

**SOĞURUCU FREKANS SEÇİCİ YÜZEY TASARIMI**

**ABSORPTIVE FREQUENCY SELECTIVE SURFACE  
DESIGN**

**AKIN ÖZKAN**

**PROF. DR. BİRSEN SAKA TANATAR**

**Tez Danışmanı**

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı için Öngördüğü

DOKTORA TEZİ olarak hazırlanmıştır.

2024

*Aileme...*

# ÖZET

## SOĞURUCU FREKANS SEÇİCİ YÜZEY TASARIMI

Akın ÖZKAN

**Doktora, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Birsen SAKA TANATAR**

**Temmuz 2024, 107 sayfa**

Tez çalışması kapsamında 11 GHz merkezli geniş iletim bantlı, düşük frekans bölgesinde geniş soğurma bandına sahip soğurucu frekans seçici yüzey tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan soğurucu frekans seçici yüzey çift polarizasyonda çalışma özelliğine sahiptir. Soğurucu frekans seçici yüzeyin birim eleman rezonatörleri, geniş iletim bandı ve çift polarizasyonda çalışma özellikleri düşünülerek, alternatif yapıların analizleri sonucunda kararlaştırılmıştır. Soğurucu yüzey rezonatörü için özgün sekizgen mikroşerit rezonatör yapısı önerilmiştir; bant geçiren yüzey için üç katlı sekizgen yama-yarık-yama rezonatör yapısı önerilmiştir.

Literatürdeki soğurucu frekans seçici yüzey tasarım çalışmalarında birim eleman rezonatörlerin sentezi ardışık tahmin, analiz ve güncelleme işlemleri sonucunda gerçekleştirilmektedir. Bu çalışmada, literatürdeki sentez sürecine alternatif olarak, soğurucu yüzey rezonatörü sentezi genetik algoritma ile gerçekleştirilmektedir. Tasarlanan genetik algoritma, sentezlenen rezonatörün hedeflenen frekans tepkisi performansını sağladığını ve üretimi gerçekleştirilebilir geometri oluşturulduğunu kontrol

etmektedir. Alternatif genetik algoritma metotları ve farklı frekans tepkisi performans hedefleri denenerek algoritmanın sentez performansı ve önerilen rezonatörün farklı frekans tepkisi hedeflerini sağlama kabiliyeti test edilmiştir.

Genetik algoritma sentezi ile tasarlanan soğurucu frekans seçici yüzeyin frekans tepkisi elektromanyetik analizi, dikey ve yatay polarizasyonda çalışma durumları ile yüzeye dik ve açılı geliş durumları için gerçekleştirilmiştir. Dik geliş açısı için soğurucu yüzey ve bant geçiren yüzeylerde oluşan yüzey akımı ve elektrik alan dağılımı elektromanyetik analiz ile incelenmiştir.

Tasarlanan soğurucu frekans seçici yüzeyin elektromanyetik analiz frekans tepkisinin 1-dB iletim bandı 9.63 GHz ve 13.10 GHz aralığındadır; 1-dB bant genişliği 3.47 GHz'dir, bant genişliğinin merkez frekansa oranı %32'dir. 3-dB iletim bandı 9.02 GHz ve 13.45 GHz aralığındadır; 3-dB bant genişliği 4.43 GHz'dir, bant genişliğinin merkez frekansa oranı %40'tır. Analiz sonucu bant içindeki en düşük iletim kaybı değeri 0.66 dB'dir.

Tasarlanan soğurucu frekans seçici yüzeyin üretimi 1x2 birimlik yüzeyler ile gerçekleştirilmiştir. Üretilen soğurucu frekans seçici yüzeyin frekans tepkisi ölçümü WR-90 dalga kılavuzu içerisinde, X-bant spektrumunda gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen ölçüm sonucunda 1-dB iletim bandı 9.38 GHz ve 12.55 GHz aralığındadır; 1-dB bant genişliği 3.17 GHz'dir, bant genişliğinin merkez frekansa oranı %29'dur. 3-dB iletim bandı 9.14 GHz ve 12.88 GHz aralığındadır; 3-dB bant genişliği 3.74 GHz'dir, bant genişliğinin merkez frekansa oranı %34'tür. Ölçüm sonucu bant içindeki en düşük iletim kaybı değeri 0.65 dB'dir.

**Anahtar Kelimeler:** Soğurucu frekans seçici yüzey, genetik algoritma sentezi, radar kesit alanı, geniş bantlı, mikroşerit rezonatör

# **ABSTRACT**

## **ABSORPTIVE FREQUENCY SELECTIVE SURFACE DESIGN**

**Akın ÖZKAN**

**Doctor of Philosophy, Department of Electrical and Electronics Engineering**

**Supervisor: Prof. Dr. Birsen SAKA TANATAR**

**July 2024, 107 pages**

In this study, 11 GHz centered absorptive frequency selective surface is designed with wide transmission band, and wide absorption band at lower frequency spectrum. Designed absorptive frequency selective surface has dual polarization operation capability. Unit element resonators of absorptive frequency selective surface are proposed in order to provide wideband and dual polarization operation, after analyzing possible alternative forms. Novel octagon shaped structure is proposed for resistive layer resonator; and three layered octagon shaped patch-slot-patch structure is proposed for bandpass layer resonator.

In literature, unit element resonators of absorptive frequency selective surfaces are synthesized after successive iterations of guess, analysis and update processes. In this study an alternative method is proposed, and unit element resonator of resistive layer is synthesized by genetic algorithm code. During synthesis process, genetic algorithm code controls that synthesized resonator provides targeted frequency response performance and geometry of synthesis is realizable. Synthesis performance of genetic algorithm code

is tested for alternative algorithm methods, and capability of proposed resonator is tested for different frequency response performance targets.

Designed absorptive frequency selective surface response is analyzed by electromagnetic analysis for horizontal and vertical polarization cases, and for normal and oblique incidence. For normal incidence, surface current and electric field distribution of resistive layer and bandpass layers are investigated.

Electromagnetic analysis response of designed absorptive frequency selective surface has 3.47 GHz 1-dB bandwidth which is 32% compared to center frequency. 1-dB cutoff frequencies are 9.63 GHz and 13.10 GHz. It has 4.43 GHz 3-dB bandwidth which is 40% compared to center frequency. 3-dB cutoff frequencies are 9.02 GHz and 13.45 GHz. Lowest insertion loss in transmission band is 0.66 dB.

Absorptive frequency selective surface is manufactured as 1x2 unit layers; and measured using WR-90 waveguide test setup for X-band spectrum. Measured frequency response has 3.17 GHz 1-dB bandwidth which is 29% compared to center frequency. 1-dB cutoff frequencies are 9.38 GHz and 12.55 GHz. 3-dB bandwidth is 3.74 GHz which is 34% compared to center frequency. 3-dB cutoff frequencies are 9.14 GHz and 12.88 GHz. Lowest insertion loss measured in transmission band is 0.65 dB.

**Keywords:** Absorptive frequency selective surface, genetic algorithm synthesis, radar cross section, wideband, microstrip resonator

## TEŞEKKÜR

Lisansüstü eğitimim süresince ve tüm tez çalışması aşamalarında değerli görüşleri, yönlendirmeleri ve anlayışlı yaklaşımı ile bu çalışmanın gerçekleşmesini sağlayan tez danışmanım Prof. Dr. Birsen SAKA TANATAR'a şükranlarımı sunarım.

Tez izleme komitelerinde ve tez çalışması sürecinde değerli görüşleriyle bu çalışmaya önemli katkılar sunan Prof. Dr. Özlem ÖZGÜN ve Prof. Dr. Asım Egemen YILMAZ'a teşekkürlerimi sunarım.

Tez savunma sınavına katılarak değerli görüşleriyle bu çalışmaya önemli katkı sunan Prof. Dr. Erdem YAZGAN ve Prof. Dr. Çiğdem Seçkin GÜREL'e teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışması aşamasında değerli fikirleriyle bu çalışmada katkıları olan Ali İhsan ÇUBUKÇU, Salih Can AKSOY ve Dr. Ceyhun KELLEÇİ'ye teşekkürlerimi sunarım. Tez çalışması kapsamında, üretim ve ölçüm altyapısını kullandığım şirketim Meteksan Savunma Sanayi A.Ş.'ye ve şirket bünyesinde üretimleri gerçekleştiren Yiğitcan KABA'ya teşekkürlerimi sunarım.

Hayatım boyunca desteklerini her zaman hissettiğim, bu çalışmanın gerçekleşmesini sağlayan Aylın, Hülya ve Savaş ÖZKAN'a en derin minnet duygularıyla teşekkür ederim.

Akın ÖZKAN

Temmuz 2024, Ankara

# İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT .....	iii
TEŞEKKÜR .....	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xv
1. GİRİŞ .....	1
2. SOĞURUCU FREKANS SEÇİCİ YÜZEY ÇALIŞMA PRENSİBİ.....	5
3. SENTEZ.....	10
3.1. Soğurucu Yüzey Sentezi .....	13
3.1.1. Genetik Algoritma Tasarımı.....	13
3.1.1.A. Boyut Maliyet Fonksiyonları.....	18
3.1.1.B. Frekans Tepkisi Maliyet Fonksiyonları .....	22
3.1.2. Genetik Algoritma Sentezi .....	26
3.1.3. Genetik Algoritma Tasarımında Alternatif Metotların İncelenmesi .....	33
3.1.3.A. GA Kodu Mutasyon Algoritması Alternatifleri .....	37
3.1.3.A.1. Mutasyon İçermeyen GA Kodu .....	37
3.1.3.A.2. Son Yirmi Sıradaki Kromozomu Mutasyona Uğrayan GA Kodu .....	38
3.1.3.A.3. Son On Sıradaki Kromozomu Mutasyona Uğrayan GA Kodu .....	39
3.1.3.A.4. Tüm Kromozomları Mutasyona Uğrayan GA Kodu.....	40
3.1.3.A.5. Son Otuz Sıradaki Kromozomunun İki Biti Mutasyona Uğrayan GA Kodu .....	41
3.1.3.B. GA Kodu Eşleşme Algoritması Alternatifleri .....	43
3.1.3.B.1. Beşer Kromozomlu Eşleşmeye Sahip GA Kodu .....	43
3.1.3.B.2. Onar Kromozomlu Eşleşmeye Sahip GA Kodu .....	44
3.1.3.B.3. Blok Halinde Eşleşme-1 .....	45
3.1.3.B.4. Blok Halinde Eşleşme-2 .....	46
3.1.3.C. GA Kodu Kromozom Sayısı Değişimi .....	46



3.1.3.C.1. Yirmi Kromozumlu GA Kodu .....	46
3.1.3.C.2. Seksen Kromozumlu GA Kodu .....	47
3.1.3.D. Frekans Tepkisi Maliyet Fonksiyonu Değişimi .....	49
3.1.3.D.1. Altıncı Maliyet Fonksiyonu M6'nın Alt Limitinin -15 dB'ye Çekilmesi .....	49
3.1.3.D.2. Altıncı Maliyet Fonksiyonu M6'nın Alt Limitinin -12 dB'ye Çekilmesi .....	50
3.1.3.D.3. Dokuzuncu Maliyet Fonksiyonu M9'un Frekans Aralığının 9-11 GHz Aralığına Çekilmesi.....	51
3.2. Bant Geçiren Yüzey Sentezi .....	54
3.3. Ara Dielektrik Katman Hesaplaması .....	55
4. EM ANALİZ.....	57
4.1 Frekans Tepkisi ve Yüzey Alanları EM Analizi.....	57
4.2 GA Tasarımı Boyut Maliyet Fonksiyonları Aralıklarının Belirlenmesi Amacıyla Gerçekleştirilen EM Analiz .....	90
5. ÜRETİM VE ÖLÇÜM .....	95
6. SONUÇ VE TARTIŞMA .....	106
Kaynaklar.....	108

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 Soğurucu frekans seçici yüzey katmanları.....	5
Şekil 2.2 İdeal soğurma şartının sağlanması için $Z_r$ empedansının alması gereken değerlerin frekansa bağlı değişimi.....	9
Şekil 3.1 Soğurucu yüzey rezonatörü, rezonatör boyutu (u) ve birim eleman periyodu (p) .....	11
Şekil 3.2 Altıgen rezonatör (a), dört paralel mikroşeritli sekizgen rezonatör (b) .....	12
Şekil 3.3 Bant geçiren yüzey rezonatörü.....	13
Şekil 3.4 Soğurucu yüzey birim eleman rezonatörü ve eşdeğer devre modeli .....	14
Şekil 3.5 Boyut maliyet fonksiyonu parametreleri.....	18
Şekil 3.6 Birinci maliyet fonksiyonu (M1) grafiği.....	19
Şekil 3.7 İkinci maliyet fonksiyonu (M2) grafiği .....	20
Şekil 3.8 Üçüncü maliyet fonksiyonu (M3) grafiği .....	21
Şekil 3.9 Dördüncü maliyet fonksiyonu (M4) grafiği.....	22
Şekil 3.10 Beşinci maliyet fonksiyonu (M5) grafiği.....	23
Şekil 3.11 Altıncı maliyet fonksiyonu (M6) grafiği.....	23
Şekil 3.12 Yedinci maliyet fonksiyonu (M7) grafiği .....	24
Şekil 3.13 Sekizinci maliyet fonksiyonu (M8) grafiği.....	25
Şekil 3.14 Dokuzuncu maliyet fonksiyonu (M9) grafiği .....	26
Şekil 3.15 Genetik algoritma (GA) işleyiş şeması .....	28
Şekil 3.16 GA sentezi sonucunda Koşturma 1, 2, 4 ve 5 sentez değerleriyle oluşturulan soğurucu yüzeylerin frekans tepkisi .....	31
Şekil 3.17 GA sentezi sonucunda Koşturma 6, 8, 9 ve 10 sentez değerleriyle oluşturulan soğurucu yüzeylerin frekans tepkisi .....	31
Şekil 3.18 GA sentezi sonucunda $M=0.0099$ maliyet fonksiyonu değeri ile sentezlenen soğurucu yüzeyin yüzey empedansı $Z_r$ grafiği .....	32
Şekil 3.19 GA ile sentezlenen soğurucu yüzey rezonatör yapıları: Koşturma 1 (a), Koşturma 2 (b), Koşturma 4 (c), Koşturma 5 (d), Koşturma 6 (e), Koşturma 8 (f), Koşturma 9 (g), Koşturma 10 (h) .....	33
Şekil 3.20 Başarılı sentez üretmiş on farklı GA kodu koşturmasının iterasyon sayısı ile maliyet fonksiyonu değişim grafiği.....	34

Şekil 3.21 Başarılı sentez üreten GA kodu koşturmasının (Koşturma 11) iterasyon sayısıyla maliyet fonksiyonları değişim grafiği.....	35
Şekil 3.22 Başarılı sentez üreten GA kodu koşturmasının (Koşturma 12) iterasyon sayısıyla maliyet fonksiyonları değişim grafiği.....	35
Şekil 3.23 Başarılı sentez üreten GA kodu koşturmasının (Koşturma 13) iterasyon sayısıyla maliyet fonksiyonları değişim grafiği.....	36
Şekil 3.24 Başarılı sentez üreten GA kodu koşturmasının (Koşturma 14) iterasyon sayısıyla maliyet fonksiyonları değişim grafiği.....	36
Şekil 3.25 Başarılı sentez üreten GA kodu koşturmasının (Koşturma 15) iterasyon sayısıyla maliyet fonksiyonları değişim grafiği.....	37
Şekil 3.26 Genetik algoritma A1 modifikasyonu işleyiş şeması .....	38
Şekil 3.27 Genetik algoritma A2 modifikasyonu işleyiş şeması .....	39
Şekil 3.28 Genetik algoritma A3 modifikasyonu işleyiş şeması .....	40
Şekil 3.29 Genetik algoritma A4 modifikasyonu işleyiş şeması .....	41
Şekil 3.30 Genetik algoritma A5 modifikasyonu işleyiş şeması .....	42
Şekil 3.31 Genetik algoritma B1 modifikasyonu işleyiş şeması .....	44
Şekil 3.32 Genetik algoritma B2 modifikasyonu işleyiş şeması .....	45
Şekil 3.33 Genetik algoritma C1 modifikasyonu işleyiş şeması .....	47
Şekil 3.34 Genetik algoritma C2 modifikasyonu işleyiş şeması .....	48
Şekil 3.35 Altıncı maliyet fonksiyonu M6 grafiği-D1 modifikasyonu.....	49
Şekil 3.36 Altıncı maliyet fonksiyonu M6 grafiği-D2 modifikasyonu.....	50
Şekil 3.37 Dokuzuncu maliyet fonksiyonu M9 grafiği-D3 modifikasyonu .....	51
Şekil 3.38 Bant geçiren yüzey eşdeğer devre modeli .....	54
Şekil 3.39 Bant geçiren yüzey rezonatör yama (a) ve yarık yüzeyleri (b).....	55
Şekil 3.40 Bant geçiren yüzey EM analiz frekans tepkisi .....	55
Şekil 4.1 Tasarlanan soğurucu frekans seçici yüzey birim elemanı: Soğurucu yüzey, ara dielektrik katman, bant geçiren yüzey.....	57
Şekil 4.2 Sentez değerleriyle oluşturulan soğurucu frekans seçici yüzey EM analiz frekans tepkisi .....	58
Şekil 4.3. EM analiz ile optimizasyon sonucu elde edilen nihai eleman değerleriyle oluşturulan soğurucu frekans seçici yüzey frekans tepkisi .....	59
Şekil 4.4 EM analizdeki dikey ve yatay polarizasyon eksenleri.....	59
Şekil 4.5 Soğurucu frekans seçici yüzey dikey ve yatay polarizasyon frekans tepkisi ..	60

Şekil 4.6 6 GHz’de dikey polarizasyon soğurucu yüzey yüzey akımı analizi .....	61
Şekil 4.7 6 GHz’de yatay polarizasyon soğurucu yüzey yüzey akımı analizi .....	61
Şekil 4.8 11 GHz’de dikey polarizasyon soğurucu yüzey yüzey akımı analizi .....	62
Şekil 4.9 11 GHz’de yatay polarizasyon soğurucu yüzey yüzey akımı analizi .....	62
Şekil 4.10 15 GHz’de dikey polarizasyon soğurucu yüzey yüzey akımı analizi .....	63
Şekil 4.11 15 GHz’de yatay polarizasyon soğurucu yüzey yüzey akımı analizi .....	63
Şekil 4.12 6 GHz’de dikey polarizasyon soğurucu yüzey elektrik alan dağılımı .....	64
Şekil 4.13 6 GHz’de yatay polarizasyon soğurucu yüzey elektrik alan dağılımı .....	64
Şekil 4.14 11 GHz’de dikey polarizasyon soğurucu yüzey elektrik alan dağılımı .....	65
Şekil 4.15 11 GHz’de yatay polarizasyon soğurucu yüzey elektrik alan dağılımı .....	65
Şekil 4.16 15 GHz’de dikey polarizasyon soğurucu yüzey elektrik alan dağılımı .....	66
Şekil 4.17 15 GHz’de yatay polarizasyon soğurucu yüzey elektrik alan dağılımı .....	66
Şekil 4.18 6 GHz’de dikey polarizasyon bant geçiren-ön yüzey yüzey akımı analizi....	67
Şekil 4.19 6 GHz’de yatay polarizasyon bant geçiren-ön yüzey yüzey akımı analizi ....	67
Şekil 4.20 11 GHz’de dikey polarizasyon bant geçiren-ön yüzey yüzey akımı analizi .....	68
Şekil 4.21 11 GHz’de yatay polarizasyon bant geçiren-ön yüzey yüzey akımı analizi .....	68
Şekil 4.22 15 GHz’de dikey polarizasyon bant geçiren-ön yüzey yüzey akımı analizi .....	69
Şekil 4.23 15 GHz’de yatay polarizasyon bant geçiren-ön yüzey yüzey akımı analizi .....	69
Şekil 4.24 6 GHz’de dikey polarizasyon bant geçiren-ön yüzey elektrik alan dağılımı.....	70
Şekil 4.25 6 GHz’de yatay polarizasyon bant geçiren-ön yüzey elektrik alan dağılımı.....	70
Şekil 4.26 11 GHz’de dikey polarizasyon bant geçiren-ön yüzey elektrik alan dağılımı.....	71
Şekil 4.27 11 GHz’de yatay polarizasyon bant geçiren-ön yüzey elektrik alan dağılımı.....	71
Şekil 4.28 15 GHz’de dikey polarizasyon bant geçiren-ön yüzey elektrik alan dağılımı.....	72

Şekil 4.29 15 GHz’de yatay polarizasyon bant geçiren-ön yüzey elektrik alan dağılımı .....	72
Şekil 4.30 6 GHz’de dikey polarizasyon bant geçiren-orta yüzey yüzey akımı analizi .....	73
Şekil 4.31 6 GHz’de yatay polarizasyon bant geçiren-orta yüzey yüzey akımı analizi .....	73
Şekil 4.32 11 GHz’de dikey polarizasyon bant geçiren-orta yüzey yüzey akımı analizi .....	74
Şekil 4.33 11 GHz’de yatay polarizasyon bant geçiren-orta yüzey yüzey akımı analizi .....	74
Şekil 4.34 15 GHz’de dikey polarizasyon bant geçiren-orta yüzey yüzey akımı analizi .....	75
Şekil 4.35 15 GHz’de yatay polarizasyon bant geçiren-orta yüzey yüzey akımı analizi .....	75
Şekil 4.36 6 GHz’de dikey polarizasyon bant geçiren-orta yüzey elektrik alan dağılımı .....	76
Şekil 4.37 6 GHz’de yatay polarizasyon bant geçiren-orta yüzey elektrik alan dağılımı .....	76
Şekil 4.38 11 GHz’de dikey polarizasyon bant geçiren-orta yüzey elektrik alan dağılımı .....	77
Şekil 4.39 11 GHz’de yatay polarizasyon bant geçiren-orta yüzey elektrik alan dağılımı .....	77
Şekil 4.40 15 GHz’de dikey polarizasyon bant geçiren-orta yüzey elektrik alan dağılımı .....	78
Şekil 4.41 15 GHz’de yatay polarizasyon bant geçiren-orta yüzey elektrik alan dağılımı .....	78
Şekil 4.42 6 GHz’de dikey polarizasyon bant geçiren-arka yüzey yüzey akımı analizi .....	79
Şekil 4.43 6 GHz’de yatay polarizasyon bant geçiren-arka yüzey yüzey akımı analizi .....	79
Şekil 4.44 11 GHz’de dikey polarizasyon bant geçiren-arka yüzey yüzey akımı analizi .....	79

Şekil 4.45 11 GHz’de yatay polarizasyon bant geçiren-arka yüzey yüzey akımı analizi .....	80
Şekil 4.46 15 GHz’de dikey polarizasyon bant geçiren-arka yüzey yüzey akımı analizi .....	80
Şekil 4.47 15 GHz’de yatay polarizasyon bant geçiren-arka yüzey yüzey akımı analizi .....	80
Şekil 4.48 6 GHz’de dikey polarizasyon bant geçiren-arka yüzey elektrik alan dağılımı.....	81
Şekil 4.49 6 GHz’de yatay polarizasyon bant geçiren-arka yüzey elektrik alan dağılımı.....	81
Şekil 4.50 11 GHz’de dikey polarizasyon bant geçiren-arka yüzey elektrik alan dağılımı.....	82
Şekil 4.51 11 GHz’de yatay polarizasyon bant geçiren-arka yüzey elektrik alan dağılımı.....	82
Şekil 4.52 15 GHz’de dikey polarizasyon bant geçiren-arka yüzey elektrik alan dağılımı.....	83
Şekil 4.53 15 GHz’de yatay polarizasyon bant geçiren-arka yüzey elektrik alan dağılımı.....	83
Şekil 4.54 Yanca yönünde $15^0$ , $30^0$ ve $45^0$ geliş açılarında soğurucu frekans seçici yüzeyin dikey polarizasyonda frekans tepkisi.....	85
Şekil 4.55 Yanca yönünde $15^0$ , $30^0$ ve $45^0$ geliş açılarında soğurucu frekans seçici yüzeyin yatay polarizasyonda frekans tepkisi .....	85
Şekil 4.56 Yükseliş yönünde $15^0$ , $30^0$ ve $45^0$ geliş açılarında soğurucu frekans seçici yüzeyin dikey polarizasyonda frekans tepkisi.....	86
Şekil 4.57 Yükseliş yönünde $15^0$ , $30^0$ ve $45^0$ geliş açılarında soğurucu frekans seçici yüzeyin yatay polarizasyonda frekans tepkisi .....	86
Şekil 4.58 Dikey polarizasyon durumunda 6 GHz’deki RKA analiz sonucu .....	87
Şekil 4.59 Yatay polarizasyon durumunda 6 GHz’deki RKA analiz sonucu .....	87
Şekil 4.60 Dikey polarizasyon durumunda 11 GHz’deki RKA analiz sonucu .....	88
Şekil 4.61 Yatay polarizasyon durumunda 11 GHz’deki RKA analiz sonucu .....	88
Şekil 4.62 Dikey polarizasyon durumunda 15 GHz’deki RKA analiz sonucu .....	89
Şekil 4.63 Yatay polarizasyon durumunda 15 GHz’deki RKA analiz sonucu .....	89
Şekil 4.64 $d_x$ değeri 0.2 mm iken soğurucu yüzeyde oluşan elektrik alan dağılımı.....	90

Şekil 4.65 $d_x$ değeri 0.6 mm iken soğurucu yüzeyde oluşan elektrik alan dağılımı .....	91
Şekil 4.66 $g$ değeri 0.1 mm iken soğurucu yüzeyde oluşan elektrik alan dağılımı .....	92
Şekil 4.67 $g$ değeri 0.25 mm iken soğurucu yüzeyde oluşan elektrik alan dağılımı .....	92
Şekil 4.68 $u$ değeri 10.2 mm iken soğurucu yüzeyde oluşan elektrik alan dağılımı .....	93
Şekil 4.69 $u$ değeri 10.6 mm iken soğurucu yüzeyde oluşan elektrik alan dağılımı .....	93
Şekil 5.1 Soğurucu yüzeyin baskı devre kartı çizim programındaki 1x2 birimlik çizimi .....	95
Şekil 5.2 Bant geçiren yüzey yama rezonatörün 1x2 birimlik baskı devre kart çizim programı çizimi .....	95
Şekil 5.3 Bant geçiren yüzey yarı rezonatörün 1x2 birimlik baskı devre kart çizim programı çizimi .....	96
Şekil 5.4 Üretilen 1x2 birimlik soğurucu yüzey .....	96
Şekil 5.5 Üretilen 1x2 birimlik bant geçiren yüzey sekizgen yama yüzeyi.....	97
Şekil 5.6 Üretilen 1x2 birimlik bant geçiren yüzey sekizgen yarı yüzeyi .....	97
Şekil 5.7 Üretilen 1x2 birimlik bant geçiren yüzey .....	98
Şekil 5.8 WR-90 dalga kılavuzu içine yerleştirilen soğurucu yüzey .....	98
Şekil 5.9 WR-90 dalga kılavuzu içine yerleştirilen bant geçiren yüzey .....	99
Şekil 5.10 Üretilen soğurucu frekans seçici yüzey içerisine eklenerek ölçüm gerçekleştirilen WR-90 dalga kılavuzu ve WR-90'dan SMA'ya geçiş adaptörleri .....	99
Şekil 5.11 Bant geçiren yüzey ölçüm sonucu ve WR-90 dalga kılavuzu içerisindeki EM analiz sonucu frekans tepkisi .....	100
Şekil 5.12 EM simülasyon programı WR-90 dalga kılavuzu içerisinde 1x2 birimlik bant geçiren yüzey modeli .....	100
Şekil 5.13 Soğurucu frekans seçici yüzey ölçüm sonucu ve WR-90 dalga kılavuzu içerisindeki EM analiz sonucu frekans tepkisi.....	101
Şekil 5.14 EM simülasyon programında WR-90 dalga kılavuzu içerisinde 1x2 birimlik soğurucu frekans seçici yüzey modeli .....	102
Şekil 5.15 Geniş bantlı EM analiz ve ölçüm sonuçları karşılaştırması .....	102
Şekil 5.16 Soğurucu frekans seçici yüzeyin ölçüm sonucu iletim katsayısı, yansıma katsayısı ve soğurma katsayısı tepkisi .....	103

## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1 GA kodu ile elde edilen başarılı sentez sonuçları maliyet fonksiyonu değerleri.....	29
Çizelge 3.2 GA kodu ile elde edilen başarılı sentez sonuçları eleman değerleri .....	29
Çizelge 3.3 GA kodu ile elde edilen başarılı sentez sonuçları boyut ve performans değerleri.....	30
Çizelge 3.4 Mutasyon algoritması modifikasyonları ile oluşturulan GA kodu alternatiflerinin başarı karşılaştırması .....	43
Çizelge 3.5 Eşleşme algoritması modifikasyonları ile oluşturulan GA kodu alternatiflerinin başarı karşılaştırması .....	46
Çizelge 3.6 Toplam kromozom sayısı değişimi ile oluşturulan GA kodu alternatiflerinin başarı karşılaştırması .....	49
Çizelge 3.7 Frekans tepkisi maliyet fonksiyonları modifikasyonları ile oluşturulan GA kodu alternatiflerinin başarı karşılaştırması .....	52
Çizelge 4.1 Sentez sonucu elde edilen ve EM analiz ile optimizasyon sonucu elde edilen soğurucu yüzey eleman değerleri .....	58
Çizelge 5.1 Ölçüm ve simülasyon sonuçlarının literatürdeki çalışmaların performansıyla karşılaştırması .....	104



## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

$Z_r$	Soğurucu yüzey rezonatörü empedansı
$Z_b$	Bant geçiren yüzey rezonatörü empedansı
$Z_d$	Dielektrik yüzey karakteristik empedansı
$\theta_d$	Dielektrik yüzey elektriksel uzunluk değeri
$ABCD_r$	Soğurucu yüzey ABCD matrisi
$ABCD_d$	Dielektrik yüzey ABCD matrisi
$ABCD_b$	Bant geçiren yüzey ABCD matrisi
$ABCD_s$	Eşdeğer soğurucu frekans seçici yüzey ABCD matrisi
$Z_0$	Boşluk karakteristik empedansı
$Q_p$	Paralel rezonans kalite faktörü
$L_p$	Paralel rezonatör yapısındaki indüktör değeri
$C_p$	Paralel rezonatör yapısındaki kapasitör değeri
$R_p$	Paralel rezonatör direnç değeri
$f_r$	Paralel rezonatör rezonans frekansı
$u$	Soğurucu yüzey rezonatör boyutu
$p$	Birim eleman periyodu
$l_a$	Seri mikroşerit uzunluğu
$L_a$	Seri mikroşerit indüktansı
$l_b$	Paralel mikroşeritlerin uzunluğu
$L_b'$	Paralel mikroşeritlerin her birinin oluşturduğu indüktans
$L_b$	Paralel mikroşeritlerin eşdeğer indüktansı

$w$	Mikroşeritlerin hat kalınlık değeri
$g$	Paralel mikroşerit hatlar arasındaki açıklık
$R$	Paralel mikroşeritlere entegre edilen toplu eleman direnç değeri
$K_i$	Kromozomun sıralama numarası (Kromozom numarası)
$l_m$	Mikroşerit hat uzunluğunu
$w_m$	Mikroşerit hat kalınlığını
$t$	Mikroşerit metal kalınlığı
$L_m$	İndüktör indüktans değeri
$A$	Paralel mikroşerit bölgelerin alanı
$d_m$	Paralel mikroşeritlerin orta kısımları arasındaki mesafe
$\epsilon_e$	Mikroşerit hat efektif dielektrik sabiti
$C_m$	Paralel mikroşeritler arasındaki kapasitans
$L_{eq}$	Soğurucu yüzey rezonatörü eşdeğer seri indüktans değeri
$R_{eq}$	Soğurucu yüzey rezonatörü eşdeğer direnç değeri
$L_{beq}$	Soğurucu yüzey rezonatörü eşdeğer paralel indüktans değeri
$C_{beq}$	Soğurucu yüzey rezonatörü eşdeğer paralel kapasitans değeri
$\Omega$	Frekans değeri
$S_{11r}$	Soğurucu yüzey $S_{11}$ değerini
$S_{21r}$	Soğurucu yüzey $S_{21}$ değerini ifade etmektedir
$M$	Toplam maliyet fonksiyonu
$w_i$	Maliyet fonksiyonları ağırlıklandırma katsayısı
$N$	Ağırlıklandırma katsayıları toplamı
$d_x$	Ardışık paralel mikroşerit köşe noktaları arası dikey uzaklık değeri
$d$	Paralel mikroşerit hatların merkezlerinin uzaklığı
$S_{d1}$	8 GHz ve 14 GHz'deki $S_{11}$ değerleri farkının mutlak değeri
$S_{d2}$	9.5 GHz ve 11 GHz'deki $S_{21}$ değerleri farkının mutlak değeri

$S_{d3}$	9 GHz ve 11 GHz'deki $S_{21}$ değerleri farkının mutlak değeri
$Z_{diel2}$	Bant geçiren yüzey taban malzemesi karakteristik empedansı
$l_p$	Sekizgen yama kenar uzunluğu
$l_s$	Sekizgen açıklık kenar uzunluğu
$h_r$	Soğurucu yüzey dielektrik malzeme kalınlığı
$h_b$	Bant geçiren yüzey dielektrik malzeme kalınlığı
$h_a$	Ara dielektrik katman kalınlığı
$\epsilon_{r,r}$	Soğurucu yüzey dielektrik malzemesi dielektrik sabiti
$\epsilon_{r,b}$	Bant geçiren yüzey dielektrik malzemesi dielektrik sabiti
$\lambda_0$	Merkez iletim frekansı dalga boyu
$I$	İletim katsayısı
$Y$	Yansıma katsayısı
$S$	Soğurma katsayısı
$\lambda_L$	Soğurma bandı en düşük frekansı dalga boyu

### **Kısaltmalar**

RKA	Radar kesit alanı
EM	Elektromanyetik
GA	Genetik algoritma



# 1. GİRİŞ

Radar kesit alanı (RKA) azaltma çalışmaları, 2. Dünya Savaşı yıllarından itibaren üzerinde çalışılan [1], günümüzde askeri açıdan önemini koruyan konulardan biridir. Karşı radarlar tarafından tespit edilmeyi zorlaştırmak amacıyla gerçekleştirilen RKA azaltma çalışması, birden çok disiplinin ortak çalışmasını gerektirebilecek bir çalışma alanıdır. RKA azaltma çalışmaları kapsamında farklı alanlarda tasarım çalışmaları gerçekleştirilmektedir. Bu çalışmalara örnek olarak; bir aracın radar kesit alanını düşürmek amacıyla geometrisinin bu amaca uygun tasarlanması, aracın gövde kısmında elektromanyetik soğurucu malzeme-kaplama kullanması verilebilir [2].

RKA azaltma çalışmaları kapsamında çalışılan alanlardan biri de anten çıkışı olan bölgelerde RKA değerini azaltma çalışmalarıdır. Bu özelliği sağlayacak yöntemlerden biri antenin ve radomun karşı tespit radarı tarafından gelen sinyalleri, geliş yönünden farklı yönlere yansıtacak şekilde tasarlanması ve konumlandırılmasıdır [3]. Bir diğer yöntem ise anten sistemlerinde, geliş yönünde düşük RKA değerine sahip soğurucu radom kullanılmasıdır. Bu amaçla tasarlanan radomun aynı zamanda kendi anteninin çalışma performansını etkilememesi gerekmektedir.

1990'lı yıllara kadar literatürde radomların RKA değerini düşürmek için çalışılan yaygın yöntem, gelen elektromanyetik (EM) dalgayı geliş yönünden farklı yönlere yansıtan radom tasarlamak olmuştur [4]. Bu yöneme alternatif olarak; 1990 ve 2000'li yıllardan itibaren radomların radar kesit alanını düşürme çalışmalarında yeni bir yaklaşım ortaya çıkmıştır [5][6][7]. Bu yeni yöntemle birlikte radomların RKA değerini düşürmek için, gelen EM dalgayı geliş açısından farklı yönlere yansıtmak yerine belirli frekans spektrumunda soğurmak ve geri yansıyan sinyal seviyesini düşürmek önerilmiştir. Bu yöntemle birlikte geliş açısından farklı geri yansıma açılarında da RKA azaltılarak, gönderici ve alıcı antenin aynı konumda olduğu (monostatik) radarlara ek olarak gönderici ve alıcı antenin farklı konumda olduğu (bistatik) radarlar ve pasif radarlarla tespit durumlarına karşı önlem alınması amaçlanmıştır. Soğurma metoduyla düşük RKA değeri elde eden bu yapılar soğurucu frekans seçici yüzeyler olarak veya İngilizce kökenli “radome” (radom) ve “absorber” (soğurucu) kelimelerinin birleştirilmesi ve kısaltılmasıyla oluşturulan “rasorber” kelimesi ile isimlendirilmektedir [8].

Soğurucu frekans seçici yüzeyler konvansiyonel frekans seçici yüzeylere benzer şekilde bant geçiren filtre frekans tepkisine sahip yüzeylerdir. Bununla birlikte frekans seçici yüzeylerden farklı olarak, frekans spektrumunda iletim bandı dışındaki soğurma bölgeleri olarak adlandırılan bölgelerde soğurma özelliği göstererek EM dalgaların daha düşük seviyelerde geri yansımalarını sağlarlar.

Soğurucu frekans seçici yüzeyler özdeş birim eleman rezonatörlerin tekrarlı dizilimiyle oluşan yapılardır. Birim eleman rezonatörlerinin türüne göre iki boyutlu ve üç boyutlu soğurucu frekans seçici yüzeyler olarak ikiye ayrılırlar; iki temel yapının kullanılmasıyla oluşturulan hibrid yapılar da mevcuttur [9]. İki boyutlu yapıların birim elemanı mikroşerit rezonatörlerdir. İki boyutlu soğurucu frekans seçici yüzeyler soğurucu yüzey, dielektrik yüzey ve bant geçiren yüzey katmanlarının üst üste birleşimiyle oluşturulur. Soğurucu yüzey, yapısında direnç bulunan özdeş mikroşerit rezonatörlerin ardışık dizilimi ile oluşturulur. Soğurucu yüzey rezonatörlerinde bulunan dirençler toplu elemanlı direnç yapısında veya dağınık elemanlı-şerit direnç yapısında [10] [11]. Bant geçiren yüzey özdeş reaktif mikroşerit rezonatörlerin ardışık dizilimi ile oluşturulur. Dielektrik katman soğurucu yüzey ve bant geçiren yüzeyin arasındaki katmandır; bu katman için hava boşluğu veya farklı dielektrik sabiti değerine sahip dielektrik malzeme kullanılabilir.

Üç boyutlu yapıların birim eleman rezonatörleri paralel plaka dalga kılavuzu, kutulu mikroşerit gibi kavite yapılarıdır; üç boyutlu soğurucu frekans seçici yüzeyler kavite tipi özdeş rezonatörlerin ardışık dizilimiyle oluşur [12]. Üç boyutlu yapıların iki boyutlu yapılara kıyasla başlıca avantajları iletim bandının daha yüksek seçiciliğe sahip olması ve soğurma-bant geçirme frekans tepkisi performansının EM sinyalin geliş açısı değişiminden daha az etkilenmesidir [12]. Buna karşılık üç boyutlu yapıların iki boyutlu yapılara kıyasla boyutları büyüktür. İki boyutlu yapılar üretim kolaylığı avantajına sahiptir; ayrıca iki boyutlu yapılardan bükülebilen taban malzeme ile üretilenler konformal radom uygulamalarında kullanılabilir [13].

Soğurucu frekans seçici yüzeyler polarizasyon geliş açısına bağımlılık durumları göre iki gruba ayrılırlar. Tek doğrusal polarizasyon açısı aralığında çalışan yüzeyler tekil polarizasyonlu yüzeyler olarak adlandırılır. Bu yüzeylerin birim eleman mikroşerit rezonatörleri genelde tek ekseninde simetrik ve polarizasyon eksenine paralel olarak uzayan yapıdadır [14]. EM dalganın polarizasyon geliş açısından bağımsız olarak çalışan

yüzeyler çift polarizasyonlu yüzeyler veya polarizasyon açısından etkilenmeyen yüzeyler olarak adlandırılırlar. Bu yüzeylerin birim eleman rezonatörleri iki dikey eksende simetrik yapılardır [15].

Soğurucu frekans seçici yüzeylerin iletim ve soğurma bantlarının tek veya çoğul olduğu çalışmalar literatürde yer almaktadır [16] [17] [18]. Soğurma bandı frekans spektrumunda iletim bandının düşük ve/veya yüksek frekans bölgesinde bulunabilir. Ayrıca soğurma ve iletim bandı frekanslarının ve seviyelerinin rezonatörlere entegre edilen pin diyot ve varaktör diyotlar ile kontrol edildiği soğurucu frekans seçici yüzey tasarım çalışmaları mevcuttur [19] [20] [21]. Yapı boyutu olarak küçük boyutlu birim elemanlara sahip, minyatürleştirilmiş rezonatöre sahip yüzeylerden oluşan soğurucu frekans seçici yüzey tasarımları literatürde yer almaktadır. Bu yapıların sağladığı avantajlardan biri yüzeylerin konformal uygulamalarda kullanım durumunu kolaylaştırmasıdır [22].

Literatürde son yıllarda gerçekleştirilen, geniş iletim bandına sahip yapılar üzerine çalışmalar bulunmaktadır [23] [24] [25] [26] [27] [28] [29] [30]. Geniş iletim bandına sahip yapıların soğurucu yüzeyleri ve bant geçiren yüzeylerinin geniş iletim bandı performansını sağlaması gerekmektedir. Soğurucu frekans seçici yüzeylerde geniş bant geçiren yüzey performansı için çok katmanlı, çoklu rezonans üreten bant geçiren yüzeyler kullanılmaktadır [24]. Geniş soğurma bandına sahip tasarımlar da son yıllarda soğurucu frekans seçici yüzey çalışmalarında çalışılan alanlardan birisidir [31] [32] [33] [34].

Literatürdeki iki boyutlu soğurucu frekans seçici yüzey çalışmalarında tasarım, soğurucu yüzey ve bant geçiren yüzeyi oluşturan, tekrarlayan birim eleman rezonatörlerin seçilmesi-önerilmesiyle başlamaktadır. Önerilen mikroşerit rezonatörlerin eşdeğer devre modelleri indüktif bağlaşımı modelleyen indüktörler, kapasitif bağlaşımı modelleyen kapasitörler ve direnç elemanlarıyla oluşturulmaktadır. Rezonatör geometrisinin belirlenmesi ve eşdeğer devre modelinin tahmin edilmesiyle-oluşturulmasıyla birlikte hedeflenen frekans tepkisi performansına göre rezonatör boyutlarının belirlenmesi, eleman değerlerinin belirlenmesi ve rezonatörlerin sentezlenmesi şu şekilde gerçekleştirilir; farklı boyut ve eleman değerleri tahmin edilir ve eşdeğer devre modelinin frekans tepkisinin analiz edilmesi sonucunda değerler güncellenir, eşdeğer devre modelinin frekans tepkisi analizinde hedeflenen performans elde edilene kadar bu işlemler tekrar edilir. Bu süreçte, önerilen boyut ve eleman setinin hedeflenen frekans

tepkisi performansını sağladığı eşdeğer devre modeli analizi ile kontrol edilirken aynı zamanda önerilen boyutların rezonatör geometrisine uyumlu olduğu (farklı mikroşerit bileşenlerin girişim yapmaması, eşdeğer devre modelinde modellenmeyen parazitik bağlaşım oluşmaması, mikroşerit rezonatöre entegre edilecek toplu elemanlı dirençler için uygun geometri oluşması) kontrol edilmelidir. Rezonatörlerin sentez sürecinin ardından soğurucu frekans seçici yüzeyin EM analizinin gerçekleştirilmesi ve eleman değerlerinin ince ayar sonucunda belirlenmesiyle tasarım süreci neticelendirilir.

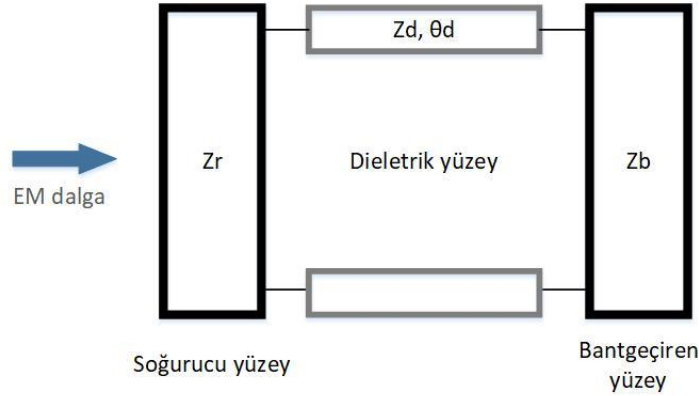
Bu tez çalışmasında X-bantta 11 GHz merkez iletim frekansında iletim sağlayan, geniş iletim bandına sahip, çift polarizasyonlu, düşük frekans tarafında S-banda kadar soğurma sağlayan iki boyutlu soğurucu frekans seçici yüzey tasarımı sunulmaktadır. Bu kapsamda geniş iletim bandını sağlayan soğurucu yüzey ve bant geçiren yüzey birim eleman rezonatör şekilleri önerilmiştir. Özgün soğurucu yüzey rezonatör şeklinin önerilmesi aşamasında mikroşerit rezonatörün farklı kol sayısında olması durumu analiz edilmiş ve değerlendirilmiştir, ve önerilen geometri için optimum kol sayısı ile tasarım gerçekleştirilmiştir. Önerilen rezonatörlerin sentezlenmesi, literatür çalışmalarındaki sentez sürecinden farklı olarak, tasarlanan genetik algoritma (GA) kodu ile başarılı şekilde gerçekleştirilmiştir; bahsedilen çalışma ilgili makalede yayımlanmıştır [35].

Bununla birlikte tez çalışması kapsamında, sentez için tasarlanan GA kodunun farklı kısımları için alternatif tasarımlar içeren çeşitli algoritma modifikasyonları tasarlanmış ve sentez performansları test edilmiştir. GA sentezi ile tasarlanan soğurucu frekans seçici yüzeyin frekans tepkisi dik ve açılı geliş durumları için farklı geliş açılarında EM analiz ile analiz edilmiştir. Soğurucu frekans seçici yüzeyin dik geliş durumunda tepkisini anlamak amacıyla yüzeyler üzerinde oluşan elektrik alan ve yüzey akımları dağılımı EM analiz ile incelenmiştir. Tasarlanan soğurucu frekans seçici yüzey 1x2 birimlik yüzey olarak üretilmiş ve WR-90 dalga kılavuzu ölçüm düzeneğiyle ölçümü gerçekleştirilmiştir. EM analiz ve ölçüm sonuçlarıyla, GA sentezinin başarısı ölçülmüş ve tasarlanan soğurucu frekans seçici yüzeyin literatürdeki diğer geniş iletim bantlı tasarımlarla performans karşılaştırması gerçekleştirilmiştir.



## 2. SOĞURUCU FREKANS SEÇİCİ YÜZEY ÇALIŞMA PRENSİBİ

İki boyutlu soğurucu frekans seçici yüzeyler soğurucu yüzey, dielektrik yüzey ve bant geçiren yüzeyin birleşimiyle oluşturulur (Şekil 2.1). Soğurucu yüzeyin iki ekseninde ardışık dizilimdeki birim elemanı, yapısında direnç içeren mikroşerit rezonatördür. Bant geçiren yüzeyin iki ekseninde ardışık dizilimdeki birim elemanı, direnç içermeyen konvansiyonel frekans seçici yüzey yapısındaki mikroşerit rezonatördür. Soğurucu frekans seçici yüzey katmanlarını gösteren Şekil 2.1’de soğurucu yüzey rezonatörü empedansı  $Z_r$ , bant geçiren yüzey rezonatörü empedansı  $Z_b$ , dielektrik yüzey karakteristik empedansı  $Z_d$ , dielektrik yüzey elektriksel uzunluk değeri  $\theta_d$  olarak adlandırılmaktadır. Soğurucu yüzey ve bant geçiren yüzeyin birim eleman boyutları periyot (tekrarlama aralığı) olarak adlandırılır. Soğurucu yüzey ve bant geçiren yüzeyin birim eleman periyotları birbirinin tam katı olmalıdır [23].



Şekil 2.1 Soğurucu frekans seçici yüzey katmanları

Soğurucu frekans seçici yüzey iletim bandında konvansiyonel frekans seçici yüzey tepkisine sahiptir, bant geçiren filtre frekans tepkisiyle çalışır. İletim bandı dışında, soğurma bölgeleri olarak adlandırılan frekans spektrumunda soğurma özelliği gösterir. Yapının iletim bandında düşük kayıpla iletim özelliğini göstermesi için soğurucu yüzeyin ve bant geçiren yüzeyin elektromanyetik geçirgen özellikte olması gerekmektedir. Bu sebeple iletim bandı spektrumunda soğurucu yüzey ve bant geçiren yüzey empedanslarının ( $Z_r$  ve  $Z_b$ ) yüksek değerde olması gerekmektedir. Soğurma bandında, soğurucu yüzey rezonatörünün içerdiği direnç elemanları ile sağladığı rezistif empedans bileşeni sayesinde soğurucu özellik göstermesi ve bant geçiren yüzeyin soğurucu yüzeye

toprak yüzeyi olarak davranması gerekmektedir [36]. Bant geçiren yüzeyin soğurma bandında soğurucu yüzeye toprak yüzeyi olarak görünmesi için ara dielektrik katman, merkez iletim frekansında çeyrek dalgaboyu elektriksel uzunluk sağlayacak kalınlıktadır [37].

Soğurucu frekans seçici yüzeyin iletim ve yansıma frekans tepkisini yüzey rezonatör empedans değerleri üzerinden analiz etmek için kullanılan temel yöntem ABCD matris analizidir [37]. Soğurucu yüzey, ara dielektrik yüzey ve bant geçiren yüzey frekans tepkileri ABCD matrisi olarak yazılarak tüm yapının eşdeğer frekans tepkisi ABCD matrisi cinsinden hesaplanır. Ardından eşdeğer ABCD matrisi S-parametre matrisine dönüştürülür. S-parametre matrisiyle, soğurucu frekans seçici yüzeyin yansıma ve iletim frekans tepkisinin yüzey empedansları  $Z_r$  ve  $Z_b$ 'ye, dielektrik katmanın elektriksel uzunluk değeri  $\theta_d$ 'ye, dielektrik katmanın karakteristik empedans değeri  $Z_d$ 'ye karşı ilişkisi elde edilir. Yüzeylerin ve soğurucu frekans seçici yüzeyin eşdeğer ABCD matrisi hesaplamaları şu şekilde gerçekleştirilir;

$$ABCD_r = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{Z_r} & 1 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

$$ABCD_d = \begin{bmatrix} \cos \theta_d & jZ_d \sin \theta_d \\ j \frac{\sin \theta_d}{Z_d} & \cos \theta_d \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

$$ABCD_b = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{Z_b} & 1 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

$$ABCD = ABCD_r ABCD_d ABCD_b \quad (2.4)$$

$$ABCD_s = \begin{bmatrix} \cos \theta_d + j \frac{Z_d}{Z_b} \sin \theta_d & jZ_d \sin \theta_d \\ \left( \frac{1}{Z_r} + \frac{1}{Z_b} \right) \cos \theta_d + j \left( \frac{1}{Z_d} + \frac{Z_d}{Z_r Z_b} \right) \sin \theta_d & \cos \theta_d + j \left( \frac{Z_d}{Z_r} \right) \sin \theta_d \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Bu eşitliklerde  $Z_r$  soğurucu yüzey empedansını,  $Z_b$  bant geçiren yüzey empedansını,  $Z_d$  dielektrik katman karakteristik empedansını,  $\theta_d$  dielektrik katman elektriksel uzunluğunu ifade etmektedir.  $ABCD_r$  soğurucu yüzeyin ABCD matrisini,  $ABCD_d$  dielektrik katmanın

ABCD matrisini,  $ABCD_b$  bant geçiren yüzeyin ABCD matrisini ifade etmektedir,  $ABCD_s$  soğurucu frekans seçici yüzey için elde edilen eşdeğer ABCD matrisini ifade etmektedir. Soğurucu frekans seçici yüzeyin frekans tepkisinin yüzey empedans değerleriyle bağlantısını görmek için ABCD matrisi cinsinden eşitliklerin S-parametre matrisi cinsinden eşitliklere dönüşümü şu şekilde gerçekleştirilir;

$$S_{11} = \frac{A + \frac{B}{Z_0} - CZ_0 - D}{A + \frac{B}{Z_0} + CZ_0 + D} \quad (2.6)$$

$$S_{21} = \frac{2}{A + \frac{B}{Z_0} + CZ_0 + D} \quad (2.7)$$

Bu eşitliklerde  $A$ ,  $B$ ,  $C$ , ve  $D$  sırayla ABCD matris elemanlarını ifade eder;  $Z_0$  boşluk karakteristik empedansını ifade etmektedir. Dielektrik katman olarak hava boşluğu kullanılması durumunda  $Z_d$  değeri  $Z_0$  boşluk karakteristik empedansına eşittir. Bu durumda S-parametre matrisinin ABCD eşdeğer matris eşitliği cinsinden ifadesi şu şekildedir;

$$S_{11} = \frac{-Z_0 \cos \theta_d \left( \frac{Z_r + Z_b}{Z_r Z_b} \right) + j \sin \theta_d \left( \frac{Z_0}{Z_b} - \frac{Z_0}{Z_r} - \frac{Z_0^2}{Z_r Z_b} \right)}{\cos \theta_d \left( 2 + \frac{Z_0}{Z_b} + \frac{Z_0}{Z_r} \right) + j \sin \theta_d \left( 2 + \frac{Z_0}{Z_b} + \frac{Z_0}{Z_r} + \frac{Z_0^2}{Z_r Z_b} \right)} \quad (2.8)$$

$$S_{21} = \frac{2}{\cos \theta_d \left( 2 + \frac{Z_0}{Z_b} + \frac{Z_0}{Z_r} \right) + j \sin \theta_d \left( 2 + \frac{Z_0}{Z_b} + \frac{Z_0}{Z_r} + \frac{Z_0^2}{Z_r Z_b} \right)} \quad (2.9)$$

Soğurucu frekans seçici yüzeyin ideal iletim bantı frekans tepkisinde,  $S_{11}$  değeri sıfıra,  $S_{21}$  değeri bire eşittir.  $Z_r$  ve  $Z_b$  empedans değerlerinin sonsuza yakınsadığı durumda  $S_{11}$  ve  $S_{21}$  için bu eşitlik değerlerinin sağlanacağı görülmektedir (Eşitlik 2.10, 2.11);

$$|S_{11}| = \frac{0}{2 \cos \theta_d + j 2 \sin \theta_d} = 0 \quad (2.10)$$

$$|S_{21}| = \frac{2}{2\cos\theta_d + j2\sin\theta_d} = 1 \quad (2.11)$$

Soğurucu yüzey ve bant geçiren yüzeyin iletim bandı frekansında rezonans oluşturan rezonatörlere sahip olması, ve rezonans frekansı bölgesinde  $Z_r$  ve  $Z_b$  empedanslarının sonsuza yakınsaması durumunda soğurucu frekans seçici yüzey EM dalgalar için kayıpsız iletim sağlamaktadır ve EM geçirgen özelliktedir. Bu sebeple, geniş iletim bandına sahip soğurucu frekans seçici yüzey tasarımını gerçekleştirmek için geniş iletim bandını sağlayacak soğurucu yüzey empedansı ( $Z_r$ ) ve geniş iletim bandını sağlayacak bant geçiren yüzey empedansı ( $Z_b$ ) gerekmektedir.

Soğurucu frekans seçici yüzeyin ideal soğurma bandı frekans tepkisinde,  $S_{11}$  ve  $S_{21}$  değerleri sıfıra eşittir. Eşitlik 2.8’de soğurucu frekans seçici yüzey için tanımı verilen  $S_{11}$  eşitliğinin sıfır değerinde olması koşulu soğurucu yüzey empedansı ( $Z_r$ ) ve bant geçiren yüzey empedansı ( $Z_b$ ) arasında Eşitlik 2.12 ile sağlanmalıdır.

$$Z_r = \frac{Z_b(-1 - j \tan \theta_d) - jZ_0 \tan \theta_d}{1 - j \tan \theta_d} \quad (2.12)$$

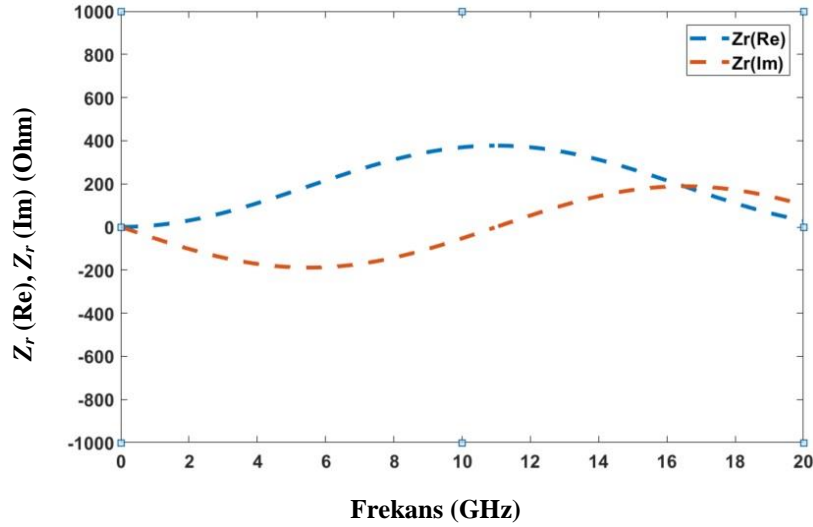
Bununla birlikte, Eşitlik 2.9’da tanımı verilen  $S_{21}$  eşitliğinin sıfır değerinde olması  $Z_r$  ve  $Z_b$  empedansları arasında tanımlı Eşitlik 2.13 ile sağlanmalıdır.

$$Z_r Z_b = 0 \quad (2.13)$$

Soğurucu yüzeyin soğurma sağlaması için yapısında direnç elemanları bulunmaktadır bu sebeple Eşitlik 2.13’ün sağlanması için  $Z_b$  empedansının sıfıra eşit olması durumu kabul edilmiştir; bu durumda Eşitlik 2.12 ve Eşitlik 2.13’ün birleştirilmesiyle soğurma bandının ideal frekans tepkisi için sağlaması gereken  $Z_r$  eşitliği (Eşitlik 2.14) şu şekildedir;

$$Z_r = \frac{Z_0 (\tan \theta_d)^2 - jZ_0 \tan \theta_d}{1 + (\tan \theta_d)^2} \quad (2.14)$$

Eşitlik 2.14 ile ideal soğurma şartının sağlanması için  $Z_r$  empedansının alması gereken değerlerin frekansa bağlı değişimi Şekil 2.2’de gösterilmektedir. Dielektrik katmanın kalınlık değeri 11 GHz merkez frekansının çeyrek dalga boyu uzunluğunda alınmaktadır.  $\theta_d$ ’nin tanjant değeri 11 GHz’de sonsuza gitmektedir.



Şekil 2.2 İdeal soğurma şartının sağlanması için  $Z_r$  empedansının alması gereken değerlerin frekansa bağlı değişimi

Geniş bantta  $Z_b$  empedansının sıfıra eşit olma koşulunu sağlamak ve Şekil 2.2’de gösterilen  $Z_r$  empedans değeri grafiğini sağlamak mümkün olmadığı için  $S_{11}$  ve  $S_{21}$  değerlerinin sıfıra eşit olduğu ideal (sıfır yansımada) soğurma performansı sağlamak mümkün değildir. Bununla birlikte hedeflenen belli seviyede soğurma performansını sağlamak şu şekilde gerçekleştirilmektedir; bant geçiren yüzey empedansı  $Z_b$ ’nin empedans değeri iletim bandı dışında soğurma bandı spektrumundaki frekanslarda düşmektedir. Bant geçiren yüzey ve soğurucu yüzeyin arasında bulunan dielektrik yüzeyin çeyrek dalga boyu çevirici tepkisinde davranmasıyla soğurucu yüzey tarafından soğurma bandı spektrumunda görülen empedans değeri yüksek değerde olmaktadır. Soğurucu yüzey tarafından yüksek empedans değeri görülmesinin sağlanmasıyla; soğurma bandında  $Z_r$  empedansının rezistif empedans değerinin  $Z_0$  empedansına yakın değerde, reaktif empedans değerinin düşük değerde olmasının sağladığı ölçüde yüksek soğurma seviyeleri, düşük geri yansımaları elde edilmektedir.

### 3. SENTEZ

Tasarlanan soğurucu frekans seçici yüzeyin çift polarizasyonlu çalışma, X bantta geniş iletim bandı, düşük frekans spektrumunda S-banda ulaşan soğurma bandı özelliklerine sahip olması için bu performans kriterlerini sağlayacak soğurucu yüzey ve bant geçiren yüzey rezonatörlerinin önerilmesi ve sentezlenmesi gerekmektedir. Soğurucu yüzeyde çift polarizasyonlu çalışma özelliği için rezonatörün iki dikey ekseninde simetrik geometrik şekilde olması gerekir [15]. Ayrıca, geniş bantta çalışma özelliği için, rezonatör yapısında bulunan ve merkez iletim frekansında rezonans eden paralel rezonatörün kalite faktörünün ( $Q_p$ ) düşük değerinde olması gerekir. Bu sebeple paralel rezonatör yapısındaki indüktör değeri  $L_p$ 'nin yüksek değerinde, kapasitör değeri  $C_p$ 'nin düşük değerinde olması gerekmektedir (Eşitlik 3.1). Literatürde, mikroşerit rezonatörlerde yüksek indüktans ve düşük kapasitans değerine sahip paralel rezonans elde etmek için çeşitli rezonatör tipleri kullanılmaktadır. Rezonatör tiplerinden bir kısmına örnek olarak; dairesel spiral rezonatör [23], interdijital rezonatör [24] [38], sarmal (convoluted) rezonatör [25], kare spiral rezonatör [33] verilebilir .

Paralel rezonans yapılarında kalite faktörü ( $Q_p$ ) eşitliği şu şekildedir;

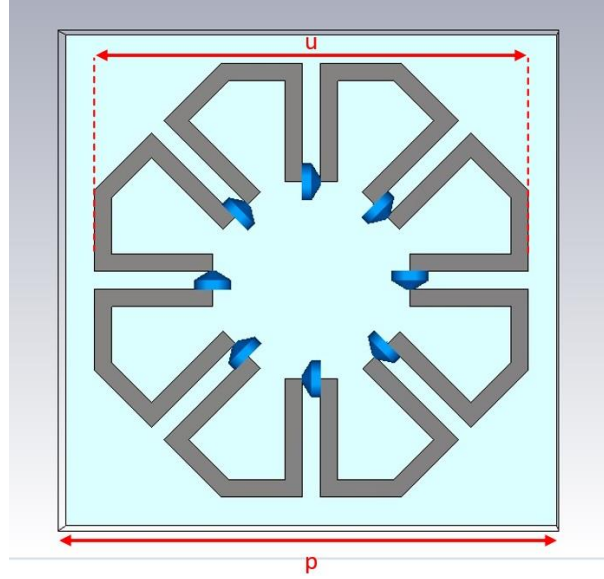
$$Q_p = R_p \sqrt{\frac{C_p}{L_p}} \quad (3.1)$$

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_p C_p}} \quad (3.2)$$

Bu eşitliklerde  $Q_p$  paralel rezonans için kalite faktörü değerini,  $L_p$  paralel rezonans yapısındaki indüktör değerini,  $C_p$  kapasitör değerini,  $R_p$  paralel direnç değerini ifade etmektedir;  $f_r$  rezonans frekansını ifade etmektedir.

Simetrik yapı gerekliliği, paralel rezonans bölgesindeki indüktör değerinin yüksek, kapasitör değerinin düşük olması gerekliliği, ve rezonatörün toplu elemanlı direnç entegrasyonuna uygun olması gerekliliği düşünülerek özgün soğurucu yüzey rezonatörü önerilmiştir. Soğurucu yüzey rezonatörü sekizgen şekilde, dış kenarlarında mikroşerit

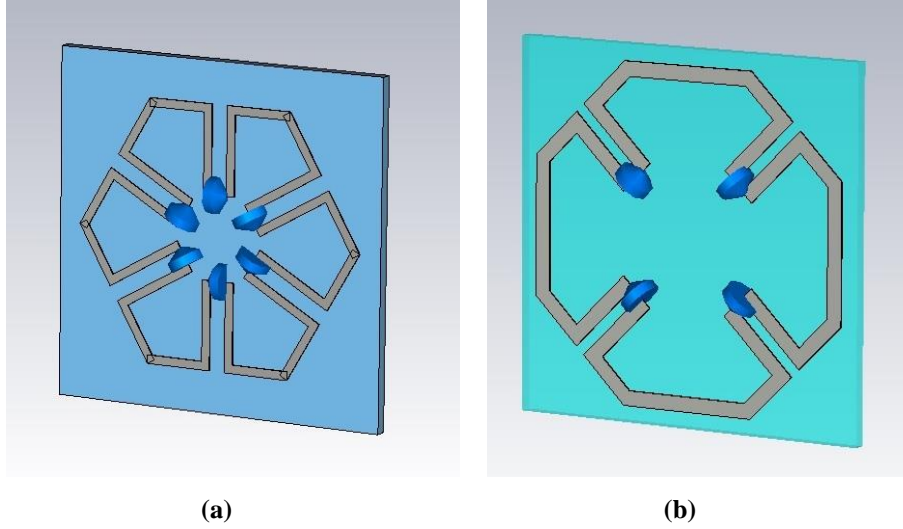
hatlar bulunan, dış mikroşerit hatların ortasından merkeze doğru paralel mikroşerit hatlar uzanan yapıdadır. Merkeze uzanan paralel mikroşerit hatların uç kısımlarında hatları birbirine bağlayan toplu eleman dirençler bulunmaktadır. Merkeze doğru uzanan paralel mikroşeritler soğurucu yüzey rezonatör boyutunun ( $u$ ) düşük değerinde kalmasını sağlarken geniş bantlı iletim için gerekli olan yüksek indüktans ve düşük kapasitans değerine sahip paralel rezonans yapısını sağlamaktadır (Şekil 3.1).



Şekil 3.1 Soğurucu yüzey rezonatörü, rezonatör boyutu ( $u$ ) ve birim eleman periyodu ( $p$ )

Soğurucu yüzey rezonatörünün alternatifi olarak altıgen mikroşerit rezonatör (Şekil 3.2.a) ve dört bölümde merkeze uzanan paralel mikroşeritlere sahip olan sekizgen rezonatör (Şekil 3.2.b) yapıları incelenmiştir. Altıgen rezonatörün üst-alt bölgelerine ve sol-sağ bölgelerine farklı mikroşerit kısımları denk gelmektedir. Altıgen geometri yapısından kaynaklanan bu durum sebebiyle soğurucu yüzeyde ardışık olarak iki eksende tekrarlayan rezonatörlerin üst-alt kısımlarıyla sol-sağ kısımları arasında farklı seviyede bağlaşım gerçekleşebilir; ayrıca tasarım aşamasında, tekrarlayan rezonatörler arası boşlukların iki farklı eksende farklı değerinde olması gerekebilir. Bu durum soğurucu yüzey rezonatörünün simetrik yapı özelliğinin bozulmasına yol açmaktadır; bu sebeple değerlendirilen altıgen mikroşerit rezonatörün (Şekil 3.2.a) soğurucu yüzey rezonatörü olarak kullanımı uygun bulunmamıştır. Soğurucu yüzey rezonatörü olarak incelenen diğer alternatif olan dört bölümde paralel mikroşeritlere sahip sekizgen rezonatör geometrisinde (Şekil 3.2.b) merkeze uzanan paralel mikroşerit hatlar dört bölümde yer almaktadır. Bu geometri yapısı sebebiyle, rezonatörün empedans modeli içinde

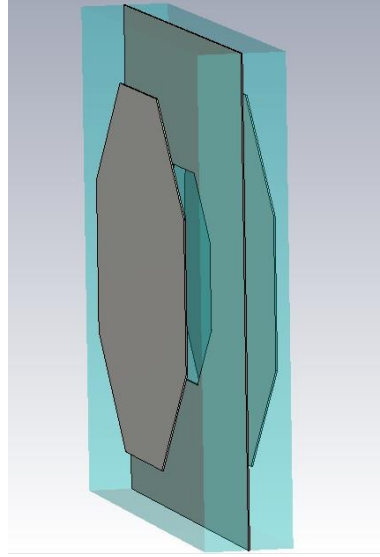
mikroşerit hatların oluşturduğu seri indüktör kısmının indüktans değeri önemli ölçüde artmaktadır. Bunun sonucunda soğurucu yüzey frekans tepkisinin istenen merkez frekansta geniş bantlı ve merkez frekans çevresinde simetrik formda oluşması mümkün olmamaktadır. Bu sebepler değerlendirilerek, soğurucu yüzey birim eleman rezonatörü olarak Şekil 3.1’de gösterilen sekizgen rezonatör yapısı önerilmektedir.



Şekil 3.2 Altıgen rezonatör (a), dört paralel mikroşeritli sekizgen rezonatör (b)

Soğurucu frekans seçici yüzey yapılarında bulunan bant geçiren yüzeyler konvansiyonel frekans seçici yüzey yapısındadır ve frekans tepkileri bant geçiren filtre formundadır. Bant geçiren yüzeyler ile geniş iletim bandı sağlamak için yaygın olarak kullanılan metot çok katmanlı bant geçiren yüzey tasarımıdır. Çok katmanlı bant geçiren yüzey tasarımıyla çoklu rezonans elde edilmektedir, ve tekli rezonans ile elde edilebilecek iletim bandından daha geniş iletim bandı performansı elde edilmektedir [24]. Bant geçiren yüzeyin çift polarizasyonlu çalışmayı sağlaması için yüzeyin birim eleman rezonatörünün iki dikey ekseninde simetrik geometrik şekilde olması gerekmektedir. Bant geçiren yüzey birim eleman rezonatörü, bu gereksinimler düşünülerek üç katmanlı sekizgen yama-yarık-yama rezonatör olarak önerilmiştir (Şekil 3.3).





Şekil 3.3 Bant geçiren yüzey rezonatörü

### 3.1. Soğurucu Yüzey Sentezi

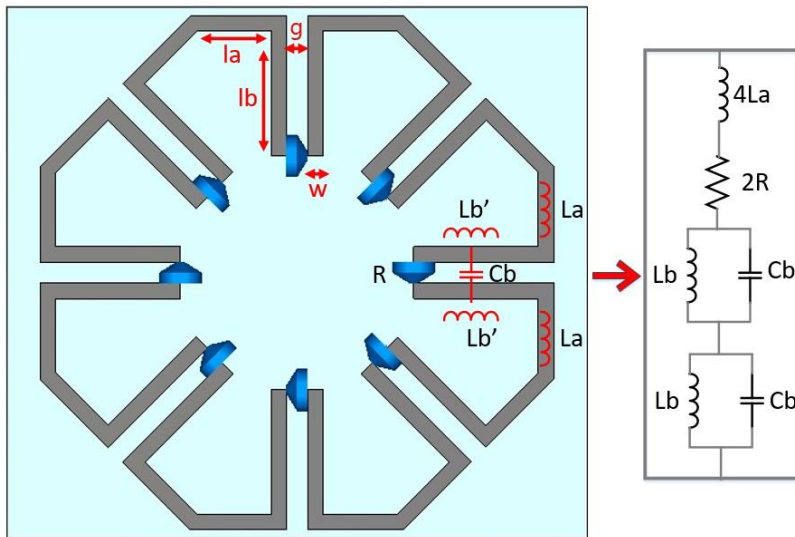
#### 3.1.1. Genetik Algoritma Tasarımı

Genetik algoritmalar geniş kapsamlı olarak farklı alanlarda optimizasyon problemlerinin çözülmesi amacıyla kullanılan sezgisel algoritmalar sınıfındadır [39]. İlk olarak 1975 yılında genetik algoritma konsepti ortaya çıkmıştır [40], ve sonrasında farklı problem çözümleri alanlarında uygulanmıştır [41]. Genetik algoritmaların uygulama alanlarından birisi de elektromanyetik problemlerdir [42].

Bu tez çalışmasında soğurucu yüzey sentezinin tasarlanan genetik algoritma kodu ile gerçekleştirilmesi önerilmiştir. Literatürde bulunan soğurucu frekans seçici yüzey tasarım çalışmalarında, yüzey birim eleman rezonatörleri önerildikten sonra eşdeğer devre modelinin oluşturulmasıyla boyut ve eleman değerlerinin tahmini, hesaplamaları ve analizinin art arda gerçekleştirilmesi sonucunda rezonatörlerin sentezi gerçekleştirilmektedir. Sentez sonrasında EM analizle gerçekleştirilen eleman ve boyut değerlerinin ince ayarı sonucunda tasarım süreci neticelendirilmektedir [9] [43]. Bu çalışmada, literatürdeki çalışmalardan farklı olarak soğurucu yüzey rezonatörünün sentezi genetik algoritma (GA) kodu ile gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla sentezi gerçekleştiren GA kodu tasarlanmıştır. GA ile sentez yöntemi sentez aşamasında rezonatör şekline kaynaklanan geometrik limitleri hesaba katmaktadır, ayrıca hedeflenen frekans tepkisini sağlayan eleman değerleri bulan sentezi

gerçekleştirmektedir; bu sebeplerle literatürdeki sentez yöntemine kıyasla sentez sürecini hızlandırmaktadır. Ayrıca aynı rezonatör yapısının farklı değerdeki frekans tepkisi hedefleri için denenmesini hızlı şekilde gerçekleştirebilmektedir.

Önerilen soğurucu yüzey birim eleman rezonatörü simetrik sekiz kısımdan oluşmaktadır, yüzeye entegre edilecek toplu eleman direnç değeriyle birlikte frekans tepkisini belirleyen beş farklı parametre ile ifade edilmektedir. Rezonatörün dış çerçeve kısmında, paralel mikroşeritlerin iki yanında  $l_a$  uzunluğunda mikroşerit kısımlar bulunmaktadır. Bu mikroşerit kısımların oluşturduğu indüktif bağlaşım eşdeğer devre modelinde  $L_a$  indüktans değeriyle ifade edilmektedir. Dış çerçeveden merkez kısma doğru uzanan paralel mikroşeritlerin uzunluğu  $l_b$  ile ifade edilmektedir. Paralel mikroşeritlerin her birinin oluşturduğu indüktif bağlaşım  $L_b'$  indüktansı ile ifade edilmektedir. Eşdeğer devre modelinde, paralel mikroşeritler için iki seri  $L_b'$  indüktansı bulunmaktadır. Rezonatör yapısında  $l_a$  ve  $l_b$  uzunluğuyla ifade edilen mikroşeritlerin hat kalınlık değeri  $w$  değeriyle ifade edilmektedir. Paralel mikroşerit hatları arasındaki açıklık  $g$  değeriyle ifade edilir. Paralel mikroşerit hatları arasında oluşan kapasitif bağlaşım  $C_b$  değerindeki kapasitör ile modellenir. Paralel mikroşeritlerin merkeze yakın uçlarına entegre edilen sekiz adet toplu eleman direncin direnç değeri  $R$ 'dir. Soğurucu yüzey rezonatörünü tanımlayan beş parametre (dört uzunluk değeri ve bir direnç değeri)  $l_a$ ,  $l_b$ ,  $w$ ,  $g$ ,  $R$  ve ilgili mikroşerit bölgelerinde oluşan bağlaşımları  $L_a$ ,  $L_b$ ,  $C_b$  indüktör ve kapasitörleri ile modelleyen eşdeğer devre modeli Şekil 3.4'te gösterilmektedir.



Şekil 3.4 Soğurucu yüzey birim eleman rezonatörü ve eşdeğer devre modeli

Genetik algoritma kodunda her bir kromozom  $l_a$ ,  $l_b$ ,  $w$ ,  $g$ ,  $R$  değerlerini ifade eden bit dizisidir ve yirmi yedi bit uzunluktadır. GA kodunda uzunluk değerleri  $l_a$  ve  $l_b$ , 0.05 mm çözünürlükle yedişer bit uzunlukla tanımlanmaktadır. Sentez sonucu alabilecekleri değer 0.05-6.40 mm aralığındadır. Mikroşerit hat kalınlık değeri  $w$  ve paralel mikroşeritler arası açıklık değeri  $g$ , 0.025 mm çözünürlükle beşer bit uzunlukla tanımlanmaktadır. Sentez sonucu alabilecekleri değer aralığı 0.025-0.80 mm'dir. Rezonatöre entegre edilen dirençlerin direnç değeri  $R$ , 25 Ohm çözünürlükle üç bit uzunlukla tanımlanmaktadır. Sentez sonucu 25-200 Ohm aralığında değer alabilir. Uzunluk değerleri için 0.05 mm ve 0.025 mm çözünürlük değerleri belirlenirken kart kazıma üretim kabiliyetleri, direnç değeri  $R$  için 25 Ohm çözünürlük değeri belirlenirken toplu elemanlı dirençlerin direnç değerlerinin sürekli olmaması dikkate alınmaktadır.

$$K_i = \left[ \underbrace{1 \dots 7}_{l_a} \underbrace{8 \dots 14}_{l_b} \underbrace{15 \dots 19}_w \underbrace{20 \dots 24}_g \underbrace{25 \dots 27}_R \right] \quad (3.3)$$

Her bir kromozom dizisinde 1'nci ve 7'nci bitler arası  $l_a$  uzunluk değerini, 8'nci ve 14'ncü bitler arası  $l_b$  uzunluk değerini, 15'nci ve 19'ncü bitler arası  $w$  hat kalınlığını, 20'nci ve 24'ncü bitler arası  $g$  aralığını, 25'nci ve 27'ncü bitler arası  $R$  direnç değerini ifade etmektedir.  $K_i$  kromozomun grup içinde, diğer kromozomlar arasında sıralanması sonucunda, sıralamadaki yerine göre aldığı kromozom numarasını ifade etmektedir.

Soğurucu yüzey eşdeğer devre modelinin oluşturulması aşamasında, eşdeğer devre modelinde mikroşerit hatların oluşturduğu indüktif bağlaşımı modelleyen indüktans değerlerinin hesabı şu şekilde gerçekleştirilmektedir [44];

$$L_m = 2 \cdot 10^4 l \left[ \ln \frac{l_m}{w_m + t} + 1.1913 + 0.2235 \frac{w_m + t}{l_m} \right] \quad (3.4)$$

Bu eşitlikte  $l_m$  ilgili mikroşerit uzunluğunu,  $w_m$  mikroşerit hat kalınlığını,  $t$  mikroşerit metal kalınlığını ifade etmektedir. Bu mikroşerit hattın modellediği indüktörün indüktans değeri  $L_m$  ile ifade edilmektedir.

Rezonatör yapısında bulunan paralel mikroşeritler arasındaki kapasitif bağlaşımı modelleyen kapasitörün kapasitans değeri  $C_m$  paralel plaka kapasitans yaklaşımıyla hesaplanmaktadır.

$$C_m = \frac{A\varepsilon_e}{d_m} \quad (3.5)$$

Bu eşitlikte  $A$  arasında kapasitif bağlaşım olan paralel mikroşerit bölgelerin alanıdır;  $d_m$  paralel mikroşerit bölgelerin orta kısımları arasındaki mesafedir. Eşitlikte mikroşerit hattın efektif dielektrik sabiti  $\varepsilon_e$  ile ifade edilir.

Genetik algorithmada eşdeğer devre modelinin analizi şu şekilde gerçekleştirilir. Sentez aşamasında üretilen  $l_a, l_b, w, g, R$  değerlerine karşılık Eşitlik 3.4 ve Eşitlik 3.5 ile eşdeğer devre modelindeki  $L_a, L_b, C_b$  değerleri hesaplanır. Bu değerlerle birlikte, soğurucu yüzey rezonatör empedansı  $Z_r$  eşdeğer indüktör ve kapasitör değerleriyle şu şekilde hesaplanır (Şekil 3.4);

$$L_{eq} = 4L_a \quad (3.6)$$

$$L_{beq} = L_b \quad (3.7)$$

$$C_{beq} = C_b \quad (3.8)$$

$$R_{eq} = 2R \quad (3.9)$$

$$Z_r = R_{eq} + j\Omega L_{eq} + 2 \left( \frac{j\Omega L_{beq} \frac{1}{j\Omega C_{beq}}}{j\Omega L_{beq} + \frac{1}{j\Omega C_{beq}}} \right) \quad (3.10)$$

Bu eşitliklerde  $L_{eq}$  rezonatörün eşdeğer seri indüktör değerini,  $R_{eq}$  eşdeğer direnç değerini;  $L_{beq}$  eşdeğer devre modelinde paralel hattaki eşdeğer indüktans değerini,  $C_{beq}$  eşdeğer kapasitans değerini ve  $Z_r$  soğurucu yüzey rezonatörünün empedans değerini,  $\Omega$  frekans değerini ifade etmektedir. Eşdeğer devre modelinin analizi, soğurucu yüzeyin ABCD matrisinin tanımlanması (Eşitlik 2.1) ve ABCD matrisinin S-parametre matrisine

dönüşümü ile gerçekleştirilir; bu dönüşümle birlikte soğurucu yüzeyin analizdeki  $S_{11}$  ve  $S_{21}$  değerleri şu şekilde yazılır.

$$S_{11r} = \frac{1 - \frac{Z_0}{Z_r}}{1 + \frac{Z_0}{Z_r}} \quad (3.11)$$

$$S_{21r} = \frac{2}{1 + \frac{Z_0}{Z_r}} \quad (3.12)$$

Bu eşitliklerde  $Z_0$  boşluk karakteristik empedansını,  $Z_r$  soğurucu yüzey rezonatörü empedansını,  $S_{11r}$  soğurucu yüzey  $S_{11}$  değerini,  $S_{21r}$  soğurucu yüzey  $S_{21}$  değerini ifade etmektedir.

Sentez sonucu oluşacak eleman değerlerinin geometrik uygunluğunu ve performans kriterlerini sağladığını kontrol etmek için GA maliyet fonksiyonları tanımlanmaktadır. GA kodu, ilgili maliyet fonksiyonlarının normalize edilmiş ağırlıklandırılmış toplamı ile hesaplanan toplam maliyet fonksiyonu  $M$ 'nin değerini minimize edecek değer setini bulacak optimizasyon algoritması olarak tasarlanmaktadır.

$$\min M \quad (3.13)$$

$$M = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^9 w_i M_i \quad i: 1, \dots, 9 \quad (3.14)$$

$$N = \sum_{i=1}^9 w_i \quad (3.15)$$

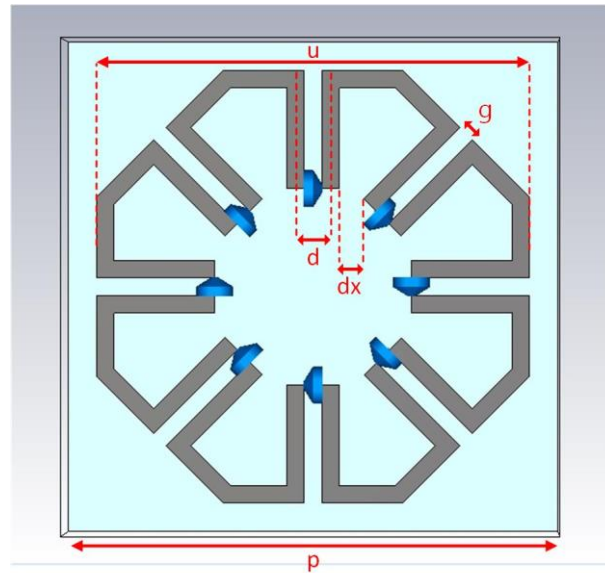
$$M_i = f_i(l_a, l_b, w, g, R) \quad 0 \leq M_i \leq 1 \quad (3.16)$$

Bu eşitlikte, her maliyet fonksiyonunun ağırlıklandırma katsayısı  $w_i$ 'dir.  $N$  ağırlıklandırma katsayılarının toplamına eşittir. Tasarlanan GA'da ağırlıklandırma katsayıları bire eşittir.  $N$  değeri dokuza eşittir. Tüm maliyet fonksiyonlarının tanımında, çıktı değer aralıklarının eşitlenmesi için maliyet fonksiyonları tanımlı talep fonksiyonları (desirability function) cinsinden yapılmaktadır [45] [46]; maliyet fonksiyonlarının çıktı değerleri  $M_i$  ve toplam maliyet fonksiyonu  $M$ , 0 ve 1 aralığında değer almaktadır.

Maliyet fonksiyoları iki gruba ayrılmaktadır. Birinci gruptaki maliyet fonksiyonları rezonatör geometrisini kontrol etmek ve gerçekleştirilebilir bir geometri sentezlemek amacıyla tanımlanmaktadır. İkinci gruptaki maliyet fonksiyonları soğurucu yüzeyin frekans tepkisini kontrol etmektedir. Birinci grupta dört, ikinci grupta beş maliyet fonksiyonu olmak üzere GA kodunda toplamda dokuz maliyet fonksiyonu bulunmaktadır.

### 3.1.1.A. Boyut Maliyet Fonksiyonları

Boyut maliyet fonksiyonları GA kodu tarafından sentezlenen rezonatörün geometrisini kontrol etmek amacıyla GA kodunda bulunmaktadır. Boyut maliyet fonksiyonlarının kontrol ettiği dört farklı boyut değeri  $d_x$ ,  $d$ ,  $g$ , ve  $u$  değerleridir. Ardışık paralel mikroşeritlerin köşe noktalarının dikey uzaklık değeri  $d_x$  olarak ifade edilmektedir. Paralel mikroşerit hatlarının merkezlerinin birbirine uzaklığı  $d$  olarak ifade edilmektedir. Paralel mikroşerit hatlarının arasındaki açıklık  $g$  olarak ifade edilmektedir. Rezonatör boyutu  $u$  ile ifade edilmektedir. İlgili boyutlar Şekil 3.5'te gösterilmektedir.



Şekil 3.5 Boyut maliyet fonksiyonu parametreleri

### Birinci Maliyet Fonksiyonu (M1)

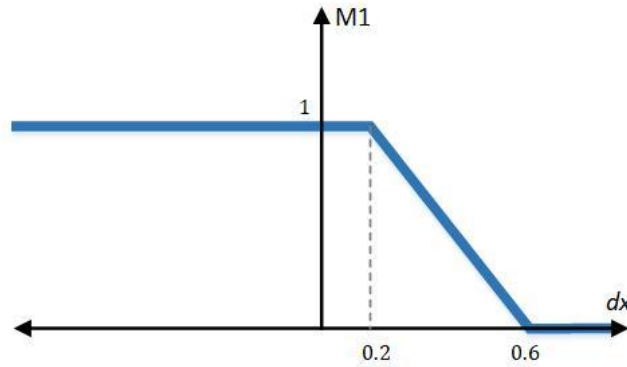
Birinci maliyet fonksiyonu ardışık paralel mikroşerit köşelerinin girişim yapmasını engellemek ve köşelerin birbirine fazla yaklaşmasını engelleyerek eşdeğer devre modelinde bulunmayan köşeler arası parazitik bağlaşımın oluşumunu engellemek

amacıyla tanımlanmaktadır. Maliyet fonksiyonunun girdisi olan ardışık paralel mikroşeritlerin köşe noktalarının dikey uzaklık değeri  $d_x$  Eşitlik 3.17 ile şu şekilde hesaplanmaktadır;

$$d_x = l_a + l_a \cos(45^\circ) - l_b \cos(45^\circ) \quad (3.17)$$

Birinci maliyet fonksiyonu  $M_1$  eşitliği şu şekilde tanımlanmaktadır (Şekil 3.6);

$$M_1 = \begin{cases} 0 & dx \geq 0.6 \\ -\frac{dx - 0.6}{0.4} & 0.6 > dx > 0.2 \\ 1 & dx \leq 0.2 \end{cases} \quad (3.18)$$



Şekil 3.6 Birinci maliyet fonksiyonu ( $M_1$ ) grafiği

Dikey uzaklık değeri  $d_x$ 'in alabileceği değerlerin alt limiti 0.2 mm'dir; limitin altındaki değerlerde sentez başarısız sayılmaktadır.

### İkinci Maliyet Fonksiyonu ( $M_2$ )

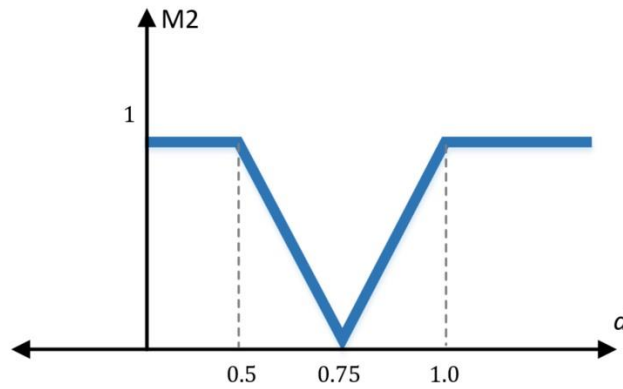
İkinci maliyet fonksiyonu paralel mikroşerit hatların merkezleri arası mesafeyi kontrol etmek amacıyla tanımlanmaktadır. Soğurucu rezonatör yapısında paralel mikroşerit hatların merkeze yakın uçlarında toplu elemanlı direnç bulunmaktadır. Direnç mikroşerit hatların uçlarına lehimlenerek hatları birbirine bağlamaktadır. Paralel mikroşeritlerin uçlarına eklenen dirençler 201 veya 402 paket boyutlu olabilecek şekilde GA kodu tasarlanmaktadır. Dolayısıyla sentez sonucu oluşacak rezonatör geometrisinde paralel

mikroşeritlerin merkezleri arasındaki  $d$  aralığının direnç entegresine uygun boyutlarda olması gereklidir;  $d$  değeri Eşitlik 3.19 ile şu şekilde hesaplanmaktadır;

$$d = w + g \quad (3.19)$$

İkinci maliyet fonksiyonu  $M_2$  şu şekilde tanımlanmaktadır (Şekil 3.7);

$$M_2 = \begin{cases} -\frac{d - 0.75}{0.25} & 0.75 \geq d > 0.5 \\ \frac{d - 0.75}{0.25} & 1.0 > d > 0.75 \\ 1 & (d \geq 1.0) \cup (d \leq 0.5) \end{cases} \quad (3.20)$$



Şekil 3.7 İkinci maliyet fonksiyonu ( $M_2$ ) grafiği

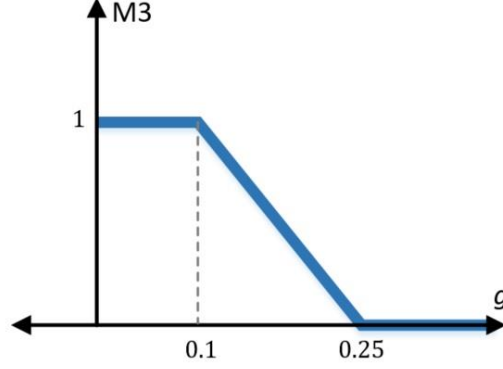
Paralel mikroşeritlerin merkezleri arası aralık  $d$ 'nin alabileceği değerlerin alt limiti 0.5 mm, üst limiti 1.0 mm'dir; limit dışındaki değerlerde sentez başarısız sayılmaktadır.

### Üçüncü Maliyet Fonksiyonu ( $M_3$ )

Üçüncü maliyet fonksiyonu paralel mikroşeritler arası açıklık değeri  $g$ 'yi kontrol etmek amacıyla tanımlanmaktadır. Açıklık değerinin üretim açısından gerçekleştirilebilir bir değer olması kontrol etmek için üçüncü maliyet fonksiyonu  $M_3$  şu şekilde tanımlanmaktadır (Şekil 3.8);



$$M_3 = \begin{cases} 0 & g \geq 0.25 \\ -\frac{g - 0.25}{0.15} & 0.25 > g > 0.1 \\ 1 & g \leq 0.1 \end{cases} \quad (3.21)$$



Şekil 3.8. Üçüncü maliyet fonksiyonu (M3) grafiği

Paralel mikroşeritler arası açıklık değeri  $g$ 'nin alabileceği değerlerin alt limiti 0.1 mm'dir; limitin altındaki değerlerde sentez başarısız sayılmaktadır.

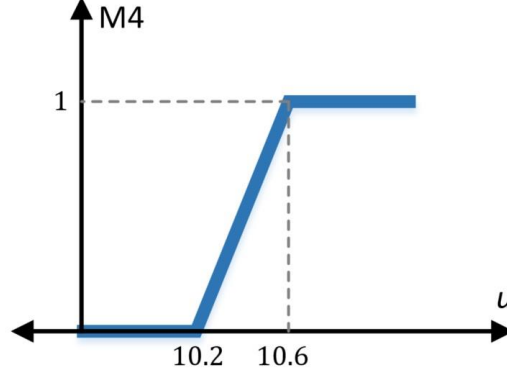
#### **Dördüncü Maliyet Fonksiyonu (M4)**

Dördüncü maliyet fonksiyonu rezonatör boyutunu kontrol etmek amacıyla tanımlanmaktadır. Tasarlanan soğurucu frekans seçici yüzeyin ölçümü WR-90 dalga kılavuzu ile gerçekleştirilmektedir. Sentezlenen rezonatörün WR-90 dalga kılavuzuyla ölçüme uygun olması ve ardışık rezonatörlerin birbirine yakın mikroşerit kolları arasında parazitik bağlaşım oluşmasını engellemek amacıyla tanımlanan maliyet fonksiyonunda birim eleman rezonatör boyutu  $u$ 'nun değeri Eşitlik 3.22 ile şu şekilde hesaplanmaktadır (Şekil 3.9);

$$u = (2 \cos(22.5^\circ) + 1)(2l_a + 2w + g + 2(w \tan(22.5^\circ))) \quad (3.22)$$

Dördüncü maliyet fonksiyonu  $M_4$  şu şekilde tanımlanmaktadır;

$$M_4 = \begin{cases} 0 & u \leq 10.2 \\ \frac{u - 10.2}{0.4} & 10.6 > u > 10.2 \\ 1 & u \geq 10.6 \end{cases} \quad (3.23)$$



Şekil 3.9 Dördüncü maliyet fonksiyonu (M4) grafiği

Birim eleman rezonatör boyutu  $u$ 'nun üst limit değeri 10.6 mm'dir; limitin üzerindeki değerlerde sentez başarısız sayılmaktadır.

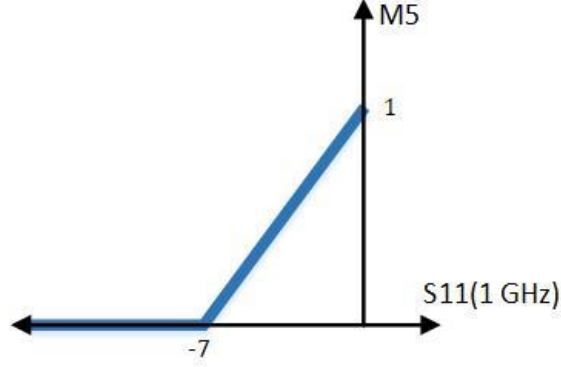
### 3.1.1.B. Frekans Tepkisi Maliyet Fonksiyonları

Soğurucu yüzey frekans tepkisini kontrol etmek amacıyla GA koduna beş frekans tepkisi maliyet fonksiyonu tanımlanmaktadır. Sentezlenen soğurucu frekans seçici yüzeyin şu performans kriterlerine sahip olması hedeflenmektedir: merkez frekansının 11 GHz olması, geniş iletim bandına sahip olması, soğurma bandının düşük frekans bölgesinde S-banda ulaşması. Frekans tepkisi maliyet fonksiyonları, sentezlenen soğurucu yüzey rezonatörünün hedeflenen frekans tepkisi değerlerine ulaşmasını sağlamak amacıyla tanımlanmaktadır.

### Beşinci Maliyet Fonksiyonu (M5)

Soğurma bandının düşük frekans spektrumunda geniş bantlı olması amacıyla iki maliyet fonksiyonu, beşinci ve altıncı maliyet fonksiyonları tanımlanmaktadır. Beşinci maliyet fonksiyonu  $M_5$ , soğurucu yüzey rezonatörünün eşdeğer devre analizinde 1 GHz'deki  $S_{11}$  değerinin -7 dB'den düşük olmasını sağlamak amacıyla, şu şekilde tanımlanmaktadır (Şekil 3.10);

$$M_5 = \begin{cases} 0 & S_{11}(1GHz) \leq -7 \\ \frac{S_{11}(1GHz) + 7}{7} & -7 > S_{11}(1GHz) > -10 \\ 1 & S_{11}(1GHz) \geq -10 \end{cases} \quad (3.24)$$

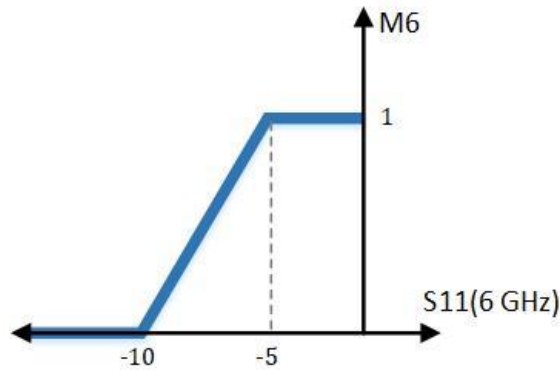


Şekil 3.10 Beşinci maliyet fonksiyonu (M5) grafiği

#### Altıncı Maliyet Fonksiyonu (M6)

Altıncı maliyet fonksiyonu  $M_6$ , soğurucu yüzey rezonatörünün eşdeğer devre analizinde 6 GHz'deki  $S_{11}$  değerinin -10 dB'den düşük olmasını sağlamak amacıyla, şu şekilde tanımlanmaktadır (Şekil 3.11);

$$M_6 = \begin{cases} 0 & S_{11}(6GHz) \leq -10 \\ \frac{S_{11}(6GHz) + 10}{5} & -5 > S_{11}(6GHz) > -10 \\ 1 & S_{11}(6GHz) \geq -5 \end{cases} \quad (3.25)$$

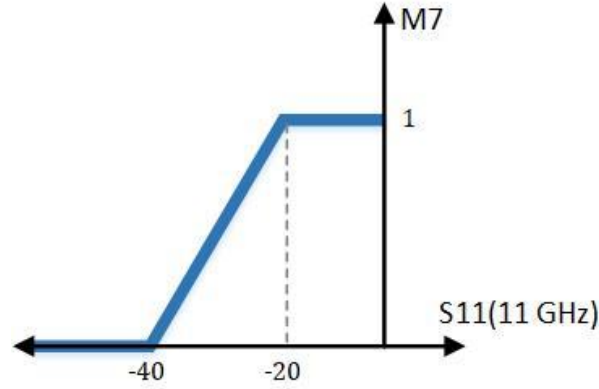


Şekil 3.11 Altıncı maliyet fonksiyonu (M6) grafiği

### Yedinci Maliyet Fonksiyonu (M7)

Soğurucu yüzeyin merkez frekansının 11 GHz’de olmasını sağlamak amacıyla iki maliyet fonksiyonu, yedinci ve sekizinci maliyet fonksiyonu tanımlanmaktadır. Yedinci maliyet fonksiyonu  $M_7$ , soğurucu yüzeyin eşdeğer devre modeli analizinde 11 GHz’deki  $S_{11}$  değerini kontrol etmek amacıyla, şu şekilde tanımlanmaktadır (Şekil 3.12);

$$M_7 = \begin{cases} 0 & S_{11}(11GHz) \leq -40 \\ \frac{S_{11}(11GHz) + 40}{20} & -20 > S_{11}(11GHz) > -40 \\ 1 & S_{11}(11GHz) \geq -20 \end{cases} \quad (3.26)$$



Şekil 3.12 Yedinci maliyet fonksiyonu ( $M_7$ ) grafiği

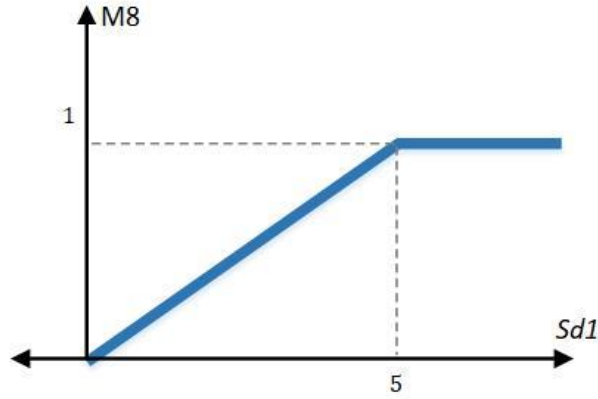
### Sekizinci Maliyet Fonksiyonu (M8)

Sekizinci maliyet fonksiyonu  $M_8$  ile soğurucu yüzeyin eşdeğer devre modeli analizinde 8 GHz’deki ve 14 GHz’deki  $S_{11}$  değerleri farkının düşük olması, bu sayede merkez iletim frekansının 11 GHz’e yaklaşması sağlanmaktadır. Bu amaçla yazılan sekizinci maliyet fonksiyonu  $M_8$  şu şekilde tanımlanmaktadır (Şekil 3.13);

$$S_{d1} = |S_{11}(8GHz) - S_{11}(14GHz)| \quad (3.27)$$

$$M_8 = \begin{cases} 0 & S_{d1} = 0 \\ \frac{S_{d1}}{5} & 5 > S_{d1} > 0 \\ 1 & S_{d1} \geq 5 \end{cases} \quad (3.28)$$

Bu eşitlikte  $S_{d1}$  eşdeğer devre modeli analizinde soğurucu yüzeyin 8 GHz ve 14 GHz'deki  $S_{11}$  değerleri farkının mutlak değeridir.



Şekil 3.13 Sekizinci maliyet fonksiyonu (M8) grafiği

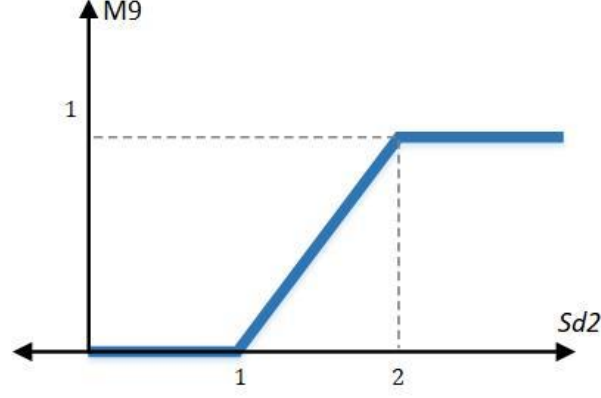
#### **Dokuzuncu maliyet fonksiyonu (M9)**

Dokuzuncu maliyet fonksiyonu soğurucu yüzeyin iletim bandı frekans tepkisinin geniş bantlı olmasını sağlamak amacıyla tanımlanmaktadır. Eşdeğer devre modeli analizinde, merkez frekansı 11 GHz olan 1-dB iletim bandının 3 GHz'den geniş bantlı olmasını sağlamak amacıyla dokuzuncu maliyet fonksiyonu  $M_9$  şu şekilde tanımlanmaktadır (Şekil 3.14);

$$S_{d2} = |S_{21}(11GHz) - S_{21}(9.5GHz)| \quad (3.29)$$

$$M_9 = \begin{cases} 0 & S_{d2} \leq 1 \\ S_{d2} - 1 & 2 > S_{d2} > 1 \\ 1 & S_{d2} \geq 2 \end{cases} \quad (3.30)$$

Bu eşitlikte  $S_{d2}$  eşdeğer devre modeli analizinde soğurucu yüzeyin 9.5 GHz ve 11 GHz'deki  $S_{21}$  değerleri farkının mutlak değeridir. Bu eşitlikle farkın 1dB'nin altında olması talep edilerek soğurucu yüzeyin 3 GHz'den geniş 1-dB iletim bandında sentezlenmesi kontrol edilmektedir.



Şekil 3.14 Dokuzuncu maliyet fonksiyonu (M9) grafiği

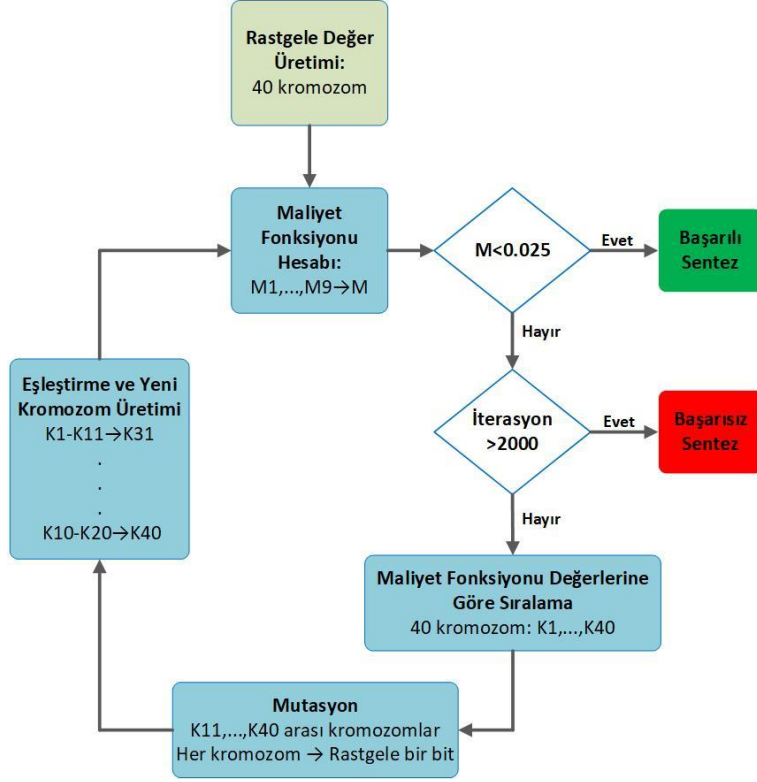
### 3.1.2. Genetik Algoritma Sentezi

Soğurucu yüzey sentezi için tasarlanan GA kodu şu şekilde çalışmaktadır. İlk aşamada her biri yirmi yedi bit uzunluğunda olan ve  $l_a$ ,  $l_b$ ,  $w$ ,  $g$  ve  $R$  parametre değerlerini ifade eden kırk adet kromozom rastgele bit değerleriyle oluşturulur. Daha sonra oluşturulan kırk adet kromozom için hesaplanan toplam maliyet fonksiyonu ( $M$ ) değerlerine göre kromozomlar; düşük maliyet fonksiyonu değerine sahip olanlardan yüksek maliyet fonksiyonu değerine sahip olanlara doğru, en düşük maliyet fonksiyonu değerine sahip olan kromozom 1'nci sırayı alacak şekilde sıralanır. Bu işlemin ardından kromozomlar eşleşme, yeni kromozom oluşumu ve mutasyon işlemlerini gerçekleştirir.

Eşleşme işleminde 1'nci ve 10'ncü sıra arasındaki kromozomlar sırayla 11'nci ve 20'nci sıra arasındaki kromozomlarla eşleşir ve 10 adet yeni kromozom oluşturur; oluşan yeni kromozomlar sırayla 31'nci ve 40'ncü sıra arasındaki kromozomların yerini alır. Eşleşme ve yeni kromozom oluşumuyla toplam kromozom sayısı değişmez. Eşleşme işleminde 1'nci kromozom 11'nci kromozomla eşleşir 31'nci kromozomu oluşturur, 2'nci kromozom 12'nci kromozomla eşleşir 32'nci kromozomu oluşturur; ve eşleşme işlemi 10'ncü ve 20'nci kromozomun eşleşmesine kadar ardışık kromozomlar arasında bu şekilde gerçekleşir. Her eşleşmede oluşan yeni kromozomun bit dizisinde  $l_a$ ,  $l_b$ ,  $w$ ,  $g$  ve  $R$  parametre değerlerini ifade eden bit dizileri, eşleşmeye giren iki kromozomdan birinden rastgele seçilerek yeni kromozomun ilgili bit dizisine aktarılır.

$$\begin{array}{rccccc}
K_i: & \underbrace{1 \dots 7}_{l_a(i)} & \underbrace{8 \dots 14}_{l_b(i)} & \underbrace{15 \dots 19}_{w(i)} & \underbrace{20 \dots 24}_{g(i)} & \underbrace{25 \dots 27}_{R(i)} \\
& + & + & + & + & + \\
K_{i+10}: & \underbrace{1 \dots 7}_{l_a(i+10)} & \underbrace{8 \dots 14}_{l_b(i+10)} & \underbrace{15 \dots 19}_{w(i+10)} & \underbrace{20 \dots 24}_{g(i+10)} & \underbrace{25 \dots 27}_{R(i+10)} \\
& \Downarrow & \Downarrow & \Downarrow & \Downarrow & \Downarrow \\
K_{i+30}: & \underbrace{1 \dots 7}_{l_a(i \vee i+10)} & \underbrace{8 \dots 14}_{l_b(i \vee i+10)} & \underbrace{15 \dots 19}_{w(i \vee i+10)} & \underbrace{20 \dots 24}_{g(i \vee i+10)} & \underbrace{25 \dots 27}_{R(i \vee i+10)}
\end{array} \quad (3.31)$$

Mutasyon işleminde 11'nci ve 40'nci kromozomlar arasındaki her bir kromozomun rastgele bir bit değeri değişir. Algoritma eşleşme, yeni kromozomların oluşumu ve mutasyon işlemlerinden sonra tekrar maliyet fonksiyonu hesaplaması ve sıralama işlemine geçer. Ardından tekrar eşleşme, yeni kromozomlar oluşumu ve mutasyon işlemi gerçekleşir. Bu işlemler ardışık olarak hedef maliyet fonksiyonu değerine ulaşana kadar gerçekleştirilir. GA kodunda toplam maliyet fonksiyonu  $M$  için belirlenen hedef değer 0.025'dir. Ayrıca sentezlenen değer setlerinde  $d_x, d, g, u$  boyut değerlerinden en az birinin tanımlanan limitler dışında değer alması durumunda sentez başarısız sayılmaktadır ve GA kodu bir sonraki iterasyona geçerek çalışmaya devam etmektedir. İki bin iterasyon sonrasında hedef maliyet fonksiyonunda sentez üretemeyen GA kodu çalışmasını durdurur ve sentez başarısız kabul edilir. Ayrıca kodun çalışması sırasında en düşük maliyet fonksiyonu değerinin beş yüz iterasyon boyunca değişmemesi durumunda GA kodu çalışmasını durdurur ve sentez başarısız kabul edilir. Genetik algoritma işleyiş şeması Şekil 3.15'te gösterilmektedir.



Şekil 3.15 Genetik algoritma (GA) işleyiş şeması

Soğurucu yüzey için kullanılan taban malzeme 0.25 mm kalınlıktaki Rogers RO3010'dur [47], taban malzemenin ölçüm dielektrik sabiti 10.3'dür. Tasarlanan GA kodu ile gerçekleştirilen soğurucu yüzey sentezlerinde, tanımlanan hedef maliyet fonksiyonu değerine ulaşan başarılı sentez setleri elde edilmektedir. GA kodunun sentezlediği eleman değerlerini analiz etmek, ilgili maliyet fonksiyonu değerlerini incelemek ve sentezlenen soğurucu yüzeylerin frekans tepkilerini analiz etmek amacıyla GA kodu ile rastgele on farklı koşurma gerçekleştirilmiştir.

GA kodunun on kez koşturulması sonucunda hedef maliyet fonksiyonuna ulaşan sekiz başarılı sentez gerçekleştirilmiştir. 3'ncü ve 7'nci koşurmada başarılı sentez elde edilememiştir. Elde edilen başarılı sentez sonuçlarının değerleri Çizelge 3.1, 3.2 ve 3.3'te gösterilmektedir.



Çizelge 3.1 GA kodu ile elde edilen başarılı sentez sonuçları maliyet fonksiyonu değerleri

Koşturma	M	İterasyon Sayısı	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	M <sub>3</sub>	M <sub>4</sub>	M <sub>5</sub>	M <sub>6</sub>	M <sub>7</sub>	M <sub>8</sub>	M <sub>9</sub>
1	0.0131	41	0	0.1	0	0	0	0	0	0.0175	0
2	0.0205	58	0	0	0	0.0127	0	0	0.1259	0.0460	0
4	0.0099	52	0	0	0	0	0	0	0.0310	0.0582	0
5	0.0241	155	0	0.1	0	0	0	0	0	0.1169	0
6	0.0108	138	0.0481	0	0	0	0	0	0	0.0493	0
8	0.0170	107	0	0	0	0	0	0	0.1376	0.0155	0
9	0.0128	36	0	0	0	0	0	0.0324	0	0.0827	0
10	0.0212	913	0.0544	0	0	0	0	0	0	0.1369	0

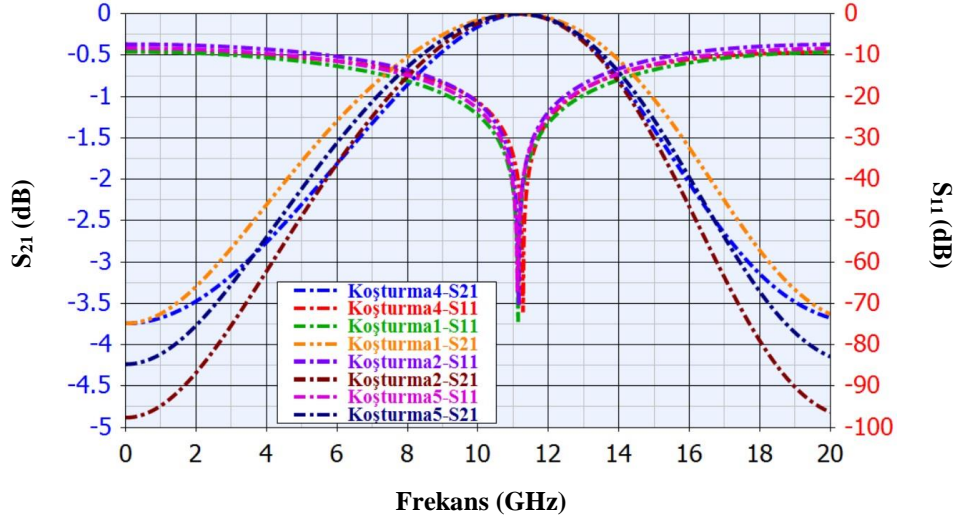
Çizelge 3.2 GA kodu ile elde edilen başarılı sentez sonuçları eleman değerleri

Koşturma	$l_a$	$l_b$	$w$	$g$	$R$	$L_{eq}$	$L_{beq}$	$C_{beq}$	$R_{eq}$
1	1.45	2.65	0.250	0.475	175	3.39	4.44	0.046	350
2	1.35	2.25	0.425	0.325	125	2.57	3.18	0.064	250
4	1.35	2.30	0.400	0.350	175	2.63	3.32	0.060	350
5	1.40	2.45	0.350	0.425	150	2.89	3.72	0.055	300
6	1.50	2.80	0.225	0.525	175	3.66	4.86	0.042	350
8	1.40	2.45	0.325	0.425	175	2.97	3.79	0.053	350
9	1.25	2.15	0.500	0.250	125	2.16	2.887	0.072	250
10	1.25	2.20	0.475	0.275	175	2.21	2.99	0.070	350

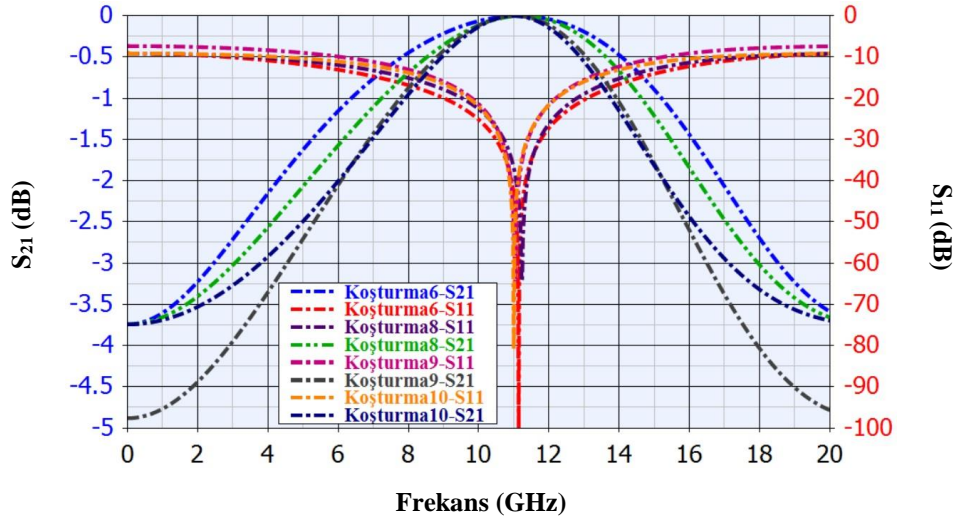
Çizelge 3.3 GA kodu ile elde edilen başarılı sentez sonuçları boyut ve performans değerleri

Koşturma	$d_x$	$d$	$u$	$S_{11}(1\text{GHz})$	$S_{11}(6\text{GHz})$	$S_{a2}$	Merkez frekans (GHz)
1	0.60	0.73	9.85	-9.20	-12.60	0.15	11.14
2	0.71	0.75	10.20	-7.40	-10.29	0.23	11.16
4	0.68	0.75	10.10	-9.17	-11.43	0.26	11.28
5	0.66	0.77	10.18	-8.35	-11.44	0.18	11.12
6	0.58	0.75	10.05	-9.22	-13.06	0.13	11.14
8	0.66	0.75	10.00	-9.18	-11.92	0.21	11.22
9	0.61	0.75	10.05	-7.39	-9.84	0.26	11.04
10	0.58	0.75	9.94	-9.16	-11.06	0.29	11.00

Genetik algoritma kodunun rastgele on kez çalıştırılmasıyla elde edilen başarılı sentez sonuçlarının eleman değerleriyle, Eşitlik 3.11 ve Eşitlik 3.12 üzerinden hesaplanan eşdeğer devre modeli frekans tepkisi analizlerinin grafikleri Şekil 3.16 ve Şekil 3.17’de gösterilmektedir. Maliyet fonksiyonu değeri 0.0099 olan sentezin (Koşturma 4) eşdeğer devre modeli analizi sonucu iletim merkez frekansı 11.28 GHz’dir. 1 GHz’de  $S_{11}$  değeri -9.2 dB’dir, 6 GHz’de  $S_{11}$  değeri -11.4 dB’dir. 1-dB iletim bandı kesim noktaları düşük frekans tarafında 7.66 GHz, yüksek frekans tarafında 14.38 GHz’dir. Sentez sonucunda oluşan bu eleman değerleri seti ile performans maliyet fonksiyonlarıyla hedeflenen performans kriterleri olan; 11 GHz’e yakın merkez iletim bandı, 1 GHz ve 6 GHz soğurma bölgelerindeki geri yansıma değerleri ve geniş iletim bandı performansının eşdeğer devre modeli analizinde sağlandığı görülmektedir. Genetik algoritma sentezi sonucu oluşan diğer başarılı sentezlerin de hedeflenen performans kriterlerini sağladığı Çizelge 3.3’te gösterilmektedir.

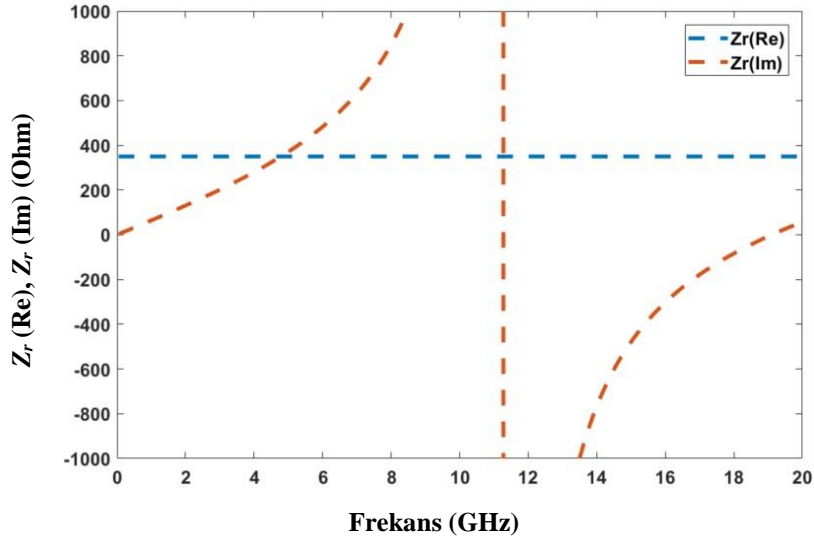


Şekil 3.16 GA sentezi sonucunda Koşturma 1, 2, 4 ve 5 sentez değerleriyle oluşturulan soğurucu yüzeylerin frekans tepkisi



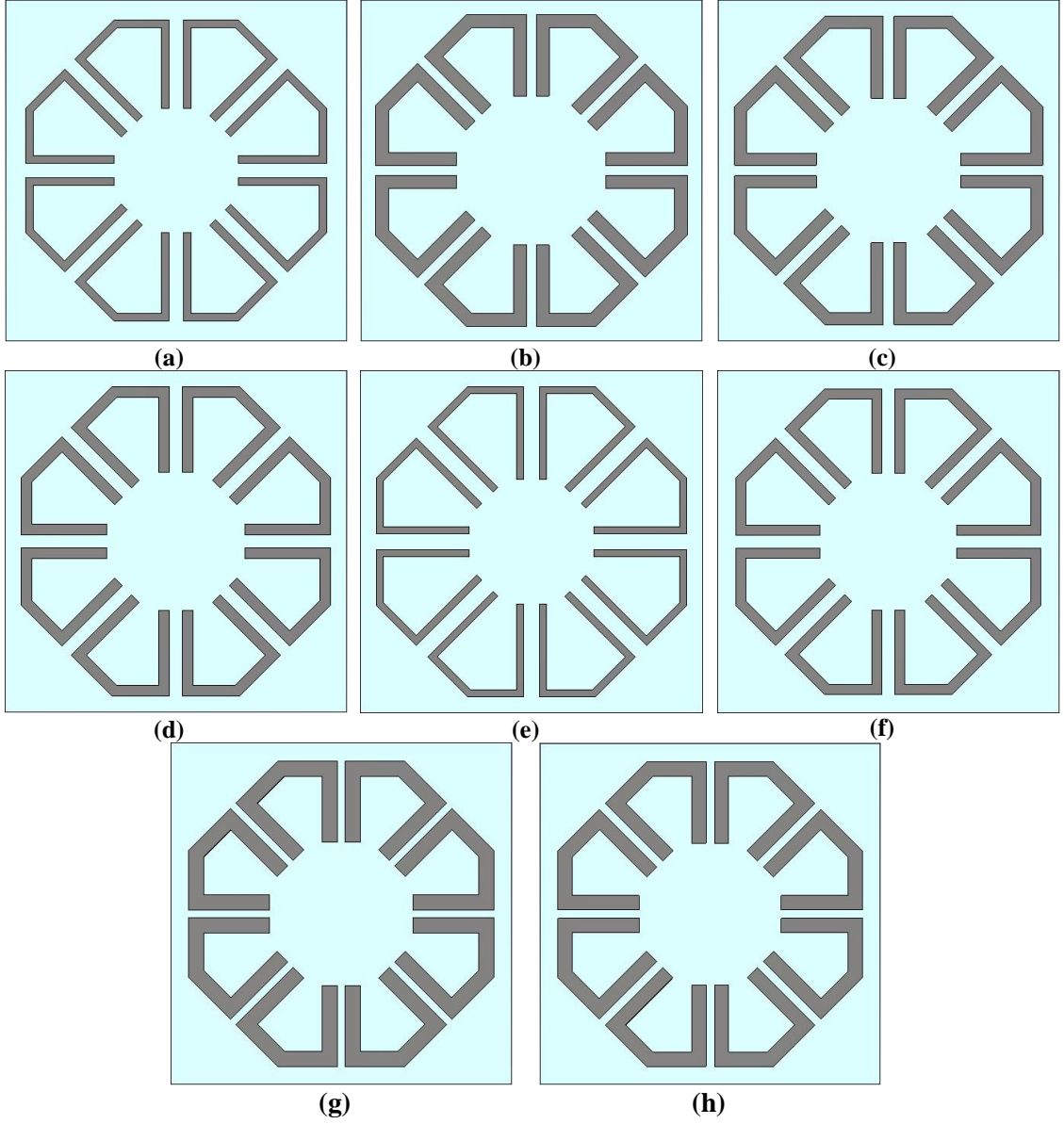
Şekil 3.17 GA sentezi sonucunda Koşturma 6, 8, 9 ve 10 sentez değerleriyle oluşturulan soğurucu yüzeylerin frekans tepkisi

4'ncü koşturma sonucu sentezlenen soğurucu yüzeyin yüzey empedansı  $Z_r$ 'nin frekansa bağlı değişim grafiği Şekil 3.18'de gösterilmektedir.



Şekil 3.18 GA sentezi sonucunda  $M=0.0099$  maliyet fonksiyonu değeri ile sentezlenen soğurucu yüzeyin yüzey empedansı  $Z_r$  grafiği

GA kodu ile sekiz başarılı sentez sonucu oluşturulan soğurucu yüzey Şekil 3.19’da gösterilmektedir. Sentezlenen tüm yüzeyler üretilebilir geometrik şekillere sahiptir, ayrıca paralel mikroşeritler arası açıklık 201 ve 402 paket boyutlu direnç lehimlenmesine uygundur. Mikroşerit rezonatör yapısında toplu elemanlı direnç kullanımı, frekansla değeri artan parazitik empedans etkisi sebebiyle, rezonatörün yüksek frekanslarda çalışmasını limitler. Bu sebeple tasarlanan soğurucu yüzey rezonatöründe, parazitik empedans değeri ilgili frekans bandında 402 paketli dirençlere kıyasla düşük değerde olan, 201 paketli dirençlerin kullanılması kararlaştırılmıştır [48].



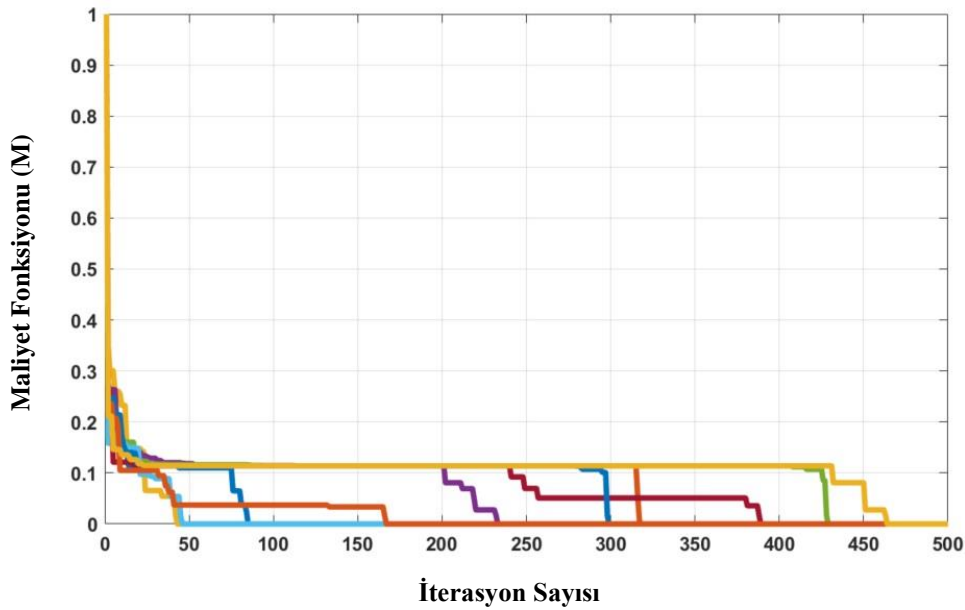
Şekil 3.19 GA ile sentezlenen soğurucu yüzey rezonatör yapıları: Koşturma 1 (a), Koşturma 2 (b), Koşturma 4 (c), Koşturma 5 (d), Koşturma 6 (e), Koşturma 8 (f), Koşturma 9 (g), Koşturma 10 (h)

### 3.1.3. Genetik Algoritma Tasarımında Alternatif Metotların İncelenmesi

Tasarlanan GA kodunun sentez performansını ölçmek ve alternatif algoritma işleyişlerini test etmek amacıyla alternatif eşleşme ve mutasyon algoritma işleyişleri önerilmiştir; ayrıca toplam birey sayısı, maliyet fonksiyonları aralıkları değiştirilerek modifiye edilmiş GA kodlarının sentez performansı ölçülmüştür. Sentez performansını ölçmek ve karşılaştırmak amacıyla referans GA kodu ve önerilen GA kodu alternatiflerinin hepsi ile elliser rastgele koşturma gerçekleştirilmiş, gerçekleştirilen koşturmaların hangi oranda

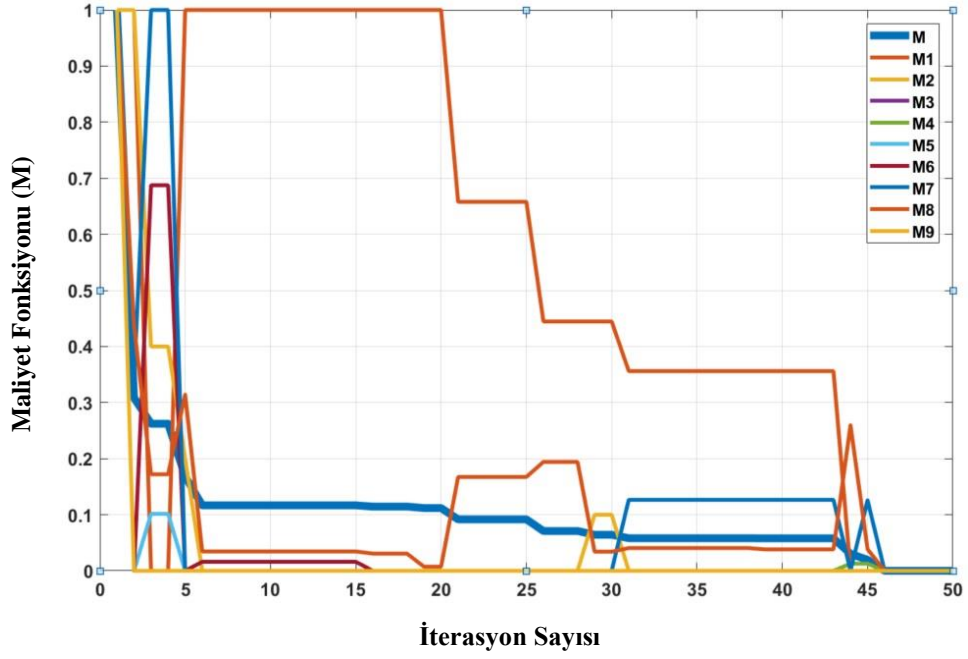
başarılı sentezler oluşturduğu ve kaç iterasyon sayısında başarılı senteze ulaştığı tespit edilmiştir.

GA kodunun (Şekil 3.15) sentez performansını test etmek için gerçekleştirilen elli farklı koşturma sonucunda, hedef maliyet fonksiyonuna ulaşan başarılı sentez gerçekleştirme oranı %80'dir. Başarılı sentezler ortalama 178 iterasyon sayısı ile üretilmiştir. Gerçekleştirilen koşturmalar arasında başarılı olmuş on farklı koşturmanın toplam maliyet fonksiyonu (M) değerinin iterasyon sayısına karşı değişim grafiği Şekil 3.20'de gösterilmektedir.

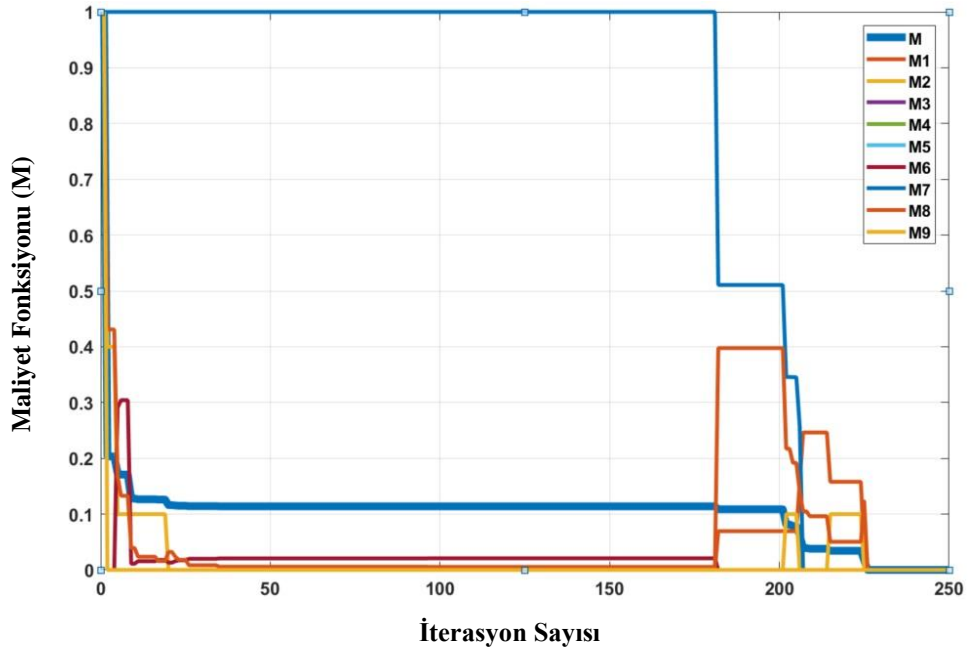


Şekil 3.20 Başarılı sentez üretmiş on farklı GA kodu koşturmasının iterasyon sayısıyla maliyet fonksiyonu değişim grafiği

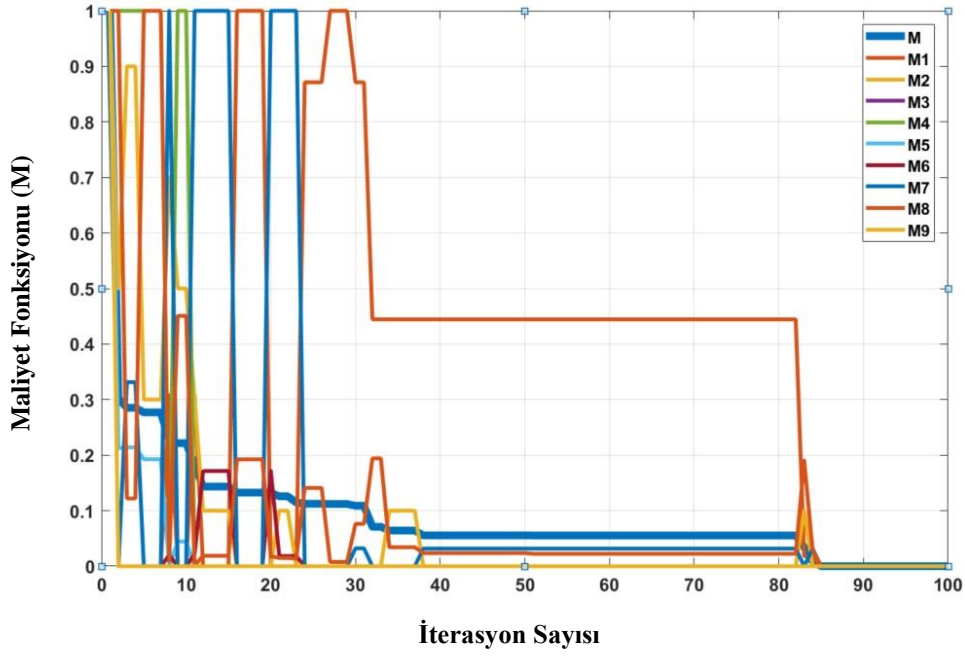
Buna incelemeye ek olarak, GA kodunun çalışması aşamasında tüm maliyet fonksiyonu değerlerinin değişimini incelemek amacıyla, gerçekleştirilen beş farklı başarılı GA kodu koşturmasının maliyet fonksiyonları ve toplam maliyet fonksiyonlarının iterasyon sayısına karşı değişimi Şekil 3.21, Şekil 3.22, Şekil 3.23, Şekil 3.24 ve Şekil 3.25'te gösterilmektedir.



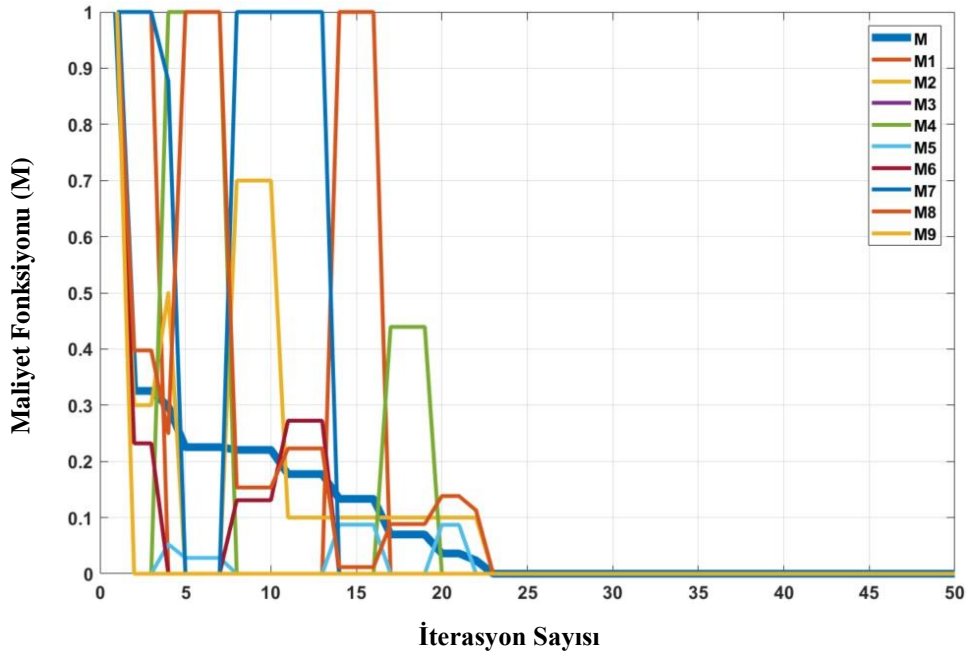
Şekil 3.21 Başarılı sentez üreten GA kodu koşturmasının (Koşturma 11) iterasyon sayısı ile maliyet fonksiyonları değişim grafiği



Şekil 3.22 Başarılı sentez üreten GA kodu koşturmasının (Koşturma 12) iterasyon sayısı ile maliyet fonksiyonları değişim grafiği

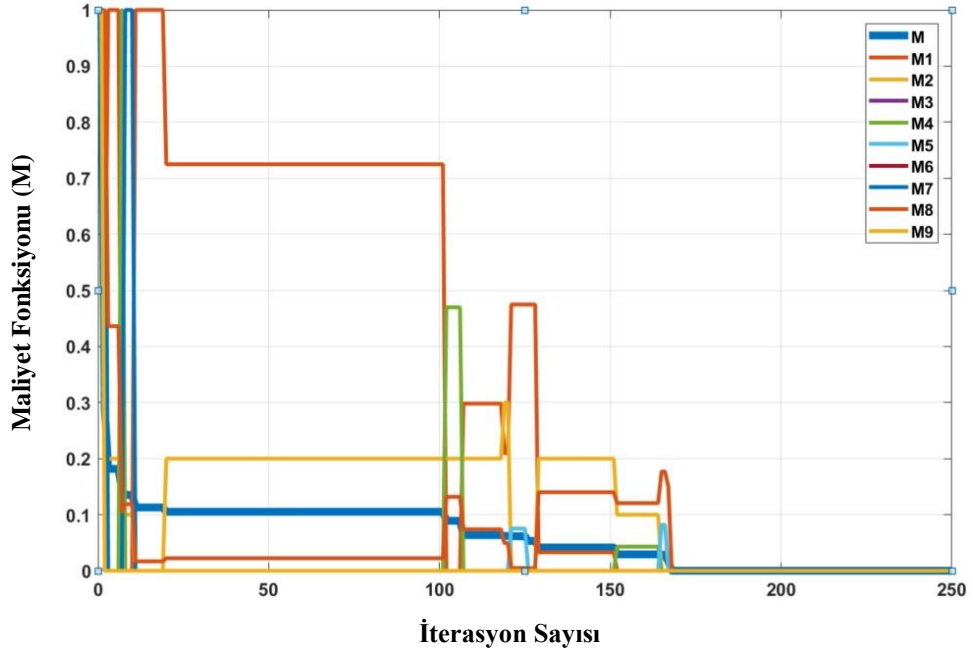


Şekil 3.23 Başarılı sentez üreten GA kodu koşturmasının (Koşturma 13) iterasyon sayısı ile maliyet fonksiyonları değişim grafiği



Şekil 3.24 Başarılı sentez üreten GA kodu koşturmasının (Koşturma 14) iterasyon sayısı ile maliyet fonksiyonları değişim grafiği





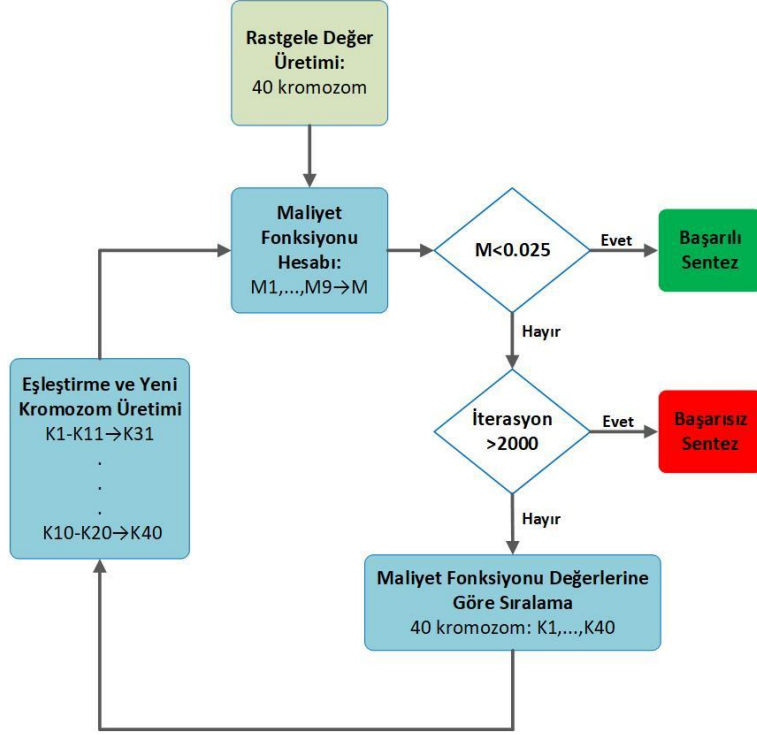
Şekil 3.25 Başarılı sentez üreten GA kodu koşturmasının (Koşturma 15) iterasyon sayısı ile maliyet fonksiyonları değişim grafiği

Grafikler incelendiğinde GA kodunun hedeflenen toplam maliyet fonksiyonu değerine ulaşmak için, büyük oranda yedinci maliyet fonksiyonu ( $M_7$ ) ve sekizinci maliyet fonksiyonunun ( $M_8$ ) hedef değerlerini sağlamaya çalıştığını görülmektedir. Yedinci ve sekizinci maliyet fonksiyonlarının tanımları değerlendirildiğinde bu beklenebilecek bir durumdur.

### 3.1.3.A. GA Kodu Mutasyon Algoritması Alternatifleri

#### 3.1.3.A.1. Mutasyon İçermeyen GA Kodu

GA kodunda mutasyon aşamasında, bir önceki turda maliyet fonksiyonlarına göre sıralanmış grupta 11'nci sıradaki kromozomdan 40'nci sıradaki kromozoma kadar her bir kromozomun rastgele bir bitinin değeri değiştirilmektedir. Bu işleme alternatif olarak tasarlanan, mutasyon işleminin gerçekleştirilmediği GA kodunun işleyiş şeması Şekil 3.26'da gösterilmektedir.

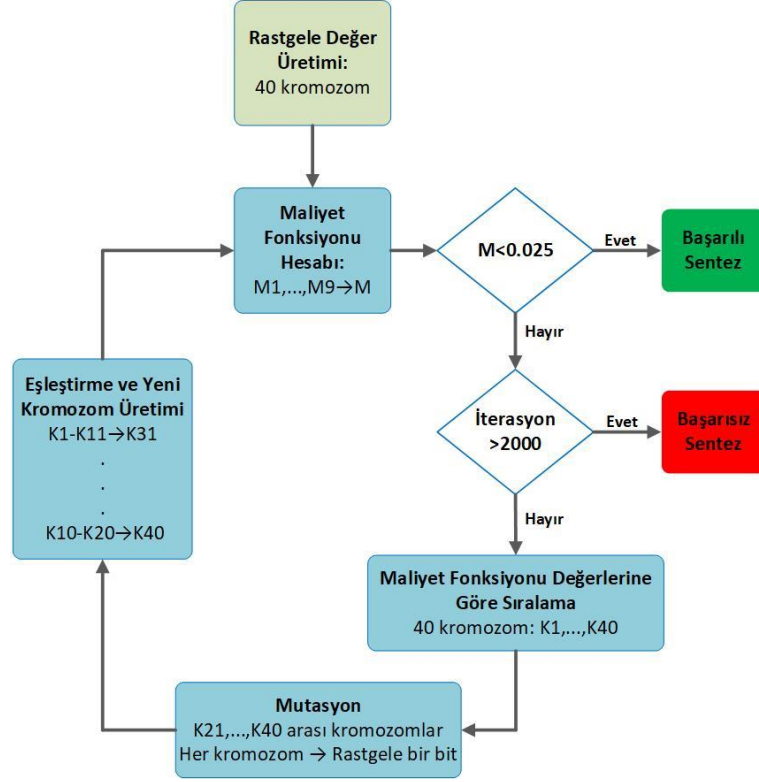


Şekil 3.26 Genetik algoritma A1 modifikasyonu işleyiş şeması

Mutasyon işlemi içermeyen GA kodunun elli kez koşurulması sonucunda hedef maliyet fonksiyonu değerine ulaşan başarılı sentez üretilmemiştir.

### 3.1.3.A.2. Son Yirmi Sıradaki Kromozomu Mutasyona Uğrayan GA Kodu

Mutasyon aşamasında, bir önceki maliyet fonksiyonu sıralamasında son yirmi sırada yer alan kromozomların her birinin rastgele bir bitinin değerini değiştiren GA kodunun işleyiş şeması Şekil 3.27’de gösterilmektedir.

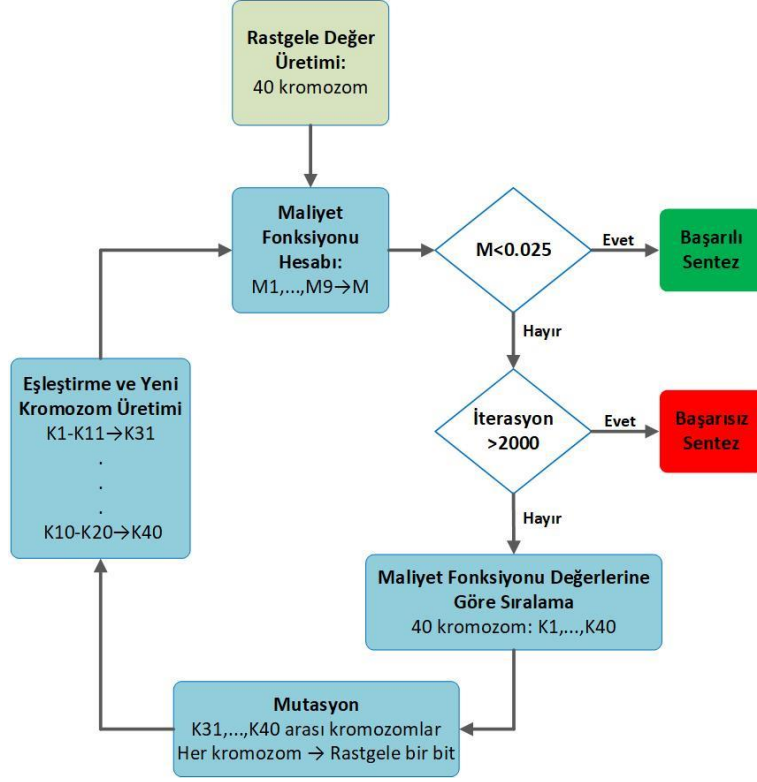


Şekil 3.27 Genetik algoritma A2 modifikasyonu işleyiş şeması

Modifikasyon sonucu oluşturulan GA kodunun elli kez koşturulması sonucunda hedef maliyet fonksiyonuna ulaşan başarılı sentez gerçekleşme oranı %16'dır. Başarılı sentezler ortalama 34 iterasyon sayısı ile üretilmiştir.

### 3.1.3.A.3. Son On Sıradaki Kromozomu Mutasyona Uğrayan GA Kodu

Mutasyon aşamasında, bir önceki maliyet fonksiyonu sıralamasında son on sırada yer alan kromozomların her birinin rastgele bir bitinin değerini değiştiren GA kodunun işleyiş şeması Şekil 3.28'de gösterilmektedir.

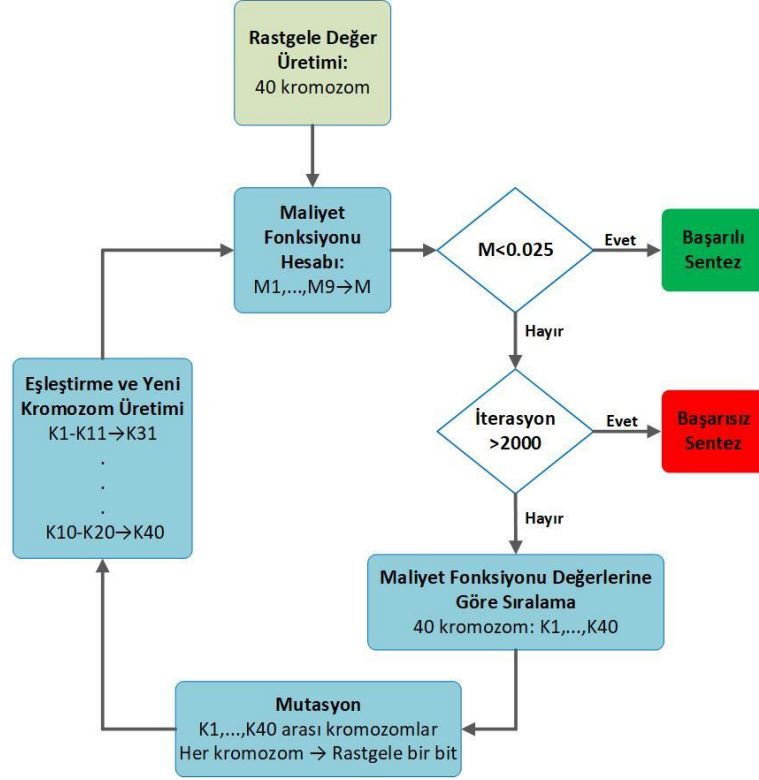


Şekil 3.28 Genetik algoritma A3 modifikasyonu işleyiş şeması

Modifikasyon sonucu oluşturulan GA kodunun elli kez koşturulması sonucunda hedef maliyet fonksiyonu değerine ulaşan başarılı sentez üretilmemiştir.

#### 3.1.3.A.4. Tüm Kromozomları Mutasyona Uğrayan GA Kodu

Mutasyon aşamasında, toplam kırk adet kromozomun her birinin rastgele bir bitinin değerini değiştiren GA kodunun işleyiş şeması Şekil 3.29’da gösterilmektedir.

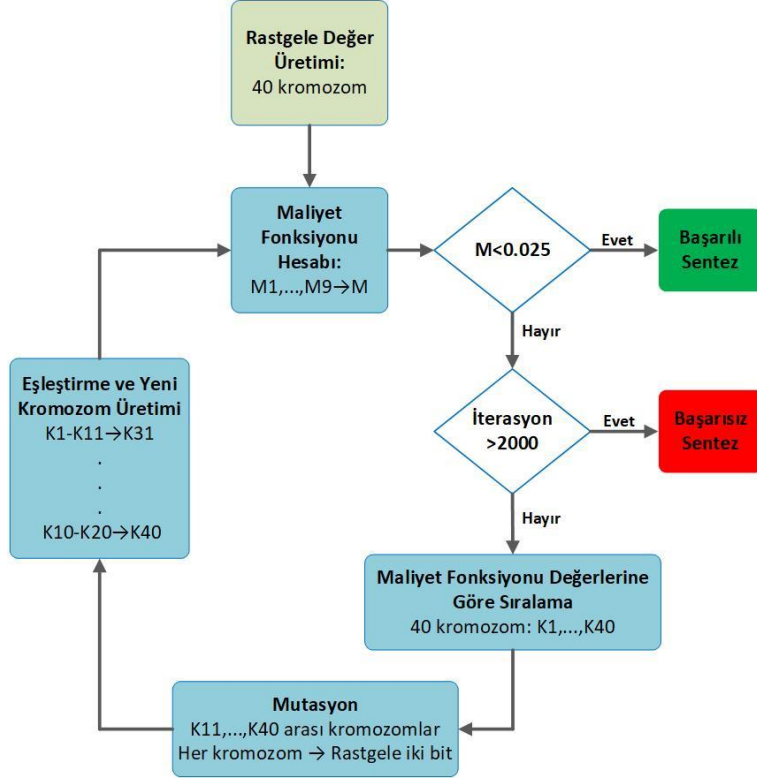


Şekil 3.29 Genetik algoritma A4 modifikasyonu işleyiş şeması

Modifikasyon sonucu oluşturulan GA kodunun elli kez koşturulması sonucunda hedef maliyet fonksiyonuna ulaşan başarılı sentez gerçekleşme oranı %74'tür. Başarılı sentezler ortalama 686 iterasyon sayısı ile üretilmiştir.

### 3.1.3.A.5. Son Otuz Sıradaki Kromozomunun İki Biti Mutasyona Uğrayan GA Kodu

Mutasyon aşamasında bir önceki turda maliyet fonksiyonlarına göre sıralanmış gruptaki son otuz kromozomun her birinin rastgele iki bitinin değerinin değiştiği GA kodunun işleyiş şeması Şekil 3.30'da gösterilmektedir.



Şekil 3.30 Genetik algoritma A5 modifikasyonu işleyiş şeması

Modifikasyon sonucu oluşturulan GA kodunun elli kez koşturulması sonucunda hedef maliyet fonksiyonuna ulaşan başarılı sentez gerçekleşme oranı %80'dir. Başarılı sentezler ortalama 285 iterasyon sayısı ile üretilmiştir.

Mutasyon algoritması modifikasyonu ile oluşturulan GA kodu alternatiflerinin başarılı sentez oranı ve senteze ulaşma iterasyon sayısı (sentez hızı) karşılaştırması Çizelge 3.4'te gösterilmektedir.

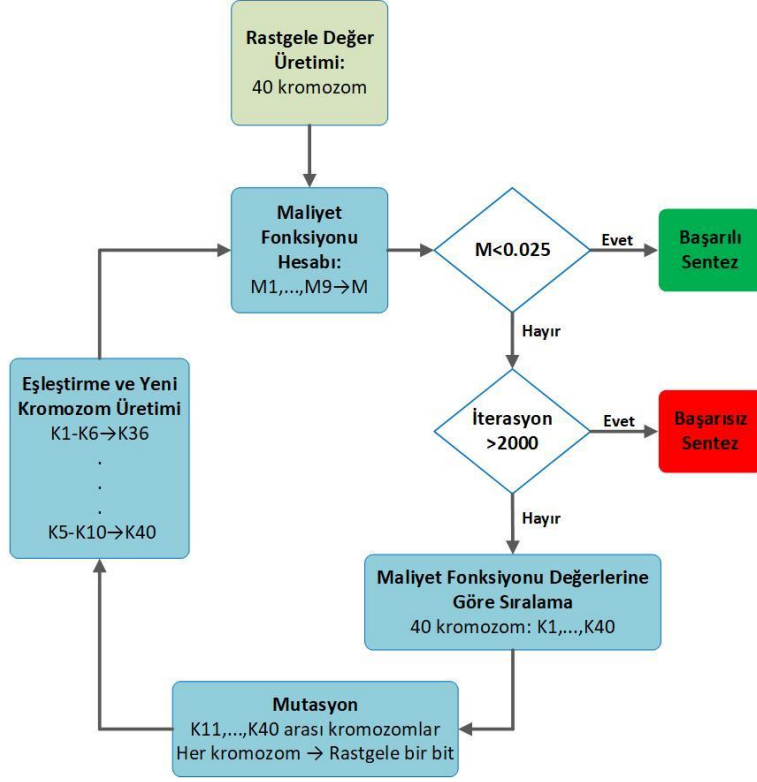
Çizelge 3.4 Mutasyon algoritması modifikasyonları ile oluşturulan GA kodu alternatiflerinin başarı karşılaştırması

Kod	Başarılı Sentez Oranı	Başarılı Sentez Ortalama İterasyon Sayısı
Referans GA Kodu	% 80	178
A.1 Kodu	% 0	-
A.2 Kodu	% 16	34
A.3 Kodu	% 0	-
A.4 Kodu	% 74	686
A.5 Kodu	% 80	285

### 3.1.3.B. GA Kodu Eşleşme Algoritması Alternatifleri

#### 3.1.3.B.1. Beşer Kromozomlu Eşleşmeye Sahip GA Kodu

Bu GA kodu modifikasyonunda, bir önceki turda maliyet fonksiyonlarına göre sıralama sonrasında 1'den 5'nci sıraya kadar dizili kromozomlar ile 6'dan 10'ncü sıraya kadar dizili kromozomların sırayla eşleşerek 36'dan 40'ncü sıraya kadar dizili olan kromozomlar yerine beş yeni kromozom oluşturur. Her eşleşmede oluşan yeni kromozomun  $l_a$ ,  $l_b$ ,  $w$ ,  $g$  ve  $R$  parametre değerlerini ifade eden bit dizileri, eşleşmeye giren iki kromozomdan birinden rastgele şekilde seçilerek yeni kromozomun ilgili bit dizisi bölgesine aktarılır. Beşli eşleme algoritmasına sahip GA kodunun işleyiş şeması Şekil 3.31'de gösterilmektedir.



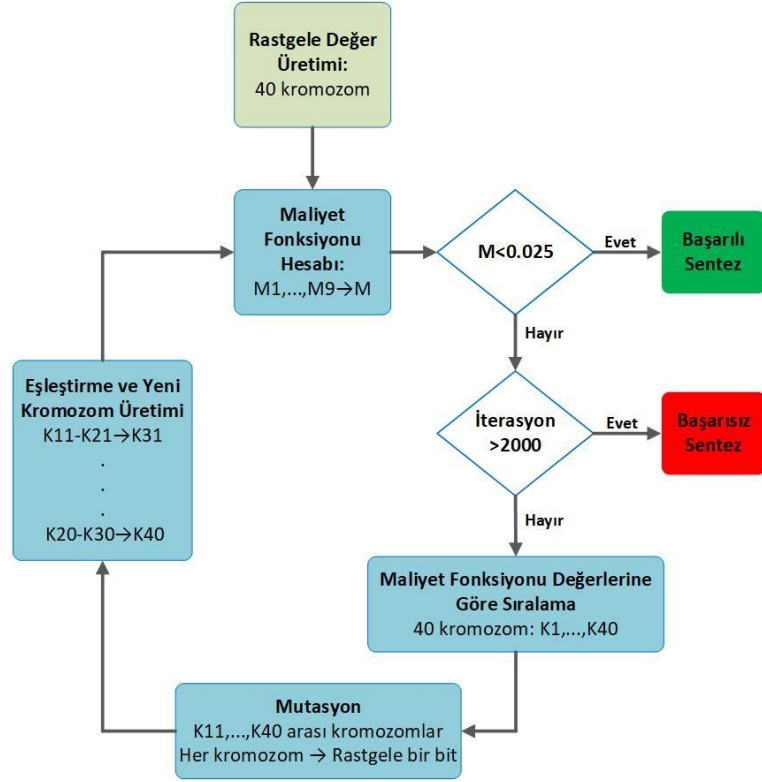
Şekil 3.31 Genetik algoritma B1 modifikasyonu işleyiş şeması

Modifikasyon sonucu oluşturulan GA kodunun elli kez koşturulması sonucunda hedef maliyet fonksiyonuna ulaşan başarılı sentez gerçekleşme oranı %58'dir. Başarılı sentezler ortalama 194 iterasyon sayısı ile üretilmiştir.

### 3.1.3.B.2. Onar Kromozomlu Eşleşmeye Sahip GA Kodu

Bu GA kodu modifikasyonunda, bir önceki turda maliyet fonksiyonlarına göre sıralama sonrasında 11'den 20'nci sıraya kadar dizili kromozomlar ile 21'den 30'ncü sıraya kadar dizili kromozomlar sırayla eşleşerek 31'den 40'ncü sıraya kadar dizili kromozomlar yerine geçen on yeni kromozom oluşturur. Her eşleşmede oluşan yeni kromozomun  $l_a$ ,  $l_b$ ,  $w$ ,  $g$  ve  $R$  parametre değerlerini ifade eden bit dizileri, eşleşmeye giren iki kromozomdan birinden rastgele şekilde seçilerek yeni kromozomun ilgili bit dizisi bölgesine aktarılır. Bahsedilen onlu eşleme algoritmasına sahip GA kodunun işleyiş şeması Şekil 3.32'de gösterilmektedir.





Şekil 3.32 Genetik algoritma B2 modifikasyonu işleyiş şeması

Modifikasyon sonucu oluşturulan GA kodunun elli kez koşturulması sonucunda hedef maliyet fonksiyonuna ulaşan başarılı sentez gerçekleşme oranı %62'dir. Başarılı sentezler ortalama 902 iterasyon sayısı ile üretilmiştir.

### 3.1.3.B.3. Blok Halinde Eşleşme-1

Bu GA kodu modifikasyonunda, referans GA koduna (Şekil 3.15) benzer şekilde, 1'nci ve 10'ncü sıra arasındaki kromozomlar sırayla 11'nci ve 20'nci sıra arasındaki kromozomlarla eşleşir ve eşleşme sonucunda bir sonraki iterasyon için 31'nci ve 40'nci sıra arasındaki kromozomlar oluşturulur. Referans GA kodundan farklı olarak eşleşme aşamasında,  $l_a$  ve  $l_b$ 'yi ifade eden bit dizileri gruplanarak eşleşmedeki kromozomlardan birinden rastgele seçilir;  $w$ ,  $g$  ve  $R$  değerlerini ifade eden bit dizileri eşleşmedeki diğer kromozomdan seçilir.

Modifikasyon sonucu oluşturulan GA kodunun elli kez koşturulması sonucunda hedef maliyet fonksiyonuna ulaşan başarılı sentez gerçekleşme oranı %80'dir. Başarılı sentezler ortalama 213 iterasyon sayısı ile üretilmiştir.

### 3.1.3.B.4. Blok Halinde Eşleşme-2

Bu GA kodu modifikasyonunda, referans GA koduna (Şekil 3.15) benzer şekilde, 1'nci ve 10'ncü sıra arasındaki kromozomlar sırayla 11'nci ve 20'nci sıra arasındaki kromozomlarla eşleşir ve eşleşme sonucu bir sonraki iterasyon için 31'nci ve 40'ncü sıra arasındaki kromozomlar oluşturulur. Referans GA kodundan farklı olarak eşleşme aşamasında,  $l_a$ ,  $w$  ve  $R$  değerlerini ifade eden bit dizileri gruplanarak eşleşmedeki kromozomlardan birinden rastgele seçilir;  $l_b$  ve  $g$  değerlerini ifade eden bit dizileri eşleşmedeki diğer kromozomdan seçilir.

Modifikasyon sonucu oluşturulan GA kodunun elli kez koşturulması sonucunda hedef maliyet fonksiyonuna ulaşan başarılı sentez gerçekleşme oranı %58'dir. Başarılı sentezler ortalama 297 iterasyon sayısı ile üretilmiştir.

Eşleşme algoritması modifikasyonu ile oluşturulan GA kodu alternatiflerinin başarılı sentez oranı ve başarılı senteze ulaşma ortalama iterasyon sayısı karşılaştırması Çizelge 3.5'te gösterilmektedir.

Çizelge 3.5 Eşleşme algoritması modifikasyonları ile oluşturulan GA kodu alternatiflerinin başarı karşılaştırması

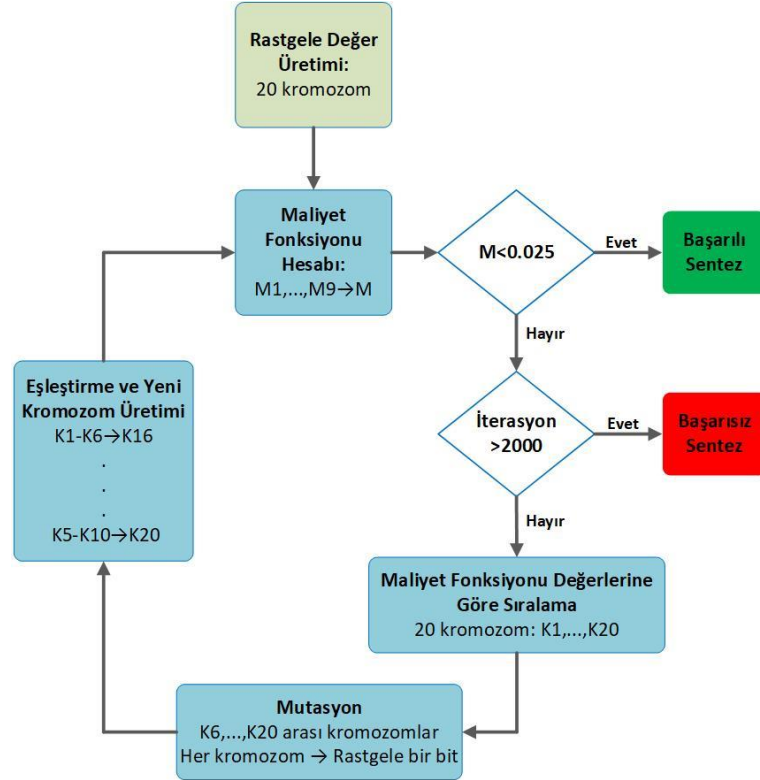
Kod	Başarılı Sentez Oranı	Başarılı Sentez Ortalama İterasyon Sayısı
Referans GA Kodu	% 80	178
B.1 Kodu	% 58	194
B.2 Kodu	% 62	902
B.3 Kodu	% 80	213
B.4 Kodu	% 58	297

### 3.1.3.C. GA Kodu Kromozom Sayısı Değişimi

#### 3.1.3.C.1. Yirmi Kromozomlu GA Kodu

Bu GA kodu modifikasyonunda toplam kromozom sayısı yirmi olarak tasarlanmıştır. Eşleşme aşamasında 1'den 5'nci sıraya kadar dizili kromozomlar ile 6'dan 10'ncü sıraya

kadar dizili kromozomlar sırayla eşleşerek 16'dan 20'nci sıraya kadar dizili olan kromozomlar yerine beş yeni kromozom oluşturur. Her eşleşmede oluşan yeni kromozomun  $l_a$ ,  $l_b$ ,  $w$ ,  $g$  ve  $R$  parametre değerlerini ifade eden bit dizileri, eşleşmeye giren iki kromozomdan birinden rastgele şekilde seçilerek yeni kromozomun ilgili bit dizisi bölgesine aktarılır. Mutasyon aşamasında, son on beş sırada yer alan kromozomların her birinin rastgele bir bitinin değerini değiştirilir (Şekil 3.33).



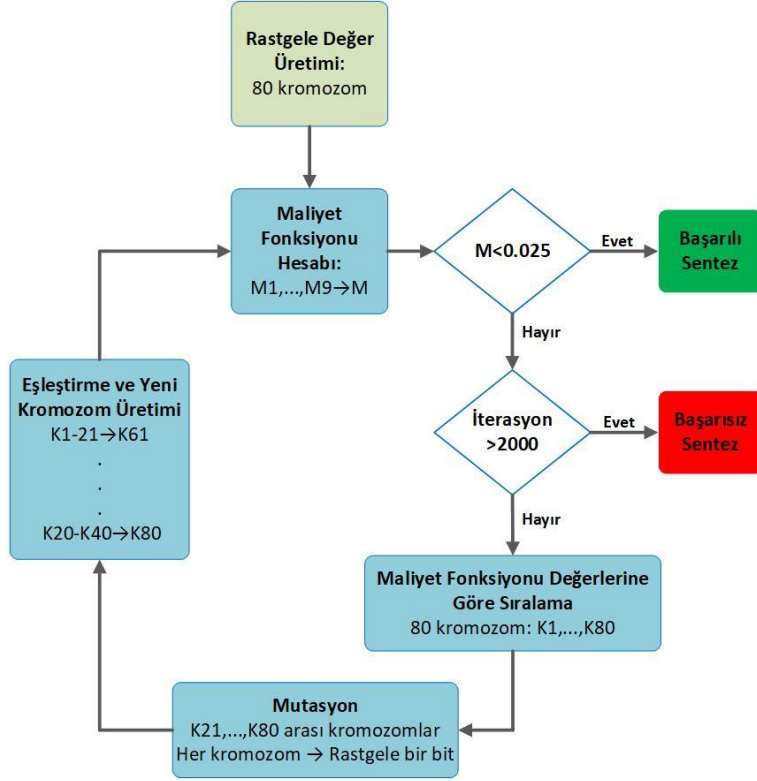
Şekil 3.33 Genetik algoritma C1 modifikasyonu işleyiş şeması

Modifikasyon sonucu oluşturulan GA kodunun elli kez koşturulması sonucunda hedef maliyet fonksiyonuna ulaşan başarılı sentez gerçekleşme oranı %64'tür. Başarılı sentezler ortalama 228 iterasyon sayısı ile üretilmiştir.

### 3.1.3.C.2. Seksen Kromozomlu GA Kodu

Bu GA kodu modifikasyonunda toplam kromozom sayısı 80'e çıkarılmıştır. Eşleşme aşamasında 1'den 20'nci sıraya kadar dizili kromozomlar ile 21'den 40'nci sıraya kadar dizili kromozomlar sırayla eşleşerek 61'den 80'nci sıraya kadar dizili olan kromozomlar yerine yirmi yeni kromozom oluşturur. Her eşleşmede oluşan yeni kromozomun  $l_a$ ,  $l_b$ ,  $w$ ,  $g$  ve  $R$  parametre değerlerini ifade eden bit dizileri, eşleşmeye giren iki kromozomdan

birinden rastgele şekilde seçilerek yeni kromozomun ilgili bit dizisi bölgesine aktarılır. Mutasyon aşamasında, son altmış sırada yer alan kromozomların her birinin rastgele bir bitinin değerini değiştirilir (Şekil 3.34).



Şekil 3.34 Genetik algoritma C2 modifikasyonu işleyiş şeması

Modifikasyon sonucu oluşturulan GA kodunun elli kez koşturulması sonucunda hedef maliyet fonksiyonuna ulaşan başarılı sentez gerçekleşme oranı %72'dir. Başarılı sentezler ortalama 96 iterasyon sayısı ile üretilmiştir.

Toplam kromozom sayısı değişimi ile oluşturulan GA kodu alternatiflerinin başarılı sentez oranı ve başarılı senteze ulaşma ortalama iterasyon sayısı karşılaştırması Çizelge 3.6'da gösterilmektedir.

Çizelge 3.6 Toplam kromozom sayısı değişimi ile oluşturulan GA kodu alternatiflerinin başarı karşılaştırması

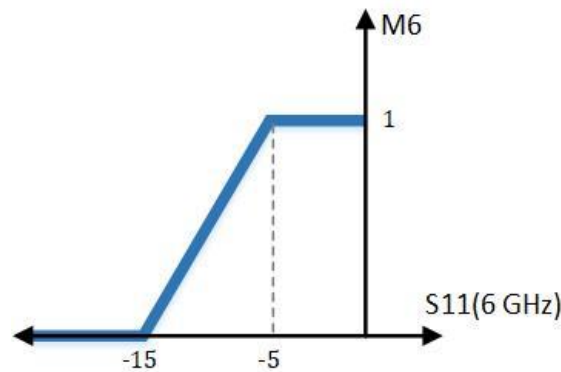
Kod	Başarılı Sentez Oranı	Başarılı Sentez Ortalama İterasyon Sayısı
Referans GA Kodu	% 80	178
C.1 Kodu	% 64	228
C.2 Kodu	% 72	96

### 3.1.3.D. Frekans Tepkisi Maliyet Fonksiyonu Değişimi

#### 3.1.3.D.1. Altıncı Maliyet Fonksiyonu M<sub>6</sub>'nın Alt Limitinin -15 dB'ye Çekilmesi

GA kodunda tanımlanan altıncı maliyet fonksiyonu M<sub>6</sub> ile sentez sonucu oluşturulan soğurucu yüzeyin 6 GHz'deki S<sub>11</sub> tepkisinin -10 dB değerinin altında olması hedeflenmektedir. Bu GA kodu modifikasyonunda, M<sub>6</sub> maliyet fonksiyonunun -10 dB hedefinin -15 dB'ye çekilmesiyle güncellenen GA kodunun sentez başarısı test edilmektedir. Güncellenen M<sub>6</sub> maliyet fonksiyonu eşitliği Eşitlik 3.32'de, grafiği Şekil 3.35'te gösterilmektedir.

$$M_6 = \begin{cases} 0 & S_{11}(6GHz) \leq -15 \\ \frac{S_{11}(6GHz) + 15}{10} & -5 > S_{11}(6GHz) > -15 \\ 1 & S_{11}(6GHz) \geq -5 \end{cases} \quad (3.32)$$



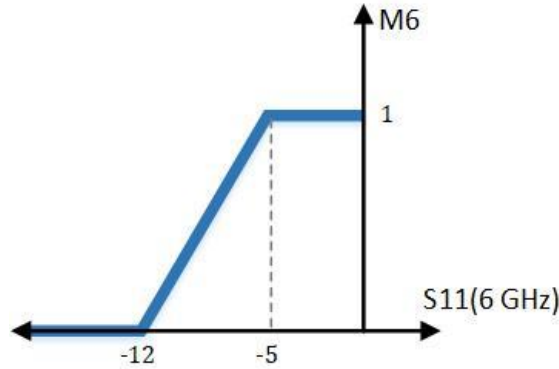
Şekil 3.35 Altıncı maliyet fonksiyonu M<sub>6</sub> grafiği-D1 modifikasyonu

Modifiye edilen  $M_6$  maliyet fonksiyonu ile çalıştırılan GA kodu algoritması işleyiş şeması Şekil 3.15'te gösterilmektedir. Modifikasyon sonucu oluşturulan GA kodunun elli kez koşturulması sonucunda hedef maliyet fonksiyonu değerine ulaşan başarılı sentez üretilmemiştir.

### 3.1.3.D.2. Altıncı Maliyet Fonksiyonu $M_6$ 'nın Alt Limitinin -12 dB'ye Çekilmesi

Bu GA kodu modifikasyonunda,  $M_6$  maliyet fonksiyonununun -10 dB hedefinin -12 dB'ye çekilmesiyle güncellenen GA kodunun sentez başarısı test edilmektedir. Güncellenen  $M_6$  maliyet fonksiyonu eşitliği Eşitlik 3.33'de, grafiği Şekil 3.36'da gösterilmektedir.

$$M_6 = \begin{cases} 0 & S_{11}(6GHz) \leq -12 \\ \frac{S_{11}(6GHz) + 12}{7} & -5 > S_{11}(6GHz) > -12 \\ 1 & S_{11}(6GHz) \geq -5 \end{cases} \quad (3.33)$$



Şekil 3.36 Altıncı maliyet fonksiyonu  $M_6$  grafiği-D2 modifikasyonu

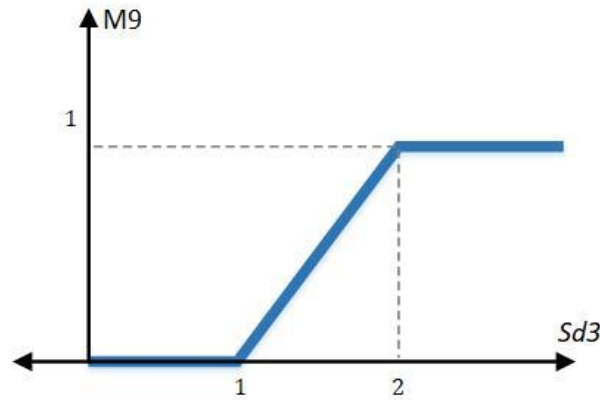
Modifiye edilen  $M_6$  maliyet fonksiyonu ile çalıştırılan GA kodu algoritması işleyiş şeması Şekil 3.15'de gösterilmektedir. Modifikasyon sonucu oluşturulan GA kodunun elli kez koşturulması sonucunda hedef maliyet fonksiyonuna ulaşan başarılı sentez gerçekleştirme oranı %50'dir. Başarılı sentezler ortalama 172 iterasyon sayısı ile üretilmiştir.

### 3.1.3.D.3. Dokuzuncu Maliyet Fonksiyonu M<sub>9</sub>'un Frekans Aralığının 9-11 GHz Aralığına Çekilmesi

Dokuzuncu maliyet fonksiyonu M<sub>9</sub>, sentezlenen soğurucu yüzeyin S<sub>21</sub> frekans tepkisinin 1-dB bandının 3 GHz'den yüksek olmasını sağlamak amacıyla GA kodunda bulunmaktadır. Modifiye edilen M<sub>9</sub> maliyet fonksiyonu ile S<sub>21</sub> frekans tepkisi 1-dB bandı 4 GHz'den yüksek olan soğurucu yüzeyin sentez başarısı test edilmektedir. Güncellenen M<sub>9</sub> maliyet fonksiyonu eşitliği Eşitlik 3.35'te, grafiği Şekil 3.37'de gösterilmektedir.

$$S_{d3} = |S_{21}(11GHz) - S_{21}(9GHz)| \quad (3.34)$$

$$M_9 = \begin{cases} 0 & S_{d3} \leq 1 \\ S_{d3} - 1 & 2 > S_{d3} > 1 \\ 1 & S_{d3} \geq 2 \end{cases} \quad (3.35)$$



Şekil 3.37 Dokuzuncu maliyet fonksiyonu M<sub>9</sub> grafiği-D3 modifikasyonu

Modifiye edilen M<sub>9</sub> maliyet fonksiyonu ile çalıştırılan GA kodu algoritması işleyiş şeması Şekil 3.15'de gösterilmektedir. Modifikasyon sonucu oluşturulan GA kodunun elli kez koşturulması sonucunda hedef maliyet fonksiyonuna ulaşan başarılı sentez gerçekleştirme oranı %58'dir. Başarılı sentezler ortalama 118 iterasyon sayısı ile üretilmiştir.

GA kodunda (Şekil 3.15) frekans tepkisi maliyet fonksiyonlarının değişimiyle oluşturulan GA kodu alternatiflerinin başarılı sentez oranı ve başarılı senteze ulaşma ortalama iterasyon sayısı karşılaştırması Çizelge 3.7'de gösterilmektedir.

Çizelge 3.7 Frekans tepkisi maliyet fonksiyonları modifikasyonları ile oluşturulan GA kodu alternatiflerinin başarı karşılaştırması

Kod	Başarılı Sentez Oranı	Başarılı Sentez Ortalama İterasyon Sayısı
Referans GA Kodu	% 80	178
D.1 Kodu	% 0	-
D.2 Kodu	% 50	172
D.3 Kodu	% 58	118

Referans GA koduna uygulanan modifikasyonlarla oluşturulan GA alternatiflerinin başarılı sentez üretme oranı ve sentez hızı incelendiğinde; mutasyon içermeyen GA kodunun (A1) ve son 10 sıradaki kromozomların mutasyona uğradığı GA modifikasyonunun (A3) başarılı sentez üretmediği görülmektedir. Son 20 sıradaki kromozomların mutasyona uğradığı GA modifikasyonunun (A2) başarılı sentez üretme oranı %16'dır, başarılı senteze ulaşma hızı ortalama 34 iterasyondur. Tüm kromozomların mutasyona uğradığı GA modifikasyonunda (A4) başarılı sentez üretme oranı %74'tür, başarılı senteze ulaşma hızı ortalama 686 iterasyondur. Son otuz sıradaki kromozomun rastgele iki bitinin mutasyona uğradığı modifikasyonun (A5) başarılı sentez üretme oranı %80'dir, başarılı senteze ulaşma hızı ortalama 285 iterasyondur. Mutasyon modifikasyonlarının performans incelemesinin sonucu olarak, eşleştirme ve yeni kromozom üretimi işlemiyle birlikte kromozom çeşitliliğini arttırmak ve başarılı senteze ulaşmak için mutasyon işleminin uygulanmasının gerekli olduğu tespit edilmektedir. Bununla birlikte son otuz sıradaki kromozomların rastgele bir bitinin mutasyona uğramasına kıyasla, tüm kromozomların rastgele bir bitinin mutasyona uğraması veya son otuz sıradaki kromozomların rastgele iki bitinin mutasyona uğraması modifikasyonlarının başarılı sentez oranını arttırmadığı ve başarılı senteze ulaşma hızını düşürdüğü (Çizelge 3.4) tespit edilmektedir.

Eşleşme algoritması modifikasyonu olan beşer kromozomlu eşleşme ile beş yeni kromozom oluşturan GA modifikasyonunun (B1) başarılı sentez üretme oranı %58'dir, başarılı senteze ulaşma hızı ortalama 194 iterasyondur. 11'den 20'nci sıraya kadar dizili kromozomlar ile 21'den 30'ncü sıraya kadar dizili kromozomların eşleştiği GA



modifikasyonunun (B2) başarılı sentez üretme oranı %62'dir, başarılı senteze ulaşma hızı ortalama 902 iterasyondur. Sonuç olarak, eşleşen birey sayısının azaltılması başarılı sentez oranının düşmesine sebep olmaktadır. Aynı zamanda kromozomların düşük maliyet fonksiyonlu ilk yirmi sıradan seçilip eşleştirilmesiyle üretilen sentezler (Şekil 3.15), orta sıradaki yirmi kromozomun eşleştirilmesiyle üretilen sentezlerden daha yüksek başarılı sentez üretme oranına ve daha yüksek başarılı senteze ulaşma hızına sahiptir (Çizelge 3.5). Eşleşme aşamasında  $l_a$ ,  $l_b$ 'yi ifade eden bit dizilerinin ve  $w$ ,  $g$ ,  $R$ 'yi ifade eden bit dizilerinin gruplandırılarak eşleşme yapıldığı GA modifikasyonunun (B3) başarılı sentez üretme oranı %80'dir, başarılı senteze ulaşma hızı ortalama 213 iterasyondur. Eşleşme aşamasında  $l_a$ ,  $w$ ,  $R$ 'yi ifade eden bit dizilerinin ve  $l_b$ ,  $g$ 'yi ifade eden bit dizilerinin gruplandırılarak eşleşme yapıldığı GA modifikasyonunun (B4) başarılı sentez üretme oranı %58'dir, başarılı senteze ulaşma hızı ortalama 297 iterasyondur. Referans GA kodu ile kıyaslandığında, B3 ve B4 GA kodu modifikasyonlarının başarılı sentez üretme oranında iyileşme görülmemektedir, başarılı senteze ulaşma hızının referans GA koduna kıyasla düştüğü görülmektedir (Çizelge 3.5).

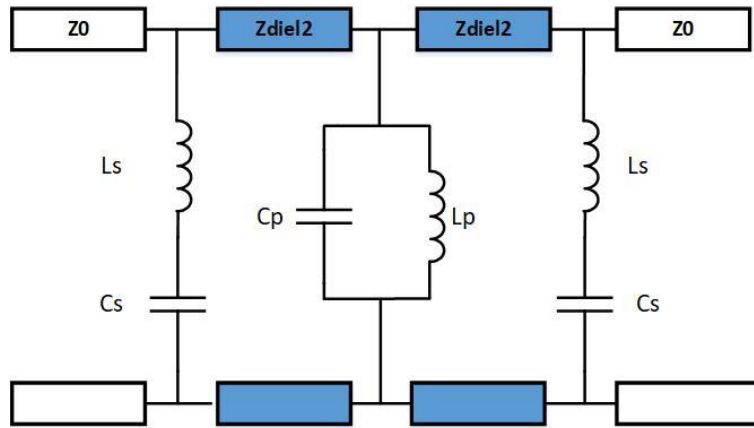
Birey sayısı yirmi kromozom olan GA kodu modifikasyonunun (C1) başarılı sentez üretme oranı %64'tür, başarılı senteze ulaşma hızı ortalama 228 iterasyondur; birey sayısı seksen kromozom olan GA kodu modifikasyonunun (C2) başarılı sentez üretme oranı %72'dir, başarılı senteze ulaşma hızı ortalama 96 iterasyondur. Toplam kromozom sayısının yirmi kromozomdan seksen kromozoma artmasıyla, karşılaştırma referansı olarak alınan kırk kromozomlu GA kodunun (Şekil 3.15) sentez performansı değerlendirildiğinde, başarılı senteze ulaşma hızının arttığı ve daha düşük iterasyon sayısı ile başarılı senteze ulaşıldığı görülmektedir. Referans alınan kırk kromozomlu GA kodunun ve 80 kromozomlu GA kodu modifikasyonunun başarılı sentez üretme oranı yirmi kromozomlu GA kodu modifikasyonundan yüksektir (Çizelge 3.6). Kromozom sayısının artmasıyla artan çeşitliliğin bu sonuçları sağladığı değerlendirilmektedir.

Frekans tepkisi maliyet fonksiyonlarının limitlerinin değiştirilmesiyle, GA kodunun güncellenen performans hedeflerine ulaşabilecek sentez setleri üretme kabiliyeti ve dolayısıyla önerilen rezonatör yapısının bu performans hedeflerini karşılama kabiliyeti test edilmektedir. Karşılaştırma referansı olan GA kodunda 6 GHz'deki  $S_{11}$  hedefi -10 dB'dir (Şekil 3.11);  $S_{21}$  frekans tepkisinin 1-dB bant genişliği hedefi 3 GHz'dir (Şekil 3.14). 6 GHz'deki  $S_{11}$  hedefi -15 dB'ye çekilen GA kodu (D1) başarılı sentez

üretmemiştir. 6 GHz'deki  $S_{11}$  hedefi -12 dB'ye çekilen GA kodunun (D2) başarılı sentez üretme oranı %50'dir, başarılı senteze ulaşma hızı ortalama 172 iterasyondur.  $S_{21}$  frekans tepkisi 1-dB bant genişliği hedefi 4 GHz'e arttırılan GA kodunun (D3) başarılı sentez üretme oranı %58'dir, başarılı senteze ulaşma hızı ortalama 118 iterasyondur. Frekans tepkisi maliyet fonksiyonları performans limitlerinin daha yüksek performans hedefleriyle tanımlanmasıyla GA kodunun başarılı sentez üretme oranının azaldığı veya başarılı sentez üretmediği görülmektedir (Çizelge 3.7). GA kodunda, soğurma bölgesi için düşük yansımaya değeri ve geniş iletim bandı elde etmek için tanımlanan frekans tepkisi performans hedeflerine ulaşılmasında belirleyici olan önerilen rezonatör yapısıdır. Limitler değiştirilerek oluşturulan GA kodu modifikasyonları ile rezonatör yapısının sağlayabileceği performans limitleri test edilmektedir.

### 3.2. Bant Geçiren Yüzey Sentezi

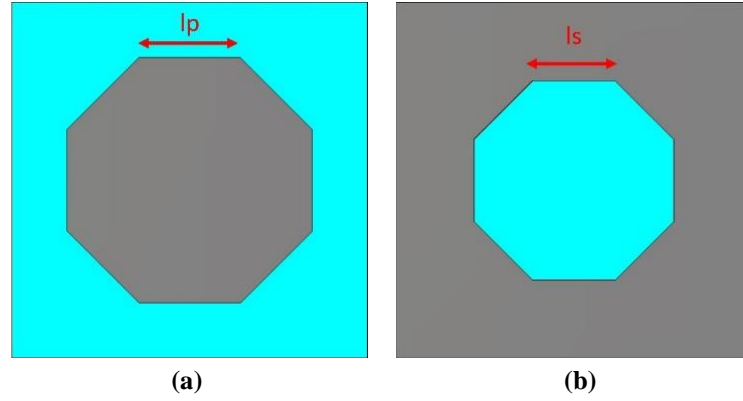
Geniş iletim bandına sahip olması ve çift polarizasyonlu çalışma özelliğinde olması hedeflenen bant geçiren yüzey için üç katmanlı sekizgen yama-yarık-yama rezonatör yapısı önerilmektedir. Çok katmanlı rezonatörde üç metal katman arasında iki dielektrik katman bulunmaktadır. Sekizgen yama metallere dış yüzeylerde, sekizgen metal yarık iç yüzeydedir. Bant geçiren yüzey eşdeğer devre modelinde yama yüzeyler seri rezonatör devresiyle, yarık yüzeyler paralel rezonatör devresiyle modellenmektedir. (Şekil 3.38).



Şekil 3.38 Bant geçiren yüzey eşdeğer devre modeli

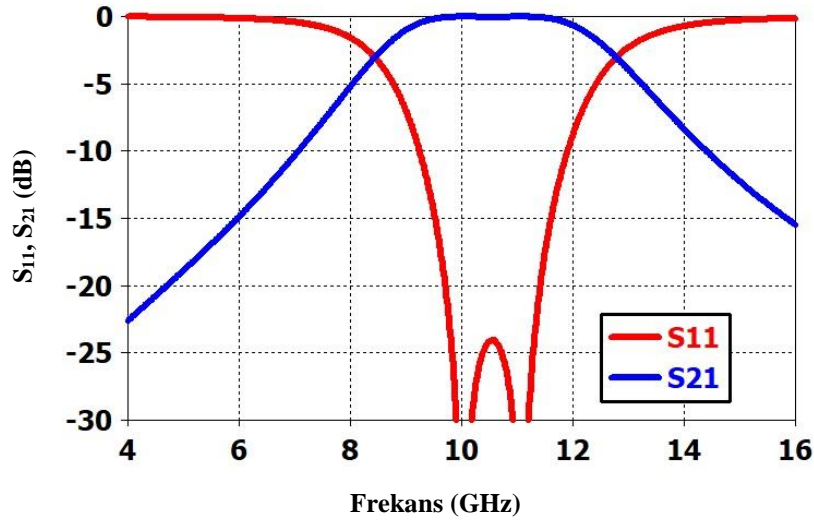
Bant geçiren yüzeyin taban malzemesi Arlon (Rogers) Dicladd880'dir; taban malzeme kalınlığı 1.5mm'dir, dielektrik sabiti 2.2'dir [49]. Eşdeğer devre modelinde taban malzeme dielektrik katmanı karakteristik empedansı  $Z_{diel2}$  olarak ifade edilmektedir. Dış

yüzeydeki sekizgen yamanın kenar uzunluğu  $l_p$  olarak ifade edilmektedir; orta yüzeydeki sekizgen açıklığın kenar uzunluğu  $l_s$  olarak ifade edilmektedir (Şekil 3.39).



Şekil 3.39 Bant geçiren yüzey rezonatör yama (a) ve yarık yüzeyleri (b)

Bant geçiren yüzey sentezi, EM analiz iterasyonları ile optimum sonucu sağlayan  $l_p$  ve  $l_s$  değerinin elde edilmesiyle gerçekleştirilmiştir. Sentez sonucu  $l_p$  değeri 3.2 mm,  $l_s$  değeri 2.6 mm'dir. EM analiz sonucunda bant geçiren yüzeyin 1-dB bant genişliği 3.16 GHz'dir, 1-dB bandı 9.0-12.16 GHz aralığındadır. 3-dB bant genişliği 4.32 GHz'dir. EM analiz sonucu Şekil 3.40'ta gösterilmektedir.



Şekil 3.40 Bant geçiren yüzey EM analiz frekans tepkisi

### 3.3. Ara Dielektrik Katman Hesaplaması

Sentez ile elde edilen soğurucu yüzey ve bant geçiren yüzey tasarımı ile birlikte ara dielektrik katmanın dielektrik malzeme seçimi ve dielektrik malzeme kalınlığının hesaplanmasıyla soğurucu frekans seçici yüzey tasarımı gerçekleştirilmektedir. Bu

çalışmada, soğurucu yüzey ve bant geçiren yüzey arası dielektrik katman olarak hava kullanılmaktadır. Ara dielektrik katman olarak hava kullanıldığı durumda çeyrek dalga boyunda katman kalınlığı şu şekilde hesaplanmaktadır;

$$\frac{\lambda_0}{4} - h_r\sqrt{\epsilon_{r,r}} - h_b\sqrt{\epsilon_{r,b}} = h_a \quad (3.36)$$

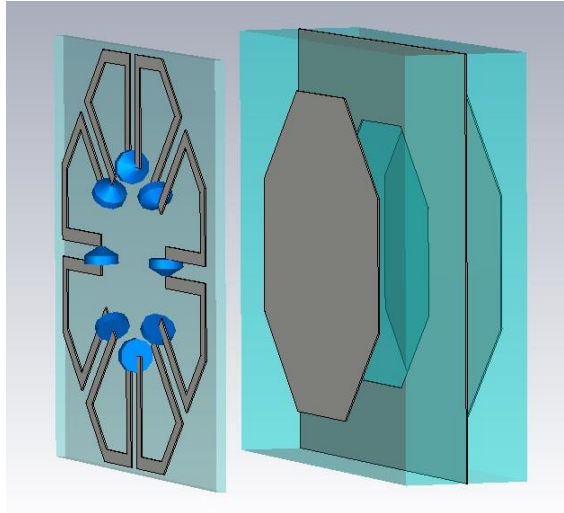
Bu eşitlikte  $h_r$  soğurucu yüzeyin dielektrik malzeme kalınlığıdır,  $h_b$  bant geçiren yüzeyin dielektrik malzeme kalınlığıdır,  $h_a$  ara dielektrik katman kalınlığıdır . Soğurucu yüzeyin dielektrik malzemesinin dielektrik sabiti  $\epsilon_{r,r}$ , bant geçiren yüzeyin dielektrik malzemesinin dielektrik sabiti  $\epsilon_{r,b}$  olarak ifade edilir. Merkez iletim frekansında dalga boyu  $\lambda_0$  olarak ifade edilir. Soğurucu yüzey taban malzemesi olarak Rogers firmasının RO3010 taban malzemesi kullanılmaktadır; kalınlığı 0.25 mm, dielektrik sabiti 10.3'tür. Bant geçiren yüzey taban malzemesi olarak Arlon (Rogers) firmasının Diclad880 taban malzemesi kullanılmaktadır; çift dielektrik katmandan her birinin kalınlığı 1.5 mm'dir, dielektrik sabiti 2.2'dir. Bu değerler ile Eşitlik 3.36 ile gerçekleştirilen hesaplamada ara hava katmanının kalınlığı  $h_a$  3.79 mm hesaplanmaktadır.

## 4. EM ANALİZ

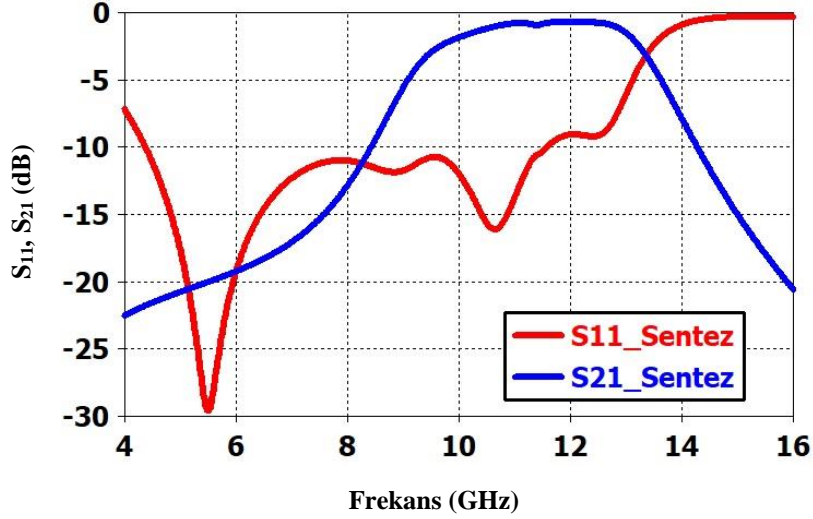
Tez çalışmasının EM analiz kısmında, sentezlenen soğurucu yüzey ve bant geçiren yüzey ile oluşturulan soğurucu frekans seçici yüzeyin eleman değerleri EM analizlerle ince ayar sonucu nihai değerlerine getirilmektedir ve tasarım neticelendirilmektedir. Bu kısımda aynı zamanda, frekans seçici yüzeyin frekans tepkisinin gelen sinyalin polarizasyon açısına karşı değişimi analiz edilmektedir. Ayrıca sinyalin dik geliş açısından farklı olarak, yanca ve yükseliş yönündeki geliş açılarında ulaştığı durumlardaki frekans tepkisi performansı incelenmektedir. Bununla birlikte soğurucu frekans seçici yüzeyin operasyonu aşamasında soğurucu yüzey ve bant geçiren yüzey üzerinde indüklenen akım ve elektrik alan vektörlerinin dağılımı incelenmektedir. EM analizler CST EM simülasyon programıyla gerçekleştirilmektedir.

### 4.1 Frekans Tepkisi ve Yüzey Alanları EM Analizi

Sentezlenen soğurucu yüzey, bant geçiren yüzey ve dielektrik katman eleman değerleriyle oluşturulan soğurucu frekans seçici yüzeyin (Şekil 4.1) frekans tepkisi EM analiz sonucu Şekil 4.2’de gösterilmektedir.



Şekil 4.1 Tasarlanan soğurucu frekans seçici yüzey birim elemanı: Soğurucu yüzey, ara dielektrik katman, bant geçiren yüzey



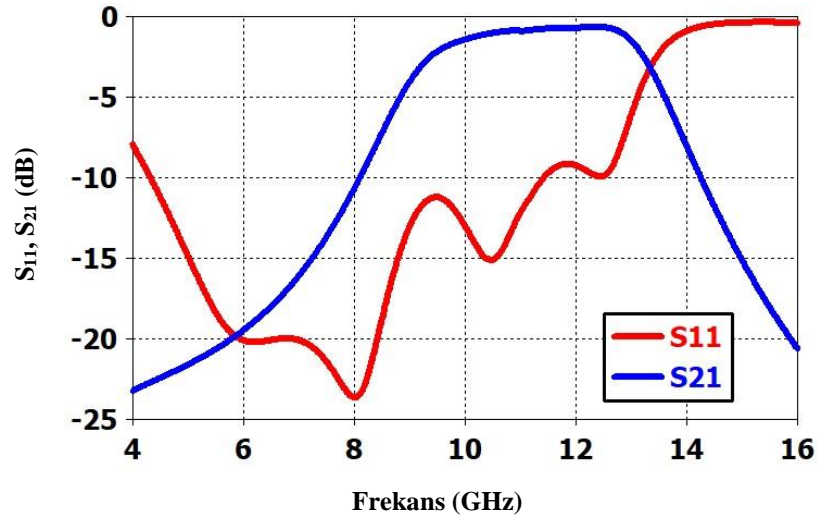
Şekil 4.2 Sentez değerleriyle oluşturulan soğurucu frekans seçici yüzey EM analiz frekans tepkisi

Sentez değerleriyle oluşturulan soğurucu frekans seçici yüzeyin frekans tepkisi gerçekleştirilen EM analizler ve eleman değerlerinin ince ayarı sonucunda optimize edilmiştir. Sentez sonucu (Koşurma 4) elde edilen eleman değerleri ve EM analiz ile optimizasyon sonucu elde edilen eleman değerleri Çizelge 4.1’de gösterilmektedir. Tüm değerler mm cinsinden verilmektedir.

Çizelge 4.1 Sentez sonucu elde edilen ve EM analiz ile optimizasyon sonucu elde edilen soğurucu yüzey eleman değerleri

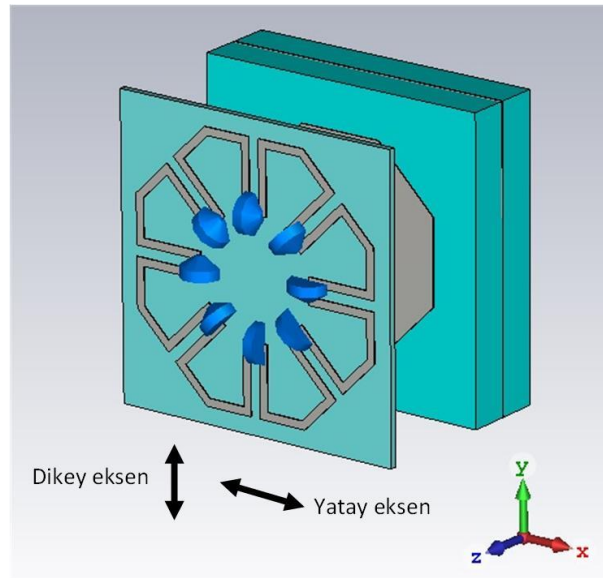
	$l_a$	$l_b$	$w$	$g$	$R$	$l_p$	$l_s$	$h_a$
Sentez değerleri	1.35	2.30	0.40	0.35	175	3.2	2.6	3.79
Optimize değerler	1.43	2.40	0.30	0.40	140	3.2	2.6	4.50

Optimizasyon ile nihai eleman değerlerine ulaşılan soğurucu frekans seçici yüzeyin EM analiz frekans tepkisi sonuçları şu şekildedir: İletim bandı içinde en düşük kayıp 12.37 GHz’de -0.66 dB’dir. 1-dB iletim bandı 9.63 GHz ile 13.10 GHz aralığındadır; bant genişliği 3.47 GHz’dir, merkez frekansa oranı %32’dir. 3-dB iletim bandı 9.02 GHz ile 13.45 GHz aralığındadır; bant genişliği 4.43 GHz’dir, merkez frekansa oranı %40’tır. Soğurma bandı -10 dB referans değeriyle 4.33 GHz’e ulaşmaktadır (Şekil 4.3).



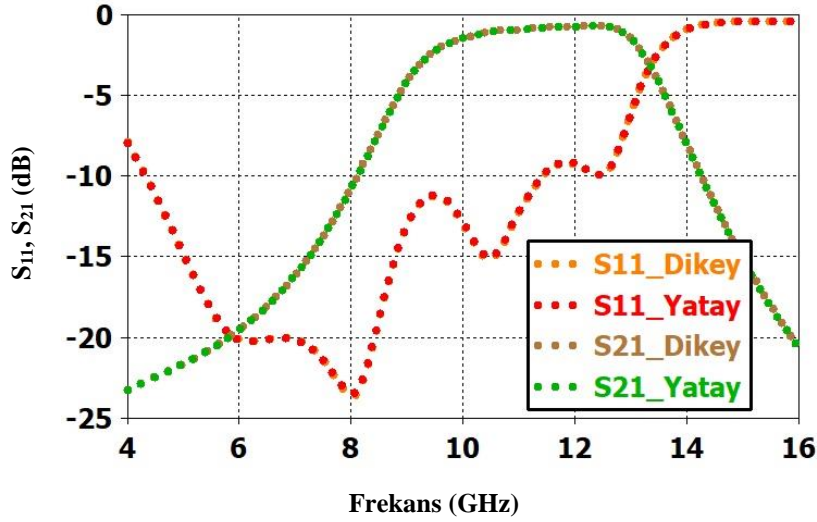
Şekil 4.3 EM analiz ile optimizasyon sonucu elde edilen nihai eleman değerleriyle oluşturulan soğurucu frekans seçici yüzey frekans tepkisi

Çift polarizasyonlu çalışma özelliğini analiz etmek için soğurucu frekans seçici yüzeye dik geliş açısında, dikey ve yatay polarizasyonda gelen EM dalga analizi gerçekleştirilmiştir. Dikey eksen polarizasyonunda gelen EM dalganın elektrik alan vektörü dikey ekseninde (y-ekseni), manyetik alan vektörü yatay ekseninde (x-ekseni) salınım yapmaktadır. Yatay eksen polarizasyonunda gelen EM dalganın elektrik alan vektörü yatay ekseninde (x-ekseni), manyetik alan vektörü dikey ekseninde (y-ekseni) salınım yapmaktadır (Şekil. 4.4).



Şekil 4.4 EM analizdeki dikey ve yatay polarizasyon eksenleri

Dikey ve yatay polarizasyon için gerçekleştirilen EM analiz sonucunda soğurucu frekans seçici yüzeyin iletim tepkisi ( $S_{21}$ ) ve yansıma tepkisi ( $S_{11}$ ) grafiklerinin dikey ve yatay polarizasyon durumlarında üst üste geldiği görülmektedir (Şekil 4.5). Soğurucu yüzey ve bant geçiren için önerilen simetrik rezonatör yapıları çift polarizasyonlu çalışma özelliğini sağlamaktadır.

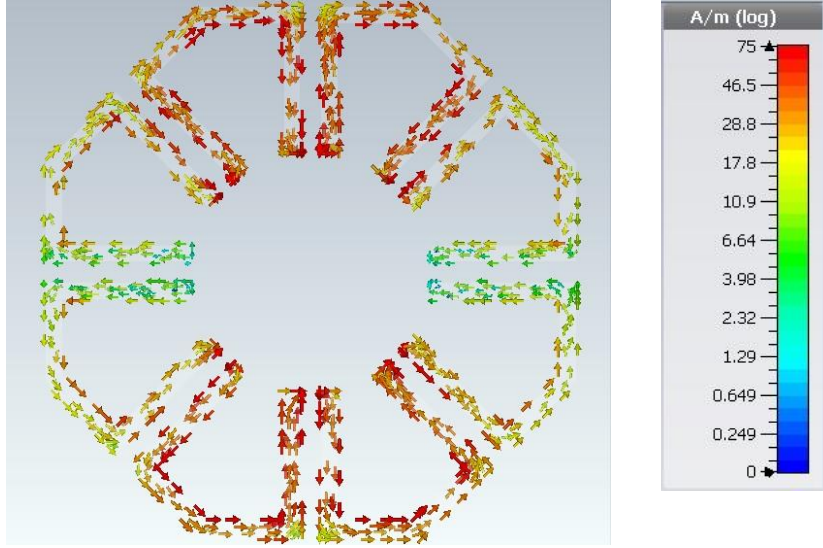


Şekil 4.5 Soğurucu frekans seçici yüzey dikey ve yatay polarizasyon frekans tepkisi

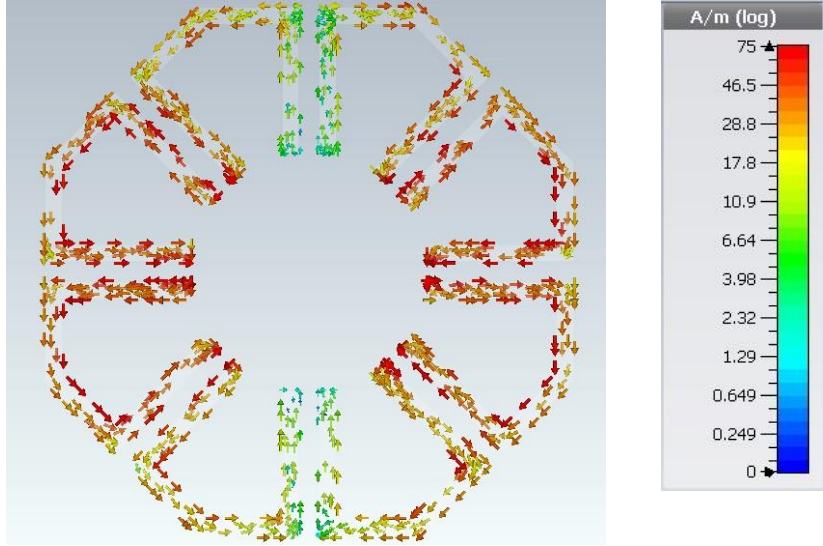
Tasarlanan soğurucu frekans seçici yüzeyin çalışma davranışını analiz etmek amacıyla CST programı ile gerçekleştirilen EM analizlerde soğurucu yüzey ve bant geçiren yüzeyin yüzey akım vektörleri ve elektrik alan vektörleri dağılımları soğurma bandı, iletim bandı ve yansıma bandı bölgeleri için analiz edilmektedir. EM analizde kullanılacak farklı kaynak gücü değerlerinde, yüzeyde indüklenerek yüzey akım ve elektrik alan vektörleri farklı genliklerde olacağı için kaynak gücü değiştirilmemektedir.

Dik geliş açısında; soğurma bandı için 6 GHz'de, iletim bandı için 11 GHz'de, yansıma bandı için 15 GHz'de dikey ve yatay polarizasyon için gerçekleştirilen analiz sonucunda soğurucu yüzeyin yüzey akımı dağılımı Şekil 4.6, 4.7, 4.8, 4.9, 4.10 ve 4.11'de gösterilmektedir.

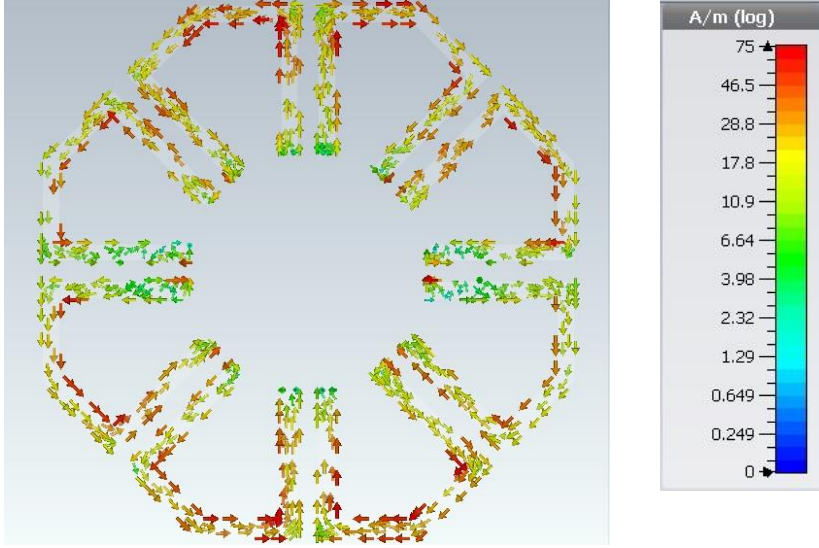




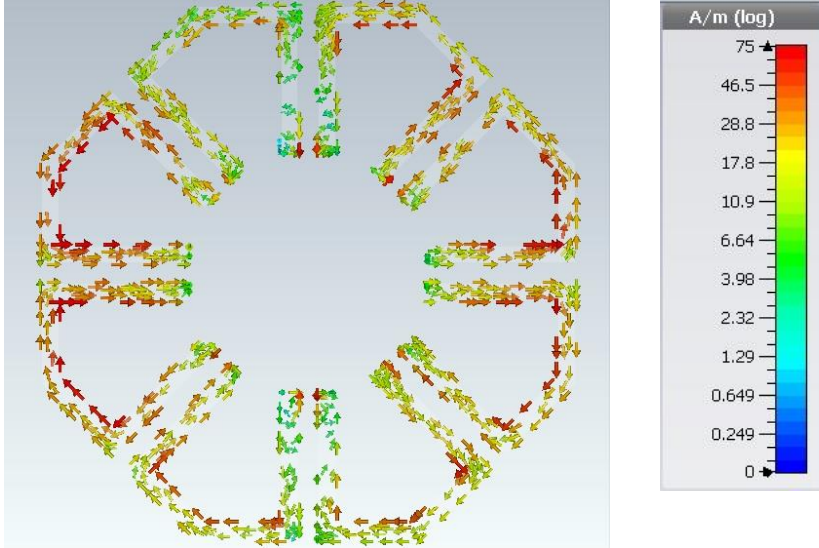
Şekil 4.6 6 GHz'de dikey polarizasyon soğurucu yüzey yüzey akımı analizi



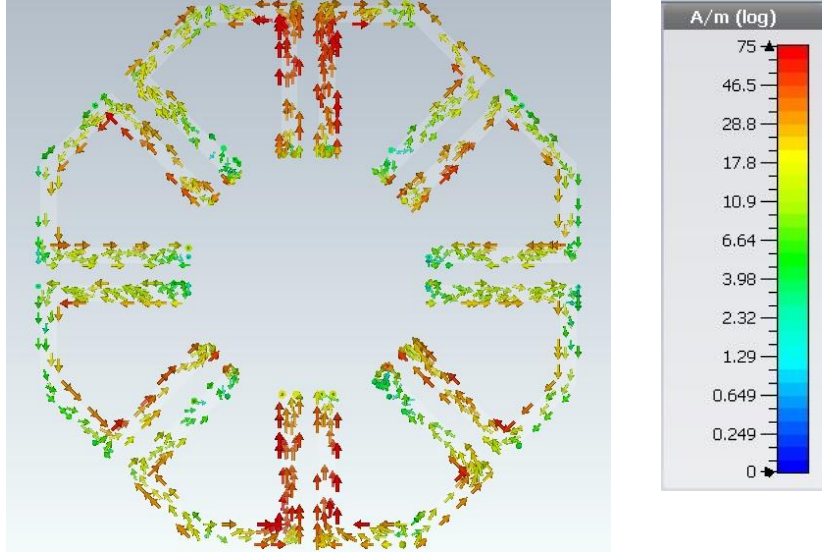
Şekil 4.7 6 GHz'de yatay polarizasyon soğurucu yüzey yüzey akımı analizi



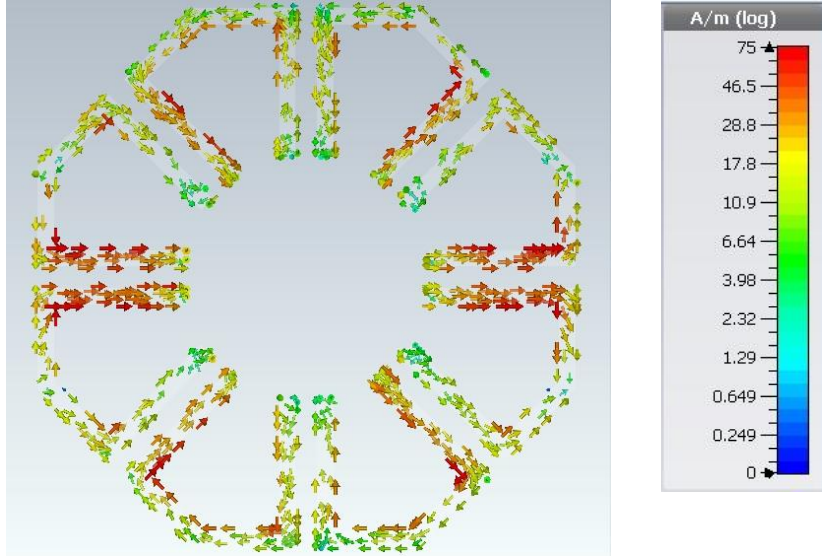
Şekil 4.8 11 GHz’de dikey polarizasyon soğurucu yüzey yüzey akımı analizi



Şekil 4.9 11 GHz’de yatay polarizasyon soğurucu yüzey yüzey akımı analizi

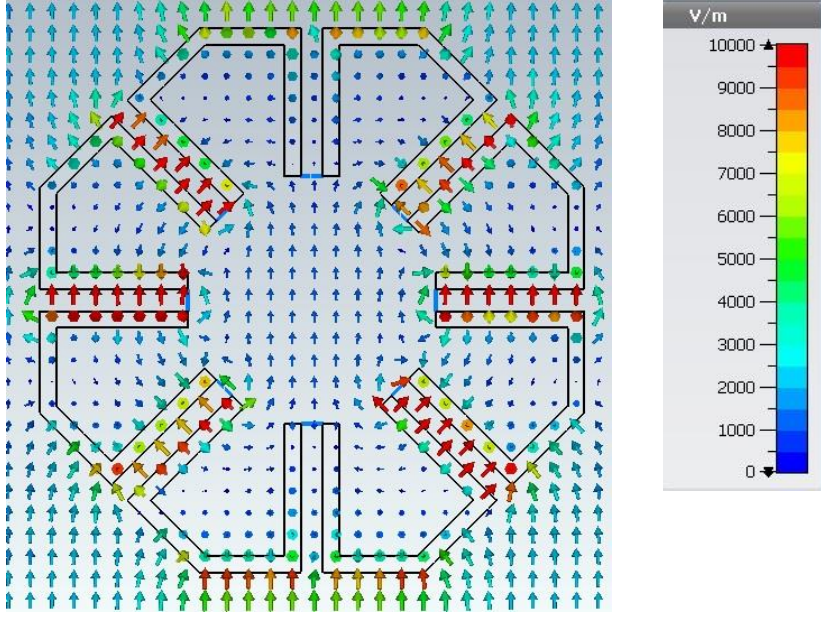


Şekil 4.10 15 GHz’de dikey polarizasyon soğurucu yüzey yüzey akımı analizi

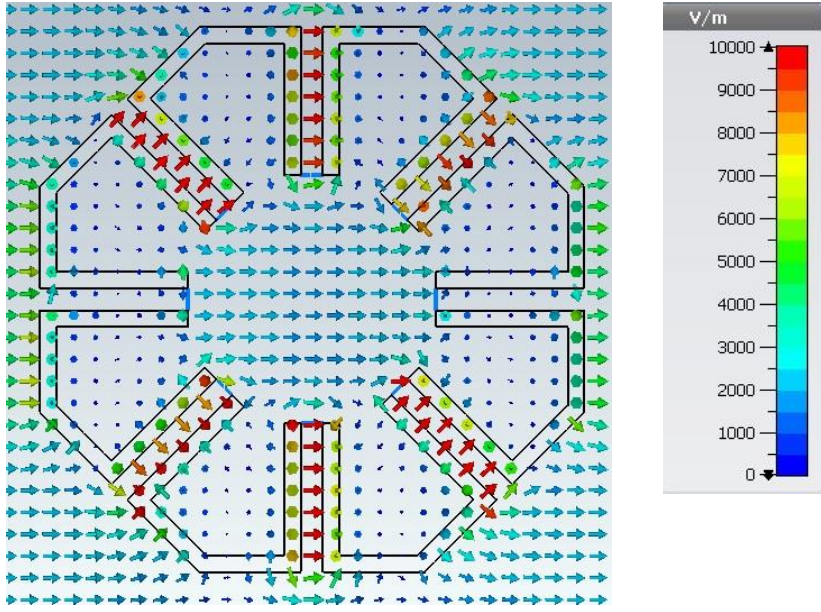


Şekil 4.11 15 GHz’de yatay polarizasyon soğurucu yüzey yüzey akımı analizi

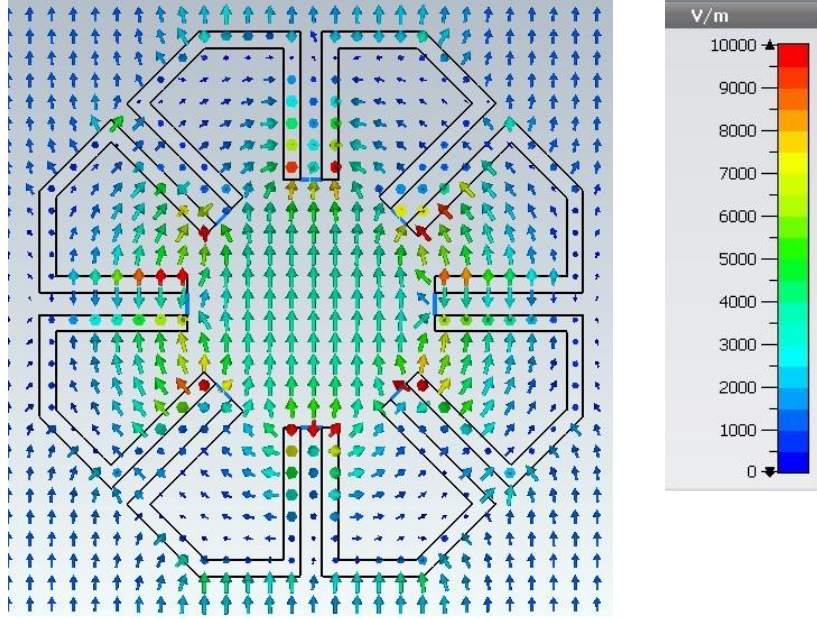
Dik geliş açısında; soğurma bandı için 6 GHz’de, iletim bandı için 11 GHz’de, yansıma bandı için 15 GHz’de dikey ve yatay polarizasyon için gerçekleştirilen analiz sonucunda soğurucu yüzeydeki elektrik alan dağılımı Şekil 4.12, 4.13, 4.14, 4.15, 4.16 ve 4.17’de gösterilmektedir.



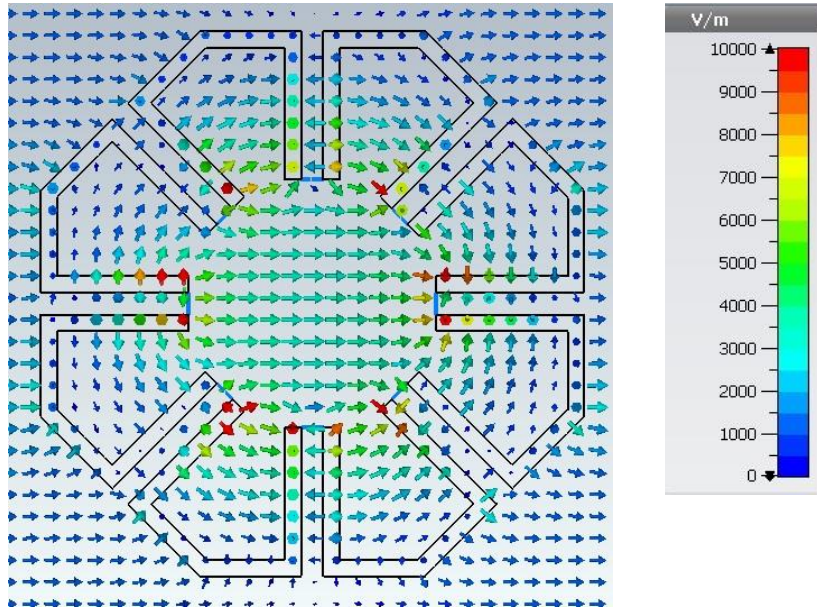
Şekil 4.12 6 GHz’de dikey polarizasyon soğurucu yüzey elektrik alan dağılımı



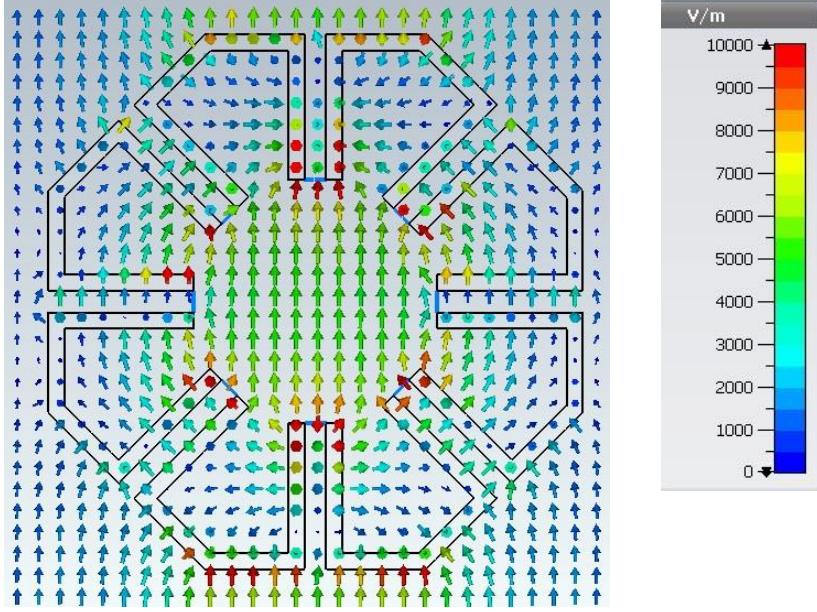
Şekil 4.13 6 GHz’de yatay polarizasyon soğurucu yüzey elektrik alan dağılımı



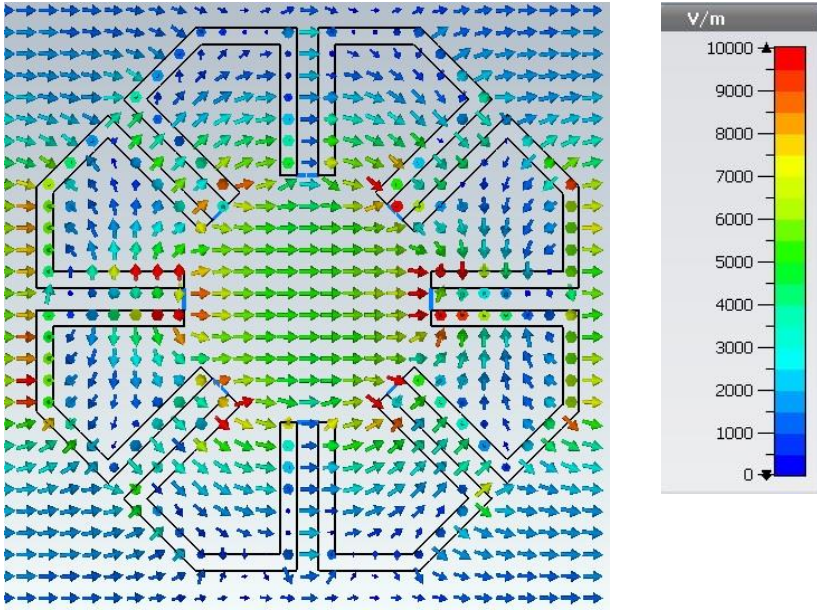
Şekil 4.14 11 GHz’de dikey polarizasyon soğurucu yüzey elektrik alan dağılımı



Şekil 4.15 11 GHz’de yatay polarizasyon soğurucu yüzey elektrik alan dağılımı

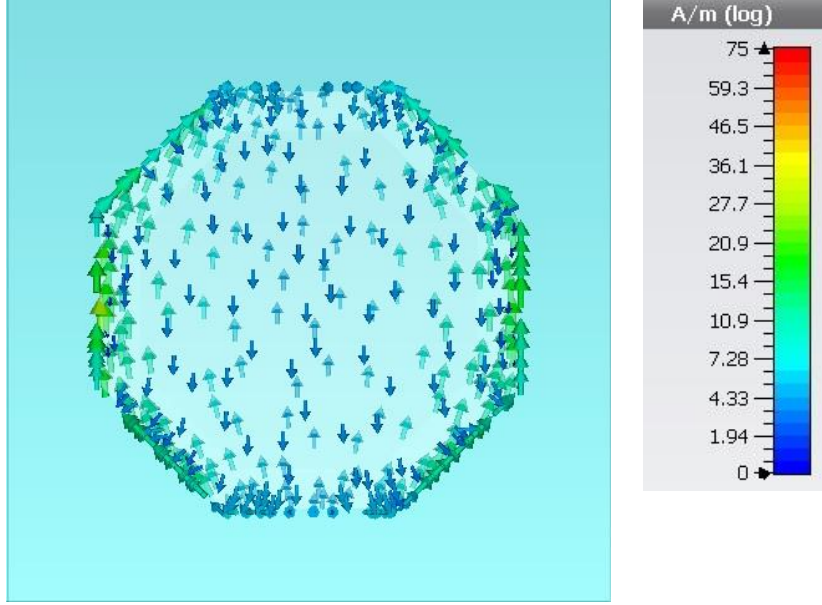


Şekil 4.16 15 GHz’de dikey polarizasyon soğurucu yüzey elektrik alan dağılımı

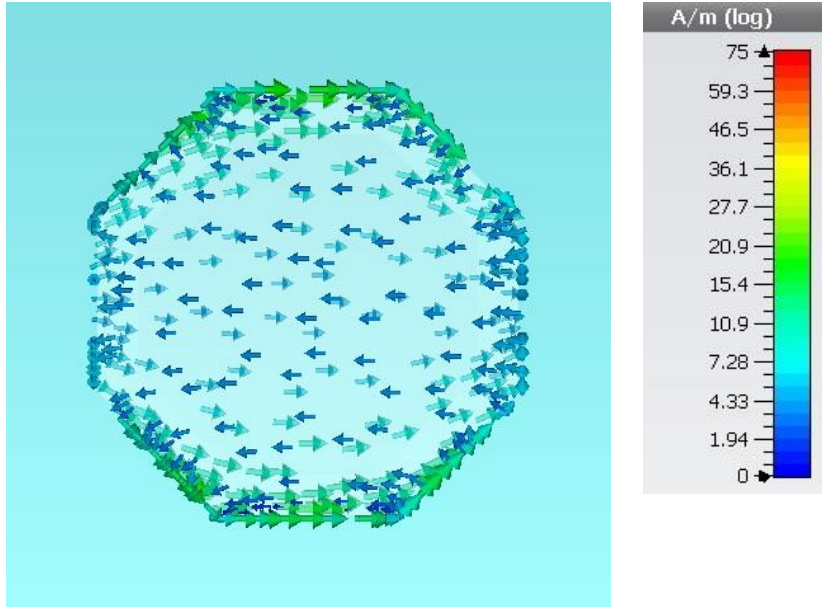


Şekil 4.17 15 GHz’de yatay polarizasyon soğurucu yüzey elektrik alan dağılımı

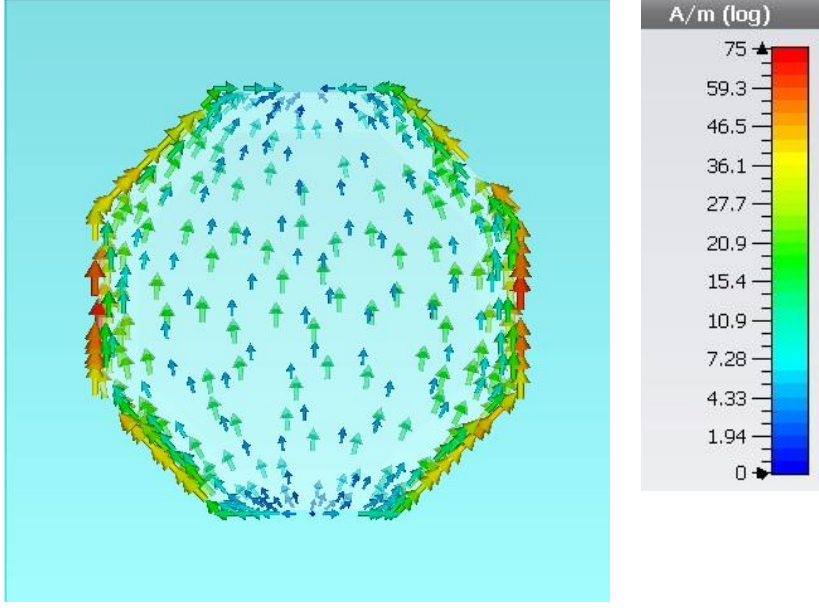
Dik geliş açısında; soğurma bölgesi için 6 GHz’de, iletim bölgesi için 11 GHz’de, yansımaya bölgesi için 15 GHz’de dikey ve yatay polarizasyon için gerçekleştirilen analiz sonucunda bant geçiren yüzey-ön yama yüzeyin yüzey akımı dağılımı Şekil 4.18, 4.19, 4.20, 4.21, 4.22 ve 4.23’de gösterilmektedir.



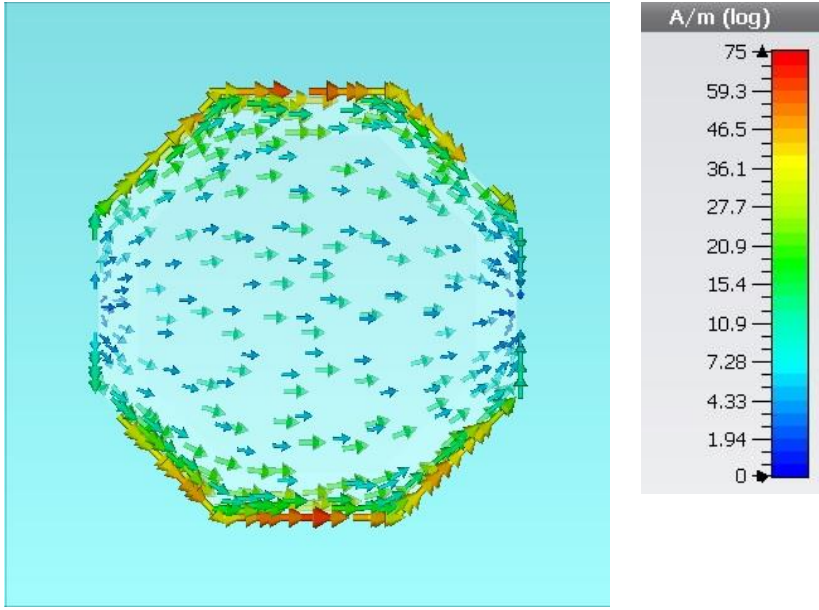
Şekil 4.18 6 GHz'de dikey polarizasyon bant geçiren-ön yüzey yüzey akımı analizi



Şekil 4.19 6 GHz'de yatay polarizasyon bant geçiren-ön yüzey yüzey akımı analizi

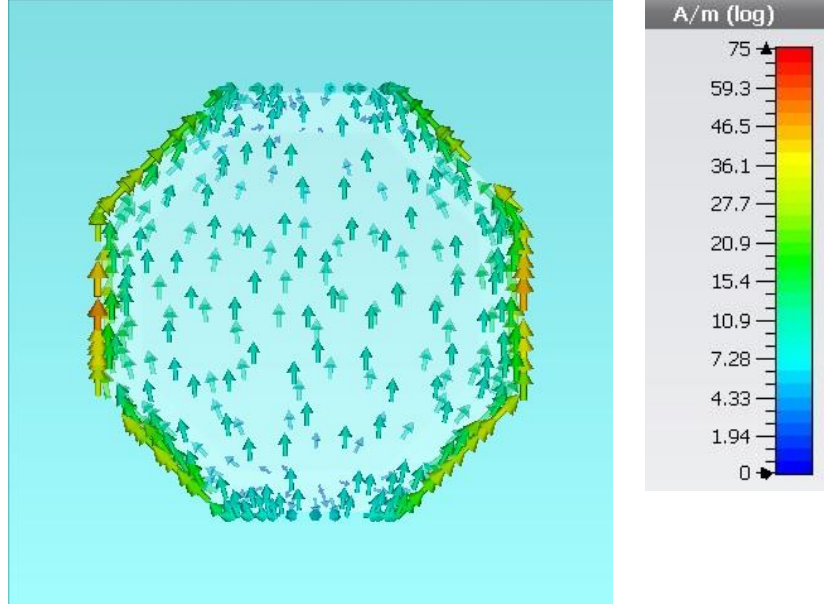


Şekil 4.20 11 GHz’de dikey polarizasyon bant geçiren-ön yüzey yüzey akımı analizi

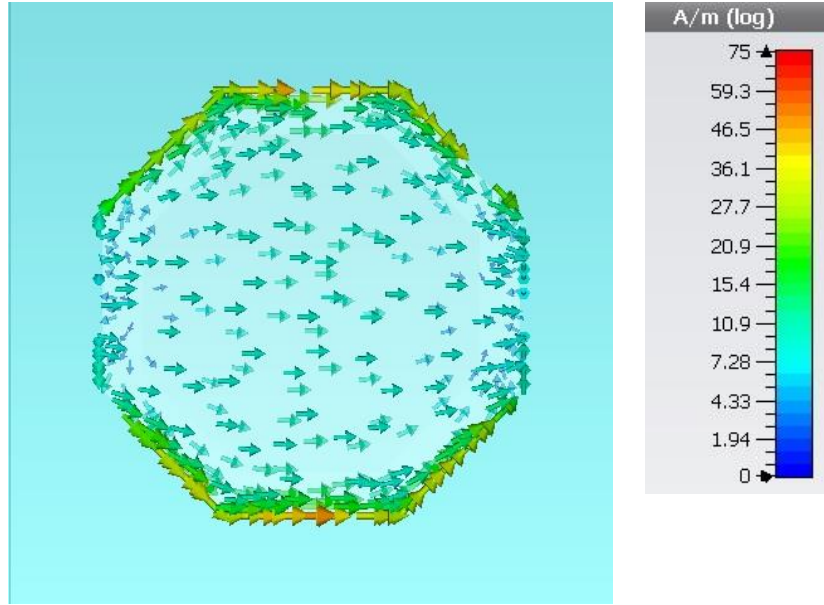


Şekil 4.21 11 GHz’de yatay polarizasyon bant geçiren-ön yüzey yüzey akımı analizi



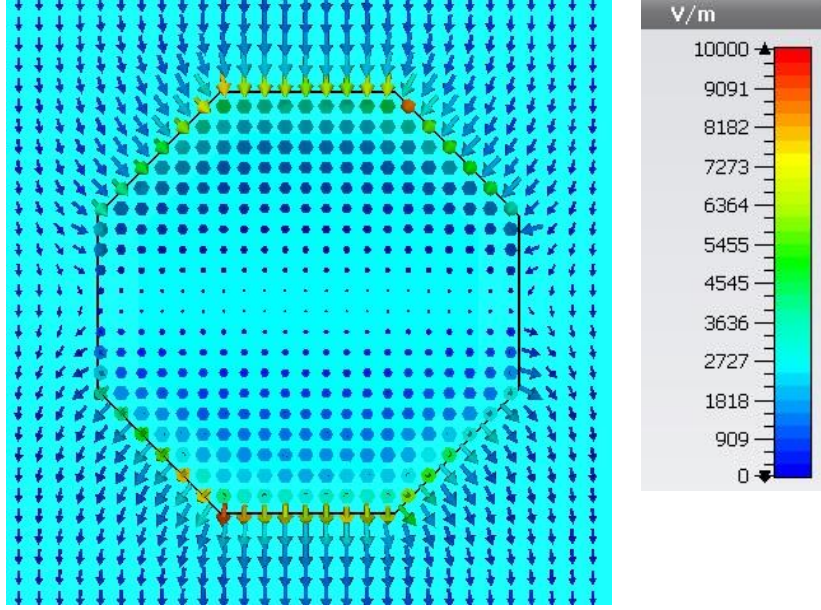


Şekil 4.22 15 GHz’de dikey polarizasyon bant geçiren-ön yüzey yüzey akımı analizi

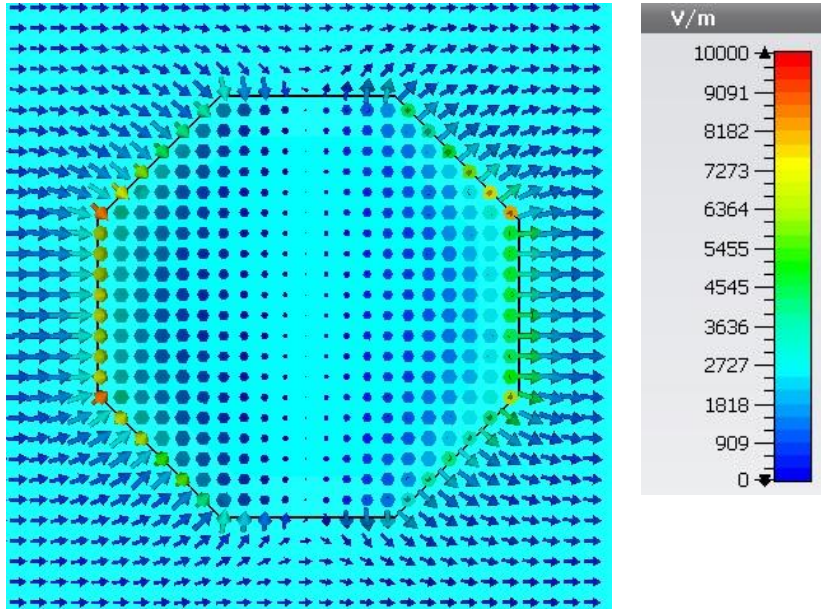


Şekil 4.23 15 GHz’de yatay polarizasyon bant geçiren-ön yüzey yüzey akımı analizi

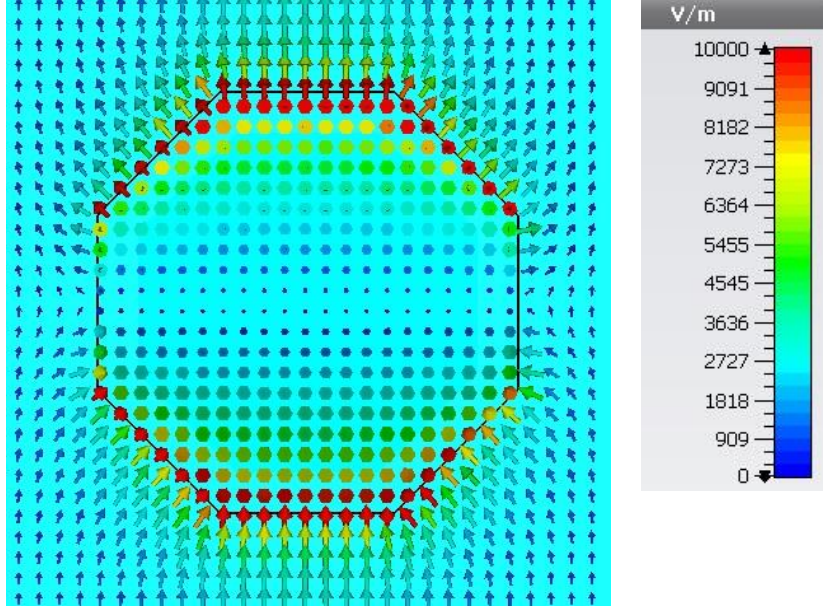
Dik geliş açısında; soğurma bandı için 6 GHz’de, iletim bandı için 11 GHz’de, yansıma bandı için 15 GHz’de dikey ve yatay polarizasyon için gerçekleştirilen analiz sonucunda bant geçiren yüzey-ön yama yüzeydeki elektrik alan dağılımı Şekil 4.24, 4.25, 4.26, 4.27, 4.28 ve 4.29’de gösterilmektedir.



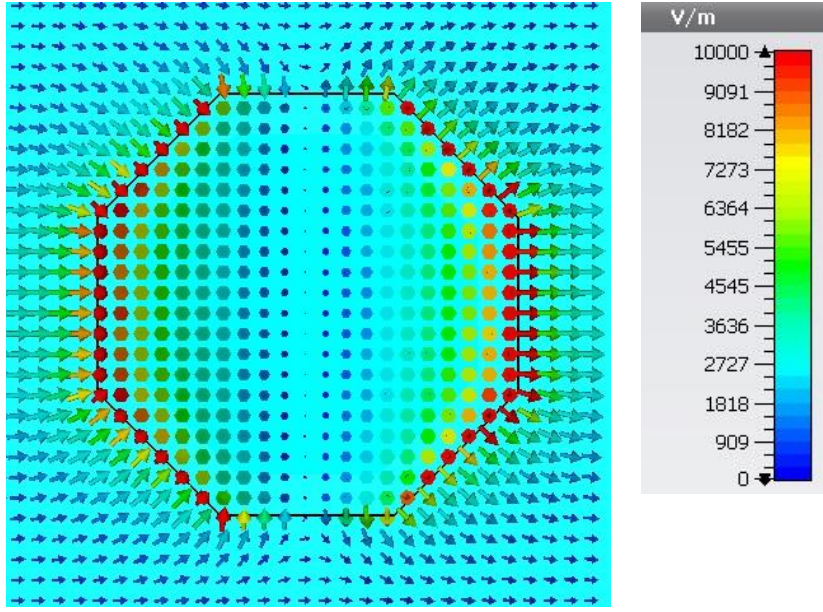
Şekil 4.24 6 GHz’de dikey polarizasyon bant geçiren-ön yüzey elektrik alan dağılımı



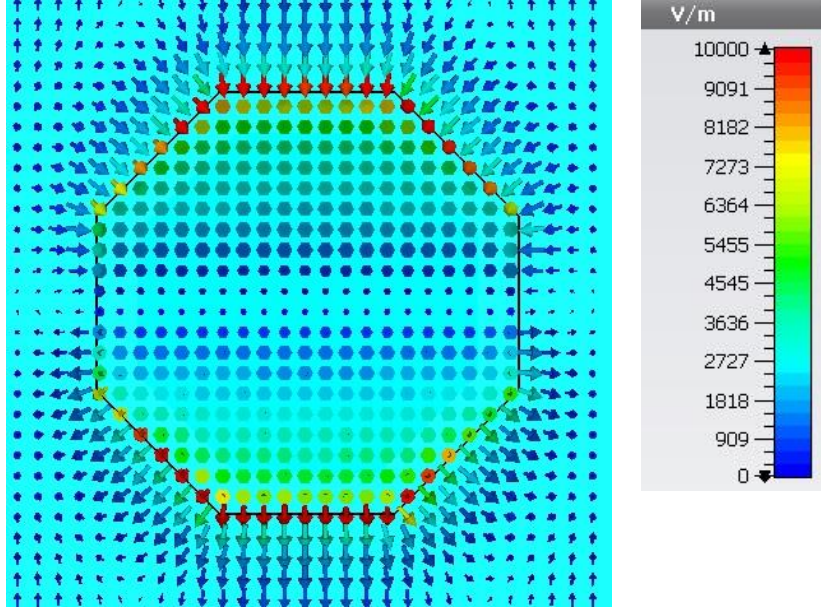
Şekil 4.25 6 GHz’de yatay polarizasyon bant geçiren-ön yüzey elektrik alan dağılımı



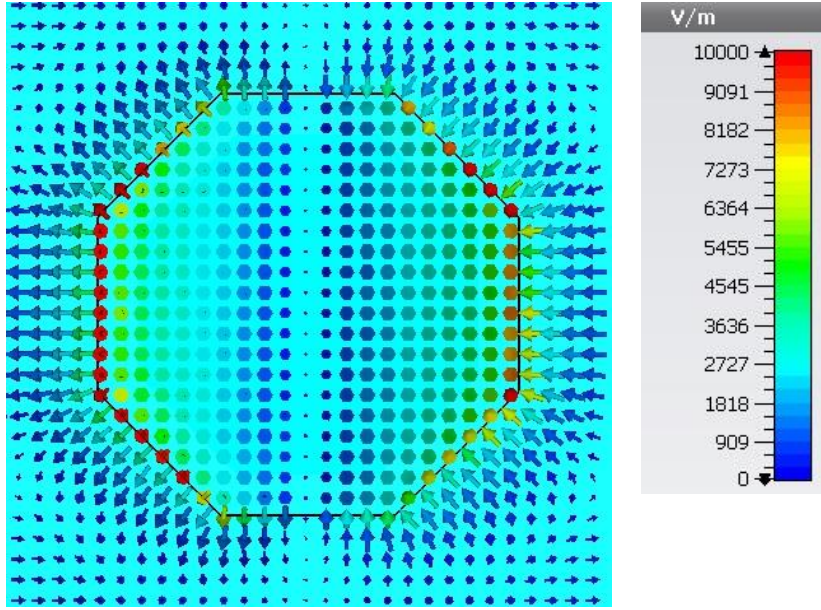
Şekil 4.26 11 GHz'de dikey polarizasyon bant geçiren-ön yüzey elektrik alan dağılımı



Şekil 4.27 11 GHz'de yatay polarizasyon bant geçiren-ön yüzey elektrik alan dağılımı

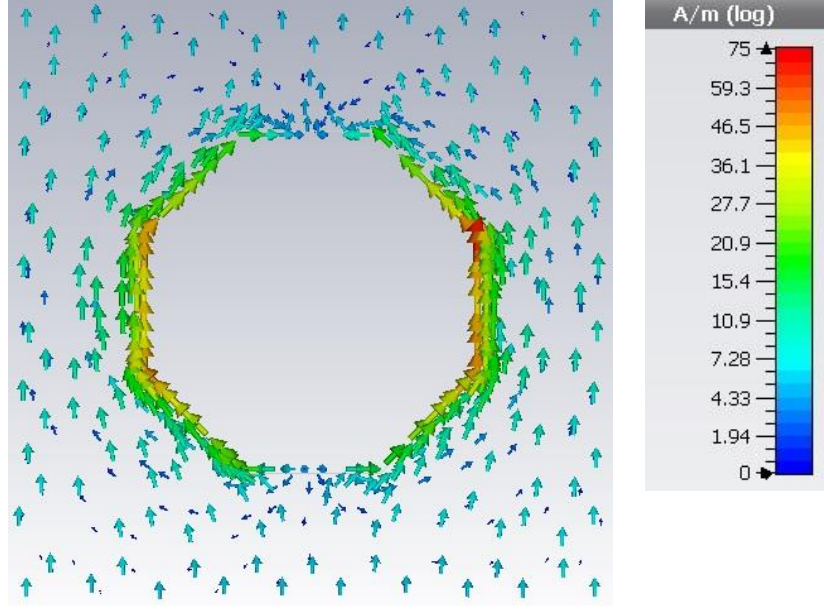


Şekil 4.28 15 GHz’de dikey polarizasyon bant geçiren-ön yüzey elektrik alan dağılımı

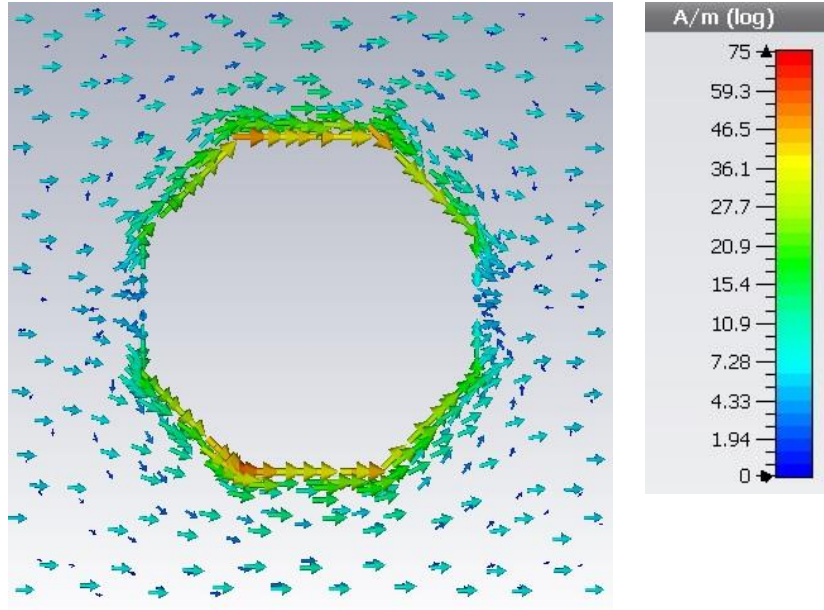


Şekil 4.29 15 GHz’de yatay polarizasyon bant geçiren-ön yüzey elektrik alan dağılımı

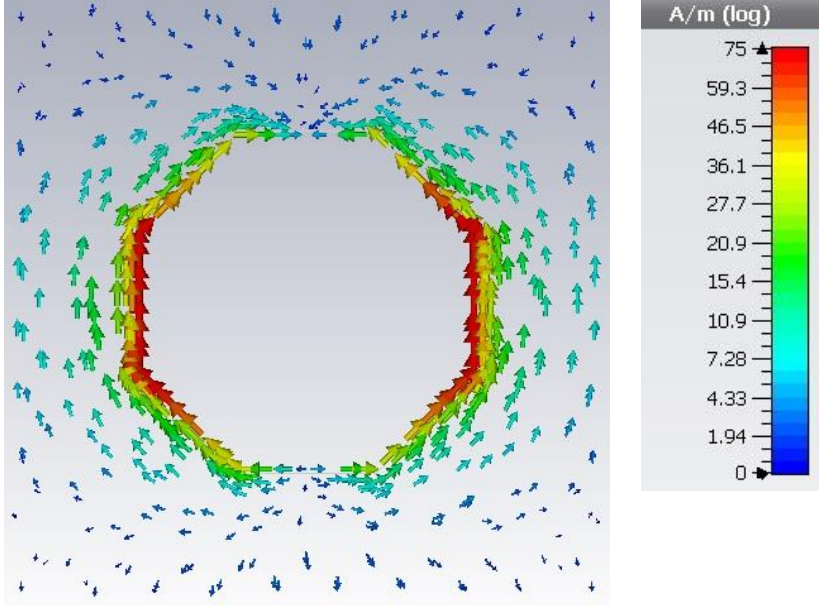
Dik geliş açısında; soğurma bandı için 6 GHz’de, iletim bandı için 11 GHz’de, yansıma bandı için 15 GHz’de dikey ve yatay polarizasyon için gerçekleştirilen analiz sonucunda bant geçiren yüzey-orta yarık yüzeyin yüzey akımı dağılımı Şekil 4.30, 4.31, 4.32, 4.33, 4.34 ve 4.35’de gösterilmektedir.



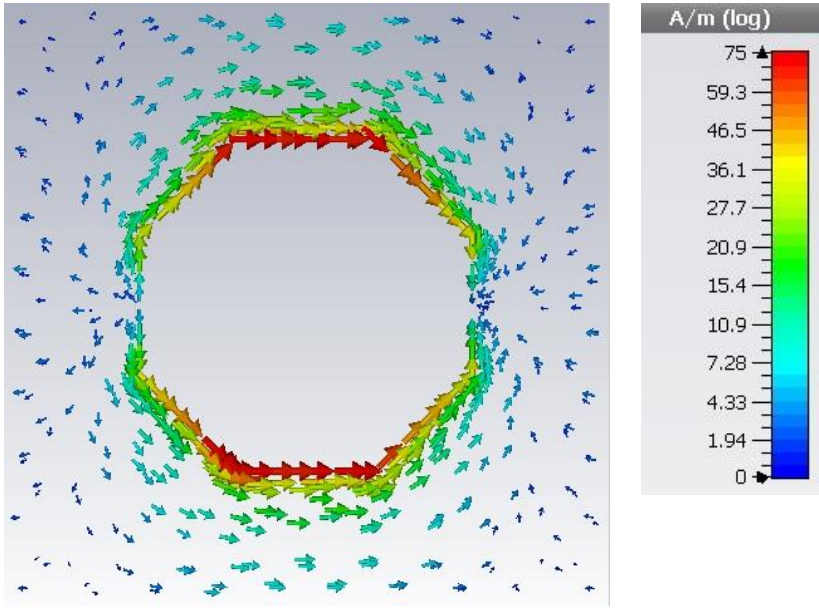
Şekil 4.30 6 GHz'de dikey polarizasyon bant geçiren-orta yüzey yüzey akımı analizi



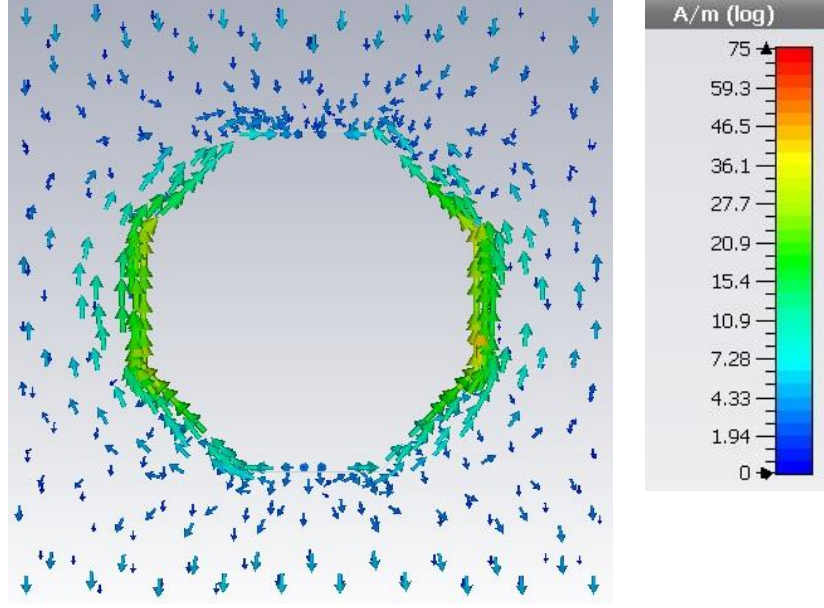
Şekil 4.31 6 GHz'de yatay polarizasyon bant geçiren-orta yüzey yüzey akımı analizi



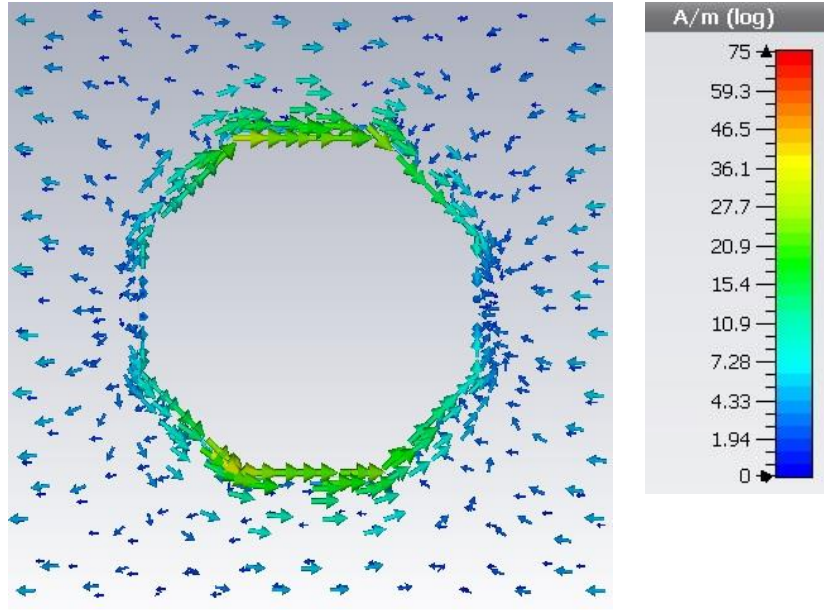
Şekil 4.32 11 GHz’de dikey polarizasyon bant geçiren-orta yüzey yüzey akımı analizi



Şekil 4.33 11 GHz’de yatay polarizasyon bant geçiren-orta yüzey yüzey akımı analizi

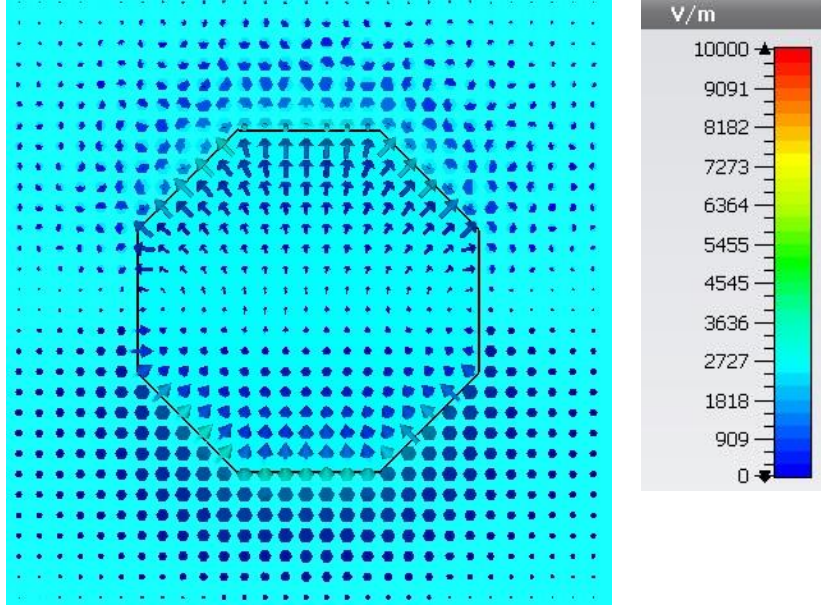


Şekil 4.34 15 GHz’de dikey polarizasyon bant geçiren-orta yüzey yüzey akımı analizi

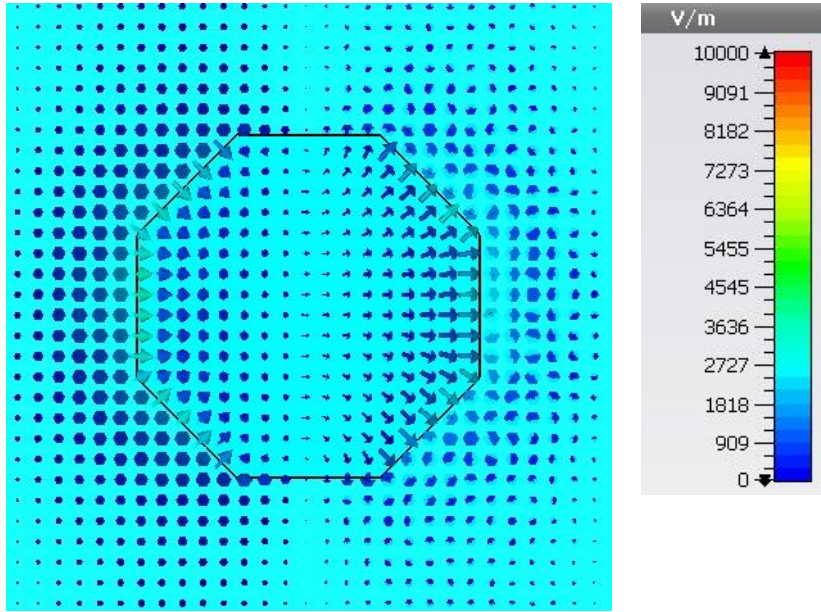


Şekil 4.35 15 GHz’de yatay polarizasyon bant geçiren-orta yüzey yüzey akımı analizi

Dik geliş açısında; soğurma bandı için 6 GHz’de, iletim bandı için 11 GHz’de, yansıma bandı için 15 GHz’de dikey ve yatay polarizasyon için gerçekleştirilen analiz sonucunda bant geçiren yüzey-orta yarık yüzeydeki elektrik alan dağılımı Şekil 4.36, 4.37, 4.38, 4.39, 4.40 ve 4.41’de gösterilmektedir.

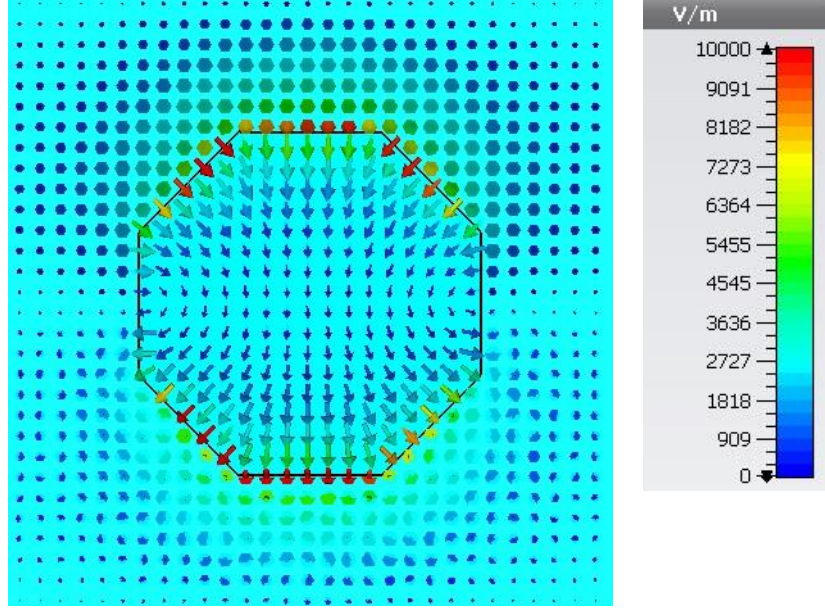


Şekil 4.36 6 GHz’de dikey polarizasyon bant geçiren-orta yüzey elektrik alan dağılımı

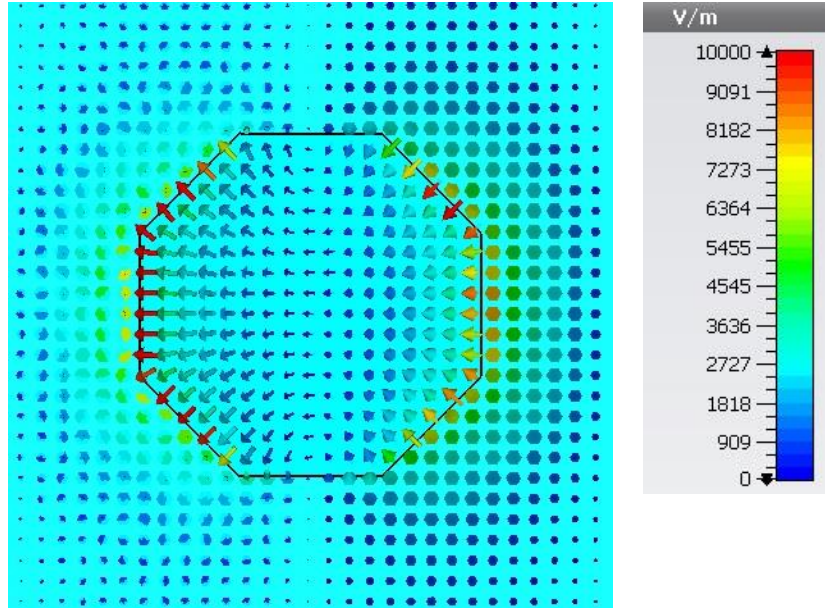


Şekil 4.37 6 GHz’de yatay polarizasyon bant geçiren-orta yüzey elektrik alan dağılımı

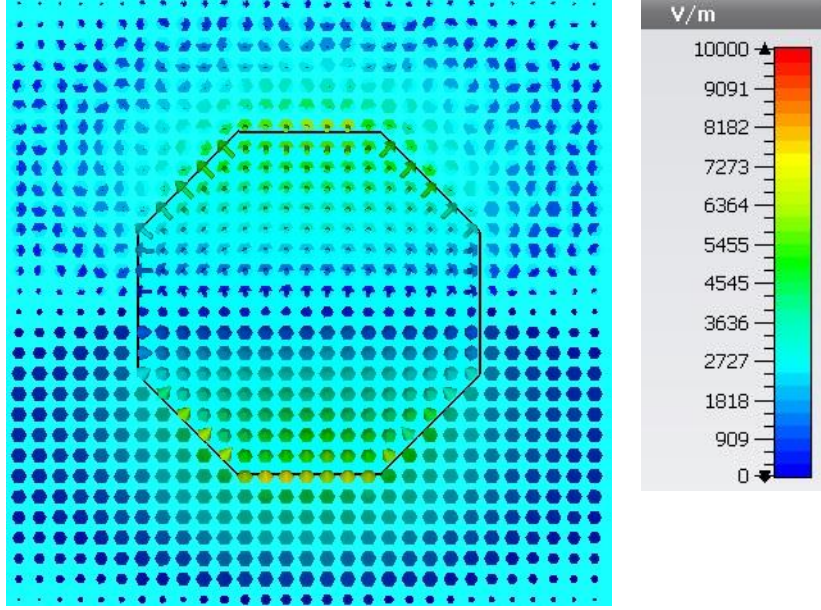




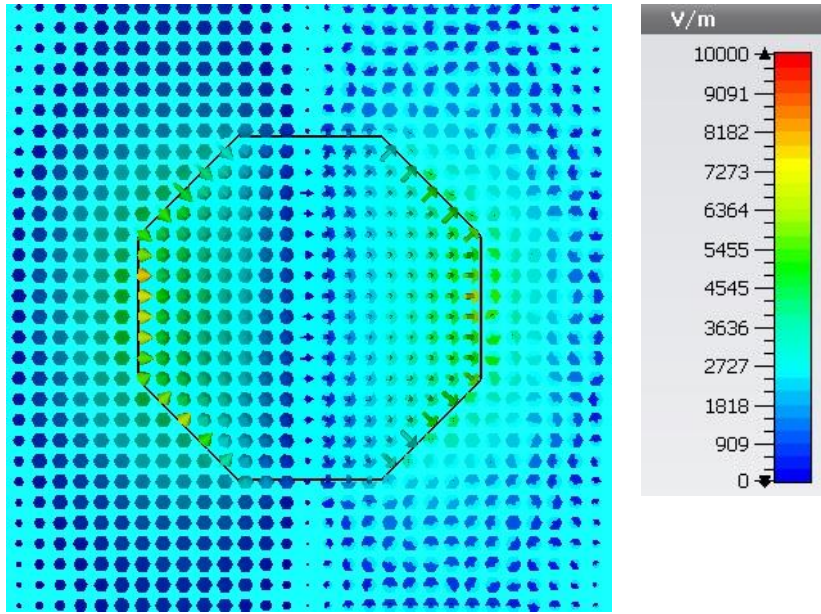
Şekil 4.38 11 GHz'de dikey polarizasyon bant geçiren-orta yüzey elektrik alan dağılımı



Şekil 4.39 11 GHz'de yatay polarizasyon bant geçiren-orta yüzey elektrik alan dağılımı

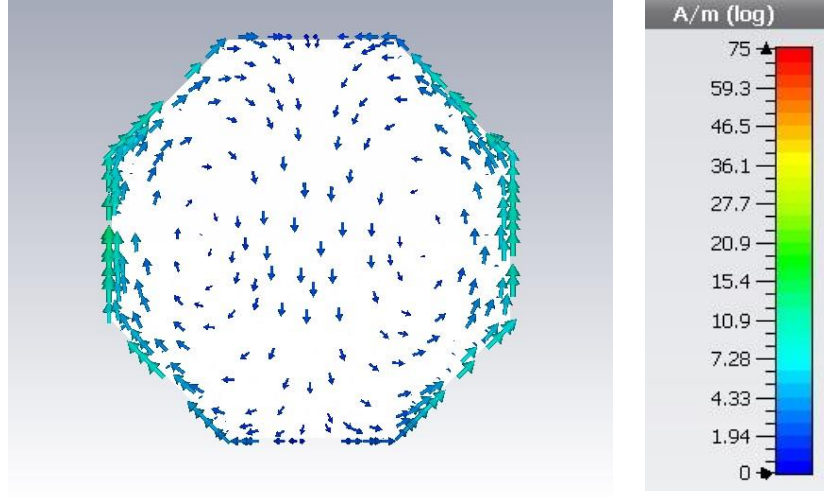


Şekil 4.40 15 GHz’de dikey polarizasyon bant geçiren-orta yüzey elektrik alan dağılımı

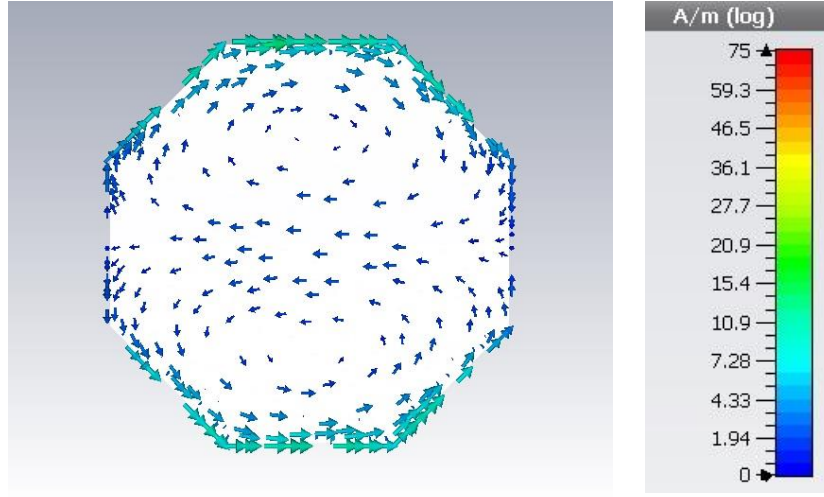


Şekil 4.41 15 GHz’de yatay polarizasyon bant geçiren-orta yüzey elektrik alan dağılımı

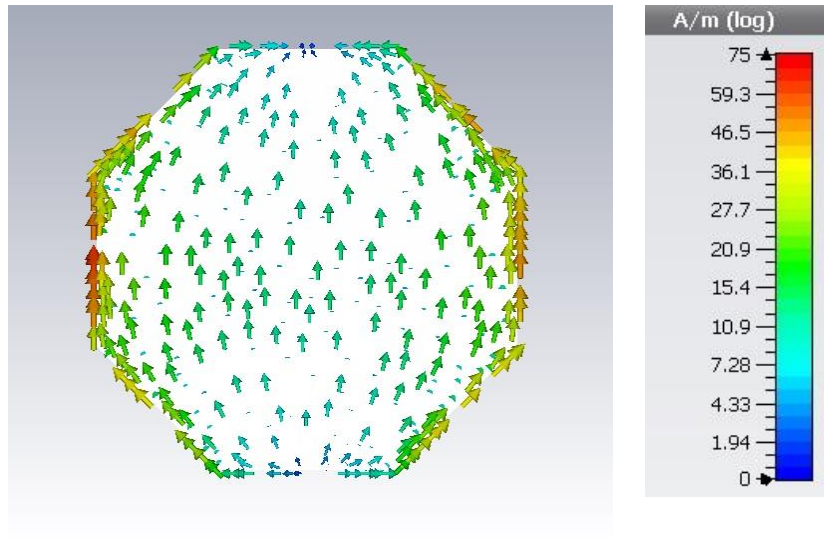
Dik geliş açısında; soğurma bandı için 6 GHz’de, iletim bandı için 11 GHz’de, yansıma bandı için 15 GHz’de dikey ve yatay polarizasyon için gerçekleştirilen analiz sonucunda bant geçiren yüzey-arka yama yüzeyin yüzey akımı dağılımı Şekil 4.42, 4.43, 4.44, 4.45, 4.46 ve 4.47’de gösterilmektedir.



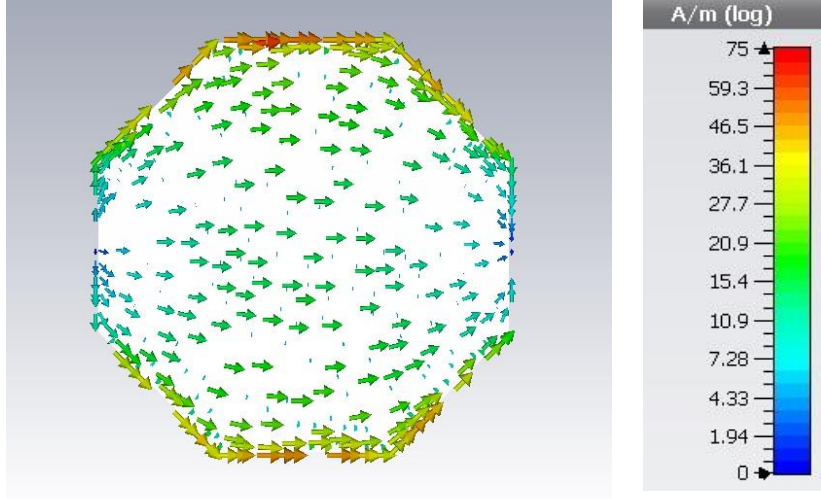
Şekil 4.42 6 GHz’de dikey polarizasyon bant geçiren-arka yüzey yüzey akımı analizi



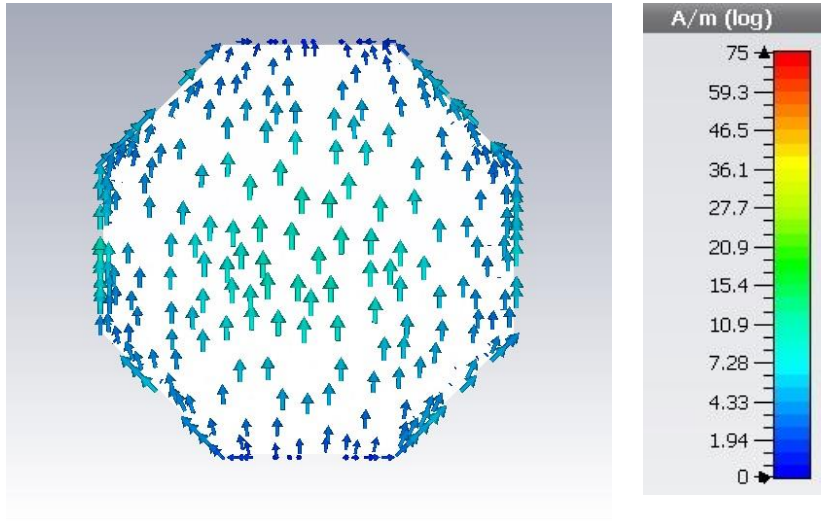
Şekil 4.43 6 GHz’de yatay polarizasyon bant geçiren-arka yüzey yüzey akımı analizi



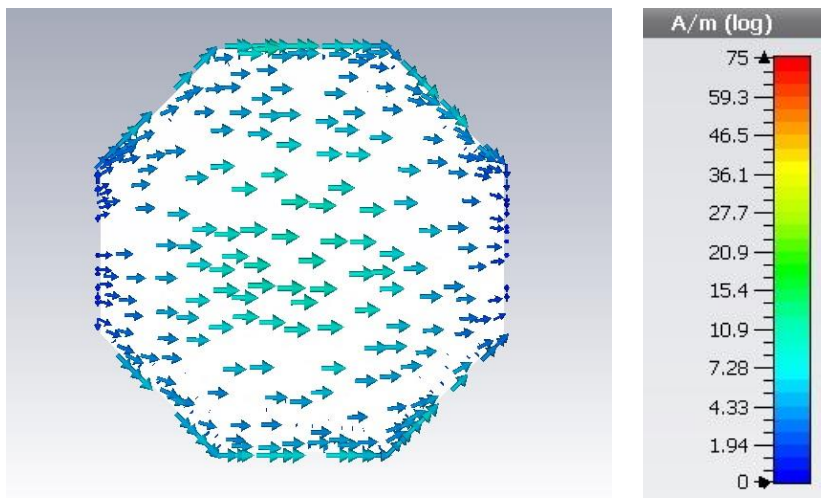
Şekil 4.44 11 GHz’de dikey polarizasyon bant geçiren-arka yüzey yüzey akımı analizi



Şekil 4.45 11 GHz’de yatay polarizasyon bant geçiren-arka yüzey yüzey akımı analizi

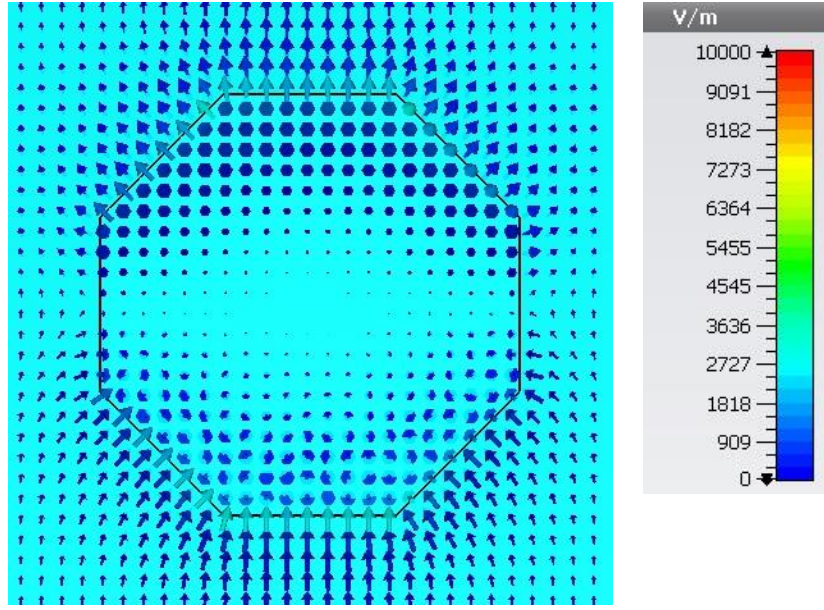


Şekil 4.46 15 GHz’de dikey polarizasyon bant geçiren-arka yüzey yüzey akımı analizi

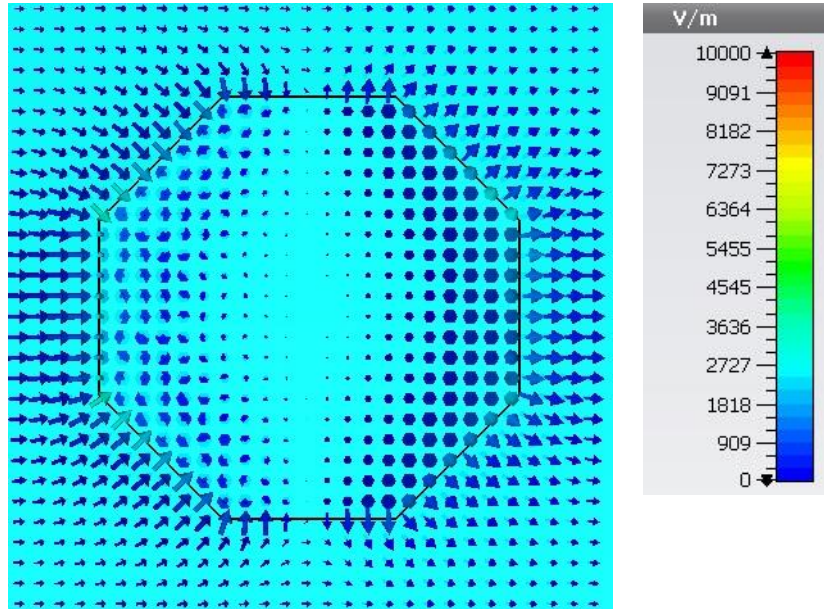


Şekil 4.47 15 GHz’de yatay polarizasyon bant geçiren-arka yüzey yüzey akımı analizi

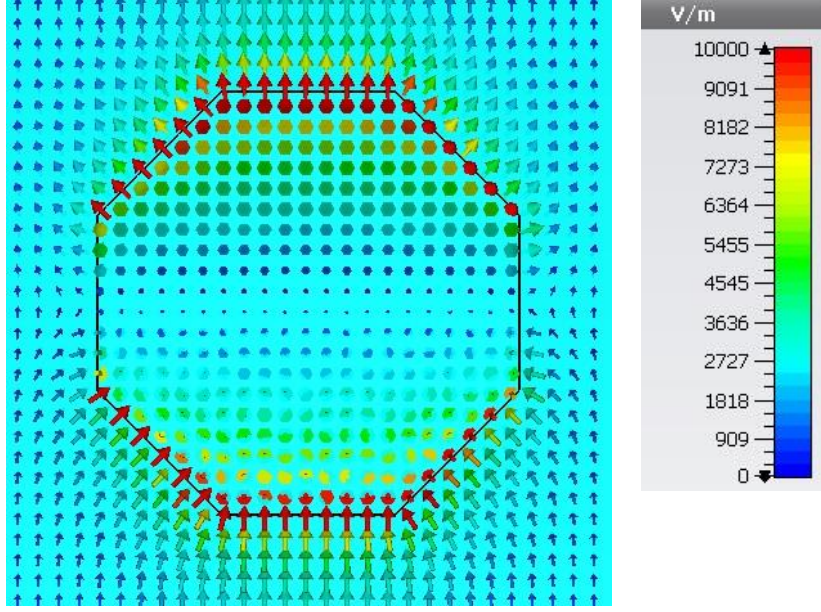
Dik geliş açısında; soğurma bandı için 6 GHz’de, iletim bandı için 11 GHz’de, yansıma bandı için 15 GHz’de dikey ve yatay polarizasyon için gerçekleştirilen analiz sonucunda bant geçiren yüzey-arka yama yüzeydeki elektrik alan dağılımı Şekil 4.48, 4.49, 4.50, 4.51, 4.52 ve 4.53’de gösterilmektedir.



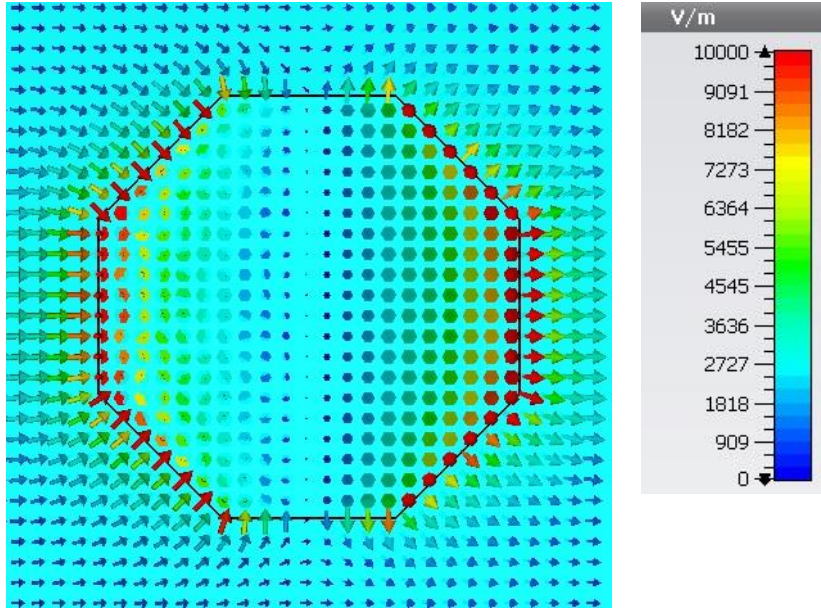
Şekil 4.48 6 GHz’de dikey polarizasyon bant geçiren-arka yüzey elektrik alan dağılımı



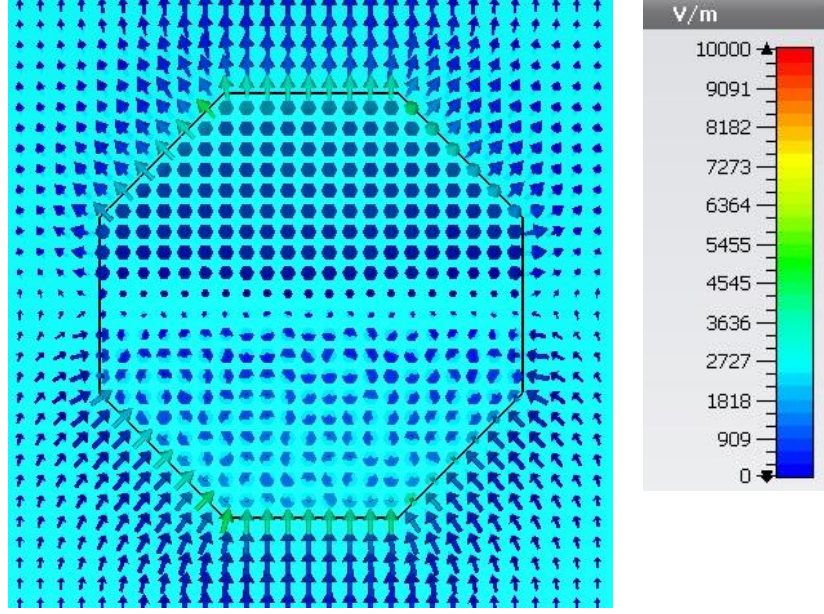
Şekil 4.49 6 GHz’de yatay polarizasyon bant geçiren-arka yüzey elektrik alan dağılımı



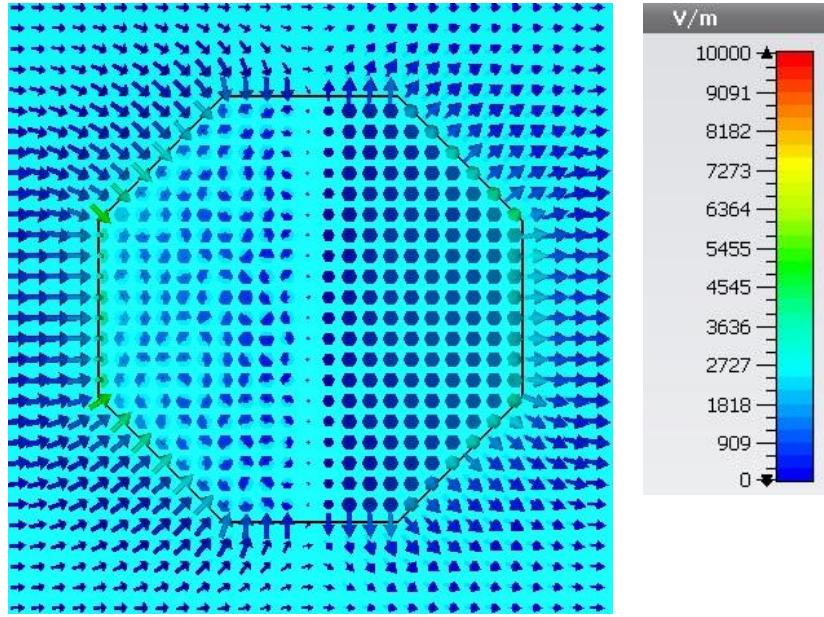
Şekil 4.50 11 GHz’de dikey polarizasyon bant geçiren-arka yüzey elektrik alan dağılımı



Şekil 4.51 11 GHz’de yatay polarizasyon bant geçiren-arka yüzey elektrik alan dağılımı



Şekil 4.52 15 GHz'de dikey polarizasyon bant geçiren-arka yüzey elektrik alan dağılımı



Şekil 4.53 15 GHz'de yatay polarizasyon bant geçiren-arka yüzey elektrik alan dağılımı

Analizler sonucunda yüzeylerde oluşan elektrik alan ve yüzey akımı değerleri kıyaslamalı olarak değerlendirilmektedir. Soğurucu yüzeyde indüklenen yüzey akım dağılımı incelendiğinde; en yüksek yüzey akımının soğurma bandında paralel mikroşerit hatlarda oluştuğu ve toplu elemanlı dirençlerin üzerinden aktığı görülmektedir. İletim bandı için oluşan yüzey akımı görece düşük seviyededir. Yansıma bandında dikey polarizasyonda dikey konumdaki paralel mikroşeritler üzerinde, yatay polarizasyonda yatay konumdaki paralel mikroşeritler üzerinde yüksek yüzey akımı oluşmaktadır; paralel mikroşeritler

üzerinde iki kolda oluşan akımlar aynı yöndedir. Soğurucu yüzeydeki elektrik alan dağılımı incelendiğinde; en kuvvetli elektrik alan dağılımının soğurma bandında paralel mikroseritler arasında olduğu görülmektedir.

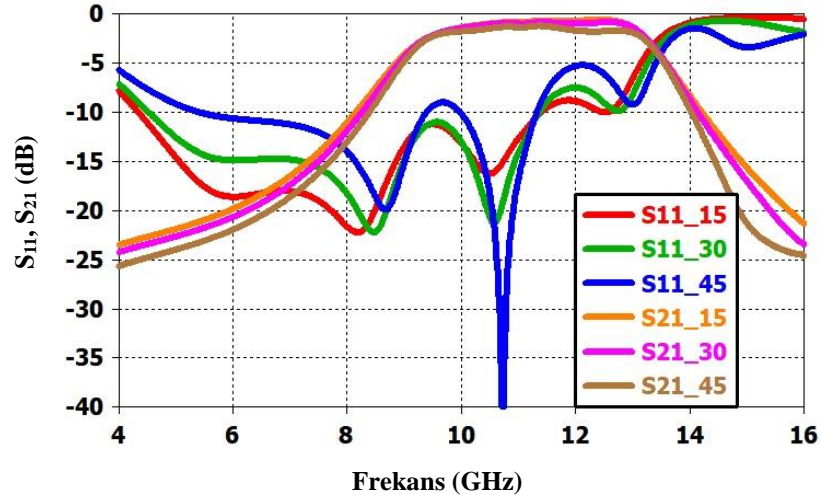
Bant geçiren yüzey-ön yüzeyde indüklenen yüzey akım dağılımı incelendiğinde; en yüksek yüzey akımlarının soğurma, iletim ve yansıma bandı için sekizgen yama rezonatörün çerçevesinde gerçekleştiği görülmektedir. Aynı şekilde yüzeydeki en kuvvetli elektrik alan dağılımının olduğu bölgeler soğurma, iletim ve yansıma bandı için rezonatörün çerçevesidir.

Bant geçiren yüzey-orta yüzeyde indüklenen yüzey akım dağılımı incelendiğinde; en yüksek yüzey akımlarının üç bant için de sekizgen yarı rezonatörün iç çerçevesinde gerçekleştiği görülmektedir. Yüzeydeki elektrik alan dağılımı incelendiğinde, en kuvvetli elektrik alan dağılımının sekizgen yarı rezonatörün iç çerçevesi etrafında olduğu görülmektedir.

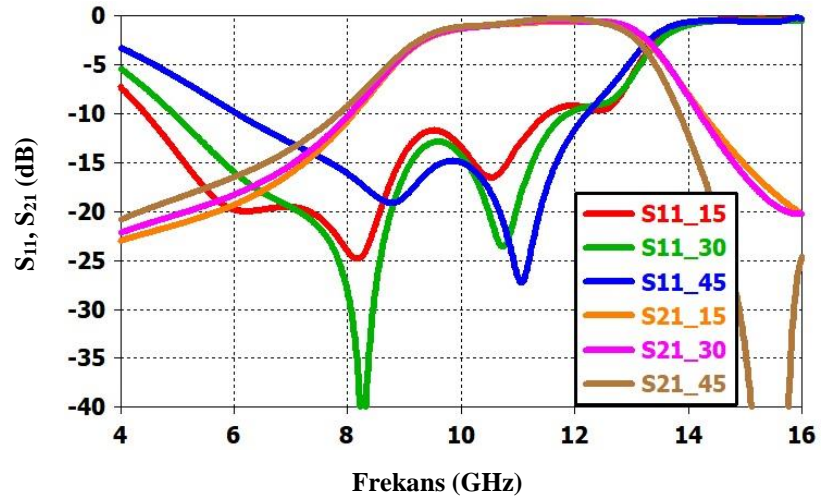
Bant geçiren yüzey-arka yüzeyde indüklenen yüzey akım dağılımı incelendiğinde; iletim bandında oluşan yüzey akımı değerleri ön yüzeyde oluşan değerlere yakındır; bununla birlikte soğurma ve yansıma bandında oluşan yüzey akımı değerleri ön yüzeyde oluşan yüzey akımlarından düşük değerdedir. Yüzey akım dağılımı davranışına benzer şekilde; bant geçiren yüzey-arka yüzeyde iletim bandında oluşan elektrik alan dağılımı ön yüzeyde oluşan elektrik alan ile benzer değerlerdedir. Bununla birlikte soğurma bandı ve yansıma bandında, yüzeyde oluşan elektrik alan dağılımının ön yüzeyde aynı bantlarda oluşan elektrik alan dağılımından daha düşük kuvvette olduğu görülmektedir.

Soğurucu frekans seçici yüzeyler birim elemanları iki yönde ardışık olarak dizilmiş frekans seçici yüzeylerden oluşan yapılardır. Frekans tepkileri yüzeye gelen EM dalganın geliş açısına göre değişir; ve iletim bandı ve soğurma bandı bölgelerinde performansı kötüleşir [50]. Tasarlanan soğurucu frekans seçici yüzeyin frekans tepkisinin, geliş açısının yanca ve yükseliş yönünde artışına göre değişimi EM analiz ile incelenmiştir. Geliş açısının yanca yönünde  $15^0$ ,  $30^0$  ve  $45^0$  olduğu durumlarda analiz sonucunda elde edilen frekans tepkisi Şekil 4.54 ve Şekil 4.55'te gösterilmektedir.



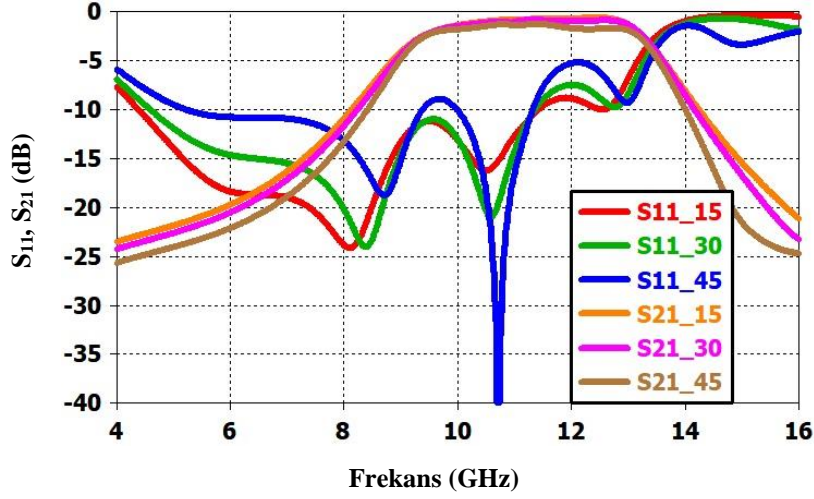


Şekil 4.54 Yanca yönünde  $15^0$ ,  $30^0$  ve  $45^0$  geliş açılarında soğurucu frekans seçici yüzeyin dikey polarizasyonda frekans tepkisi

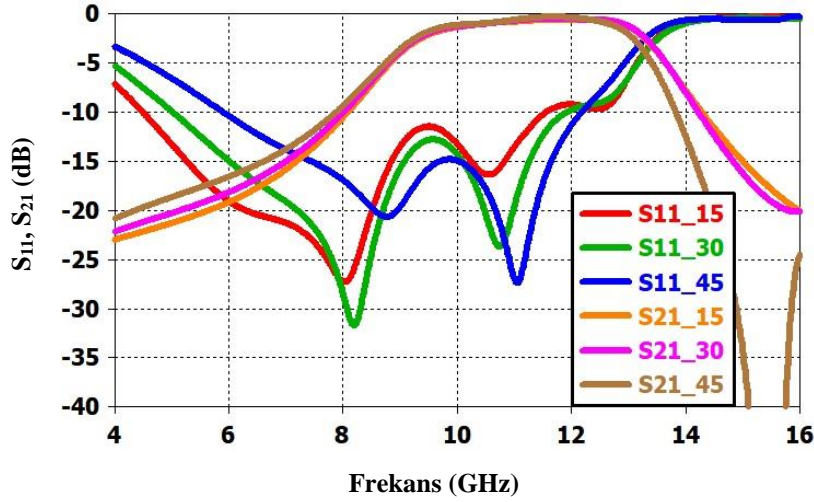


Şekil 4.55 Yanca yönünde  $15^0$ ,  $30^0$  ve  $45^0$  geliş açılarında soğurucu frekans seçici yüzeyin yatay polarizasyonda frekans tepkisi

Geliş açısının yükseliş yönünde  $15^0$ ,  $30^0$  ve  $45^0$  olduğu durumlarda analiz sonucunda elde edilen frekans tepkisi Şekil 4.56 ve Şekil 4.57’de gösterilmektedir.



Şekil 4.56 Yükseliş yönünde  $15^{\circ}$ ,  $30^{\circ}$  ve  $45^{\circ}$  geliş açılarında soğurucu frekans seçici yüzeyin dikey polarizasyonda frekans tepkisi



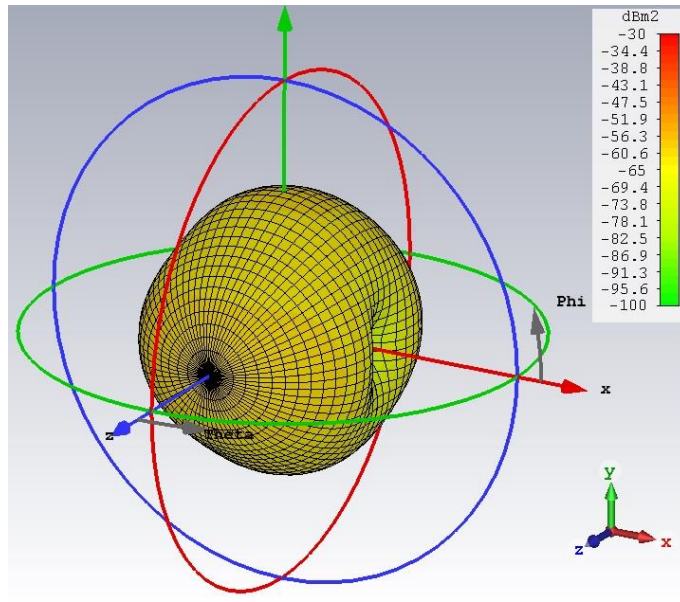
Şekil 4.57 Yükseliş yönünde  $15^{\circ}$ ,  $30^{\circ}$  ve  $45^{\circ}$  geliş açılarında soğurucu frekans seçici yüzeyin yatay polarizasyonda frekans tepkisi

Yanca ve yükseliş yönünde geliş açısının  $15^{\circ}$ 'den  $45^{\circ}$ 'ye artmasıyla, soğurma bandındaki 4-8 GHz spektrumunda  $S_{11}$  değerinin kötüleştiği görülmektedir. İletim bandındaki  $S_{11}$  değeri, dikey polarizasyonda yanca ve yükseliş yönündeki geliş açısının artmasıyla kötüleşmektedir; yatay polarizasyonda ise düşüş yönünde değişim göstermektedir.

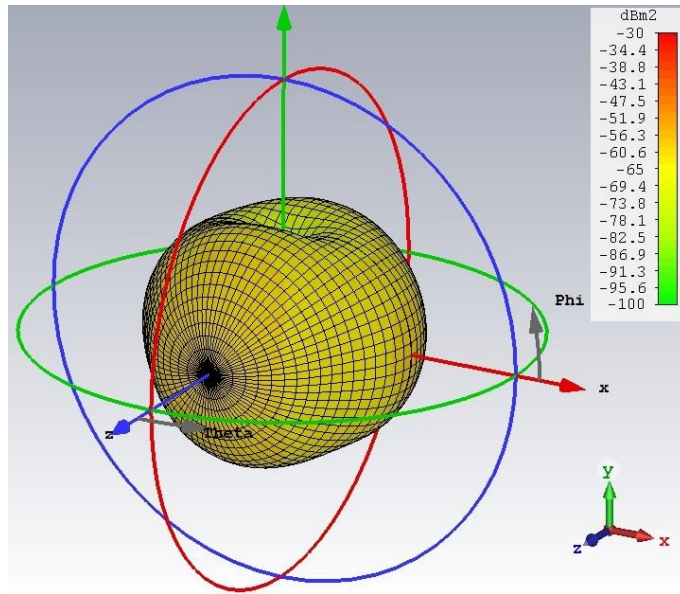
Yanca ve yükseliş yönünde geliş açısının artmasıyla soğurucu frekans seçici yüzeyin iletim bandı kaybı değişmemektedir. Geliş açısının yanca ve yükseliş yönünde artmasıyla,

geniş bant incelendiğinde, iletim bandının daraldığı görülmektedir; ancak 1-dB iletim bant genişliğinin dik geliş açısındaki analize yakın olduğu ortaya çıkmaktadır.

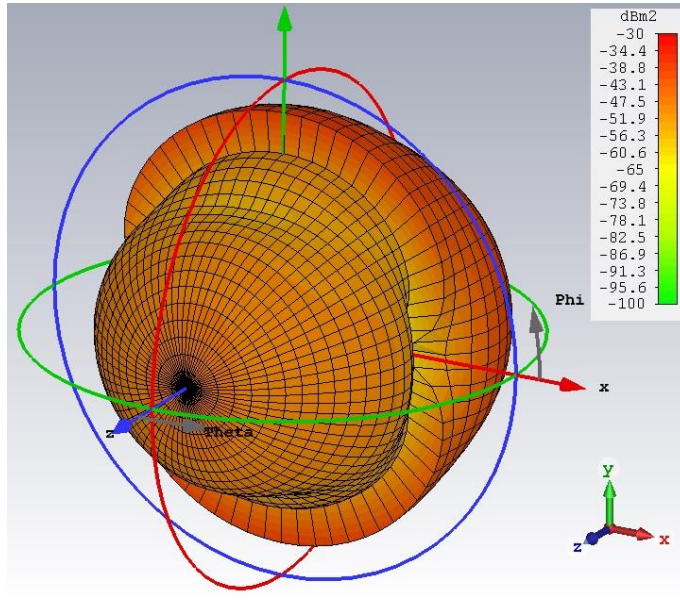
Tasarlanan soğurucu frekans seçici yüzeyin RKA performansını incelemek için gerçekleştirilen EM analiz sonucunda; soğurma bandı, iletim bandı ve yansıma bandında 6 GHz, 11 GHz ve 15 GHz frekansları için elde edilen RKA sonuçları Şekil 4.58, 4.59, 4.60, 4.61, 4.62, 4.63'te gösterilmektedir.



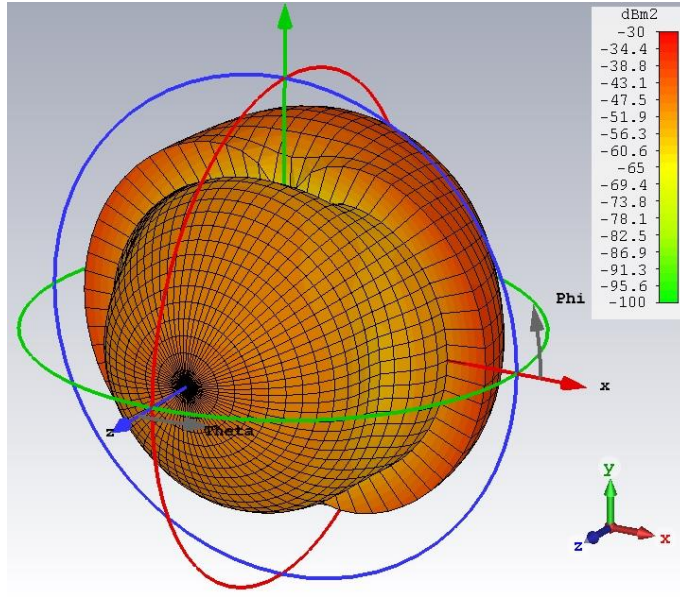
Şekil 4.58 Dikey polarizasyon durumunda 6 GHz'deki RKA analiz sonucu



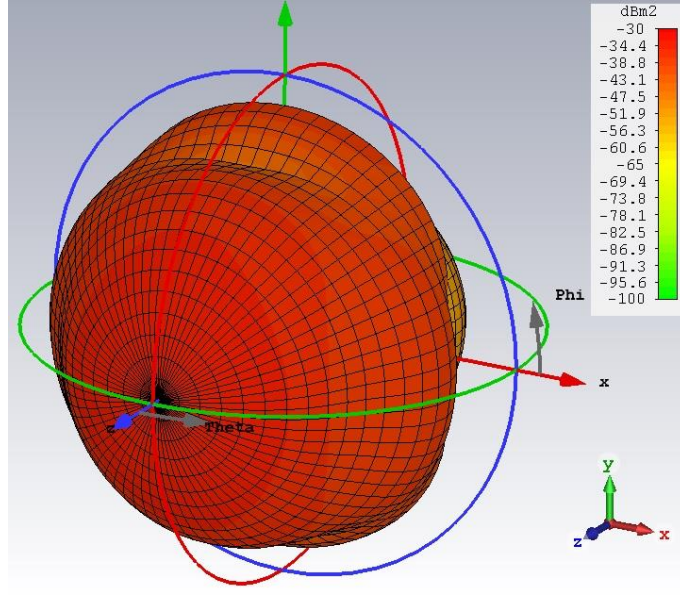
Şekil 4.59 Yatay polarizasyon durumunda 6 GHz'deki RKA analiz sonucu



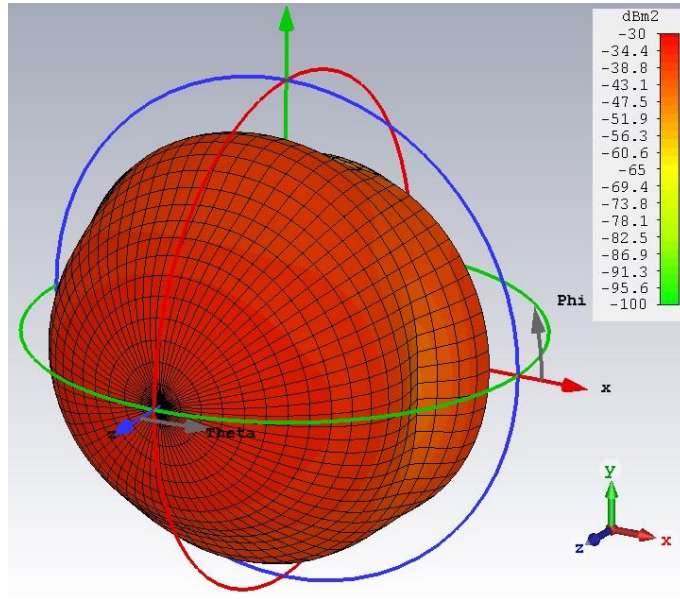
Şekil 4.60 Dikey polarizasyon durumunda 11 GHz'deki RKA analiz sonucu



Şekil 4.61 Yatay polarizasyon durumunda 11 GHz'deki RKA analiz sonucu



Şekil 4.62 Dikey polarizasyon durumunda 15 GHz'deki RKA analiz sonucu



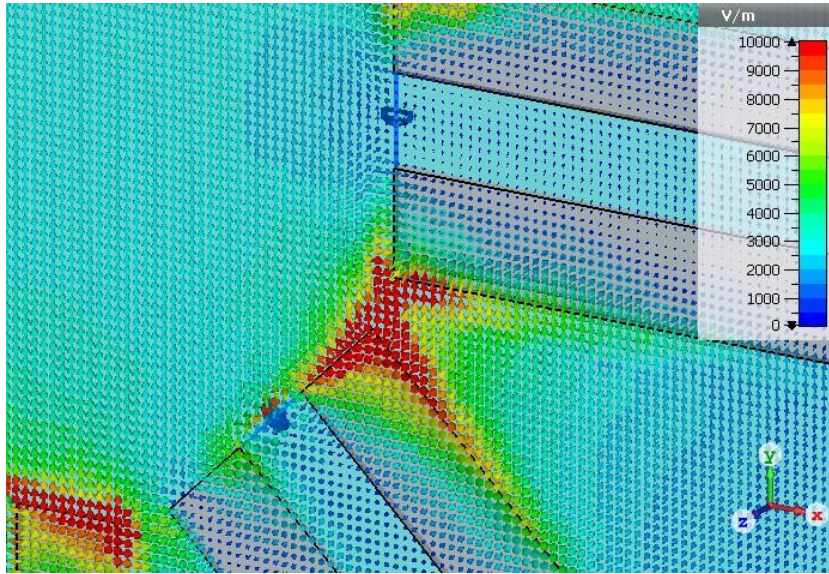
Şekil 4.63 Yatay polarizasyon durumunda 15 GHz'deki RKA analiz sonucu

Analiz sonuçları incelendiğinde en yüksek RKA değerlerinin yansımada oluştuğu, iletim bandındaki RKA değerlerin yansımada bandından düşük olduğu görülmektedir. Beklendiği üzere en düşük RKA değerleri soğurma bandında oluşmaktadır; yansımada bandı değerleriyle kıyaslandığında, konvansiyonel frekans seçici yüzey yapısında -30 dBm2 seviyelerinde görülebilecek geniş açı aralığındaki RKA değerinin yaklaşık -70 dBm2 seviyelerine düştüğü görülmektedir.

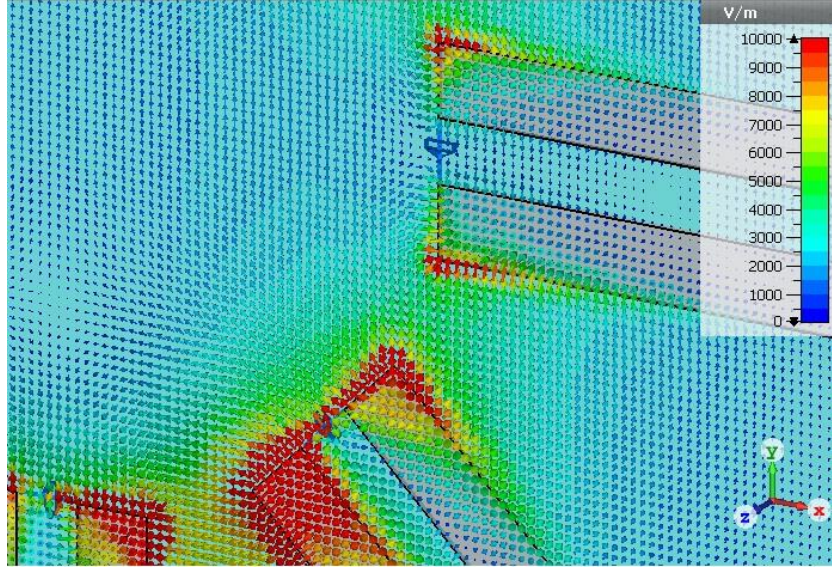
#### 4.2 GA Tasarımı Boyut Maliyet Fonksiyonları Aralıklarının Belirlenmesi Amacıyla Gerçekleştirilen EM Analiz

GA'da tanımlanan boyut maliyet fonksiyonları gerçekleştirilebilir geometri sentezleme gereksinimleriyle birlikte, sentezlenen rezonatör yapısında parazitik bağlaşımların kuvvetli seviyede oluşmasını önlemek amacıyla da tanımlanmaktadır. Boyut maliyet fonksiyonları eşitliklerinde boyut değerleri aralığının belirlenmesi için; birinci, üçüncü ve dördüncü maliyet fonksiyonlarında tanımlanan  $d_x$ ,  $g$ , ve  $u$  boyut değerlerinin değişiminin soğurucu yüzeyde oluşan elektrik alan dağılımına etkisi sabit kaynak gücü değeriyle, farklı durumlar için gerçekleştirilen EM analizler sonucunda kıyaslamalı olarak gözlemlenmiştir.

Birinci maliyet fonksiyonunda tanımlanan  $d_x$ 'in değeri 0.2 mm ve 0.6 mm iken; ve diğer eleman değerleri Çizelge 3.2'de gösterilen Koşurma 4 sentez değerlerinde iken gerçekleştirilen EM analiz sonucu soğurucu yüzey elektrik alan dağılımları Şekil 4.64 ve 4.65'te gösterilmektedir.



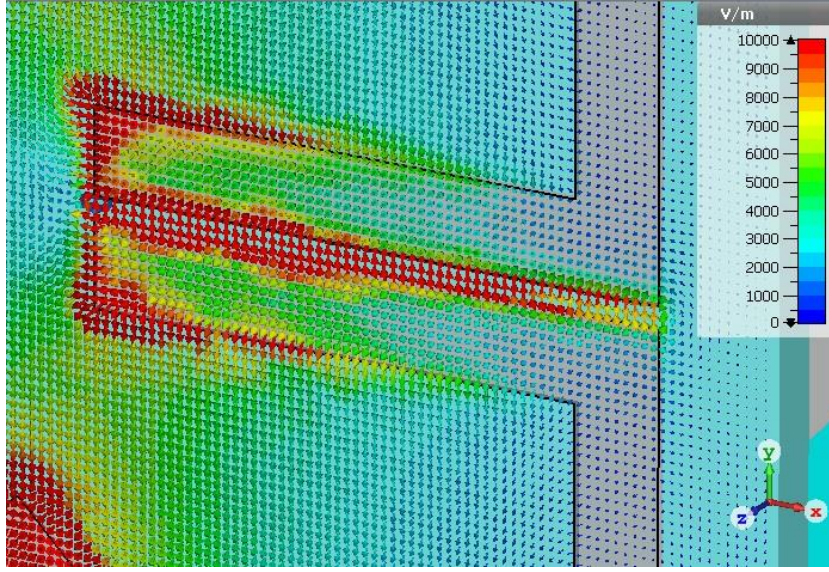
Şekil 4.64  $d_x$  değeri 0.2 mm iken soğurucu yüzeyde oluşan elektrik alan dağılımı



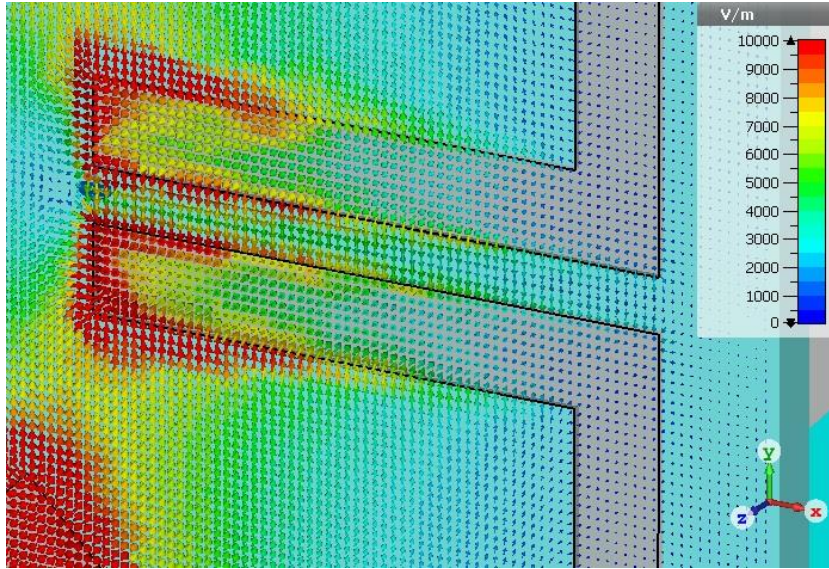
Şekil 4.65  $d_x$  değeri 0.6 mm iken soğurucu yüzeyde oluşan elektrik alan dağılımı

İki farklı  $d_x$  değeri için gerçekleştirilen EM analizde  $d_x$  değeri 0.2 mm iken ardışık paralel mikroşeritlerin köşeleri arasında oluşan elektrik alan vektörlerinin kuvveti 10000 V/m üzerinde değerlere ulaşmaktadır.  $d_x$  değeri 0.6 mm'ye çıkarıldığında elektrik alan kuvveti 5000 V/m seviyelerine inmektedir. Analiz sonucu elde edilen değerler, gerçekleştirilebilir ve üretilebilir geometri elde etme ihtiyacıyla birlikte değerlendirilerek birinci maliyet fonksiyonunda tanımlanan  $d_x$ 'in değer aralığı belirlenmektedir (Eşitlik 3.18).

Üçüncü maliyet fonksiyonunda tanımlanan  $g$  aralığının değeri 0.1 mm ve 0.25 mm iken, ve diğer eleman değerleri Çizelge 3.2'de gösterilen Koşurma 4 sentez değerlerinde iken gerçekleştirilen EM analiz sonucu soğurucu yüzey elektrik alan dağılımları Şekil 4.66 ve 4.67'de gösterilmektedir.



Şekil 4.66  $g$  değeri 0.1 mm iken soğurucu yüzeyde oluşan elektrik alan dağılımı

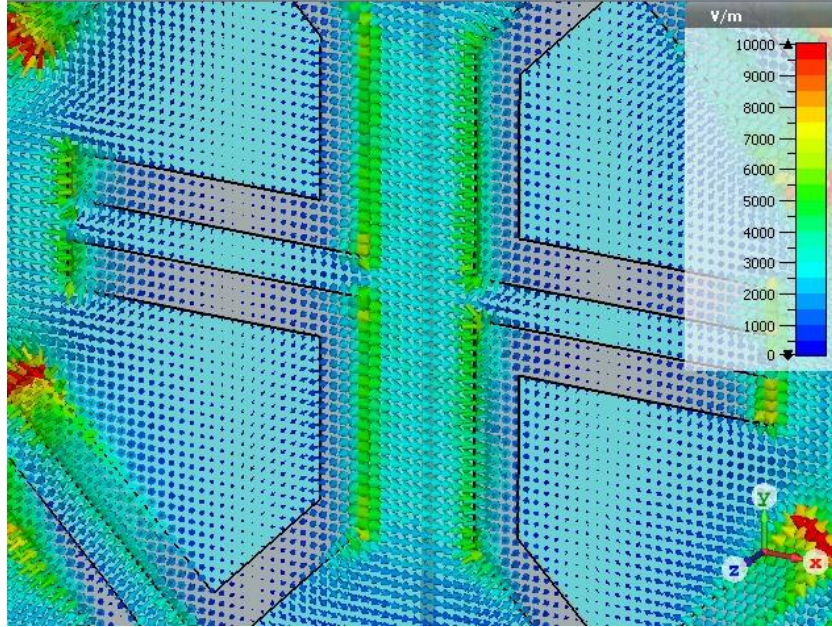


Şekil 4.67  $g$  değeri 0.25 mm iken soğurucu yüzeyde oluşan elektrik alan dağılımı

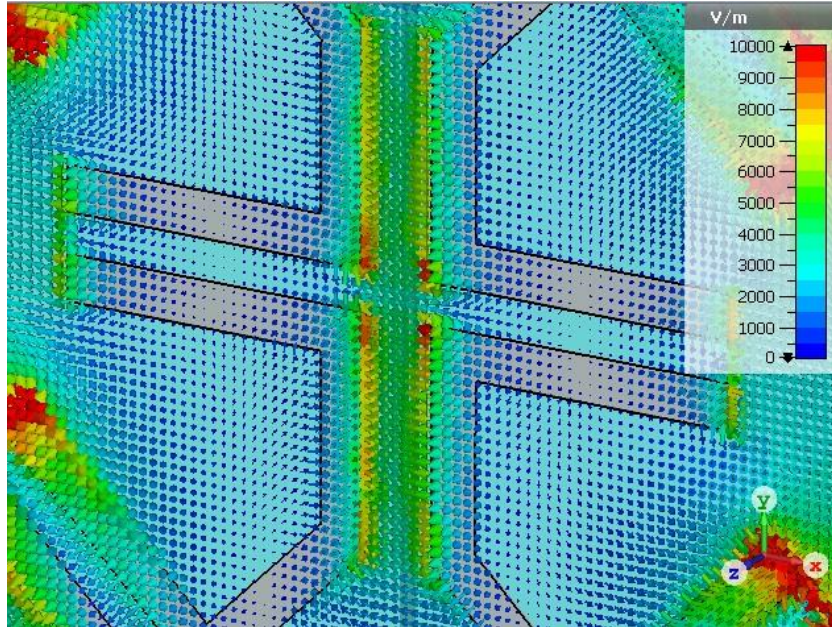
Paralel mikroşeritler arası açıklık değeri  $g$  0.1 mm iken gerçekleştirilen EM analiz sonucunda paralel mikroşeritler arasında oluşan elektrik alan kuvveti 10000 V/m seviyesinin üzerine çıkmaktadır;  $g$  değeri 0.25 mm iken elektrik alan kuvveti 5000-6000 V/m'den seviyesindedir. Gerçekleştirilen EM analiz ile birlikte paralel mikroşeritler arası açıklığı üretilebilir olma durumu değerlendirilerek üçüncü maliyet fonksiyonunda tanımlanan  $g$ 'in değer aralığı belirlenmektedir (Eşitlik 3.21).



Dördüncü maliyet fonksiyonunda tanımlanan rezonatör boyutu  $u$ 'nun değeri 10.2 mm ve 10.6 mm iken; ve diğer eleman değerleri Çizelge 3.2'de gösterilen Koşturma 4 sentez değerlerinde iken gerçekleştirilen EM analiz sonucu soğurucu yüzey elektrik alan dağılımları Şekil 4.68 ve 4.69'da gösterilmektedir.



Şekil 4.68  $u$  değeri 10.2 mm iken soğurucu yüzeyde oluşan elektrik alan dağılımı



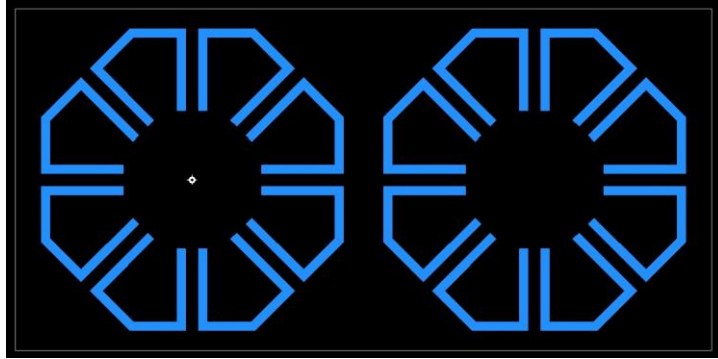
Şekil 4.69  $u$  değeri 10.6 mm iken soğurucu yüzeyde oluşan elektrik alan dağılımı

Rezonatör boyutu  $u$  değeri 10.2 mm iken gerçekleştirilen EM analiz sonucunda ardışık rezonatörlerin en yakın mikroşerit hatları arasında oluşan elektrik alan kuvveti 3000 V/m seviyesindedir;  $u$  değeri 10.6 mm iken elektrik alan kuvveti 5000-6000 V/m seviyesine ulaşmaktadır. Gerçekleştirilen EM analiz ile birlikte, dalga kılavuzu içerisinde ölçüme uygun boyut gereksinimi hesaplanarak dördüncü maliyet fonksiyonunda tanımlanan  $u$  değerinin aralığı belirlenmektedir (Eşitlik 3.23).

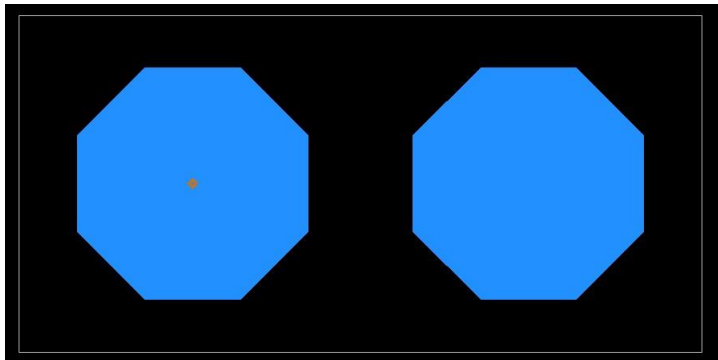
## 5. ÜRETİM VE ÖLÇÜM

Tasarlanan soğurucu frekans seçici yüzeyin frekans tepkisini ölçmek için dalga kılavuzu içinde ölçüm yöntemi kullanılmıştır. Literatürde bu yöntemle birlikte paralel plaka dalga kılavuzu içinde ölçüm [51] ve karşılıklı antenler arasına soğurucu frekans seçici yüzey konumlandırarak frekans tepkisi ölçme yöntemleri bulunmaktadır [52].

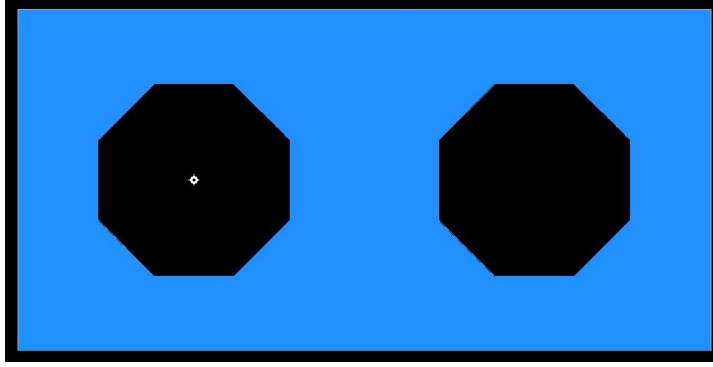
Dalga kılavuzu içinde ölçüm gerçekleştirmek için X bantta çalışan WR-90 dalga kılavuzu kullanılmıştır [53]. WR-90 dalga kılavuzu olarak Flann firmasının 16441 parça numaralı dalga kılavuzu kullanılmıştır [54]. Dalga kılavuzu içinde ölçüm gerçekleştirmek için soğurucu frekans seçici yüzeyin 1x2 birimlik yüzeyler olarak üretim dosyaları hazırlanmış ve soğurucu yüzey ile bant geçiren yüzey üretimi gerçekleştirilmiştir. Soğurucu yüzey ve bant geçiren yüzey üretimi LPKF firmasının lazer kazıma makinesi ile gerçekleştirilmiştir. Üretim için gerekli üretim dosyalarının çizimi Pads baskı devre kart çizim programıyla gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.1, Şekil 5.2, Şekil 5.3).



Şekil 5.1 Soğurucu yüzeyin baskı devre kartı çizim programındaki 1x2 birimlik çizimi

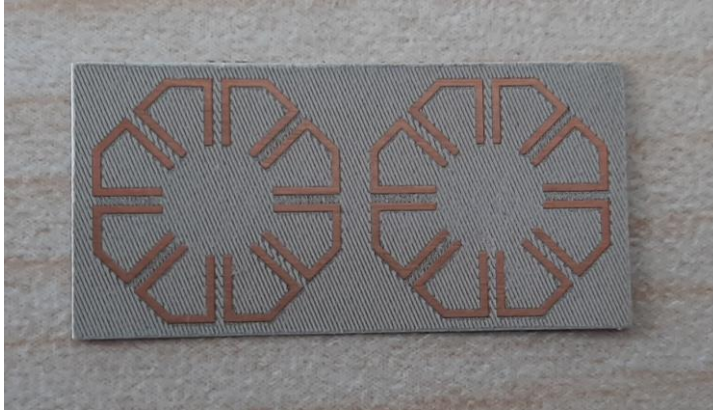


Şekil 5.2 Bant geçiren yüzey yama rezonatörün 1x2 birimlik baskı devre kart çizimi



Şekil 5.3 Bant geçiren yüzey yarık rezonatörün 1x2 birimlik baskı devre kart çizim programı çizimi

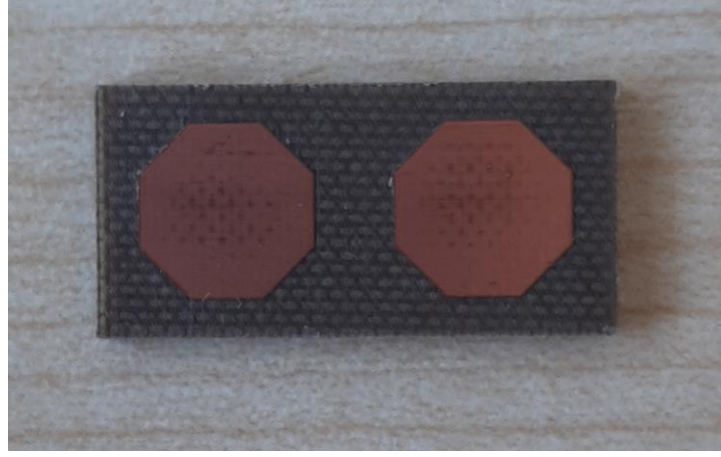
Soğurucu yüzey üretimi 0.25 mm kalınlıktaki iki yüzü metal kaplı (Rogers RO3010) taban malzemenin tek yüzündeki metalin asitle çözülmesi ve metal kaplı diğer yüzün lazer kazıma ile kazınarak mikroşerit rezonatörün oluşturulması ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.4). Üretim sonrasında mikroşerit rezonatörlere Pasanonic firmasının 201 paket ERJ1GNF1400C dirençlerinin lehimlenmesiyle 1x2 birimlik soğurucu yüzey üretimi tamamlanmıştır.



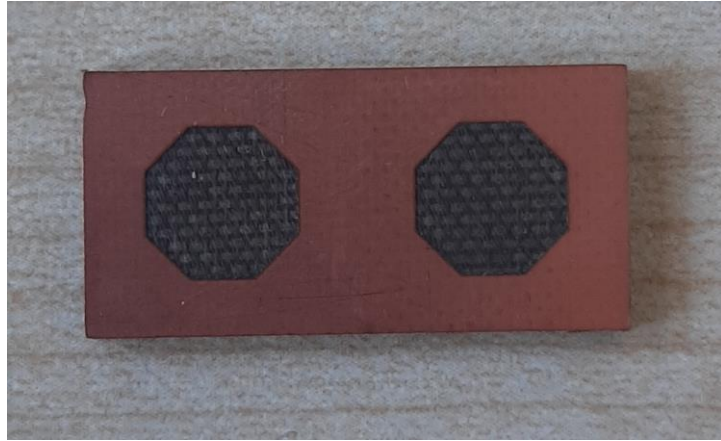
Şekil 5.4 Üretilen 1x2 birimlik soğurucu yüzey

Bant geçiren yüzey üç metal yüzey arasında iki dielektrik katman içeren üç katlı rezonatör yapısından oluşmaktadır. Bant geçiren yüzeyi oluşturan yüzeylerin üretimi iki yüzü metal kaplı ve tek yüzü metal kaplı 1.5 mm kalınlıkta Arlon (Rogers) Diclاد880 taban malzemeleri ile gerçekleştirilmiştir. İki yüzü metal kaplı taban malzemenin metal yüzeyleri lazer kazıma makinesi ile kazınarak bir metal yüzünde tasarlanan sekizgen yama şekli, diğer metal yüzünde tasarlanan sekizgen yarık şekli oluşturularak üretilmiştir.

Bununla birlikte, tek yüzü metal kaplı taban malzeme lazer kazıma makinesi ile kazınarak metal yüzünde tasarlanan sekizgen yama şekli oluşturularak üretilmiştir (Şekil 5.5, Şekil 5.6).

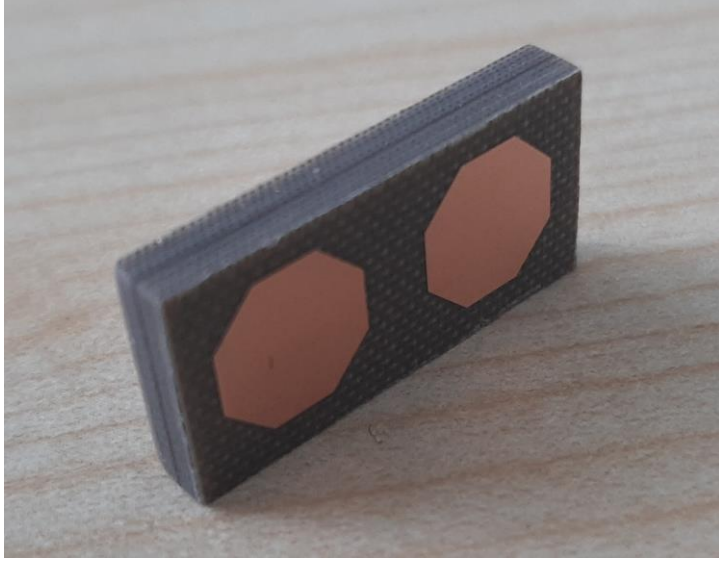


Şekil 5.5 Üretilen 1x2 birimlik bant geçiren yüzey sekizgen yama yüzeyi



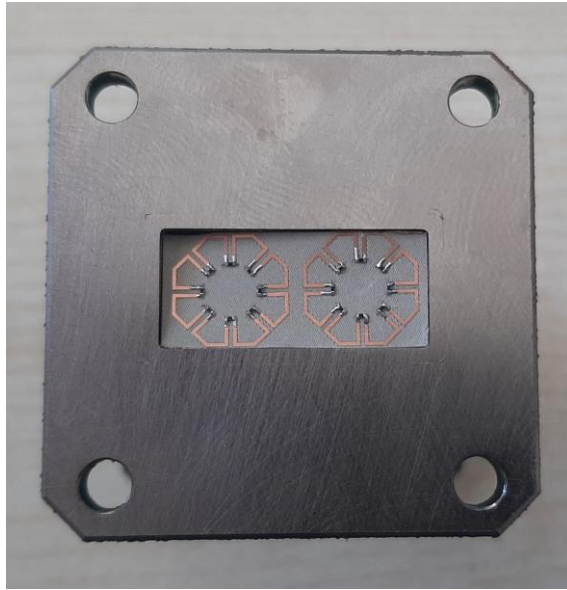
Şekil 5.6 Üretilen 1x2 birimlik bant geçiren yüzey sekizgen yarık yüzeyi

Üretilen iki taban malzeme birleştirilerek üç katlı (üç metal yüzey arası iki dielektrik yüzey bulunan) 1x2 birimlik bant geçiren yüzey elde edilmiştir (Şekil 5.7).

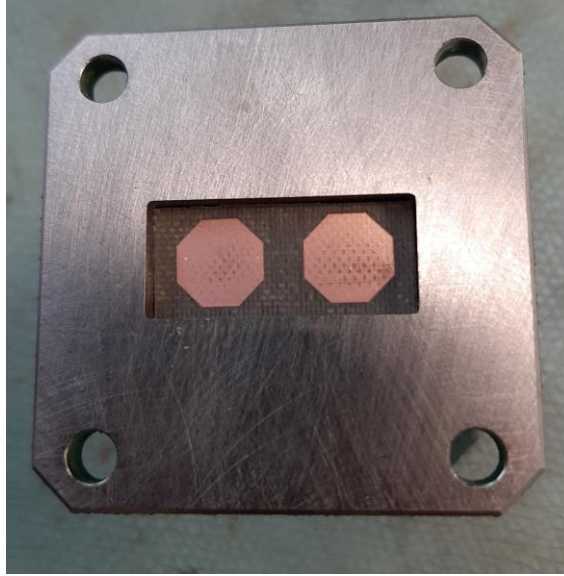


Şekil 5.7 Üretilen 1x2 birimlik bant geçiren yüzey

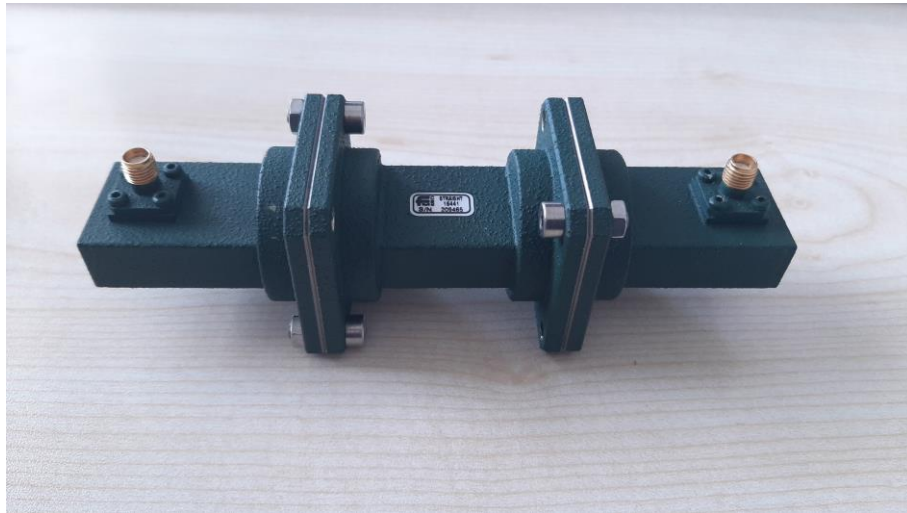
Üretilen soğurucu yüzey ve bant geçiren yüzeyin aralarındaki hava boşluğu katmanı ölçülerek WR-90 dalga kılavuzu içinde konumlandırılmasıyla üretilen soğurucu frekans seçici yüzeyin ölçümü gerçekleştirilmiştir. Dalga kılavuzu içine konumlandırılan soğurucu yüzey ve bant geçiren yüzey Şekil 5.8 ve Şekil 5.9’da gösterilmektedir. İçerisine üretilen 1x2 birimlik soğurucu frekans seçici yüzey konumlandırılan WR-90 dalga kılavuzu ve dalga kılavuzunun iki yanına takılan WR-90 dalga kılavuzundan SMA’ya geçiş adaptörleri Şekil 5.10’da gösterilmektedir.



Şekil 5.8 WR-90 dalga kılavuzu içine yerleştirilen soğurucu yüzey

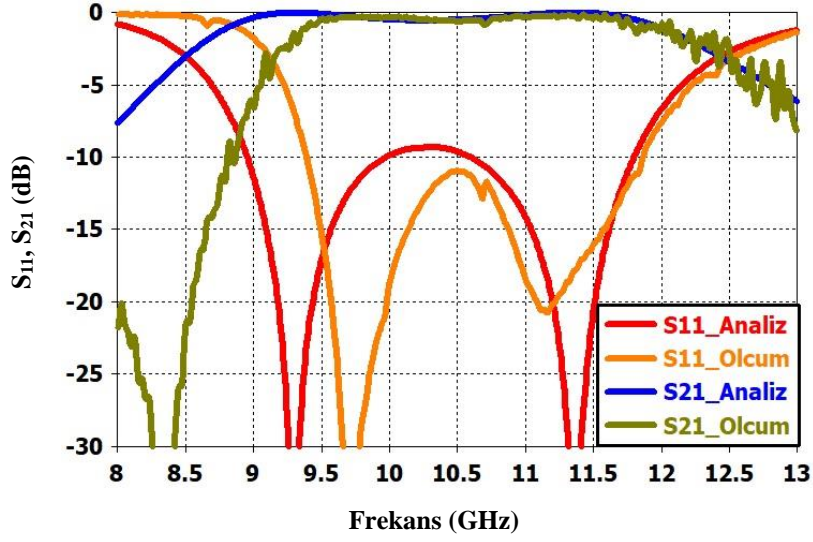


Şekil 5.9 WR-90 dalga kılavuzu içine yerleştirilen bant geçiren yüzey

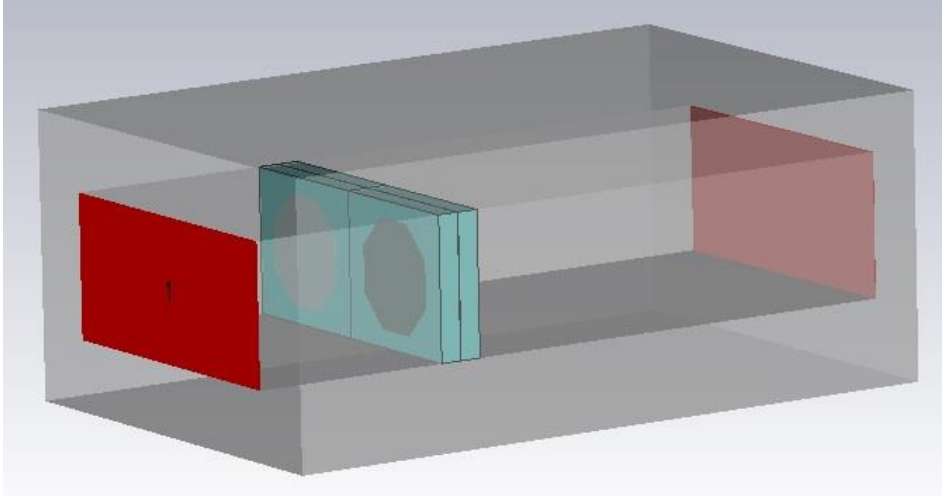


Şekil 5.10 Üretilen soğurucu frekans seçici yüzey içerisine eklenerek ölçüm gerçekleştirilen WR-90 dalga kılavuzu ve WR-90'dan SMA'ya geçiş adaptörleri

Ölçüm için kullanılan WR-90 dalga kılavuzunun çalışma aralığı 8.2-12.5 GHz'dir. Üretilen 1x2 birimlik bant geçiren yüzeyin, önünde soğurucu yüzey olmadan, WR-90 dalga kılavuzunun içerisine yerleştirilerek network analizör ile ölçümü gerçekleştirilmiştir. Bununla birlikte, frekans tepkisi performansını karşılaştırmak amacıyla 1x2 birimlik bant geçiren yüzey WR-90 dalga kılavuzu içerisinde modellenerek EM analiz gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.12). Ölçüm ve analiz sonuçları Şekil 5.11'de gösterilmektedir.



Şekil 5.11 Bant geçiren yüzey ölçüm sonucu ve WR-90 dalga kılavuzu içerisindeki EM analiz sonucu frekans tepkisi



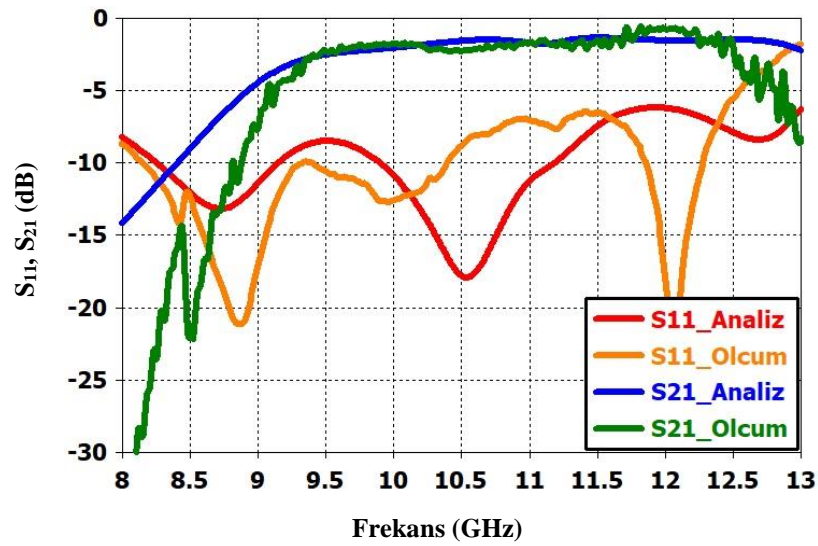
Şekil 5.12 EM simülasyon programı WR-90 dalga kılavuzu içerisinde 1x2 birimlik bant geçiren yüzey modeli

Dalga kılavuzu içerisinde gerçekleştirilen ölçümün sonucunda; bant geçiren yüzeyin 1-dB iletim bandı 2.4 GHz genişliğindedir (Şekil 5.11), bu değer dalga kılavuzu içerisindeki EM analiz sonucunda 3.17 GHz'dir (Şekil 5.11), geniş bantlı analizde 3.16 GHz'dir (Şekil 3.40). Ölçüm sonucu 1-dB kesim noktaları 9.39 GHz ve 11.79 GHz'dir. Ölçüm sonucunda 3-dB iletim bandı 3.29 GHz genişliğindedir; bu değer dalga kılavuzu içerisindeki EM analiz sonucunda 3.93 GHz'dir, geniş bantlı analizde 4.32 GHz'dir (Şekil 3.40). Ölçüm sonucu 3-dB kesim noktaları 9.15 GHz ve 12.44 GHz'dir. Ölçüm ve analiz sonucu karşılaştırmasında iletim bandının ölçüm sonucunun düşük frekans tarafında

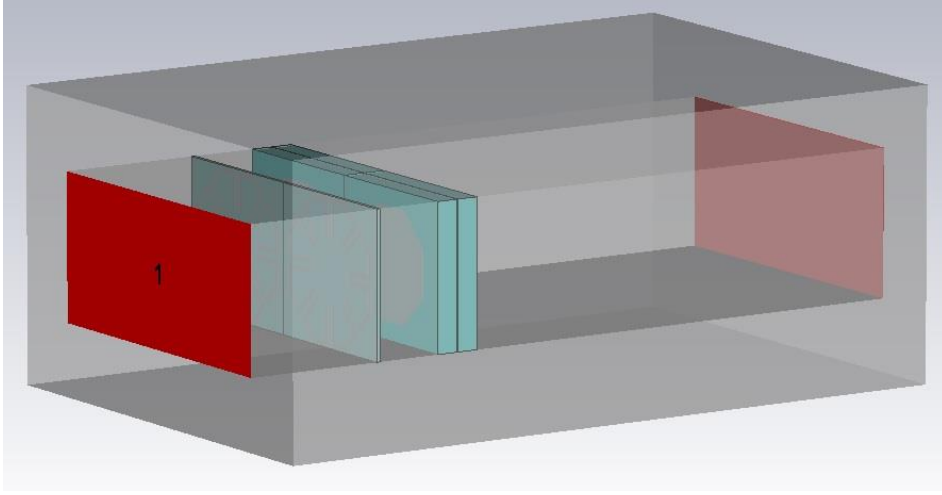


analiz sonucuna kıyasla daraldığı görülmektedir; yüksek frekans tarafında analiz ve ölçüm sonuçları birbirine yakındır.

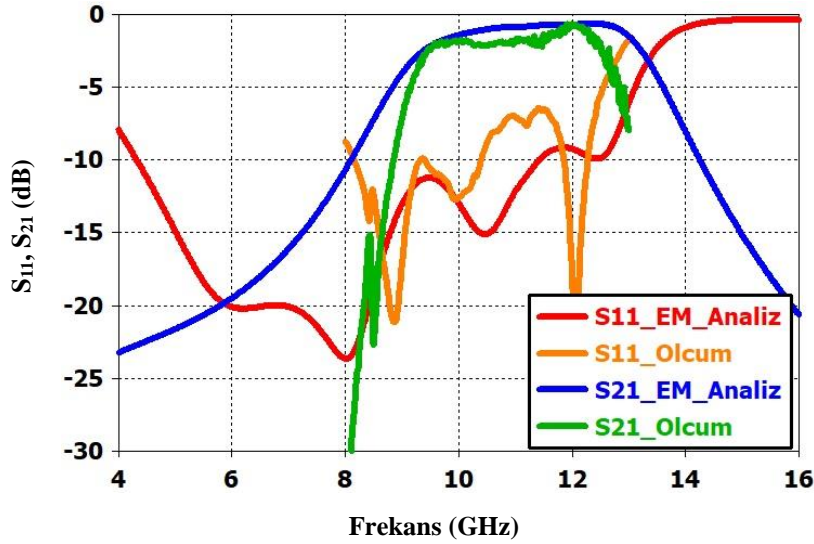
Üretilen soğurucu frekans seçici yüzeyin ölçümü WR-90 dalga kılavuzu içerisine yerleştirilerek network analizör ile gerçekleştirilmiştir. Karşılaştırma yapmak amacıyla 1x2 birimlik soğurucu frekans seçici yüzey WR-90 dalga kılavuzu içerisinde modellenerek EM analiz gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.14). 1x2 birimlik soğurucu frekans seçici yüzeyin ölçüm sonucu frekans tepkisi, WR-90 dalga kılavuzu içerisinde modellenen EM analiz frekans tepkisiyle birlikte Şekil 5.13'te gösterilmektedir. Aynı zamanda, soğurucu frekans seçici yüzeyin dalga kılavuzu içerisindeki ölçüm sonucunun geniş bantlı EM analiz sonucu (Şekil 4.3) ile karşılaştırması Şekil 5.15'te gösterilmektedir.



Şekil 5.13 Soğurucu frekans seçici yüzey ölçüm sonucu ve WR-90 dalga kılavuzu içerisindeki EM analiz sonucu frekans tepkisi



Şekil 5.14 EM simülasyon programı WR-90 dalga kılavuzu içerisinde 1x2 birimlik soğurucu frekans seçici yüzey modeli



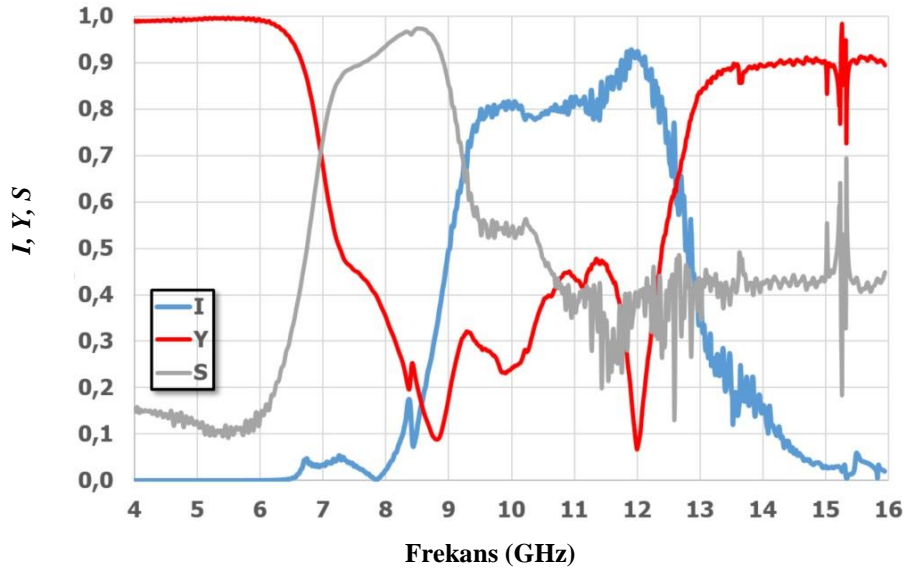
Şekil 5.15 Geniş bantlı EM analiz ve ölçüm sonuçları karşılaştırması

Gerçekleştirilen ölçüm sonucunda; soğurucu frekans seçici yüzeyin en düşük kayıplı iletim frekansı -0.65 dB kayıpla 11.96 GHz'dir. Ölçüm sonucunda, 1-dB iletim bandı 3.17 GHz genişliğindedir; 1-dB kesim noktaları 9.38 GHz ve 12.55 GHz'dir (Şekil 5.13). 1-dB bant genişliği 11 GHz merkez frekansa oranla % 29'dur. 1-dB bant genişliği dalga kılavuzu içerisindeki analizde 3.41 GHz (Şekil 5.13), geniş bantlı analizde 3.47 GHz'dir (Şekil 5.15). Ölçüm sonucunda, 3-dB iletim bandı 3.74 GHz genişliğindedir; 3-dB kesim noktaları 9.14 GHz ve 12.88 GHz'dir. 3-dB bant genişliği 11 GHz merkez frekansa oranla % 34'tür. 3-dB bant genişliği dalga kılavuzu içerisindeki analizde 4.32 GHz (Şekil 5.13), geniş bantlı analizde 4.43 GHz'dir (Şekil 5.15).

Dalga kılavuzu içinde ölçüm sonuçları ile soğurucu frekans seçici yüzeyin lineer skaladaki iletim katsayısı ( $I$ ), yansımaya katsayısı ( $Y$ ) değerleri elde edilmektedir. Ölçüm sonucu elde edilen  $I$  ve  $Y$  değeriyle soğurma katsayısı ( $S$ ) şu şekilde hesaplanmaktadır (Eşitlik 5.1).

$$S = \sqrt{1 - I^2 - Y^2} \quad (5.1)$$

Ölçüm sonucu elde edilen iletim katsayısı ( $I$ ), yansımaya katsayısı ( $Y$ ) ve bu değerler üzerinden hesaplanan soğurma katsayısının ( $S$ ) geniş bantlı çizimi Şekil 5.16'da gösterilmektedir.



Şekil 5.16 Soğurucu frekans seçici yüzeyin ölçüm sonucu iletim katsayısı, yansımaya katsayısı ve soğurma katsayısı tepkisi

Soğurucu frekans seçici yüzeyin EM analiz ve dalga kılavuzu içindeki ölçüm sonuçlarının, literatürde gerçekleştirilen araştırma sonucunda tespit edilebilen, en geniş iletim bantlı soğurucu frekans seçici yüzeyler ile karşılaştırması Çizelge 5.1'de sunulmaktadır. Literatürdeki çalışmalardan simülasyon değeri bulunanların simülasyon sonuçları, ölçüm değeri bulunanların ölçüm sonuçları Çizelge 5.1'de gösterilmektedir.

Çizelge 5.1 Ölçüm ve simülasyon sonuçlarının literatürdeki çalışmaların performansıyla karşılaştırması

Çalışma	Simülasyon / Ölçüm Sonucu	Merkez Frekans (GHz)	1-dB İletim Bandı (GHz)	İletim Bandı (%)	Soğurma Bandı (%)	Kayıp (dB)	Boyut ( $\lambda_L$ )
[23]	Ölçüm	9.8	8.3-11.05: 2.75	28	83	-	0.15
[24]	Simülasyon	9.6	8.1-11.0: 2.9	30	40+10	0.08	0.18
[25]	Ölçüm/ Simülasyon	10.8	9.0-12.6: 3.6	33	66	< 1	0.18
[26]	Simülasyon	4.2	3.65-4.70: 1.05	25	59	-	0.16
[27]	Simülasyon	7.3	6.4-8.0: 1.6	22	18+15	-	0.28
[28]	Simülasyon	10.0	7.8-11.8: 4.0	40	46+6	0.19	0.11
[29]	Simülasyon	9.8	7.7-11.8: 4.1	42	22+7	-	0.20
[30]	Simülasyon	9.5	7.0-12.2: 5.2	54	17	0.13	0.15
Bu çalışma	Ölçüm	11.0	9.38-12.55: 3.17	29	-	0.65	0.16
	Simülasyon		9.63-13.1: 3.47	32	61	0.66	

Bu çizelgede (Çizelge 5.1) tasarlanan soğurucu frekans seçici yüzeyin merkez iletim frekansı, iletim bant genişliği, soğurma bant genişliği, bant içindeki en düşük iletim kaybı değeri ve boyut değeri literatürdeki çalışmalarla karşılaştırılmaktadır. İletim bandı kıyaslamasında merkez frekansa referanslı 1-dB iletim bandı karşılaştırılmaktadır.

Soğurma bandı kıyaslaması için 0.9 soğurma katsayısı referans alınmaktadır. Kayıp değeri karşılaştırmasında iletim bandı içindeki en düşük iletim kaybı referans alınmaktadır. Boyut karşılaştırması için, birim eleman periyot boyutlarının ( $p$ ) soğurma bandının en düşük frekans değeri ile hesaplanan dalga boyuna ( $\lambda_L$ ) oranı kullanılmaktadır. Karşılaştırma değerlerinin aynı referanslarda sunulmadığı literatür çalışmalarının değerleri, ilgili çalışmadaki grafikler üzerinden hesaplanmaktadır. Karşılaştırılan çalışmalar arasında, tasarlanan soğurucu frekans seçici yüzey [25] numaralı çalışma ile birlikte en yüksek merkez iletim frekansı değerine sahiptir. Oransal 1-dB bant genişliği karşılaştırmasında literatürdeki en geniş bantlı çalışmalar arasındadır. İletim bandı bu çalışmadan geniş olan dört çalışma bulunmaktadır, bu çalışmalar [25], [28], [29] ve [30] numaralı çalışmalardır. Bununla birlikte soğurma bandı kıyaslamasında, tasarlanan soğurucu frekans seçici yüzey[28], [29] ve [30] numaralı çalışmalardan daha geniş soğurma bandına sahiptir. İncelenen çalışmalarda, oransal iletim bandı ve soğurma bandı bu çalışmadan geniş olan tek çalışma [25] numaralı çalışmadır. Bununla birlikte [25] numaralı çalışma, tasarlanan soğurucu frekans seçici yüzeye kıyasla daha büyük boyutta olma dezavantajına sahiptir. Literatürdeki çalışmalar arasında [28] numaralı çalışma en küçük boyuta sahiptir; bununla beraber [28] numaralı çalışmada çift katlı soğurucu yüzey bulunmaktadır ve iki yüzey arasında via geçişleri mevcuttur. Bu sebeple karşılaştırmada yer alan diğer çalışmalara kıyasla daha karmaşık üretim yapısına sahiptir. Tasarlanan soğurucu frekans seçici yüzeyin literatürdeki çalışmalara kıyasla dezavantajı iletim kaybının diğer çalışmalardan görece yüksek olmasıdır. Geniş iletim bandı ve soğurma bandı için önerilen sekizgen rezonatör yapısında bulunan sekiz adet direnç bu dezavantaja sebep olmaktadır.

Sonuç olarak literatürdeki çalışmalarla kıyaslandığında, tasarlanan soğurucu frekans seçici yüzey en düşük boyuta sahip yapılar arasında olup en geniş soğurma bandı ve en geniş iletim bandını sağlayan yapılar arasındadır. Bunlara ek olarak merkez iletim frekansı en yüksek yapılar arasındadır.

## 6. SONUÇ VE TARTIŞMA

Tez çalışması kapsamında X-bantta geniş iletim bandı olan, soğurma bandı S-bant spektrumuna ulaşan, frekans tepkisi polarizasyon açısından etkilenmeyen soğurucu frekans seçici yüzey tasarımı gerçekleştirilmiştir.

Tasarım aşamasında geniş iletim bandı özelliğini sağlayabilecek soğurucu yüzey ve bant geçiren yüzey tasarımları gerçekleştirilmiştir. Geniş iletim bandı, geniş soğurma bandı, düşük iletim kaybı ve polarizasyon açısından etkilenmeyen çalışma özelliklerine uygun yüzey birim eleman rezonatörleri önerilmiştir. Bu performans kriterlerini sağlayan, merkeze uzanan paralel mikroşeritler barındıran, özgün sekizgen şekle sahip soğurucu yüzey birim eleman rezonatörü yapısı analizler ve alternatif olabilecek yapıların kıyaslanması ile oluşturulmuştur. Yüzey birim eleman rezonatörlerinin sentezi aşamasında oluşturulan eşdeğer devre modellerinin analizi ve yüzeylerin elektromanyetik analiz tepkilerinin karşılaştırması sonucunda eşdeğer devre modellerinin gerçekçi modeller olduğu değerlendirilmektedir.

Tasarımı gerçekleştirilen soğurucu frekans seçici yüzeyin frekans tepkisi farklı geliş açıları için EM analiz ile analiz edilmiş ve geliş açısı değişiminin frekans tepkisine etkisi gözlemlenmiştir. Ayrıca soğurucu frekans seçici yüzeyin soğurucu yüzey ve bant geçiren yüzeylerinde oluşan elektrik alan dağılımı ve yüzey akım dağılımları soğurma bandı, iletim bandı ve yansıtma bandı frekansları için dikey ve yatay polarizasyonda incelenmiş ve yüzeylerin tepkisi analiz edilmiştir. Ayrıca ilgili bantlarda dikey ve yatay polarizasyonda çalışma durumlarında RKA değeri EM analiz ile incelenmiştir; soğurma bandındaki RKA değerinin yansıtma bandındaki değere kıyasla, yanca ve yükseliş ekseninde, geniş açıda, önemli ölçüde düşük olduğu görülmüştür.

Tasarlanan soğurucu frekans seçici yüzey, WR-90 dalga kılavuzu ile ölçümü gerçekleştirilmek üzere, 1x2 birimlik yüzeyler olarak kart çizim programlarıyla çizilerek üretilmiştir. Üretilen soğurucu frekans seçici yüzey WR-90 dalga kılavuzu içine konumlandırılarak network analizör ile dik geliş açısı için frekans tepkisi ölçülmüştür. Ölçüm sonucu olarak düşük kayıplı geniş iletim bandına sahip frekans tepkisi elde edilmiştir. Ölçüm sonucu literatürdeki yayınlarda bulunan çalışmalarla karşılaştırılmıştır;

karşılaştırma sonucunda tasarlanan soğurucu frekans seçici yüzeyin literatürdeki en geniş iletim ve soğurma bandına sahip tasarımlar arasında yer aldığı görülmektedir. Tasarlanan soğurucu frekans seçici yüzey literatürdeki geniş bantlı tasarımlara kıyasla daha yüksek merkez iletim frekansı değerine sahiptir. Aynı zamanda, soğurucu frekans seçici yüzey kıyaslanan geniş bantlı yapılar arasında küçük birim eleman boyutuna sahip tasarımlar arasındadır.

Bu tez çalışması kapsamında, soğurucu yüzey sentezi aşamasında, literatürdeki çalışmalardan farklı bir metot uygulanmıştır. Soğurucu yüzey birim eleman rezonatörünün sentezi bu amaçla tasarlanan genetik algoritma kodu ile gerçekleştirilmiştir. Sentezlenen yüzeyin frekans tepkisi performans hedefleri ve gerçekleştirilebilir boyut gereksinimleri genetik algoritma kodunun maliyet fonksiyonları kısmında tanımlanmıştır. Tasarlanan genetik algoritma kodu ile performans kriterlerini sağlayan, gerçekleştirilebilir geometriye sahip soğurucu yüzey sentezleri başarılı şekilde gerçekleştirilmiştir.

Genetik algoritma kodunun tasarımı aşamasında alternatif algoritma tasarımlarının sentez performansına etkisi test edilmiştir. Genetik algoritma kodunda eşleşme algoritması, mutasyon algoritması, toplam birey sayısı değişimlerinin başarılı sentez oranına etkisi ve başarılı senteze ulaşma hızı ölçüsü olan iterasyon sayısı üzerine etkisi incelenmiştir. Ayrıca maliyet fonksiyonlarının hedef değer aralıkları değiştirilerek, önerilen rezonatör yapılarıyla hedeflenen frekans tepkisi performansından daha yüksek performansa sahip yüzey tasarımlarının gerçekleştirilebilirliği test edilmiştir.

Gerçekleştirilen çalışma sonucunda, soğurucu frekans seçici yüzey sentezleri için genetik algoritma ile sentez metodunun farklı rezonatör geometrilerinde kullanılabileceği ve literatürdeki konvansiyonel sentez metoduna kıyasla daha hızlı şekilde başarılı sentez değerlerine ulaşmayı sağlayacağı değerlendirilmektedir. Önerilen metotla birlikte, frekans tepkisi performans hedeflerinin ve rezonatör geometrisinin gerektirdiği boyut hedeflerinin maliyet fonksiyonları üzerinden tanımlanması ile; önerilen rezonatör yapılarıyla, farklı frekans tepkisi performans kriterleri için sentezlerin gerçekleştirilebilir boyut değerleriyle hızlı ve kontrollü bir şekilde gerçekleştirilebileceği değerlendirilmektedir.

## KAYNAKLAR

- [1] E. F. Knott, J. F. Schaeffer ve M. T. Tuley, Radar Cross Section, SciTech Publishing, 2004.
- [2] D. Richardson, Stealth Warplanes, MBI Publishing, 2001.
- [3] J. Adam, How to design an invisible aircraft, *IEEE Spectrum*, cilt 25, no. 4, pp. 26-31, 1988.
- [4] B. A. Munk, Frequency Selective Surfaces, John Wileny & Sons, 2000.
- [5] R. W. W. S. Arceneaux, Absorptive/Transmissive Radome, US Patent: 5400043, 1995.
- [6] B. A. Munk, Metamaterials Critique and Alternatives, John Wiley&Sons, 2009.
- [7] A. M. F. Costa, A frequency selective radome with wideband absorbing properties, *IEEE Trans. on Antennas and Prop.*, cilt 60, no. 6, pp. 2740-2747, 2012.
- [8] X. Yuan ve X. Yuan, A transmissive/absorbing radome with double absorbing band, *Microwave and Optical Technology Letters*, cilt 58, pp. 2016-2019, 2016.
- [9] W. Yu, M. Cheng, W. W. Y. Yu, L. Liu ve G. Q. Luo, Bandpass Absorptive Frequency-Selective Structures With Wide Absorption Bands Based on Hybrid 2-D and 3-D Structures, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, cilt 71, no. 4, pp. 3183-3192, 2023.
- [10] H. Chen, W. B. Lu, Z. G. Liu ve Z. H. Jiang, Flexible Raserber Based on Graphene With Energy Manipulation Function, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, cilt 68, no. 1, pp. 351-359, 2020.
- [11] M. S. Patinavalasa, L. Banoth, A. Sharma, K. V. Srivastava ve S. Ghosh, A frequency-selective raserber with wideband absorption and in-band transmission using resistive ink, *Microwave and Optical Technology Letters*, cilt 64, no. 9, pp. 1544-1552, 2022.
- [12] Y. Yu et al. , 3D Band-Absorptive Frequency Selective Raserber: Concept and Analysis, *IEEE Access*, cilt 7, pp. 2520-2528, 2019.
- [13] M. M. Zargar, A. Rajput, K. Saurav ve S. K. Koul, Single-Layered Flexible Dual Transmissive Raserbers With Dual/Triple Absorption Bands for Conformal Applications, *IEEE Access*, cilt 9, pp. 150426-150442, 2021.
- [14] R. Li, J. Tian, B. Jiang, Z. Lin, B. Chen ve H. Hu, A Switchable Frequency Selective Raserber With Wide Passband, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, cilt 20, no. 8, pp. 1567-1571, 2021.



- [15] A. Sharma, M. Saikia, S. Malik, S. Ghosh ve K. V.Srivastava, A polarization-insensitive broadband rasorber with in-band transmission response, *Microwave and Optical Technology Letters*, cilt 62, no. 12, pp. 3668 - 3676, 2020.
- [16] X. Zhang, W. Wu, J. Huang, W. Zhang, Y. Ye ve N. Yuan, Dual-Polarized Frequency Selective Rasorber With Two Transmission Bands, *IEEE Access*, cilt 7, pp. 139795-139801, 2019.
- [17] Z. Sun, Q. Chen, M. Guo, H. Yu ve Y. Fu, Frequency Selective Rasorber and Reflector With Two-Sided Absorption Bands, *IEEE Access*, cilt 7, pp. 6025-6031, 2019.
- [18] M. Guo, Z. Sun, D. Sang, X. Jia ve Y. Fu, Design of Frequency-Selective Rasorbers Based on Centrosymmetric Bended-Strip Resonator, *IEEE Access*, cilt 2019, pp. 24964-24970, 2019.
- [19] Q. Guo, Z. Zhao, J. Su ve Z. Li, Dual-Polarization Absorptive/Transmissive Frequency-Selective Surface With Tunable Passband, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, cilt 63, no. 5, pp. 1347-1356, 2021.
- [20] S. C. Bakshi, D. Mitra ve F. L. Teixeira, Multifunctional Frequency Selective Rasorber With Dual Mode and Continuous Tunability, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, cilt 69, no. 9, pp. 5704-5715, 2021.
- [21] D. Yu, Z. Z. Y. Dong, M. Lin ve L. Han, High-Selectivity Frequency-Selective Rasorber With Tunable Absorptivity, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, cilt 71, no. 4, pp. 3620-3630, 2023.
- [22] Q. Yu, S. Liu, A. Monorchio, X. Kong, Y. Wen ve Z. Huang, A Miniaturized High-Selectivity Frequency Selective Rasorber Based on Subwavelength Resonance and Interdigital Resonator, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, cilt 18, no. 9, pp. 1833-1837, 2019.
- [23] Q. Chen, D. Sang, M. Guo ve Y. Fu, Miniaturized Frequency-Selective Rasorber With a Wide Transmission Band Using Circular Spiral Resonator, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, cilt 67, no. 2, pp. 1045-1052, 2019.
- [24] L. Wang, S. Liu, X. Kong, H. Zhang, Q. Yu ve Y. Wen, Frequency-Selective Rasorber With a Wide High-Transmission Passband Based on Multiple Coplanar Parallel Resonances, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, cilt 19, no. 2, pp. 337-340, 2020.
- [25] M. Guo, Q. Chen, T. Bai, K. Wei ve Y. Fu, Wide Transmission Band Frequency-Selective Rasorber Based on Convolutated Resonator, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, cilt 19, no. 5, pp. 846-850, 2020.

- [26] Y. Han ve L. Xu, Dual-polarized frequency-selective absorber with wide transmission band, *Microwave and Optical Technology Letters*, cilt 62, no. 3, pp. 1270 - 1274, 2019.
- [27] Q. Yu, F. Costa ve A. Monorchio, A Broadband Frequency-Selective Resorber with Double-Sided Absorption Bands, *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and North American Radio Science Meeting*, Montreal, Canada, 2020.
- [28] Z. Yang, W. Jiang, Q. Huang ve T. Hong, A 2.5-D Miniaturized Frequency-Selective Resorber With a Wide High-Transmission Passband, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, cilt 20, no. 7, pp. 1140-1144, 2021.
- [29] J. Ge, W. Jiang, T. Hong, Y. Gao ve S. Gong, Bandpass Frequency-Selective Resorber With Wide Transmission Band and High Selectivity Based on Multiorder Resonance, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, cilt 71, no. 12, pp. 9621-9632, 2023.
- [30] K. Liao, S. Liu, X. Zheng, X. Zhang, X. Shao ve X. Kong, An ultra-wide passband frequency-selective resorber with high transmission, *Microwave and Optical Technology Letters*, cilt 64, no. 11, pp. 1911-1916, 2022.
- [31] J. Xia et al., Design of a Wideband Absorption Frequency Selective Resorber Based on Double Lossy Layers, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, cilt 68, no. 7, pp. 5718-5723, 2020.
- [32] S. C. Bakshi, D. Mitra ve F. L. Teixeira, FSS-Based Fully Reconfigurable Resorber With Enhanced Absorption Bandwidth and Simplified Bias Network, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, cilt 68, no. 11, pp. 7370-7381, 2020.
- [33] Q. Xing, W. Wu, Y. Yan, X. Zhang ve N. Yuan, A Wideband Frequency-Selective Resorber With Rectangular Spiral Resonators, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, cilt 21, no. 8, pp. 1688-1692, 2022.
- [34] C. J. Hodgkinson, D. E. Anagnostou ve S. K. Podilchak, Jaumann-Like Resorber Offering Angular Stability With Wideband Absorption and Low Insertion Loss, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, cilt 21, no. 11, pp. 2186-2190, 2022.
- [35] A. Özkan ve B. Saka, Wideband dual-polarized resorber design with genetic algorithm synthesis, *Microwave and Optical Technology Letters*, cilt 66, no. 4, 2024.
- [36] Q. Chen, D. Sang, M. Guo ve Y. Fu, Frequency-Selective Resorber With Interabsorption Band Transparent Window and Interdigital Resonator, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, cilt 66, no. 8, pp. 4105-4114, 2018.

- [37] Y. Shang, Z. Shen ve S. Xiao, Frequency-Selective Resorber Based on Square-Loop and Cross-Dipole Arrays, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, cilt 62, no. 11, pp. 5581-5589, 2014.
- [38] Q. Yu et al., Miniaturized Wide-Angle Resorber With a Wide Interabsorption High Transparent Bandpass Based on Multiple 2.5-D Resonators, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, cilt 21, no. 2, pp. 416-420, 2022.
- [39] O. Kramer, Genetic Algorithm Essentials, Springer, 2017.
- [40] J. H. Holland, Adaptation in Natural and Artificial Systems, Univ. Michigan Press, 1975.
- [41] D. E. Goldberg, Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning, New York: Addison-Wesley, 1989.
- [42] R. L. Haupt ve D. H. Werner, Genetic Algorithms in Electromagnetics, John Wiley & Sons, 2007.
- [43] A. Wang, M. Yan, J. Zhang, L. Zhen, J. Wang ve S. Qu, Absorptive/transmissive integrated frequency selective structure based on lumped resistance elements, *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, cilt 14, no. 3, pp. 159-162, 2019.
- [44] K.C.Gupta, R.Garg, I.Bhal ve P.Bhartia, Microstrip Lines and Slotlines, Artech House, 1996.
- [45] E. C. Harrington, The desirability function, *Ind Quality Control*, cilt 21, pp. 494-498, 1965.
- [46] G. Derringer ve R. Suich, Simultaneous optimization of several response variables, *J Quality Technology*, cilt 12, pp. 214-219, 1980.
- [47] Rogers Corporation, <https://www.rogerscorp.com/advanced-electronics-solutions/ro3000-series-laminates/ro3010-laminates>.
- [48] Tech Note TN0004, Vishay Intertechnology Inc., 2006. <https://www.vishay.com/docs/49427/vse-tn00.pdf>.
- [49] Rogers Corporation, [https://www.rogerscorp.com/advanced-electronics-solutions/diclad-series-laminates/diclad-870\\_880-laminates](https://www.rogerscorp.com/advanced-electronics-solutions/diclad-series-laminates/diclad-870_880-laminates).
- [50] T. Rao, S. Yu, R. Shi ve N. Kou, A Dielectric Matching Layer Loaded Frequency Selective Resorber With Enhanced Angular Stabilities, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, cilt 22, no. 7, pp. 1552-1556, 2023.
- [51] E. Cheng, X. Wang ve X. Kong, A wideband parallel-plate waveguide design for FSS/FSR measurement, *Microwave and Optical Technology Letters*, cilt 64, no. 11, pp. 1879-2123, 2022.

- [52] Q. Chen, S. Yang, J. Bai ve Y. Fu, Design of Absorptive/Transmissive Frequency-Selective, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, cilt 65, no. 9, pp. 4897-4902, 2017.
- [53] D. M. Pozar, Microwave Engineering, John Wiley & Sons, 2005.
- [54] Flann Microwave, <https://flann.com/products/straights/flange-to-flange-waveguide-straights-adaptors-and-spacers-series-441-445/>.