlama	123456789 → 123745689
Evirme Mutasyonu	Permütasyon Kodlama	123456789 → 123459876
Yer Değiştirmeli Mutasyon	Permütasyon Kodlama	123456789 → 127456389
Pozisyona göre Mutasyon	Değer Kodlama	K L M P T Z → Z L M P T K
Tek nokta rasgele Mutasyon	İkili Kodlama	001101010 → 001101000

4. ÇOK KATMANLI MİKRODALGA SOĞURUCU TASARIMI

Yapılan tez çalışmasında ilk olarak Matlab’de yazılan kodun doğruluğunu göstermek amacıyla Dib ve diğerlerinin yaptığı çalışmada [19] dördüncü örnek için elde ettikleri çizelge 4.1’de verilen malzeme kalınlık değerleri kullanılarak 2-18 GHz frekans aralığında frekans artış miktarı 0.5 GHz, başlangıç açısı 0° ve bitiş açısı 60° için 15° lik açı arttırımı ile paralel ve dik kutuplanmaya göre çizdirilen frekans-yansıma grafiği şekil 4.1’de verilmiştir. Aynı grafiğin elde edildiği gözlemlenmiştir. Referans alınan kaynakta [19] 15° geliş açısı için paralel ve dik kutuplanma yansıma katsayısı verilmediği için şekil 4.1’de 15° için gösterilmemiştir.



Şekil 4.1 : Farklı kutuplanma ve geliş açısına göre frekans-yansıma grafiği [19].

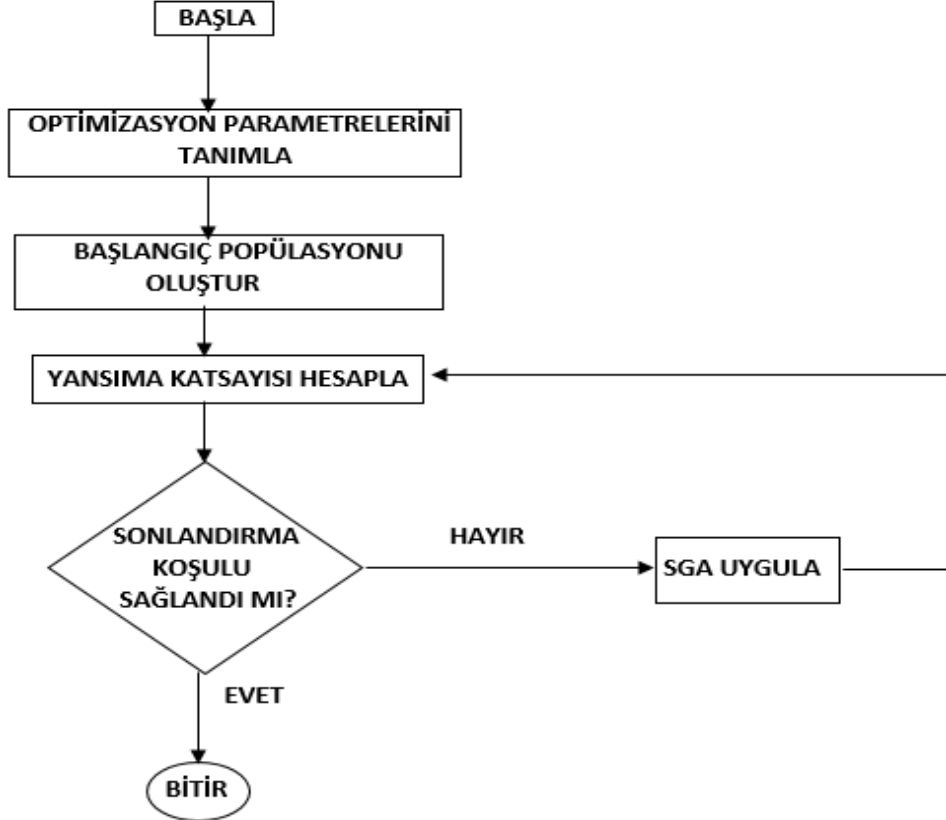
Çizelge 4.1’de Matlab programının sağlamlasını yapmak için kullanılan malzeme numaraları ve katman kalınlıkları verilmiştir [19].

Çizelge 4.1 : Doğrulama örneği için kullanılan malzemeler ve kalınlıkları[19].

Tabaka Nu.	Malzeme	Kalınlık(mm)
1	16	0.2205
2	6	1.8477
3	16	0.5144
4	1	1.0325
5	13	0.9837
6	Mİ	Toplam kalınlık:4.6mm

4.1 Sürekli Genetik Algoritma Kullanılarak Çok Katmanlı Mikrodalga Soğurucu Tasarımı

SGA kullanarak tasarlanan çok katmanlı mikrodalga soğurucu modelinde belirli frekans ve açı aralığında Chew's formülünü kullanarak çok katmanlı yapının belirli frekans ve açı aralığında, frekans ve açı arttırım verilerine göre maksimum yansım katsayısı değerleri ile katmanların kalınlığı, SGA optimizasyon tekniği kullanılarak minimize edilmiştir. Şekil 4.2'de çok katmanlı mikrodalga soğurucu tasarımın akış şeması gösterilmiştir.



Şekil 4.2 : Çok katmanlı mikrodalga soğurucu tasarımı akış şeması.

Şekil 4.2’de başlıktan sonraki kutucuğun ve genetik algoritma girdilerinin nasıl programa girileceği 4. başlıkta anlatılmıştır. N katmanlı mikrodalga soğurucu yapısında malzemeler hesaplama kolaylığı açısından Mİ’den hava ortamına doğru sıralanmıştır.

4.2 Optimizasyon Adımları

Çok katmanlı mikrodalga soğurucu yapısında hesaplamalarda Chew’s formülü ve optimize işlemi için SGA yöntemi kullanılmıştır. Popülasyon oluşturma, sürekli genetik algoritma işlemleri, yansıma hesaplanması ve uygunluk fonksiyonu hesaplanması bu bölüm içinde açıklanmıştır.

4.2.1 İlk popülasyon oluşturma

Popülasyonun her bir kromozomu mikrodalga soğurucu yapısını temsil ederken, seçilen katman sayısı kadar gen ihtiva etmektedir. Genler, bilgi olarak katmanların kalınlıklarını içermektedir. Örnek olarak rastgele değerler kullanılarak oluşturulan popülasyon sayısı 8, katman sayısı 5 olan kalınlık değerleri çizelge 4.2’ de gösterilmiştir.

Çizelge 4.2 : Popülasyon oluşturulması.

Katman-1	Katman-2	Katman-3	Katman-4	Katman-5
$0.8 \cdot 10^{-3}$	$0.712 \cdot 10^{-3}$	$0.567 \cdot 10^{-3}$	$1.912 \cdot 10^{-3}$	$0.818 \cdot 10^{-3}$
$0.788 \cdot 10^{-3}$	$0.835 \cdot 10^{-3}$	$0.378 \cdot 10^{-3}$	$1.865 \cdot 10^{-3}$	$0.834 \cdot 10^{-3}$
$0.715 \cdot 10^{-3}$	$0.245 \cdot 10^{-3}$	$0.819 \cdot 10^{-3}$	$0.487 \cdot 10^{-3}$	$0.854 \cdot 10^{-3}$
$0.114 \cdot 10^{-3}$	$0.759 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$0.589 \cdot 10^{-3}$	$0.877 \cdot 10^{-3}$
$0.119 \cdot 10^{-3}$	$0.840 \cdot 10^{-3}$	$0.749 \cdot 10^{-3}$	$1.838 \cdot 10^{-3}$	$0.822 \cdot 10^{-3}$
$0.943 \cdot 10^{-3}$	$0.483 \cdot 10^{-3}$	$0.314 \cdot 10^{-3}$	$0.862 \cdot 10^{-3}$	$0.876 \cdot 10^{-3}$
$0.816 \cdot 10^{-3}$	$1.278 \cdot 10^{-3}$	$0.269 \cdot 10^{-3}$	$0.924 \cdot 10^{-3}$	$0.357 \cdot 10^{-3}$
$0.895 \cdot 10^{-3}$	$1.486 \cdot 10^{-3}$	$0.971 \cdot 10^{-3}$	$0.420 \cdot 10^{-3}$	$0.146 \cdot 10^{-3}$

Çizelge 4.2’de satırlar kromozomları, kutucuklar ise genleri temsil etmektedir. Matlab programında elde edilen bir kısım verilerin karmaşık sayı olduğu için Genetik Algoritma kodlama tekniği olarak Bölüm 3’te belirtilen değer kodlama tekniği kullanılmıştır. İlk popülasyonu oluşturmak ve elde etmek için Matlab programında (popmatrisi = rand(psize,malsay)*(ustsinir - altsinir) + altsinir) kodu kullanılarak malzemelerin minimum ve maksimum kalınlık değerleri arasında rastgele dağılımlı

(popülasyon sayısı x malzeme sayısı) boyutunda kalınlık değerlerinden (genlerden) oluşan matris elde edilmiştir.

4.2.2 Paralel ve dik kutuplanmada toplam yansımaya katsayısı hesabı

Katmanlar arasındaki yansımaya katsayısı ve son katman ile hava arasındaki yansımaya katsayısının nasıl hesaplanacağı Bölüm 2’de anlatılmıştır. k_i her bir katmandaki dalga sayısı her iki kutuplanma, dik ve (ya) belli açıyla geliş için denklem 2.66’da, paralel kutuplanmada, dik geliş ve eğik geliş malzemeler arası yansımaya katsayısı r_i denklem 2.67’de, dik kutuplanmada da dik ve eğik geliş için r_i denklem 2.68’te verilmiştir. Özyinelemeli mantıkta çalışan denklem 2.69 (Chew’s formülü) kullanılarak mikrodalga soğurucu yapı ile hava arasındaki R_T toplam yansımaya katsayısı bulunmaktadır. Elde edilen karmaşık sayı olan R_T (toplam yansımalarının), karmaşık sayı olduğu için önce genliği alınıp daha sonra logaritmasının alınması denklem 4.1’de ifade edilmiştir[21].

$$R_{Te\&Tm} = 20\log(\text{abs}(R_T)) \quad (4.1)$$

4.2.3 Uygunluk fonksiyonu hesaplanması

Mikrodalga soğurucu yapıların, yansımaları SGA ile optimize edilirken kullanılan maliyet fonksiyonu denklem 4.2’de ifade edilmiştir[18].

$$F_{\text{Min}} = \min[a_1 * \text{Maks}\{\text{Maks}(|R_{0,1}(f)_{Te,\theta}|), \text{Maks}(|R_{0,1}(f)_{\text{Normal}}|), \text{Maks}(|R_{0,1}(f)_{Tm,\theta}|)\} + a_2 * \sum_{i=1}^N L_i] \quad (4.2)$$

Yukarıdaki denklemde $R_{0,1}(f)$ (2.69) no lu denklemden hesaplanan yansımaya katsayısını f frekansı, L_i ise katmanların kalınlığını göstermektedir. Denklem 4.2’de $a_1 = 4, a_2 = 2000$ katsayı değerleri atanmıştır, popülasyondaki her bir birey için bütün açı ve frekans aralığındaki yansımaya katsayısı hesaplamaları yapılarak normal geliş açısı, paralel ve dik kutuplanmadaki eğik geliş açısına göre hangisinin yansımaya katsayısı fazla ise ilgili açı ve frekans için ilgili maksimum değer alınmıştır. Daha sonra popülasyondaki üyelerin genleri toplamından toplam tabaka kalınlığı elde edilerek, maksimum yansımaya katsayısı ile toplam tabaka kalınlığı toplanarak ilk maliyet değeri elde edilmektedir. Diğer iterasyona geçildiğinde, yine aynı işlemler yapılarak elde edilen maliyeti bir önceki iterasyondaki maliyet değeri ile

karşılaştırılıp hangisi minimum ise o değer minimum değer olarak tutulmaktadır. Özetle her iterasyonda maliyet düşürülmeye çalışılmıştır.

4.2.4 SGA işlemleri

SGA optimizasyonunda, Bölüm 3'te anlatılan GA işlemleri yapılmaktadır. Bu işlemler sırasıyla doğal seçim, çaprazlama ve mutasyon işlemleridir. Çaprazlama işleminin verimli olması için popülasyon sayısının çift sayı seçilmesi zorunludur.

4.2.4.1 Doğal seçim (seleksiyon)teknîği

Yapılan çalışmada doğal seçim tekniği olarak sıralı seçim uygulamıştır. Herbir iterasyonda bulunan maliyetler küçükten büyüğe doğru sıralanarak maliyeti en düşük olan %50'lik kısmın hayatta kalması için, en fazla maliyete sahip olan %50'lik kısım elenerek, diğer işleme geçilmektedir.

4.2.4.2 Çaprazlama tekniği

Yapılan çalışmada, çaprazlama tekniği olarak çift noktalı çaprazlama tekniği kullanılmıştır. Çift noktalı çaprazlama tekniğine geçmeden önce doğal seçimden elimizde bulunan en düşük maliyetli hayatta kalan bireylerin hangi bireyin hangi bireyle eşleneceği "randperm" fonksiyonu kullanarak belirlendikten sonra arayüzden kullanıcı tarafından girilen çaprazlama oranına göre birbiri ile çaprazlanacak bireyler içinde rastgele iki nokta seçilerek iki nokta arasında kalan genler eşlenen bireylerde yer değiştirilerek çaprazlama işlemi sonlandırılmaktadır. Özet olarak çaprazlama yapılan eşlenen bireyler arasındaki gen(ler) aktarımıdır.

4.2.4.3 Mutasyon tekniği

Yapılan çalışmada yer değiştirmeli mutasyon tekniği kullanılmıştır. Bu teknik mutasyon oranına göre kromozom içindeki iki genin bir biri ile yer değiştirmesidir.

4.3 Kullanılan malzemeler

Yazılan tez kapsamında 4 tipten toplamda 16 adet malzeme kullanılmıştır. Çizelge 4.3'de kullanılan malzemeler ve ilgili sabit katsayılar verilmiştir. Çizelgedeki malzemelerin türüne ve frekansa göre elektriksel ve manyetik geçirgenlik denklemleri de malzeme setleri için verilmiştir [19, 21, 23].

Bu malzeme setlerinden ilki (1,2) kayıpsız dielektrik malzemelerde bağıl elektrik ve manyetik geçirgenlik frekansa göre değişmezken, 2. Set (3,4,5) malzeme olan kayıplı manyetik malzemelerde bağıl elektriksel geçirgenlik sabitken, bağıl manyetik geçirgenlik frekansa göre değişmektedir. Denklem 4.3'te kayıplı manyetik malzemelerin frekansa göre bağıl manyetik geçirgenliği ifade edilmiştir [19, 21, 23].

$$\mu'(f) = \frac{\mu'}{f^a} ; \mu''(f) = \frac{\mu''}{f^b} \quad (4.3a)$$

$$\mu = \mu' - j\mu'' \quad (4.3b)$$

Denklem 4.3'teki a ve b katsayıları (çizelge 4.3'de verilmiştir.) Frekansa göre manyetik geçirgenliğin hesaplanması frekans GHz cinsinden alınmaktadır. Üçüncü set (6,7,8) malzeme olan kayıplı dielektrik malzemelerde ise frekansa göre bağıl elektriksel geçirgenlik değişirken, bağıl manyetik geçirgenlik değişmemektedir. Denklem 4.4'te frekansa bağıl bağıl elektriksel geçirgenlik ifade edilmiştir [19, 21, 23].

$$\varepsilon'(f) = \frac{\varepsilon'}{f^a} ; \varepsilon''(f) = \frac{\varepsilon''}{f^b} \quad (4.4a)$$

$$\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon'' \quad (4.4b)$$

Çizelge 4.3 : Kullanılan malzemelerin bağıl manyetik ve bağıl dielektrik geçirgenlik sabitleri çizelgesi [19, 21, 23].

Malzeme Numarası	ε'	ε''	a	μ'	μ''	b	f_m	μ_m
1	10	-	-	1	-	-	-	-
2	50	-	-	1	-	-	-	-
3	15	-	0.961	5	10	0.974	-	-
4	15	-	0.957	3	15	1	-	-
5	15	-	1	7	12	1	-	-
6	5	8	0.569	1	0	0.861	-	-
7	8	10	0.682	1	0	0.778	-	-
8	10	6	0.861	1	0	0.778	-	-
9	15	-	-	-	-	-	0.8	35
10	15	-	-	-	-	-	0.5	35
11	15	-	-	-	-	-	1.0	30
12	15	-	-	-	-	-	0.5	18
13	15	-	-	-	-	-	1.5	20
14	15	-	-	-	-	-	2.5	30
15	15	-	-	-	-	-	2.0	30
16	15	-	-	-	-	-	3.5	25

Katsayılar olan a ve b katsayılarının 1 GHz'deki değerleri çizelge 4.3'de verilmiştir. Son set (9,10,11,12,13,14,15,16) olan relaksiyon tipi manyetik malzemelerde ise frekansa göre bağıl elektriksel geçirgenlik sabitken bağıl manyetik geçirgenlik frekansa göre değişmektedir. Denklem 4.5'te relaksiyon tipi manyetik malzemenin frekansa göre bağıl manyetik geçirgenliği dikkörtgensel formda ifade edilmiştir [19, 21, 23].

$$\mu'(f) = \frac{\mu_m f_m^2}{f^2 + f_m^2}; \mu''(f) = \frac{\mu_m f_m f}{f^2 + f_m^2} \quad (4.5a)$$

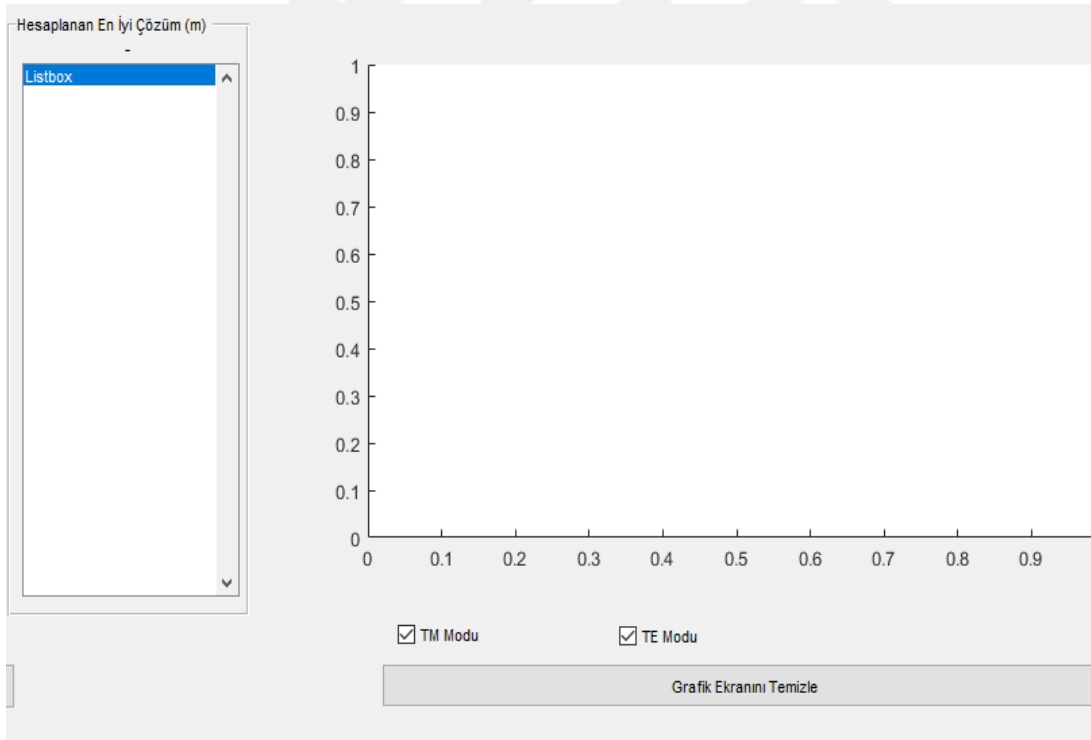
$$\mu = \mu' - j\mu'' \quad (4.5b)$$

Denklem 4.5'teki μ_m, f_m katsayıları (1 GHz için) çizelge 4.3'de verilmiştir.

4.4 Matlab Arayüzü (GUI)

Yazılan Matlab programında kullanıcı tarafından bilgilerin girilmesi için Matlab arayüz programı (GUI) yapılmıştır. Kullanıcı arayüzün girdi bölümünde malzeme sayısı girişi, SGA parametreleri, seçilen malzemeler ve aç parametresi girdilerinden oluşturulmuştur. Şekil 4.3'te kullanıcı arayüzün girdi bölümü gösterilmiştir. Şekil 4.3'ün içeriğinde sol üst kısımda malzeme sayısı girişinden kullanıcı tarafından kutucuğa 1-16 arasında sayı girilerek katman sayısını matlab programına tanıtılmıştır. Kullanıcı ister manuel isterse otomatik olarak önceden özellikleri tanıtılmış 16 tane malzeme içinden seçim yaparak girilen katman sayısı kadar malzeme seçimi yapılabilmektedir. Manuel seçimde, seçilen katman sayısı kadar ekranda çıkan kutucuğa 1-16 arası (1 ve 16 dahil) numaralar girilerek malzeme seçimi yapılmıştır. Random seçim sekmesinde ise program katman sayısı kadar 1-16 arası (1 ve 16 dahil) numaraları malzeme sayısı kadar otomatik seçilmektedir. Arayüzün sol alt kısmında genetik algoritma parametreleri olan popülasyon sayısı, çaprazlama olasılığı, mutasyon olasılığı ve itersyon sayısı manuel olarak girilmektedir. SGA, parametrelerine ek olarak malzemelerin minimum ve maksimum kalınlık değerleri ile başlangıç frekansı, frekans artış miktarı ve bitiş frekansı kullanıcı tarafından manuel olarak girilmektedir. sağ alt kesimde başlangıç açısı, aç artış miktarı, bitiş açısı derecede cinsinden kullanıcı tarafından girilmektedir. Parameterler girildikten sonra çalıştır sekmesine tıklayarak program çalıştırılmaktadır. Arayüzün, çıktıları olan her bir katmanın kalınlığı, yapının toplam kalınlığı ve frekans-yansıma grafiği kullanıcıya gösterilmektedir. Şekil 4.4'te arayüzün çıktı bölümü gösterilmiştir.

Şekil 4.3 : Girdi arayüzü.



Şekil 4.4 : Çıktı arayüzü.

Şekil 4.4'te gösterildiği gibi kullanıcıya kutuplanma türü seçimi de program çalıştırılmadan önce yaptırılmaktadır. Program tekrardan çalıştırılırsa grafik ekranını temizle sekmesine tıklandığında, frekans-yansıma bölümündeki grafik şekilleri silinmektedir.

4.5 Optimizasyon Sonuçları

Yapılan tez çalışması kapsamında, çeşitli frekans aralıklarında 3, 4, 5 ve 7 katmanlı mikrodalga soğurucu yapısı tasarlanıp diğer yapılan çalışmalarla karşılaştırma yapılarak çizelge ve şekillerde gösterilmiştir. Bütün tasarımlarda 20 adet deneme yapıp en az kalınlık ve(ya) geliş açılara göre maksimum yansıması en az olan yansıma-frekans grafiği alınmıştır, TM ve TE modu için ayrı ayrı yapılabildiği gibi iki kutuplanmayada aynı anda optimizasyon yapılabilmektedir. Frekans hariç diğer parametreler sabit tutulmuştur. Parametrelerin (Sabit tutulan) eğik geliş açıları için çizelge 4.4'te, dik geliş açısı için çizelge 4.8'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.4 : Farklı geliş açıları için girdi değerleri

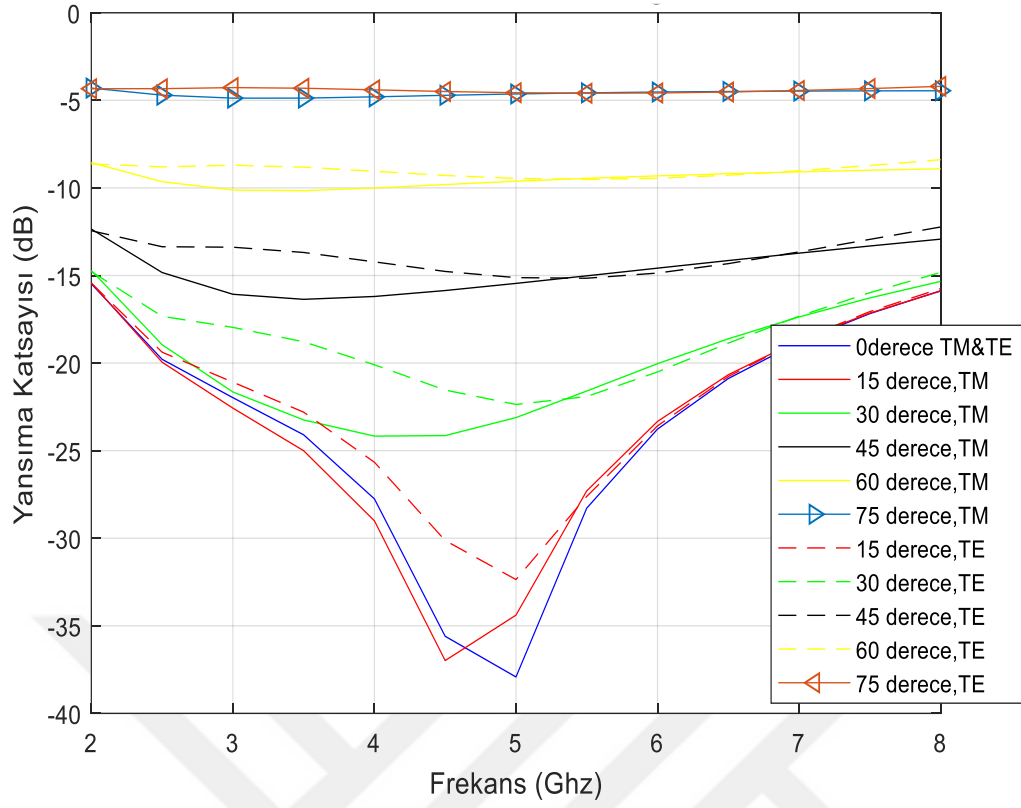
Parametre Adı	Değer(ler)i
Popülasyon sayısı	1000
Çaprazlama olasılığı	0.9
Mutasyon olasılığı	0.05
Maksimum iterasyon sayısı	100
Malzeme kalınlığı (Herbir katman için)	0.1mm (min.) - 2mm (maks.)
Başlangıç açısı	0°
Açı artım aralığı	15°
Bitiş açısı	75°

4.5.1 Dört katmanlı mikrodalga soğurucu

Dört katmanlı mikrodalga soğurucu yapısı için tasarım-1,tasarım-2 ve tasarım-3 olarak üç adet farklı frekans aralıklarında, farklı malzemeler seçilerek yapılmıştır. Dört katmanlı tasarımlar için çizelge 4.4'teki girdi parametreleri kullanılmıştır.

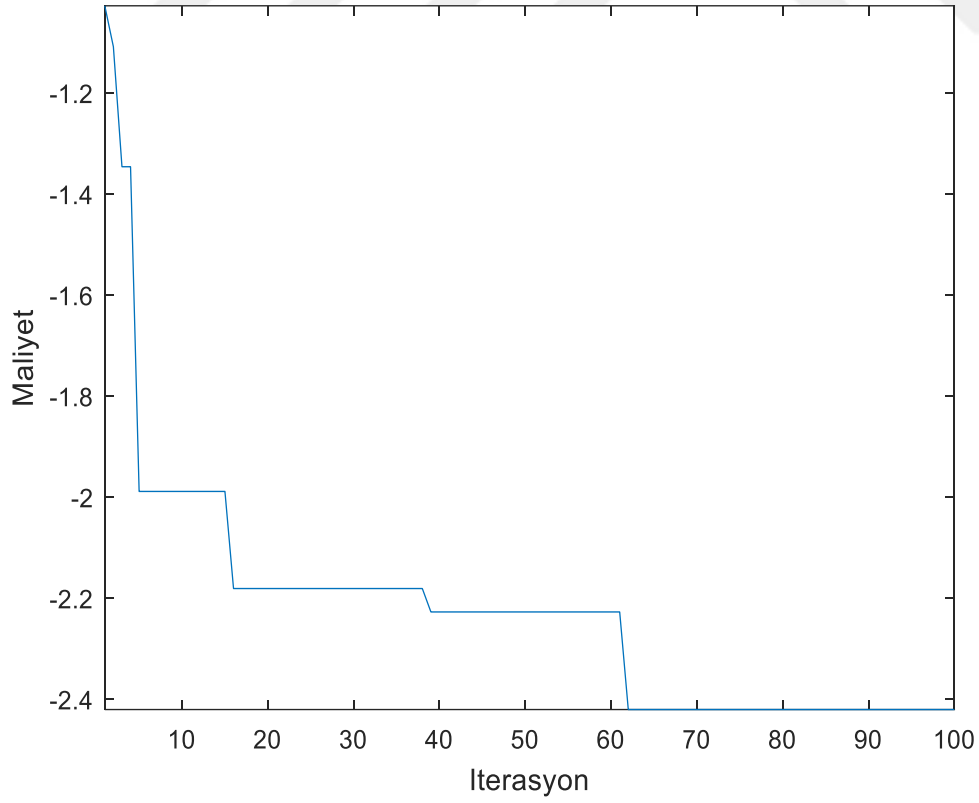
4.5.1.1 Tasarım-1

Frekans aralığı 2-8 GHz ve frekans artırımını 0.5 GHz olan tasarım-1'in frekans-yansıma grafiği şekil 4.5'de gösterilmiştir. Ayrıca şekil 4.6'da tek seferlik iterasyon-maliyet grafiği gösterilmiştir.



Şekil 4.5 : 4 katmanlı 2-8 GHz yansımaya-frekans grafiği.

İterasyon-Maliyet Grafiği



Şekil 4.6 : Tasarım-1 maliyet-iterasyon grafiği.

Şekil 4.6'da gösterildiği gibi iterasyon ekseninde ilerledikçe maliyetin azaldığı gösterilmiştir ve maliyet fonksiyonu optimizasyon tekniğinin mantığına uygun çalışmaktadır.

Tasarım-1 için WDO, DE ve PSO optimizasyon teknikleri ile karşılaştırma yapılmıştır. Malzeme tipleri manuel olarak girilmiştir, iyi bir optimizasyon yapılabilmesi için WDO tekniğinin kullandığı malzeme ve sırası kullanılmıştır. Tasarım-1 ve karşılaştırma yapılan tasarımların değerleri çizelge 4.5'te verilmiştir.

Çizelge 4.5'te gösterildiği gibi en düşük katman kalınlığı tasarım-1'de elde edilmiştir. Diğer tekniklerde 75° açısı için veri paylaşılmamıştır. Yansıma katsayıları WDO tekniği ile yakın değerler bulunmuştur.

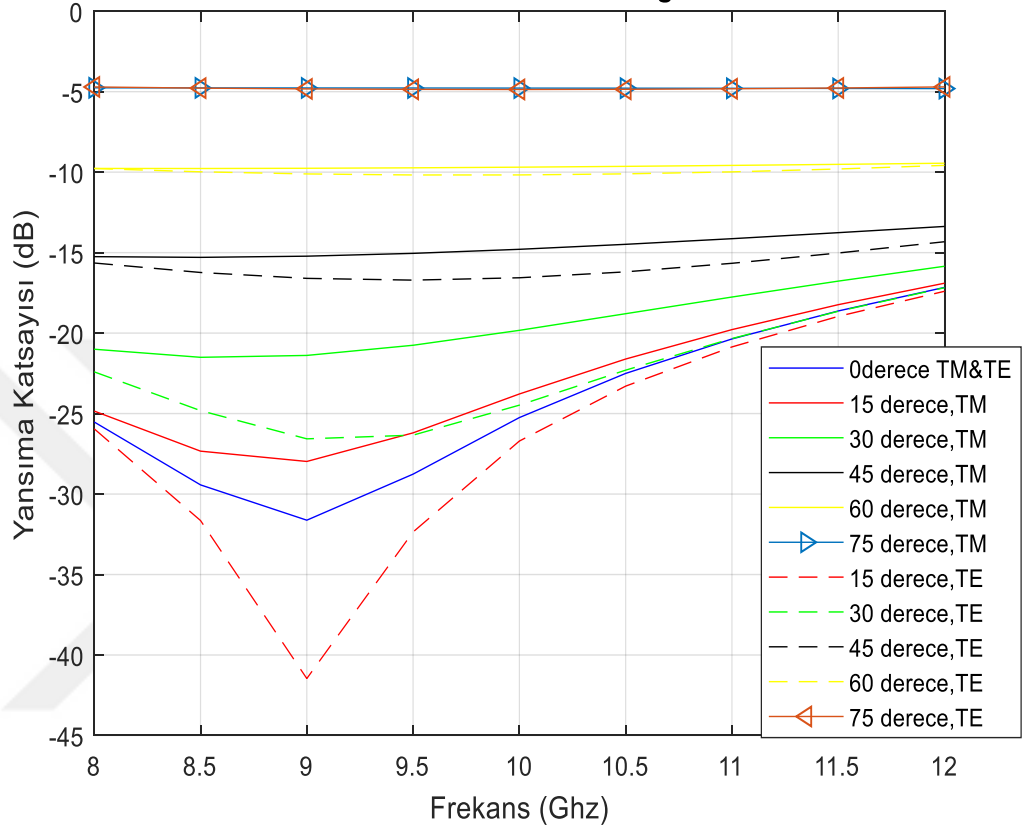


Çizelge 4.5 : Tasarım-1 ve diğer tekniklerin karşılaştırılması.

Katmanlar	Tasarım-1 (4 katmanlı)		Veri1 [18] (4 katmanlı)		Veri2[20] (4 katmanlı)	
	Malzeme Nu.	kalınlık (mm)	Malzeme Nu.	kalınlık (mm)	Malzeme Nu.	kalınlık (mm)
1	16	0.6769	16	0.7012	16	0.4254
2	2	0.6014	2	0.6569	8	1.4362
3	13	0.7576	13	0.7072	5	1.2021
4	12	0.2307	12	0.3833	11	0.8465
5	-	-	-	-	-	-
Zemin	Mİ	Mİ	Mİ	Mİ	Mİ	Mİ
Toplam kalınlık (mm)	2.2669	2.4488	2.4488	3.8403	3.8403	3.8403
Frekans bandı (GHz)	2-8	2-8	2-8	2-8	2-8	2-8
Yansımaya katsayısı (dB) Normal geliş ($\theta_{min} = 0^\circ$) Maks.	-15.89	-15.25	-15.25	-21.693	-21.693	-21.693
Min.	-38.71	-39.69	-39.69	-23.6	-23.6	-23.6
Eğik geliş ($\theta = 60^\circ$) TE&TM						
Maks.	-8.67&-8.71	-8.55&-8.60	-8.55&-8.60	-	-	-
Min.	-9.93&-10.4	-9.9&-10.06	-9.9&-10.06	-	-	-
Eğik geliş ($\theta_{maks} = 75^\circ$) TE&TM						
Maks.	-4.30&-4.25	-	-	-	-	-
Min.	-5.04&-5.38	-	-	-	-	-
Eğik gelen dalga Optimizasyon tekniği	Evet (<-4.30dB) SGA	Evet (<-8.55dB) WDO	Evet (<-8.55dB) WDO	Hayır PSO	Hayır PSO	Hayır PSO

4.5.1.2 Tasarım-2

Frekans aralığı 8-12 GHz ve frekans arttırımı 0.5 GHz olan tasarım-2'nin yansım-frekans grafiği şekil 4.7'da gösterilmiştir.



Şekil 4.7 : 4 Katmanlı 8-12 GHz yansım-frekans grafiği.

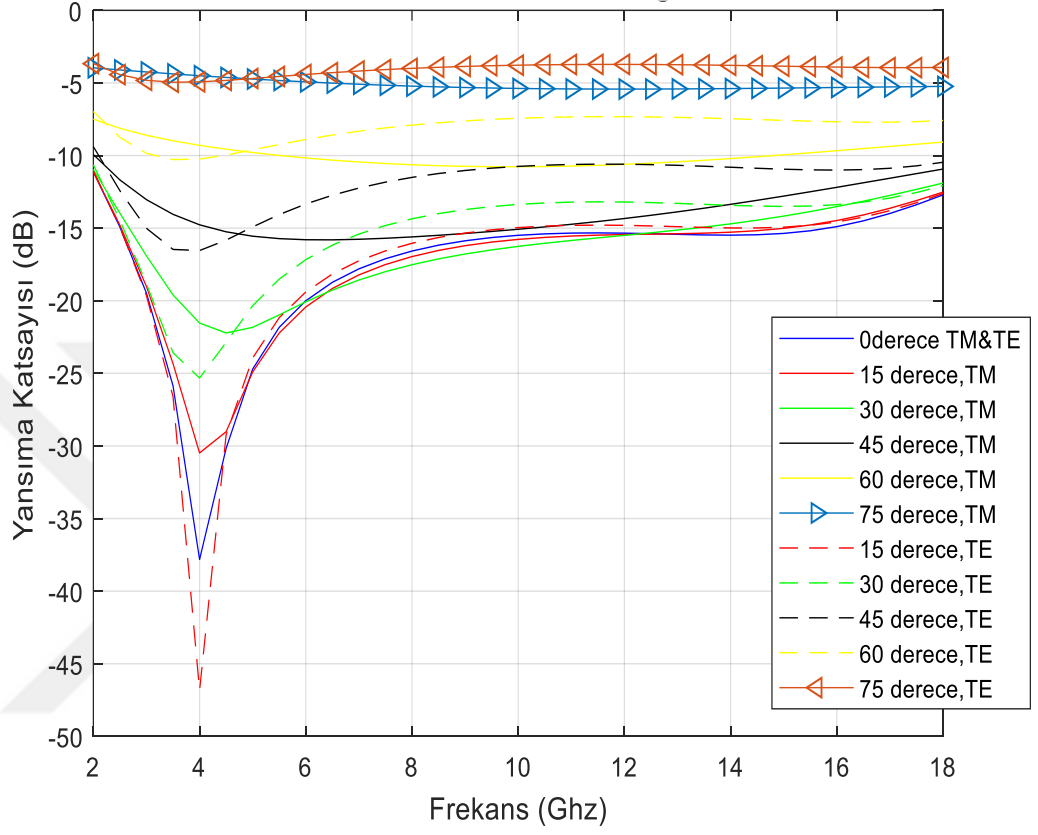
Tasarım-2 ve karşılaştırma yapılan tasarımların verileri çizelge 4.6'da verilmiştir.

Çizelge 4.6 : Tasarım-2 ve diğer tasarımların karşılaştırılması.

Katmanlar	Tasarım-2 (4 katmanlı)		Veri 3[18] (4 katmanlı)		Veri 4[22] (4 katmanlı)		Veri 5[20] (4 katmanlı)	
	Malzeme kalınlık Nu.	(mm)	Malzeme kalınlık Nu.	(mm)	Malzeme Nu.	kalınlık (mm)	Malzeme Nu.	kalınlık (mm)
1	16	0.3728	16	0.2627	6	0.6451	16	0.2769
2	14	0.1190	14	0.2319	2	0.7096	6	1.4678
3	3	0.1006	3	0.1363	2	1.8064	6	0.8269
4	8	0.7038	8	0.6728	3	1.0322	13	0.8937
Zemin	Mİ		Mİ		Mİ		Mİ	
Toplam kalınlık (mm)	1.2964		1.3038		4.1933		3.3653	
Frekans bandı (GHz)	8-12		8-12		8-12		8-12	
Yansımaya katsayısı (dB) Normal geliş ($\theta_{min} = 0^\circ$)	-17.92		-17.38		-17.02		-26.10	
Maks.	-32.47		-39.79		-30		-38	
Min.	-32.47		-39.79		-30		-38	
Eğik geliş ($\theta = 60^\circ$) TE&TM								
Maks.	-9.87&-9.64		-9.27&-9.76		-		-	
Min.	-10.53&-10.35		-9.78&-10.17		-		-	
Eğik geliş ($\theta_{maks} = 75^\circ$) TE&TM								
Maks	-4.70&-4.45		-		-		-	
Min.	-5.43&-5.24		-		-		-	
Eğik gelen dalga	Evet (<-4.45dB)		Evet (<-9.27dB)		Hayır		Hayır	
Optimizasyon tekniği	SGA		WDO		GA		PSO	

4.5.1.3 Tasarım-3

Frekans aralığı 2-18 GHz ve frekans artırımını 0.5 GHz olan tasarım-3'nin yansım-frekans grafiği Şekil 4.8'de gösterilmiştir.



Şekil 4.8 : 2-18 GHz 4 katmanlı frekans yansım grafiği.

Tasarım-3 ve karşılaştırma yapılan tasarımların verileri izelge 4.7'de verilmiştir.

Çizelge 4.7 : Tasarım-3 ve diğer tasarımların değerleri.

Katmanlar	Tasarım-3 (4 katmanlı)		Veri 6[20] (4 katmanlı)	
	Malzeme Nu.	kalınlık (mm)	Malzeme Nu.	kalınlık (mm)
1	16	0.3149	16	0.3038
2	7	1.6989	6	1.0370
3	5	0.2393	5	0.8976
4	14	0.5525	9	0.8011
Zemin		Mİ		Mİ
Toplam kalınlık (mm)		2.8		3.03
Frekans bandı (GHz)		2-18		2-18
Yansımaya katsayısı (dB) Normal geliş ($\theta_{min} = 0^\circ$) Maks.		-13.54		-16.42
Min.		-37.56		-19.15
Eğik geliş ($\theta = 60^\circ$) TE&TM				
Maks.		-6.94&-7.02		-
Min.		-10.68&-11.58		-
Eğik geliş ($\theta_{maks} = 75^\circ$) TE&TM				
Maks.		-3.54&-3.60		-
Min.		-5.13&-6.58		-
Eğik gelen dalga		Evet (<-3.54dB)		Hayır
Optimizasyon tekniği		SGA		PSO

4.5.2 Beş katmanlı mikrodalga soğurucu

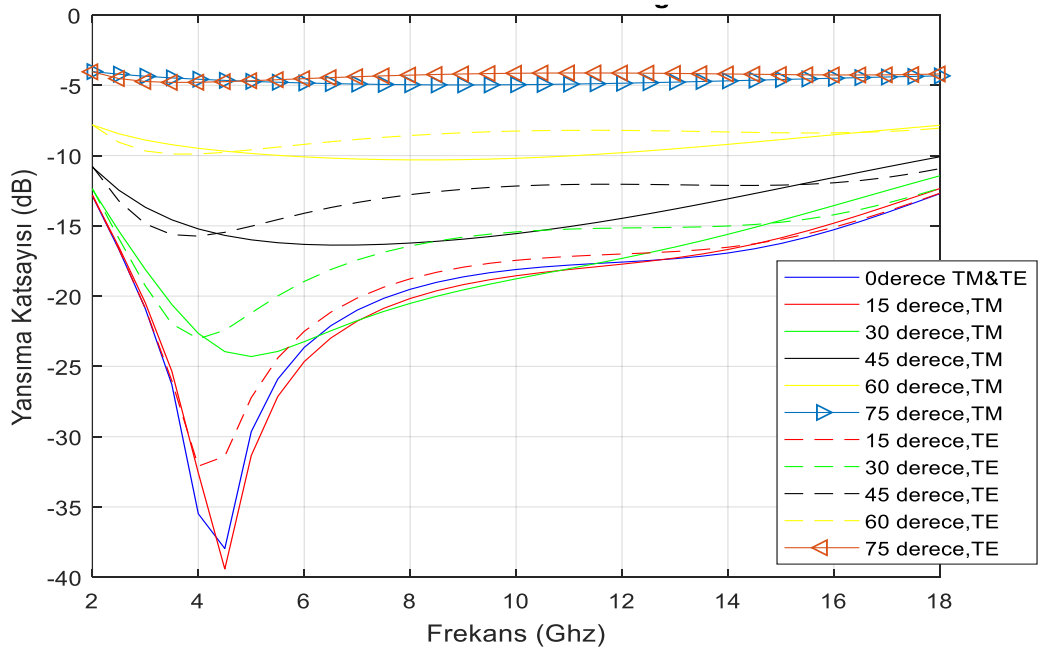
Beş katmanlı mikrodalga soğurucu yapısında tasarım-4 ve tasarım-5 yapıları tasarlanarak diğer optimizasyon teknikleri ile farklı frekans aralıklarında, aynı malzeme kümesi kullanılarak iki tasarım için frekans yansımaları elde edilmiştir. Tasarım-4 için çizelge 4.4'teki girdi parametreleri kullanılırken tasarım-5 için çizelge 4.8'deki girdi değerleri kullanılmıştır.

Çizelge 4.8 : Dik geliş açısı için girdi değerleri.

Parametre Adı	Değer(ler)i
Popülasyon sayısı	1000
Çaprazlama olasılığı	0.9
Mutasyon olasılığı	0.05
Maksimum iterasyon sayısı	100
Malzeme kalınlığı	0.1mm (min.) - 2mm (maks.)
Geliş açısı	0°

4.5.2.1 Tasarım-4

Tasarım-4'te frekans aralığı 2-18 GHz arasında, frekans artış miktarı 0.5 GHz yapılmıştır. Şekil 4.9'da tasarım-4'ün frekans yansımaları gösterilmiştir. Çizelge 4.9'da tasarım-4 için bulunan sonuçlarla, veri[19] 5 katmanlı yapı için karşılaştırması gösterilmiştir.



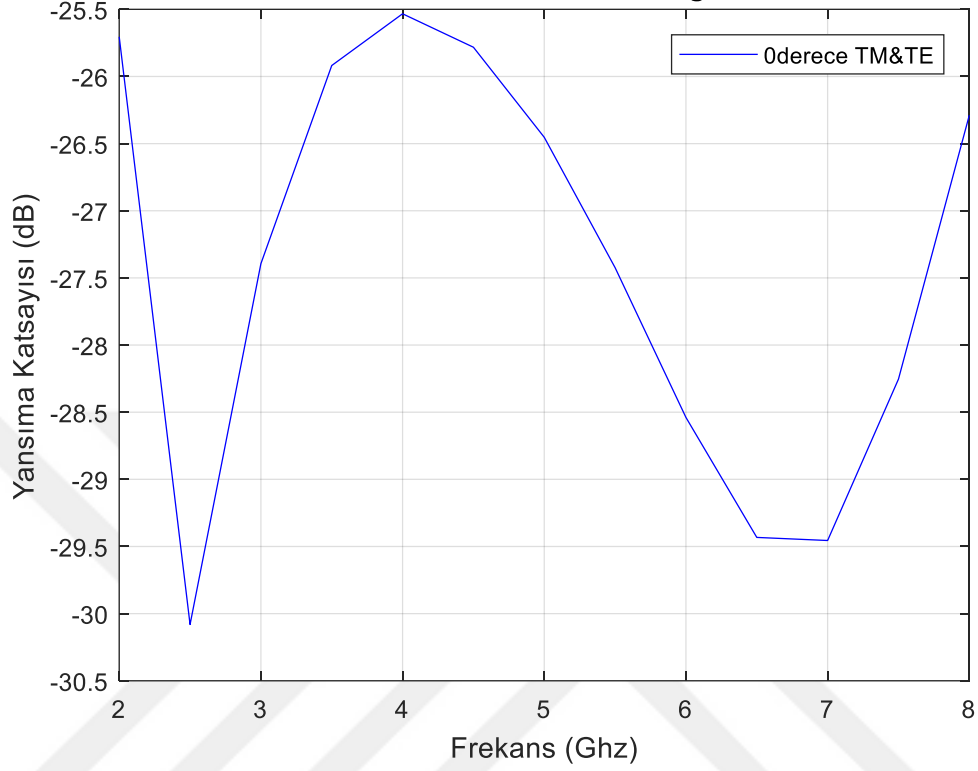
Şekil 4.9 : 2-18 GHz 5 katmanlı yapıya eğik gelen dalganın frekans yansımaları grafiği.

Çizelge 4.9 : Tasarım-4 ve diğer tasarımın değerleri.

Katmanlar	Tasarım-4 (5 katmanlı)		Veri 7[19] (5 katmanlı)	
	Malzeme kalınlık Nu.	(mm)	Malzeme kalınlık Nu.	(mm)
1	16	0.2874	16	0.2205
2	6	0.2822	6	1.8477
3	6	1.0072	16	0.5144
4	6	0.6180	1	1.0325
5	15	0.8893	13	0.9837
Zemin	Mi		Mi	
Toplam kalınlık (mm)	3.08		4.6	
Frekans bandı (GHz)	2-18		2-18	
Yansımaya katsayısı (dB) Normal geliş ($\theta_{min} = 0^\circ$) Maks.	-13.18		-18	
Min.	-38.00		-24	
Eğik geliş ($\theta = 60^\circ$) TE&TM				
Maks.	-8.25&-7.9		-8.24&-8.89	
Min.	-9.87&-10.32		-9.00&-11.47	
Eğik geliş ($\theta_{maks} = 75^\circ$) TE&TM				
Maks.	-4.20&-4.13		-	
Min.	-4.79&-4.96		-	
Eğik gelen dalga	Evet (<-4.13dB)		Evet (<-8.24dB)	
Optimizasyon tekniği	SGA		DE	

4.5.2.2 Tasarım-5

Frekans aralığı 2-8 GHz olan frekans artımı 0.5 GHz için, dik açıyla gelen dalganın frekans-yansıma grafiği şekil 4.10'da gösterilmiştir.



Şekil 4.10 : 2-8 GHz 5 katmanlı yapıya dik gelen dalganın frekans-yansıma grafiği.

Tasarım 5' te 2-8 GHz frekans bandı aralığında frekans artırım aralığı 0.5 GHz için 5 katmanlı yapıya dik gelen dalga için diğer optimizasyon teknikleri ile karşılaştırılması çizelge 4.10'da verilmiştir.

Çizelge 4.10 : Tasarım-5 ve diğer tasarımların değerleri.

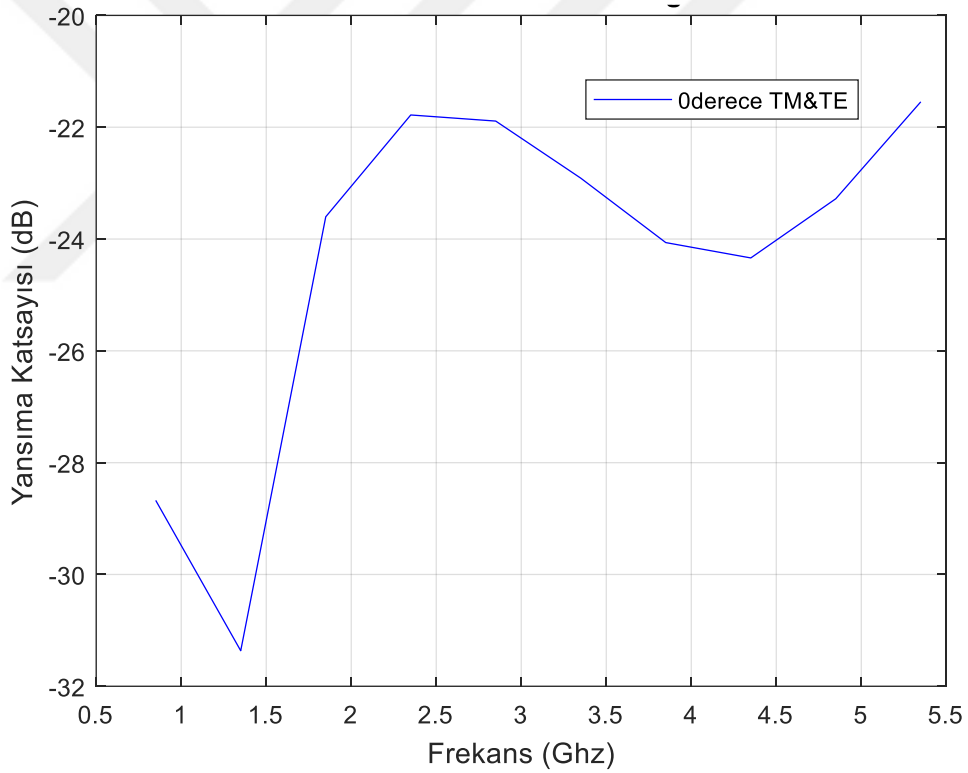
Katmanlar	Tasarım-5 (5 katmanlı)		Veri 8[21] (5 katmanlı)		Veri 9[21] (5 katmanlı)		Veri 10[20] (5 katmanlı)	
	Malzeme kalınlık Nu.	(mm)	Malzeme kalınlık Nu.	(mm)	Malzeme kalınlık Nu.	(mm)	Malzeme kalınlık Nu.	(mm)
1	16	0.3767	16	0.3682	14	0.4626	14	0.455
2	6	1.7037	6	1.9580	6	1.7694	6	1.9955
3	6	0.3148	6	1.1016	6	0.6101	8	0.322
4	6	0.9784	14	0.4834	3	0.7620	5	0.986
5	15	1.4280	15	0.9424	11	1.3709	11	1.128
Zemin		Mİ		Mİ		Mİ		Mİ
Toplam kalınlık (mm)		4.8017		4.8536		4.9751		4.888
Frekans bandı (GHz)		2-8		2-8		2-8		2-8
Yansımaya katsayısı (dB) Normal geliş ($\theta_{min} = 0^\circ$) Maks.		-25.55		-25.85		-23.79		-23.88
Optimizasyon tekniği		SGA		BLSA-SA		LSA		PSO

4.5.3 Üç katmanlı mikrodalga soğurucu

3 katmanlı mikrodalga soğurucu yapısında paralel ve dik kutuplanma için tasarım-6'da sadece dik geliş açısı için, tasarım-7'de ise 0° – 75° açıları arasında 15° 'lik açı arttırımı ile tasarım yapıлып 0.85 GHz - 5.4 GHz frekansları arasında 0.5 GHz frekans arttırımı ile frekans-yansıma grafiği elde edilmiştir. Tasarım-6 için çizelge 4.8'deki ve tasarım-7'de çizelge 4.4'deki girdi değerleri kullanılmış olup, aynı malzemeler aynı sırada kullanılmıştır.

4.5.3.1 Tasarım-6

paralel ve dik kutuplanma için dik geliş açısında frekansa göre yansıma katsayısı aynı olmaktadır. Şekil 4.11'de tasarım-6'nın yansıma frekans grafiği gösterilmiştir.



Şekil 4.11 : 0.85-5.4 GHz 3 katmanlı yapının dik geliş için frekans-yansıma grafiği.

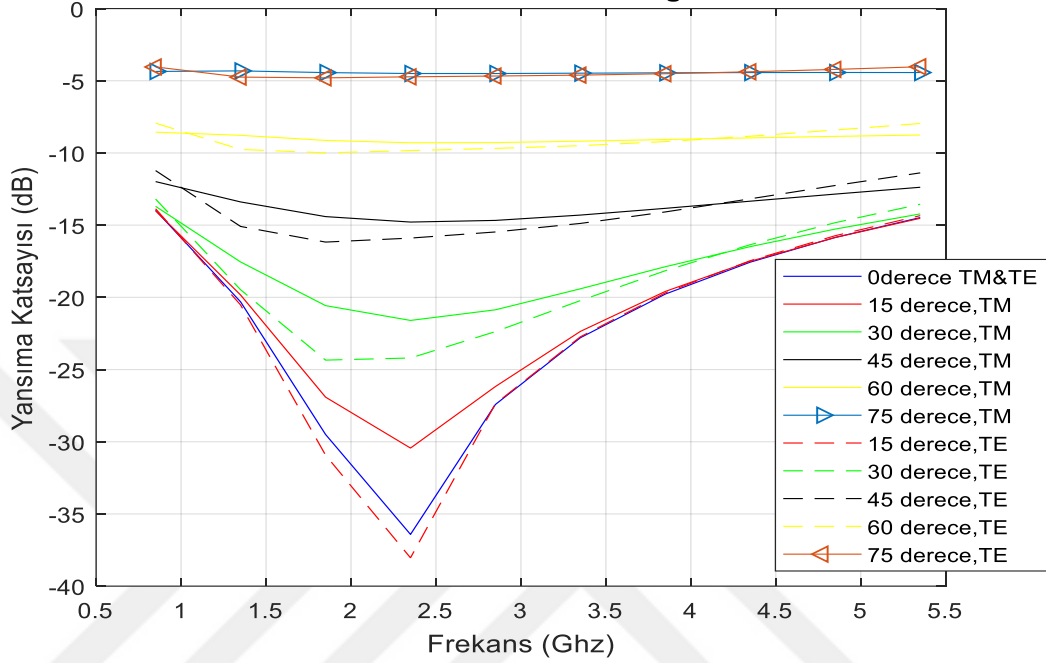
Çizelge 4.11'de tasarım-6 ve diğer tekniklerden elde edilen toplam yapı kalınlığı ve Maksimum yansıma katsayıları verilmiştir.

Çizelge 4.11 : Tasarım-6 ve diğer tekniklerin dik geliş için karşılaştırması.

Katmanlar	Tasarım-6 (3 katmanlı)		Veri 11[21] (3 katmanlı)		Veri 12[21] (3 katmanlı)		Veri 13[20] (3 katmanlı)	
	Malzeme Nu.	kalınlık (mm)	Malzeme Nu.	kalınlık (mm)	Malzeme Nu.	kalınlık (mm)	Malzeme Nu.	kalınlık (mm)
1	16	0.3767	16	0.5996	15	0.8488	16	0.5999
2	3	1.7037	3	1.9990	2	1.0378	3	1.9995
3	4	0.3148	4	1.6299	5	1.9994	4	1.6273
Zemin	Mİ		Mİ		Mİ		Mİ	
Toplam kalınlık (mm)	4.1437		4.2285		3.8860		4.2268	
Frekans bandı (GHz)	0.85 - 5.4		0.85 – 5.4		0.85 – 5.4		0.85 – 5.4	
Yansımaya katsayısı (dB) Normal geliş ($\theta = 0^\circ$) Maks.	-21.55		-21.4668		-18.1918		-21.4625	
Optimizasyon tekniği	SGA		BLSA-SA		LSA		PSO	

4.5.3.2 Tasarım-7

Paralel ve dik kutuplanma için $0^\circ - 75^\circ$ açıları arasında açı artırım aralığı 15° seçilerek tasarım-7'nin frekansa göre yansıma Şekil 4.12'de gösterilmiştir. Tasarım-7'nin yansıma ve katman kalınlık değerleri çizelge 4.12'de gösterilmiştir.



Şekil 4.12 : 0.85-5.4 GHz 3 katmanlı yapının eğik geliş için frekans-yansıma grafiği.

Çizelge 4.12 : Tasarım-7'nin eğik geliş için değerleri.

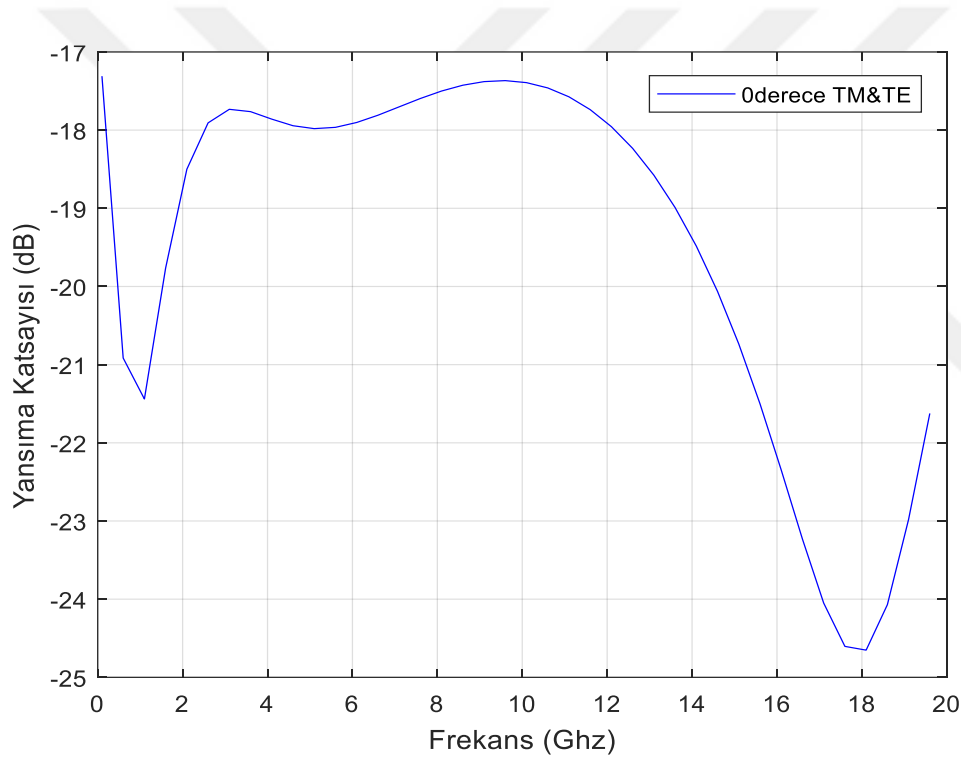
Katman	Tasarım-7 (3 katmanlı)	
	Malzeme Nu.	kalınlık (mm)
1	15	0.9933
2	2	0.7727
3	5	1.8080
Zemin	Mİ	
Toplam kalınlık (mm)	3.574	
Frekans bandı (GHz)	0.85 – 5.4	
Yansıma katsayısı (dB) Normal geliş ($\theta_{min} = 0^\circ$) Maks.	-14.23	
Min.	-36.41	
Eğik geliş ($\theta = 60^\circ$) TE&TM		
Maks.	-7.938 & -8.568	
Min.	-9.995 & -9.297	
Eğik geliş ($\theta_{maks} = 75^\circ$) TE&TM		
Maks.	-4.04 & -4.317	
Min.	-4.8 & -4.434	
Eğik gelen dalga Optimizasyon tekniği	Evet(<-4.04 dB) SGA	

4.5.4 Yedi katmanlı mikrodalga soğurucu tasarımı

Yedi katmanlı mikrodalga soğurucu tasarımında tasarım-8 ve tasarım-9 olarak iki adet tasarım yapılmıştır. Tasarım-8’de dik geliş açısı için, tasarım-9’da dik ve eğik açıyla gelen paralel ve dik kutuplanmalı dalgalar için frekans yansımaya grafiği elde edilmiştir.

4.5.4.1 Tasarım-8

Frekans aralığı 0.1-20 GHz olan frekans artım aralığı 0.5 GHz olan paralel ve dik kutuplanması olan mikrodalga soğurucu yapıya dik gelen dalga için çizelge 4.8’deki girdi değerleri ile şekil 4.13’de frekans-yansımaya grafiği gösterilmiştir.



Şekil 4.13 : 0.1-20 GHz 7 katmanlı yapının dik geliş için frekans-yansımaya grafiği.

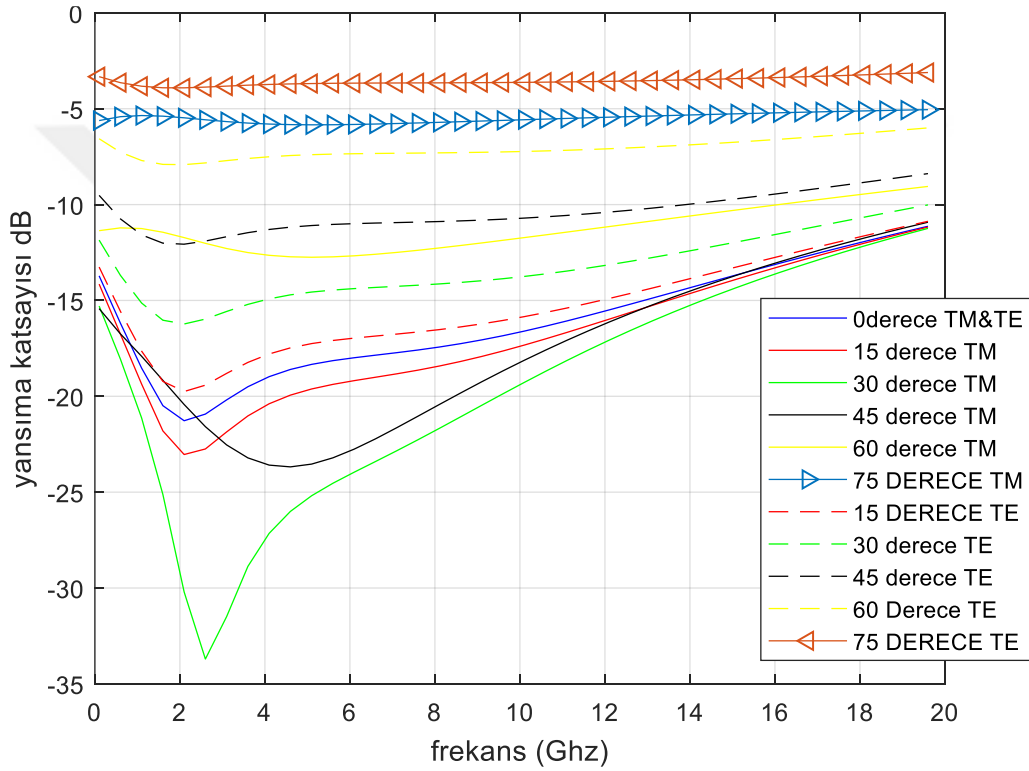
Tasarım-8 için kullanılan sürekli genetik algoritma tekniğinin diğer optimizasyon Teknikleri ile karşılaştırılması çizelge 4.13’te verilmiştir.

Çizelge 4.13 : Tasarım-8 ve diğer tekniklerin dik geliş için karşılaştırılması

Katmanlar	Tasarım-8 (7 katmanlı)		Veri 14[23] (7 katmanlı)		Veri 15[21] (7 katmanlı)	
	Malzeme Nu.	kalınlık (mm)	Malzeme Nu.	kalınlık (mm)	Malzeme Nu.	kalınlık (mm)
1	14	0.200	16	0.2102	14	0.21267
2	6	1.86837	6	1.8485	6	2.1786
3	4	0.60159	14	0.5678	14	0.50102
4	6	0.9048	5	1.6820	6	1.1592
5	4	0.63660	4	1.2007	5	1.7043
6	2	1.18545	4	0.2630	6	2.1965
7	3	0.34266	3	0.0894	5	1.6561
Zemin		Mi		Mi		Mi
Toplam kalınlık (mm)		5.7384		5.861		9.6
Frekans bandı (GHz)		0.1-20		0.1-20		0.1-20
Yansıma katsayısı (dB) Normal geliş ($\theta = 0^\circ$)						
Maks.		-17.44		-17.924		-18.5
Optimizasyon tekniği		SGA		CFO		MLPSO

4.5.4.2 Tasarım-9

Tasarım-9'da çizelge 4.4'teki girdiler kullanılarak yedi katmanlı mikrodalga soğurucu yapısı 0.1GHz-20-GHz aralığında frekans artış aralığı 0.5 GHz için frekans yansımaya grafiği elde edilmiştir. Paralel ve dik kutuplanmada eğik geliş açıları 0° – 75° açıları 15° 'lik açı arttırımı için yedi katmanlı soğurucu modeli diğer tekniklerde yapılmadığı için karşılaştırma yapılmamıştır. Şekil 4.14'te tasarım-9'un frekans-yansımaya grafiği gösterilmiştir.



Şekil 4.14 : 0.1-20 GHz 7 katmanlı tasarımın eğik geliş açıları için frekans-yansımaya grafiği.

Çizelge 4.14'te, tasarım-9'un SGA kullanılarak katman kalınlıkları, dik geliş ve eğik geliş açıları için maksimum-minimum yansımaya katsayısı değerleri verilmiştir. Eğik geliş için herhangi bir veri bulunamadığı için karşılaştırma yapılmamıştır.

Çizelge 4.14 : Tasarım-9'un eğik geliş açıları için değerleri.

Katmanlar	Tasarım-9 (7 katmanlı)	
	Malzeme Nu.	kalınlık (mm)
1	16	0.29184
2	6	0.69558
3	16	0.10397
4	5	1.39472
5	6	0.14254
6	4	1.30243
7	8	0.11614
Zemin	Mİ	
Toplam kalınlık (mm)	4.0477	
Frekans bandı (GHz)	0.1 – 20	
Yansımaya katsayısı (dB) Normal geliş ($\theta_{min} = 0^\circ$) Maks.	-11.20	
Min.	-21.27	
Eğik geliş ($\theta = 60^\circ$) TE&TM		
Maks.	-7.153 & -9.184	
Min.	-7.917 & -12.72	
Eğik geliş ($\theta_{maks} = 75^\circ$) TE&TM		
Maks.	-3.268 & -5.356	
Min.	-3.908 & -5.829	
Eğik gelen dalga Optimizasyon tekniği	Evet (<-3.268dB) SGA	



5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Günümüz gelişen teknolojisinde her alanda olduğu gibi savunma, havacılık, tıp, kablolu-kablosuz haberleşme, elektronik cihaz ve sistemlerde hızlı değişim ve gelişmeler olmaktadır. Bu gelişme süreci içerisinde ilgili alanlarda kullanılan cihaz ve sistemlerin iş yükleri arttığı için performans ihtiyacı gereksinimlerini sağlamak amacıyla daha kompleks ve hızlı cihazlar tasarlanıp son kullanıcıya sunulmaktadır. Cihaz ve sistemlerde artan elektromanyetik girişim (EMG) yüzünden elektromanyetik soğurucu malzemelere (ESM) gün geçtikçe artan bir talep oluşmuştur.

Savunma ve havacılık sektöründe ESM'ler hem EMG'yi azaltmak hem de görünmezlik yani düşman unsurlar tarafından tespit edilememe amacıyla kullanılmaktadır. Savunma ve havacılık sektöründe kullanılan araç-gereçlerin düşman tarafından tespitini zorlaştırmak için radar kesit alanlarının (RKA) mümkün olduğunca düşürülmesi gerekmektedir. Hedeften yansıma ne kadar az olursa düşman tarafından söz konusu araç ve gereçlerin tespiti zor olacaktır. Genel radar denklemi incelendiğinde hedef açısından düşman unsurlara karşı değiştirilebilecek tek parametre RKA'dır. Bu parametre ne kadar az ise hedefin tespiti o derece düşman unsurlar tarafından zor olmaktadır. RKA düşürmek için çeşitli teknikler mevcuttur. Başlıca teknikler mikrodalga soğurucu malzeme (MSM) ile cisimlerin yüzeyini kaplamak ya da RKA'yı azaltacak biçim ve geometride tasarım yapmaktır, Ancak hava araçları için aerodinamik önemli bir performans parametresi olduğu için her şekil ve geometri tasarlanıp kullanılamamaktadır. Bu yüzden RKA'yı azaltmak için cisimler frekansa göre elektriksel ve (ya) manyetik geçirgenliği değişen (meyen) çok katmanlı MSM ile kaplanmaktadır. Mikrodalga soğurucu malzemeler için maliyet ve hava araçlarına uygulandığında aerodinamik faktörler göz önüne alındığında olabildiğince az kalınlıkta ve yansıma katsayısı olabildiğince düşük olan yapıların elde edilebilmesi için optimizasyon tekniklerine ihtiyaç duyulmuştur.

Tez çalışması kapsamında sürekli genetik algoritma (SGA) tekniği kullanılarak daha önceden tanımlanmış frekansa göre elektriksel ve manyetik geçirgenliği sabit olan

kayıpsız dielektrik, frekansa göre manyetik geçirgenliği değişen kayıplı manyetik malzeme, elektriksel geçirgenliği değişen kayıplı dielektrik malzeme ve manyetik geçirgenliği değişen relaksasyon tipi manyetik malzemelerin oluşturduğu toplam onaltı adet malzeme kullanılmıştır. Bütün tasarımların en alt katmanına mükemmel iletken (Mİ) yerleştirilmiştir. SGA optimizasyon tekniğinde istenilen açı aralığı ve frekans aralığında popülasyondaki herbir katmanın kalınlık değerleri kullanılarak önce katmanlar arasındaki yansımaya katsayısını daha sonra yapı ile hava ortamı arasındaki yansımaya katsayısını özyinelemeli biçimde hesaplayan Chew's formülü kullanılarak toplam yansımaya katsayısı dB olarak elde edilmiştir. Toplam yansımaya katsayısı hesaplanırken kutuplanma türüne göre paralel kutuplama (TM modunda), için mükemmel iletken yansımaya katsayısı değeri +1, dik kutuplanma (TE modunda) için mükemmel iletken yansımaya katsayısı değeri -1 alınmıştır. Tasarımların elde edilen toplam yansımaya katsayıları ile katmanların toplam uzunluğu maliyet fonksiyonunda hesaplanarak ilgili açı ve frekans değerleri için minimum maliyeti sağlayan yansımaya ve kalınlık değerinin SGA ile bulunması amaçlanmıştır.

Kullanıcının parametrelerini girebilmesi için MATLAB'de kullanıcı arayüzü oluşturulup SGA'nın temel parametreleri olan polulasyon sayısı, çaprazlama ve mutasyon oranı kullanıcı arayüzünden bütün tasarımlar için girilmiş, her bir tasarım için program arayüzünden iterasyon sayısı 100 girilerek program 20 defa çalıştırılmıştır. Sonuç olarak en az katman kalınlığı ve minimum yansımaya katsayısını veren en iyi çözüm kümesinde elde edilmiş ve her katmanın kalınlık değeri optimizasyon işleminden sonra kullanıcıya arayüzde gösterilmiştir.

Programın doğru çalıştığını kontrol etmek için literatürde önceden yapılmış beş katmanlı tasarımı oluşturan malzemeler ve bu malzemelerin kalınlıkları kullanılarak paralel ve dik kutuplanma için frekans aralığı 2-8 GHz, frekans artırım aralığı 0.5 GHz, $0^\circ - 60^\circ$ arasında 15° açı artırımı ile aynı frekans-yansımaya grafiği elde edilip gösterilmiştir.

Dört katmandan oluşan tasarım-1, tasarım-2 ve tasarım-3 farklı frekans aralıklarında frekanslar 0.5 GHz artırılarak $0^\circ - 75^\circ$ (başlangıç-bitiş açıları dahil) açıları arasında 15° açı artırımı için paralel ve dik kutuplanmada aynı anda SGA optimizasyonuna tabi tutulup üç tasarım için de $0^\circ, 60^\circ$ ve 75° açıları için minimum ve maksimum yansımaya değerleri ve toplam katman kalınlıkları, tasarım-1 için 2-8 GHz aralığında wind driven optimization (WDO), differential equation (DE) ve parçacık sürü optimizasyonu (PSO) ile, tasarım-2 için 8-12 GHz aralığında WDO, DE ve PSO ile,

tasarım-3 için 2-18 GHz aralığında DE ve PSO optimizasyon teknikleri ile karşılaştırma yapılmıştır. Dört katmanlı mikrodalga soğurucu yapısında tasarlanan tasarım-1, tasarım-2 ve tasarım-3 için karşılaştırma yapılan diğer tekniklerde 75° geliş açısı için literatürde veriye rastlanmamış olup üç tasarımda da her iki kutuplanma için 75° geliş açısında en yüksek yansımaya katsayısı elde edilmiştir.

Beş katmandan oluşan çok katmanlı mikrodalga soğurucu yapısı için tasarım-4 ve tasarım-5 yapıları tasarlanmıştır. Tasarım-4'te paralel ve dik kutuplanma için SGA uygulanıp 2-18 GHz frekans aralıklarında $0^{\circ} - 75^{\circ}$ (başlangıç-bitiş açısı dahil) açıları arasında her 15° açı ve 0.5 GHz frekans artırımında 0° , 60° ve 75° açıları için minimum ve maksimum yansımaya değerleri ve toplam katman kalınlığı değerleri, DE optimizasyon tekniğinin sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Tasarım-4 ve DE optimizasyon tekniğinin sonuçları karşılaştırıldığında daha ince bir tasarım elde edilmiş, her iki kutuplanma için 75° geliş açısında DE tekniğinde karşılaştırma verisi bulunamamıştır, Tasarım-4'de en yüksek yansımaya katsayısı 75° geliş açısında elde edilmiştir. Tasarım-5 te dik gelen dalga için 2-8 GHz aralığında frekans 0.5 GHz artırılarak maksimum yansımaya katsayısı ve toplam katman kalınlığı BLSA-SA, lightning search algorithm (LSA) ve PSO optimizasyon tekniklerinin sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırmada diğer üç teknikten daha ince bir yapı ve LSA ve PSO tekniklerinden daha düşük yansımaya katsayısı elde edilmiştir.

Üç katmanlı mikrodalga soğurucu yapısı için tasarım-6 ve tasarım-7 sonuçları verilmiştir. Tasarım-6' da frekans 0.85-5.4 GHz arasında 0.5 GHz arttırılarak dik gelen dalga için BLSA-SA, LSA, PSO teknikleri ile yapılan karşılaştırmada en düşük yansımaya katsayısı elde edilmiştir. Tasarım-7'de 0.85-5.4 GHz frekansları arasında frekans 0.5 GHz arttırılarak 0° , 60° ve 75° açıları için paralel ve dik kutuplanmada maksimum ve minimum yansımaya katsayıları gösterilmiştir. Diğer eğik geliş açıları için diğer tasarımlarda olduğu gibi tasarım-7 de maksimum yansımaya katsayısı 75° açı değerinde bulunmuştur. Yedi katmanlı mikrodalga soğurucu için tasarım-8 ve tasarım-9 yapıları tasarlanmıştır. Bu tasarımların tasarlandığı frekans aralığı diğer tasarımların frekans aralığına göre en büyük olanıdır. Kullanıcı arayüzünden frekans aralığı 0.1-20 GHz ve frekans artış miktarı 0.5 GHz girilmiştir. Tasarım-8 için ilgili frekans aralığında karşılaştırma yapılan CFO ve MLPSO optimizasyon tekniklerinin verdiği katman kalınlık değerlerine göre tasarım-8 en ince katman kalınlığına sahip tasarım olmuştur. Karşılaştırma yapılan CFO ve MLPSO optimizasyon tekniklerinde

eğik geliş için literatürde herhangi bir veri bulunamadığından karşılaştırma yapılamamıştır.

Tasarım-9'da yedi katmanlı yapı için girilen frekans ve frekans artış aralığında her iki kutuplanma türü için 15° açı arttırım aralığında $0^\circ, 60^\circ$ ve 75° açıları için maksimum ve minimum yansıma katsayıları elde edilmiş olup en yüksek yansıma katsayısı önceki tasarımlarda olduğu gibi 75° için elde edilmiştir. Eğik geliş için yapılan tasarımların hepsinde en yüksek yansıma katsayısı paralel ve dik kutuplanma için 75° geliş açısında elde edilmiş olup, diğer optimizasyon tekniklerine ait 75° için herhangi bir veri yoktur. Yapılan 9 tasarımın hepsinde 0° geliş açısı için paralel ve dik kutuplanmada aynı yansıma katsayıları elde edilmiştir. SGA optimizasyon tekniğinde eğik geliş açıları için yapılan tasarımlarda 45° üzerindeki geliş açılarında minimum yansıma katsayısının -10 dB altına indiği gözlemlenmemiştir.

SGA optimizasyonunun verimli çalışması için popülasyon sayısının çift sayı girilmesi çaprazlama işleminde eşleşmenin daha kolay yapılmasını sağlamıştır. SGA optimizasyon tekniğinde herbir katmanın kalınlığına bağlı olarak elde edilen yansıma katsayısını ve katman kalınlıklarını minimize etmek temel amacı oluşturmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] **Munk, B. A.** (2009). *Metamaterials: Critique and Alternatives*. Hoboken, NJ:John Wiley & Sons.
- [2] **Veselago, V. G.** (1968). The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of *Soviet Physics: Uspeshki* 10, 509.
- [3] **Vu, D. Q., Le, D. H., Dinh, H. T., Trinh, T. G., Yue, L. , Le, D. T. and Vu, D. L.** (2018). Broadening the absorption bandwidth of metamaterial absorber by coupling three dipole resonances. *Physica B: Condensed Matter* 534, 90-94.
- [4] **Caloz, C. and Itoh, T.** (2005). *Electromagnetic Metamaterials Transmission Line Theory and Microwave Applications*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- [5] **Tirkey, M. M. and Gupta, N.** (2019). The quest for perfect electromagnetic absorber: a review. *International Journal of Microwave and Wireless Technologies* 11, 151–167.
- [6] **Munaga, P., Ghosh, S., Bhattacharrya, S. and Srivastava, K. V.** (2016). A fractal-based compact broadband polarization insensitive metamaterial absorber using lumped resistors. *Microwave and Optical Tehnology Letters* 58, 343-347.
- [7] **Montaser, A. M.** (2016). Design of metamaterial absorber for all bands from microwave to terahertz ranges. *Int J. Adv. Res. Electron. Commun Eng.* 5, 1475-1481.
- [8] **Landy, N. I., Sajuyigbe, S., Mock, J., Smith, D. and Padilla, W.** (2008). Perfect metamaterial absorber. *Physical Review Letters* 100, 207402.
- [9] **Fante, R. L. and McCormack, M. T.** (1988). Reflection properties of the Salisbury screen. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 36, 1443-1454.
- [10] **Tong, X. C.** (2016). *Advanced Materials and Design for Electromagnetic Interference Shielding*. Boca Raton, FL:CRC Press.
- [11] **Xiao, Z. Y., Liu, D. J., Ma, X. I. and Wang, Z. H.** (2015). Multi-band transmissions of chiral metamaterials based on Fabry-Perot like resonators. *Optics Express* 23, 7053-7061.
- [12] **Wang, B., Koschny, T. and Soukoulis, C. M.** (2009). Wide-angle and polarization-independent chiral metamaterial absorber. *Physical Review B* 80, 033108
- [13] **Cheng, Y., Yang, H., Cheng, Z. and Wu, N.** (2011). Perfect metamaterial absorber based on a split-ring-cross resonator. *Applied Physics A: Materials* 102, 99–103

- [14] **Bian, B., Liu, S., Wang, S., Kong, X., Zhang, H., Ma, B. and Yang, H.** (2013). Novel triple-band polarization-insensitive wide-angle ultra-thin microwave metamaterial absorber. *Journal of Applied Physics* 114, 194511.
- [15] **Ayop, O. B., Abd Rahim, M. K., Murad, N. A., Samsuri, N. A. and Dewan, R.** (2014). Triple band circular ring-shaped metamaterial absorber for X-band applications. *Progress in the Electromagnetic Research M* 39, 65–75.
- [16] **Zhang, X. and Wu, Y.** (2015) Effective medium theory for anisotropic metamaterials. *Scientific Reports* 5, 7892.
- [17] **Shen, X., Yang, Y., Zang, Y., Gu, J., Han, J., Zhang, W., Jun Cui, T.** (2012). Triple-band terahertz metamaterial absorber: design, experiment, and physical interpretation. *Applied Physics Letters* 101, 154102.
- [18] **P, Ranjan., A, Choubey., S Kumar, Mahto.** (2017). A Novel approach for Optimal Design of Multilayer Wideband Microwave Absorber Using Wind Driven Optimization Technique, *International journal of Electronics and Communications*. Vol. 83, 81-87
- [19] **N. I. Dib, M. Asi, and A. Sabbah** (2010). On the Optimal Design of Multilayer Microwave Absorbers, *Progress In Electromagnetics Research C*, Vol. 13, 171-185.
- [20] **S. Roy, S. D. Roy, J. Tewary, A. Mahanti, and G. K. Mahanti,** (2015). Particle Swarm Optimization for Optimal Design of Broadband Multilayer Microwave Absorber for Wide Angle of Incidence, *Progress In Electromagnetics Research B*, Vol. 62, 121-135.
- [21] **Y. Lu and Y. Zhou,** (2017). Design of Multilayer Microwave Absorbers Using Hybrid Binary Lightning Search Algorithm and Simulated Annealing, *Progress In Electromagnetics Research B*, Vol. 78, 75-90.
- [22] **Jiang, L., Cui, j., Shi, L., Li, X.** (2009). Pareto optimal design of multilayer microwave absorbers for wide for wide angle incidence using genetic algorithms, *IET Microw Anten Propagat.*,3: 572-9.
- [23] **Asi, M. J. and N. I. Dib** (2010). Design of multilayer microwave broadband absorbers using central force optimization *Progress In Electromagnetics Research B*, Vol. 26, 101.
- [24] **V. G. Borkar, A. Ghosh, R. K. Singh and N. Chourasia** (2010). Radar Cross Section Defence Science Journal, Vol. 60, No. 2, pp. 204 – 212.
- [25] **Url-1** <<http://www.radartutorial.eu/01.basics/Radar%20Denklemi.tr.html>> erişim tarihi: 18.04.2019.
- [26] **Chen, J., Hu, Z., Wang, G., Huang, X., Wang, S., Hu, X. and Liu, M.** (2015). High-impedance surface-based broadband absorbers with interference theory. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 63, 4367–4374.
- [27] **He, Y., Jiang, J., Chen, M., Li, S., Miao, L. and Bie, S.** (2016). Design of an adjustable polarization-independent and wideband electromagnetic absorber. *Journal of Applied Physics* 119, 105103

- [28] **Bu, D. D., Yue, C. S., Zhang, G.Q., Hu, Y.T. and Dong, S.** (2015). Broadband, polarization-insensitive, and wide-angle microwave absorber based on resistive film. *Chinese Physics B* 25, 067802.
- [29] **Sun, H., Gu, C., Chen, X., Li, Z., Liu, L., Xu, B. and Zhou, Z.** (2017). Broadband and broad-angle polarization-independent metasurface for radar cross section reduction. *Scientific Reports* 7, 40782.
- [30] **Kim, H.K., Lee, D. and Lim, S.** (2016). Wideband-switchable metamaterial absorber using injected liquid metal. *Scientific Reports* 6, 31823.
- [31] **Huang, X., Pan, K. and Hu, Z.** (2016). Experimental demonstration of printed graphene nano-flakes enabled flexible and conformable wideband radar absorbers. *Scientific Reports* 6, 38197.
- [32] **Ozden, K., Yuçedag, O. M. and Kocer, H.** (2016). Metamaterial based broadband RF absorber at X-band. *AEU-International Journal of Electronics and Communications* 70, 1062–1070.
- [33] **Li, Y. Q., Zhang, H., Fu, Y. Q. and Yuan, N. C.** (2008). RCS reduction of ridged waveguide slot antenna array using EBG radar absorbing material. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters* 7, 473–476.
- [34] **Liu, X., Tyler, T., Starr, T., Starr, A. F., Jokerst, N. M. and Padilla, W. J.** (2011). Taming the blackbody with infrared metamaterials as selective thermal emitters. *Physical Review Letters* 107, 045901.
- [35] **Hamm, J. M., Wuestner, S., Tsakmakidis, K. L. and Hess, O.** (2011). Theory of light amplification in active fishnet metamaterials. *Physical Review Letters* 107, 167405.
- [36] **Namai, A., Sakurai, S., Nakajima, M., Suemoto, T., Matsumoto, K., Goto, M., Sasaki, S. and Ohkoshi, Si.** (2008). Synthesis of an electromagnetic wave absorber for high-speed wireless communication. *Journal of the American Chemical Society* 131, 1170–1173.
- [37] **Pretorius, J.** (2004). Design and manufacture of a ferrimagnetic wave absorber for cellular phone radiations. In *Electron Devices for Microwave and Optoelectronic Applications, 2004. EDMO 2004. 12th International Symposium on*, IEEE, 119–123.
- [38] **David, K. Cheng** (1983) *Field and Wave Electromagnetics*. Addison Wesley Publishing Company. pp 332-361, ISBN 0-201-01239-1.
- [39] **Url-2 Onur Karasoy, Serkan Ballı.** < <https://ab.org.tr/ab16/sunum/202.pdf>> erişim tarihi: 19.04.2019.
- [40] **Randy, L., Haupt, Sue Ellen Haupt** (2004) *Practical Genetic Algorithms 2. Edition*, A John Wiley & Sons, Inc..
- [41] **Nitasha Soni, Dr. Tapas Kumar** (2004) Study of Various Mutation Operators in Genetic Algorithms. *International Journal of Computer Science and Information Technologies*, Vol. 5 (3) 4519-4521
- [42] **S. N. Sivanandam and S. N. Deepa** (2007)., *Introduction to Genetic Algorithms*, Springer, ISBN 9783540731894.



ÖZGEÇMİŞ



Ad-Soyad : Kadir Orkun mısır

Doğum Tarihi ve Yeri : 28.03.1984 / İstanbul

E-posta : kmisir@thy.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2008 / Başkent Üniversitesi / Elektrik-Elektronik Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2012-2018 Havelsan Teknoloji Radar (HTR) firmasında kıdemli uzman radar mühendisi.
- 2018-halen THY Teknik AŞ. ARGE başkanlığı uçuşa elverişlilik mühendisi.