

**T.C.  
MİLLÎ SAVUNMA ÜNİVERSİTESİ  
HEZÂRFEN HAVACILIK VE UZAY TEKNOLOJİLERİ  
ENSTİTÜSÜ  
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ PROGRAMI**

**POLARİZASYONDAN BAĞIMSIZ İNCE TEK  
KATMANLI FREKANS SEÇİCİ YÜZEY  
KULLANARAK ELEKTROMANYETİK  
SOĞURUCU TASARIMI**

**DOKTORA TEZİ**

**KAĞAN CAN  
4172201**

**TEZ DANIŞMANI: DOÇ.DR.MUSTAFA EMRE AYDEMİR**

**İSTANBUL  
TEMMUZ 2020**

**T.C.**  
**MİLLÎ SAVUNMA ÜNİVERSİTESİ**  
**HEZÂRFEN HAVACILIK VE UZAY TEKNOLOJİLERİ**  
**ENSTİTÜSÜ**  
**ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**  
**ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ PROGRAMI**

**POLARİZASYONDAN BAĞIMSIZ İNCE TEK**  
**KATMANLI FREKANS SEÇİCİ YÜZEY**  
**KULLANARAK ELEKTROMANYETİK**  
**SOĞURUCU TASARIMI**

**DOKTORA TEZİ**

**KAĞAN CAN**  
**4172201**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 22.07.2020**

**Tezin Savunulduğu Tarih: 30.06.2020**

**Tez Oy birliği / Oy çokluğu ile başarılı bulunmuştur.**

**Tez Danışmanı**  
**Jüri Üyeleri**

**Unvan Ad Soyad**

**Doç.Dr.Mustafa Emre AYDEMİR**

**Prof.Dr.Ahmet Serdar TÜRK**

**Prof.Dr.Ali OKATAN**

**Doç.Dr.Hamid TORPİ**

**Dr.Öğr.Üyesi Pınar ÖZTÜRK ÖZDEMİR**

**İmza**

**İSTANBUL**  
**TEMMUZ 2020**

## ÖZGÜNLÜK RAPORU

Tez çalışmamın a) Kapak sayfası, b) Giriş, c) Ana bölümler ve ç) Sonuç kısımlarından oluşan toplam 80 sayfalık kısmına ilişkin, 04/06/2020 tarihinde şahsım tarafından Turnitin adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan özgünlük raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 5'tir.

Uygulanan filtrelemeler:

1-Kaynakça hariç

2-Alıntılar hariç/dâhil

3-5 kelimedenden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

Millî Savunma Üniversitesi Hezârfen Havacılık ve Uzay Teknolojileri Enstitüsü Lisansüstü Tez Çalışması Özgünlük Raporu Alınması ve Kullanılması Uygulama Usul ve Esasları'nı inceledim ve bu Uygulama Esasları'nda belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Kağan CAN

14/07/2020

## ETİK BEYAN

Millî Savunma Üniversitesi Enstitüleri Lisansüstü Tez Hazırlama Kılavuzu'nda yer alan kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında; tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu, tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi, kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı, bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu, bildirir; aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Bu tezdeki düşünce, görüş, varsayım, sav veya tezler bana aittir; Millî Savunma Bakanlığı, Türk Silahlı Kuvvetleri, Hava Kuvvetleri Komutanlığı, Millî Savunma Üniversitesi ve Hezârfen Havacılık ve Uzay Teknolojileri Enstitüsü sorumlu tutulamaz.

Kağan CAN

14/07/2020



*Sevgili eşime ve çocuklarıma*

## ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

Öncelikli olarak bu tezin ortaya çıkmasında bilgi ve tecrübesi ile büyük pay sahibi olan tez danışmanım Doç.Dr.Mustafa Emre AYDEMİR'e, tavsiyeleri ile çalışmamın doğru yolda ilerlemesini sağlayan tez izleme juri üyeleri Prof.Dr.Ahmet Serdar TÜRK ile Doç.Dr.Hamit TORPİ'ye, bana değerli zamanlarını ayırdıkları için tez savunma juri üyeleri Prof.Dr. Ali OKATAN ile Dr.Öğr.Üyesi Pınar ÖZTÜRK'e sonsuz şükran ve teşekkürlerimi sunarım.

İstanbul Temmuz 2020

Kağan CAN

## İÇİNDEKİLER

Sayfa

|                                                                                  |      |
|----------------------------------------------------------------------------------|------|
| ÖZGÜNLÜK RAPORU                                                                  |      |
| ETİK BEYANI                                                                      |      |
| İTHAF                                                                            |      |
| ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR                                                                |      |
| İÇİNDEKİLER .....                                                                | vii  |
| TABLO LİSTESİ .....                                                              | ix   |
| ŞEKİL LİSTESİ .....                                                              | x    |
| SEMBOL LİSTESİ .....                                                             | xiii |
| KISALTMALAR .....                                                                | xiv  |
| TÜRKÇE ÖZ .....                                                                  | xv   |
| İNGİLİZCE ÖZ (ABSTRACT) .....                                                    | xvi  |
| 1. GİRİŞ .....                                                                   | 1    |
| 2. SOĞURUCULAR .....                                                             | 2    |
| 3. FREKANS SEÇİCİ YÜZEYLER .....                                                 | 6    |
| 3.1. Temel Frekans Seçici Yüzeyler.....                                          | 15   |
| 3.1.1. Merkezi Bağlantılı Yapılar.....                                           | 17   |
| 3.1.1.1. Gangbuster Yapısı.....                                                  | 17   |
| 3.1.1.2. Tripol Yapısı .....                                                     | 18   |
| 3.1.1.3. Çapa Yapısı.....                                                        | 19   |
| 3.1.1.4. Jerusalem Haçı Yapısı .....                                             | 19   |
| 3.1.1.5. Kare Spiral Yapısı.....                                                 | 20   |
| 3.1.2. Kapalı Eğri Yapılar .....                                                 | 21   |
| 3.1.2.1. Dört Ayaklı Yapı .....                                                  | 21   |
| 3.1.2.2. Üç Ayaklı Yapı .....                                                    | 22   |
| 3.1.2.3. Çember ve Altıgen Yapı .....                                            | 22   |
| 3.1.3. Plakalar.....                                                             | 23   |
| 3.1.4. Birleşim Yapılar .....                                                    | 25   |
| 3.2. Frekans Seçici Yüzeylerin Analizi .....                                     | 27   |
| 3.3. Frekans Seçici Yüzey Konusunda Yapılan Çalışmalar .....                     | 28   |
| 3.3.1. Yeni Bir Kullanım Alanının Önerilmesi ve Uygulanması .....                | 28   |
| 3.3.2. Belli Bir Frekansta Yansıtma ve İletim Değerlerinin İyileştirilmesi ..... | 29   |
| 3.3.3. Mevcut ve Yeni Optimizasyon Tekniklerinin Uygulanması.....                | 31   |
| 3.3.4. Soğurucu Yapıların Geliştirilmesi.....                                    | 31   |
| 4. FSY TABANLI ÖZGÜN SOĞURUCU TASARIMI .....                                     | 33   |
| 4.1. FSY Tabanlı Çok Bandlı Özgün Soğurucu Yapısı (1 mm) .....                   | 40   |

|                                                                  |           |
|------------------------------------------------------------------|-----------|
| 4.2. FSY Tabanlı Çok Bandlı Özgün Soğurucu Yapısı (0,8 mm) ..... | 44        |
| 4.3. FSY Tabanlı Çok Bandlı Özgün Soğurucu Yapısı (1,6 mm).....  | 47        |
| 4.4. FSY Tabanlı Geniş Bandlı Özgün Soğurucu Yapısı (1 mm) ..... | 51        |
| 4.4.1. Genel Regresyon Yapay Sinir Ağı .....                     | 55        |
| 4.4.2. Parçacık Sürü Optimizasyon Yöntemi .....                  | 63        |
| 4.4.3. Fiziksel Test Ölçümü.....                                 | 71        |
| <b>5. SONUÇ</b> .....                                            | <b>77</b> |
| <b>KAYNAKÇA</b> .....                                            | <b>80</b> |
| <b>ÖZGEÇMİŞ</b> .....                                            | <b>85</b> |



## TABLÖLAR LİSTESİ

|                                                                                                                     | Sayfa |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| <b>Tablo 3.1:</b> Temel Frekans Seçici Yapıların Performans Karşılaştırması .....                                   | 12    |
| <b>Tablo 3.2:</b> Bazı Temel Frekans Seçici Yüzey İletim Hattı Modelleri .....                                      | 13    |
| <b>Tablo 4.1:</b> Saçılım Parametreleri .....                                                                       | 36    |
| <b>Tablo 4.2:</b> 1 mm Çok Bandlı Soğurucu Birim Yapısı Parametre Değerleri...                                      | 42    |
| <b>Tablo 4.3:</b> 0,8 mm Çok Bandlı Soğurucu Birim Yapısı Parametre Değerleri                                       | 45    |
| <b>Tablo 4.4:</b> 1,6 mm Çok Bandlı Soğurucu Birim Yapısı Parametre Değerleri                                       | 48    |
| <b>Tablo 4.5:</b> Çok Bandlı Soğurucu Birim Yapılarının Literatürdeki Benzer Çalışmalar ile Karşılaştırılması ..... | 50    |
| <b>Tablo 4.6:</b> İkili Yöntem İle Elde Edilen Parametre Değerleri .....                                            | 52    |
| <b>Tablo 4.7:</b> $r=2,6$ mm İçin Değişen $w$ Değerlerine Göre Yapılan 28 Simülasyon .....                          | 58    |
| <b>Tablo 4.8:</b> $r=3$ mm İçin Değişen $w$ Değerlerine Göre Yapılan 36 Simülasyon .....                            | 59    |
| <b>Tablo 4.9:</b> $r=3,4$ mm İçin Değişen $w$ Değerlerine Göre Yapılan 45 Simülasyon .....                          | 59    |
| <b>Tablo 4.10:</b> $r=3,8$ mm İçin Değişen $w$ Değerlerine Göre Yapılan 55 Simülasyon .....                         | 60    |
| <b>Tablo 4.11:</b> Eğitimde Kullanılan Verilerin Örnek Bir Kısım .....                                              | 60    |
| <b>Tablo 4.12:</b> İyileştirme Sonucu Elde Edilen Parametreler .....                                                | 68    |
| <b>Tablo 4.13:</b> Önerilen Yapının Literatürdeki Benzerleri İle Karşılaştırılması...                               | 76    |

## ŞEKİLLER LİSTESİ

|                                                                                                                          | Sayfa |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Şekil 3.1: Kapasitif ve İndüktif Frekans Seçici Yüzeyler .....                                                           | 7     |
| Şekil 3.2: Elemanların Dikdörtgensel ve Üçgensel Formda Sıralanışı .....                                                 | 8     |
| Şekil 3.3: TE ve TM Modları .....                                                                                        | 9     |
| Şekil 3.4: Bazı Temel Yapılar .....                                                                                      | 12    |
| Şekil 3.5: Fiziksel Test Kurulumu.....                                                                                   | 15    |
| Şekil 3.6: Frekans Seçici Yüzey Üzerinde Yansıma ve İletim.....                                                          | 16    |
| Şekil 3.7: Gangbuster Yapısı.....                                                                                        | 17    |
| Şekil 3.8: Dik Açılı Konumlanmış Çift Dipol Yapı.....                                                                    | 18    |
| Şekil 3.9: Tripol Yapısı .....                                                                                           | 18    |
| Şekil 3.10: Çapa Yapısı .....                                                                                            | 19    |
| Şekil 3.11: Jerusalem Haçı Yapısı .....                                                                                  | 19    |
| Şekil 3.12: Kare Spiral Yapısı.....                                                                                      | 20    |
| Şekil 3.13: Dört Ayaklı Yapı.....                                                                                        | 21    |
| Şekil 3.14: Üç Ayaklı Yapı .....                                                                                         | 22    |
| Şekil 3.15: Çember Yapı .....                                                                                            | 22    |
| Şekil 3.16: Altıgen Yapı.....                                                                                            | 23    |
| Şekil 3.17: Kare Plaka Yapısı.....                                                                                       | 23    |
| Şekil 3.18: Daire Plaka Yapısı.....                                                                                      | 24    |
| Şekil 3.19: Kare Yarık Plaka Yapısı.....                                                                                 | 24    |
| Şekil 3.20: Daire Yarık Plaka Yapısı .....                                                                               | 25    |
| Şekil 3.21: Dairesel Dipol Birleşimsel Yapı .....                                                                        | 26    |
| Şekil 3.22: Dairesel Dikdörtgensel Dipol Birleşimsel Yapı.....                                                           | 26    |
| Şekil 3.23: Saçılma Parametreleri .....                                                                                  | 27    |
| Şekil 4.1: Örnek İletim Hattı Modellemesi .....                                                                          | 34    |
| Şekil 4.2: CST Microwave Studio Programında Bulunan FYS Şablonu<br>Kullanılarak Gerçekleştirilen Örnek FYS Tasarımı..... | 35    |
| Şekil 4.3: Örnek FSS Yapısı-1 .....                                                                                      | 37    |
| Şekil 4.4: Örnek FSS Yapısı-1 Frekans Cevabı .....                                                                       | 37    |
| Şekil 4.5: Örnek FSS Yapısı-1 CST Simülasyon Sonucu .....                                                                | 38    |
| Şekil 4.6: Örnek FSS Yapısı-2 .....                                                                                      | 38    |
| Şekil 4.7: Örnek FSS Yapısı-2 Frekans Cevabı .....                                                                       | 39    |
| Şekil 4.8: Örnek FSS Yapısı-2 CST Simülasyon Sonucu .....                                                                | 39    |
| Şekil 4.9: CST Microwave Studio Optimizasyon Akış Şeması.....                                                            | 40    |
| Şekil 4.10: 1 mm Çok Bandlı Soğurucu Birim Yapısı .....                                                                  | 41    |
| Şekil 4.11: 1 mm Çok Bandlı Soğurucu Birim Yapısı Parametreleri .....                                                    | 41    |

|                                                                                                         |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 4.12:</b> 1 mm Çok Bandlı Soğurucu TE Polarizasyon Grafiği.....                                | 42 |
| <b>Şekil 4.13:</b> 1 mm Çok Bandlı Soğurucu TM Polarizasyon Grafiği.....                                | 43 |
| <b>Şekil 4.14:</b> 1 mm Çok Bandlı Soğurucu Grafiğinin w Parametresine Göre Değişimi .....              | 43 |
| <b>Şekil 4.15:</b> 0,8 mm Çok Bandlı Soğurucu Birim Yapısı .....                                        | 44 |
| <b>Şekil 4.16:</b> 0,8 mm Çok Bandlı Soğurucu Birim Yapısı Parametreleri .....                          | 45 |
| <b>Şekil 4.17:</b> 0,8 mm Çok Bandlı Soğurucu TE Polarizasyon Grafiği.....                              | 46 |
| <b>Şekil 4.18:</b> 0,8 mm Çok Bandlı Soğurucu TM Polarizasyon Grafiği.....                              | 46 |
| <b>Şekil 4.19:</b> 1,6 mm Çok Bandlı Soğurucu Birim Yapısı .....                                        | 47 |
| <b>Şekil 4.20:</b> 1,6 mm Çok Bandlı Soğurucu Birim Yapısı Parametreleri .....                          | 48 |
| <b>Şekil 4.21:</b> 1,6 mm Çok Bandlı Soğurucu TE Polarizasyon Grafiği.....                              | 49 |
| <b>Şekil 4.22:</b> 1,6 mm Çok Bandlı Soğurucu TM Polarizasyon Grafiği.....                              | 49 |
| <b>Şekil 4.23:</b> Birim yapı .....                                                                     | 52 |
| <b>Şekil 4.24:</b> Geniş Band Soğurucu Birim Yapısı.....                                                | 53 |
| <b>Şekil 4.25:</b> Geniş Bandlı Soğurucu TE Soğurma Grafiği.....                                        | 53 |
| <b>Şekil 4.26:</b> Geniş Bandlı Soğurucu TM Soğurma Grafiği .....                                       | 54 |
| <b>Şekil 4.27:</b> Yeniden Düzenlenmiş Birim Yapı.....                                                  | 54 |
| <b>Şekil 4.28:</b> Frekans Seçici Yüzey Tabanlı Elektromanyetik Soğurucu Dörtlü Yapı .....              | 55 |
| <b>Şekil 4.29:</b> Yapay Sinir Ağı Katmanları.....                                                      | 56 |
| <b>Şekil 4.30:</b> FSY Tabanlı Soğurucu GRNN Modeli .....                                               | 57 |
| <b>Şekil 4.31:</b> Dağılım Parametresi Tespit Tekniği Akışı.....                                        | 61 |
| <b>Şekil 4.32:</b> $r=3\text{mm}$ , $w_1=0,4\text{ mm}$ ve $w_2=1\text{mm}$ için simülasyon sonucu..... | 62 |
| <b>Şekil 4.33:</b> GRNN Modelinin Oluşturduğu Sonuç.....                                                | 63 |
| <b>Şekil 4.34:</b> Sürüdeki Parçacıkların Hareketi .....                                                | 64 |
| <b>Şekil 4.35:</b> Yapı Modelinin Optimizasyon Akışı .....                                              | 66 |
| <b>Şekil 4.36:</b> Parçacık Sürü Optimizasyonu .....                                                    | 67 |
| <b>Şekil 4.37:</b> İyileştirilme Sonucu Elde Edilen Birim Yapı .....                                    | 68 |
| <b>Şekil 4.38:</b> İyileştirilmiş Parametreler Kullanılarak Elde Edilen TE Mod Yansıma Grafiği .....    | 69 |
| <b>Şekil 4.39:</b> İyileştirilmiş Parametreler Kullanılarak Elde Edilen TM Mod Yansıma Grafiği .....    | 69 |
| <b>Şekil 4.40:</b> TE Mod Yüzey Akım Dağılımı .....                                                     | 70 |
| <b>Şekil 4.41:</b> TM Mod Yüzey Akım Dağılımı .....                                                     | 70 |
| <b>Şekil 4.42:</b> İmal Edilen Frekans Seçici Yüzey Tabanlı Soğurucu Yapı.....                          | 71 |
| <b>Şekil 4.43:</b> 1x2 Birim Ölçülerinde Bakır Levha .....                                              | 72 |
| <b>Şekil 4.44:</b> 1x2 Birim Yapıdan Oluşan Soğurucu Yapı .....                                         | 72 |

|                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 4.45:</b> Test seti .....                                             | 73 |
| <b>Şekil 4.46:</b> Bağlantı düzeni.....                                        | 73 |
| <b>Şekil 4.47:</b> TE mod ölçüm sonucu .....                                   | 74 |
| <b>Şekil 4.48:</b> TM mod ölçüm sonucu .....                                   | 75 |
| <b>Şekil 5.1:</b> Farklı geliş açlarına göre soğurma grafiği.....              | 77 |
| <b>Şekil 5.2:</b> İleriki dönemde üzerinde çalışılabilecek 78x78mm yapı.....   | 78 |
| <b>Şekil 5.3:</b> İleriki Dönemde Üzerinde Çalışılabilecek 130x130mm Yapı..... | 79 |



## SEMBOL LİSTESİ

|            |                           |
|------------|---------------------------|
| $\epsilon$ | : Elektriksel Geçirgenlik |
| $\mu$      | : Manyetik Geçirgenlik    |
| $\delta$   | : Zayıflama               |
| $\lambda$  | : Dalga Boyu              |
| $\phi$     | : Faz Kayması             |
| $\alpha$   | : Zayıflama Katsayısı     |
| $\beta$    | : Yayılım Katsayısı       |
| $\omega$   | : Açısal Frekans          |
| $\gamma$   | : İletim Katsayısı        |
| $f_0$      | : Merkez Frekans          |

## KISALTMALAR

|             |                                       |
|-------------|---------------------------------------|
| <b>CST</b>  | : Computer Simulation Technology      |
| <b>FSY</b>  | : Frekans Seçici Yüzey                |
| <b>GRNN</b> | : General Regression Neural Network   |
| <b>PSO</b>  | : Parçacık Sürü Optimizasyon          |
| <b>HFSS</b> | : High Frequency Structural Simulator |
| <b>BG</b>   | : Band Genişliği                      |



## ÖZ

### **Polarizasyondan Bağımsız İnce Tek Katmanlı Frekans Seçici Yüzey Kullanarak Elektromanyetik Soğurucu Tasarımı**

Kağan CAN

Millî Savunma Üniversitesi, Hezârfen Havacılık ve Uzay Teknolojileri Enstitüsü  
İstanbul, Temmuz, 2020

Çalışmamızda polarizasyondan bağımsız ince tek katmanlı frekans seçici yüzey kullanarak çok bandlı ve geniş bandlı özgün elektromanyetik soğurucu yapıları tasarlanmıştır. Çok bandlı özgün soğurucu geliştirme çalışması kapsamında üç adet özgün yapı ortaya konmuştur. 1 mm kalınlığındaki ilk çok bandlı yapımız X bandda, 0,8 mm kalınlığındaki ikinci çok bandlı yapımız X ve Ku bandlarında, 1,6 mm kalınlığındaki üçüncü çok bandlı yapımız S,C,X ve Ku bandlarında soğurma yapabilmektedir. Söz konusu yapılar CST Microwave Studio kullanılarak simüle edilmiştir. Geniş bandlı özgün soğurucu geliştirme çalışması kapsamında bir adet 1 mm kalınlığında X ve Ku Bandlarında 1,1 GHz band genişliğinde özgün soğurucu yapı oluşturulmuştur. Soğurucu yapılar, tek katmandan kolay üretilebilir ve polarizasyondan bağımsız çalışabilir olarak tasarlanmıştır. Bilgisayar tabanlı CST Microwave Studio program ile simülasyonları yapılmıştır. Bu simülasyonlar sonucu geniş bandlı yapının yapay sinir ağı modeli oluşturulmuş ve parçacık sürü optimizasyon yöntemi ile model iyileştirilmiştir. İyileştirme sonucu ortaya çıkan yapı fiziksel teste tabi tutulmuştur. Fiziki test sonuçları tasarlanan yapının soğurucu özellikleri ile uyumlu çıkmıştır. Önerilen yapılar, band genişliği, tek katmanlı ince yapılı kolay üretilebilir olması ve polarizasyondan bağımsız çalışabilmesi gibi özellikleri nedeniyle literatürdeki diğer çalışmaların önüne geçmektedirler.

**Anahtar Sözcükler:** Frekans seçici yüzey, Elektromanyetik dalga soğurucu, Yapay sinir ağı, Parçacık sürü optimizasyonu, Ultraince Polarizasyondan bağımsız

Bilim Kodu : 90516

Sayfa Sayısı : 104

Tez Danışmanı : Doç.Dr.Mustafa Emre AYDEMİR

## ABSTRACT

### **Design of Electromagnetic Absorber Using Polarization Independent Thin Single Layer Frequency Selective Surface**

Kağan CAN

National Defense University, Hezârfen Aeronautics and Space Technologies Institute  
İstanbul, July, 2020

In this work polarization insensitive, thin single layer, multiband and broadband unique electromagnetic absorbers are designed. Within the scope of the multiband absorber development study, three unique structures have been revealed. Our first multiband structure with a thickness of 1 mm can absorb in X Band, our second multiband structure with a thickness of 0,8 mm can absorb in X and Ku Bands, our third multiband structure with a thickness of 1,6 mm can absorb in S,C,X and Ku bands. These structures are simulated using CST Microwave Studio. Within the scope of broadband unique absorber development study, a 1 mm thick X and Ku Band 1.1 GHz absorber unique structure is created. The absorber surfaces are designed as single layer for easy fabrication and polarisation insensitive. The simulations were run in CST Microwave Studio. After simulations the artificial neural network model of broadband absorber surface is designed and then this model is optimized by using PSO (Particle Swarm Optimization). The model of broadband absorber that has been optimized, is realized and tested physically. The outcome of physical test is almost same as results of simulations. The designed absorbers are leading works among similar works as it is thin and polarization free.

**Keywords:** Frequency selective surface, Electromagnetic wave absorber, Neural network, PSO, Ultrathin and polarization insensitive

Science Code : 90516  
Pages : 104  
Supervisor : Assoc.Prof.Mustafa Emre AYDEMİR

## 1. GİRİŞ

Günümüz askeri havacılığı iki temel üzerinden ilerlemektedir. Bunlarda ilki uçan platformlar ile bunların mühimmatlarının geliştirilmesidir. Diğerisi ise geliştirilen bu güçlü savaş araçlarından korunmak için tespit ve imha sistemlerinin geliştirilmesidir. Tüm bu geliştirmelerin en büyük ortak noktası ise radar sistemidir. Uçan platformlar yerdeki sistemlerin hedefi olmamak için radar izlerini küçültmeye hatta yapabiliyorlarsa yok etmeye çalışırlar. Yerdeki sistemler ise hava platformunun hedefi olmadan onu tespit edebilmek için radar izini küçültmeye çalışır.

İşte tam bu noktada sahneye radarın yanında başka bir sistem girer. Soğurucu sistemler. Soğurucular elektromagnetik dalgaların enerjisini zayıflatan hatta sıfırlayan sistemlerdir. Soğurucuların bu özelliğinden dolayı, iki rakip sisteme uygulanabilir hale getirilme çalışmaları tüm hızıyla devam etmektedir.

Bu tez çalışmasında polarizasyondan bağımsız ince tek katmanlı frekans seçici yüzey kullanarak çok bandlı ve geniş bandlı özgün elektromanyetik soğurucu yapıları tasarlanmıştır. Çok bandlı özgün soğurucu geliştirme çalışması kapsamında üç adet özgün yapı ortaya konmuştur. 1 mm kalınlığındaki ilk çok bandlı yapımız X bandda, 0,8 mm kalınlığındaki ikinci çok bandlı yapımız X ve Ku bandlarında, 1,6 mm kalınlığındaki üçüncü çok bandlı yapımız S,C,X ve Ku bandlarında soğurma yapabilmektedir. Söz konusu yapılar CST Microwave Studio kullanılarak simüle edilmiştir. Geniş bandlı özgün soğurucu geliştirme çalışması kapsamında bir adet 1 mm kalınlığında X ve Ku Bandlarında 1,1 GHz band genişliğinde özgün soğurucu yapı oluşturulmuştur. Soğurucu yapılar, tek katmandan kolay üretilebilir ve polarizasyondan bağımsız çalışabilir olarak tasarlanmıştır.

## 2. SOĞURUCULAR

Soğurucular üzerine düşen elektromagnetik dalganın enerjisini emerek yok eden; bu suretle dalganın geri yansımısını ve ileri iletimini engelleyen yapılardır. Genel olarak iki yüzey arası dolgu maddeli bir veya birden fazla tabakadan oluşan soğurucular elektriksel geçirgenlik ( $\epsilon$ ) ve manyetik geçirgenlik ( $\mu$ ) özelliklerine göre karakterize edilirler. Maddenin, üzerinden ilerleyen elektromagnetik dalganın elektrik alanına olan etkisine elektriksel geçirgenlik; manyetik alanına olan etkisine ise manyetik geçirgenlik denir. Soğurucular maddeler için elektriksel geçirgenlik ve manyetik geçirgenlik frekans ile değişmektedir.

Elektriksel geçirgenlik kompleks bir sayıdır ve

$$\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (2.1)$$

denklemini (2.1) ile ifade edilir. Burada  $\epsilon'$  dielektrik sabitini ifade ederken  $\epsilon''$  madde tarafından elektrik alanında oluşturulan zayıflatmayı gösterir. Buradan elektriksel alan kayıp eğimi

$$\tan \delta_e = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \quad (2.2)$$

denklemini (2.2) ile ifade edilebilir. Kayıp eğimi ne kadar büyük ise dalga madde içerisinde ilerledikçe elektrik alanında meydana gelen kayıp da o oranda artar. Aynı şekilde kompleks bir sayı olan manyetik geçirgenlik

$$\mu^* = \mu' - j\mu'' \quad (2.3)$$

denklemini (2.3) ile ifade edilir. Buradan hareketle manyetik alan kayıp eğimi

$$\tan \delta_m = \frac{\mu''}{\mu'} \quad (2.4)$$

denklemini (2.4) ile verilir.

Temel olarak iki tip soğurucu yapısı mevcuttur. Bunlardan ilki yansıtıcı soğurucudur. Burada  $\lambda/4$  kalınlığındaki soğurucunun arka yüzeyi tamamen

iletkenidir. Soğurucunun yüzeyine gelen elektromagnetik dalganın bir bölümü yansırken diğer bir bölümü ise madde içerisinde ilerler ve arka metalik yüzeyden tam yansımaya uğrar.  $\lambda/4$  kalınlığından dolayı yansıyan dalgalar arası gidiş geliş 180 derece ( $\lambda/4 + \lambda/4 = \lambda/2$ ) faz farkı oluşur ve bu dalgalar birbirlerini sönümlendirirler. Tek katmanlı bu tür soğurucular dar bantlıdır. Geniş band bir soğurucu elde etmek için aralarında  $\lambda/4$  mesafe bulunan birçok katmandan oluşan soğurucular geliştirilmiştir. Yansıtıcı soğurucuların en bilinen örneği Salisbury ekranıdır.

Diğer bir tip soğurucu ise kayıplı soğuruculardır. Bu tip soğurucularda yüzeye gelen elektromagnetik dalga yansımadan içeri girer (tam uyumlandırma ile) ve içerideki katmanlar arasında ilerlerken enerjisini ısıya çevirerek yok olur. Bu tür soğurucular için sönümlemeyi sağlayacak olan ara dolgu maddeleri önemlidir. İki tip ara dolgu maddesi kullanılır. Bunlardan ilki dalganın manyetik bileşenini zayıflatan manyetik maddelerdir. Bir diğer dolgu maddesi ise elektrik alan bileşenini zayıflatan dielektrik maddelerdir. Her iki alan bileşenini zayıflatan ara dolgu maddeleri de kullanılabilir.

Soğurucu tasarımında iki temel konu bulunmaktadır. İlk konu gelen elektromagnetik dalganın maksimum oranda yapıya nüfuz etmesini sağlamaktır. Bunu sağlamak için serbest uzay empedans ile soğurucu empedansının birbirine uyumlandırılması gerekmektedir. Soğurucu yüzeyinde sınır koşulları gereği gelen, yansıyan ve kırılan dalgaların elektrik/manyetik alanları devamlılık göstermelidir. Genlik devamlılığı Frensel Denklemlerine; faz devamlılığı ise Shell kanununa göre gerçekleşir.

Herhangi bir dielektrik yüzeyden yansıma, gelen elektromagnetik dalganın polarizasyonuna bağlıdır. Paralel polarizasyon durumunda yansıma aşağıdaki denklemde (2.5) verildiği gibi gerçekleşir.

$$r_{paralel} = \frac{\sqrt{\mu^* \varepsilon^* - \sin^2 \theta} - \mu^* \varepsilon^* \cos \theta}{\sqrt{\mu^* \varepsilon^* - \sin^2 \theta} + \mu^* \varepsilon^* \cos \theta} \quad (2.5)$$

Dik polarizasyon durumunda ise yansıma aşağıdaki denklemde (2.6) verildiği gibi gerçekleşir.

$$r_{dik} = \frac{\cos \theta - \sqrt{\mu^* \varepsilon^* - \sin^2 \theta}}{\cos \theta + \sqrt{\mu^* \varepsilon^* - \sin^2 \theta}} \quad (2.6)$$

Elektromagnetik dalganın  $d$  kadar mesafe sonraki faz kayması aşağıda verilen denklemde (2.7) ifade edilmiştir.

$$\phi = \frac{2\pi d}{\lambda} \sqrt{\mu^* \varepsilon^* - \sin^2 \theta} \quad (2.7)$$

$d$  kalınlığındaki bir dielektrik yüzeydeki yansıma, ön ve arka yüzeylerdeki yansımaların toplamı olarak aşağıdaki denklemde (2.8) verilmiştir.

$$R = \frac{-r^* (1 - e^{-j2\phi})}{1 - r^{*2} e^{-j2\phi}} \quad (2.8)$$

İletim denklemi (2.9) de benzer yoldan ifade edilebilir.

$$T = \frac{(1 - r^2) e^{-j\phi}}{1 - r^2 e^{-j2\phi}} \quad (2.9)$$

Eğer soğurucu yüzey arkasında metal bir yüzey bulunursa yansıma denklemi (2.8) aşağıdaki şekilde tekrar düzenlenebilir.

$$R_{metal} = \frac{r - e^{-j2\phi}}{1 - r e^{-j2\phi}} \quad (2.10)$$

En genel ifadesi yukarıdaki denklemde (2.10) sunulan yansımanın modeli aşağıdaki denklem (2.11) ile ifade edilmiştir. Bu denklem (2.11) ileride soğurucu modeli oluşturma çalışmalarında kolaylık sağlayacaktır.

$$Z_{in} = Z_C \frac{Z_L + Z_C \tanh(j\beta d + \alpha d)}{Z_C + Z_L \tanh(j\beta d + \alpha d)} \quad (2.11)$$

Burada  $Z_L$  indüktör, kapasitör ve direnç gibi elemanlardan oluşan iletim hattı model devresinin toplam empedansıdır. Üçüncü bölümde verilen Tablo 2’de görüleceği gibi her bir frekans seçici yüzey yapısının bir iletim hattı model devresi bulunmaktadır. Bu tür modeller çeşitli test ve analizler sonucu elde edilmiştir.  $Z_C$  ise soğurucu maddenin sabit karakteristik empedansı olup bir sonraki denklem (2.12) ile ifade edilir.

$$\sqrt{\frac{\mu^*}{\varepsilon^*}} \quad (2.12)$$

$\alpha$  zayıflama katsayısını,  $\beta$  ise yayılma sabitidir. Aşağıdaki denklemler (2.13) (2.14) kullanılarak elde edilirler. Aşağıdaki denklemlerde (2.13) (2.14) görüleceği üzere  $\alpha$

ve  $\beta$  elektromagnetik dalganın frekansı ile soğurucu maddenin elektriksel ( $\epsilon$ ) ve manyetik ( $\mu$ ) geçirgenlik sabitlerine bağlıdır.

$$\gamma = j\omega\sqrt{\epsilon^*\mu^*} = \alpha + j\beta \quad (2.13)$$

$$\omega = 2\pi\nu = 2\pi f \quad (2.14)$$

Eğer soğurucu, metalik yüzeyli tek katmandan oluşuyorsa  $Z_L=0$  olur. Dolayısıyla empedans denklemi (2.15) aşağıda verildiği gibi sadeleşir.

$$Z_{in} = Z_C \tanh(j\beta d + \alpha d) \quad (2.15)$$

İletim hattı modelinin girişindeki yansıma denklemi (2.16) nihai şeklini alır. Burada serbest uzayın empedansı  $377\Omega$  olarak belirlenmiştir.

$$R = \frac{Z_{in} - 377}{Z_{in} + 377} \quad (2.16)$$

Soğurucular konusunda karşımıza çıkan bir diğer konu ise yüzeyden içeri yansımaz giren elektromagnetik dalganın zayıflatılarak yok edilmesidir. Zayıflatma, elektromagnetik dalganın içinde ilerlediği maddenin/ortamın manyetik ve elektriksel geçirgenlik özelliklerine bağlıdır. Zayıflatma tek veya birçok tabakada gerçekleştirilebilir. Mesafe başına zayıflatmayı aşağıdaki denklem (2.17) ile elde edebiliriz.

$$A = \frac{2\pi(8,686)}{\lambda_0} \sqrt{\frac{\mu'\epsilon'}{2} (\sqrt{(1+\tan^2\delta_d)(1+\tan^2\delta_m)} - (1-\tan\delta_d \tan\delta_m))} \quad (2.17)$$

Temel matematiksel ifadeleri yukarıda sunulan soğurucular fiziksel olarak periyodik yapılar kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Bu yapılar frekans seçici yüzeyleri oluşturmaktadır. Bir sonraki bölümde frekans seçici yüzeyler konusunda temel bilgiler verilecektir.

### 3. FREKANS SEÇİCİ YÜZEYLER

Frekans seçici yüzey, elektromagnetik dalgaları, frekansına göre yansıtmak, iletmek veya soğurmak için periyodik olarak sıralanmış yapılardan oluşturulan ince yapılı bir yüzeydir. Diğer bir deyişle frekans seçici yüzeyler aslında birer filtredir. Burada filtrenin frekans cevabını belirleyen faktör yapıların şekli ve sıralanış sıklığıdır.

Bu tür yüzeyler anten teorisi kapsamında yarım yüzyıldır bilinmektedir. Mikrodalga frekans bandında bu tür yapılar fiziksel olarak kolayca oluşturulup kullanılabilir. Ancak daha yüksek frekanslara yönelik yapıların oluşturulmasında özel makinelerin kullanılması gerekir.

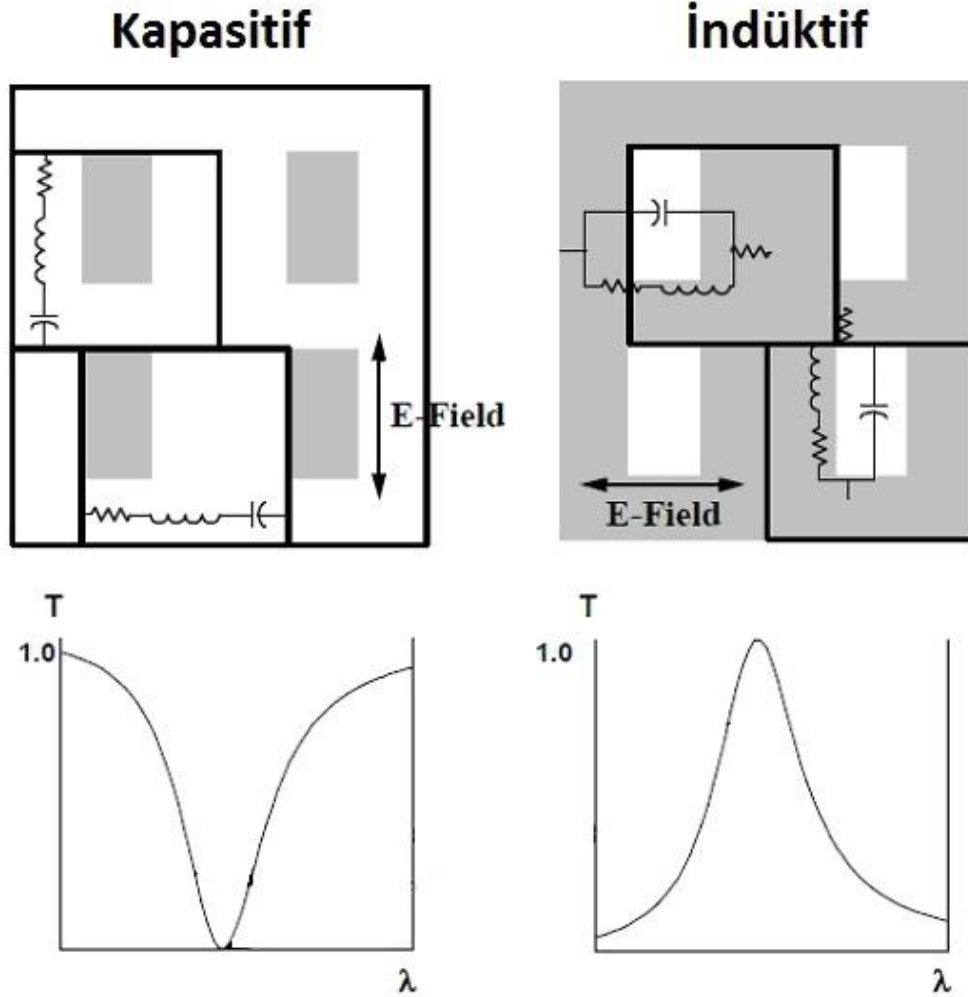
Faz dizili anten teorisi frekans seçici yüzeyler konusunda bir başlangıç noktası oluşturmaktadır. Amitay (1972) tarafından yazılan kitabı bu konuda bilgi sağlamaktadır. Teorik olarak iyi bilinen bu alanda halen bir çok yapı henüz analiz edilmemiştir.

Bu başlık altında bazı özel yapıların oluşturulması ve bunların analiz edilerek en uygun yapının bulunması amaçlanmaktadır. Frekans seçici yüzeylerin uygulanabilir olması için geniş bandlı ve ince yapılı olması en önemli gerekliliktir.

Bilgisayar programlarında gerçekleşen gelişmeler frekans seçici yüzeyler ile ilgili daha detaylı nümerik analizlerin yapılmasına olanak sağlamıştır. CST ve HFSS son yıllarda bu alanda en çok kullanılan yazılım araçlarıdır.

Frekans seçici bir yüzey temel olarak indüktif ve kapasitif özelliklere sahip olur. İndüktif olması durumunda yüksek geçiren bir filtre, kapasitif olması durumunda ise düşük geçiren bir filtre gibi davranır. Yani eğer bir frekans seçici yüzey indüktif ise üzerindeki iletken yapının rezonans frekansının yakın çevresinde bir band geçiren (iletken) yapı olacaktır. Eğer bir frekans seçici yüzey kapasitif ise rezonans frekansının yakın çevresinde band durduran (soğuran) bir yapı olacaktır. Kapasitif ve indüktif frekans seçici yüzeyler isimlerini devre teorisinden alırlar. Şekil 3.1’de tipik kapasitif ve indüktif frekans seçici yüzey yapıları verilmiştir. Burada dikdörtgen iletken yapılar kapasitif iletken üzerindeki dikdörtgen boşluk yapıları ise indüktif

özellikler taşımaktadır. Miller (1994) tarafından gerçekleştirilen çalışmada alışmasında frekans seçici yüzeylere yönelik devre analizi tekniklerini detaylıca vermiştir.



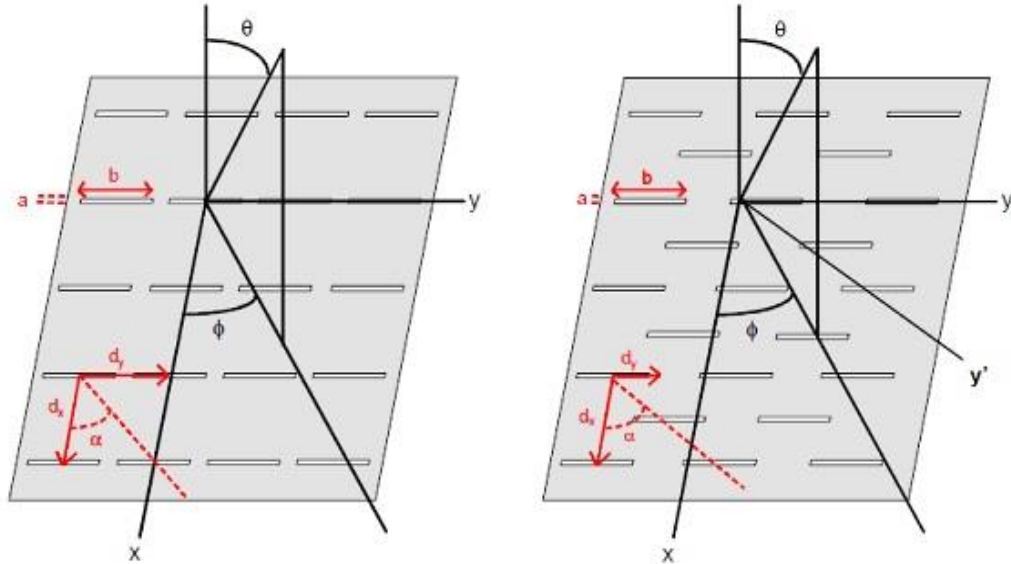
**Şekil 3.1: Kapasitif ve İndüktif Frekans Seçici Yüzeyler.**

Munk (2000)'den uyarlanmıştır.

Frekans seçici yüzeyler temel anlamda iki şekilde uyarılır. Pasif dizide gelen düzlemsel bir dalga ile, aktif dizide ise her elemana bağlanmış birer üreteç ile uyarılma gerçekleştirilir. Frekans seçici yüzeyler özellikle haberleşmede, mikrodalga devrelerinde ve antenlerde kullanılmaktadır. Örneğin, radom yapılarında kullanılan frekans seçici yüzeyler ile radar kesit alanının düşürülmesi hedeflenmiştir.

Frekans seçici yüzeylerin iletim ve soğurma özellikleri kullanılan malzemelerin cinsine, katman kalınlığına, düzlemsel dalga'nın geliş açısı ile polarizasyonuna, katmanlar üzerine yerleştirilen metalik yamaların boyutlarına, geometrisine, periyodikliğine ve simetri ekseninin konumuna göre değişmektedir. Frekans seçici yüzeyler konusunda gerçekleştirilen mevcut çalışmalarda söz konusu özellikler değiştirilerek istenilen frekansta istenilen band genişliğinde iletim veya soğurma elde edilmeye çalışılır. Bunu sağlarken elde edilen frekans seçici yüzeyin minimum kalınlığa sahip olması hedeflenir. Frekans seçici yüzeyin katmanlarının herhangi birisinin kalınlığı değiştirilerek görev yapılacak bölgedeki tehditlerin frekans bandında gelen sinyaller soğurulabilir. Burada dikkat edilmesi gereken nokta elde edilecek frekans seçici yüzeyin hedef frekans bandının tamamını kaplamasını sağlarken kalınlığının uygulanabilir düzeyde ince olmasıdır. Mevcut durumda istenilen band genişliğini sağlayan birçok çalışma olmasına rağmen herhangi bir hareketli platforma uygulanamayacak kadar kalın frekans seçici yüzeyler elde edilmiştir.

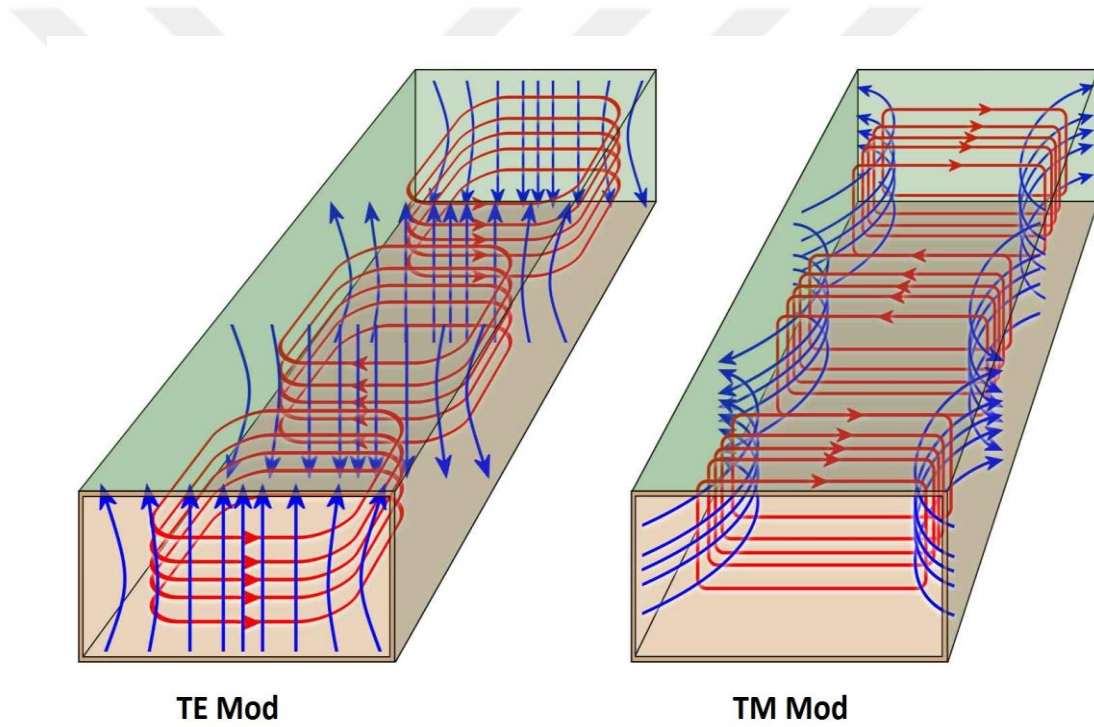
Frekans seçici yüzey üzerindeki iletken elemanlar Şekil 3.2’de gösterildiği gibi dikdörtgensel formda yada üçgensel formda sıralanmaktadır.



**Şekil 3.2: Elemanların Dikdörtgensel ve Üçgensel Formda Sıralanışı.**

Munk (2000)’den uyarlanmıştır.

Frekans seçici yüzeylerin tasarımında gelen dalganın düzlem ile yaptığı açı ile polarizasyonu da dikkate alınmalıdır. İdeal bir frekans seçici yüzey her açıdan gelen dalgalara aynı ölçüde maksimum cevap vermelidir. Bu konuda yapılan çalışmalarda normal ile en fazla 45 derece (yüzeye 45 derece) açı yapan dalgalar göz önüne alınmıştır. Ayrıca frekans seçici yüzeyin, dalganın Şekil 3.3’de gösterilen iki polarizasyon durumu (TE ve TM) için de kabul edilebilir bir tepki vermesi beklenir. Mevcut durumda literatürde tasarlanmış tüm frekans seçici yüzeylerin hem TE hem de TM dalgalarına verdiği cevap analiz edilmiştir. Ancak bazı çalışmalarda bu tür değişimlerden minimum etkilenmesi için frekans seçici yüzeylerin dairesel yapılardan oluşturulması önerilmiştir.



**Şekil 3.3: TE ve TM Modları.**

Munk (2000)'den uyarlanmıştır.

Frekans seçici yüzeylerin periyodik yapılardan oluşması analizini en çok kolaylaştıran unsurdur. Bu yapıların periyodik olmasına dayanılarak tek bir elemanın analizi tüm yüzey için genelleştirilebilmektedir. Floquet teoremine göre eğer bir lineer differansiyel denklem periyodik katsayılarla ve periyodik sınır koşullarına sahip ise bu denklemin çözümü periyodik fonksiyon ile eksponensiyel olarak azalan

fonksiyonun çarpımlarından oluşur. Bu teoreme göre frekans seçici yüzey üzerindeki herhangi bir birim referans birimine eksponensiyel fonksiyon bağıntısı ile bağlıdır.

Frekans seçici yüzeyler isiminden de anlaşılacağı üzere frekansa göre dalgaları geçiren veya geçirmeyen olarak tasarlanır. Söz konusu yüzeyler dalgaların frekansına ek olarak polarizasyonuna da göre filtreleme yapabilir. Bu özelliği sayesinde frekans seçici yüzey bir hüzme ayırıcı (beam splitter) olarak da kullanılabilir. Bu sayede bazı dalga boyları için bilinen malzeme ile yapılması mümkün olmayan polarizör ve hüzme ayırıcı tasarımları frekans seçici yüzeyler sayesinde gerçekleştirilebilir.

Mevcut durumda frekans seçici yüzeyler antenlerin radomlarında radar kesit alanlarının düşürülmesi için kullanılmaktadır. Tasarımlarının karmaşık olması ve sinyalin geliş açısına olan performans bağıllığı bu yapılar ile ilgili daha yapılaması gereken çok çalışma olduğunu göstermektedir. En genel teori doğrultusunda frekans seçici yüzey üzerindeki elemanların boyutlarının ortalama dalga boyunun yarısı uzunluğunda olması gerekmektedir.

Literatürde güncel olarak dalganın geliş açısı ile polarizasyonundan en az etkilenen band genişliği en fazla ve kalınlığı en az olan frekans seçici yüzeylerin tasarımını hedefleyen çalışmalar yapılmaktadır. Her bir çalışma bir öncekine göre yukarıdaki özelliklerden bir veya daha fazlasının iyileştirilmesi olarak gerçekleştirilmektedir.

Elektronik devrelerde filtreler istenmeyen sinyallerin süzülmesi gibi temel bir işleve sahiptir. Filtreler genel olarak alçak geçiren, yüksek geçiren ve band geçiren olmak üzere üç gruba ayrılır. Herbir frekans seçici yüzeyin bir transmisyon hattı temsili devresi mevcuttur. Bu devre sayesinde frekans seçici yüzeyin gelen dalgalara karşı nasıl davranacağı hesaplanabilir. Bu transmisyon hatları ise aslında birer filtredir.

20'nci yüzyılın ortalarında itibaren frekans seçici yüzeyler bünyelerinde barındırdığı askeri alana uygulanabilirlik özelliğinden dolayı yoğun bir şekilde çalışılmıştır (Vardaxoglou, 1997). Bu konudaki ilk çalışmalar Marconi ve Franklin'e (1919) aittir (Marconi ve Franklin, 1919). Frekans seçici yüzeyler en çok uçakların radar kesit alanlarının düşürülmesi konusunda yenililer sunmaktadır.

Frekans seçici yüzeyin frekans cevabı tamamen yüzey üzerindeki yama birimlerinin geometrik şekillerine bağlıdır. Burada yüzeyin sonsuza uzandığı kabul edilir ve hesaplamalar ancak bu şekilde yapılabilir. Bir elektromanyetik dalga yüzey ile temas ettiğinde her bir eleman etkin boyutu oranında bir frekansta rezonansa girer.

Dalganın geliş yönüne göre her bir birim farklı bir gecikme zamanına dolayısıyla farklı bir yansıma miktarına sahiptir. Tüm bu bireysel yansımaların toplamı frekans seçici yüzeyin o dalgaya verdiği cevabı oluşturur.

Bir frekans seçici yüzeyin rezonans frekansı etkin fiziksel alanına ve dalgaların geliş açısına bağlıdır. Frekans seçici yüzey tasarımında gerçekleştirilen bazı yenilikler ile bu bağımlılığın üstesinden gelinmeye çalışılır. Bunun yanında harmonikler de frekans seçici yüzeyin performansını etkilemektedir. Tüm bunlara yönelik geliştirilen çözümler farklı geometrik yapıların farklı dizilişlerini önermektedir.

Daha önce de belirtildiği gibi frekans seçici yüzeyler nümerik hesaplamaların yapılabilmesi için sonsuz uzunluktaki bir yüzey olarak kabul edilir. Bu sayede tüm yüzeyin bir sinyale cevabı bir birimin o sinyale verdiği cevap üzerinden hesaplanabilir. Tüm tasarım işi bu sayede temel birim elemanının tasarımı konusunda dönüştürülebilir. Genel olarak iki tip geometriye sahip temel birimi kullanılmaktadır. Bunlar, yama tipi ve açıklık tipi temel birimlerdir. Periyodik metal yamalardan oluşan en temel yapıların alçak geçiren filtre özelliği sergilediği görülmüştür. Bir dalga bu tür bir yüzeye temas ettiğinde sinyalin alçak frekans bileşenleri yüzeyden geçerken yüksek frekans bileşenlerin yüzeyden geri yansıtılmaktadır. Aynı şekilden kapasitif özelliğe sahip bir yüzey ise yüksek geçiren bir filtre gibi davranmaktadır.

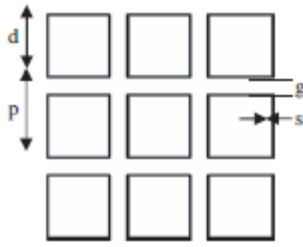
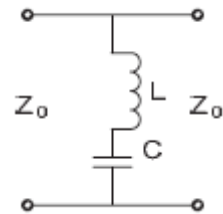
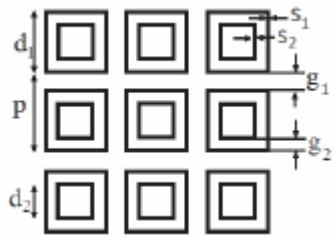
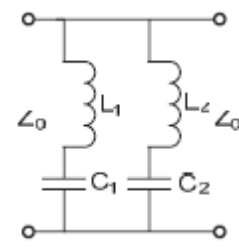
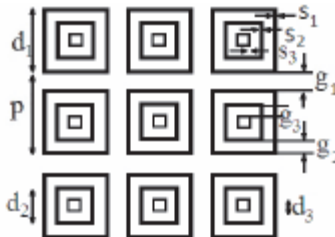
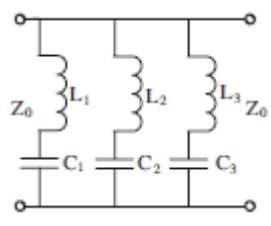
Yıllar içerisinde bazı örnekleri Şekil 3.4'de verilen bir çok frekans seçici yüzey tasarlanmıştır. Bunlar arasında dairesel formda olanlar, dikdörtgen dipol olanlar, haç formunda olanlar, üç veya dört bacaklı olanlar, çember şeklinde olanlar ve karesel kapalı eğri olanlar bulunmaktadır. Tüm formlar farklı kullanım ihtiyaçlarına göre seçilerek kullanılmaktadır. Söz konusu ihtiyaçlar açı ile polarizasyona bağımlılık oranı, band genişliği ve yüzey kalınlığıdır. Mesela açısal bir ayırıştırma talep ediliyorsa açığa çok duyarlı olan bir birim elamanı seçilebilir. Aynı şekilde sistemin açıdan etkilenmemesi isteniyorsa açığa duyarlılığı en az olan yapılar kullanılmalıdır.



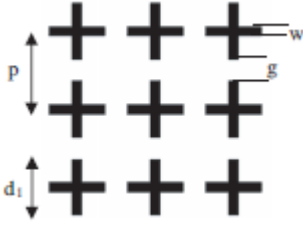
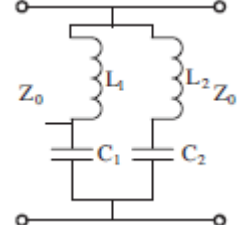
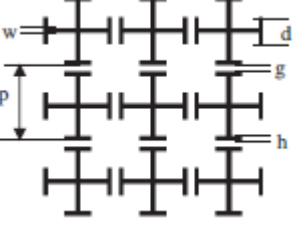
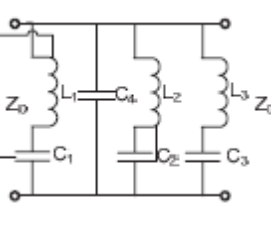
Frekans seçici yapıların frekans cevabı ara katman olarak kullanılan yarı iletken malzemenin tipine göre değişmektedir. Ancak yapının geometrisini ve boyutunu değiştirmek malzeme tipini değiştirmekten daha kolay olduğu için mevcut durumdaki çalışmalar fiziksel yapıyı iyileştirmeye odaklanmıştır.

Temel yapılara geçmeden önce tekrar belirtmek gerekirse bir frekans seçici yüzey; temel elemanın geometrisine, boyutuna ve yarı iletken malzeme tipine bağlıdır. Tasarım gerçekleştirirken hedef frekansa göre yapının boyutu belirlenir. Sahip olması istenen çeşitli özelliklere (kalınlığı, band genişliği, açıdan bağımsızlığı vb.) göre geometri belirlenir. Bu belirleme işlemi esnasında bir sonraki bölümde göreceğimiz temel yapılardan yararlanılır. Ayrıca yapının modeli oluşturularak buradan hesaplamalar yapılabilir. Bazı temel frekans seçici yüzeyin iletim modeli Tablo 3.2’de sunulmuştur.

**Tablo 3.2: Bazı Temel Frekans Seçici Yüzey İletim Hattı Modelleri.**

| S/N | Frekans Seçici Yüzey  |                                                                                     | İletim Hattı Modeli                                                                   |
|-----|-----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
|     | Adı                   | Şekli                                                                               |                                                                                       |
| 1   | Tek Kare Kapalı Yapı  |  |  |
| 2   | Çift Kare Kapalı Yapı |  |  |
| 3   | Üçlü Kare Kapalı Yapı |  |  |

**Tablo 3.2 – devam.**

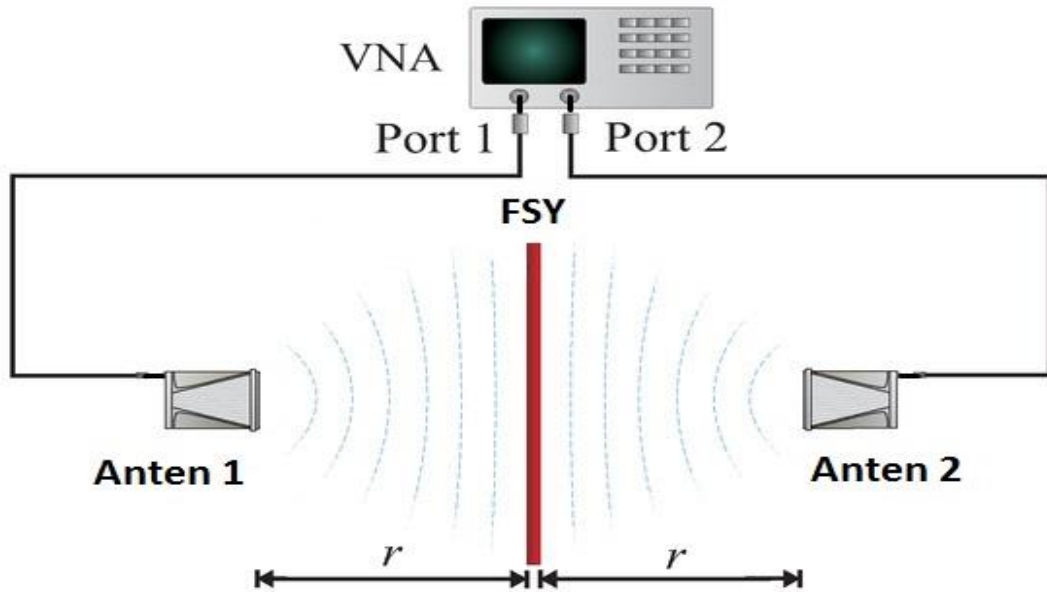
| S/N | Frekans Seçici Yüzey |                                                                                   | İletim Hattı Modeli                                                                 |
|-----|----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
|     | Adı                  | Şekli                                                                             |                                                                                     |
| 4   | Dipol Haç Yapı       |  |  |
| 5   | Jerusalen Haç Yapı   |  |  |

Munk (2000)'den uyarlanmıştır.

Frekans seçici yüzeyler üzerindeki rezonans yapılar ile ilgili yıllardan beri çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmalar sonucunda bazı temel yapıların frekans davranışları iyi şekilde anlaşılmıştır. Söz konusu temel yapıların frekans cevapları bazı nümerik teknikler kullanılarak oluşturulmuştur. Öncelikli yapılar sonsuz periyodik olarak farz edilir. Bir yapı ele alınır ve davranışını ortaya koyan bir denklem elde edilir. Daha sonra bu denklemeden Floquet teoremi ile tüm yüzey için bir denklem tanımlaması elde edilir. Temel anlamda bu şekilde yapılan analizler mevcut durumda CST (Computer Simulation Technique) vb gibi bilgisayar destekli simülasyon sistemleri daha hızlı gerçekleştirilmektedir. Bu sayede daha önce sadece temel yapılarla sınırlı olan frekans seçici yüzeyler çok farklı geometri ve boyutlarda tasarlanabilmektedir. Daha önce klasik yöntemlerle yapılan analiz sonuçları ile aynı yapının bilgisayar destekli simülasyonu sonucu elde edilen çıktıları birbirine uymaktadır. Ancak frekans seçici yüzey yapılarının davranışını belirleyen denklemlerin, sistemin tutarlı bir şekilde çalıştığının gösterilmesi açısından mutlaka elde edilmesi gerekmektedir. Bilgisayar destekli simülasyonlar ihtiyaca cevap verecek olan en uygun yapının en kısa sürede bulunması noktasında bizlere yardımcı olmaktadır. Klasik yöntemler ile denemek istediğimiz yapının analizi günler hatta

haftalar sürebilmektir. Bilgisayar destekli simülasyon aracı bu analizi saatler mertebesine indirmiştir.

Bilgisayar destekli simülasyon sistemleri sayesinde iletim ve yansıma karakteristikleri elde edilmektedir. Ancak söz konusu yapının gerçek dünyada kullanılabilirliğini göstermek amacıyla fiziksel testinin gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Sadece simülasyon sonuçlarını gösteren her çalışma yarım kalmış bir çalışmadır. Söz konusu fiziksel testler çeşitli yollardan yapılabilmektedir. En temel fiziksel test kurulumu Şekil 3.5'te gösterildiği gibi iki adet horn anten ve bir adet vektör ağ analizöründen (Vector Network Analyzer-VNA) meydana gelmektedir.



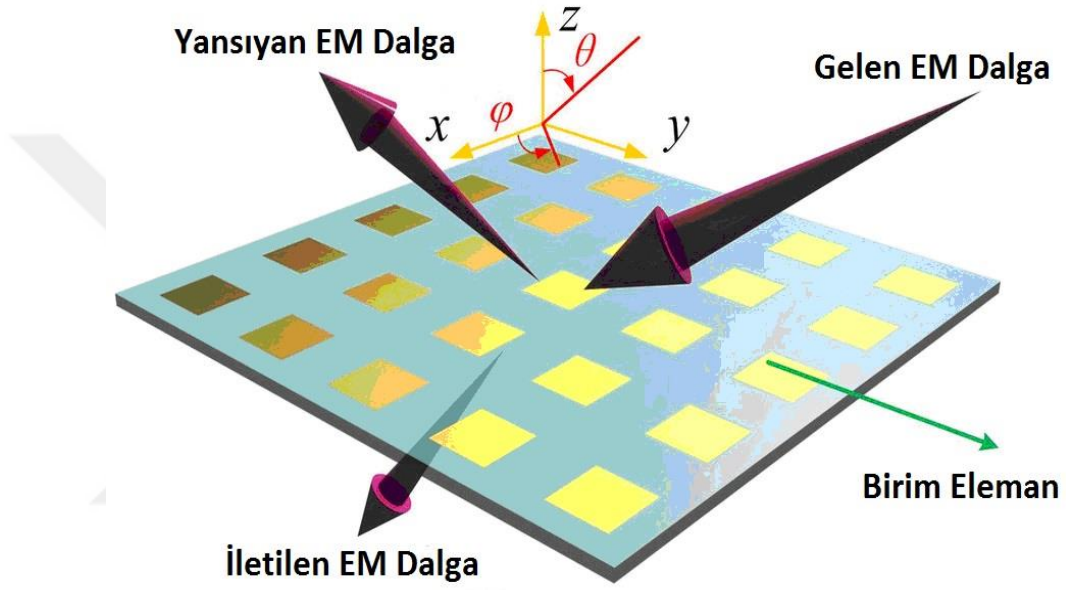
**Şekil 3.5: Fiziksel Test Kurulumu**

Bundan sonraki bölümde frekans seçici yüzeylerde kullanılmış veya halen kullanılan temel yapı birimleri ve karakteristik frekans cevapları incelenecektir. Bu tür yapıların bilinmesi frekans seçici yüzeyler üzerine gerçekleştirilecek çalışmalarda hangi tarafa yönleneceğimiz konusunda bize büyük yarar sağlayacaktır. Daha sonra frekans seçici yüzeyleri modellenmesi konusunda inceleme gerçekleştirilecektir.

### **3.1. Temel Frekans Seçici Yapılar**

Frekans seçici yüzeyler tamamen rezonans birim yapılarına bağlıdır. Elektromagnetik bir dalga frekans seçici bir yüzeye temas ettiğinde yüzey elemanları

üzerinde akım oluşturur. Oluşan akımın genliği eleman ve dalga arasındaki kuplaj gücü ile doğru orantılıdır. Bu genlik eleman boyutlarına en uygun frekansta (yaklaşık  $\lambda/2$ ) maksimum değerini alır. Bu nedenle eleman boyutları çalışması istenen frekans bölgesine uygun seçilir. Eleman üzerindeki akım dağılımına bağlı olarak bir kaynak gibi davranır ve o da bir yayılım gerçekleştirir. Şekil 3.6'da görsel olarak verilen bu geri yayılıma, saçılım alanı denir. Gelen dalga ve oluşan saçılım alanı frekans seçici yüzey etrafından karakteristik bir toplam alan oluşturur.



**Şekil 3.6: Frekans Seçici Yüzey Üzerinde Yansıma ve İletim.**

Munk (2000)'den uyarlanmıştır.

Söz konusu toplam alan değiştirildiğinde frekans seçici yüzeyin frekans cevabı da değişir. Bu nedenle eleman üzerindeki akım dağılımı frekans seçici yüzeyin frekans cevabını doğrudan etkilemektedir. Akım dağılımı ise elemanın geometrik yapısına bağlıdır. Dolayısıyla frekans seçici yüzey üzerindeki elemanların geometrilerini değiştirerek saçılım alanı ve dolaylı yoldan frekans cevabı da değiştirilebilir.

Frekans seçici yüzey üzerindeki iletken yapıların geometrisi aynı zamanda yüzeyin geliş açısına bağlı cevabını da etkilemektedir. Fiziksel dünyada elektromagnetik dalgalar bir yüzeye her zaman dik gelmezler. Çoğu zaman bu dalgalar belli bir açı ile yüzeye gelirler. Farklı açılardan gelen dalgalar frekans seçici yüzeyin farklı harmoniklerini harekete geçirebilir. Bu da yüzeyin frekans cevabında ani

değişikliklere sebep olabilir. İletken yapının geometrisini bu sorunu da ortadan kaldıracak şekilde olması gerekmektedir.

Geometrik yapılar arasındaki mesafe de frekans cevabını etkilemektedir. Mesafenin artması band genişliğini azaltır.

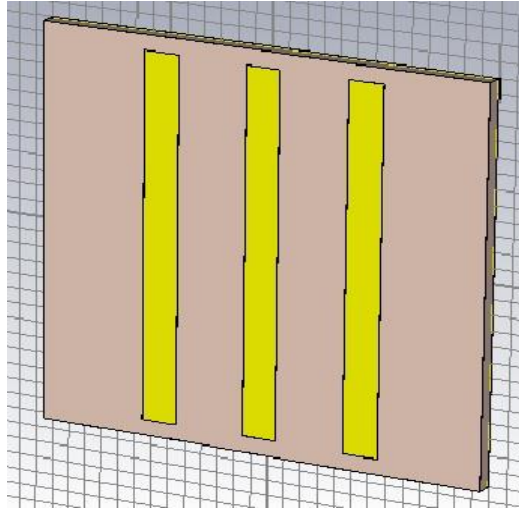
Burada bazı temel geometrik yapılar incelenecektir. Bu yapılar aracılığı ile ihtiyaç duyulan özellikteki (frekans, band genişliği kalınlık vb.) daha kompleks yapılar oluşturulmaktadır.

Söz konusu yapılar dört ana gruba ayrılmıştır.

- Merkezi bağlantılı yapılar.
- Kapalı eğri yapılar.
- Plakalar.
- Birleşim yapılar.

### 3.1.1 Merkezi Bağlantılı Yapılar

#### 3.1.1.1 Gangbuster Yapısı

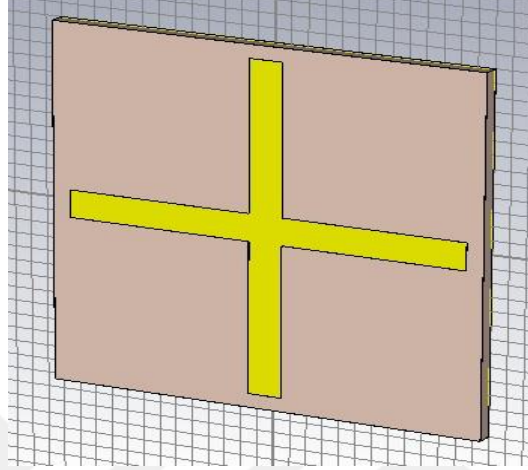


**Şekil 3.7: Gangbuster Yapısı.**

Munk (2000)'den uyarlanmıştır.

Gangbuster yapısı Şekil 3.7'de görüleceği üzere periyodik olarak sıralanmış dipollerden oluşur. Dipollerin uzunlukları arttıkça frekans seçici yüzeyin frekansı

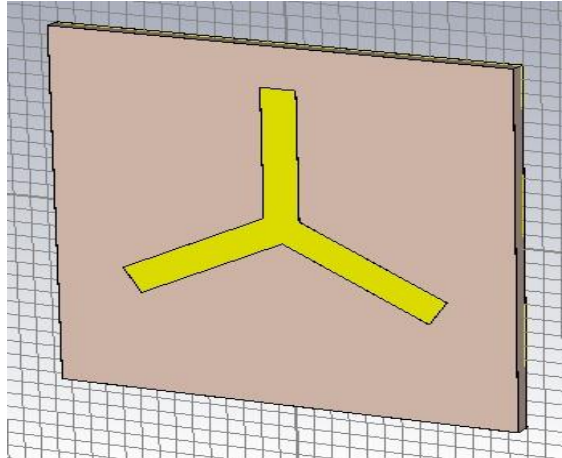
azalır. Eğer dipolleri daha sık yerleştirirsek daha geniş band genişliğinde bir frekans seçici yüzey elde ederiz. Dipoller sadece bir polarizasyon yönüne duyarlı olduğundan iki farklı dipol grubunu Şekil 3.8’de gösterildiği gibi birbirine dik olacak şekilde yerleştirirsek polarizasyondan bağımsız yapılar elde edebiliriz.



**Şekil 3.8: Dik Açılı Konumlanmış Çift Dipol Yapı**

Munk (2000)’den uyarlanmıştır.

### 3.1.1.2 Tripol Yapısı

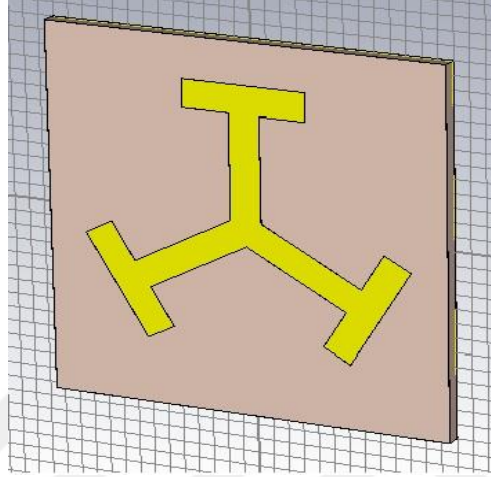


**Şekil 3.9: Tripol Yapısı**

Munk (2000)’den uyarlanmıştır.

Tripol yapısı Şekil 3.9’da görüleceği üzere birbirine bağlı üç adet dipol yapıdan oluşur. Mikrodalga frekans bandında etkin olarak çalışır. Yapısal olarak sık konumlandırılabilir olması dolayısıyla band genişliği arttırılır.

#### 3.1.1.3 Çapa Yapısı

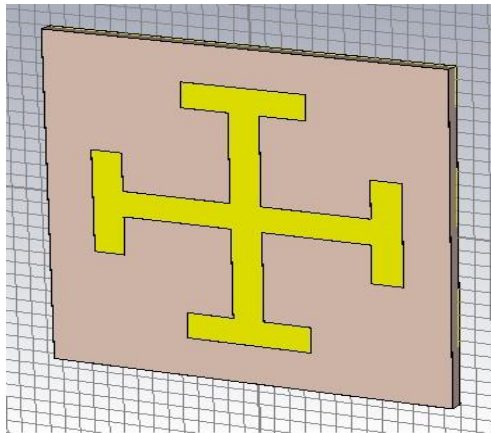


**Şekil 3.10: Çapa Yapısı**

Munk (2000)’den uyarlanmıştır.

Çapa yapısı Şekil 3.10’da görüleceği üzere tripol yapısının basitleştirilmiş bir halidir. Uçlara eklenmiş bölümler kapasitör oluşturarak yapının band genişliğini arttırırlar.

#### 3.1.1.4 Jerusalem Haçı Yapısı

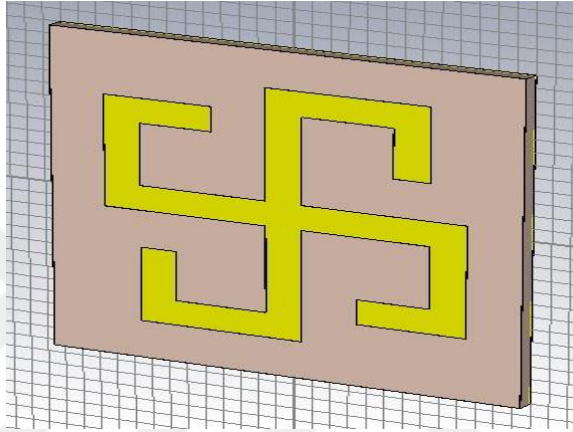


**Şekil 3.11: Jerusalem Haçı Yapısı**

Munk (2000)’den uyarlanmıştır.

Jerusalem haçı en temel yapılardan biridir. Şekil 3.11’de görüleceği üzere birbirine dik iki adet dipol ve uçlarında bulunan yük yapılarından oluşur. Mikrodalga frekans bandında etkin olarak çalışır. Tripol yapısına göre geliş açısı değişikliklerine daha dayanıklıdır.

#### 3.1.1.5 Kare Spiral Yapısı



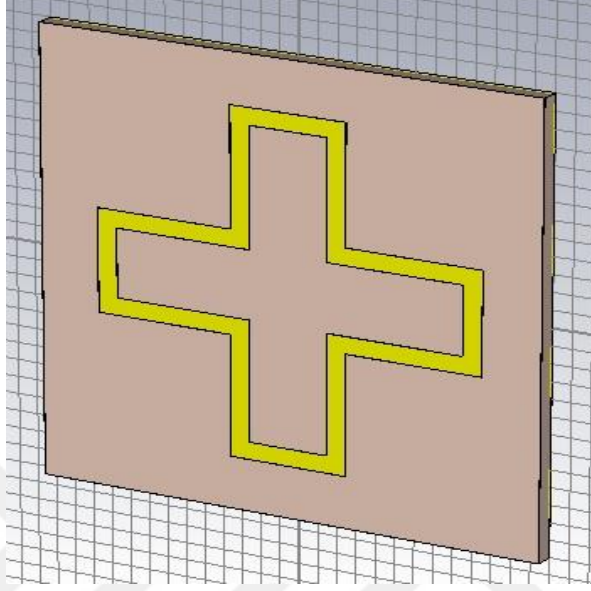
**Şekil 3.12:Kare Spiral Yapısı.**

Munk (2000)’den uyarlanmıştır.

Şekil 3.12’de görülen kare spiral yapısı, Gangbuster yapısı ile benzer band genişliğine sahiptir ancak ondan farklı olarak hem yansıtma hem de band geçiren iletim yüzeyi olarak kullanılabilir. Gangbuster yapısı sadece yansıtma yüzeyi olarak kullanılabilir. Daha fazla spiral dönüş eklenerek ve elemanlar arası mesafe azaltılarak band genişliği daha da arttırılabilir.

### 3.1.2 Kapalı Eğri Yapılar

#### 3.1.2.1 Dört Ayaklı Yapı



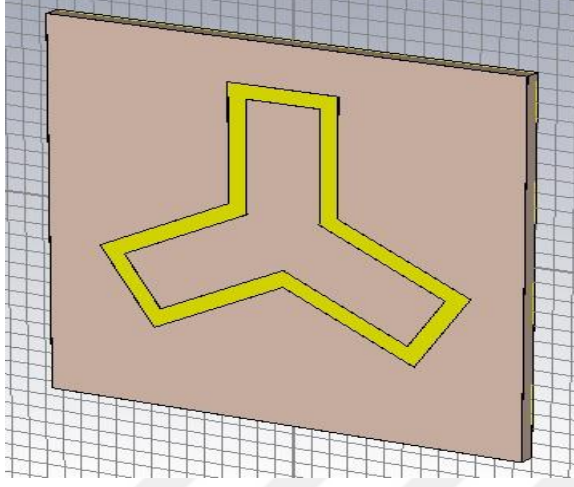
**Şekil 3.13: Dört Ayaklı Yapı**

Munk (2000)'den uyarlanmıştır.

Dört Ayaklı Yapı Şekil 3.13'de görüleceği üzere iki adet yarım dalga dipol yapısından oluşmaktadır. İletim hattı teorisinden yola çıkılarak oluşturulmuştur. Mikrodalga frekans bandında etkin olarak çalışır. Radar radomlarında kullanılabilecek en iyi yapılardan biridir. Dipol yapılardan farklı olarak dört ayaklı yapı polarizasyona karşı değişmez özelliğindedir.

Yukarıdaki şekilde iki adet yarım dalga dipol gözükmektedir. Bu dipol polarizasyondan bağımsız değildir. Söz konusu yarım dalga dipolü iki çeyrek dalga dipole bölüp uçlarını birleştirdiğimizde aynı rezonans etkisini elde etmiş oluruz. Burada yapımız artık polarizasyondan bağımsızdır.

### 3.1.2.2 Üç Ayaklı Yapı

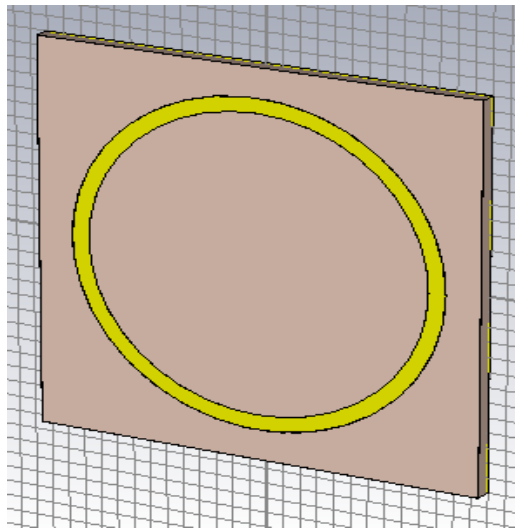


**Şekil 3.14: Üç Ayaklı Yapı**

Munk (2000)'den uyarlanmıştır.

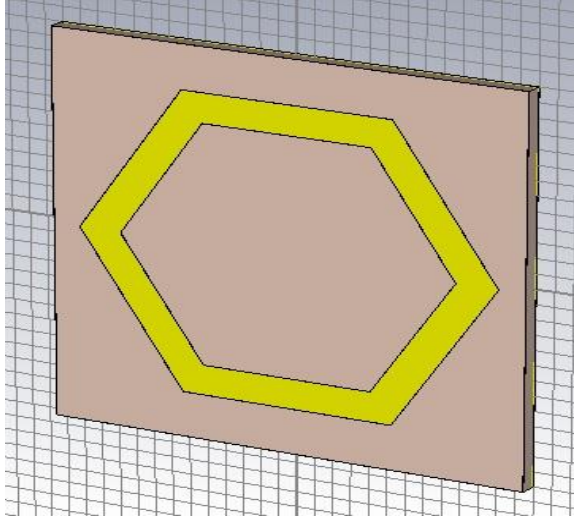
Şekil 3.14'de gösterilen yapı polarizasyona göre band genişliği değişimi kabul edilebilir sınırlar içinde olduğundan radar radomlarında kullanılabilir. Dört ayaklı yapıya göre daha geniş bir band genişliğine sahiptir.

### 3.1.2.3 Çember ve Altıgen Yapı



**Şekil 3.15:Çember Yapı**

Munk (2000)'den uyarlanmıştır.

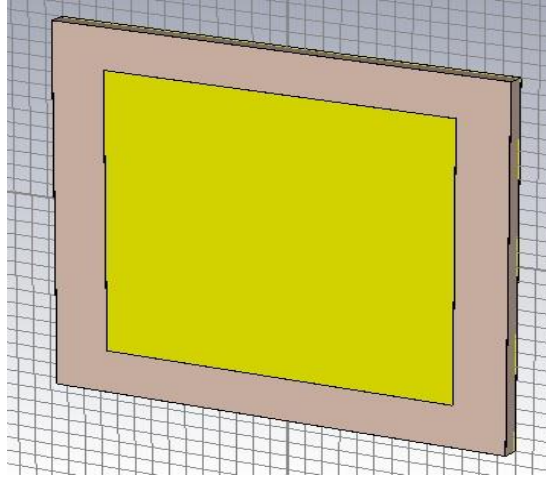


**Şekil 3.16: Altıgen Yapı**

Munk (2000)'den uyarlanmıştır.

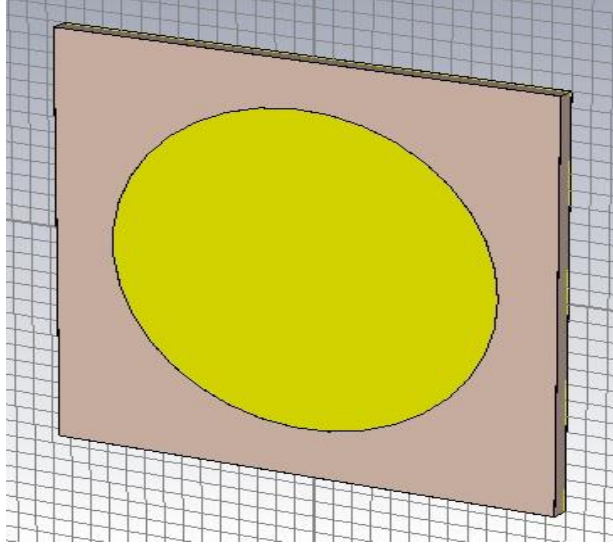
Şekil 3.15 ve Şekil 3.16'da gösterilen çember ile altıgen yapı bir önceki kapalı yapılara göre daha iyi açısal bağımsızlık sağlar. Ayrıca daha iyi bir tarama istikrarı sağlar.

### 3.1.3 Plakalar



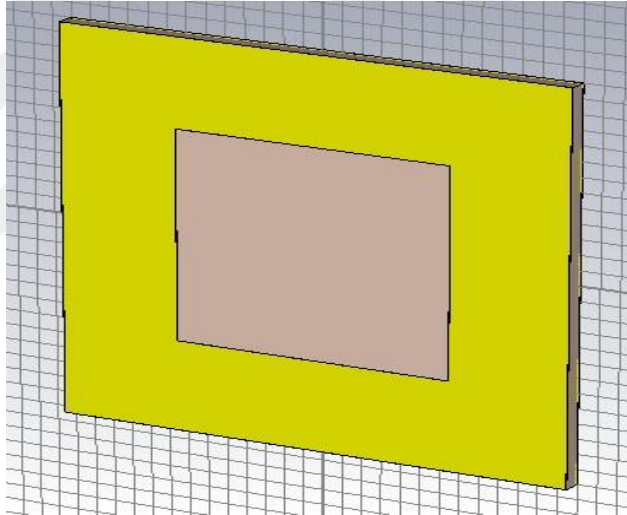
**Şekil 3.17: Kare Plaka Yapısı**

Munk (2000)'den uyarlanmıştır.



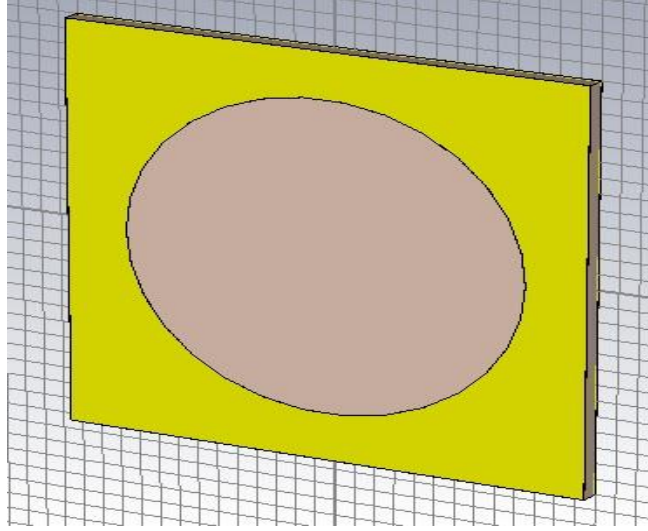
**Şekil 3.18: Daire Plaka Yapısı**

Munk (2000)'den uyarlanmıştır.



**Şekil 3.19: Kare Yarık Plaka Yapısı**

Munk (2000)'den uyarlanmıştır.



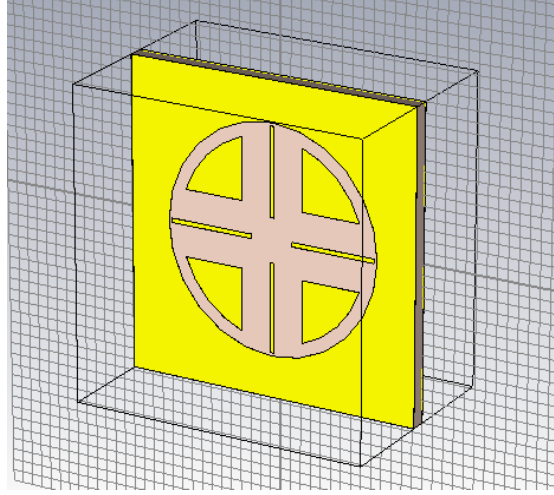
**Şekil 3.20: Daire Yarık Plaka Yapısı**

Munk (2000)'den uyarlanmıştır.

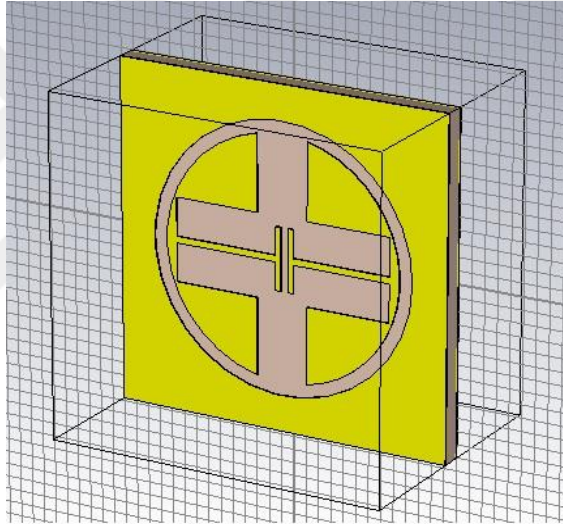
Plaka frekans seçici yüzey yapıları iki ana alt gruba ayrılırlar. Şekil 3.17 ve Şekil 3.18'de örnekleri verilen ilk grup plakalar yarı iletken malzeme üzerinde periyodik olarak oluşturulmuş metal plakalardır. Şekil 3.19 ve Şekil 3.20'de örnekleri verilen ikinci grup ise yarı iletken malzeme üzerini kaplayan metal tabakada periyodik olarak açılmış yarıklardan oluşmaktadır. İlk grup genel anlamda yansıtıcı olarak kullanılırken ikinci grup geçirgendir. Bu tür yapılar polarizasyon ve açı değişikliklerinden diğer temel yapılara göre oldukça fazla etkilenmektedirler. Ancak bu tür yapılar bazı adaptasyonlar ile (aralarına direnç, kapasitör, indüktör bağlama vb.) kullanılabilir hale gelmektedir.

#### **3.1.4 Birleşim Yapılar**

Yukarıda adı geçen yapılar en temel yapılardır. Bu temel yapıların birbirleri ile birleşimlerinden Şekil 3.21 ve Şekil 3.22'dekilere benzeyen çok farklı özellik sergileyen çok sayıda yeni yapı ortaya çıkmaktadır.



**Şekil 3.21: Dairesel Dipol Birleşimsel Yapı.**



**Şekil 3.22: Dairesel Dikdörtgensel Dipol Birleşimsel Yapı.**

Mesela Şekil 3.21'deki yapı dairesel ve dipol yapıların birleşiminden oluşmaktadır. Şekil 3.22'deki yapı ise dairesel, dikdörtgensel ve dipol yapıların birleşiminden oluşmaktadır. Temel yapıların standart frekans cevapları bulunurken birleşimsel yapıların kendilerine has frekans cevapları bulunmaktadır.

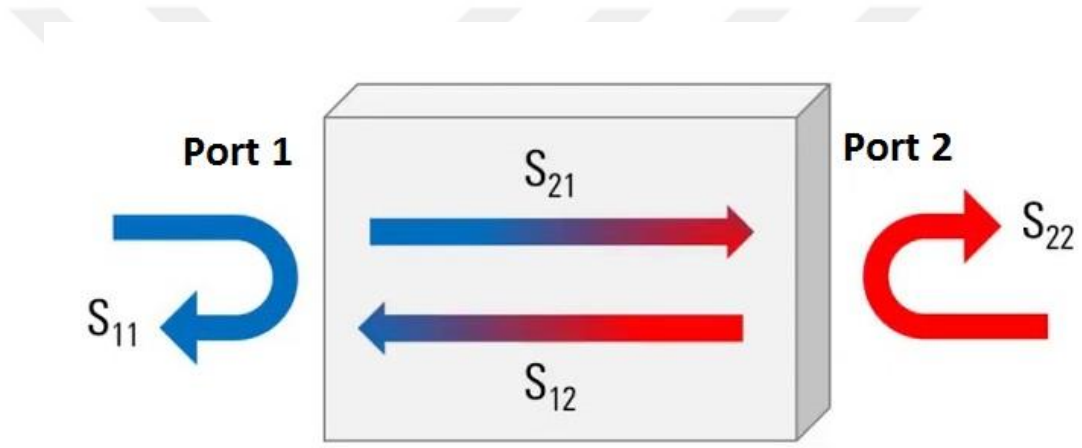
İdeal bir frekans seçici yüzey daha önce de belirttiğimiz gibi dalganın geliş açısından bağımsız olarak çalışmalıdır. Dalganın geliş açısına duyarlılığın sebebi yan loblardır. Bu yan lobları ne kadar azaltabilirsek açisal duyarlılığı da o oranda azaltabiliriz. Bunu sağlamanın en temel yolu iletken yapılar arasındaki mesafeyi kısaltmaktır. Bu sayede yan loblar azaltılarak frekans seçici yüzeyin açığa olan duyarlılığı

düşürülecektir. Yan lobları azaltmanın bir diğer yolu ise yapının geometrisinin değiştirilmesidir. Yukarıdaki temel yapı geometrilerinden kapalı eğri yapıları açısallı duyarlılığı en az olan yapılardır.

Yeni yapı tasarımında temel yapıların ana karakterleri incelenmekte ve ihtiyaca en uygun birleşim oluşturulmaktadır.

### 3.2 Frekans Seçici Yüzeylerin Analizi

Frekans seçici yüzeylerin analizinde kullanılan en önemli parametreler Şekil 3.23’de iki portlu devre için gösterilen saçılma parametreleridir.



**Şekil 3.23: Saçılma Parametreleri.**

Munk (2000)’den uyarlanmıştır.

Şekil 3.23’de gösterilen saçılma parametrelerinden  $S_{11}$  birinci porttan yansıma oranını,  $S_{21}$  birinci porttan ikinci porta aktarım oranını,  $S_{22}$  ikinci porttan yansıma oranını ve  $S_{12}$  ikinci porttan birinci porta aktarım oranını veren saçılma parametreleridir. Söz konusu parametrelerden hangilerinin dikkate alınacağı frekans seçici yüzeyin tasarım amacına göre değişmektedir. Bu parametrelerin frekansa göre değişiminde frekans seçici yüzeyin hangi frekans aralığında soğurma hangi frekans aralığında yansıtma ve hangi frekans aralığında iletim yaptığını tespit edebiliriz. Ayrıca frekans seçici yüzey üstünde oluşan yayılım paternini çıkarabilmemiz için saçılma parametrelerine ihtiyacımız bulunmaktadır. Söz konusu parametreler bilgisayar destekli simülasyon sistemleri yardımıyla elde edilebilir. Ancak

simülasyon çıktıları yeterli değildir ayrıca daha önce bahsettiğimiz test düzeneği kurulup ağ analizörü yardımıyla bu parametreler ölçülmelidir.

### **3.3 Frekans Seçici Yüzeyler Konusunda Yapılan Çalışmalar**

Frekans seçici yüzeyler konusunda literatürde yapılan çalışmalar 4 ana başlık altında toplanabilir. Bunlar;

- Yeni bir kullanım alanının önerilmesi ve uygulanması.
- Belli bir frekansta yansıtma ve iletim değerlerinin iyileştirilmesi.
- Mevcut veya yeni optimizasyon tekniklerinin uygulanması.
- Geniş band ince yapılı soğurucu sistemlerin geliştirilmesi.

#### **3.3.1 Yeni Bir Kullanım Alanının Önerilmesi ve Uygulanması**

Bu kapsamda yapılan çalışmalarda kullanım alanına özel yeni bir frekans seçici yapısı önerilmekte veya mevcut yapıların boyutları kullanım alanına göre uyarlanmaktadır.

Segundo ve Camposs (2014) tarafından WLAN uygulamalarında kullanılmak üzere band geçiren bir frekans seçici yüzey önerilmiştir (Segundo ve Camposs, 2014). Burada amaç WLAN sinyallerinin diğer sinyallerden etkilenmemesini sağlamaktır.

Johar ve diğ.(2014) tarafından gerçekleştirilen çalışmada güneşten korunmak için bina camlarına uygulana kaplamaların içindeki maddelerden dolayı GSM GPS vb. sinyallerin zayıflamasına yol açtığı tespit edilmiştir (Johar ve diğ.,2014). Söz konusu çalışmada kaplamanın periyodik yapılar şeklinde uygulanması halinde camların band geçiren filtre gibi davranacağı ve zayıflama sorununu ortadan kaldıracağı ifade edilmiştir.

Khalid ve Seman (2014) tarafından gerçekleştirilen çalışmada GSM sinyallerinden etkilenebilecek elektronik eşyaların bulunduğu mekanın etrafına GSM sinyallerini soğuracak yüzeyler ile kaplanması önerilmiştir (Khalid ve Seman, 2014). Bu sayede GSM sinyallerin etkisi jammer kullanmaya gerek kalmadan ortadan kaldırılmıştır.

Rafique ve diğ. (2011) tarafından hazırlanan çalışmada ortamdaki WLAN sinyallerinin dışarıdan biri tarafından alınmasının önüne geçilebilmesi için WLAN

sinyallerini soğuran bir yapı geliştirilmiştir (Rafique ve diğ.,2011). Bu sayede bina dışından yabancı birisi WLAN sinyallerine erişim sağlayamayacaktır.

Louertani ve Chio (2014) tarafından ortaya konulan çalışmada spiral bir antenin arkasına konulacak aynı banda soğurma yapan bir yüzeyin antenin arka ışımasını engelleyebileceği ifade edilmiştir (Louertani ve Chio, 2014). Bu suretle istenmeyen sinyallerin önüne geçilebilmektedir.

### **3.3.2 Belli Bir Frekansta Yansıtma ve İletim Değerlerinin İyileştirilmesi**

Mevcut çalışmaların çoğunluğu bu konuda gerçekleştirilmiştir. Burada genellikle hedeflenen frekans merkezli band geçiren ve band durduran yüzeylerin tasarımları yer almaktadır. Genellikle sık kullanılan frekanslar seçilmiştir. Her bir çalışmada bir önceki çalışmada elde edilen sonuçlardan daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Yüzeylerin dalganın geliş açısından ve polarizasyonundan mümkün olduğunda bağımsız olması en önemli tasarım kriteridir.

Bu başlık altında band geçiren veya band durduran (yansıtıcı) frekans seçici yüzey uygulamaları geliştirilmiştir. Geliştirilen uygulamalarda ana amaç radar kesit alanın düşürülmesi ve iletişim sistemlerinin birbirini etkilemesini minimum hale getirilmesidir.

Segundo ve diğ. (2014) tarafından yapılan çalışmada açısız ve polarizasyondan bağımsız ultra geniş band bir band durduran frekans seçici yüzey önerilmiştir. Fraktal geometriye sahip 10 GHz etrafında geniş band bir band durduran yapı oluşturulmuştur (Segundo ve diğ., 2014). Söz konusu fraktal yapı önce x uzunluğunda kare yama bir yapıdan Wu (1995) tarafından gösterilen adımlar takip edilerek oluşturulmuştur.

Jha ve diğ. (2012) tarafından önerilen yapı ile 3 ve 22 GHz frekanslarında band geçiren filtre olarak çalışan bir yüzey tasarlanmıştır (Jha ve diğ., 2012). Söz konusu yüzeyin uydular üzerinde kullanılabileceği ifade edilmiştir.

Bharti ve diğ. (2013) tarafından gerçekleştirilen çalışmada çember şeklindeki bir yapının boyutlarının değiştirilerek 14-24 GHz band aralığında s parametrelerinin nasıl değiştiği ortaya konulmuştur (Bharti ve diğ., 2013). Söz konusu çalışmada CST programında yararlanılmıştır.

Gosh ve diğ. (2014) tarafından ortaya konulan çalışmada üç adet band durduran ve iki adet geniş band geçiren nokta bulunduran bir yapı önerilmiştir (Gosh ve diğ., 2014). Söz konusu yapı C ve X bandlarında çalıştığı için ileriki dönemde radyo iletişiminde, uydu haberleşmesinde, radarlarda veya geniş band haberleşmede kullanılabileceği ifade edilmiştir.

Khalilzadeh ve Mirsalehi (2012) tarafından gerçekleştirilen çalışmada iki bandlı bir band durduran dairesel yapı önerilmiştir (Khalilzadeh ve Mirsalehi, 2012). Dairesel olmasından dolayı açısal farklardan az etkilenmektedir.

Yang ve diğ. (2013) tarafından yapılan çalışmada üzerinde kontrol edilebilen bir diyot bulunan üç boyutlu bir frekans seçici yüzey önerilmiştir (Yang ve diğ., 2013). Bu sayede diyot değeri değiştirilerek 1,59 ile 3,34 GHz frekansları arasında istenen noktalarda rezonans noktaları elde edilebilmektedir.

Bera ve diğ. (2013) tarafından ortaya konulan çalışmada 3,2 GHz ve 10,45 GHz frekanslarında çalışan band durduran bir yüzey önerilmiştir (Bera ve diğ., 2013).

Yang ve diğ. (2012) tarafından yapılan çalışmada 1,5 GHz ve 2,75 GHz frekanslarında band geçiren bir yüzey önerilmiştir (Yang ve diğ., 2012).

Gosh ve diğ. (2013) tarafından gerçekleştirilen çalışmada geniş band bir frekans seçici yüzey önerilmiştir (Gosh ve diğ., 2013). Söz konusu yapı iki farklı merkez frekans etrafındaki geniş bölgede band durduran filtre gibi davranmaktadır.

Çiğdem ve diğ. (2014) tarafından önerilen kelebek şekilli birim hücre yapısı 20 GHz frekansında band durduran bir filtre gibi davranmaktadır (Çiğdem ve diğ., 2014). Hücrenin boyutlarındaki değişiklikler band durdurma noktasını 20 GHz etrafında değiştirebilmektedir.

Colasante ve diğ. (2010) tarafından yapılan çalışmada Ku band sinyallerini Ka Band sinyallerinden ayıran band geçiren dairesel bir frekans seçici yüzey tasarlanmıştır (Colasante ve diğ., 2010).

Li ve diğ. (2011) tarafından gerçekleştirilen çalışmada 12-20 GHz bandının tümünü kapsayan dört katmanlı bir band geçiren frekans seçici yüzey önerilmiştir (Li ve diğ., 2011).

### **3.3.3 Mevcut veya Yeni Optimizasyon Tekniklerinin Uygulanması**

Bu konuda yapılan çalışmalardan elde edilen yapılar daha sonra başka çalışmalarda kullanılmıştır. Frekans seçici yapı tasarımı en çok kullanılan optimizasyon yöntemi genetik algoritma yöntemidir.

Yılmaz ve Kuzuoğlu (2009) tarafından gerçekleştirilen çalışmada kare kapalı halka yapılarını optimize etmek için parçacık sürü optimizasyon yöntemi kullanılmıştır (Yılmaz ve Kuzuoğlu, 2009). Çalışma yapının modeli üzerinden gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon için C++ programlama dili kullanılmıştır.

Ohira ve diğ. (2004) tarafından yapılan çalışmada genetik algoritma kullanarak çok bandlı bir frekans seçici yüzey yapısı oluşturulmuştur (Ohira ve diğ., 2004). Her bir yapı küçük birimlere ayrılmış ve bu birimlerin rastgele birleşimlerinden kromozomlar oluşturulmuştur. İstenen frekans özellikleri doğrultusunda genetik algoritma işletilmiş ve temel frekans seçici yüzey yapılarından farklı bir yapı elde edilmiştir. Yeni yapının performansı temel yapılara göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

Weile ve diğ. (2001) tarafından hazırlanan çalışmada çok pencereli geniş band bir frekans seçici yüzeyin yansıtma katsayısının tespit edilmesi için interpolasyon yönteminin kullanılması önerilmiştir (Weile ve diğ., 2001). Bu suretle tek tek katmanların yansıtma katsayılarından yola çıkarak tüm geniş band çoklu katman yapının yansıtma katsayısı hesaplanır.

### **3.3.4 Soğurucu Yapıların Geliştirilmesi**

Bu başlık altındaki çalışmalarda geniş band, açıdan ve polarizasyondan bağımsız, ince yapılı soğurucu tasarımı hedeflenmektedir. En basit anlatımla tasarım, gelen dalgayı yansıtmadan tamamen içine almalı ve bünyesinde bu sinyali ısıya çevirerek yok etmelidir.

Askeri alanda en fazla soğurucuların fayda sağlayacağı düşünülmektedir. Yeterli band genişliği ile fiziksel inceliğe sahip soğurucu yüzey hava platformlarının radarlarda görünmez olmasını sağlayabilir. Ve bu tür yüzeyler mevcut görünmezlik teknolojisinin sağladığı gibi yalnızca monostatik radarlara karşı değil bistatik radarlara karşı da hava platformuna görünmezlik sağlayabilir. Bu konuda

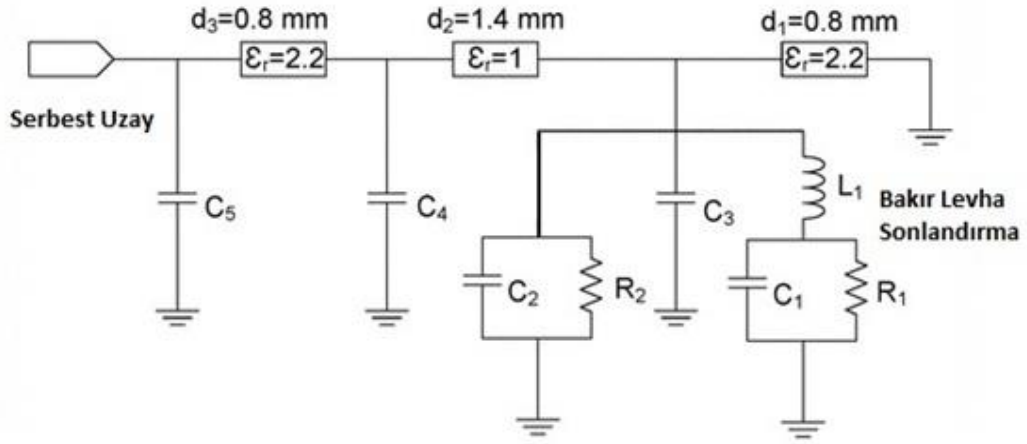
gerçekleştirilen çalışmaların bir kısmı band genişliğine odaklanırken bir kısmı ise fiziksel incelik konusunda iyileştirmeler yapmıştır.



#### 4. FREKANS SEÇİCİ YÜZEY TABANLI ÖZGÜN SOĞURUCU TASARIMI

Frekans seçici yüzey tabanlı elektromanyetik soğurucu tasarımımda önemli noktalar band genişliği, yapı kalınlığı ve çalışma frekansıdır. Bu üç özellik arasında optimum noktanın bulunması tasarımın ana hedefidir. Frekans seçici yüzey tabanlı elektromanyetik soğurucuların kalınlığı istenen band genişliğinin artması ile artar (Rozanov, 2000). Elektromanyetik soğurucunun performansı kalınlığın yanında ayrıca iletken tabakalar arasında kullanılan malzemeye ve yüzeydeki iletkenin geometrisine de bağlıdır. Literatürde yapılmış elektromanyetik soğurucu çalışmaları, kalınlık, polarizasyondan bağımsız olması, tek veya çok katmanlı olması, merkez frekans ve band genişliği gibi özellikleri nedeniyle birbirlerinden ayrılmaktadır. Elektromanyetik soğurucular alanında yapılan çalışmalar genel olarak kalınlık ile band genişliği arasında en optimum sonuca ulaşmaya çalışmaktadırlar.

Frekans seçici yüzey tabanlı elektromanyetik soğurucu tasarımımda temel olarak iki teknik kullanılmaktadır (Singh ve Srivastava, 2018). İlk teknikte birbirini izleyen tabakalar iletim hattı teorisi modellenmekte ve istenen frekans ile band genişliğine ulaşmaya kadar parametreler optimize edilmektedir (Kundu ve diğ., 2018). Literatürde bilinen yapıların analitik denklemleri kullanılarak iyileştirme gerçekleştirilmektedir. Söz konusu bilinen yapıların ardarda eklenmesini esas alan teknik sistematik bir şekilde uygulanabilir. Ancak bu teknik kullanılarak elde edilen yapı çok katmanlı ve kalınlığı fazla olmaktadır. Denklemi bilinen temel yapı katmanlarından oluşturulursa tüm frekans seçici yüzeyler Şekil 4.1’de gösterildiği gibi iletim hattı olarak modellenebilir. Şekil 4.1’de üç katmanlı bir yapının iletim hattı modellenmesi gösterilmektedir.  $d_1$ ,  $d_2$  ve  $d_3$  kalınlıklarındaki yarıiletken malzemelerin aralarında bakır temel yapı levhaları bulunmaktadır. En alt katman ise söz konusu yapı bir soğurucu olduğu için tamamen bakır levha ile kaplanmıştır. Tüm yapının denklemi model üzerinden kolaylıkla elde edilir. Denklemi istenen frekans bandı ile band genişliğine göre optimize etmek oldukça kolaydır.



**Şekil 4.1: Örnek İletim Hattı Modellemesi.**

Kundu ve diğ. (2018)'den uyarlanmıştır.

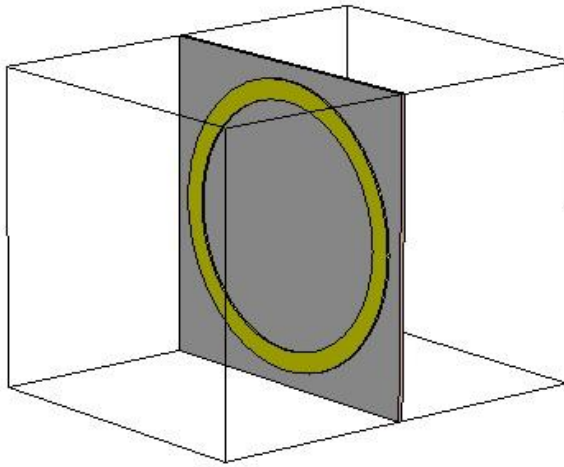
İkinci teknikte ise iletken yüzeydeki geometrik yapıların şekillendirilmesi ile bir yansıma paterninin oluşturulması üzerine kurulmuştur. Sistematik bir işleyişi olmamasına rağmen tek katmanlı elektromanyetik soğurucu elde etmek için kullanılabilecek en iyi tekniktir. Özgün bir yapı oluşturulması gerekliliği nedeniyle bu konudaki çalışma genellikle uzun süre almaktadır. Oluşturulan özgün geometrik yapının çeşitli ebat parametrelerinin optimize edilmesi ile sonuca ulaşılır. Elde performansı tanımlayacak herhangi bir denklem olmadığı için yapının iyileştirilmesi sezgisel iyileştirme yöntemleri ile gerçekleştirilmektedir. Bilinen iki yapının çeşitli formlarda bir araya getirilmesi ile tamamen özgün bir yapı ortaya çıkmaktadır. Artık bu yapı birleşimlerinin frekans cevabından tamamen farklı bir frekans cevabı sergilemektedir. Yaptığımız çalışma kapsamında ince tek katmanlı bir yapı oluşturulması hedeflendiği için ikinci teknik kullanılmıştır.

Tez çalışması kapsamında çok bandlı özgün soğurucu yapısı geliştirmesi ve geniş bandlı özgün soğurucu yapısı geliştirmesi olmak üzere iki farklı alanda çalışma yapılmıştır. Çok bandlı özgün soğurucu geliştirme çalışması kapsamında üç adet özgün yapı ortaya konmuştur. 1 mm kalınlığındaki ilk çok bandlı yapımız X bandda soğurma yapar iken, 0,8 mm kalınlığındaki ikinci çok bandlı yapımız X ve Ku banda soğurma yapmakta ve 1,6 mm kalınlığındaki üçüncü çok bandlı yapımız ise S,C,X ve Ku bandlarında soğurma yapabilmektedir. Söz konusu yapılar CST Microwave Studio kullanılarak simüle edilmiştir. Geniş bandlı özgün soğurucu geliştirme

çalışması kapsamında bir adet 1 mm kalınlığında X bandı ile Ku bandı arasında 1,1 GHz band genişliğinde özgün soğurucu yapı oluşturulmuştur. Çok bandlı yapıların aksine geniş band optimizasyonunu yapılabilmesi için söz konusu yapı için CST Microwave Studio ile elde edilen simülasyon sonuçları kullanılarak MATLAB üzerinde yapay sinir ağı modeli oluşturulmuştur. Söz konusu model yine MATLAB kullanılarak optimize edilmiştir.

Tez kapsamında geliştirilen birim yapıların simülasyonlarında CST (Computer Simulation Technology) Microwave Studio yazılım aracı kullanılmıştır. Söz konusu yazılım yüksek performanslı elektromanyetik simülasyon aracıdır. CST Microwave Studio yazılımı hesaplamalarını sonlu integral yöntemi (Finite Integral Technique) kullanarak gerçekleştirmektedir. Bu teknik yapının birçok küçük hücreye ayrılarak hesaplanmasını sağlamaktadır. CST Microwave Studio içerisinde iki adet çözücü bulunmaktadır. Bunlar zaman alan (time domain) ve frekans alan (frequency domain) çözücüleridir. Bu çözücülerden frekans alan çözücüsü frekans seçici yüzeyin (FSY) temel yapısını test etmek için en uygundur. Bu çözücü ile Floquet teoremi ile periyodik sınır koşulları doğrultusunda temel yapı analiz edilir.

CST Microwave Studio içerisinde bulunan ve Şekil 4.2’de gösterilen FSY şablonu sayesinde temel birim yapı sınır koşulları otomatik olarak uygulanır. Bu şablon ile x ve y boyutları girilerek periyodik temel birim yapısı oluşturulur. Z boyutu ise açık uzay (open space) seçilir. Z boyutu aynı zamanda sinyalin geliş ve gidiş yönleridir.



**Şekil 4.2: CST Microwave Studio Programında Bulunan FYS Şablonu Kullanılarak Gerçekleştirilen Örnek FYS Tasarımı.**

Ayrıca bu şablon içerisindeki theta ve phi açı değerleri girilerek sinyalin geliş açısı değiştirilebilmektedir. Bu sayede FSY tüm yönlerden gelen sinyaller ile analiz edilebilmektedir. Ayrıca TE ve TM modları da seçilerin sinyalin modu belirlenebilir.  $Z_{max}$  ile  $Z_{min}$  ise giriş çıkış portlarıdır. Bu port giriş çıkışlarının birbirine oranı saçılım (S scattering) parametrelerini verir. Program yardımıyla elde ettiğimiz bazı önemli saçılım parametreleri Tablo 4.1’de sunulmuştur.

**Tablo 4.1: Saçılım parametreleri.**

| S Parametresinin CST Gösterimi | S Parametresini Açıklaması |
|--------------------------------|----------------------------|
| $(S_{1max}, S_{1max})$         | TE mod yansıma katsayısı   |
| $(S_{2max}, S_{2max})$         | TM mod yansıma katsayısı   |
| $(S_{1min}, S_{1max})$         | TE mod iletim katsayısı    |
| $(S_{2min}, S_{2max})$         | TM mod iletim katsayısı    |

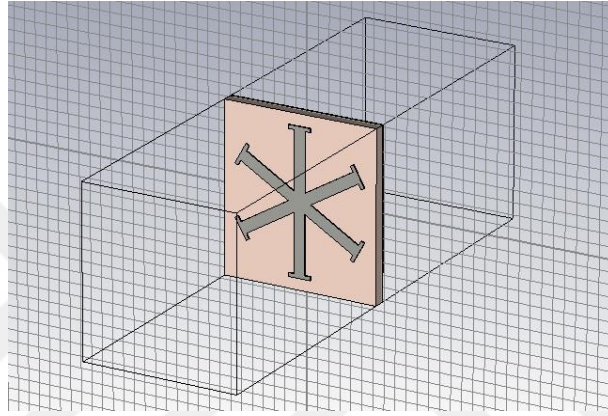
Şablon üzerinden açılan pencereler aracılığı ile gerçekleştirilen ayarlar sonrasında frekans alanı çözücüsü üzerinden temel birim yapısının analizi gerçekleştirilir. Analiz sonucunda S parametre değerleri elde edilir. Bu değerlerden bizim için önemli olan yansıma katsayısıdır.  $(S_{max}, S_{max})$ . Yapımızın arka kısmı iletken ile kaplı olduğu için iletim katsayısı  $(S_{min}, S_{max})$  zaten sıfır çıkacaktır. S parametreleri sonuçları bir boyutlu sonuçlardır. CST Microwave Studio bir boyutlu sonuçların yanında iki boyutlu sonuçlar da verebilir İki boyutlu sonuçlar bize elektrik ve manyetik alanlar ile akım yoğunlukları ve iletim modlarının etkisi konusunda bilgi vermektedir. Bu bilgi tasarımı iyileştirme konusunda bize referans olmaktadır.

CST Microwave Studio üzerinde bulunan parametre tarama (parameter sweep) özelliği sayesinde temel birim yapısının parametrelerini otomatik olarak değiştirebiliriz. Bu sayede uygun parametre değer uzay kümesini sınırlayabiliriz.

CST Microwave Studio bünyesinde bulunan optimizasyon aracı kullanılarak küçük boyutlu yapılar için optimizasyon işlemleri gerçekleştirilebilir. Büyük boyutlu yapılarda optimizasyon aracının döngüden çıkamadığı tespit edilmiştir.

CST Microwave Studio yazılımının gerçeğe uygun sonuçlar ürettiğini göstermek amacıyla literatürdeki bazı çalışmaların modeli oluşturulmuş ve simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Simülasyon sonuçları ölçüm sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırmalarda CST Microwave Studio yazılımının gerçek ölçümlere çok yakın sonuçlar ürettiği görülmüştür.

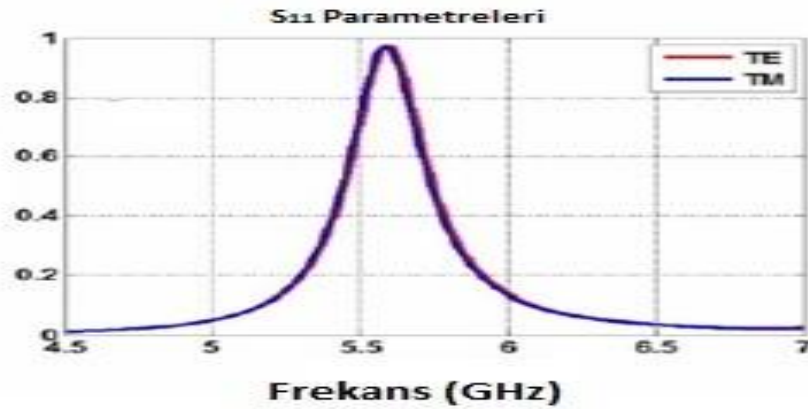
Alvarez ve diğ. (2015) tarafından tasarlanan yapı yayında verilen ebatlar kullanılarak Şekil 4.3'deki gibi tasarlanmıştır (Alvarez ve diğ., 2015).



**Şekil 4.3: Örnek FSS Yapısı-1.**

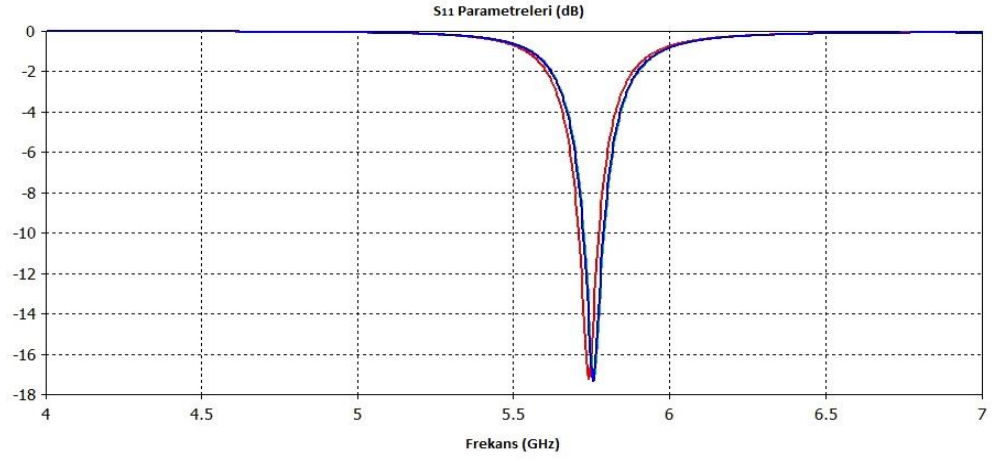
Alvarez ve diğ. (2015)'den uyarlanmıştır.

Tasarlanan yapı üzerinde gerçekleştirilen analiz sonucu ile ölçüm sonuçları Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'te görüldüğü üzere birbirlerini tutmaktadır.



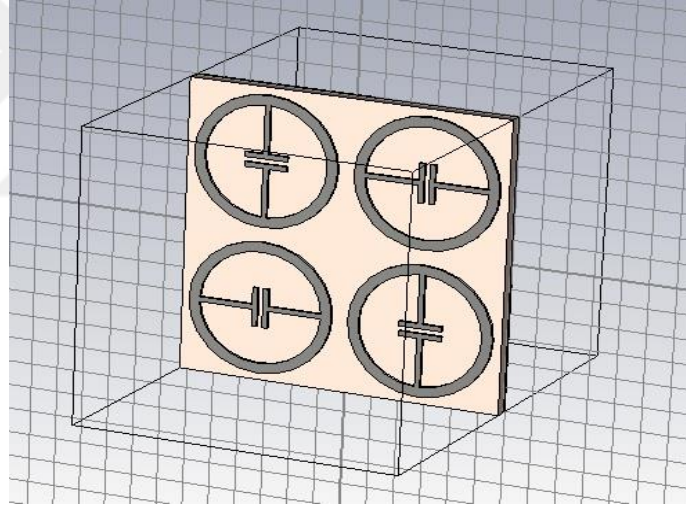
**Şekil 4.4: Örnek FSS Yapısı-1 Frekans Cevabı.**

Alvarez ve diğ. (2015)'den alınmıştır.



**Şekil 4.5: Örnek FSS Yapısı-1 CST Simülasyon Sonucu.**

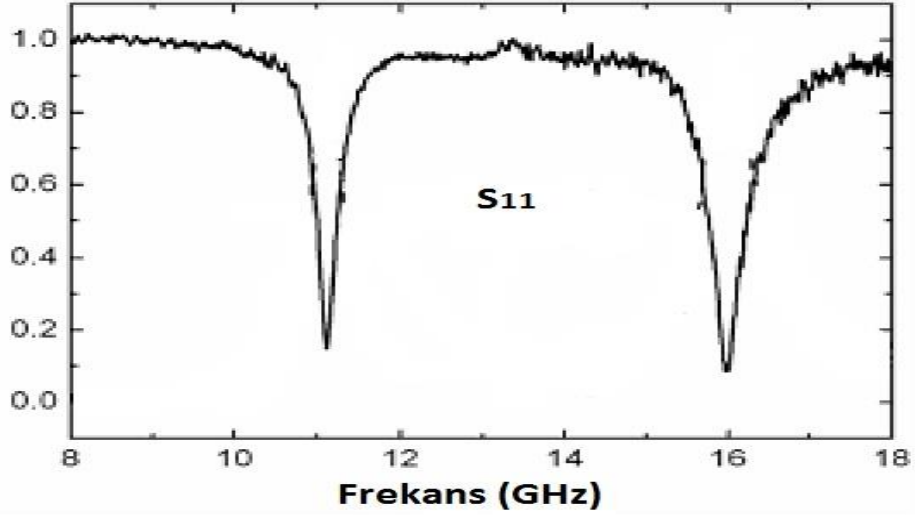
Li ve diğ. (2010) tarafından tasarlanan yapı yayında verilen ebatlar kullanılarak Şekil 4.6'daki gibi tasarlanmıştır (Li ve diğ., 2010).



**Şekil 4.6: Örnek FSS Yapısı-2.**

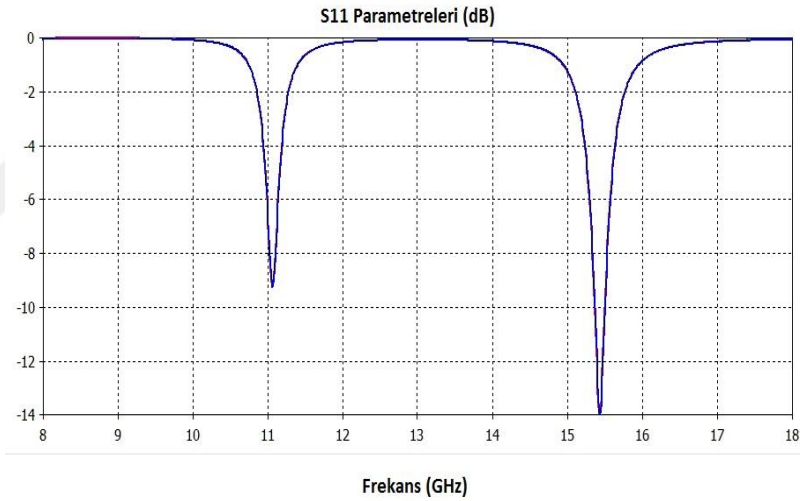
Li ve diğ. (2010)'dan uyarlanmıştır.

Tasarlanan yapı üzerinde gerçekleştirilen analiz sonucu ile ölçüm sonuları Şekil 4.7 ve Şekil 4.8'de görüldüğü üzere birbirlerini tutmaktadır.



**Şekil 4.7: Örnek FSS Yapısı-2 Frekans Cevabı.**

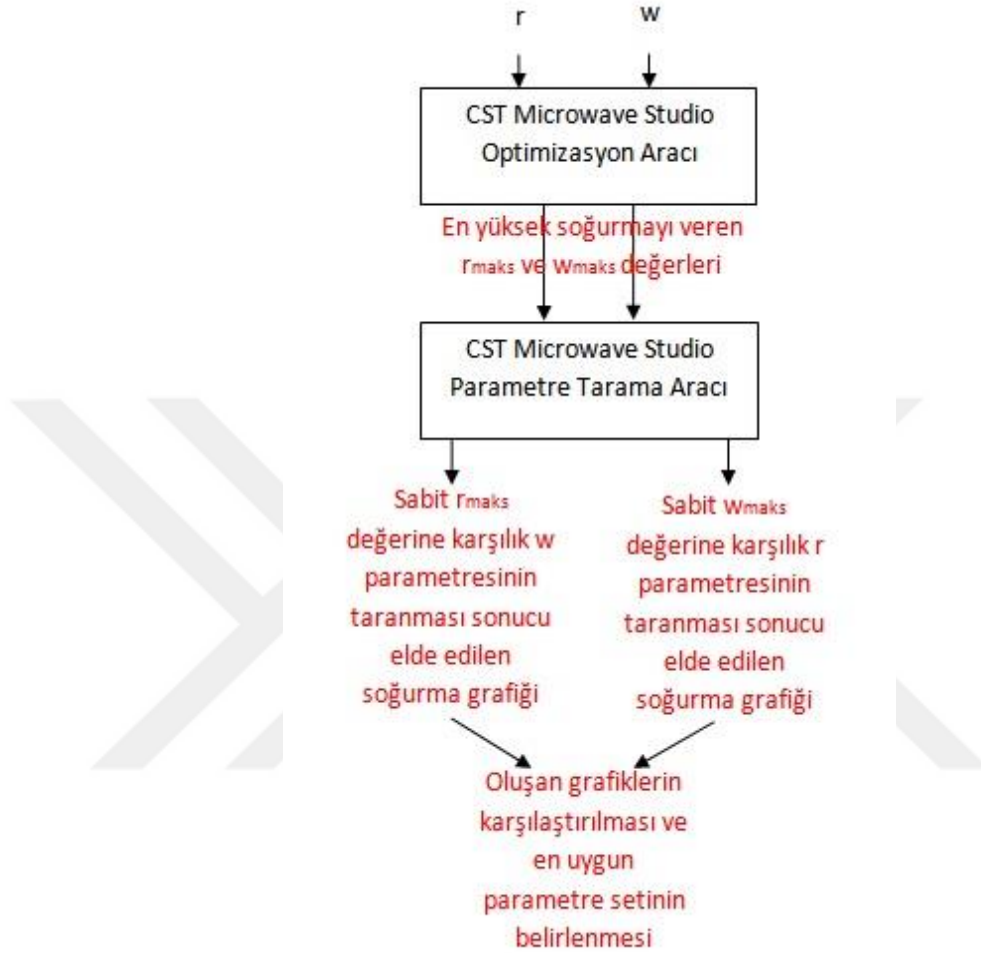
Li ve diğ. (2010)'dan alınmıştır.



**Şekil 4.8: Örnek FSS Yapısı-2 CST Simülasyon Sonucu.**

Tez çalışması kapsamında geliştirilen üç temel yapının daha önce belirlenen ana parametreleri CST Microwave Studio programı kullanılarak Şekil 4.9'da verilen akış şeması uygulanarak önce sınırlı yetenekli optimizasyon aracı kullanılarak en yüksek soğurma noktasını veren parametreler tespit edilmiştir. Daha sonra yine CST Microwave Studio programı içerisindeki araçlar kullanılarak parametrelerden biri sabit tutulmuş ve diğer parametreye parametre tarama uygulanmıştır. Aynı işlem parametreler değiştirilerek tekrarlanmıştır. Bu suretle sadece bir frekans noktasında

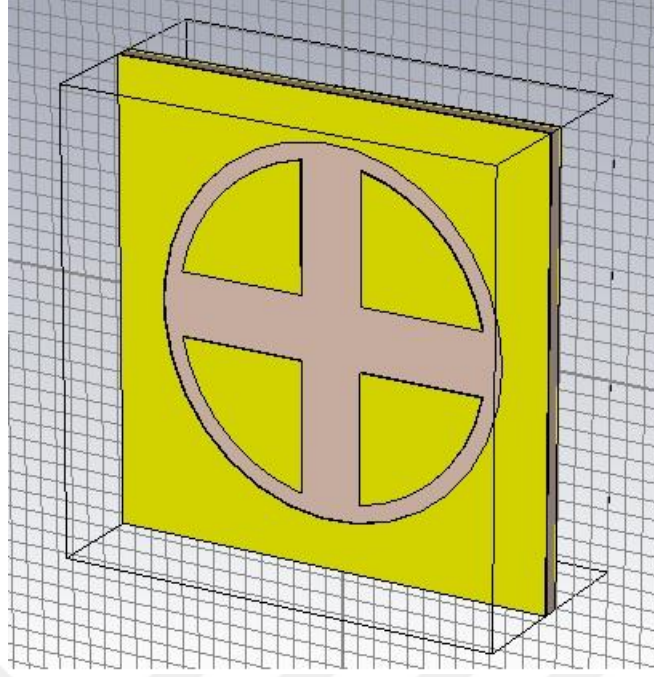
en yüksek soğurmayı verebilen CST Microwave Studio programı ile belli bir bandda soğurma grafiği elde edilebilmiştir.



Şekil 4.9: CST Microwave Studio Optimizasyon Akış Şeması.

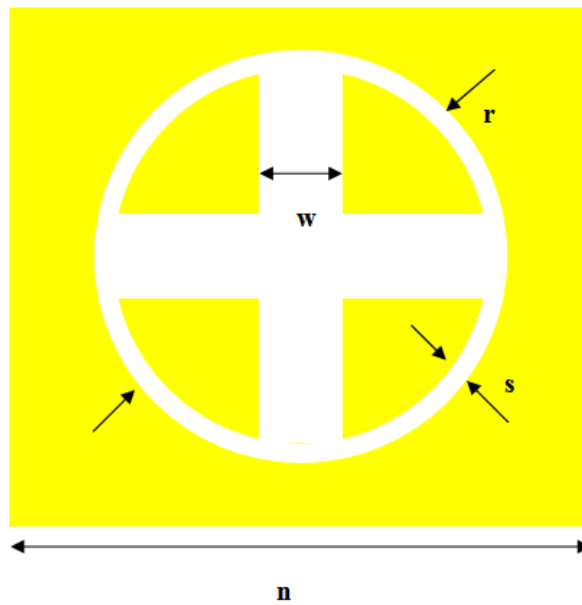
#### 4.1 FSY Tabanlı Çok Bandlı Özgün Soğurucu Yapısı (1 mm)

Frekans seçici yüzey tabanlı çok bandlı (X) soğurucu yapısı oyuk şekiller kullanılarak özgün olarak tasarlanmıştır (Can ve Aydemir, 2019). Özgün yapı bakır bir levha üzerinde çember oyuk ile merkezi bağlantılı birbirine dik iki dipol oyuk birleşiminden oluşturulmuştur. Özgün tasarım ile çok bandlı bir soğurucu yapısı elde edilmiştir. Şekil 4.10'da gösterilen yapı CST Microwave Studio yazılım aracı kullanılarak tasarlanmış ve parametre tarama yöntemi ile en uygun parametreler elde edilmiştir.



**Şekil 4.10: 1 mm Çok Bandlı Soğurucu Birim Yapısı.**

Yapımızın performansını direkt etkileyen parametreler parametre tarama yöntemi ile belirlenmiştir. Şekil 4.11’de gösterilen söz konusu parametreler CST Microwave Studio yazılım aracında bulunan optimizasyon araçları kullanılarak optimize edilmiştir.



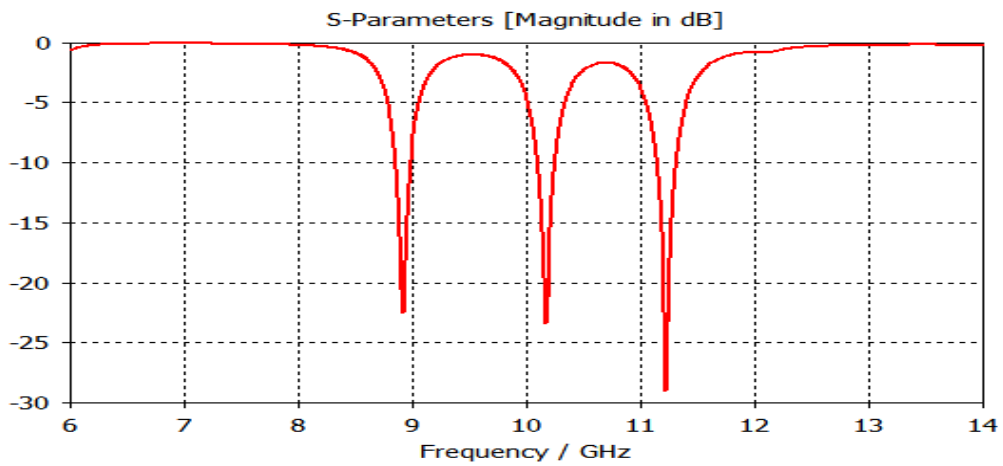
**Şekil 4.11: 1 mm Çok Bandlı Soğurucu Birim Yapısı Parametreleri.**

Şekil 4.11’de gösterilen parametreler sırasıyla  $n$  birim yapı boyutunu,  $r$  çember oyuk yapının çapını,  $s$  çember oyuk yapının genişliğini,  $w$  dipol oyuk yapının genişliğini ve  $h$  yapının toplam kalınlığını vermektedir. Yapılan parametre tarama çalışmasının sonucunda söz konusu parametrelerden  $w$  parametresinin sonucu en çok değiştirdiği tespit edilmiştir. Bu parametrelerin optimizasyonu sonucunda Tablo 4.2’de verilen parametre değerlerine ulaşılmıştır.

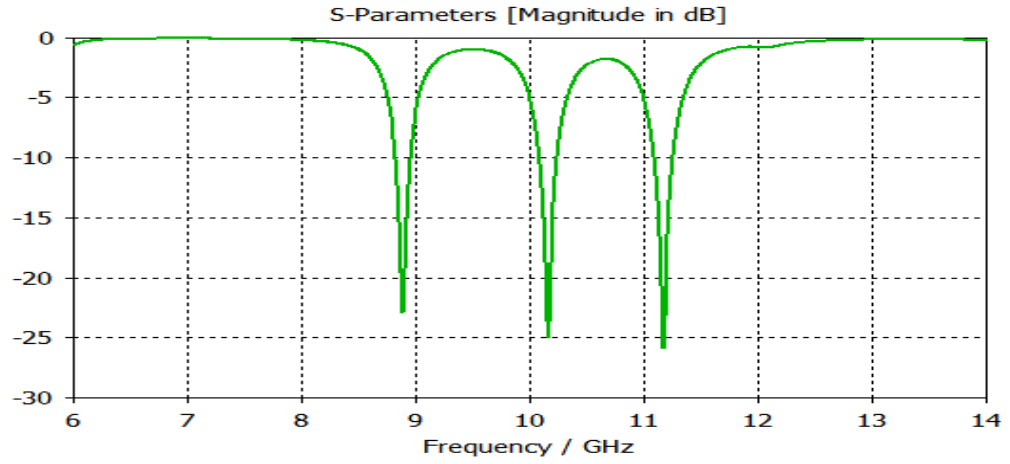
**Tablo 4.2: 1 mm Çok Bandlı Soğurucu Birim Yapısı Parametre Değerleri.**

| Parametre Adı | Parametre Değeri (mm) |
|---------------|-----------------------|
| $n$           | 26                    |
| $r$           | 20,6                  |
| $s$           | 1                     |
| $w$           | 1,8                   |
| $h$           | 1                     |

Optimize edilen parametreler kullanılarak gerçekleştirilen simülasyonlar sonucunda Şekil 4.12’de verilen TE polarizasyon soğurma grafiği ile Şekil 4.13’de verilen TM polarizasyon soğurma grafiği elde edilmiştir.

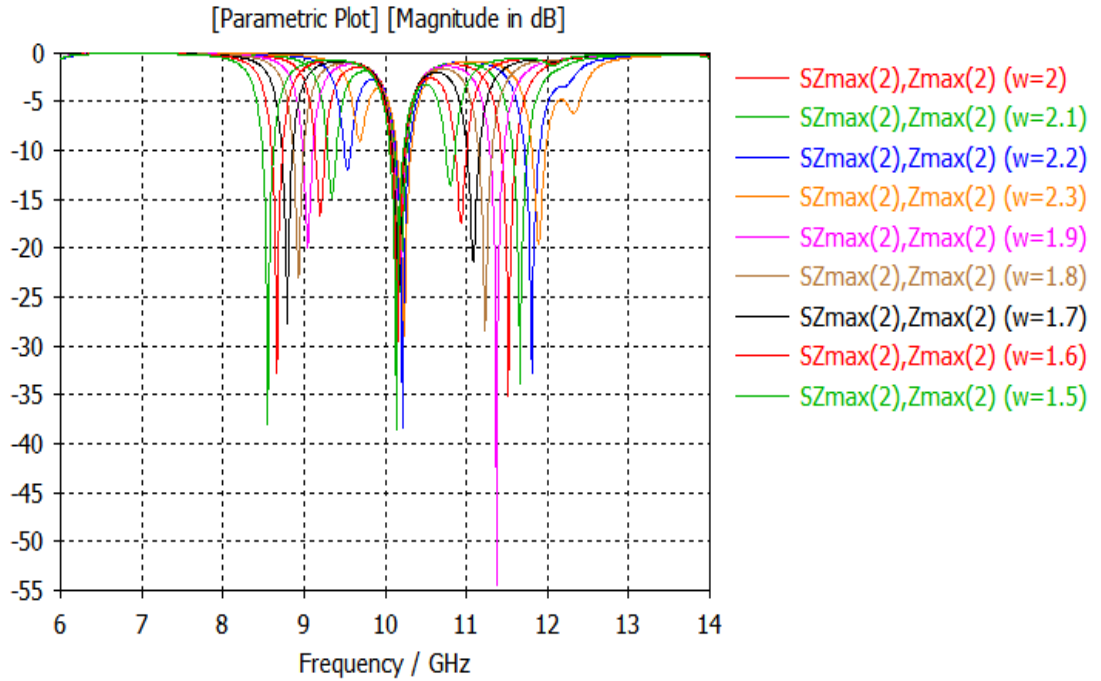


**Şekil 4.12: 1 mm Çok Bandlı Soğurucu TE Polarizasyon Grafiği.**



**Şekil 4.13: 1 mm Çok Bandlı Soğurucu TM Polarizasyon Grafiği.**

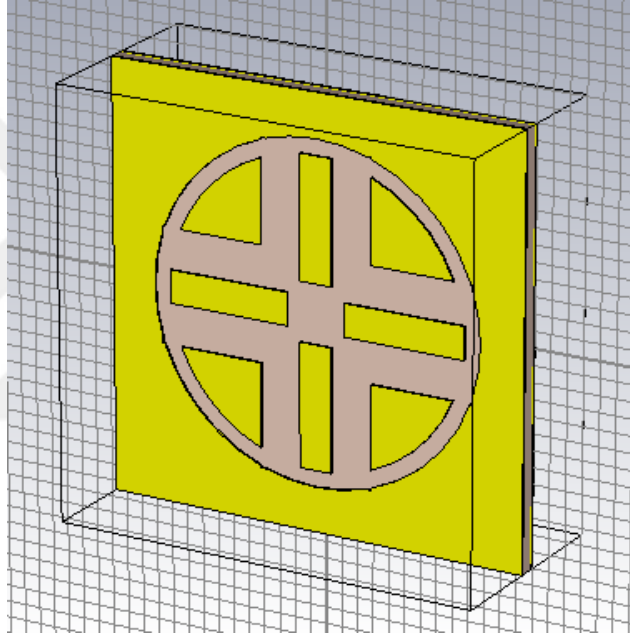
Bir adet etkin parametresi olan birinci özgün yapımız, sözkonusu parametrenin Şekil 4.14 de gösterildiği gibi değiştirilmesi ile X band boyunca istenen frekansta soğurma gerçekleştirebilmektedir. Bu tasarımda esneklik sağlamaktadır.



**Şekil 4.14: 1 mm Çok Bandlı Soğurucu Grafiğinin w Parametresine Göre Değişimi**

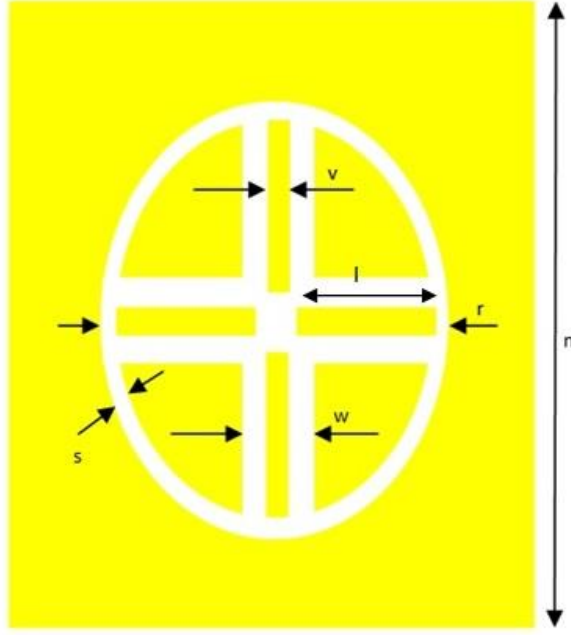
#### 4.2 FSY Tabanlı Çok Bandlı Özgün Soğurucu Yapısı (0,8 mm)

Frekans seçici yüzey tabanlı çok bandlı (X ve Ku) soğurucu yapısı oyuk şekiller kullanılarak özgün olarak tasarlanmıştır. Özgün yapı bakır bir levha üzerinde çember oyuk ile merkezi bağlantılı birbirine dik iki dipol oyuk birleşimine dört adet dipol yama eklenmesi ile oluşturulmuştur. Özgün tasarım ile çok bandlı bir soğurucu yapısı elde edilmiştir. Şekil 4.15’de gösterilen yapı CST Microwave Studio yazılım aracı kullanılarak tasarlanmış ve parametre tarama yöntemi ile en uygun parametreler elde edilmiştir.



**Şekil 4.15: 0,8 mm Çok Bandlı Soğurucu Birim Yapısı.**

Yapımızın performansını direkt etkileyen parametreler parametre tarama yöntemi ile belirlenmiştir. Şekil 4.16’da gösterilen söz konusu parametreler CST Microwave Studio yazılım aracında bulunan optimizasyon araçları kullanılarak optimize edilmiştir.



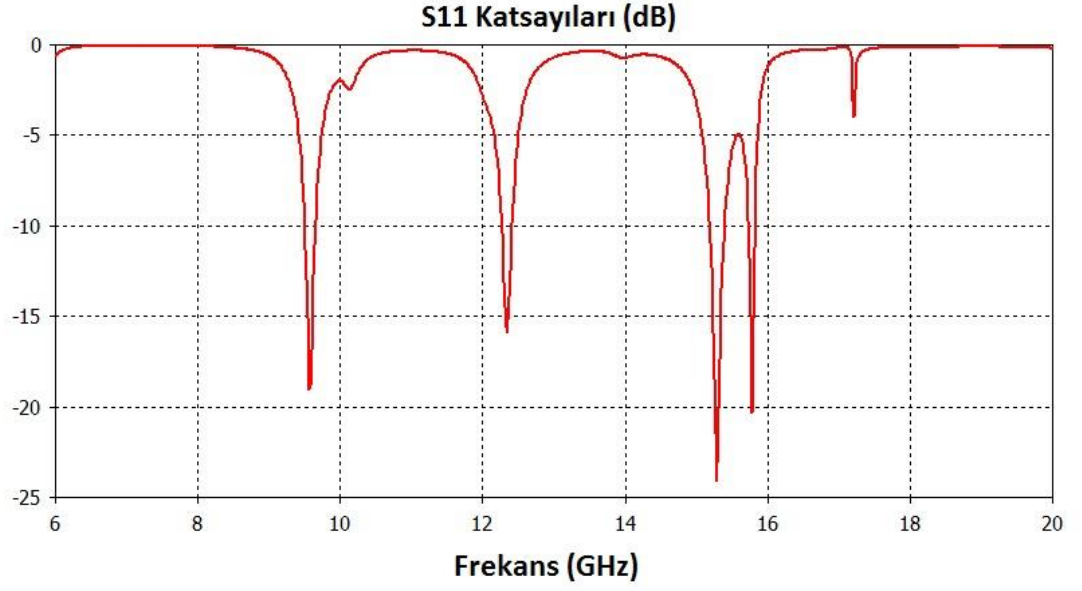
**Şekil 4.16: 0,8 mm Çok Bandlı Soğurucu Birim Yapısı Parametreleri.**

Şekil 4.16'd1 gösterilen parametreler sırasıyla  $n$  birim yapı boyutunu,  $r$  çember oyuk yapının çapını,  $s$  çember oyuk yapının genişliğini,  $w$  dipol oyuk yapının genişliğini,  $l$  dipol yapının uzunluğunu,  $v$  dipol yapının genişliğini ve  $h$  yapının toplam kalınlığını vermektedir. Yapılan parametre tarama çalışmasının sonucunda söz konusu parametrelerden  $w$  ile  $v$  parametrelerinin sonucu en çok değiştirdiği tespit edilmiştir. Bu parametrelerin optimizasyonu sonucunda Tablo 4.3'de verilen parametre değerlerine ulaşılmıştır.

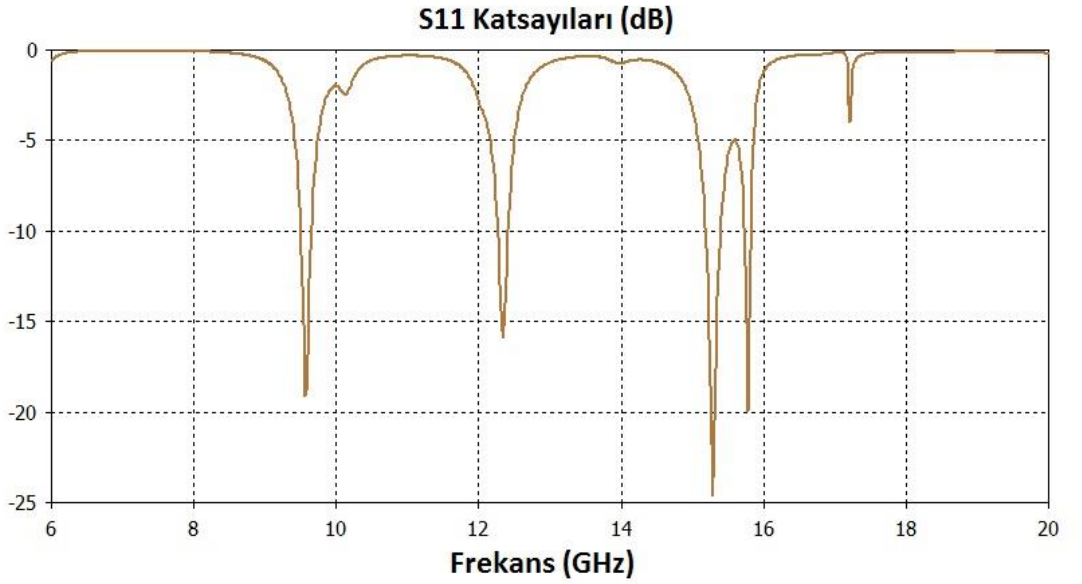
**Tablo 4.3: 0,8 mm Çok Bandlı Soğurucu Birim Yapısı Parametre Değerleri.**

| Parametre Adı | Parametre Değeri (mm) |
|---------------|-----------------------|
| $n$           | 26                    |
| $r$           | 20,6                  |
| $s$           | 1                     |
| $w$           | 7                     |
| $l$           | 7,5                   |
| $v$           | 2                     |
| $h$           | 0,8                   |

Optimize edilen parametreler kullanılarak gerçekleştirilen simülasyonlar sonucunda Şekil 4.17’de verilen TE polarizasyon soğurma grafiği ile Şekil 4.18’de verilen TM polarizasyon soğurma grafiği elde edilmiştir.



**Şekil 4.17: 0,8 mm Çok Bandlı Soğurucu TE Polarizasyon Grafiği.**

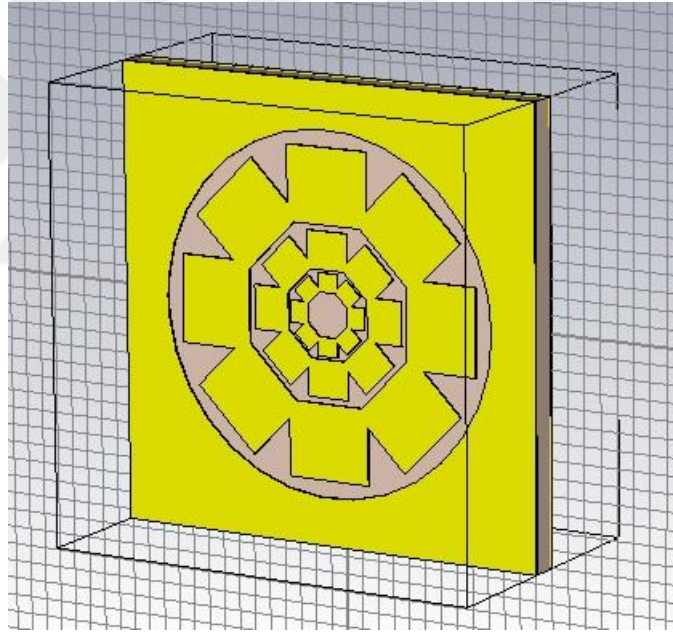


**Şekil 4.18: 0,8 mm Çok Bandlı Soğurucu TM Polarizasyon Grafiği.**

Tasarlanan özgün yapının literatürdeki mevcut çok bandlı yapılara göre öne çıkan özellikleri mevcuttur.

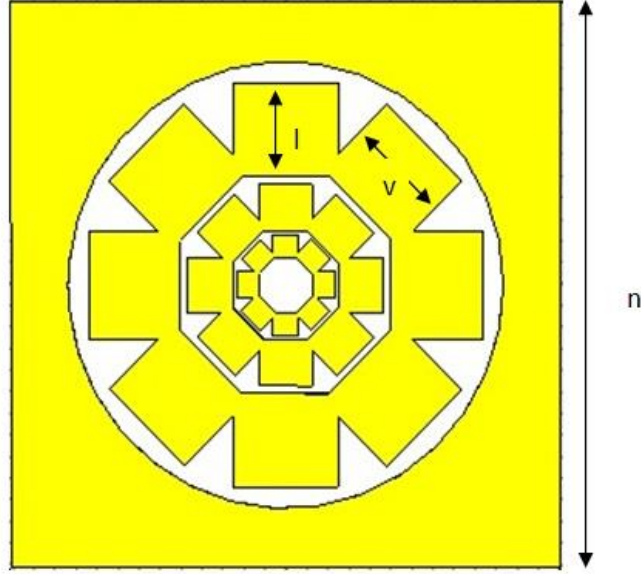
#### 4.3 FSY Tabanlı Çok Bandlı Özgün Soğurucu Yapısı (1,6 mm)

Frekans seçici yüzey tabanlı çok bandlı (S,C,X ve Ku) soğurucu yapısı oyuk ve yama şekiller kullanılarak özgün olarak tasarlanmıştır. Özgün yapı bakır bir levha üzerinde çember oyuk ile sekizgen bir merkez etrafında birbirine bağlanmış dikdörtgen yama zinciri ile bu zincirin iki defa 0,5 oranında küçültülmüş kopyalarının birleşiminden oluşur. Özgün tasarım ile çok bandlı bir soğurucu yapısı elde edilmiştir. Şekil 4.19’da gösterilen yapı CST Microwave Studio yazılım aracı kullanılarak tasarlanmış ve parametre tarama yöntemi ile en uygun parametreler elde edilmiştir.



**Şekil 4.19: 1,6 mm Çok Bandlı Soğurucu Birim Yapısı.**

Yapımızın performansını direkt etkileyen parametreler parametre tarama yöntemi ile belirlenmiştir. Şekil 4.20’de gösterilen söz konusu parametreler CST Microwave Studio yazılım aracında bulunan optimizasyon araçları kullanılarak optimize edilmiştir.



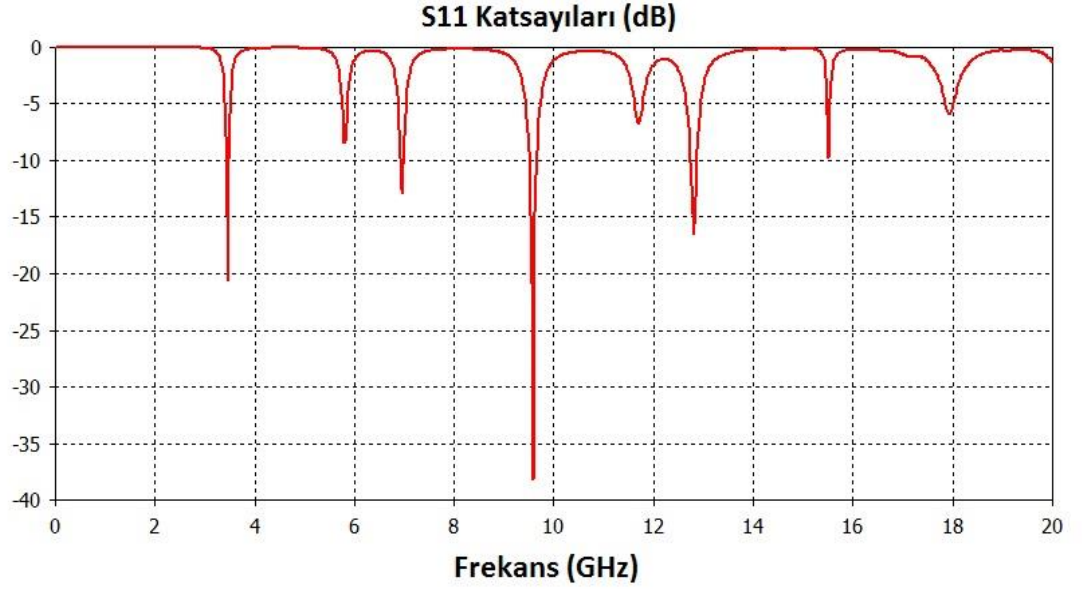
**Şekil 4.20: 1,6 mm Çok Bandlı Soğurucu Birim Yapısı Parametreleri.**

Şekil 4.20’de gösterilen parametreler sırasıyla  $n$  birim yapı boyutunu,  $r$  çember oyuk yapının çapını,  $l$  dikdörtgen yama uzunluğunu,  $v$  dikdörtgen yama genişliğini ve  $h$  yapının toplam kalınlığını vermektedir. Yapılan parametre tarama çalışmasının sonucunda söz konusu parametrelerden  $l$  ile  $v$  parametrelerinin sonucu en çok değiştirdiği tespit edilmiştir. Bu parametrelerin optimizasyonu sonucunda Tablo 4.4’de verilen parametre değerlerine ulaşılmıştır.

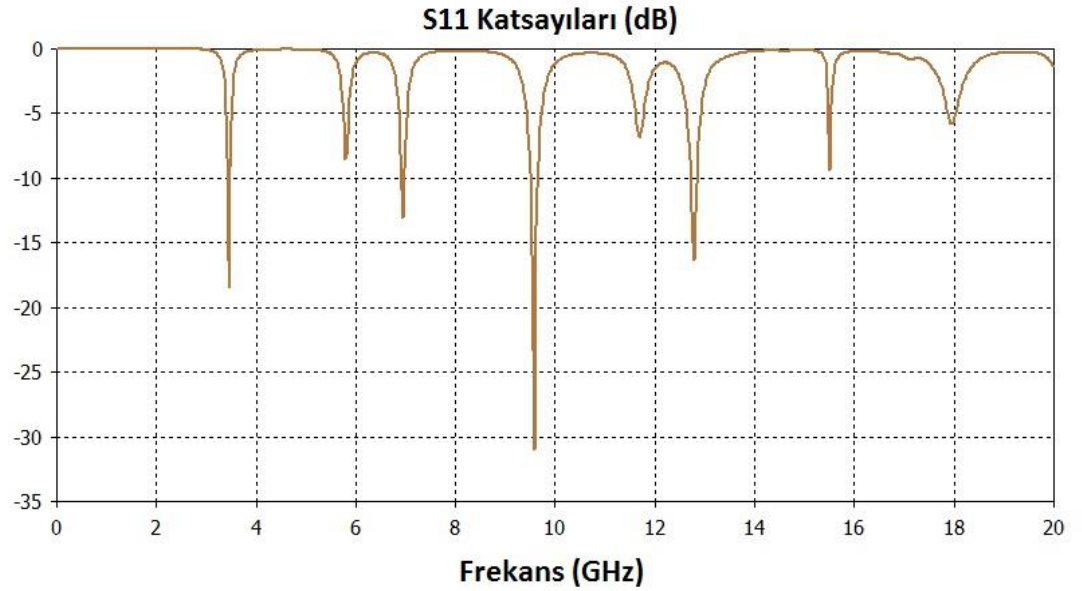
**Tablo 4.4: 1,6 mm Çok Bandlı Soğurucu Birim Yapısı Parametre Değerleri.**

| Parametre Adı | Parametre Değeri (mm) |
|---------------|-----------------------|
| $n$           | 26                    |
| $r$           | 20,6                  |
| $l$           | 4,3                   |
| $v$           | 2,5                   |
| $l$           | 7,5                   |
| $h$           | 1,6                   |

Optimize edilen parametreler kullanılarak gerçekleştirilen simülasyonlar sonucunda Şekil 4.21’da verilen TE polarizasyon soğurma grafiği ile Şekil 4.22’de verilen TM polarizasyon soğurma grafiği elde edilmiştir.



Şekil 4.21: 1,6 mm Çok Bandlı Soğurucu TE Polarizasyon Grafiği.



Şekil 4.22: 1,6 mm Çok Bandlı Soğurucu TM Polarizasyon Grafiği.

Çok bandlı özgün soğurucu yapısı geliştirmesi çalışması kapsamında oluşturulan üç özgün soğurucu yapısının literatürdeki benzer çalışmalar ile karşılaştırması Tablo-4.5’de sunulmuştur. Söz konusu tabloda görüleceği üzere oluşturulan özgün yapılar benzerlerine göre daha iyi özelliklere sahiptir.

**Tablo 4.5: Çok Bandlı Soğurucu Birim Yapılarının Literatürdeki Benzer Çalışmalar ile Karşılaştırılması.**

| Çalışma               | Kalınlık | Soğurma Frekansları                                                   | Frekans Bandları                      | Polarizasyondan Bağımsızlık |
|-----------------------|----------|-----------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------|
| Önerilen Yapı 1       | 1 mm     | 8,8 GHz<br>10,2 GHz<br>11,2 GHz                                       | X Band                                | Evet                        |
| Önerilen Yapı 2       | 0,8 mm   | 9,5 GHz<br>12,5 GHz<br>15,2 GHz<br>15,8 GHz                           | X Band<br>Ku Band                     | Evet                        |
| Önerilen Yapı 3       | 1,6 mm   | 3,5 GHz<br>6,9 GHz<br>9,6 GHz<br>12,9 GHz<br>15,5 GHz                 | S Band<br>C Band<br>X Band<br>Ku Band | Evet                        |
| Munaga ve diğ. (2018) | 2mm      | 3,16 GHz<br>4,05 GHz<br>7,35 GHz<br>8,65GHz<br>11,88 GHz<br>13,12 GHz | S Band<br>C Band<br>X Band<br>Ku Band | Evet                        |
| Sharma ve diğ. (2016) | 1,6 mm   | 3,1 GHz<br>4,6 GHz<br>9,5 GHz                                         | S Band<br>C Band<br>X Band            | Evet                        |

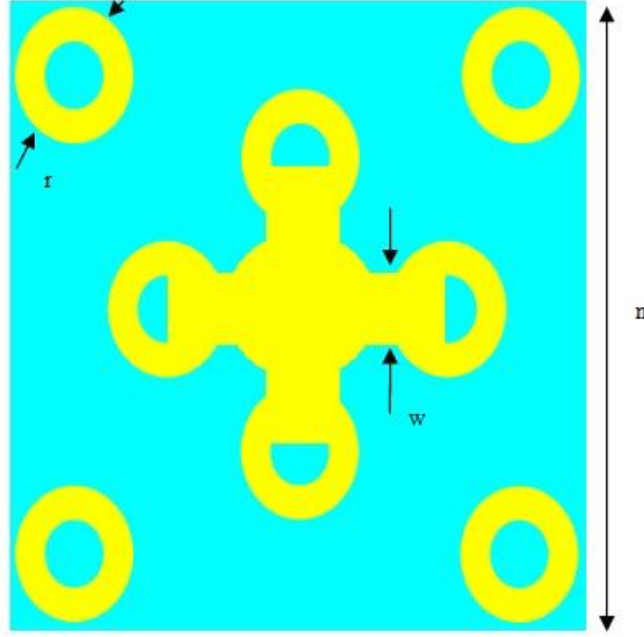
**Tablo 4.5 – devam.**

| <b>Çalışma</b>        | <b>Kalınlık</b> | <b>Soğurma Frekansları</b>                     | <b>Frekans Bandları</b>     | <b>Polarizasyondan Bağımsızlık</b> |
|-----------------------|-----------------|------------------------------------------------|-----------------------------|------------------------------------|
| Ren ve diğ. (2017)    | 1,6 mm          | 7,05 GHz<br>8,43 GHz<br>11,54 GHz<br>13,53 GHz | C Band<br>X Band<br>Ku Band | Evet                               |
| Chen ve diğ. (2016)   | 0,6 mm          | 9,85 GHz<br>13,05 GHz<br>14,93 GHz             | X Band<br>Ku Band           | Evet                               |
| Mishra ve diğ. (2017) | 0,8 mm          | 4,19 GHz<br>9,34 GHz<br>11,48 GHz              | C Band<br>X Band            | Evet                               |
| Ma ve diğ. (2017)     | 0,8 mm          | 8,1 GHz<br>10,7 GHz<br>14,2 GHz                | X Band<br>Ku Band           | Evet                               |
| Zhang ve diğ. (2017)  | 1.1 mm          | 8,24 GHz<br>12,58 GHz<br>19,68 GHz             | X Band<br>Ku Band<br>K Band | Hayır                              |

#### **4.4 FSY Tabanlı Geniş Bandlı Özgün Soğurucu Yapısı**

Frekans seçici yüzey tabanlı geniş bandlı soğurucu yapısı yama şekiller kullanılarak özgün olarak tasarlanmıştır. Özgün yapı FR-4 bir levha üzerinde 1 adet daire plaka yama, 8 adet çember yama, 1 adet yatay dipol yama ve 1 adet dikey dipol yamanın birleşiminden oluşur.

Temel birim, söz konusu yapılarının Şekil 4.23'deki gibi konumlandırılması ile birim yapısı oluşturulmuştur.



**Şekil 4.23: Birim yapı**

Şekil 4.23’de gösterilen birim yapıda bir çok parametre bulunmaktadır. Band genişliğine en çok etki eden iki parametre belirlenmiştir. Söz konusu parametreler;

- $r$  daire ve çember plaka çapı
- $w$  dipol kalınlığı

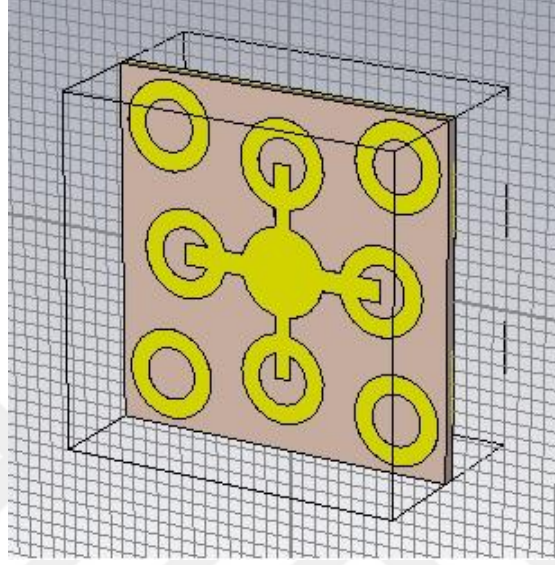
İkili yöntem ile elde edilen parametre değerleri Tablo 1.’de verilmiştir.

**Tablo 4.6: İkili Yöntem İle Elde Edilen Parametre Değerleri**

| Parametre | Parametre Değeri (mm) |
|-----------|-----------------------|
| $r$       | 3,3                   |
| $w$       | 0,6                   |

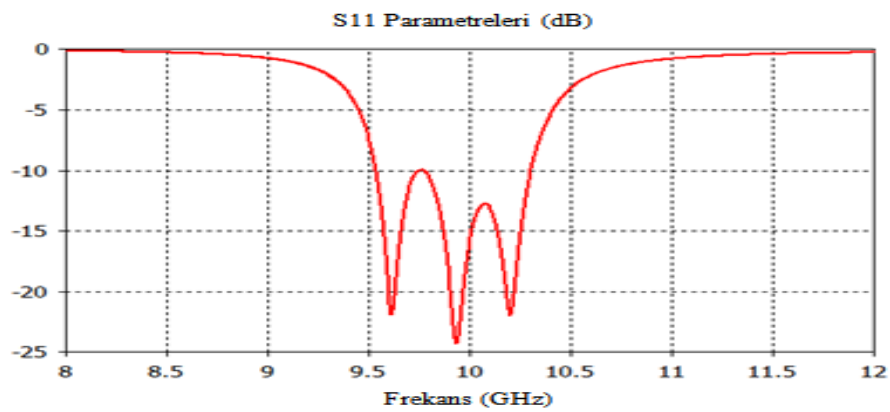
Elde edilen birim yapı Şekil 4.24’te gösterilmiştir. Buradan görüleceği üzere yapımızda bulunan üç ayrı geometrik şekil iki ana parametreye göre değişim göstermektedir. Dipol yapıların birbirinin aynı olması analiz edilecek parametre sayısını ikiye düşürmüş ve yapının CST Microwave Studio ile optimizasyonunu gerçekleştirilebilir hale getirmiştir. Ancak bu özellik söz konusu yapının band

genişliğini belli bir seviyede tutmuştur. Band genişliğine etki edecek daha fazla parametrenin tasarımı dahil edilmesi optimizasyon için yetenekleri sınırlı CST Microwave Studio optimizasyon aracı haricinde optimizasyon tekniklerinin uygulanmasını gerektirirken band genişliğinin arttırılmasını sağlayacaktır.

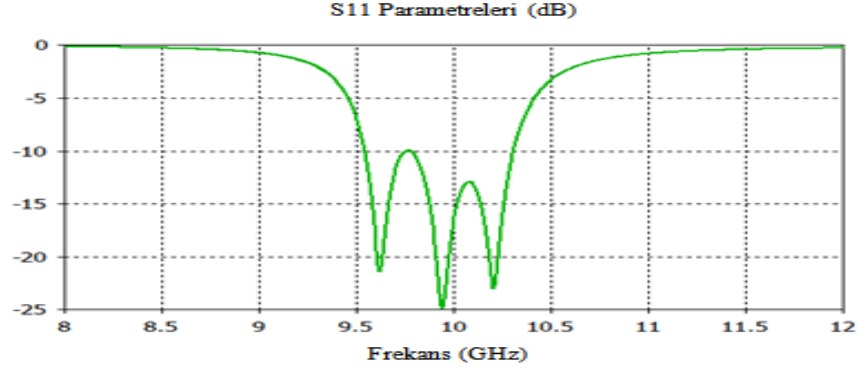


**Şekil 4.24: Geniş Band Soğurucu Birim Yapısı**

Tasarlanan taslak yapı üzerinde CST Microwave Studio programı kullanılarak yapılan optimizasyon ve devamında gerçekleştirilen parametre taraması neticesinde Şekil 4.25 ve Şekil 4.26’da gösterildiği gibi 0,8 GHz band genişliğinde bir soğurma elde edilmiştir.

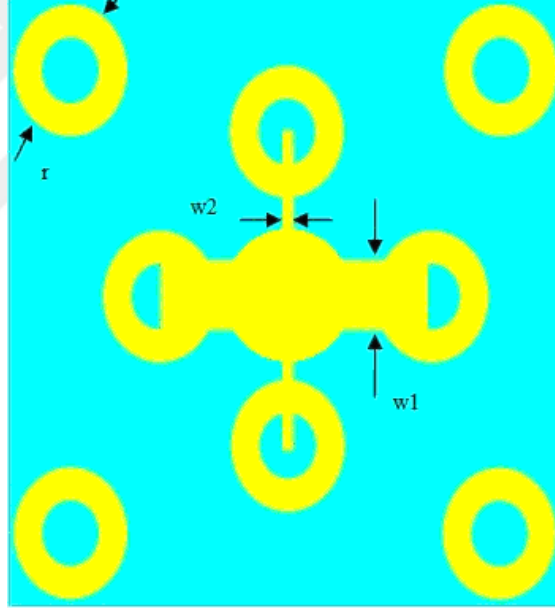


**Şekil 4.25: Geniş Bandlı Soğurucu TE Soğurma Grafiği**



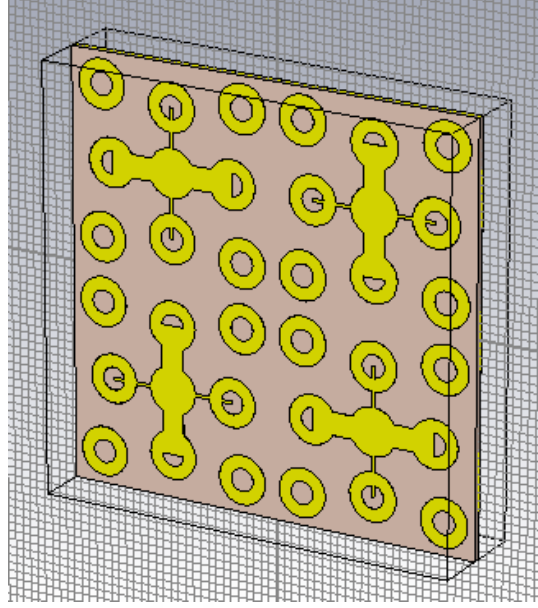
**Şekil 4.26: Geniş Bandlı Soğurucu TM Soğurma Grafiği**

Elde edilen band genişliğini arttırmak için birim yapısı Şekil 4.27’deki gibi yeniden düzenlenmiştir.



**Şekil 4.27: Yeniden Düzenlenmiş Birim Yapı.**

Şekil 4.27’de gösterildiği gibi yapımızda artık iki yerine üç adet parametre bulunmaktadır. Dairesel ve çember yapıların yarıçapı  $r$ , yatay dipolün kalınlığı  $w1$  ve dikey dipolün kalınlığı  $w2$  parametreleri ile ifade edilmiştir. İki farklı dipol kalınlığının band genişliğini arttırdığı tespit edilmiştir (Can ve Aydemir, 2018). Yapının polarizasyondan bağımsızlığını korumak için birim yapı Şekil 4.28’de gösterildiği gibi dörtlü grup halinde yeniden dizayn edilmiştir.



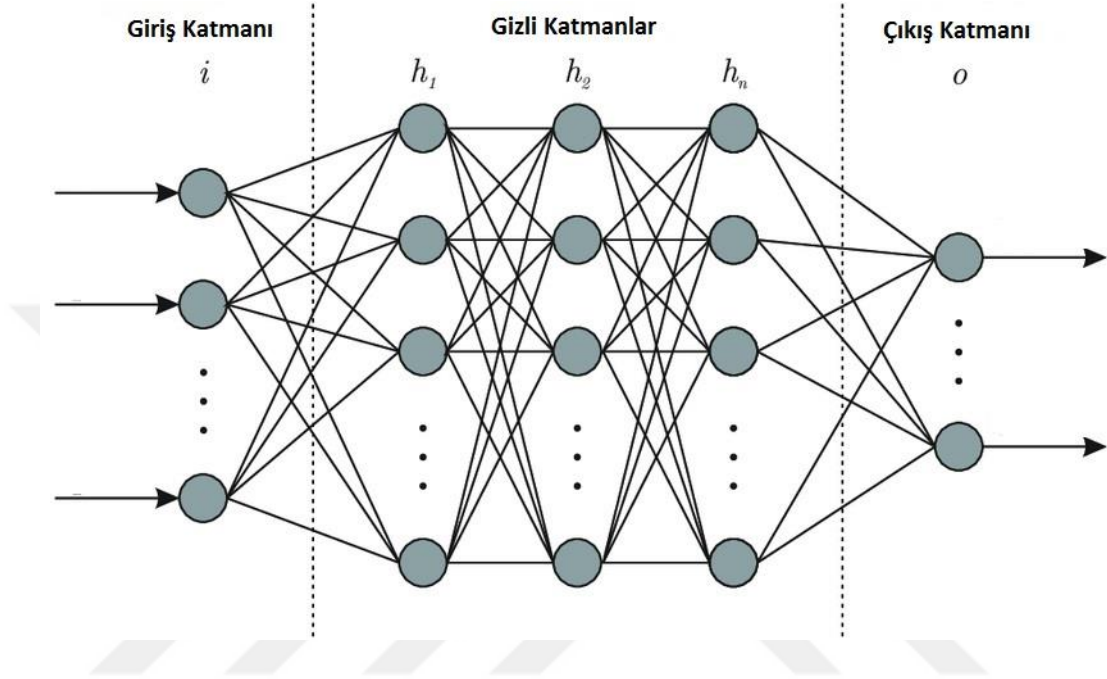
**Şekil 4.28: Frekans Seçici Yüzey Tabanlı Elektromanyetik Soğurucu Dörtlü Yapı.**

Yeni dizayn edilen yapı 56 x 56 mm ebatlarında 1 mm kalınlığında FR4 dielektrik malzemenin iki bakır levha arasına yerleştirilmesi ile oluşturulmuştur. Yüzeyin arkasına geçişi engellemek için arkadaki levha tamamen bakır ile kaplanmıştır. Öndeki levhada frekans seçici yapı bulunmaktadır. Frekans seçici yapı, 32 adet kapalı eğri yapı, 4 adet plaka ve 8 adet dipol yapının birleşiminden oluşturulmuştur. Tüm bu yapıların maksimum soğurma band genişliğini verecek şekilde birbirine göre optimize edilmesi gerekmektedir. Birim yapının ebadının büyük olması CST Microwave Studio programı ile analizinin uzun sürede tamamlanmasına yol açmaktadır. Ayrıca CST Microwave Studio programı maksimum yansıma katsayısını veren parametre setini tespit etmemizi sağlarken maksimum band genişliğini veren parametre setini tespit etmemize imkan vermemektedir. Bu nedenlerden dolayı optimizasyon işlemi, yapının Genel Regresyon Yapay Sinir Ağı modeli üzerinde Parçacık Sürü Optimizasyonu yöntemi kullanılarak MATLAB ortamında gerçekleştirilmiştir.

#### **4.4.1 Genel Regresyon Yapay Sinir Ağı**

Analitik olarak modellenmesi zor olan alanlarda modelleme yapay sinir ağları kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Yapay sinir ağları biyolojik sinir sistemindeki nöronların çalışma prensibinden yola çıkılarak oluşturulmuş yapılardır. Yapay sinir

ağları eğitim dataları kullanılarak eğitilirler. Bu eğitim sonucunda oluşturulan model gerçek modelin fonksiyonlarını yerine getirebilir. Yapay sinir ağları birbirine bağlı nöron tabakalarından oluşur. Tabakalar, Şekil 4.29’da gösterildiği gibi giriş katmanı, gizli katmanlar ile çıkış katmanından oluşur.



**Şekil 4.29: Yapay Sinir Ağı Katmanları.**

Tek gizli katmanlı yapay sinir ağının çıkışı

$$Y = (W_{HO}h(xW_{IH} + b_I)) + b_O \quad (4.1)$$

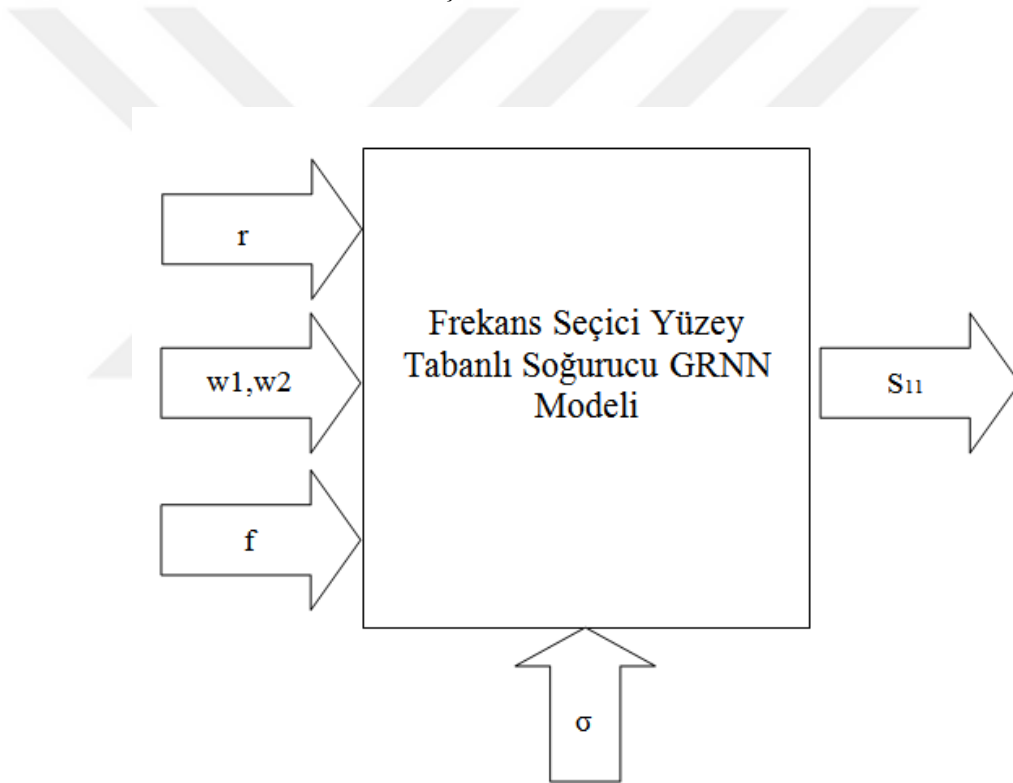
denkleminde (4.1) verilir. Y çıkışı, WHO gizli katman ile çıkış katmanı arasındaki ağırlık matrisini, h gizli katman aktivasyon fonksiyonunu, x giriş vektörünü, WIH giriş katmanı ile gizli katman arasındaki ağırlık matrisini, b<sub>I</sub> giriş katmanı sapma vektörünü ve b<sub>O</sub> çıkış katmanı sapma vektörünü verir. Yapay sinir ağının eğitimi, temelde yukarıdaki denklemde (4.1) verilen tüm parametrelerin aşağıda verilen hata fonksiyonu denkleminde (4.2) göre denklem (4.3) ile modifiye edilmesidir.

$$E = \frac{1}{N} \sum_{I=1}^N (y - t)^2 \quad (4.2)$$

$$\theta_{yeni} = \theta_{eski} - \lambda \frac{\partial E}{\partial \theta} \quad (4.3)$$

Yukarıdaki denklemlerde (4.2), (4.3) N kullanılan eğitim datası sayısını, y yapay sinir ağı çıkışını, t istenen çıkışını,  $\theta$  yapay sinir ağının parametrelerini, E ise öğrenme oranını verir. Genel regresyon sinir ağı (GRNN), tek gizli katmanlı bir yapıdır (Specht, 1991). Gizli katmanda Gaussian aktivasyon fonksiyonunu kullanır. GRNN eğitimi diğer yapay sinir ağlarına göre oldukça kolaydır ve daha kısa sürede tamamlanır. GRNN’de sadece bir defaya mahsus yayılım parametresinin ( $\sigma$ ) belirlenmesi gerekirken diğer sinir ağlarında ağırlık matrisleri, sapma vektörleri ve öğrenme oranlarının devamlı güncellenmesi gerekmektedir. GRNN diğer yapay sinir ağlarına göre hata oranı daha düşüktür.

Bir önceki paragrafta verilen GRNN’nin tüm üstün özellikleri dikkate alınarak modelimizde GRNN kullanılmıştır.



**Şekil 4.30: FSY Tabanlı Soğurucu GRNN Modeli**

Oluşturulan Frekans Seçici Yüzey Tabanlı Soğurucu GRNN Modeli Şekil 4.30’da gösterildiği gibi 4 giriş değerine karşılık bir çıkış üretecek şekilde tasarlanmıştır. Giriş değerleri dairesel yapıların çapı (r), yatay dipolün kalınlığı (w1), dikey dipolün kalınlığı (w2) ve frekans olarak belirlenmiştir.

GRNN modelini eğitmek için giriş ve girişe karşılık gelen çıkış verilerine ihtiyaç bulunmaktadır. Söz konusu giriş değerlerine karşılık gelen çıkış değerlerini oluşturmak için CST Microwave Studio Programı kullanılmıştır. Tablo 1’de dairesel yapıların çapı 2,6mm olacak şekilde ayarlanmış ve tüm dipol kalınlıkları yapıya uygulanarak yansıma katsayıları ( $S_{11}$ ) elde edilmiştir. Aynı şekilde Tablo 4.7-4.10 arasında sırasıyla dairesel yapıların çapı 3mm, 3,4mm ve 3,8mm olacak şekilde ayarlanarak dipol kalınlıklarına göre yansıma katsayıları elde edilmiştir. Toplamda 164 set giriş verisine ( $r, w1, w2$ ) karşılık 164 set çıkış verisi ( $S_{11}$ ) elde edilmiştir.

**Tablo 4.7:  $r=2,6$  mm için değişen  $w$  değerlerine göre yapılan 28 simülasyon**

|           |        |     |     |     |     |     |     |     |  |
|-----------|--------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|--|
| r=2,6(mm) | w1(mm) | 0,2 | 0,6 | 1   | 1,4 | 1,8 | 2,2 | 2,6 |  |
|           | w2(mm) | 0,2 |     |     |     |     |     |     |  |
|           |        | 0,6 | 0,6 |     |     |     |     |     |  |
|           |        | 1   | 1   | 1   |     |     |     |     |  |
|           |        | 1,4 | 1,4 | 1,4 | 1,4 |     |     |     |  |
|           |        | 1,8 | 1,8 | 1,8 | 1,8 | 1,8 |     |     |  |
|           |        | 2,2 | 2,2 | 2,2 | 2,2 | 2,2 | 2,2 |     |  |
|           |        | 2,6 | 2,6 | 2,6 | 2,6 | 2,6 | 2,6 | 2,6 |  |

**Tablo 4.8:  $r=3$  mm için değişen  $w$  değerlerine göre yapılan 36 simülasyon**

| $r=3(\text{mm})$ | $w1(\text{mm})$ | 0,2 | 0,6 | 1   | 1,4 | 1,8 | 2,2 | 2,6 | 3 |
|------------------|-----------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|---|
|                  | $w2(\text{mm})$ | 0,2 |     |     |     |     |     |     |   |
|                  |                 | 0,6 | 0,6 |     |     |     |     |     |   |
|                  |                 | 1   | 1   | 1   |     |     |     |     |   |
|                  |                 | 1,4 | 1,4 | 1,4 | 1,4 |     |     |     |   |
|                  |                 | 1,8 | 1,8 | 1,8 | 1,8 | 1,8 |     |     |   |
|                  |                 | 2,2 | 2,2 | 2,2 | 2,2 | 2,2 | 2,2 |     |   |
|                  |                 | 2,6 | 2,6 | 2,6 | 2,6 | 2,6 | 2,6 | 2,6 |   |
|                  |                 | 3   | 3   | 3   | 3   | 3   | 3   | 3   | 3 |

**Tablo 4.9:  $r=3,4$  mm için değişen  $w$  değerlerine göre yapılan 45 simülasyon**

| $R=3,4(\text{mm})$ | $W1(\text{mm})$ | 0,2 | 0,6 | 1   | 1,4 | 1,8 | 2,2 | 2,6 | 3   | 3,4 |
|--------------------|-----------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|                    | $W2(\text{mm})$ | 0,2 |     |     |     |     |     |     |     |     |
|                    |                 | 0,6 | 0,6 |     |     |     |     |     |     |     |
|                    |                 | 1   | 1   | 1   |     |     |     |     |     |     |
|                    |                 | 1,4 | 1,4 | 1,4 | 1,4 |     |     |     |     |     |
|                    |                 | 1,8 | 1,8 | 1,8 | 1,8 | 1,8 |     |     |     |     |
|                    |                 | 2,2 | 2,2 | 2,2 | 2,2 | 2,2 | 2,2 |     |     |     |
|                    |                 | 2,6 | 2,6 | 2,6 | 2,6 | 2,6 | 2,6 | 2,6 |     |     |
|                    |                 | 3   | 3   | 3   | 3   | 3   | 3   | 3   | 3   |     |
|                    |                 | 3,4 | 3,4 | 3,4 | 3,4 | 3,4 | 3,4 | 3,4 | 3,4 | 3,4 |

**Tablo 4.10:  $r=3,8$  mm için değişen  $w$  değerlerine göre yapılan 55 simülasyon**

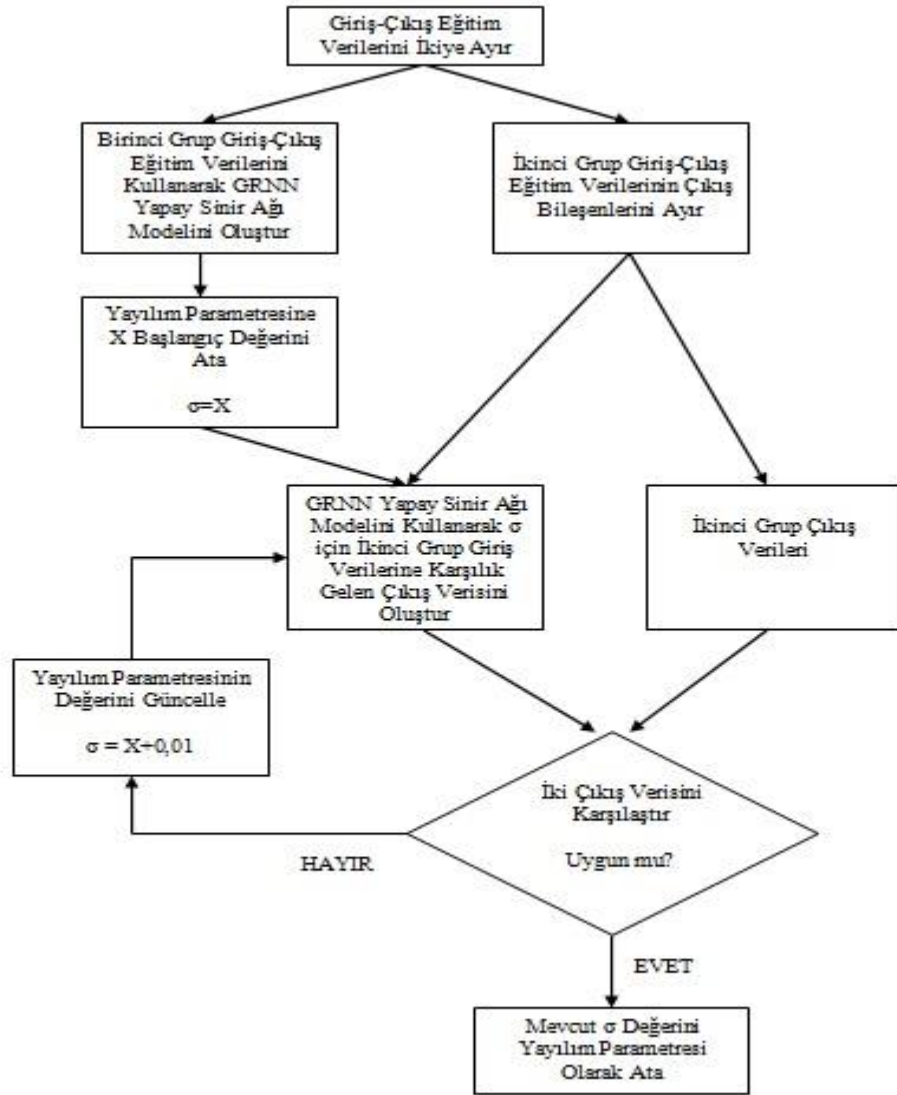
|           |        |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|-----------|--------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| r=3,8(mm) | w1(mm) | 0,2 | 0,6 | 1   | 1,4 | 1,8 | 2,2 | 2,6 | 3   | 3,4 | 3,8 |     |
|           | w2(mm) | 0,2 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|           |        | 0,6 | 0,6 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|           |        | 1   | 1   | 1   |     |     |     |     |     |     |     |     |
|           |        | 1,4 | 1,4 | 1,4 | 1,4 |     |     |     |     |     |     |     |
|           |        | 1,8 | 1,8 | 1,8 | 1,8 | 1,8 |     |     |     |     |     |     |
|           |        | 2,2 | 2,2 | 2,2 | 2,2 | 2,2 | 2,2 |     |     |     |     |     |
|           |        | 2,6 | 2,6 | 2,6 | 2,6 | 2,6 | 2,6 | 2,6 |     |     |     |     |
|           |        | 3   | 3   | 3   | 3   | 3   | 3   | 3   | 3   |     |     |     |
|           |        | 3,4 | 3,4 | 3,4 | 3,4 | 3,4 | 3,4 | 3,4 | 3,4 | 3,4 |     |     |
|           |        | 3,8 | 3,8 | 3,8 | 3,8 | 3,8 | 3,8 | 3,8 | 3,8 | 3,8 | 3,8 | 3,8 |

CST Microwave Studio programı kullanılarak Tablo 4.11’de bir kısmı örnek olarak verilen yansıma katsayıları çıkış verileri olarak kullanılmak üzere elde edilmiştir.

**Tablo 4.11: Eğitimde Kullanılan Verilerin Örnek Bir Kısımı.**

|                         |              |        |        |        |     |
|-------------------------|--------------|--------|--------|--------|-----|
| Parametreler            | <b>r</b>     | 3      | 3      | 3      | ... |
|                         | <b>w1</b>    | 0,4    | 0,4    | 0,4    | ... |
|                         | <b>w2</b>    | 0,4    | 0,8    | 1,2    | ... |
| Frekans Değerleri (GHz) | <b>10,5</b>  | -1,094 | -1,107 | -1,405 | ... |
|                         | <b>10,54</b> | -1,159 | -1,207 | -1,413 | ... |
|                         | <b>10,58</b> | -1,234 | -1,314 | -1,519 | ... |
|                         | <b>10,62</b> | -1,309 | -1,402 | -1,670 | ... |
|                         | ...          | ...    | ...    | ...    | ... |

Elde edilen eğitim çiftlerinin (giriş ve çıkış verileri) kullanılabilmesi için modelimize uygun yayılım parametresinin ( $\sigma$ ) tespit edilmesi gerekmektedir. Gereğinden büyük seçilecek bir yayılım parametresi ( $\sigma$ ), çıkışın eğitim datalarının ortalamasını veren düz bir çizgi halini almasına sebep olur. Gereğinden küçük seçilecek bir  $\sigma$  ise, çıkışın salınımlı bir çizgi halini almasına sebep olur. Yayılım parametresini ( $\sigma$ ) doğru olarak seçmemiz durumunda yapay sinir ağı modelimiz eğitim dataları ile öğrendiği şekilde her girişe doğru çıkış üretebilir. Dağılım parametresinin belirlenmesi için Şekil 4.31’de detayı verilen ve Spect (1991) tarafından önerilen teknik kullanılmıştır.



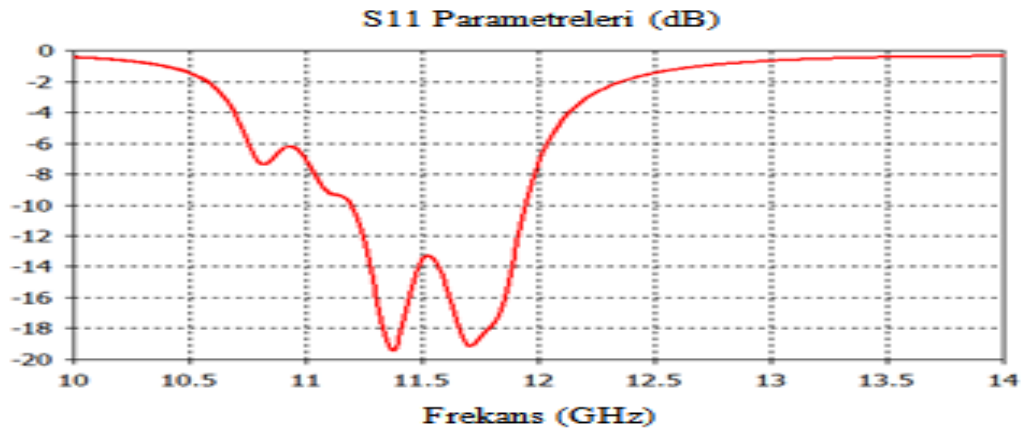
**Şekil 4.31: Dağılım Parametresi Tespit Tekniği Akışı.**

Spect (1991)’den uyarlanmıştır.

Söz konusu teknik doğrultusunda elde edilen tüm çıktıların ( $S_{11}$  değerleri) yarısı silinmiştir. Daha sonra dağılım parametresi 0,01'den başlayarak 0,01 arttırılarak her bir dağılım parametresine karşılık bir adet yapay sinir ağı modeli, silinmeyen eğitim çiftleri ( $r, w_1, w_2, f$  ile bunlara karşılık gelen  $S_{11}$ ) kullanılarak MATLAB üzerinde oluşturulmuştur. Oluşturulan her bir modele silinen girdi setleri ( $r, w_1, w_2$  ve  $f$ ) uygulanmış ve silinen çıktı setine ( $S_{11}$ ) en yakın değerleri veren dağılım parametresi olarak  $\sigma=0,1$  tespit edilmiştir.

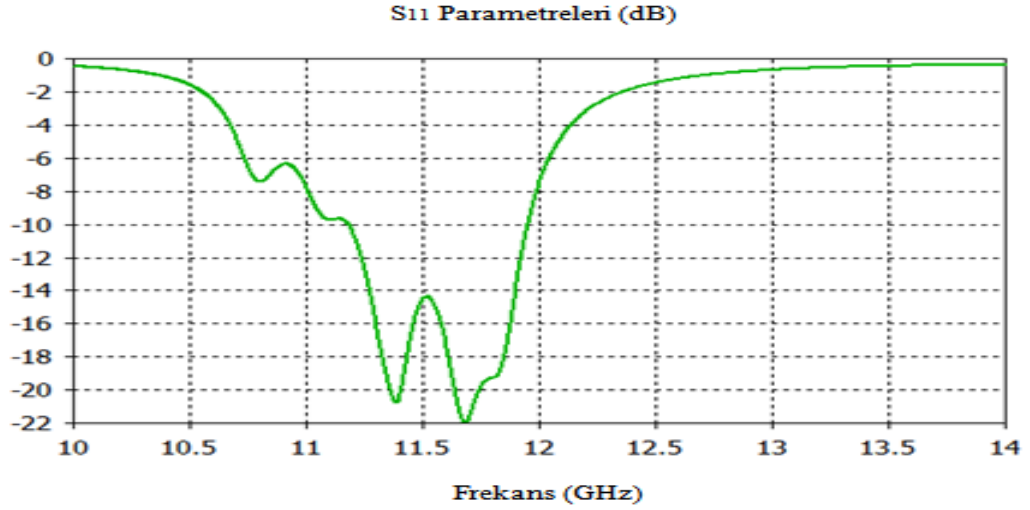
En uygun yayılım parametresi tespit edildikten sonra Frekans Seçici Yüzey Tabanlı Soğurucu GRNN Modeli tasarımı tamamlanmıştır. Frekans Seçici Yüzey Tabanlı Soğurucu GRNN Modeline giriş olarak verilen verilere karşılık çıkış olarak yansıma katsayıları setleri elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde Frekans Seçici Yüzey Tabanlı Soğurucu GRNN Modelinin CST Microwave Studio ile elde edilen sonuçlara çok yakın sonuçlar ürettiği tespit edilmiştir.

Örnek olarak vermek gerekirse CST Microwave Studio ile  $r=3\text{mm}$ ,  $w_1=0,4\text{mm}$  ve  $w_2=1\text{mm}$  parametre değerleri kullanılarak yapılan simülasyon sonucunda elde edilen yansıma katsayılarının grafiği Şekil 3.32'de gösterilmiştir.



**Şekil 4.32:  $r=3\text{mm}$ ,  $w_1=0,4\text{ mm}$  ve  $w_2=1\text{mm}$  için simülasyon sonucu.**

MATLAB üzerinde bulunan Frekans Seçici Yüzey Tabanlı Soğurucu GRNN modeline  $r=3\text{mm}$ ,  $w_1=0,4\text{mm}$  ve  $w_2=1\text{mm}$  girdileri verilerek elde edilen soğurma grafiği Şekil 4.33'de verilmiştir.



**Şekil 4.33: GRNN modelinin oluşturduğu sonuç.**

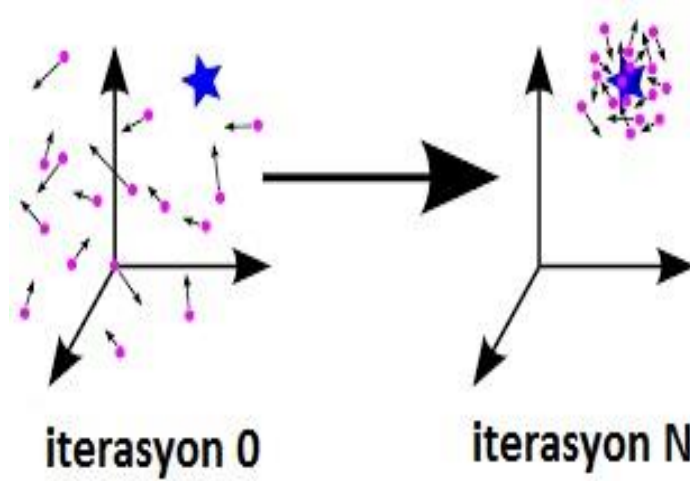
Söz konusu grafiklerden görüldüğü üzere Frekans Seçici Yüzey Tabanlı Soğurucu GRNN modeli simülasyon sonuçları ile benzer sonuçları vermektedir. Bu sonuçlar Frekans Seçici Yüzey Tabanlı Soğurucu GRNN modelinin yapının optimizasyonu için büyük doğruluk oranı ile kullanılabileceğini göstermiştir.

Oluşturulan yapay sinir ağı modelinin optimizasyonu için elektromanyetik alanda benzerlerinden daha iyi sonuçlar vermesi sebebiyle (Aydemir, 2014) Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO-Particle Swarm Optimization) yöntemi kullanılmıştır (Kennedy ve Eberhart, 1995).

#### **4.4.2 Parçacık Sürü Optimizasyon Yöntemi**

Parçacık sürü optimizasyonu (PSO Particle Swarm Optimization) algoritması 1995 yılında Kennedy ve Eberhart (1995) tarafından doğadaki sürülerin davranışı gözlemlenerek oluşturulmuştur. Doğadaki sürüler yemek bulmak üzere hareketlerini yönlendirmektedirler. Yönlendirme kendi ve diğer sürü elemanlarının tecrübeleri doğrultusunda gerçekleştirilmektedir.

PSO’da parçacıklar, çevrelerinin değişimine göre konumlarını ve hızlarını değiştirebilirler. Ayrıca parçacıklar hareketleri konusunda kendilerine limit koymazlar ve Şekil 4.34’ de gösterildiği gibi tüm uzayda hareket edebilirler.



**Şekil 4.34: Sürüdeki Parçacıkların Hareketi.**

Kennedy ve Eberhart (1995)'den alınmıştır.

PSO'da 6 adet önemli parametre bulunmaktadır. Bunlar stabilite ağırlığı, öğrenme faktörü, hız limiti, konum limiti, sürü popülasyon sayısı ve ilk sürü konumlarıdır.

Stabilite ağırlığı, genel arama ile yerel arama arasındaki paylaşmayı ayarlar. Yüksek değerli stabilite ağırlığı genel aramanın sonuca olan ağırlığını arttırırken düşük değerli stabilite ağırlığı yerel aramanın sonuca olan ağırlığını arttırmaktadır. Değişken olan stabilite ağırlığı belli bir algoritma doğrultusunda sisteme adapte edilmektedir.

Öğrenme faktörü, parçacığı genel ve yerel en iyiye ulaştırma adım hızıdır. Eğer çok hızlı hassas olmayan bir şekilde en iyiye ulaşmak isteniyorsa adım hızı büyük seçilmelidir. Eğer en iyiye hassas bir şekilde ulaşmak isteniyorsa adım hızı küçük seçilmelidir. Adım hızı da stabilite ağırlığı gibi değişken seçilebilir.

Genel arama işlemini kontrol edebilmek için, parçacıkların hızını bir hız limiti ile sınırlandırmamız gerekmektedir. Aksi takdirde parçacıklarınız bir anda kontrolsüz olarak çözüm uzayının bir ucundan diğer bir ucuna hareket edebilirler. Bu da istenmeyen salınımlara yol açar. Hız limiti de diğer parametreler gibi adapte edilebilir şekilde ayarlanabilir.

Parçacıkların çözüm uzayı içerisinde kalabilmeleri için gidebilecekleri bölgenin konum limiti ile sınırlandırılması gerekmektedir. Bu sınırlar soğurucu, yansıtıcı veya görünmez özellikli olabilir. Parçacık soğurucu sınıra ulaştığında hızı otomatik olarak sıfırlanır. Yansıtıcı sınır üzerine gelen parçacığın hızını ters yönde

olacak şekilde değiştirir. Çoğu sistemde kullanılan görünmez sınır ise kendini aşan parçacıkları yok sayarak onların hiçbir verisini dikkate almaz.

Sürü popülasyon sayısı seçimi çok önemlidir. Bu parametrenin en optimum şekilde seçilmesi gerekmektedir. Gereğinden büyük seçilen popülasyon sayısı işlem yükünü arttırabilir. Gereğinden küçük seçilen bir popülasyon ise doğru sonucu bulabilmek için daha fazla iterasyona ihtiyaç duyar.

İlk sürü konumlarının atanması genellikle rastgele yapılmaktadır. Ancak sonuca bir an önce fazla salınım yapmadan ulaşılması için ilk konumların belirlenmesinde diğer bazı optimizasyon yöntemleri (sipleks, nelder mead, genetik algortima vb.) kullanılabilir. Literatürde bu tarzda bir çok hibrit teknik bulunmaktadır.

Bir fonksiyonun aday çözümleri olan parçacıklar, çözüm uzayında belli bazı basit kurallara göre hareket ederler. Bu hareketlerin hızı, parçacığın kendi en iyi konumu ile sürüdeki parçacıkların içerisinde en iyi konuma göre aşağıdaki denkleme (4.4) göre gerçekleşir.

$$v_i(t+1) = \omega v_i(t) + c_1 r_1 [\hat{x}_i(t) - x_i(t)] + c_2 r_2 [g(t) - x_i(t)] \quad (4.4)$$

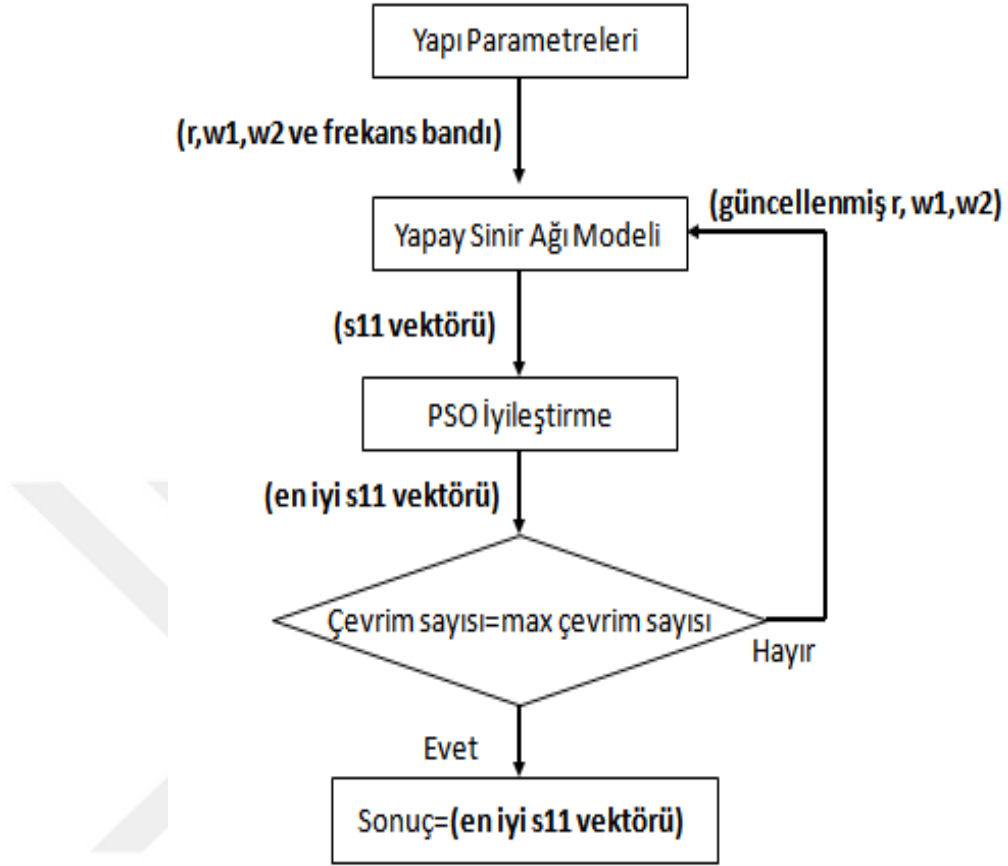
Yukarıda verilen denklemde (4.4)  $\omega$  stabilite ağırlığını,  $C_1$  ve  $C_2$  ğrenme faktörlerini,  $r_1$  ve  $r_2$  rastgele sayıları,  $x$  yerel en iyi konumu,  $g$  ise genel en iyiyi vermektedir.

Her bir parçacık için bulunan hız doğrultusunda parçacıkların yeni konumları aşağıdaki denklem (4.5) ile hesaplanır.

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t+1) \quad (4.5)$$

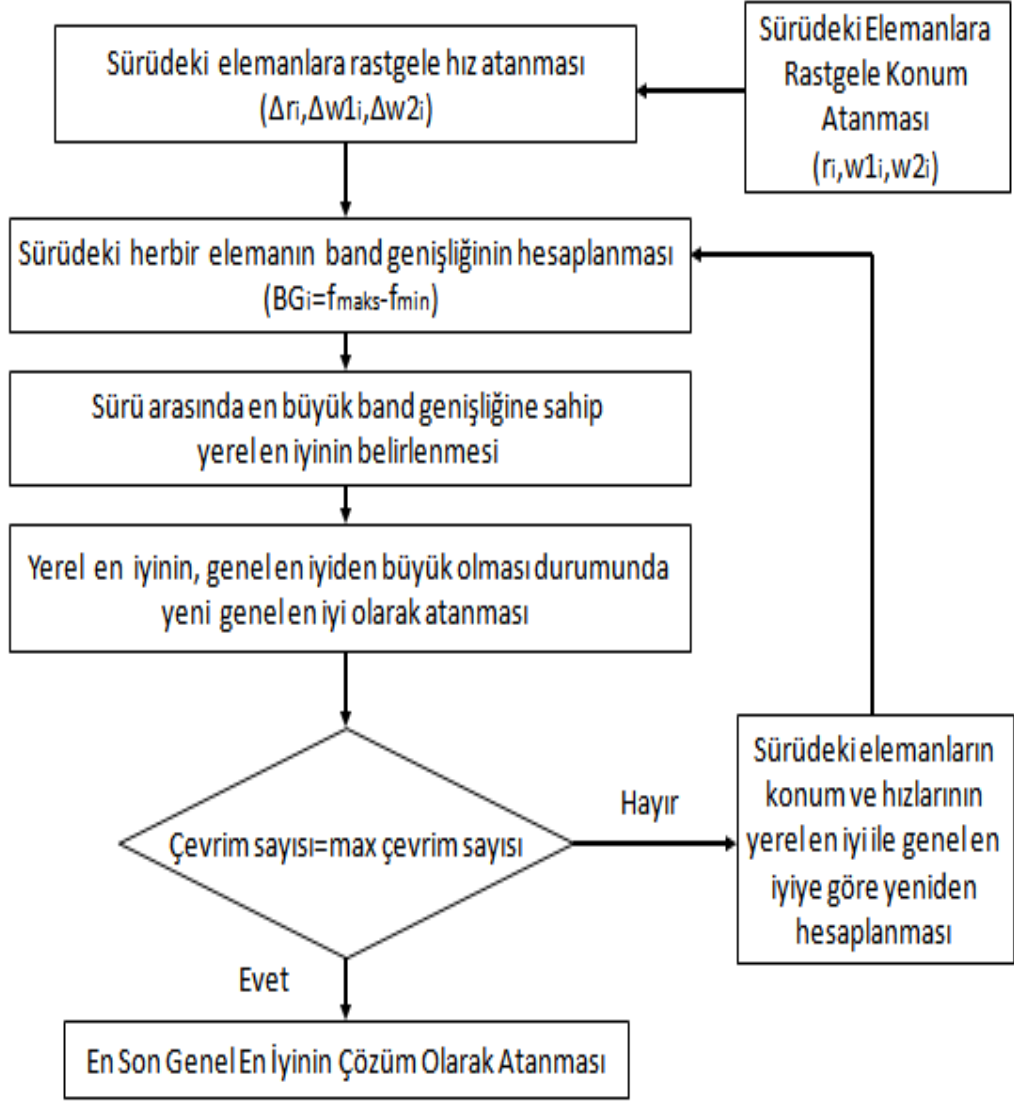
Yukarıda verilen denklemdeki (4.5) ilk terim eski konumu ikinci terim ise yeni hızı gösterir. Parçacıklar belirlenen iterasyon kadar yukarıdaki denklemlere (4.4), (4.5) göre çözüm uzayında hareketlerine devam ederler. İterasyon sonucunda genel en iyi bizim zmmz oluşturur.

Birim yapısını iyileştirmek amacıyla şekil 4.35’de verilen akış oluşturulmuş ve takip edilmiştir. Söz konusu akış doğrultusunda rastgele oluşturulan 1000 adet parametre setinden oluşan sürü, yapay sinir ağına giriş olarak verilmiş ve yansıma katsayısı ( $S_{11}$ ) vektörleri elde edilmiştir.



**Şekil 4.35: Yapı Modelinin Optimizasyon Akışı.**

Elde edilen vektörler ile Şekil 4.36’da verilen PSO algoritması kullanılarak önce band genişlikleri hesaplanmış daha sonra sürü içerisinde en büyük band genişliğini veren giriş seti hem yerel hem de genel en iyi olarak atanmıştır. Yerel ve genel en iyi band genişliği değeri kullanılarak sürünün diğer elemanlarının yeni parametre değerleri ile parametre hızlarının (parametre değişim miktarı) belirlendiği sonlu bir döngü kurulmuştur. Kurulan döngü 5000 çevrime tabi tutulduğunda en büyük band genişliğini veren parametre değerleri belli bir alanda toplanmıştır. Bu alanda toplanan parametre değerleri maksimum band genişliğini vermiştir.



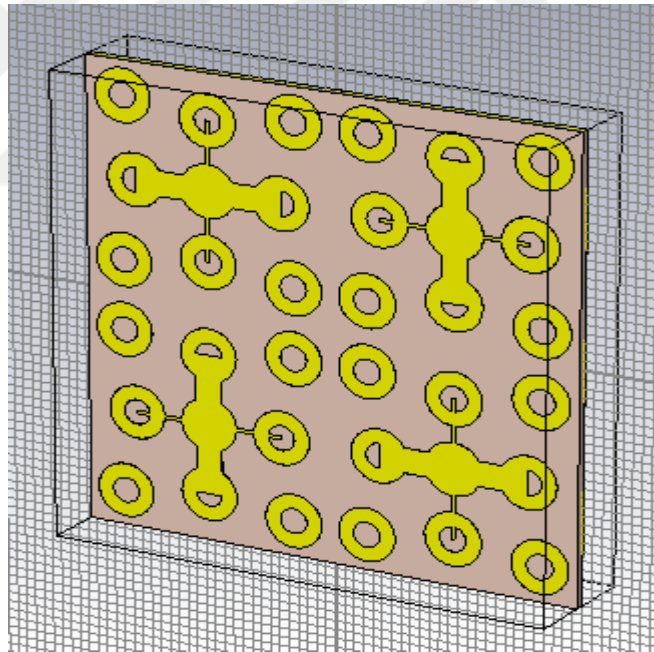
**Şekil 4.36: Parçacık Sürü Optimizasyonu.**

PSO optimizasyonu sonucunda en geniş band genişliği olan 1,1 GHz'i veren parametreler  $r=3$  mm,  $w1=0,2$  mm ve  $w2=1,4$  mm olarak bulunmuştur. Söz konusu kritik parametrelerin bulunması ile yapının boyutları Tablo 4.12'de verildiği şekilde oluşturulmuştur.

**Tablo 4.12: İyileştirme sonucu elde edilen parametreler**

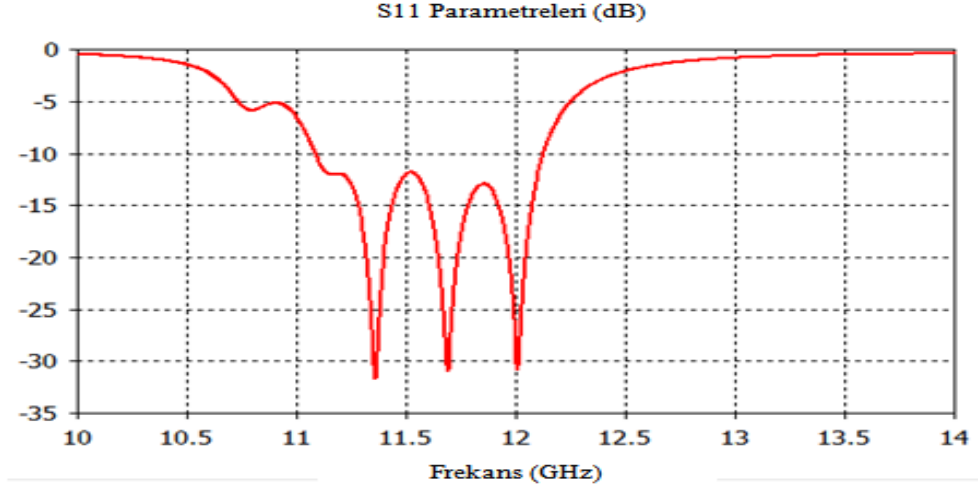
| Yapı Bileşeni              | Parametre | Boyutu (mm) |
|----------------------------|-----------|-------------|
| Eni ve boyu                | N         | 52          |
| Kalınlığı                  | H         | 1           |
| Daire ve Çember Çapı       | R         | 3           |
| Yatay Dikdörtgen Kalınlığı | w1        | 0,2         |
| Dikey Dikdörtgen Kalınlığı | w2        | 1.4         |

İyileştirme sonucu elde edilen ve Tablo 4.12’de verilen parametreler kullanılarak CST Microwave Studio Programı ile yapı Şekil 4.37’de verildiği gibi tekrar tasarlanmıştır.



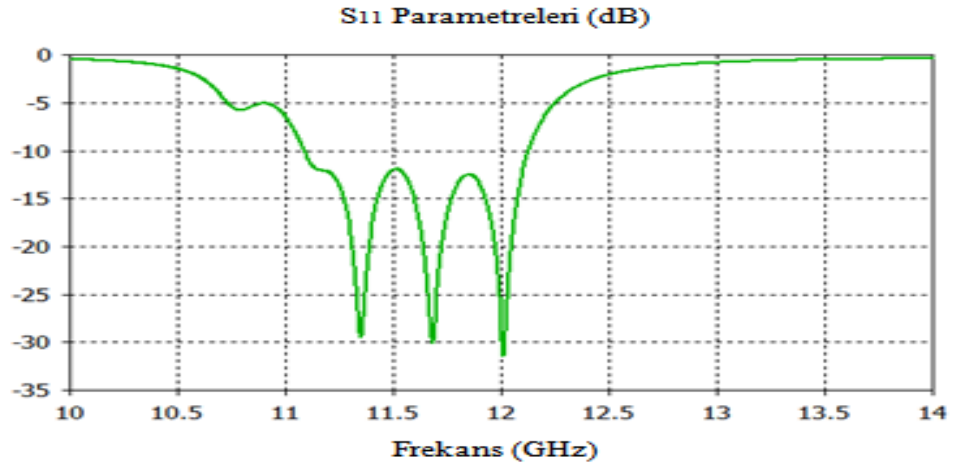
**Şekil 4.37: İyileştirilme Sonucu Elde Edilen Birim Yapı.**

Yeni tasarım üzerinde yapılan simülasyonlar sonucunda TE modda yansıma grafiği Şekil 4.38’de verildiği gibi elde edilmiştir.



**Şekil 4.38: İyileştirilmiş parametreler kullanılarak elde edilen TE Mod yansıma grafiği.**

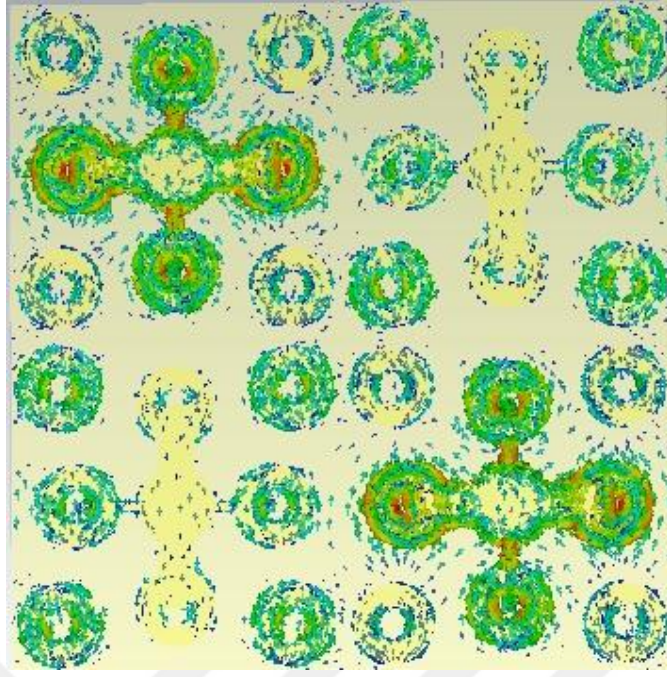
TM modda yapılan simülasyon sonucunda yansıma grafiği Şekil 4.39’da verildiği şekilde elde edilmiştir.



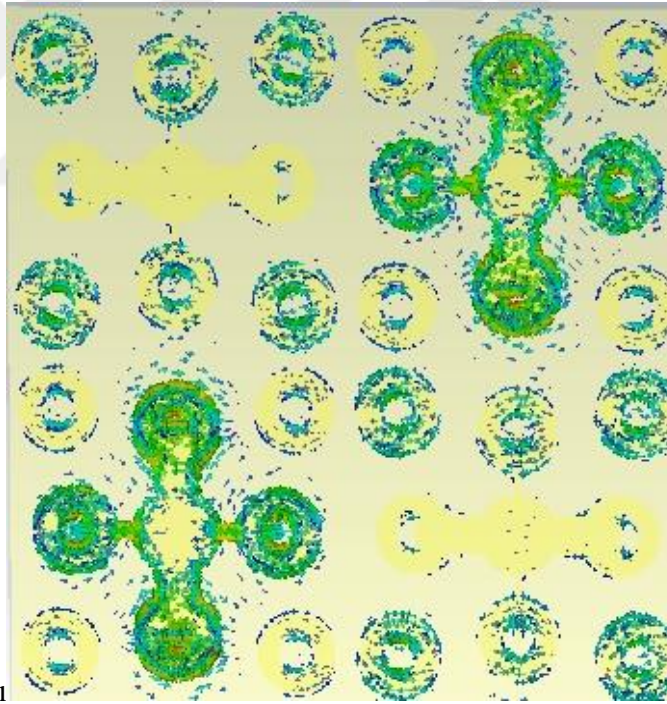
**Şekil 4.39: İyileştirilmiş parametreler kullanılarak elde edilen TM Mod yansıma grafiği.**

Yapılan simülasyonlar sonucu elde edilen grafiklerden görüleceği gibi iyileştirme sonucunda yaklaşık %20 artışla 1.1 GHz’lik bir band genişliği elde edilmiştir. Farklı açılar kullanılarak gerçekleştirilen simülasyonlar sonucunda yapının 30°’ye kadar benzer sonuçlar ürettiği tespit edilmiştir.

Tasarlanan yapının CST Microwave Studio ile elde edilen yüzey akım dağılımı TE polarizasyon için Şekil 4.40’da, TM polarizasyon için Şekil 4.41’de verilmiştir.



**Şekil 4.40: TE Mod Yüzey Akım Dağılımı.**

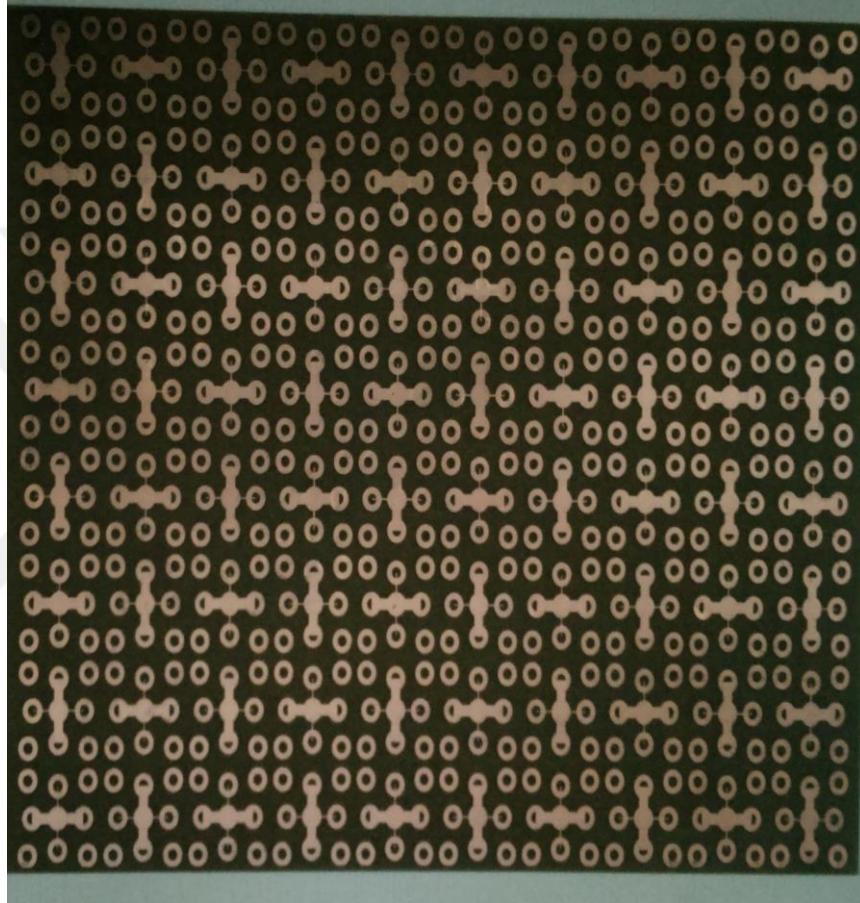


**Şekil 4.41: TM Mod Yüzey Akım Dağılımı**

Söz konusu yüzey akım dağılımları incelendiğinde herbir polarizasyonda dörtlü birim yapının birbirinin aynı olan çapraz yapılarının rezonansa girdiği görülmektedir. Yapıda bu şekilde polarizasyondan bağımsızlık sağlanabilmiştir.

#### 4.4.3 Fiziksel Test Ölçümü

Optimizasyon ve simülasyon sonucu elde edilen veriler doğrultusunda frekans seçici yüzey tabanlı elektromanyetik soğurucu yapı fiziksel olarak çift taraflı bakır kaplı 1 mm kalınlığında ve bağıl dielektrik katsayısı  $\epsilon_r=4,3$  olan FR4 malzeme kullanılarak Şekil 4.42’de verildiği şekilde imal edilmiştir.

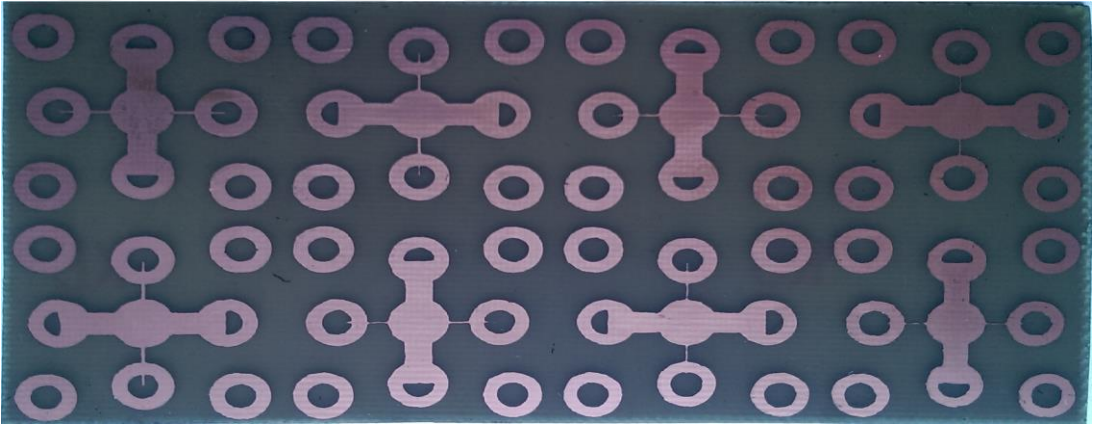


Şekil 4.42: İmal edilen frekans seçici yüzey tabanlı soğurucu yapı

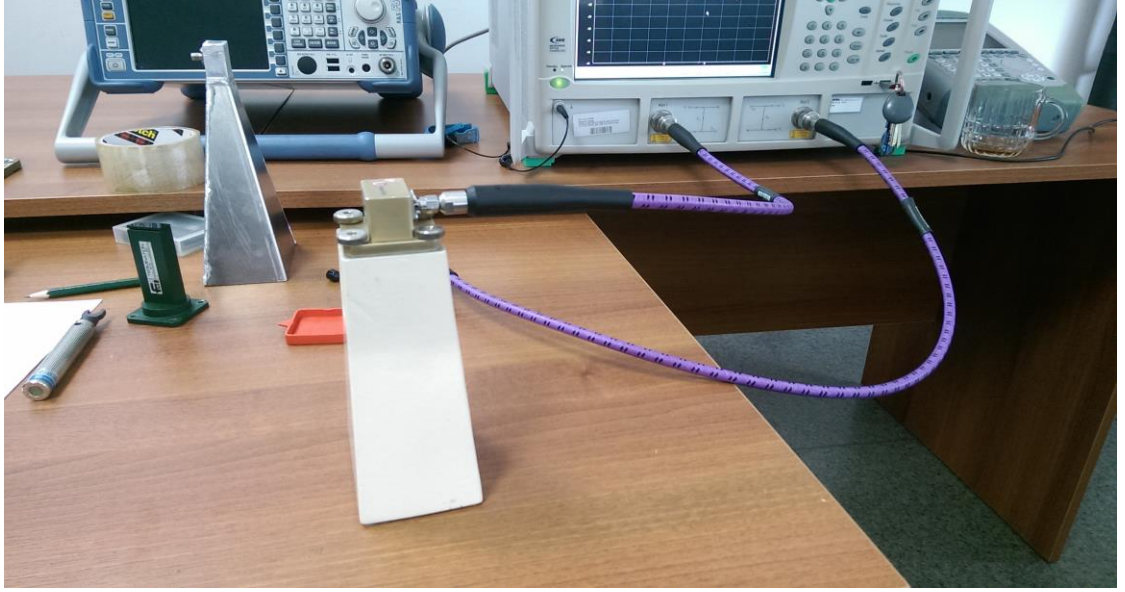
Söz konusu malzemenin horn antenin ebatlarına uygun Şekil 4.43 ve Şekil 4.44’de gösterilen 1x2’lik parçalar üzerinde Şekil 4.45’de gösterilen test düzeneği kullanılarak ölçüm gerçekleştirilmiştir.



**Şekil 4.43: 1x2 birim ölçülerinde bakır levha**

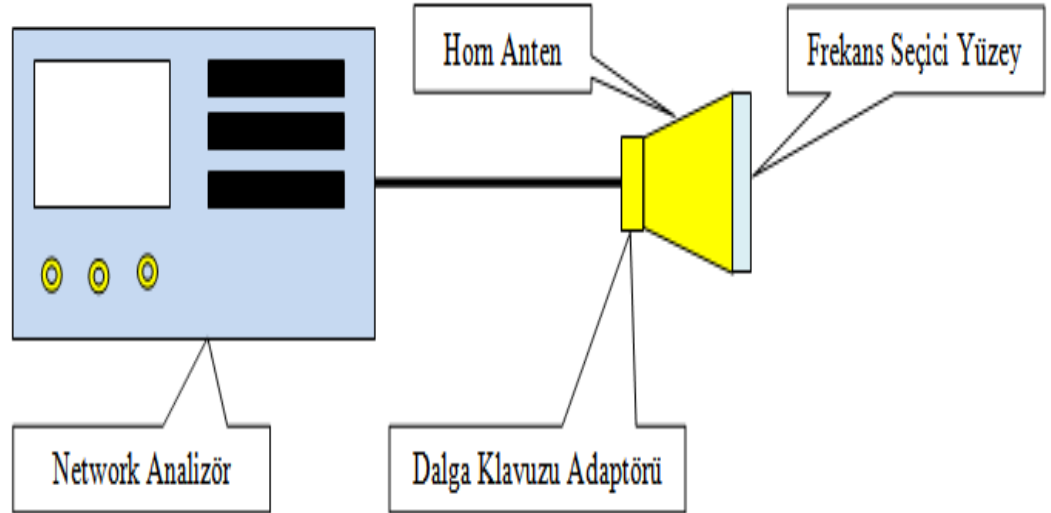


**Şekil 4.44: 1x2 birim yapıdan oluşan soğurucu yapı**



**Şekil 4.45: Test seti**

Gerçekleştirilen fiziksel ölçümde Anritsu MS4644A model vektör network analizör, dalga kılavuzu adaptörü, horn anten ve sinyal kabloları Şekil 4.46’da gösterildiği şekilde bağlanmıştır.



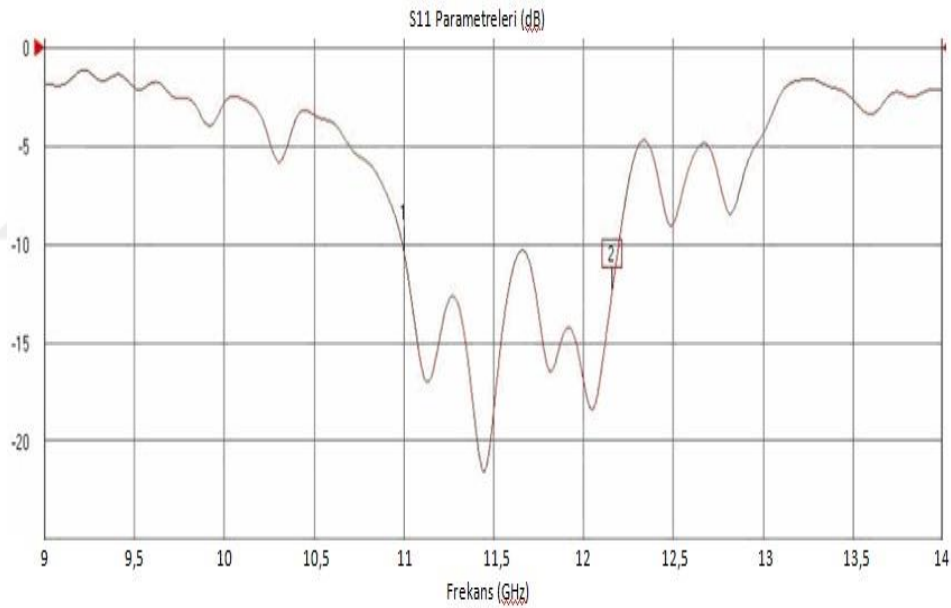
**Şekil 4.46: Bağlantı düzeni**

Ölçüm esnasında horn anten 1x2 birim yapının ebatlarında tamamen bakır ile kaplanmış levhaya bağlanmıştır. Bu şekilde ölçülen yansıma miktarı network

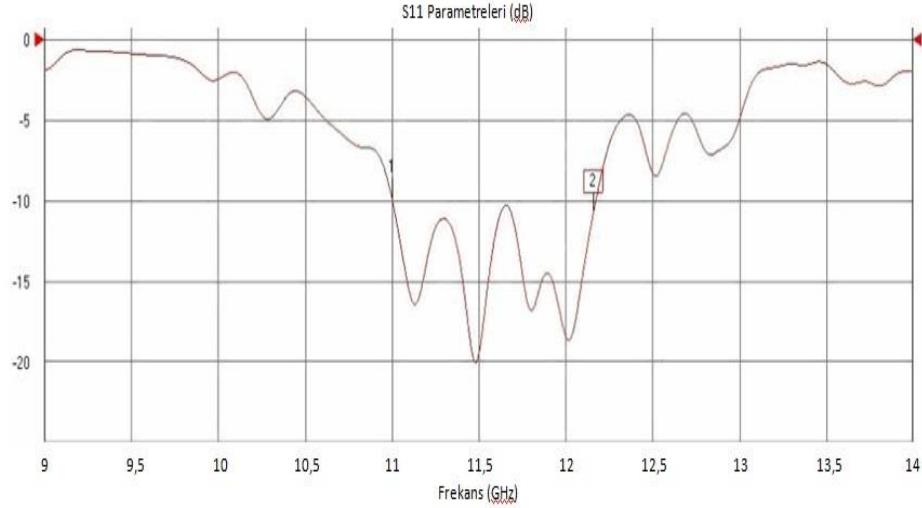
analizör tarafından kaydedilmiştir. Her frekans adımına karşın bu ölçümden elde edilen yansıma datası  $R_1(\omega)$  olarak adlandırılmıştır. Daha sonra horn anten 1x2 birim yapıya bağlanmıştır. Bu şekilde ölçülen yansıma miktarı da network analizör tarafından kaydedilmiştir. Her frekans adımına karşın bu ölçümden elde edilen yansıma datası  $R_2(\omega)$  olarak adlandırılmıştır. Network analizör tarafından kaydedilen söz konusu iki ölçüm sonuçlarının farkı hesaplanmıştır. Aşağıdaki denklemde (4.6) verilen söz konusu fark bize frekans seçici yüzey tabanlı soğurucu yapımızın net soğurma miktarını vermiştir.

$$N(\omega) = R_2(\omega) - R_1(\omega) \quad (4.6)$$

Bu yöntemle elde edilen yansıma miktarları Şekil 4.47 ve Şekil 4.48’de verilen grafiklerde verilmiştir.



**Şekil 4.47: TE mod ölçüm sonucu**



**Şekil 4.48: TM mod ölçüm sonucu**

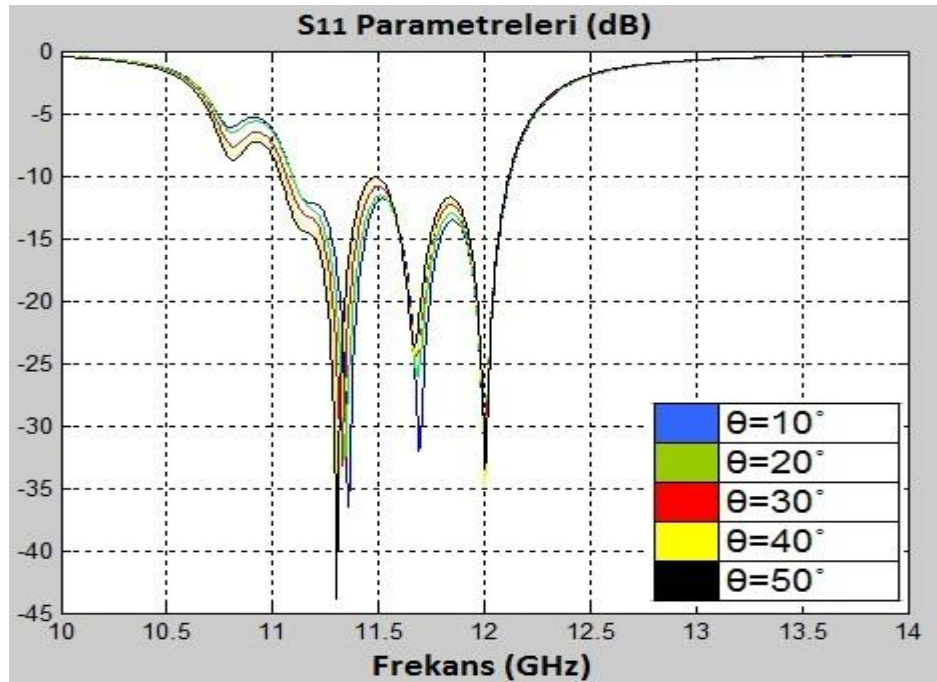
Söz konusu ölçüm sonuçları incelendiğinde yapımızın simülasyonlardan da öngörüldüğü gibi 11,5 GHz merkez frekansı etrafında yaklaşık 1,1 GHz'lik bir band genişliğinde soğurma sağlandığı tespit edilmiştir. Bu performansı ile yapımız Tablo 4.13'te gösterildiği gibi literatürdeki benzer çalışmalardan daha iyi konumdadır. Ayrıca 11-12 GHz bandında soğurma yapan tek ince yapılı soğurucudur. Diğer çalışmalar incelendiğinde hem ince yapılı hemde polarizasyondan bağımsız yapıların soğurma band genişliklerinin ortalama 0,5 GHz olduğu görülmektedir. Bu yapı literatürdeki band genişliğinin yaklaşık %120 oranında arttırmıştır. Yapımız ulaşılabilirliği kolay iletken bakır ile dielektrik FR4 malzemesi kullanılarak tek katman olarak tasarlanmıştır. Bu tasarımı ile kolayca üretilebilir özellik kazanmıştır. Literatürdeki bazı benzer çalışmalar çok katmanlı olmaları veya ara dolgu malzemesi olarak özel bir dielektrik malzeme kullanmaları nedeniyle üretimleri zahmetli ve zaman alıcıdır.

**Tablo 4.13: Önerilen yapının literatürdeki benzerleri ile karşılaştırılması**

| <b>Çalışma</b>                  | <b>Kalınlık</b> | <b>Band Genişliği (BG/fo)</b> | <b>Polarizasyondan Bağımsızlık</b> | <b>Üretim Basitliği/ Tek Katmanlı</b> |
|---------------------------------|-----------------|-------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------|
| Önerilen Yapı                   | 1mm             | %10                           | Evet                               | Evet                                  |
| Zabri ve diğ. (2014)            | 1mm             | %4                            | Evet                               | Hayır                                 |
| Bhattacharyya ve diğ. (2013)    | 1 mm            | %6                            | Hayır                              | Evet                                  |
| Bhattacharyya ve diğ. (2014)    | 1 mm            | %4                            | Hayır                              | Evet                                  |
| Soheilifar ve diğ. (2014)       | 1 mm            | %6                            | Evet                               | Evet                                  |
| Dinçer ve diğ. (2014)           | 1,6 mm          | %3                            | Evet                               | Evet                                  |
| Lee ve diğ. (2015)              | 0,6 mm          | %4                            | Evet                               | Evet                                  |
| Tak ve Choi (2017)              | 1 mm            | %10                           | Hayır                              | Evet                                  |
| Yoo ve diğ. (2016)              | 0,5 mm          | %2                            | Evet                               | Hayır                                 |
| Ayop ve diğ. (2016)             | 0,8 mm          | %4                            | Evet                               | Evet                                  |
| Dimitriadis ve Tsiboukis (2012) | 1 mm            | %6                            | Evet                               | Evet                                  |
| Ramya ve Rao (2019)             | 1,2 mm          | %20                           | Hayır                              | Evet                                  |
| Kaur ve diğ. (2017)             | 2,4 mm          | %8                            | Evet                               | Evet                                  |
| Yadav ve diğ. (2019)            | 0,6 mm          | %4                            | Evet                               | Evet                                  |
| Yah ve diğ. (2019)              | 1,6 mm          | %10                           | Evet                               | Evet                                  |

## 5.SONUÇ

Tez kapsamında çok bandlı özgün soğurucu yapısı geliştirmesi ve geniş bandlı özgün soğurucu yapısı geliştirmesi olmak üzere iki farklı alanda çalışma yapılmıştır. Çok bandlı özgün soğurucu geliştirme çalışması kapsamında üç adet özgün yapı ortaya konmuştur. 1 mm kalınlığındaki ilk çok bandlı yapımız X banda, 0,8 mm kalınlığındaki ikinci çok bandlı yapımız X ve Ku banda, 1,6 mm kalınlığındaki üçüncü çok bandlı yapımız S,C,X ve Ku bandlarında soğurma yapabilmektedir. Söz konusu yapılar CST Microwave Studio kullanılarak simüle edilmiştir. Geniş bandlı özgün soğurucu geliştirme çalışması kapsamında bir adet 1 mm kalınlığında 1,1 GHz band genişliğinde özgün soğurucu yapı oluşturulmuştur. CST Microwave Studio kullanılarak yapılan simülasyonlarda yaklaşık 1,1 GHz band genişliğinde bir soğurma sağlanmıştır. Söz konusu soğurma polarizasyondan bağımsız olarak elde edilebilmiştir. Geniş band tasarım Şekil 5.1’de gösterildiği gibi 50°’ye kadar açıdan bağımsızlığını koruyabilmektedir.

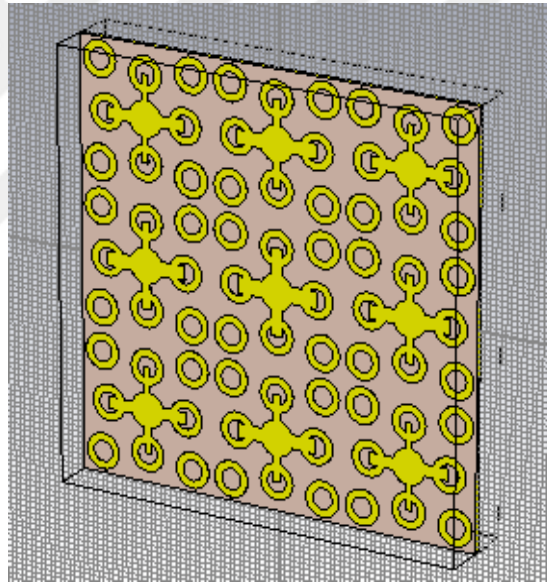


Şekil 5.1: Farklı geliş açılarına göre soğurma grafiği.

Söz konusu yapılar tek katmanlı basit, ince yapılı ve polarizasyondan bağımsız olması gibi öne çıkan özellikleri nedeniyle elektromanyetik soğurucu yüzey olarak kullanılmaya uygundur.

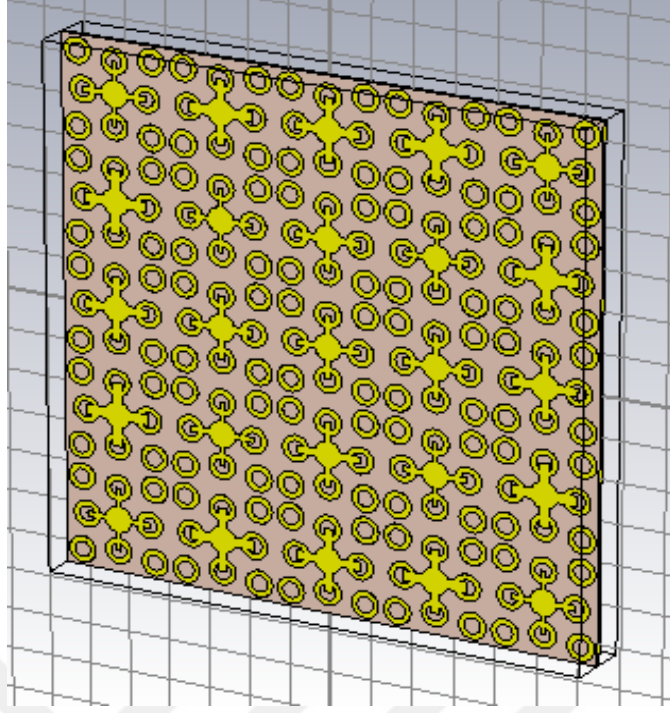
Gelecek çalışmalarda daha fazla farklı kalınlıktaki dipolün aynı birim hücrede kullanılması ile band genişliğinin daha da arttırılabileceği öngörülmektedir.

Şekil 5.2’de örnek bir tasarımı verilen 78x78 mm ebatlarındaki yapının  $r$ ,  $w_1$ ,  $w_2$  ve  $w_3$  parametrelerini yapay sinir ağları ile CST Microwave Studio programı kullanarak optimize edilmesi sonucunda 52x52 mm eabtlarındaki yapıdan daha geniş bir bandda soğurma yapılabileceği değerlendirilmektedir. Ancak söz konusu yapının eğitim datalarını oluşturmak için işlem gücü yüksek bilgisayarların kullanılması gerekmektedir.



**Şekil 5.2: İleriki dönemde üzerinde çalışılabilecek 78x78mm yapı**

Şekil 5.3’te ise daha fazla band genişliğine sahip 130x130 mm ebatlarında soğurucu yüzey tasarımı gösterilmiştir. Aynı şekilde bu yapı 52x52 mm ve 78x78mm yapılarına göre daha geniş band bir soğurmaya sahip olacağı değerlendirilmektedir.



**Şekil 5.3: İleriki dönemde üzerinde çalışılabilecek 130x130mm yapı**

## KAYNAKÇA

- Álvarez, H. F., Gómez, M. E. & Las-Heras, F. (2015). A six-fold symmetric metamaterial absorber. *Materials*, 8(4):1590-1603.
- Amitay, N., Galindo, V. & Wu, C. P. (1972). *Theory and analysis of phased array antennas*. New York: Wiley.
- Aydemir, M. E. (2014). Bazı optimizasyon yöntemlerinin yama anten problemlerindeki performansı. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 29(3): 579-588.
- Ayop O., Kamal M., Rahim A., Murad N.A. & Samsuri N.A. (2016). Wideband polarization-insensitive metamaterial absorber with perfect dual resonances. *Applied Physics*, 122: 311-316.
- Bera, S., Bandhu, S. & Sarkar, P. P. (2013). Design of novel shaped compact frequency selective surface with dualband applications. *International Journal of Electronics and Communication Technology*, 4(5):29-32.
- Bharti, G., Singh, G., Jha, K. R. & Jyoti, R. (2013, Haziran). Analysis of circular ring frequency selective surface at ka/ku band. *Advanced Computing Conference*.
- Bhattacharyya S., Ghosh S. & Srivastava K.V. (2013) Bandwidth-enhanced metamaterial absorber using electric field-driven LC resonator for airborne radar applications. *Microwave and Optical Technology Letters*, 55(9): 2131-2137.
- Bhattacharyya S., Ghosh S. & Srivastava K.V. (2014). Bandwidth-enhancement of an ultrathin polarization insensitive metamaterial absorber. *Microwave And Optical Technology Letters*, 56(2): 350-355.
- Can K. & Aydemir M. E. (2018, Eylül). Frekans seçici yüzey kullanarak soğurucu tasarımı. *URSI-Türkiye IX. Bilimsel Kongresi*.
- Can, K., & Aydemir, M. E. (2019). Triple resonance electromagnetic absorber for space applications, *Recent Advances in Space Technologies*.
- Chen, J., Hu, Z., Wang, S., Huang, X. & Liu, M. (2016) A triple-band, polarization- and incident angle-independent microwave metamaterial absorber with interference theory, *European Physics Journal*, 89: 14-20.
- Colasante, A., Bellaveglia, G., Forti, R. L., Ramaccia, D. & Toscano, A. (2010). Inductive Ku/Ka bands double elements frequency selective surface. *Progress In Electromagnetics Research Letters*, 31(3): 16-24.

- Çiğdem, S., Tunca, C., Can, S. & Yılmaz, A. E. (2014, Ağustos). Frekans seçici yüzey kelebek şekilli birim hücre yapı önerisi. *URSI-Türkiye 2014 VII. Bilimsel Kongresi*.
- Dimitriadis A. & Tsiboukis N.K.T. (2012). A polarization-/angle-insensitive, bandwidth-optimized, metamaterial absorber in the microwave regime. *Applied Physics*, 109:1065–1070.
- Dincer F., Karaaslan M., Unal E., Akgol O. & Sabah C. (2014). Design of polarization and incident angle-independent perfect metamaterial absorber with interference theory. *Journal of Electronic Materials*, 43(11): 3949-3953.
- Ghosh, R., Sarkar, D. & Sarkar, P. P. (2013). Dual broad band frequency selective structures with multi resonant frequencies. *International Journal of Latest Trends in Engineering and Technology*, 40(5):154:160.
- Ghosh, R., Sarkar, D. C. & Sarkar, P. P. Compact, (2014). Multi band frequency selective surface design for communication purpose. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 26(2):125-138.
- Jha, K. R., Singh, G. & Jyoti, R. (2012). Simple synthesis technique of single-square-loop frequency selective surface. *Progress In Electromagnetics Research*, 23(2):122-134.
- Johar, F. M., Azmin, F. A., Shibghatullah A. S., Suaid M. K., Ahmad, B. H., Aziz, M. Z. A., Salleh, S. N. & Shukor, M. M. (2014). Application of genetic algorithm to the design optimization of complex energy saving glass coating structure. *Journal of Physics*, 60(3):124-135
- Kaur K.P., Upadhyaya T. & Palandöken M. (2017). Dual-band polarization-insensitive metamaterial inspired microwave absorber for LTE-band applications. *Progress In Electromagnetics Research C*, 77: 91–100.
- Kennedy J. & Eberhart R. (1995, Aralık). Particle swarm optimization. *International Conference on Neural Networks*.
- Khalid, N. K. B. A. & Seman, F. B. C. (2014). Double square loop frequency selective surface (FSS) for GSM shielding. *Advanced computer and communication engineering technology*, 315(4):223-229.
- Khalilzadeh, M. & Mirsalehi, M. M. (2012, Mayıs). Design of a microwave dual-band filter using frequency selective surfaces. *Iranian Conference on Electrical Engineering*.
- Kundu D. , Mohan A. & Chakrabarty A. (2018, Aralık). Design of a conductive FSS based ultrathin absorber using impedance analysis method of equivalent circuit model. *IEEE Indian Conference on Antennas and Propagation*.

- Lee J., Yoo M., & Lim S. (2015). A study of ultra-thin single layer frequency selective surface microwave absorbers with three different bandwidths using double resonance. *IEEE Transactions On Antennas And Propagation*, 63(1): 221-230.
- Li, M. H., Yang, H. L. & Hou, X. W. (2010). Perfect metamaterial absorber with dual bands. *Progress In Electromagnetics Research*, 108(3): 37-49.
- Li, Y., Pei, Z., Qu, S., Xu, Z., Wang, J., Zhou, H., Gu, C. & Yu, F. (2011). The design of a broad band third-order frequency-selective surfaces. *Progress In Electromagnetics Research Letters*, 32(2): 116-124.
- Louertani, K. & Chio, T. (2014, Temmuz). Low profile broadband spiral antenna with metamaterials. *Antennas and Propagation Society International Symposium*.
- Ma, Y., Liu, J., Su, L. & Lu, F. (2017, Nisan). Triple-band wide-angle ultrathin metamaterial absorber. *Sixth Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP)*.
- Marconi, G. & Franklin, C. S. (1919). *Reflector for use in wireless telegraphy and telephony*. U.S. Patent.
- Miller, R. O. (1994). *Studies on the interaction of waves with metal mesh filters* (Yüksek Lisans Tezi). The University of Texas, Dallas.
- Mishra, N., Choudhary, D. K., Chowdhury, R., Kumari, K. & Chaudhary, R. K. (2017). An investigation on compact ultra-thin triple band polarization independent metamaterial absorber for microwave frequency applications. *IEEE Access*, 5:234-240.
- Munaga, P., Bhattacharyya, S., Ghosh, S. & Srivastava, K. V. (2018). An ultra-thin compact polarization-independent hexa-band metamaterial absorber. *Applied Physics A*, 124: 331-340.
- Munk, B. A. (2000). *Frequency-selective surfaces: theory and design*. New York: Wiley.
- Ohira, M., Deguchi, H., Tsuji, M. & Shigesawa, H. (2004). Multiband single-layer frequency selective surface designed by combination of genetic algorithm and geometry-refinement technique. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 52(11): 134-142.
- Rafique, U., Kiani, G. I., Ahmed, M. M. & Habib, S. (2011, Ocak). Frequency selective surface absorber for wlan security. *5th European Conference on Antennas and Propagation*.
- Ramya S. & Rao I.S. (2019). An ultra thin, bandwidth enhanced metamaterial absorber for x band applications. *Wireless Personal Communications*, 105: 1617–1627.

- Ren, Y., Ding, J., Guo, C., Qu, Y. & Song, Y. (2017). Design of a quad-band wide-angle microwave metamaterial absorber. *Journal of Electronic Materials*, 46(1): 142:151.
- Rozanov K. N. (2000). Ultimate thickness to bandwidth ratio of radar absorbers. *IEEE Transactions on Antennas And Propagation*, 48(8):1230-1234.
- Segundo, F. C. G. & Camposs, A.L.P.S. (2014). *Compact frequency selective surface with dual band response for WLAN applications*. New York: Wiley.
- Segundo, F. C. G., Camposs, A. L. P. S. & Braz, E. C. (2014). Wide band frequency selective surface for angular and polarization independent operation. *Microwave and optical technology letters*, 57(1):23-34
- Sharma, S. K., Ghosh, S. & Srivastava, K. V. (2016). An ultra-thin triple-band polarization-insensitive metamaterial absorber for S, C and X band applications. *Applied Physics A*, 122: 1071-1080.
- Singh D. & Srivastava V. M. (2018). Dual resonance shorted stub circular rings metamaterial absorber. *International Journal of Electronics And Communications*, 83(5): 58-66.
- Soheilifar M,R, Sadeghzadeh R.A. & Gobadi H. (2014). Design and fabrication of a metamaterial absorber in the microwave range. *Microwave And Optical Technology Letters*, 56(8): 1748-1752.
- Specht D. F. (1991). A general regression neural network. *IEEE Transactions On Neural Networks*, 2(6): 568–576.
- Tak J. & Choi J. (2017). A wearable metamaterial microwave absorber. *IEEE Antennas And Wireless Propagation Letters*, 16(2): 784-787.
- Vardaxoglou, J. C. (1997) *Frequency-selective surfaces: analysis and design*. Taunton: Research Studies Press, Ltd.
- Weile, D. S., Michielssen, E. & Gallivan, K. (2001). Reduced-order modeling of multiscreen frequency-selective surfaces using krylov-based rational interpolation. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 49(5):122:132.
- Wu, T. K. (1995). *Frequency-selective surface and grid array*. New York: Wiley.
- Yadav S., Sharma M.M. & Abegaonkar M.P. (2019, Mart) Polarization independent ultrathin dual-band metamaterial absorber for x-band applications. *6th International Conference on Signal Processing and Integrated Networks (SPIN)*.

- Yah N. F. N., Rahim H. A. , Abdulmalek M., Lee Y. S., Yahaya N. Z., Jusoh M. & Abbasi Q. H. (2019, Mart). Ultrathin metamaterial microwave absorber using coconut coir fibre over x-band frequency range. *International Conference on Communications, Signal Processing, and their Applications*.
- Yang, G., Ma, S., Wang, E., Qin, Y. & Gu, X. (2013). Design of active frequency selective surfaces for the RCS reduction. *International Journal of Security and Its Applications*, 7(5):407-414.
- Yang, Y., Wang, X. H. & Zhou, H. (2012). Dual-band frequency selective surface with miniaturized element in low frequencies. *Progress In Electromagnetics Research Letters*, 33(4): 167-175.
- Yılmaz, A. E. & Kuzuoğlu M. (2009). Design of the square loop frequency selective surfaces with particle swarm optimization via the equivalent circuit model. *Radioengineering*, 18(2):95-102.
- Yoo M., Kim H.K. & Lim S. (2016). Angular and polarization-insensitive metamaterial absorber using subwavelength unit cell in multilayer technology. *IEEE Antennas And Wireless Propagation Letters*, 15(1): 414-417.
- Zabri N., Cahill R. & Schuchinsky A. (2014). Polarisation independent resistively loaded frequency selective surface absorber with optimum oblique incidence performance. *IET Microwave Antennas Propagation*, 8(14): 1198-1203.
- Zhang, Y., Lyu, Y., Liao, D. & Wang, H. (2017, Mart). Ultrathin multiband microwave absorber based on electric-field-coupled-LC resonators. *International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium (ACES)*.

## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : Kağan CAN  
Uyruğu : Türkiye Cumhuriyeti  
Doğum tarihi ve yeri : 23.03.1981 Bandırma  
Telefon : 0505 6723185  
e-mail : kcan@hho.edu.tr



### Eğitim

#### Derece

#### Yüksek lisans

#### Lisans

#### Üniversite ve Bölüm

Old Dominion University  
Electronics and Computer Engineering  
Ankara Üniversitesi  
Elektronik Mühendisliği

#### Mezuniyet tarihi

28 Mayıs 2010

06 Haziran 2003

### Meslekî Deneyim

#### Yıl

2003-2005

2005-2008

2010-2013

2013-2016

2016-2017

2017-...

#### Yer

3'üncü HİBM K.lığı

GES K.lığı

Hv.K.P.P.Bşk.lığı

HUTEN

Hv.K.MEBS Bşk.lığı

MSÜ Hv.Harp Okl.Dek.lığı

#### Görev

Haber. Aty. Şef.

Sinyal İsth.Sb.

Prj.Sb.

Dr.Öğrencisi

Prj.Sb.

Pl.Koor.Sb.

### Yabancı Dil

İngilizce

### **Yayınları**

Can K. & Aydemir M. E. (2018, Eylül). Frekans Seçici Yüzey Kullanarak Soğurucu Tasarımı. *URSI-Türkiye IX. Bilimsel Kongresi*.

Can, K., & Aydemir, M. E. (2019). Triple Resonance Electromagnetic Absorber For Space Applications, *Recent Advances in Space Technologies*.

### **Tezden Türetilen Yayınları/Sunumları**

Can K. & Aydemir M. E. (2018, Eylül). Frekans Seçici Yüzey Kullanarak Soğurucu Tasarımı. *URSI-Türkiye IX. Bilimsel Kongresi*.

Can, K., & Aydemir, M. E. (2019). Triple Resonance Electromagnetic Absorber For Space Applications, *Recent Advances in Space Technologies*.