



T.C.  
NECMETTİN ERBAKAN  
ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



MİKRODALGA ENERJİSİ İLE  
ÇALIŞAN EV TİPİ ISITMA CİHAZI

Faruk ÖZYURT

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

TEMMUZ - 2024  
KONYA  
Her Hakkı Saklıdır

## TEZ KABUL VE ONAYI

Faruk ÖZYURT tarafından hazırlanan “MİKRODALGA ENERJİSİ İLE ÇALIŞAN EV TİPİ ISITMA CİHAZI” adlı tez çalışması 28/06/2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS olarak kabul edilmiştir.

### Jüri Üyeleri

### İmza

#### Başkan

Unvanı Adı SOYADI

.....

#### Danışman

Unvanı Adı SOYADI

.....

#### Üye

Unvanı Adı SOYADI

.....

#### Üye

Unvanı Adı SOYADI

.....

#### Üye

Unvanı Adı SOYADI

.....

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun .../.../20.. gün ve ..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Şerife Yurdagül KUMCU  
FBE Müdürü

## TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

## DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Faruk ÖZYURT

Tarih: 28/06/2024

# ÖZET

## YÜKSEK LİSANS TEZİ

### MİKRODALGA İLE ÇALIŞAN EV TİPİ ISITMA CİHAZI

Faruk ÖZYURT

Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü  
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Emin ÜNAL

2024, 55 Sayfa

Jüri

Danışman Prof. Dr. Emin ÜNAL  
Doç. Dr. Seyfettin Sinan GÜLTEKİN  
Dr. Öğr. Üyesi Ali Osman ÖZKAN

Günümüzde, ısıtma sistemlerinde doğalgazlı kombi, elektrikli kombi, elektrikli şofben ve termosifonlar yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak, bu sistemlerde verim oldukça düşüktür. Bu da sistem maliyetini bir hayli arttırmaktadır. Ayrıca, fosil yakıt kullanılan cihazlar dışarıya karbondioksit salımı yaptığı için birçok çevre sorununa sebep olmaktadır ( R. Anwar, Mao, and Ning 2018).

Frekans seçici yüzeyler (FSY) bir dielektrik tabaka üzerine yerleştirilmiş metal yamalar ya da oyuklardan oluşan iki boyutlu periyodik yapılardır. FSY'ler üzerine gelen elektromanyetik dalganın frekansına göre kalkanlama veya iletim yapabilmek ve aynı zamanda, elektromanyetik filtre oluşturmak için tasarlanabilir. (R.Anwar, Mao & Ning 2018; Xu, Hum & Eleftheriades 2018). FSY'ler, kalkanlama, kablosuz haberleşme ve kablosuz ağların güvenliği gibi birçok alanda uygulama potansiyeli bulabilirler.

Bu çalışmada, mikrodalga enerjisinin kombi içerisinde ısı enerjisine dönüştürülmesi ve ısıtılan suyun kalorifer sistemine verilmesi amaçlanmıştır. Mikrodalga enerjisinin ısıtma sisteminden dışarıya sızması FSY'ler aracılığıyla sağlanacaktır. Altyapı gerektirmeden, bacasız yani dışarıya herhangi bir artık madde (katı, sıvı ve gaz) salımı yapılmadan mevcut sistem aynen korunarak ve sadece doğalgazlı kombilerin iç dizaynı değiştirilerek elektrik enerjisi kullanılması hedeflenmektedir. Önerilen sistem ile kullanılan elektrik enerjisi mikrodalga fırınlarda kullanılan magnetron aracılığıyla 2.45 GHz de elektromanyetik dalgaya dönüştürülecektir. Üretilen mikrodalganın cihaz dışarısına su boruları içerisinden sızıntısının engellenmesi için FSY kullanılacaktır. Mikrodalgalar ile ısıtma cihazının içerisinde ısıtılan suyun, ısıtma tesisatı içinde sirkülasyonunu sağlayan bir cihazın üretilip üretilmeyeceği araştırılacaktır.

**Anahtar Kelimeler:** elektromanyetik dalgalar, elektromanyetik filtreleme, elektrik enerjisi, frekans seçici yüzey, fosil yakıt, mikrodalga, ısıtma sistemi

## ABSTRACT

### MS THESIS

## HOUSEHOLD HEATING DEVICE WORKING WITH MICROWAVE ENERGY

Faruk ÖZYURT

THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF  
NECMETTİN ERBAKAN UNIVERSITY  
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE DOCTOR OF PHILOSOPHY  
IN ELECTRIC-ELEKTRONICS ENGINEERING

Advisor: Prof. Dr. Emin ÜNAL

2024, 55 Pages

Jury

Advisor Prof. Dr. Emin ÜNAL

Assoc. Dr. Seyfettin Sinan GÜLTEKİN

Assist Prof. Dr. Ali Osman ÖZKAN

Today, natural gas combi boilers, electric combi boilers, electric water heaters and water heaters are widely used in heating systems. However, the efficiency in these systems is quite low. The cost of this system increases considerably. In addition, devices that use fossil fuels cause many environmental problems because they emit carbohydrates. (R. Anwar, Mao, and Ning 2018)

Frequency Selective Surface (FSY) are two-dimensional periodic structures consisting of metal patches or aperture elements placed on a dielectric layer. FSY's can be designed to provide shielding or transmission according to the frequency of the electromagnetic wave incident on them, as well as to create an electromagnetic filter. (R. Anwar, Mao, and Ning 2018; Xu, Hum, and Eleftheriades 2018). FSY can find applications in various fields such as shielding, wireless communications and security of wireless networks.

In this study, it is aimed to convert microwave energy into heat energy in the combi boiler and to give the heated water to the heating system. It will be ensured that microwave energy does not leak out of the heating system through FSY. It is aimed to use electrical energy without requiring infrastructure, without a chimney, that is, without releasing any waste materials (solid, liquid and gas) to the outside, by keeping the existing system as it is and by changing only the interior design of natural gas combi boilers. The electrical energy used with the proposed system will be converted into electromagnetic waves at 2.45 GHz through the magnetron used in microwave ovens. A frequency selective surface will be used to prevent the generated microwave from leaking out of the device through water pipes. It will be investigated whether a device that allows the water heated in the heating device with microwaves to circulate in the heating installation can be produced.

**Keywords:** electromagnetic waves, electromagnetic filtering, electric energy, frequency selective surface, fossil fuel, microwave, heating system

## ÖNSÖZ

Tez çalışmamda bana destek olan ve tecrübelerini benimle paylaşan danışman hocam Prof. Dr. Emin Ünal'a teşekkürü borç bilirim. Tüm eğitim hayatım boyunca beni destekleyen ve maddi manevi hep yanımda olan aileme teşekkür ederim.

FARUK ÖZYURT  
KONYA-2024



## İÇİNDEKİLER

<b>ÖZET .....</b>	<b>iv</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>v</b>
<b>ÖNSÖZ .....</b>	<b>vi</b>
<b>İÇİNDEKİLER .....</b>	<b>vii</b>
<b>SİMGELER VE KISALTMALAR .....</b>	<b>ix</b>
<b>ŞEKİLLER LİSTESİ .....</b>	<b>x</b>
<b>ÇİZELGE LİSTESİ.....</b>	<b>x</b>
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
1.1. Tezin Amacı.....	2
1.2. Hipotez.....	4
<b>2. LİTERATÜRDEKİ ÇALIŞMALAR .....</b>	<b>5</b>
<b>3. MATERYAL VE YÖNTEM.....</b>	<b>12</b>
3.1. Frekans Seçici Yüzeyler .....	12
3.1.1. Frekans Seçici Yüzeylerin Sınıflandırılması .....	14
3.1.1.1. Aktif Frekans Seçici Yüzeyler .....	15
3.1.1.2. Pasif Frekans Seçici Yüzeyler .....	15
3.1.2. Eşdeğer Devre .....	15
3.1.2.1. FSY'lerin Eşdeğer Devre Modellemesi.....	16
3.1.3. Frekans Seçici Yüzeylerin Frekans Özelliklerini Etkileyen Faktörler .....	20
3.1.3.1. Fiziksel Yapı Etkisi.....	20
3.1.3.2. Boyut Etkisi .....	22
3.1.3.3. Dielektrik Malzemenin Etkisi .....	23
3.1.3.4. İletken Malzemenin Etkisi .....	23
3.1.3.5. Malzeme Türü Etkisi .....	24
3.1.3.6. EMD'nin FSY'ye Geliş Açısı ve Polarizasyonu .....	24
3.1.4. Frekans Seçici Yüzey Tipleri ve Filtreleme Özellikleri .....	24
3.1.4.1. Bant Durduran Frekans Seçici Yüzey .....	25
3.1.4.2. Bant geçiren Frekans Seçici Yüzey .....	25
3.1.4.3. Alçak Geçiren Frekans Seçici Yüzey .....	26
3.1.4.4. Yüksek Geçiren Frekans Seçici Yüzey .....	26
3.2. Frekans Seçici Yüzey Tasarım Çalışmaları .....	26
3.3. Frekans Seçici Yüzeyin Simülasyon Çalışmaları .....	28
3.4. İkinci Simülasyon Çalışmaları.....	34
<b>4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....</b>	<b>37</b>
4.1. FSY Üretimi.....	38
4.2. Üretilen FSY nin Fiziki Test Çalışmaları .....	38
4.3. Üretilen Frekans Seçici Yüzeyin Uygulama Projesi.....	40

4.3.1. FSY Uygulama 1 .....	41
4.3.2. FSY Uygulama 2 .....	44
<b>5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....</b>	<b>46</b>
5.1 Sonuçlar .....	46
5.2 Öneriler .....	47
<b>6. KAYNAKLAR .....</b>	<b>48</b>



## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

$\lambda$	Dalga boyu
c	Işık hızı
f	Frekans
$\mu$	Manyetik geçirgenlik
$\epsilon$	Dielektrik sabiti
$\Omega$	Ohm
$\emptyset$	Çap
T	tesla
B	Manyetik akı yoğunluğu (tesla)
H	Manyetik alan şiddeti (amper/metre)

### Açıklamalar

### Kısaltmalar

EMD	Elektromanyetik Dalga
FSY	Frekans Seçici Yüzey
MW	Mikrodalga
MW	Mikrodalga Frekans
GSM	Mobil İletişim İçin Küresel Sistem
MTM	Metamalzeme
MA	Metamalzeme Soğurma
PA	Mükemmel Soğurma
$S_{11}$	Saçılma Parametresi
$S_{21}$	iletim Parametresi
dB	Desibel
GHz	Gigahertz
cm	santimetre
mm	milimetre
$\mu\text{m}$	mikrometre
CAD	Bilgisayar Destekli Tasarım
EBG	Elektromanyetik Bant Boşluğu
BW	Bant Genişliği
SSR	Bölünmüş Halka Rezonatörleri
CSSR	Tamamlayıcı Bölünmüş Halka Rezonatörleri
HB	Hidrojen Bağları
TEM	Enine Elektromanyetik Dalga
PEC	Mükemmel Elektrik İletken
PMC	Mükemmel Manyetik İletken
RCS	Radar Kesit Alanı
VAR	Volt-Amper Reaktif

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1. Mikrodalga fırın camı üzerinde FSY uygulaması .....	13
Şekil 2. İki kapılı bir şebekede S-Parametre gösterimi .....	14
Şekil 3. FSY'nin Endüktif modellenmesi .....	16
Şekil 4. FSY'nin Kapasitif modellenmesi .....	17
Şekil 5. İndüklenmiş salınım .....	17
Şekil 6. Izgara şekilli FSY eşdeğer devre modeli .....	18
Şekil 7. Dikdörtgen yama şeklindeki FSY eşdeğer devre modeli .....	19
Şekil 8. FSY'nin Temel Şekilleri .....	21
Şekil 9. Az kayıplı iletken kullanılarak oluşturulan FSY yapıda oluşan kaybın frekansa karşı grafiği .....	23
Şekil 10. FSY'ler ile elde edilen genel filtre karakteristiği .....	24
Şekil 11. FSY perspektif görünümü .....	27
Şekil 12. Tasarlanan FSY yapının boyutları .....	27
Şekil 13. Simülasyon görünümü .....	28
Şekil 14. Tasarlanan FSY'nin sınır koşulları .....	28
Şekil 15. FSY üzerindeki elektrik alan dağılımı .....	29
Şekil 16. FSY üzerindeki manyetik alan dağılımı .....	30
Şekil 17. Simülasyon çalışmasının uzak alan yaklaşım sonuçları .....	31
Şekil 18. Simülasyon çalışmasının yüzey akım dağılımı .....	32
Şekil 19. Simülasyon çalışmasının güç yoğunluğu çıktıları .....	33
Şekil 20. Tasarlanan FSY yapının S parametrelerinin simülasyon sonuçları .....	33
Şekil 21. İkinci simülasyon sonuçları .....	34
Şekil 22. FSY'nin hava ortamda yapılan ikinci simülasyon sonuçları .....	35
Şekil 23. FSY'nin su ile dolu ortamda yapılan simülasyon sonuçları .....	36
Şekil 24. LPKF E-33 kullanarak FSY Üretimi .....	38
Şekil 25. PNA-L Microwave Network Analyzer cihazı ile S parametrelerinin ölçümü .....	39
Şekil 26. $S_{21}$ ölçüm sonuçları .....	39
Şekil 27. Tasarlanan FSY'li kombi şeması .....	40
Şekil 28. Tasarlanan FSY Uygulama-1 .....	42
Şekil 29. Mikrodalga enerjisi ile çalışan ev tipi kombi projesine FSY uygulama-1 .....	42
Şekil 30. Mikrodalga enerjisi ile çalışan ev tipi kombi projesine FSY uygulama-2 .....	45

## ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 1. Temel FSY eşdeğer devre gösterimleri .....	22
Çizelge 2. FSY Teknik Özellikleri .....	37

## 1. GİRİŞ

İlk olarak 1900'lü yılların başında Guglielmo Marconi tarafından geliştirilen frekans seçici yüzeyler (FSY'ler) uzun yıllardan beri kullanılmaktadır [Marconi 1919]. Bu cihazlar, geliş düzleminde birden fazla malzemenin, metalik elementlerin veya her ikisinin bir kombinasyonunun periyodik dizilerinin neden olduğu girişimi kullanarak elektromanyetik dalgaları pasif olarak filtrelemek için kullanılır [Munk 1971]. Bu girişim, belirli frekansları filtrelerken diğerlerinin geçmesine izin vererek frekans seçici bir tepkiye neden olur. FSY'ler konusunda kapsamlı geliştirilme çalışmaları ise 1960'lı yıllara dayanmaktadır. O tarihten beri bilim dünyasında farklı sektör ve sahalarda FSY'ler kullanılmaktadır. FSY'ler başta savunma sanayisi, havacılık ve haberleşme olmak üzere geniş kullanım alanına sahiptir ve farklı sektörlerde yaygın olarak kullanılır. (Kutlu 2004)

Üzerine gelen elektromanyetik dalganın frekans aralığına bağlı olarak FSY'lerin S-parametreleri; yani iletim ve yansıma karakteristikleri değişir. FSY'ler genellikle mikrodalga ve optik frekanslarda filtreleme ve kalkanlama amacıyla kullanılır; yani, istenilen frekans bandını geçirir veya durdurur. FSY'ler genel olarak iki şekilde tasarlanabilir. Bunlardan birincisi dielektrik levha üzerine periyodik olarak dizilmiş metalik yamalar kullanılarak gerçekleştirilir. Bu yapılar kapasitif bir karakteristik özellik gösterdiğinden kapasitif FSY olarak bilinir. İkinci yapı ise iletken bir levha üzerinde periyodik olarak açılan delikler veya oyuklardan oluşmaktadır. Bu tür FSY'ler ise endüktif bir karakteristiğe sahip olacağından endüktif FSY olarak bilinir. Dielektrik bir yüzey üzerine periyodik olarak dizilmiş iletken yamaların veya iletken bir yüzey üzerinde oluşturulmuş periyodik oyukların toplamının rezonans tepkisi FSY'nin S-parametrelerini belirler. FSY'nin geometrik yapısı; şekli, periyodu, periyodik elemanların cinsi, dielektrik tabakanın özellikleri ve iletken malzemenin özellikleri FSY'nin karakteristiklerini belirleyen parametreler olarak sayılabilir. Böylece FSY'ler yukarıda sayılan parametrelere bağlı yüksek ve alçak geçiren, bant durduran, bant geçiren filtre gibi kullanmak amacıyla tasarlanabilir.

## 1.1. Tezin Amacı

Dünya nüfusunun artmasına ve teknolojik gelişmelere paralel olarak enerji ihtiyacı da artmaktadır. Enerji talebindeki artış sadece enerji maliyetlerini artırmakla kalmıyor, aynı zamanda çevre kirliliği gibi çevresel sorunlara da yol açmaktadır. Bu sebeple enerjiyi verimli kullanmak ve temiz enerji kaynaklarından elde etmek çok önemli hale gelmiştir. Enerji verimliliğini artırmak, yani, aynı enerji ile daha fazla katma değer elde etmek ve fosil yakıtların enerji kullanımı içerisindeki payını azaltmak da bir o kadar önemlidir. Fosil yakıtların kullanımının azaltılması birçok çevre probleminin oluşmasının da önüne geçecektir. Ülkemizdeki konutlarda tüketilen enerjinin, toplam enerji tüketiminin deki payının %20 olduğu, bu enerjinin de yaklaşık %85'inin ısıtma ve sıcak su ihtiyacını karşılamak amacıyla kullanıldığı bilinmektedir. Toplam enerji sarfiyatı içerisinde oldukça yüksek bir paya sahip olan bu sarfiyatın verimli kullanılması, mümkünse alternatif ve yenilenebilir ve daha da önemlisi daha verimli sistemlere yönelmesi büyük önem taşımaktadır. Ülkemizde, konutlarda ısıtma ve sıcak su ihtiyacını karşılamak amacıyla yaygın olarak kombi sistemleri kullanılmaktadır, ancak bu sistemlerde genellikle fosil yakıt olan doğalgaz kullanılmaktadır ve verim oldukça düşüktür.

Doğalgazlı kombi, doğalgazlı şofben, elektrikli şofben, termosifon ve benzeri klasik ısıtma sistemleri, suyu ısıtmak için elektrik ve doğal gaz kullanırlar. Bu sistemlerde elektriği doğrudan ısıtma amacıyla yani doğalgazı yakmak amacıyla kullanılır. Bu sistemlerin verim dışında yanma olayının sonucu olarak karbon monoksit gazının çevreyi kirletmesi gibi yan etkileri vardır.

FSY'ler bir tür filtre görevi yapan yapılardır, yani gelen elektromanyetik dalganın frekansına bağlı olarak yansıma veya iletim yapabilen yapılardır. Devre teorisindeki rezonanslı yapılara benzer şekilde, FSY'ler de mikrodalga frekanslarda alçak geçiren, yüksek geçiren, bant geçiren veya bant durduran filtre gibi özellik göstermekte ve istenen frekansları filtrelemek amacıyla kullanılabilirler.

Bu çalışmanın konusu; suyun 2.45 GHz'lik mikrodalga enerjisi ile çalışan bir mikrodalga kombi içerisinde ısıtılması, ısınan suyun kalorifer sistemine aktarılması ile ilgilidir. Isınan su kalorifer sistemine aktarılırken, mikrodalga enerjisinin su ile birlikte mikrodalga kombiden dışarıya sızması için bant durduran özellikli bir FSY tasarımı yapılacak ve suyun kombiye girdiği ve çıktığı boru içerisine yerleştirilecektir.

Mikrodalğanın su ısıtma amacıyla kullanılması bilinen bir uygulamadır. Ancak, daha önce mikrodalgaların kombi uygulamalarında kullanıldığına rastlanmamıştır. Ayrıca, literatür de bu amaçla tasarlanmış bir frekans seçici yüzey bulunmamaktadır. Bu sebepten dolayı, kombinin doğrudan mikrodalga ile ısıtılması ve mikrodalğanın dışarıya sızmasının engellenmesi için tasarlanan frekans seçici yüzey tamamen özgün bir çalışmadır. Bu tezin özgün değeri, suyu MW enerjisi kullanarak ısıtması, kombi içerisindeki mikrodalga enerjisinin su ile birlikte dışarı sızmaması amacıyla FSY lerin kullanılması ve ayrıca verimi yüksek bir kombi elde edilmesidir. Isınan suyun su boruları aracılığıyla sistem dışına aktarılması sırasında mikrodalğanın da kombi dışına sızıntısının engellenmesi amacıyla suyu geçiren fakat elektromanyetik dalgayı geçirmeyecek tasarıma sahip bir bant durduran FSY'nin su borusu içerisine yerleştirilmesidir.

Söz konusu tez çıktısı olarak elde edilecek ürün herhangi bir alt yapı çalışması gerektirmeyecek, mevcut kombi sistemlerinde kullanılan alt yapı aynen korunacaktır. Doğalgaz kullanımını azaltarak fosil yakıt kullanımını azaltması ve bunun sonucunda doğadaki karbon ayak izimizi azaltması yani çevreye faydalı olabilecek bir çalışma ortaya koyulabilecektir. 2.45 GHz'lik elektrik enerjisinin tamamının suya aktarılması sayesinde daha yüksek verimli olması ve böylece kullanıcının fatura maliyetini azaltması, yapı içerisinde duvarlarda bir tesisat gerektirmemesi, üretimi kolay olması bu tasarımın mevcut kombi sistemlerine göre avantajları olarak sıralanabilir.

2.45 GHz'de çalışan bir magnetron ve aynı frekans bandı için tasarlanacak FSY yapısı ile su ısıtma sistemi tasarımı hedeflenmektedir. Mevcut teknolojiden farklı olarak, suyu geçiren fakat 2.45 GHz'lik mikrodalga enerjisini geçirmeyen bir FSY tasarlayarak alternatif bir ısıtma sistemi gerçekleştirilmesi hedeflenmektedir.

Önerilen tezin amacı, mikrodalga fırınlarında bulunan magnetron kullanarak mikrodalga enerjisini üretmek, bu enerji yardımıyla mikrodalga kombi içerisinde suyu ısıtmak, ısınan suyu kalorifer sistemine aktarmak ve bu aktarım sırasında su giriş çıkış borularından mikrodalgaların dışarıya sızmasını engellemek için bant durduran özellikli bir FSY tasarlamaktır.

## 1.2. Hipotez

Daha önceki FSY'ler ile ilgili yapılan çalışmalarda üretim tekniğine ve kullanım alanına göre araştırmalar ve geliştirmeler yapılmıştır.

Bu çalışmada ise telekomünikasyon, savunma sanayi, havacılık gibi birçok alanda kullanılan frekans seçici yüzeylerin bilindik üretim teknikleri kullanılarak kullanım alanı genişletilmiştir.

Çalışmada 2,45 GHz çalışma frekansında bant durduran filtre özelliği gösteren FSY kullanılacaktır. Tasarlanan FSY'nin 2 farklı simülasyon programında simülasyon çalışmaları yapılarak su içerisinde ve hava ortamında FSY yüzeyine gelen elektromanyetik dalganın yansıma özellikleri incelenmiştir. Bu inceleme sonucunda FSY'nin hava ortamında çalıştığı gibi su ortamında da bant durduran filtre özelliği gösterdiği anlaşılmıştır. Simülasyon çalışmaları neticesinde boyutlar optimize edilmiş ve tasarlanan FSY'nin üretimi gerçekleştirilmiştir. Ardından, network analizör cihazı kullanılarak üretilen FSY'nin yansıma ve iletim parametreleri ölçülmüştür. Ölçümler üretilen FSY yapıları boşluk ortamda ve su içerisine konularak gerçekleştirilmiştir. Bu testler sonucunda FSY'nin hem boşluk ortamda hem de su içerisinde üzerine gelen 2,45 GHz'lik elektromanyetik dalgayı yansıttığı gözlenmiştir.

Bu yöntemler ile normalde haberleşme, havacılık, savunma gibi sektörlerde kullanılan FSY'ler ısıtma sistemlerinde de kullanılabilirliği anlaşılmıştır.

## 2. LİTERATÜRDEKİ ÇALIŞMALAR

FSY'ler, genel olarak dar bantlı olduklarından ve yeterli uzaysal filtreleme yanıtı sağlamadıklarından dolayı FSY'lerin bant genişliğini artırmak ve frekans tepkisini geliştirmek için kapsamlı araştırmalar devam etmektedir. Diğer taraftan, tek katmanlı FSY yapılarının, EM dalga geliş açısının değişmesine karşı istikrarsız performans sergiledikleri de bilinmektedir. Bu nedenle, tek katmanlı FSY'lerin sınırlamalarının üstesinden gelmek ve istenen performans için değişen parametrelerde ek esneklik sunan çok katmanlı FSY'ler tanıtılmıştır [Anwar; Martinez., Abdelrahman; Abadi], [Li,B; Rashid; Kiani; Li,L]. Ayrıca, entegre FSY ve Elektromanyetik bant aralığı yapıları (EBG) [Huang] ile metamateriyal FSY'ler [Sun, Song] mikrodalga araştırmacıları tarafından üzerinde çalışılmakta olan en son gelişmelerdir.

FSY'lerle ilgili olarak, son yıllarda yapılan çalışmalardan bir tanesi 2007 yılında Delihacıoğlu ve arkadaşları tarafından yapılmıştır (K Delihacioglu, Uckun, and Ege 2007). Bu çalışmada, dielektrik alt tabaka tarafından desteklenen L-şekilli ve tek dönüşlü sarmal şekilli FSY'lerin çift sonsuz periyodik iletken dizilerinin sınır değeri problemi, modal genişletme yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Bir diğer çalışma 2013 yılında yapılmıştır. (Delihacioglu, Sabah, Karaaslan, and Unal 2013) tarafından yapılan çalışmada zik zag şeklinde bir FSY yapı incelenmiş, bu yapının yansıma ve iletim katsayıları teorik olarak analiz edilmiştir. 2017 yılında yapılan bir başka çalışmada metalmalzemeye (MTM) soğurucu (MA) tabanlı bir sensör tasarlanmış ve basınç, sıcaklık, yoğunluk ve nem algılama gibi çeşitli önemli uygulamalar için analiz edilmiştir. Malzeme parametrelerinin yanı sıra eşdeğer devre modeli çıkarılmış ve açıklanmıştır. MTM sensör uygulamaları için bant genişliği ve farklı sensör uygulamalarına uygulanabilirlik önemli olduğundan, basınç, sıcaklık, nem içeriği ve yoğunluk için farklı sensör gösterimleri gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar mevcut literatür ile karşılaştırılmıştır. (Karaaslan et al. 2017).

Tarım ve gıda endüstrilerinde farklı karışımların algılanması amacıyla, bant genişliği yaklaşık 800 MHz olan mikrodalga sensör yapıları Dinçer ve arkadaşları tarafından incelenmiştir. (Dincer et al. 2016). (Karadağ et al. 2019) tarafından yapılan çalışmada 2.46 GHz'de çalışan, mikroşerit yama antenin kullanıldığı mikrodalga görüntüleyici tasarlanmıştır.

(Wu 2005) tarafından yapılan çalışmada dalga kılavuzu parafin mumu gibi bir dielektrik madde ile doldurulduğunda dalga kılavuzunun kesme frekansının azaltıldığı ifade edilmiştir. Izgara lobu olmadan daha küçük dalga kılavuzunda gerçekleştiği ayrıca geliş açısının artmasının çapraz polarizasyon seviyesini arttırdığı ve dairesel olarak eliptikliğe neden olduğu anlaşılmıştır.

FSY tabanlı, Elektromanyetik bant boşluğu (EBG) içeren bir çalışma Lina ve arkadaşları tarafından 2010 yılında yapılmıştır. Bu çalışmada FSY tabanlı EBG yapıların bant genişletme özelliği incelenmiş ve EBG rezonatörünün, üst arayüzünün uygun FSY den oluşması durumunda geniş bant davranışına sahip olma yeteneğine odaklanmaktadır. Öncelikle farklı FSY'lerin birleştirilmesiyle oluşturulan yeni EBG malzemesinin ve yeni EBG rezonatörünün davranışı açıklanmıştır (Lina and Jecko 2010). 2010 yılında yapılan bir başka çalışma ise Euler ve arkadaşları tarafından yapılmıştır (Euler et al. 2010). Elde edilen sonuçlar değerlendirilmiş, ölçülen ve modellenen tahminler arasında iyi bir uyum olduğu belirtilmiştir.

(Li et al. 2011) tarafından yapılan çalışmada, genlik kontrollü yansıtıcı için bir yansıma düzlemi olarak desteklenen düzgün olmayan FSY kullanan yeni bir konsept önerilmiştir. FSY'nin her bir eleman boyutunu uygun şekilde kontrol ederek, reflektör dizisi elemanından yansıma genliği yeterince kontrol edilebilir ve genlik kontrollü reflektör dizisinin gerçekleştirilebilir olduğu ifade edilmiştir. Ayrıca, Dolph-Tschebyscheff ağırlık katsayılarını kullanan bir yansıtma dizisi uygulanmış ve 22 dB'ye kadar ana lob-yan lob oranları elde edilmiştir.

2018 yılında yapılan bir çalışmada, FSY'lerin tasarımında, kullanılan dizi eleman ve uygulamalar incelenmiştir (R. Anwar, Mao, and Ning 2018). (G. Xu, Hum, and Eleftheriades 2018) tarafından yapılan bir diğer çalışmada ise çok katmanlı bir FSY'nin katmanlar arasındaki kuplajı göstermek amacıyla bir eş değer devre modeli önerilmiştir. Önerilen bu model ile deneysel ve teorik olarak incelenmiştir.

(English and MacElroy 2003) tarafından yapılan çalışmada yoğun bir mikrodalga alanı içerisinde suyun moleküler boyutta dinamik simülasyonları, normal ortam koşullarından süper kritikliğe kadar katı (polarize edilir), esnek (polarize edilemez) model kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Mikroskobik enerji dengesi ve polarize modelin bu konuda üstün olduğu bulunmuştur.

2011 yılında Ortiz ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada Bölünmüş Halka Rezonatörlerden (SRR'ler) ve aynı zamanda yüzeyin kendi kendini tamamlayacağı şekilde yerleştirilmiş Tamamlayıcı Bölünmüş Halka Rezonatörlerden (CSRR'ler) oluşan yeni bir yapı önerilmiştir. (Ortiz et al. 2011). Diğer taraftan, (Gümüşderelioğlu and Kaynak 2012) tarafından yapılan çalışmada mikrodalgaların çalışma prensibi, kullanım alanları, faydaları, zararları incelenmiştir.

Mutfaklarda kullanılan mikrodalga fırının kontrolü, 2014 yılında Tıgılı tarafından Z80 mikroişlemci aracılığıyla araştırılmıştır. Bu sistemde, mikrodalga enerjisinin üretildiği magnetrona sağlanan güç, sinyalinin sıfır geçişleri ve kullanıcının belirlediği zaman-güç değerlerini kullanılarak kontrol edilmiştir. Bu işlem kullanılan sinyalin faz açısı kontrol edilerek gerçekleştirilmiştir. Magnetrona sağlanan güç, bu gücün süresi sisteme girdi olarak kullanıcı tarafından girilmekte, girilen veriler program aracılığıyla kontrol edilerek uygulanmaktadır. (Tıgılı 2014)

2019 yılında Duman tarafından yapılan çalışmada FSY yapı, belli frekans aralıklarında istenmeyen frekansları azaltmak veya engellemek amacıyla bant durduran filtre olarak kullanılmıştır. Tasarlanan bu yapının rezonans frekansı  $1.35 \text{ GHz}$  ve bant genişliği  $44 \text{ MHz}$  olarak belirtilmiştir. Bant durduran özellikli FSY yapı oluşturulurken kompozit epoksi plakalar kullanılmış, herhangi bir aktif devre elemanı kullanılmamıştır. Sadece pasif elemanlardan oluşan, bant durduran filtre özelliği gösteren bu yapının özellikleri de ayrıntılı olarak incelenmiştir. (Duman 2019).

Çok katmanlı FSY yapı 2002 yılında Erdemli ve arkadaşları tarafından çalışılmıştır. Bu çalışmada geniş bant, açıklık (aperture) anten performansının artırılması amacıyla yeni nesil bir FSY tasarımı yapılmıştır. Özellikle, dipol anten dizilerinin performansına FSY yapının etkisi incelenmiştir. Geniş bant gerekliliklerinin aynı zamanda orantsız FSY tasarımlarına olan ihtiyacı da beraberinde getirdiği belirtilmiştir (Erdemli et al. 2002).

Bant genişliği tasarım doğruluğunun iyileştirilmesine ilişkin tartışmalar 2017 yılında Liu ve arkadaşları tarafından değerlendirilmiştir. Bant genişliği açısız kararlılığı dikkate alınarak önerilen yöntemle tasarlanan yapı, FSY anten kaportası inşa etmeye daha uygun olduğu belirtilmiştir. Bu çalışmada,  $15 \text{ GHz}$ 'de çalışan ve bant genişliği  $2 \text{ GHz}$  olan bir FSY yapı analiz edilmiş, üretilmiş ve ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Simüle edilen ve ölçülen sonuçlar arasında iyi uyumlar gözlemlenmiştir (N. Liu et al. 2017).

Grafen tabanlı FSY yapı, 2017 yılında Qu ve arkadaşları tarafından çalışılmıştır. Önerilen FSY, kimyasal potansiyel tarafından kontrol edilen grafen şeritlerin değiştirilebilir iletkenliğine bağlı olarak ayarlanabilir bir bant geçiren filtreleme özelliği sergilediği belirtilmiştir. Bu çalışmada, yeniden yapılandırılabilen FSY'nin bant geçirme özelliği temel teşkil etmiştir. Radom ile yüklenen dipolün ileri ve geri uç ateş radyasyonları, kimyasal potansiyelin uygun şekilde ayarlanmasıyla gerçekleştirildiği belirtilmiştir. Bu çalışmada önerilen anten terahertz ve kızılötesi frekanslarda ve ayrıca plazmonik cihazlarda ve sistemlerde potansiyel kullanım alanına sahip olduğu ifade edilmiştir. (Qu et al. 2017).

FSY tabanlı polarizör çalışması 2017 yılında Zhang ve arkadaşları tarafından çalışılmıştır. Bu çalışmada, doğrusal polarizasyonu dairesel polarizasyona dönüştüren FSY tabanlı polarizasyon dönüştürücü önerilmiştir. Önerilen yeni polarizörün hem geniş operasyonel bant genişliği hem de yüksek iletim katsayıları gibi avantajları olduğu ifade edilmiştir. (W. Zhang, Li, and Xie 2017).

2005 yılında Wu tarafından yapılan çalışmada FSY'lerin türleri, özellikleri, yapışan elemanların FSY karakteri üzerine etkileri ayrıntılı bir şekilde araştırılmıştır. Ayrıca, FSY'lerin analiz yöntemleri, potansiyel kullanım alanları da ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir. (Wu 2005b).

Zong ve Wu 2009 tarafından yapılan çalışmada her birim hücrenin farklı farklı kapasitif yüklemelere sahip çift kare döngülerden oluşan dar bant aralığına sahip minyatürleştirilmiş çift bantlı FSY yapı sunulmaktadır.

Singh ve arkadaşları tarafından 2020 yılında yapılan çalışmada rezonans frekansı üzerindeki etkiyi göstermek için çeşitli FSY parametreleri tartışılmıştır. Üretim sürecini daha kolay ve uygun maliyetli hale getirmek için verici ve alıcı antenler de 3 boyutlu baskı malzemesi kullanılarak üretildiği belirtilmiştir. 3 boyutlu baskı, diğer geleneksel tekniklerle karşılaştırıldığında uygun maliyetli üretim tekniği sunar ve hızlı prototip oluşturmaya yardımcı olduğu ifade edilmiştir. Üretilen prototip, simüle edilen sonuçlar ile ölçülenler arasında iyi bir uyum olduğunu gösteren deneysel sonuçlarla doğrulanmıştır (Singh, Jain, and Yadav 2020).

2019 yılında Ghosh ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, 3D baskı tekniği kullanarak minyatür bir bant geçiren FSY özellikleri incelenmiştir. (Ghosh and Lim 2019).

Çoklu yama veya açıklık dizi tabanlı FSY yapısı, 1998 yılında Reed ve arkadaşları tarafından incelenmiştir. Modal yöntemeye dayanan yöntemimiz, bir birim hücre içindeki birden fazla açıklığın veya yamanın boyut veya şekil bakımından aynı olmasına gerek olmaması açısından benzersiz olduğu belirtilmiştir. Önerilen yöntem, değişen uzunluktaki dar dikdörtgen açıklık desenleriyle delikli, mükemmel şekilde iletken ince tabakalara uygulanmış, çift rezonanslı bir spektral iletim profili üreten bir yuva açıklıkları deseni ortaya konulmuştur (Reed and Byrne 1998).

Dielektrik alt katman üstüne periyodik olarak yerleştirilen iletken desenler şeklindeki üretim tekniğinin bir takım sertlik ve esneklik problemleri ortaya çıkardığı ifade edilmiş, katman şeklindeki üretim tekniği FSY'nin esnekliği açısından bazı zorluklara sebep olduğu belirtilmiştir. Harnois ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada FSY'yi 3 boyutlu olarak imal etmenin hem üretim maliyetlerini iyileştireceği hem de esneklik problemine çözüm olabileceği belirtilmiştir.

Yapılan başka bir çalışmada ise bant durduran bir karakteristiğe sahip yeni ve yeniden yapılandırılabilir üç boyutlu FSY sunulmaktadır. Önerilen FSY yapının mikrodalga frekanslarında L ve S bantlarında band durdurma özelliğine olduğu ifade edilmiştir. (Sivasamy and Kanagasabai 2017).

X. Liu ve arkadaşları tarafından 2020 yılında tarafından yapılan çalışmada, bir cam alt tabaka kullanılarak elde edilen bant durduran bir FSY yapı incelenmiştir. (X. Liu et al. 2020).

(Wang et al. 2014) tarafından yapılan çalışmada antenin ışın genişliğini dinamik olarak kontrol etmek için frekans seçici yüzeyin (FSY) kullanılmasına yönelik bir yöntem önerilmiştir. Bu çalışmada varaktörlerle yüklenmiş, periyodik H şekilli iki katmanlı bir yapı incelenmiştir. Her birim hücreye yüklenen varaktörün kapasitansını makul bir şekilde ayarlayarak tüm FSY'nin şeffaf bölgesinin kontrol edilebileceği ve böylece iletilen dalğanın ışın genişliğinin ayarlanabileceği ifade edilmiştir. Yukarıdaki özellik, FSY'nin huni anten dizisinin üzerine üst tabaka olarak yerleştirilmesiyle doğrulanmıştır.

2017 yılında N. Liu ve arkadaşları tarafından önerilen yapıda, geliş açısına duyarsız bir FSY yapı incelenmiştir. Bu çalışmada ayrıca, FSY'nin bant genişliği ve açısız duyarlılığı iyileştirilmiş ve en küçük kareler metodu ile istenen rezonans frekansı

ve bant genişliği için yapısal parametreler elde edilmiştir. Bant genişliği tasarım doğruluğunun iyileştirilmesine ilişkin tartışmalar sunulmuştur. (N. Liu et al. 2017).

(Samaddar et al. 2017) tarafından yapılan çalışmada bant geçişli silindirik çift katmanlı frekans seçici yüzeyler (FSY'ler) moment yöntemi (MOM) kullanılarak incelenmiştir. Teorik ve ölçümlü incelemeler sırasıyla FEKO simülatör ve mikrodalga test tezgâhı kurularak değerlendirilmeler yapılmıştır (Samaddar et al. 2017).

(TAKANO et al. 2017) tarafından yapılan çalışmada saçıcıların bulunduğu kapalı bir ortama boşluk rezonatörü kablosuz güç aktarımı (CR WPT) uygulanmış ve görüş hattı (LOS) ve görüş hattı olmayan (NLOS) konumlarda yüksek aktarım verimliliği elde edildiği ifade edilmiştir. Ayrıca, metal ağ kullanarak kablosuz güç aktarım bölgesini sınırlamak amacıyla da bir yöntem önerilmiştir.

(Murugan et al. 2015) tarafından yapılan çalışmada, mikrodalga fırınların çalışmasını sağlayan 2,45 GHz'lik 1000 Watt gücündeki sinyallerin fırın camından dışarı sızmasını engellemek amacıyla bant durduran özellikli FSY yapı incelenmiştir. Bu çalışmada, dairesel halka şeklinde yamalardan oluşan iki farklı FSY dizinin tasarım ve simülasyon sonuçları tartışılmıştır.

2021 yılında Fan ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, güçlü mekanik çekme deformasyonuna dayanabilen, deformasyona bağlı olarak rezonans frekansı değişen, burkulma dipolüne sahip esnek bir FSY yapı incelenmiştir.

(T. Liu and Kim 2019) tarafından yapılan çalışmada 90° dönme simetrisine sahip dört katlanmış kol spiral iletkenlerden oluşan küçük bir dizi periyodikliği elde etmek amacıyla yüksek kapasitif bir FSY yapı önerilmiştir. Küçük bir aralık aralığı ile büyük etkili bölümler üzerine dağıtılmış katlanmış spiral iletkenler arasındaki düzlemler arası ve düzlem içi bağlantılardan kaynaklanan yüksek bir kapasitans değeri elde edildiği belirtilmiştir.

(Vasquez et al. 2020) tarafından yapılan çalışmada iki frekans bandının iletilmesine ve üçüncü bir bandın yansımaya olanak tanıyan endüktif FSY tabanlı bağımsız dikroik alt reflektör sunulmaktadır. Alt reflektörün çalışma frekansları Ku, K ve Ka frekans bantlarına denk gelecek şekilde tasarlanmıştır. FSY, eşdeğer devre modeli tekniğinin yanı sıra iletim hattı teorisi kullanılarak araştırılmıştır.

(Lee, Zarrillo, and Law 1982a) tarafından yapılan çalışmada periyodik metal ızgaralardan (endüktif ekran) veya metal plakalardan (tamamlayıcı kapasitif ekran)

yapılmış bir ekran aracılığıyla normal olarak gelen bir elektromanyetik düzlem dalgasının iletim katsayısı için kapalı formda varsayımaya dayalı basit bir çözüm önerilmiştir.

Dar bantlı, bant geçiren filtre özelliğine sahip, minyatürleştirilmiş bir FSY yapı 2015 yılında Momeni ve arkadaşları tarafından incelenmiştir. Önerilen yapı endüktif özellikli, tel ızgara yapıların periyodik diziliminden oluşmaktadır. Ayrıca, bu yapı için basit bir eşdeğer devre modeli de önerilmiştir. (Momeni Hasan Abadi and Behdad 2015)

FSY'ler hakkında yapılan başka bir çalışmada ise FSY'lerin imalatının yapılabilmesi için kullanılan temel ilke, geometri ve üretim tekniklerine odaklanılmıştır. Geleneksel yöntemlerden üç boyutlu FSY'lere kadar uzanan tüm üretim serüveni incelenmiştir. (Kapoor, Mishra, and Kumar 2022)

Fraktal yinelemeli teknikler kullanılan başka bir çalışmada, bu teknikler ile FSY üretilmiş ve ölçümler yapılmıştır. Bu çalışmada, periyodik yapıları, moment yöntemi (MOM) ve zamanda sonlu farklar domain (FTDT) teknikleri dahil olmak üzere simülasyon yetenekleri gösterilmiştir. (Gianvittorio et al. 2003)

(G. H.-H. Sung et al. 2006) tarafından yapılan çalışmada kapalı kablosuz ortamlarda, duvara duvar kâğıdı olarak bant durdurucu bir FSS uygulanarak, parazit kontrolü için etkili bir teknik önerilmiştir. Önerilen FSS yapının performansı hem eşdeğer devre modelleme ile, hem de pratik ölçümlerle incelenmiştir.

(Katoch, Jaglan, and Gupta 2019) tarafından yapılan çalışmada FSY ve kavramları detaylı olarak araştırılmıştır. FSY'lerin özelliklerini daha iyi anlamak adına çeşitli geometrik yapılarda FSY'lerin eşdeğer devre modelleri incelenmiştir.

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada, kombi sistemlerinde suyu ısıtmak amacıyla kullanılan doğalgaz ve fosil yakıtlar yerine mikrodalga enerjisi kullanarak daha verimli ve yenilikçi bir kombi sistemi tasarımı hedeflenmektedir. Ayrıca, doğalgazlı kombi kullanan evlerde duvarların içinden ve dışından geçen boruları kaldırmak ve olası doğal afetlerde enkaz oluşumu nedeniyle doğalgaz hatlarında meydana gelebilecek tehlikelerin önüne geçmek, bacası bulunan cihazların aksine doğaya karbon monoksit salmayarak karbon monoksit salınımını azaltmak ve doğalgaz alt yapı masraflarının azaltılması hedeflenmektedir.

Doğalgazlı kombi, doğalgazlı şofben, elektrikli şofben, termosifon ve benzeri klasik ısıtma sistemleri suyu ısıtmak için elektrik veya doğal gaz kullanırlar. Bu sistemlerde elektrik enerjisi doğrudan, doğalgaz ise yakılarak suyu ısıtma amacıyla kullanılır. Bu çalışmada, suyun mikrodalga enerjisi kullanılarak ısıtılması, mikrodalga enerjisi suya doğrudan transfer edileceğinden verimi yüksek bir kombi sisteminin elde edilmesi hedeflenmektedir. Isınan suyun su boruları aracılığıyla kombi sistemi dışına aktarılması sırasında mikrodalga enerjisinin de kombi dışına sızıntısının engellenmesi amacıyla suyu geçiren fakat mikrodalga enerjisini geçirmeyecek, kombi içerisine hapsedecek tasarıma sahip, bant durduran bir FSY'in su borusu içerisine yerleştirilmesi amaçlanmıştır.

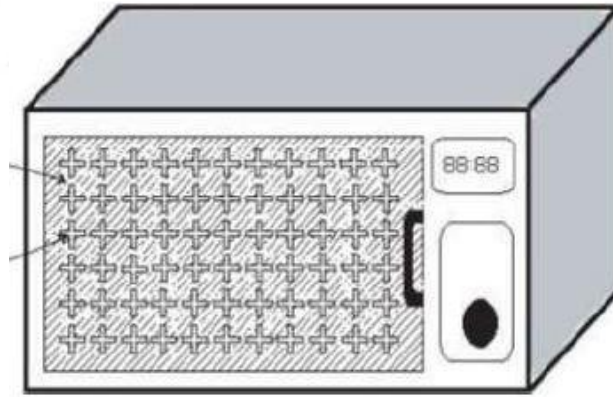
Mikrodalğanın su ısıtma amacıyla kullanılması bilinen bir uygulamadır (Tanaka and Sato 2007). Ancak, daha önce mikrodalgaların kombi uygulamalarında kullanıldığına rastlanmamıştır. Ayrıca, literatürde bu amaçla tasarlanmış bir FSY bulunmamaktadır. Bu sebepten dolayı, kombiden geçen suyun doğrudan mikrodalga ile ısıtılması ve mikrodalğanın dışarıya sızmasının engellenmesi için tasarlanan FSY tamamen özgün bir çalışmadır.

#### 3.1. Frekans Seçici Yüzeyler

FSY'lerin özellikleri yani, iletim ve yansıma karakteristikleri birçok parametreye bağlıdır. Periyodik yapıyı içerisinde yer alan birim hücrenin yapısı, şekli ve boyutu, ayrıca alt taş olarak kullanılan malzemenin kalınlığı ve dielektrik sabiti bu parametrelerden bazılarıdır. Diğer taraftan, dalğanın geliş açısı ve polarizasyonu da belirleyici faktörler arasındadır. (General Overview 2000, Takano et al. 2017). FSY yapının filtreleme özelliği

gelen elektromanyetik dalganın frekansına göre ayarlanabilir. Frekans seçme işlemi, tıpkı elektronik devrelerde pasif filtrelemenin kondansatör, indüktör ve dirençler ile gerçekleştirilmesi gibi, oluşturulan bu yüzeyler sayesinde yapılır. Dolayısıyla her FSY tasarımı arka planda bir devre tasarımı olarak düşünülebilir (Lee, Zarrillo, and Law 1982b).

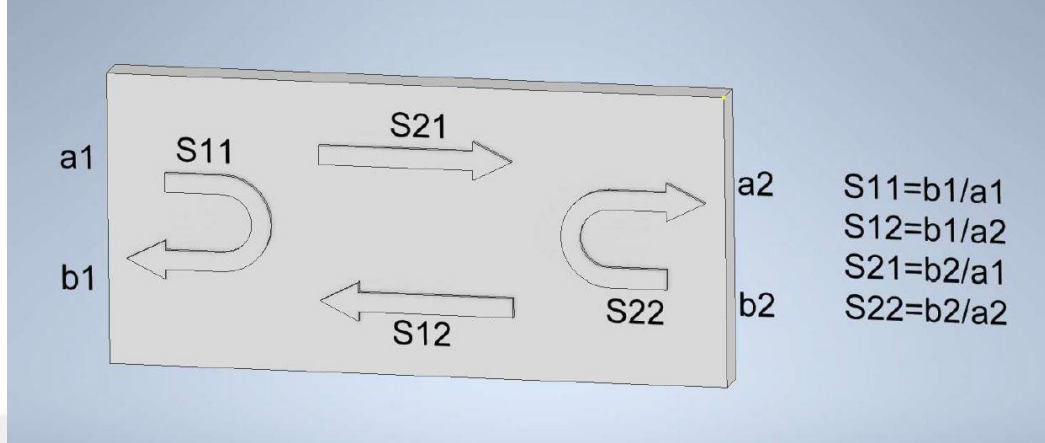
FSY'ler yetmiş yılı aşkın bir süredir araştırma konusu olmuştur. FSY'ler başlangıçta çoğunlukla askeri amaçlar için kullanılmıştır. Askeri amaçlar için üretilen FSY'ler radar kesit alanını (RCS) azaltmaya yöneliktir. Ayrıca şekil 1 de görüldüğü üzere mikrodalga fırın uygulamaların kapak kısımlarında, anten tasarımları, filtre tasarımları gibi çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır. Fiziksel olarak birçok FSY tasarımı mevcuttur. Örneğin Şekil 1 de (Murugan et al. 2015) görüldüğü gibi mikrodalga fırınların ön kısmında bulunan cam bölme üzerinde bulunan FSY uygulaması sayesinde fırın içerisindeki mikrodalga enerjisinin dışarı çıkması engellenmektedir (Işık 2022; Murugan vd. 2015).



Şekil 1. Mikrodalga fırın camı üzerinde FSY uygulaması

Bu çalışmada yansımaya,  $S_{11}$  ve iletime,  $S_{21}$  parametreleri incelenerek değerlendirme yapılacaktır. Mikrodalga şebekeler saçılma (S) parametreleri kullanılarak karakterize edilir. Mikrodalga şebekelerde, gelen ve giden dalgaları kullanarak akım ve gerilimlerden daha kolay hesaplandığı için S parametreleri kullanılır, ancak S-parametreleri frekansa bağlıdır, bu sebeple S-parametrelerinin ölçüldüğü frekans belirtilmelidir (Pozar 2012).

Şekil 2’de, iki portlu bir sistemin S parametre modellemesinin temsili bir gösterimini verilmektedir (Işık 2022).



Şekil 2. İki kapılı bir şebekede S-Parametre gösterimi

FSY'ler teoride sonsuz ve periyodik dizilerdir. Fakat gerçek hayatta sonsuz bir dizi gerçekleştirmek mümkün değildir. Birim hücre sayısı kısıtlı olan FSY'ler özellikle dalganın geliş açısındaki değişimden etkilenir. FSY tasarımında, geliş açısına ve polarizasyona duyarsızlık da dikkate alınması gereken önemli iki parametredir. Polarizasyona duyarsızlık, yatay ve düşey ekseninde simetrinin sağlanması ile elde edilebilir. Birim hücrenin küçük olması, rezonans frekansını ve kararlılığını artırır, muhtemelen daha geniş bant genişliği sağlar. Birim hücrenin küçük olmasının ayrıca, geliş açısına duyarlılığı da azaltan etkisi olduğu bilinmektedir. Daha sonra hangi filtre modellemesinin bu amaca en uygun olacağına karar vermek gerekir. Son olarak da bu amaca ulaşacak filtre modeli için en uygun fiziksel tasarımı analizlerle destekleyerek modellemek gerekir. Bu tasarımları ve analizleri gerçekleştirmek için çeşitli ticari elektromanyetik analiz programları mevcuttur(Işık 2022).

### 3.1.1. Frekans Seçici Yüzeylerin Sınıflandırılması

FSY'lerin yapıları potansiyel olarak kullanım alanlarına ve amaçlarına göre farklı fiziksel ve yapısal özelliklere sahiptir. Pasif elemanlar kullanılarak pasif FSY yapılar oluşturulabildiği gibi, aktif elemanlar kullanılarak da aktif FSY yapılar tasarlanabilmektedir.

### 3.1.1.1. Aktif Frekans Seçici Yüzeyler

Aktif FSY'ler, FSY'nin birim hücreleri arasına elektronik devre elemanları olan varaktör, diyot veya kondansatör gibi aktif elektronik devre elemanları konularak elde edilir. Aktif FSY yapısında kullanılan elektronik devre elemanları, rezonans frekans aralıkları ve bant genişliği kolayca kontrol edilebilir özellikte FSY'lerin oluşturulmasına imkân sunarlar. Ancak aktif FSY yapıların yüksek maliyet ve karmaşık yapıların tasarımı gibi bazı önemli dezavantajları da bulunmaktadır. Ayrıca, bu tür FSY'ler de DC güç kaynağı ile besleme yapılması gerekmektedir (Sharipov vd. 2016).

### 3.1.1.2. Pasif Frekans Seçici Yüzeyler

Pasif FSY'lerin rezonans frekansları ve bant genişlikleri aşağıda bahsedilecek tasarım parametreleri dikkate alınarak, tasarımı yapılırken tasarımcı tarafından belirlenir. Tasarımı tamamlanmış FSY'nin tasarım çalışmalarında belirlenen çalışma frekansı ve bant genişliği gibi özellikleri üretim sonrası değiştirilemez. Pasif FSY'ler elektronik devre elemanı içermezler, yani aktif elemanı yoktur. Pasif FSY'lerin aktif FSY'lere göre en önemli avantajı üretimlerinin kolay ve ucuz olmasıdır. Ayrıca, pasif FSY'ler, aktif FSY'lerde olduğu gibi bir DC güç kaynağına ihtiyaç duymazlar (Sharipov vd. 2016).

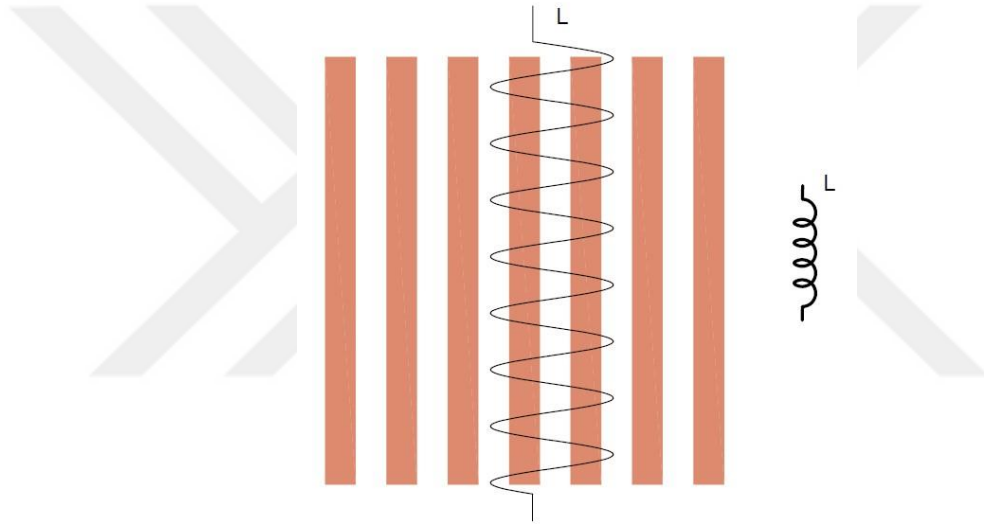
### 3.1.2. Eşdeğer Devre

FSY'ler, yapıldıkları malzemelerin yüzeylerinin şekillendirilmesi ile elde edildiğinden, FSY'ler de çoğunlukla dikdörtgen yapılar kullanılır. Bunun nedeni hem üretimlerinin kolaylığı hem de eşdeğer devre modellemesinin kolaylığıdır. Birçok FSY problemi devre teorisi ve elektromanyetik teori birlikte kullanılarak modellenebilir (General Overview 2000). Tüm FSY'ler temel elektronik devrelerde kullanılan kapasitif ve endüktif gibi özellikler sergiler (Fan et al. 2021). Böylece, FSY, toplu kapasitans ve endüktanslardan oluşan bir mekanizma olarak modellenebilir (T. Liu and Kim 2019).

### 3.1.2.1. FSY'lerin Eşdeğer Devre Modellemesi

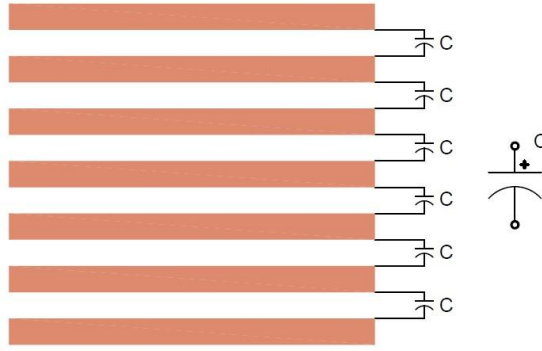
FSY'ler, elektrik alanın yönüne göre kapasitif ve endüktif olmak üzere iki farklı devre elemanı gibi davranabilir. Endüktif ve kapasitif değerleri, FSY'nin uzunluğu ve kalınlığı, FSY malzemesinin türü ve iki FSY arasındaki hava boşluğunun mesafesi gibi parametrelerden etkilenir (Işık 2022).

Elektrik alanı, dikdörtgen FSY'nin uzun kenarına paralel ise, iki dikdörtgen yapı arasındaki kuplaj nedeniyle endüktif bir etki oluşur (Vasquez et al. 2020, 2022). Bu endüktif etki endüktans olarak bilinen elektronik devre elemanı ile modellenenir. Şekil 3 de verilen yapıda, endüktif etki gösteren FSY tasarımına örnek bir model gözlenebilir.



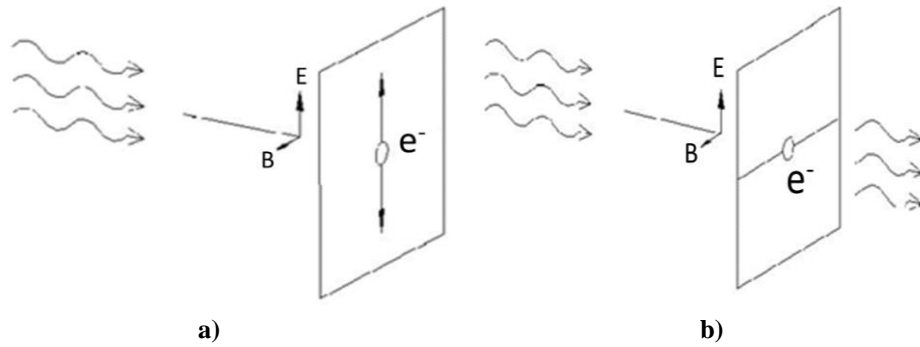
Şekil 3. FSY'nin Endüktif modellenmesi

Elektrik alanı, dikdörtgen FSY'nin uzun kenarına dik ise, iki dikdörtgen yapı arasında zıt elektrik yüklerinin oluşması nedeniyle kapasitif bir etki meydana gelir. Her dikdörtgen FSY parçası bir önceki FSY parçası ve bir sonraki FSY parçası ile polarize olduğundan, her iki komşu dikdörtgen FSY arasında kapasitif bir etki gözlenir. Bu kapasitif etki kapasitans olarak bilinen bir devre elemanı ile modellenenir (T. Liu and Kim 2019). Bilindiği gibi kapasitif etkinin oluşabilmesi için iki iletken levha arasına bir dielektrik malzemeye gerek vardır. Dikdörtgen FSY'ler iletken görevi görürken, aralarındaki hava boşluğu yalıtkan görevi görür. Şekil 4'de, kapasitif etki gösterecek tasarıma sahip bir FSY'nin örneği verilmiştir.



Şekil 4. FSY'nin Kapasitif modellenmesi

FSY'ler, toplu elemanlarından oluşan eşdeğer devreler kullanılarak tasarlanabilir. Analog devrelerde olduğu gibi, FSY tasarlanırken bu toplu devre elemanlarının değerleri değiştirilerek istenilen filtre cevabı alınmaya çalışılır. Bu parametreler geleneksel elektronik devrelerde kullanılan devre elemanının devreye bağlanması ve değerlerin değiştirilmesiyle elde edilirken, üzerinde aktif eleman olmayan FSY'lerden oluşan yapılarda, birim hücrenin şekli, boyutu gibi parametrelerin değiştirilmesi ile istenilen frekans tepkisi elde edilmeye çalışılır.



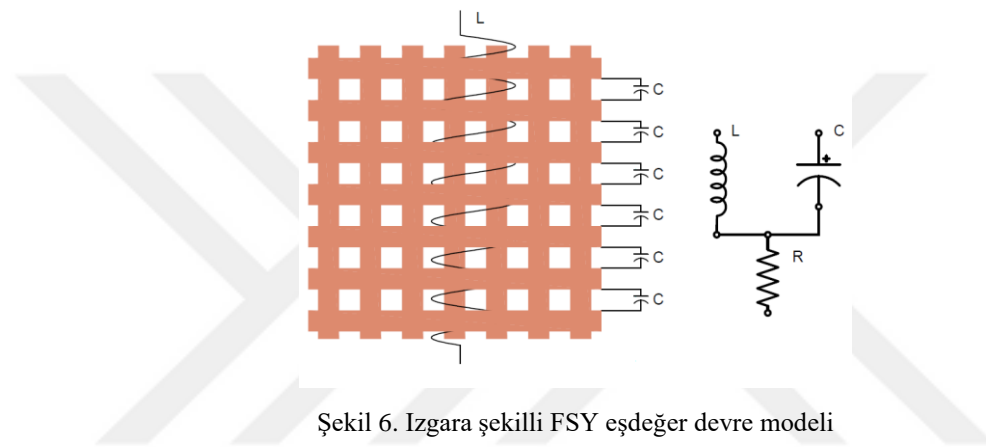
Şekil 5. İndüklenmiş salınım

a) Düşük geçirgen özellikli indüklenmiş salınım b) Yüksek geçirgenlik özellikli indüklenmiş salınım yok

Şekil 3'de gösterilen yapıya benzer, elektrik alan vektörüne paralel olan bir metal yapı Şekil 5a'da verilmiştir. Ayrıca, sol taraftan gelen bir düzlem dalganın metal bir yüzeye çarptığı görülmektedir. Elektromanyetik dalganın çarptığı metal yüzeyde tek bir elektronun bulunduğunu varsayalım. Bu elektrik alan vektörü elektron üzerinde bir kuvvet uygular ve onun salınmasına neden olur. Bu nedenle, elektronun salınım durumunda

kalabilmesi için kaynaktan gelen enerjinin bir kısmının kinetik enerjiye dönüşmesi gerekir. Enerjinin korunumunu için, gelen gücün sadece bir kısmı iletilecek ve geri kalanı elektron tarafından emilecektir. Dalgadan gelen enerjinin tamamı metaldeki elektronlara aktarılırsa, filtreden geçen iletim sıfır olacaktır (Hooberman 2005).

Diğer taraftan, Şekil 4’de gösterilen yapıya benzer, elektrik alan vektörüne dik olan bir metal Şekil 5b’de görülmektedir. Eğer bir elektron bu tel boyunca hareket etmeye zorlanırsa, kuvvetin uygulandığı yönde hızlanmasına izin verilmediği için kaynaktan kinetik enerji almayacaktır. Bu durumda elektron gelen dalgaya karşı etkili bir şekilde "görünmez" olur ve bu dalga tamamen iletir (Hooberman 2005).



Şekil 6. Izgara şekilli FSY eşdeğer devre modeli

Aynı düzlem üzerinde, birbirini dik açıda kesen, yatay eksende ve düşey eksende iletken şeritlerden oluşan ızgara şekline benzer şekilde tasarlanmış FSY’nin gösterimi Şekil 6’de verilmiştir. Izgara şeklindeki yapılar sayesinde bant geçiren filtre özelliği gösteren FSY’ler tasarlanabilmektedir (Momeni Hasan Abadi and Behdad 2015).

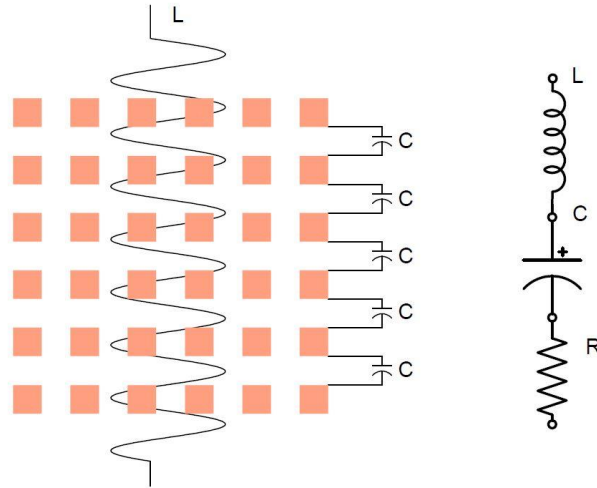
Şekil 6’de verilen eşdeğer devre modeli kullanılarak istenilen filtre karakteristiği için C ve L değerleri değiştirilebilir. Örneğin, oluşturulacak filtre devresinde daha büyük bir kapasitif etki isteniyorsa Denklem 1’de gösterilen kapasitans denkleminde de anlaşılacağı gibi elektrik alana dik duran, yatay iki iletken şerit arasındaki mesafe azaltılmalıdır. Diğer taraftan, FSY ortamdaki iletim kaybı ise, eşdeğer devrede de görüldüğü gibi seri R direnci ile modellenmiştir (Işık 2022).

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d} \quad (1)$$

Burada,  $C$  kapasitans'ı belirtmektedir.  $A$  iletken plakaların yüzey alanını,  $\epsilon_r$  bağıl dielektrik katsayısını,  $\epsilon_0$  boşluğun dielektrik sabitini ve  $d$  ise iki iletken levha arasındaki mesafeyi belirtmektedir.

FSY yapı kare gibi eşit kenarlar şeklinde kullanılacaksa yönden bağımsız olarak kullanılabilir. Çünkü FSY üzerine etki eden elektrik alanın dik olması koşuluyla, frekans seçici yüzeyin kapasitif ve endüktif etkileri hangi taraftan gelirse gelsin aynı olacaktır (Işık 2022).

Dielektrik plaka üzerine dikdörtgen yamalardan oluşan FSY'nin eşdeğer devre modeli Şekil 7'da görülmektedir. Şekillerden de anlaşılacağı üzere, Şekil 7'da gösterilen FSY yapı Şekil 6'de gösterilen ızgara şeklindeki yapının tamamlayıcısı bir yapıdır; yani, metal kısımlar ile boşlukların yer değiştirilmesi ile elde edilmiş bir yapıdır.



Şekil 7. Dikdörtgen yama şeklindeki FSY eşdeğer devre modeli

FSY modelinin kenar uzunlukları elektrik alan yönüne göre eşit uzunlukta olmayabilir. İki komşu dikdörtgen yama yatay ve dikey olarak farklı endüktif ve kapasitif etkiler gösterebilir. Ancak bu farklı endüktif ve kapasitif etkilerin FSY üzerindeki etkisi birim hücrelere indirildiğinde bir kondansatör, bir indüktör ve bir dirençten oluşan birim hücre olarak modellenebilir.

FSY'yi oluşturan birim hücrenin yapısında veya boyutlarında meydana gelen herhangi bir değişiklik, eşdeğer devreyi oluşturan toplu elemanlar olan  $L$  ve  $C$  değerlerinde de bir değişime yol açar. EM dalgası tarafından aydınlatılan FSY'nin birim hücresi, bir rezonans devresi gibi davranır ve tepki verir. Rezonans frekansı aşağıda verilen denklem 2 yardımıyla bulunabilir, burada  $L$  ve  $C$  parametreleri sırasıyla, FSY

birim hücrenin eşdeğer endüktansını ve kapasitansını gösterir. (R. S. Anwar, Mao, and Ning 2018b).

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2)$$

FSY'ler bant durdurucu filtre olarak da kullanılabilir. Soğurma, denklem 3 kullanılarak bulunabilir, burada  $\Gamma$  yansıma katsayısı,  $T$  iletim katsayısıdır.

$$Sogurma = 1 - |\Gamma|^2 - |T|^2 \quad (3)$$

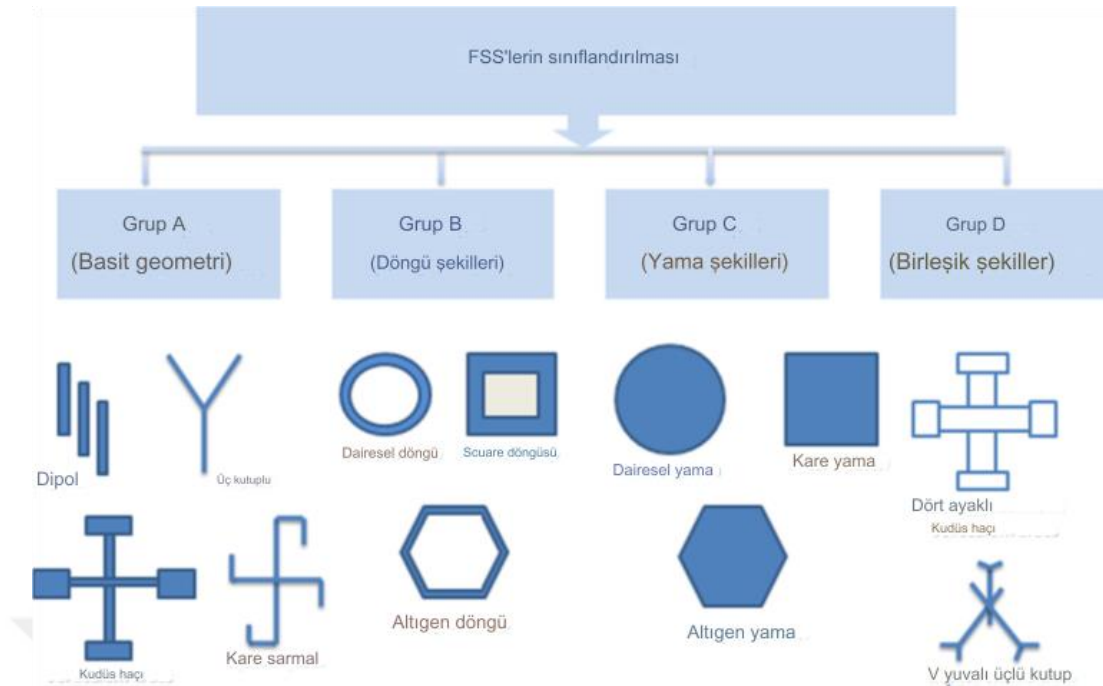
Bu tip bant durdurucu FSY'lerde soğurma bandının genişliği ve yansıma katsayısı gibi parametreler önemlidir. Bant durdurucu olarak kullanılan FSY'ler, savunma sanayine yönelik uygulamalarda gizlilik sağlamak için geliştirilmiştir. Bu uygulamalar yüksek bant genişliği, hafiflik ve yüksek soğurma genliği gerektirmektedir. Çünkü bu uygulamalar radara yakalanmamalı ve manevra gibi performansları düşürmemek için platformu ağırlaştırmamalıdır. Tüm bu kabiliyetlerin tek bir FSY tasarımı ile elde edilmesi mümkün olmayacağından her uygulamaya özel FSY tasarımı yapılmalıdır (Işık 2022).

### 3.1.3. Frekans Seçici Yüzeylerin Frekans Özelliklerini Etkileyen Faktörler

Küçük boyut, periyodiklik, polarizasyon ve geliş açısından etkilenmemeye FSY'lerin en önemli özellikleridir. Bu özellikler önemli olmakla birlikte bu parametrelere uygun tasarımlar yapmak oldukça zordur (General Overview 2000). En iyi frekans seçimini yapabilmek için FSY'nin tüm parametrelerini iyi değerlendirmek gerekir. Bu parametreleri kullanmanın en iyi yolu bazen boşlukları değiştirmek bazen de yamalar kullanmaktır. Bu nedenle FSY'lerin rezonansa girdiği frekans bölgesi birçok parametreden etkilenmektedir.

#### 3.1.3.1. Fiziksel Yapı Etkisi

Birim hücreleri oluşturan yama veya oyukların geometrik yapıları FSY'lerin karakteristiğini belirleyen faktörlerin en önemlilerindedir. FSY'leri oluşturan elemanların geometrik şekillerinde herhangi bir sınırlama bulunmaz, herhangi bir geometrik şekil bir FSY yapının oluşturulması amacıyla kullanılabilir. En çok kullanılan FSY'ler fiziksel özelliklerine göre 4 ana grupta incelenebilir (General Overview 2000).



Şekil 8. FSY'nin Temel Şekilleri

FSY'ler Şekil 8'de de gösterildiği gibi dört ana grupta toplanabilir (Kapoor, Mishra, and Kumar 2022):

- Grup-A: Merkezi bağlantılı veya N kutuplu, örneğin basit düz eleman, ankraj elemanları, Kudüs Haçı vb.
- Grup-B: Üç ve/veya dört uçlu elemanlar, daire, kare ve altıgen yapılar.
- Grup-C: Çeşitli şekillerde katı iç veya plaka tipleri, Kare yama, dairesel yama vb.
- Grup-D: Hibrit yapılar veya tüm kombinasyonların karışımı.

FSY tasarımlarında etkileyici özellikleri nedeniyle fraktal geometri de kullanılabilir (Gianvittorio et al. 2003). Fraktal geometri, çeşitli ölçeklerde simetri sergileyen kendine benzer desenleri ve şekilleri inceleyen bir alandır. Fraktalların en önemli özelliklerinden biri, kendilerine benzer olmalarıdır. Fraktal desenin yukarı veya aşağı ölçeklenebileceği ve yine de daha büyük ve daha küçük ölçekte aynı görüneceği anlamına gelir. Bu özellik, fraktalların karmaşık problemlerin modellenmesi amacıyla kullanılmasını sağlar, çünkü karmaşık ayrıntıların ve yapıların farklı çözünürlük düzeylerinde temsil edilmesine imkân tanır. (Peitgen, Jürgens, and Saupe 2004).

### 3.1.3.2. Boyut Etkisi

FSY tasarımında, yama ve oyukların geometrik şekillerinin yanında, birim hücrenin boyutları da FSY'lerin özelliklerini belirleyen önemli faktörlerdendir.

Çizelge 1. Temel FSY eşdeğer devre gösterimleri

	FSS	Devre	Eşdeğer devre	Eşdeğer Endüktans	Eşdeğer Kapasite
1	Tek Kare Döngü			$\frac{X_L}{Z_0 P} = F(p, 25, 2) = 4F\left(s, \frac{d}{s}\right)$	
2	Çift Kare Döngü			$\left(\frac{X_L}{Z_0}\right)_1 = F(p, s_1, \lambda)$ $\left(\frac{X_L}{Z_0}\right)_2 = F(p, s_2, \lambda)$	$\left(\frac{B_c}{Z_0}\right)_1 = 4F(s, 8, \lambda)$ $\left(\frac{B_c}{Z_0}\right)_2 = 4F(s, g_1, \lambda)$
3	Üçlü Kare Döngü			$\left(\frac{X_L}{Z_0}\right)_1 = F(p, s_1, \lambda)$ $\left(\frac{X_L}{Z_0}\right)_2 = F(p, s_2, \lambda)$ $\left(\frac{X_L}{Z_0}\right)_3 = F(p, s_3, \lambda)$	$\left(\frac{B_c}{Z_0}\right)_1 = 4F(s, 8, \lambda)$ $\left(\frac{B_c}{Z_0}\right)_2 = 4F(s, g_2, \lambda)$ $\left(\frac{B_c}{Z_0}\right)_3 = 4F(s, 83, \lambda)$
4	Çapraz Dipol			$\frac{X_L}{Z_0 P} = F(p, w, \lambda)$	$B = 4F\left(s, g, \lambda, \lambda\right)$ $B = 4F\left(p, p-w, \lambda\right)$
5	Kudüs Haçı Dizisi			$\frac{X_L}{Z_0} = \left(\frac{d}{p}\right) F(p, w, \lambda)$	$B_1 = 4 \left(2h \pm 8\right) F(p, p-d, \lambda)$ $B = 4-F\left(p, 8, \lambda\right)$

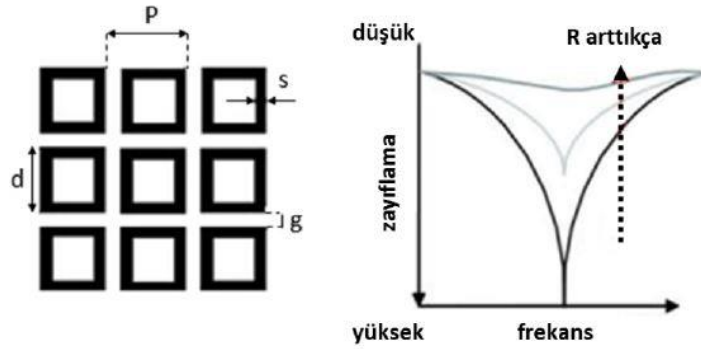
FSY'nin bazı özellikleri farklı geliş açılarında iki komşu FSY hücresi arasındaki mesafe ile kontrol edilebilir (G. H.-H. Sung et al. 2006). Ayrıca, boyut arttıkça rezonans frekansı azalır çünkü frekans dalga boyu ile ilişkilidir. Boyut değişiminin her FSY üzerindeki etkisi farklıdır. Bu durum eşdeğer devrelerinin farklı olmasıyla açıklanabilir. Dolayısıyla boyut değişimi her bir FSY'de kapasitif, rezistif ve endüktif değerlerde farklı değişimlere neden olur (Katoch, Jaglan, and Gupta 2019). En iyi bilinen FSY'lerden bazılarının eşdeğer devre modellemesi Çizelge 1 de verilmiştir (Katoch, Jaglan, and Gupta 2019). Boyut etkisine ilave olarak, birim hücreler arasındaki mesafelerin artırılması ya da azaltılmasına bağlı olarak FSY'lerin rezonans frekansları ve bant genişlikleri kontrol edilebilir.

### 3.1.3.3. Dielektrik Malzemenin Etkisi

FSY'leri oluşturan dielektrik alt katmanlar da tasarımda önemli bir parametredir. Alt katmanlar uygun seçilmezse, FSY'nin rezonans frekansında kaymalara neden olabilir. Alt katmanın dielektrik sabitinin ve kalınlığının FSY'nin rezonans frekansını etkilediği bilinmektedir (H. Zhang et al. 2008). Rezonans frekansını doğru ayarlamak için uygun alt katman kullanılmalı ve kalınlığı buna göre ayarlanmalıdır. Alt katman, farklı dielektrik özelliklere sahip malzemelerden oluşan, çok katmanlı bir yapıda da olabilir. (Işık 2022).

### 3.1.3.4. İletken Malzemenin Etkisi

FSY'nin rezonans frekansını ve bant genişliğini etkileyen önemli faktörlerden bir tanesi de periyodik olarak yerleştirilen elemanların iletkenliğidir FSY'ler, içerdikleri periyodik elemanların geometrisine bağlı olarak, endüktif ve kapasitif olarak modellenebilir. FSY'lerin tasarımında kayıplı iletken kullanılmış ise, eşdeğer devre modellerinde kapasitif ve endüktif elemanlara ek olarak, rezistif eleman da bulunur. (H.-H. Sung n.d.).



Şekil 9. Az kayıplı iletken kullanılarak oluşturulan FSY yapıda oluşan kaybın frekansa karşı grafiği

Az kayıplı iletken malzeme kullanılarak oluşturulan FSY yapıda oluşan kaybın frekansa karşı grafiği Şekil 9'de görülmektedir (H.-H. Sung ). Şekil 9 incelendiğinde, eşdeğer devre modelinde kullanılan direnç değeri arttıkça, kayıp azalmaktadır. Bu sebepten dolayı, kaybı azaltmak için yüksek iletkenliğe sahip malzemeler seçilmelidir.

### 3.1.3.5. Malzeme Türü Etkisi

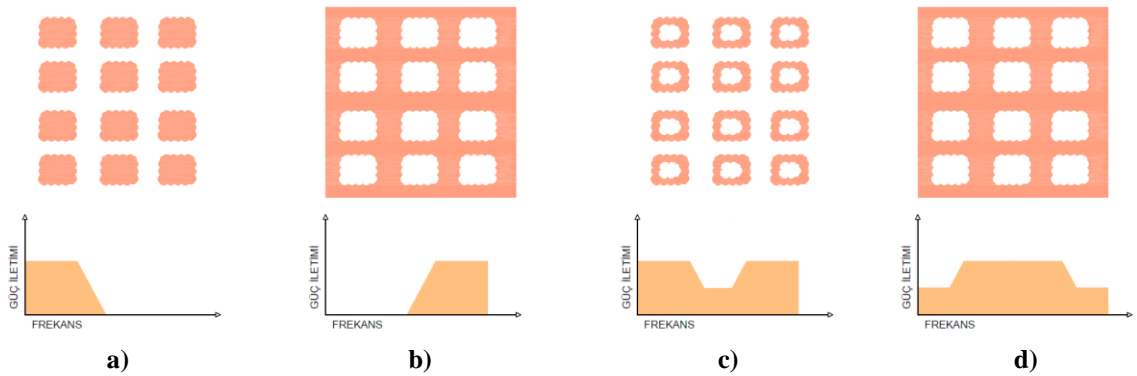
Önceki bölümlerde açıklandığı gibi, FSY'ler kapasitans (C), endüktans (L) ve iletken kayıplarına karşılık gelen dirençler (R) ile modellenebilir. Genellikle, bu dirençteki kaybı azaltmak için yüksek iletkenliğe sahip malzemeler seçilir. Ayrıca, FSY merkez frekansı ayarlanırken, yüzey empedansının çok az etkisi vardır.

### 3.1.3.6. EMD'nin FSY'ye Geliş Açısı ve Polarizasyonu

EM dalgaların FSY yüzeye geliş açısı, FSY'lerin karakteristik özelliğini etkileyen faktörlerden bir tanesidir. Bu yüzden, her FSY'in kendi yapısına bağlı olarak, düzgün performans sergilediği bir açı bandı bulunur; yani, bu açı bandı haricinde gelen elektromanyetik dalga için FSY'nin frekans tepkisi değişmektedir. Geliş açısına ilaveten, dalga polarizasyonunun da FSY'lerin karakteristik özelliklerini etkilediği bilinmektedir (Mahouti et al. 2016).

### 3.1.4. Frekans Seçici Yüzey Tipleri ve Filtreleme Özellikleri

FSY'ler, yapısal özelliklerine göre, alçak geçiren, yüksek geçiren, bant durduran ve bant geçiren filtre özelliği göstermektedir.



Şekil 10. FSY'ler ile elde edilen genel filtre karakteristiği

a) alçak geçiren filtre b) yüksek geçiren filtre c) Bant Durdurma Filtresi d) Bant Geçiren Filtre

Yama yapıların periyodik dizilmesi ile elde edilen FSY'ler alçak geçiren filtre özelliği gösterirken, oyuk yapılardan oluşan FSY'ler ise yüksek geçiren filtre özelliği

gösterir. Yama ve oyuk yapıların farklı kombinasyonları ile elde edilen FSY'lerin frekans değişimine karşı tepkisi Şekil 10'da görülmektedir.

FSY'ler, temel filtre özelliklerinden de anlaşılacağı gibi özelleştirilmiş filtrelerdir. Bu filtrelerin elemanları yapıyı oluşturan boşluklar ve yamalardır. FSY kullanarak istenen özellikte filtre tasarlarırken, bant genişliği, açısız kararlılık, iletim katsayısı ve yansıma katsayısı gibi parametreler dikkate alınmalıdır, çünkü filtre karakteristikleri bu parametrelerden etkilenmektedir (Nisanci et al. 2017). Bu FSY yapıları elektronik devrelerde de kullanılan kapasitif ve endüktif devre elemanlarına benzetilebilir. Yani FSY'deki her bir yama ve oyuk, analog devrelerde sırasıyla kapasitans ve endüktansa karşılık gelmektedir. (Nisanci et al. 2017).

#### **3.1.4.1. Bant Durduran Frekans Seçici Yüzey**

Band durduran FSY'ler, elektromanyetik dalga geçişini belli frekans aralıklarında engelleyen yapılardır. Bu yapılar genellikle mikrodalga ve radyo frekansı uygulamalarında kullanılır.

Band durduran FSY'ler, frekansı belli aralıkta olan EM dalgaları durdururken, bu frekans aralığı dışındaki dalgaların geçişine izin verir. Bu çalışmada tasarlanan filtre de bant durduran filtredir. Burada amaç, mikrodalga fırının çalışma bandını oluşturan frekansların durdurularak, kombi sistemine geçmesinin engellenmesidir.

#### **3.1.4.2. Bant geçiren Frekans Seçici Yüzey**

Band geçiren FSY'ler, frekansı belli aralıkta olan EM dalgaların geçişine izin verirken, bu frekans aralığı dışındaki dalgaların geçişine izin vermez. Bu yapılar genellikle mikrodalga ve radyo frekansı uygulamalarında kullanılır.

Bu yüzeyler, genellikle bir alt tabaka ve üzerine düzenli olarak dizilmiş iletken veya yarı iletken malzemelerin bir kombinasyonundan oluşur. Dizilim deseni, istenen frekanslarda yüzeyin etkili optik özelliklerini kontrol etmek için tasarlanır. Örneğin, belirli bir frekans aralığındaki dalgalara geçiş izni vermek için belirli bir desen kullanılabilirken, diğer frekanslarda yüzey yansıtıcı veya soğurucu hale getirilebilir.

### 3.1.4.3. Alçak Geçiren Frekans Seçici Yüzey

Bu yüzeyler, belirli bir frekansın üzerindeki dalgaların geçişini engellerken, bu frekansın altındaki dalgaların geçişine izin verir.

### 3.1.4.4. Yüksek Geçiren Frekans Seçici Yüzey

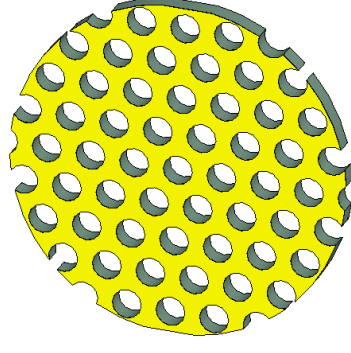
Bu yüzeyler, belirli bir frekansın üzerindeki (yüksek frekanslarda) sinyalleri geçirirken, düşük frekanslı sinyalleri (genellikle istenmeyen gürültü veya arka plan sinyallerini içeren kısımlar) engellerler.

## 3.2. Frekans Seçici Yüzey Tasarım Çalışmaları

Üzerine gelen elektromanyetik dalganın frekansına bağlı olarak, yansıma veya iletim sağlayan FSY, aynı zamanda bir elektromanyetik filtre gibi de davranır. FSY frekansa bağlı olarak dalgayı ileten veya söndüren bir iki kapılı devre gibi de düşünülebilir yani, iletim bandı içerisinde gelen dalgaları geçirir, durdurma bandı içerisinde gelen dalgaları ise söndürür. FSY'ler periyodik olarak yerleştirilmiş yama ve oyuklardan oluşmaktadır; yamalar kapasitif etkiye sebep olurken, oyuk yapılar da endüktif etkiye sebep olduğu bilinmektedir.

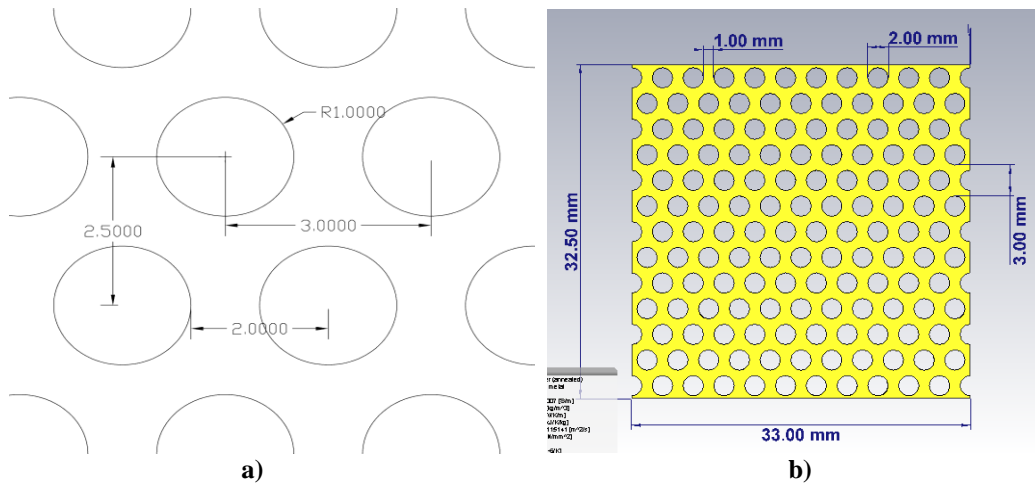
Periyodik yamalardan oluşan FSY'ler rezonans anında yüzeye gelen EM dalgaların hemen hemen tamamını yansıtırken, oyuklardan oluşan FSY yapılar rezonans anında yüzeye gelen EM dalgaların tamamını iletir. FSY yapının filtre özellikleri, tasarımı kullanılan iletkenin elektriksel özelliklerine, dielektrik malzemenin dielektrik sabitine, birim hücrenin yapısına türüne ve şekline bağlıdır. Bu bağlamda proje kapsamında tasarlanan FSY yapının, su akışını sağlayan, ancak mikrodalga fırının çalışma bandını durduran bir filtre gibi çalışması amaçlanmıştır. Band durduran filtre özelliği gösterecek şekilde tasarlanan bu FSY yapının, bilinen havacılık, savunma, radar, gıda, güvenlik, Telekom, tıp gibi kullanım alanlarının aksine suyun geçeceği fakat mikrodalga fırının çalışma bandının durdurulacağı uygulamalarda kullanılabilir olduğunu göstermektedir.

S- parametreleri, bir FSY'nin üzerine gelen elektromanyetik dalgaya verdiği tepkiyi anlamak için ölçülür. Bu ölçümlerde genellikle, yansıma ( $S_{11}$ ) ve iletim ( $S_{21}$ ) parametreleri ölçülür. Bant genişliği belirlenirken -10 dB eşik değeri olarak kabul edilir yani, S parametrelerinin -10 dB'nin altına düştüğü bölge FSY'nin bant genişliği olarak adlandırılır.



Şekil 11. FSY perspektif görünümü

Tez kapsamında tasarlanan bant durdurucu FSY yapının perspektif görünümü Şekil 11'de görülmektedir. FSY yapısı tasarlanırken, dielektrik malzeme olarak kolay ulaşılabilir ve düşük maliyetli olduğundan dolayı FR-4 kullanılmıştır, 35  $\mu\text{m}$  kalınlığında bakır ile kaplı olan FR4 malzemenin bağıl dielektrik sabiti  $\epsilon_r = 4,3$  ve kalınlığı 1,6 mm dir.

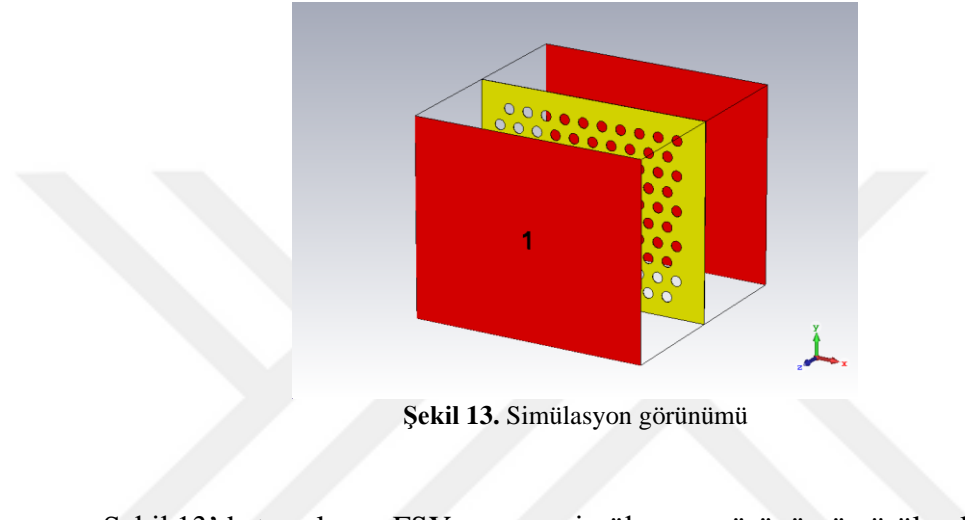


Şekil 12. Tasarlanan FSY yapının boyutları

Tasarlanan FSY yapının boyutları Şekil 12.a ve 12.b'de verilmiştir. FSY yapısında kullanılan periyodik oyukların çapı 2 mm'dir ve oyuklar arasında 1 mm yatay boşluk

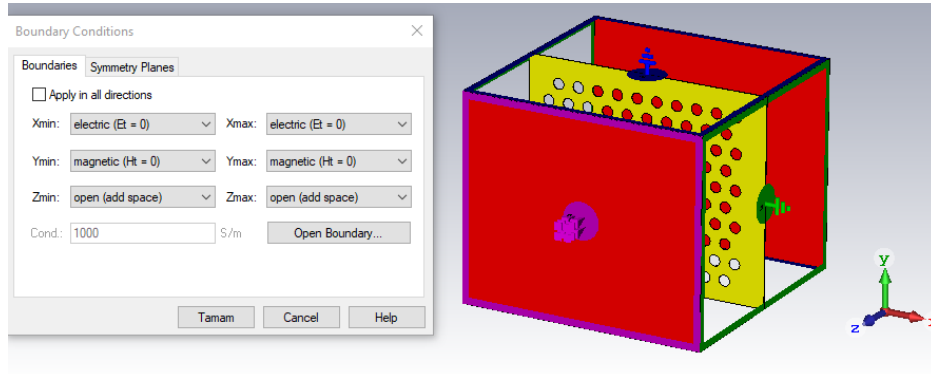
bulunmaktadır. Proje kapsamında tasarlanan FSY yapının sayısal analizi sonlu entegrasyon tekniğine dayanan tam dalga elektromanyetik çözücü kullanılarak yapılmıştır. Simülasyon çalışmalarından sonra, optimizasyon yapılarak boyutlar netleştirilmiş ve FSY yapının üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretimi yapılan FSY'nin test ve ölçümler PNA L N5234A Network Analizör kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

### 3.3. Frekans Seçici Yüzeyin Simülasyon Çalışmaları



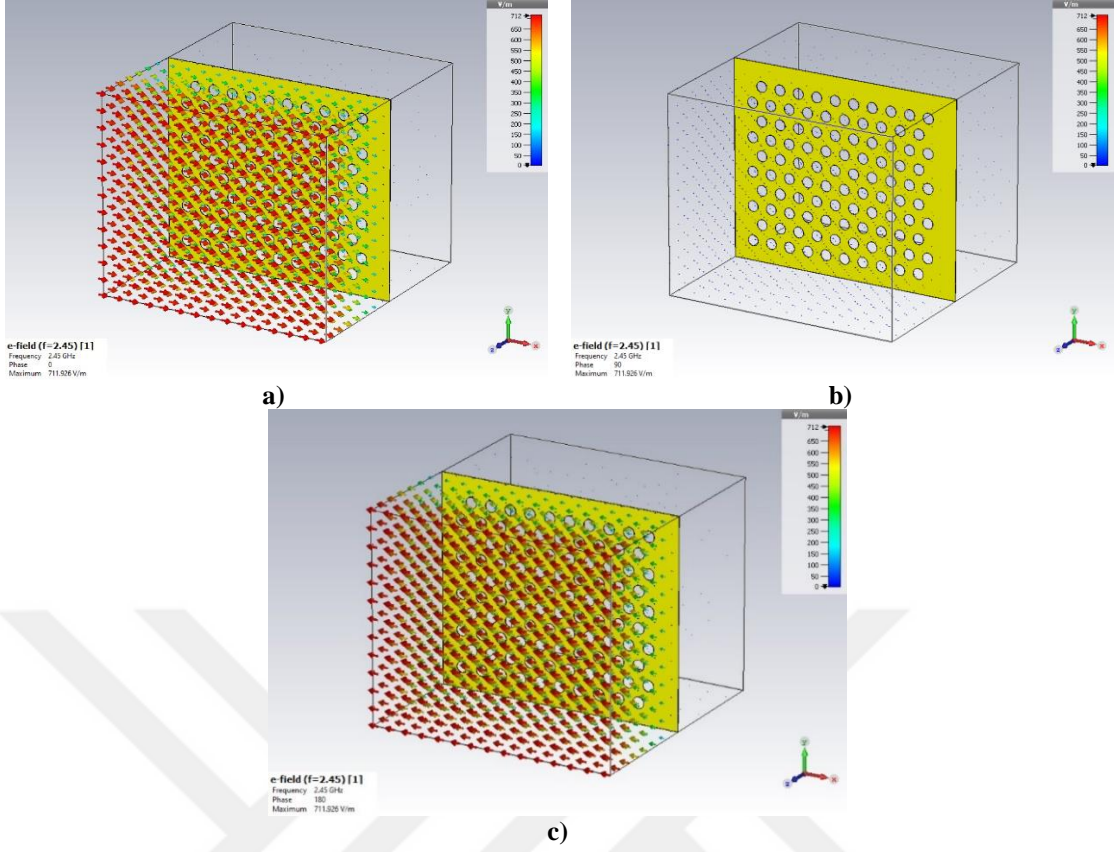
Şekil 13. Simülasyon görünümü

Şekil 13'de tasarlanan FSY yapının simülasyon görünümü görülmektedir. Burada numaralandırılmış ve kırmızı yüzeyler sinyal kaynağı olarak portları temsil etmektedir.



Şekil 14. Tasarlanan FSY'nin sınır koşulları

Şekil 14'de FSY yapının sınır koşulları görülmektedir. Elektrik ve manyetik alana dik duvarlar sırasıyla, mükemmel elektriksel iletken (PEC) ve mükemmel manyetik iletken (PMC) olarak tanımlanmıştır. Elektromanyetik sinyallerin  $\pm z$  yönünde ilerleyebilmesi için bu yönler tanımlandı. Elektromanyetik dalganın 2.45 GHz'de TEM dalga modunda olduğu varsayıldı.

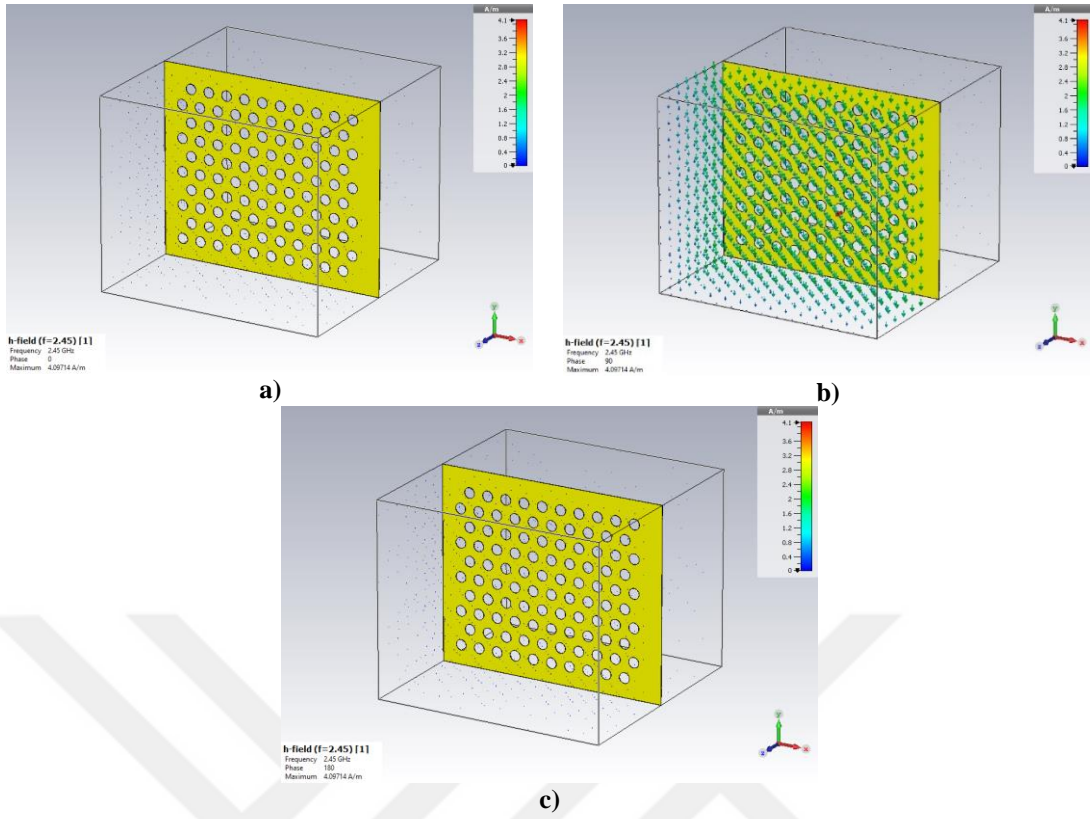


Şekil 15. FSY üzerindeki elektrik alan dağılımı

a) Faz farkı 0 derece b) Faz farkı 90 derece c) Faz farkı 180 derece

Şekil 15’de simülasyon çalışmalarında frekans seçici yüzey üzerine gelen TEM dalga modunda ilerleyen elektromanyetik dalganın elektrik alanı gösterilmiştir.

Şekil 15.a da görüldüğü gibi, faz farkı 0 derece ise, elektrik alanı 712 V/m olarak en yüksek seviyeye ulaşmıştır. Diğer taraftan, faz farkı 90 derece olduğunda, elektrik alanının 0 V/m olarak en düşük seviyede olduğu Şekil 15.b’de görülmektedir. Faz farkı 180 derece olduğunda, elektrik alanının 15.c’de görüldüğü gibi 712 V/m olarak yine en yüksek seviyede olduğu tespit edilmiştir. Faz farkı dikkate alındığında, faz farkı sıfır veya 180 derece olduğunda elektrik alanının maksimum olduğu anlaşılmaktadır. 90 derece olduğunda ise sıfırdır, yani aktif güç transferi gerçekleşmemiştir.



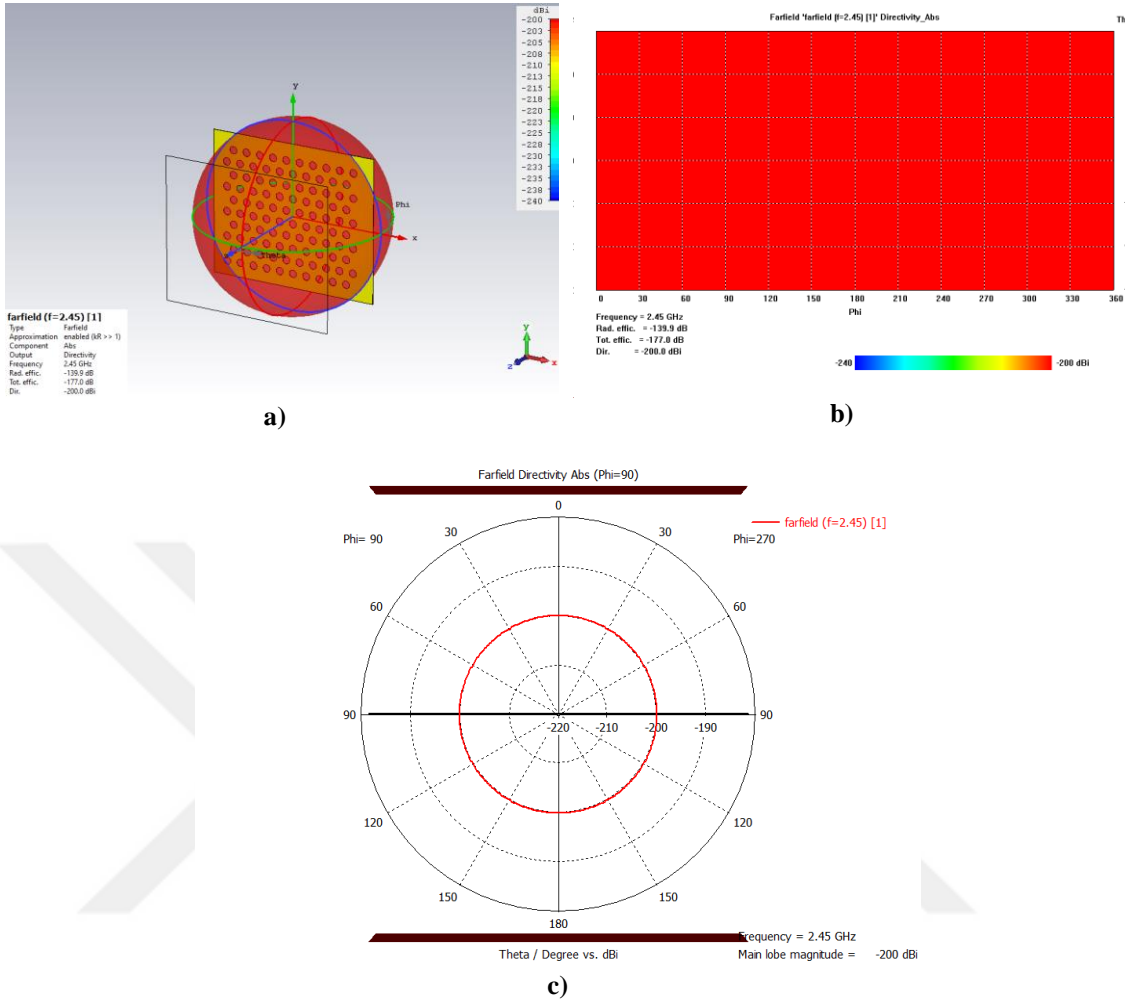
**Şekil 16.** FSY üzerindeki manyetik alan dağılımı

**a)** Faz farkı 0 derece **b)** Faz farkı 90 derece **c)** Faz farkı 180 derece

Şekil 16’de simülasyon çalışmalarında frekans seçici yüzey üzerine gelen TEM dalga modunda ilerleyen elektromanyetik dalganın manyetik alan dağılımı gösterilmiştir.

Şekil 16.a da görüldüğü gibi, faz farkı 0 derece ise manyetik alan 0,65 A/m olarak en yüksek yüksek seviyeye ulaşmıştır. Diğer taraftan, faz farkı 90 derece olduğunda manyetik alanın 0 A/m olarak en düşük seviyede olduğu Şekil 16.b’de görülmektedir. Faz farkı 180 derece olduğunda, Şekil 16.c’de görüldüğü gibi, manyetik alanın 0,65 A/m olarak yine en yüksek seviyede olduğu tespit edilmiştir. Yukarıda da bahsedildiği gibi, faz farkı sıfır veya 180 derece olduğunda elektrik alanına benzer şekilde, manyetik alan da maksimum olur. 90 derece olduğunda ise sıfırdır, yani aktif güç transferi gerçekleşmemiştir.

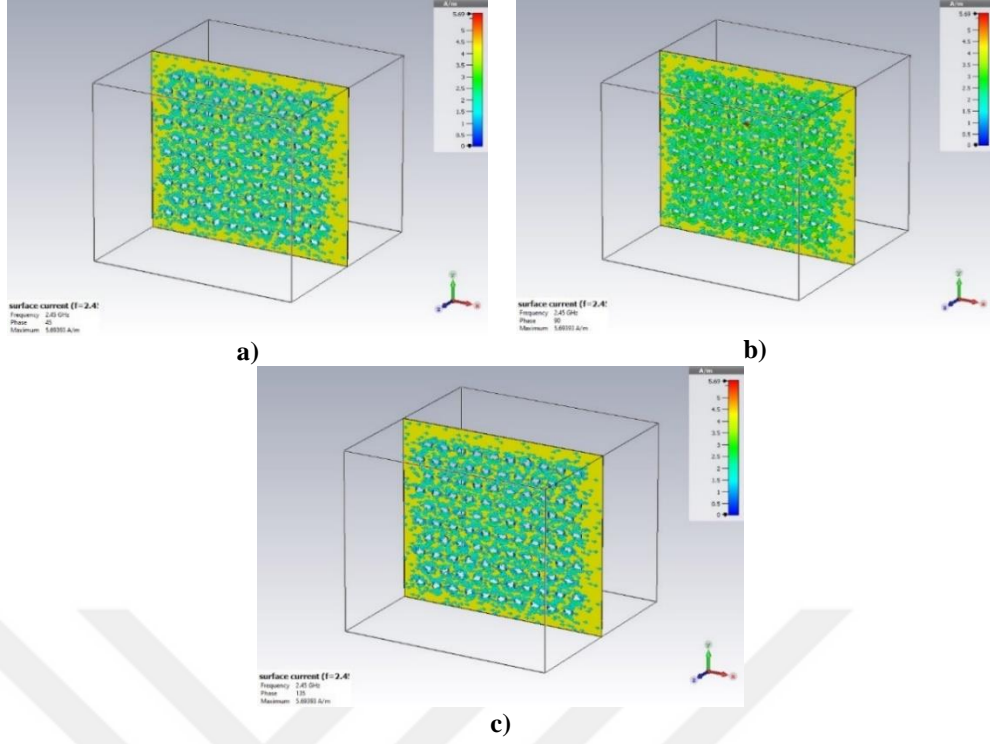
EM dalga kaynağından  $2D^2/\lambda$  mesafeden daha uzak bölge, uzak alan bölgesi olarak adlandırılır. Burada, D, antenin maksimum lineer boyu,  $\lambda$  ise dalga boyudur. Bu bölgede radyasyon deseni mesafeye (R) bağlı olarak şekil değiştirmez. E ve H alanları hala  $1/R$  olarak sönümlense de güç yoğunluğu  $1/R^2$  olarak sönümlenir. Uzak alan bölgesinde, düzlem dalgalarda olduğu gibi, birbirlerine dik E ve H alanlarından oluşan ve her iki alana dik yayılma yönüne sahip (TEM) dalgalar hakimdir.



Şekil 17. Simülasyon çalışmasının uzak alan yaklaşım sonuçları

a) 3d görünüm b) 2d görünüm c) kutupsal görünüm

Şekil 17’de simülasyon çalışmalarında frekans seçici yüzey üzerine gelen TEM dalga modunda ilerleyen elektromanyetik dalganın uzak alanı ışınma yaklaşımının 3d, 2d ve kutupsal düzlem üzerinde gösterilmiştir.



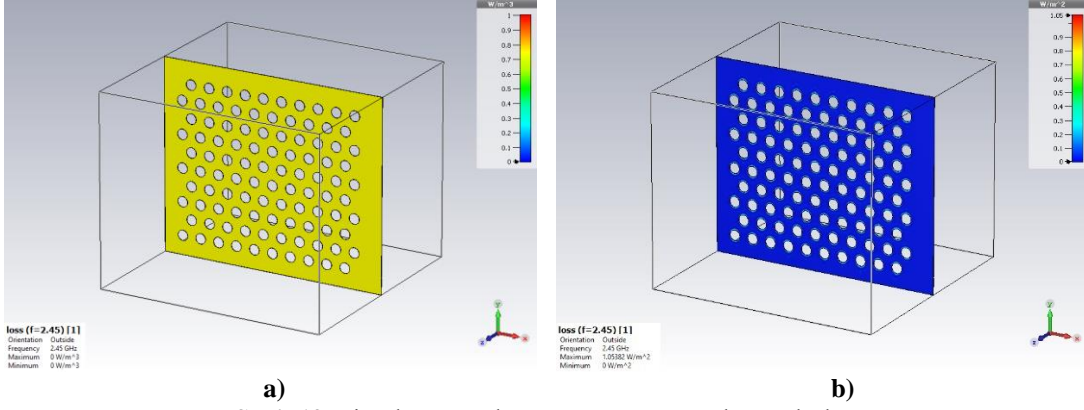
**Şekil 18.** Simülasyon çalışmasının yüzey akım dağılımı

a) 45 derece b) 90 derece c) 135 derece

Şekil 18’de simülasyon çalışmalarında frekans seçici yüzey üzerine gelen TEM dalga modunda ilerleyen elektromanyetik dalganın yüzey akım dağılımı gösterilmiştir. Elektrik ve manyetik alan arasındaki faz farkı Şekil 18.a’da görüldüğü gibi 45 derece ise yüzey akım yoğunluğunun 1,5 A/m olduğu tespit edilmiştir. Elektrik ve manyetik alan arasındaki faz farkı Şekil 18.b’de görüldüğü gibi 90 derece olduğunda, yüzey akım yoğunluğunun 2,5 A/m ye kadar yükselerek en yüksek seviyeye ulaştığı tespit edilmiştir. Şekil 18.c de görüldüğü gibi faz farkı 135 derece olduğunda, yüzey akım yoğunluğunun 45 derece faz farkındaki değerle aynı değerde 1,5 A/m olduğu tespit edilmiştir.

Devre teorisinde, aktif güç (gerçek güç) ve reaktif güç arasındaki fark önemlidir. Akım ve voltaj arasındaki faz farkı 0 derece olduğunda, güç tamamen aktif güçtür ve devreye gerçek güç sağlanmaktadır. Ancak, akım ve voltaj arasındaki faz farkı 90 derece ise, tüm güç sanal ve reaktif güçtür. Bu durumda, devreye güç sağlanmıyor ve güç tüketilmiyor, ancak devredeki elemanlar enerji depolayabilir veya salabilir.

Elektromanyetizma teorisine baktığımızda da, elektrik ve manyetizma arasındaki etkileşimlerle ilgilenir. Elektrik alanlar ve manyetik alanlar arasındaki ilişki, devrelerin davranışını ve güç akışını da etkiler.



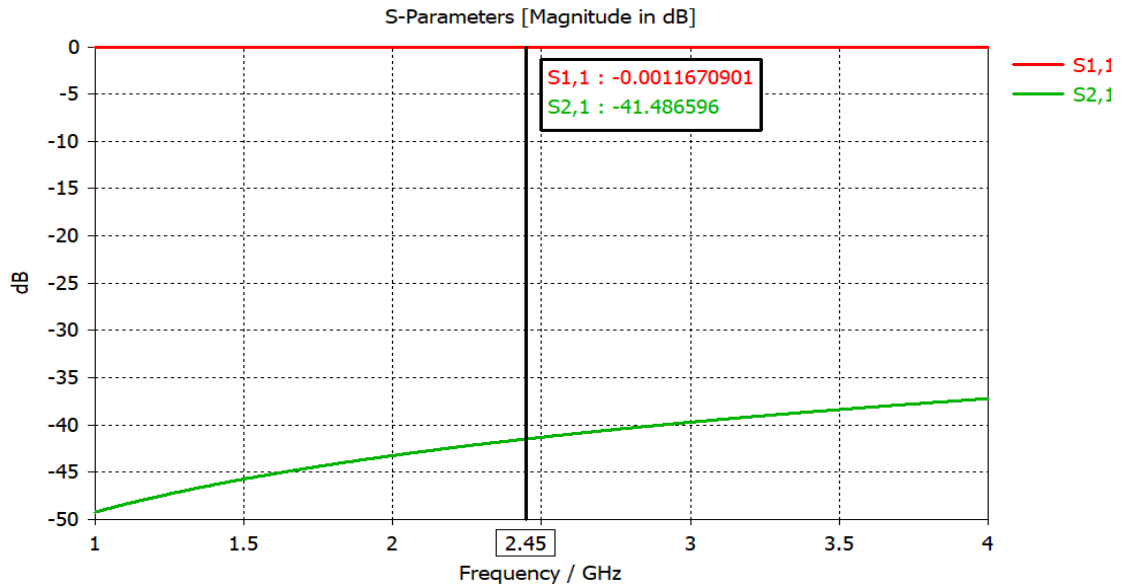
a) güç akışı b) güç yoğunluğu  
Şekil 19. Simülasyon çalışmasının güç yoğunluğu çıktıları

a) güç akışı b) güç yoğunluğu

Şekil 19'de simülasyon çalışmalarında frekans seçici yüzey üzerine gelen TEM dalga modunda ilerleyen elektromanyetik dalganın güç yoğunluğu çıktıları aşağıdaki şekilde gösterilmiştir:

Şekil 19.a da güç kaybı yoğunluğu  $1 \text{ W/m}^3$  olarak gösterilmiştir.

Şekil 19.b da yüzey güç kaybı yoğunluğu  $1.05 \text{ W/m}^2$  olarak gösterilmiştir.

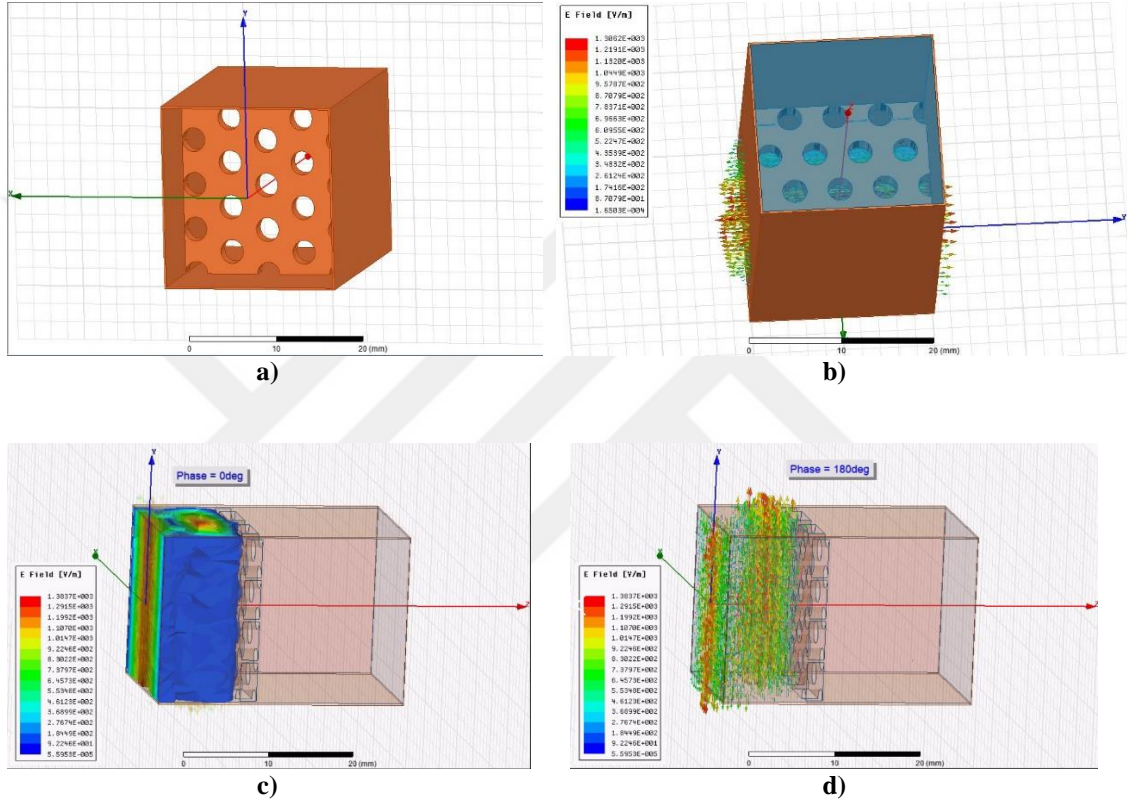


Şekil 20. Tasarlanan FSY yapının S parametrelerinin simülasyon sonuçları

Tasarlanan FSY yapının S parametrelerinin simülasyon sonuçları Şekil 20'de verilmiştir. Şekil 20'de görüldüğü gibi kırmızı renkli grafik S<sub>1,1</sub>, yeşil grafik ise S<sub>2,1</sub> parametresini göstermektedir. Mikrodalga fırının çalışma bandını kapsayan 1-4 GHz

arasında  $S_{11}$ 'in doğrusal bir değişim gösterdiği ve 0 dB'de sabit kaldığı, yani FSY üzerine gelen 2.45 GHz EM dalganın tamamının yansıdığı anlaşılmaktadır. İletim katsayısı,  $S_{21}$  incelendiğinde 2,45 GHz'de -41 dB olduğu görülmektedir. Eşik değer -10 dB dikkate alındığında, tasarlanan FSY yapının 2,45 GHz'lik dalgaları durdurduğu anlaşılmaktadır.

### 3.4. İkinci Simülasyon Çalışmaları



Şekil 21. İkinci simülasyon sonuçları

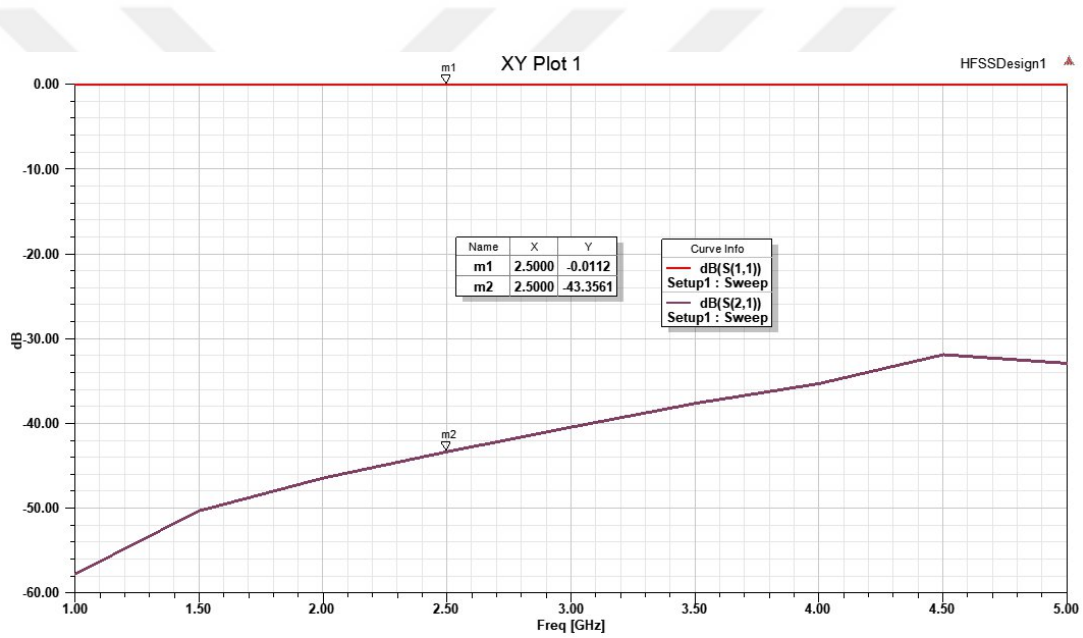
a) FSY boşluk ortamda, b) FSY su içerisinde c) FSY boşluk ortamda iken manyetik alan dağılımı, d) FSY su içerisinde iken manyetik alan dağılımı

Tasarım için, aynı boyutlar ve malzeme kullanılarak Şekil 21 'de görüldüğü gibi farklı simülasyon programı kullanılarak ikinci bir simülasyon daha gerçekleştirilmiştir. İlk simülasyonda olduğu gibi, 35  $\mu\text{m}$  kalınlığında bakır ile kaplı olan FR4 malzemenin bağıl dielektrik sabiti  $\epsilon_r = 4,3$  ve kalınlığı 1,6 mm dir. Tasarlanan FSY yapının boyutları Şekil 12'de olduğu gibidir; yani FSY yapıda kullanılan periyodik oyukların çapı 2 mm'dir ve uyuklar arasında 1 mm yatay boşluk bulunmaktadır.

Şekil 21.a'da dalga kılavuzu içerisine yerleştirilmiş FSY yapı görülmektedir. Dalga kılavuzu içerisinde başka bir malzeme bulunmamaktadır. Yani hava ortamında

simülasyon olayı gerçekleştirilmiştir. İkinci simülasyon çalışmalarında manyetik alan dağılımları ise Şekil 21c ve d’de gösterilmiştir.

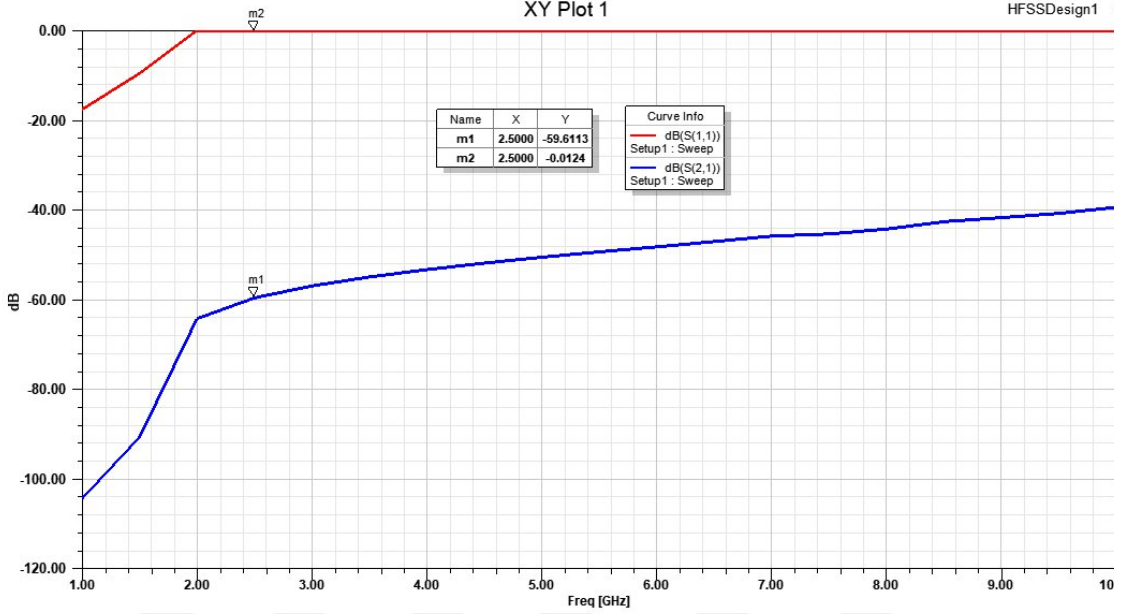
Şekil 22’de,  $S_{11}$  ve  $S_{21}$  parametreleri göstermektedir. Mikrodalga fırının çalışma bandını kapsayan 1-5 GHz arasında  $S_{11}$ ’in bir önceki simülasyon sonuçları ile uyumlu olarak doğrusal bir değişim gösterdiği ve 0 dB’de sabit kaldığı, yani FSY üzerine gelen 2.45 GHz EM dalganın tamamının yansıdığı anlaşılmaktadır. İletim katsayısı,  $S_{21}$  incelendiğinde 2,5 GHz’de -43,5 dB olduğu görülmektedir. Bu sonuç, ilk simülasyon sonuçları ile uyumlu ve ilk simülasyon sonuçlarından daha iyi bir değere sahiptir. Eşik değer -10 dB dikkate alındığında, tasarlanan FSY yapının 2,45 GHz’lik dalgaları durdurduğu anlaşılmaktadır. İkinci simülasyon sonuçları Şekil 23’ de gösterilmiştir.



Şekil 22. FSY’nin hava ortamda yapılan ikinci simülasyon sonuçları

Şekil 21.b’de içerisi su ile doldurulmuş dalga kılavuzu içerisine yerleştirilmiş FSY tasarımı görülmektedir. Bu simülasyonun sonucu ise Şekil 25’de Mikrodalga kombi sisteminde, Tasarlanan FSY’nin su içerisinde çalışacağı dikkate alınarak, ikinci simülasyon çalışmalarında FSY yapısı, içerisi su ile doldurulmuş bir dalga kılavuzu içerisine konulmuş ve simülasyon bu şekilde gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 23’de görülmektedir. Bu simülasyon 1-10 GHz arasında gerçekleştirilmiştir.  $S_{11}$ ’in bir önceki simülasyon sonuçları ile uyumlu olduğu, 2-10 GHz aralığında doğrusal bir değişim gösterdiği ve 0 dB’de sabit kaldığı, yani FSY üzerine gelen 2.45 GHz EM dalganın tamamının yansıdığı anlaşılmaktadır. İletim katsayısı,  $S_{21}$  incelendiğinde 2,45

GHz'de -56,5 dB gibi içi boş kılavuz ortamına göre daha iyi olduğu görülmektedir. Bu sonuç, ilk simülasyon sonuçları ile uyumlu ve ilk simülasyon sonuçlarından daha iyi bir değere sahiptir. Eşik değeri -10 dB dikkate alındığında, tasarlanan FSY yapısının 2,45 GHz'lik dalgaları durdurduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 23. FSY'nin su ile dolu ortamda yapılan simülasyon sonuçları

Sonuç olarak, iki farklı simülasyon yapılmış, birbiri ile oldukça uyumlu sonuçlar elde edilmiştir. Ayrıca, simülasyon çalışmalarında tasarlanan FSY yapısı hem boşluk ortamında hem de su ile dolu ortamda denenmiş ve su ile dolu ortamda mikrodalga fırının çalışma frekansında daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Her iki simülasyon çalışmasında da  $S_{11}$  için oldukça uyumlu sonuçlar elde edilmiştir. Özellikle 2-5 GHz aralığında  $S_{11}$ 'in doğrusal bir değişim gösterdiği ve 0 dB'de sabit kaldığı, yani FSY üzerine gelen 2.45 GHz'lik EM dalganın tamamının yansıdığı anlaşılmaktadır. İletim katsayısı,  $S_{21}$  incelendiğinde 2,45 GHz'de -40 dB'nin altında sonuçlar elde edilmiştir, bu değer su içerisinde -56 dB'nin de altına düşmüştür. Eşik değeri olan -10 dB dikkate alındığında, tasarlanan FSY yapısının 2,45 GHz'lik dalgaları durdurduğu, yani mikrodalga fırın içerisindeki dalgaların su ile kalorifer sistemine geçmesini engellediği, kombi içerisinde geri yansıttığı anlaşılmaktadır.

#### 4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Bu bölümde, yapılan tasarım iki farklı simülasyon programında simüle edilmiştir. İki farklı simülasyon sonuçları uyum içerisindedir. Simülasyon sonuçlarına göre, tasarlanan yapı ile -41 dB'lik bir iletim elde edilmiştir. Bu değer, tasarlanan FSY'nin üzerine gelen EMD'nin %99,99'unu yansıtacağı anlamına gelmektedir.

**Çizelge 2.** FSY Teknik Özellikleri

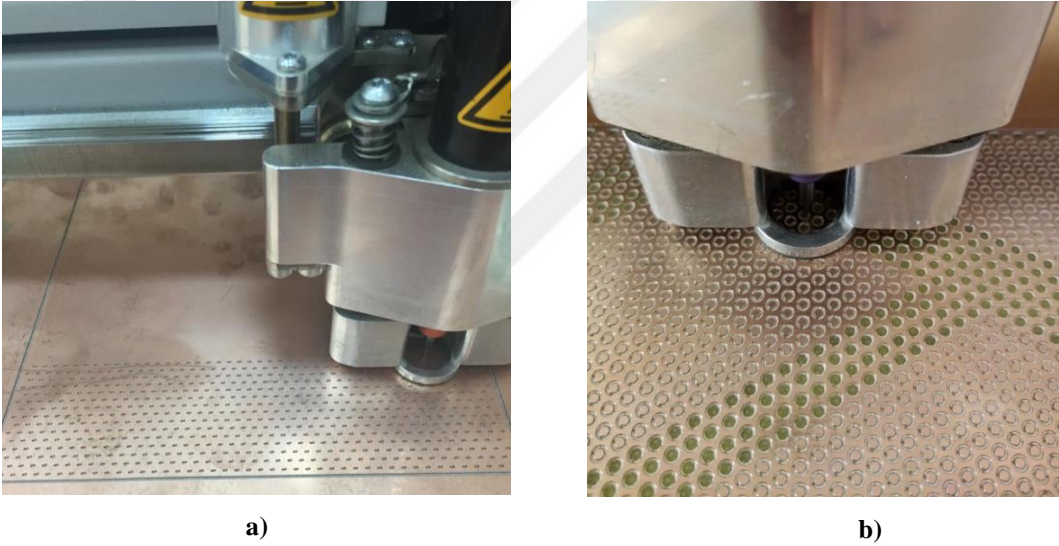
PARAMETRE	MİKTAR	BİRİM
Plaka En	32.5	mm
Plaka Boy	33	mm
Dielektrik kalınlık	1.6	mm
Dielektrik malzeme	FR-4 $\epsilon_r = 4.3$	
İletken malzeme	Bakır	
İletken kalınlık	35	$\mu\text{m}$
Delik çapı	2	mm
Yatayda delik arası uzaklık	2.5	mm
Dikeyde delik arası uzaklık	5	mm

Tasarlanan FSY'nin boyutları 2.45 GHz'de optimum çalışma performansına uygun olacak şekilde optimize edilmiştir. Optimizasyon yaparken, gelecek sinyalin farklı yönlerde ve açılarda gelebileceği de göz önünde bulundurularak tasarlanan delikli FSY'nin gelen sinyalin yönü ve geliş açısına bakmaksızın 1 Ghz ile 6 Ghz aralığında gelen tüm elektromanyetik dalgaları yansıtması amaçlanmıştır. Optimum çalışma performansı göstermesi beklenen tasarım ölçüleri Çizelge 2'de verilmiştir.

#### 4.1. FSY Üretimi

Tasarımı tamamlanan ve boyutları optimize edilen FSY yapının üretimi, LPKF laser & elektronik AG, promat E33; yani, bilgisayarlı sayısal kontrol (CNC) ve baskılı devre kartı (PCB) cihazı kullanarak Şekil 24.a ve 24.b'de görüldüğü gibi gerçekleştirilmiştir.

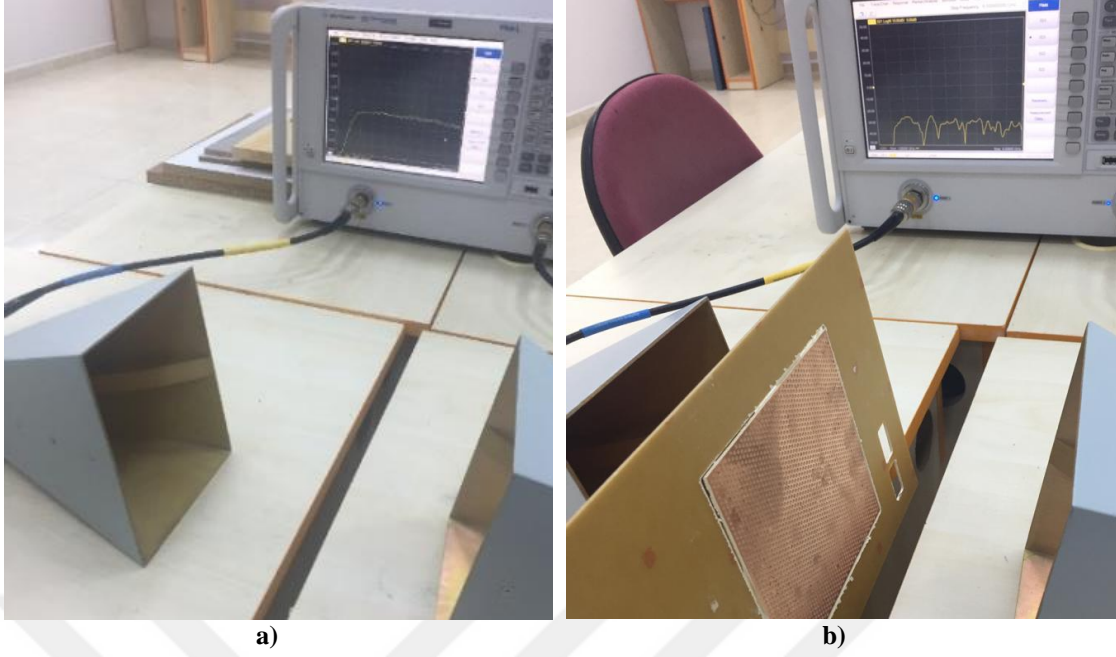
Üretimde, üzeri bakır kaplı FR4 malzeme kullanılmıştır. Dielektrik sabiti  $\epsilon_r = 4,3$ , kayıp tanjantı  $\tan \delta = 0,025$  olan FR4 malzemenin kalınlığı 1,6 mm, iletkenliği  $\sigma = 5.8 \times 10^7 S/m$  olan bakır tabakanın kalınlığı ise 0,035 mm dir. Su akışını sağlamak için periyodik olarak yerleştirilen deliklerin derinliği ise dielektrik ve bakır tabakaların toplam kalınlığı kadar, yani 1,635mm dir.



Şekil 24. LPKF E-33 kullanarak FSY Üretimi

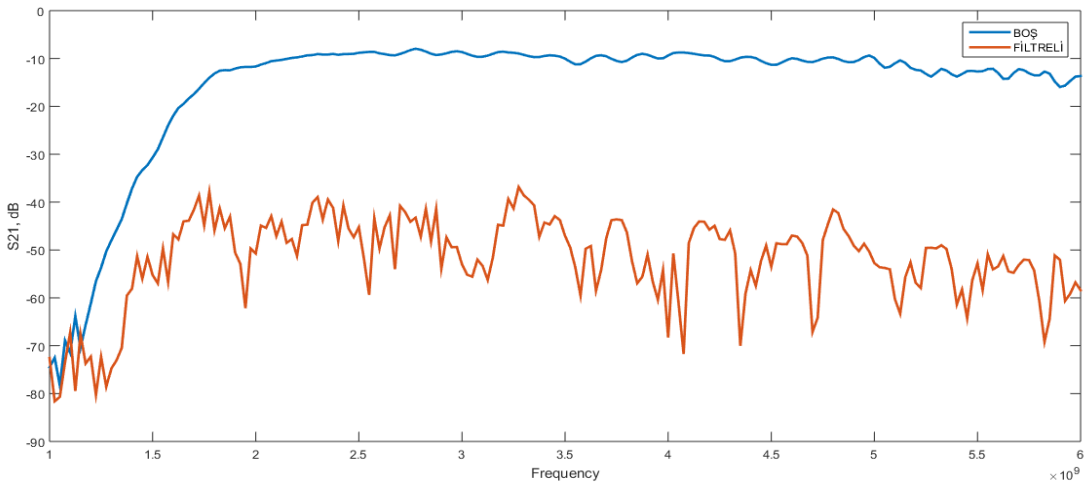
#### 4.2. Üretilen FSY nin Fiziki Test Çalışmaları

Üretilen FSY'nin deneysel sonuçları PNA-L Microwave Network Analyzer cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ölçümlere başlamadan önce PNA-L Microwave Network Analyzer cihazımızın kalibrasyon işlemleri gerçekleştirilmiştir. Kalibre edilmiş cihazın giriş ve çıkış portlarına, birisi alıcı, diğeri verici olmak üzere iki adet 1,7 GHz'den 2,6 GHz'e kadar çalışan, standart kazançlı WR-430 Waveguide Horn anten bağlanarak Şekil 25.a ve 25.b'de gösterildiği gibi ölçümler gerçekleştirilmiştir.



Şekil 25. PNA-L Microwave Network Analyzer cihazı ile S parametrelerinin ölçümü

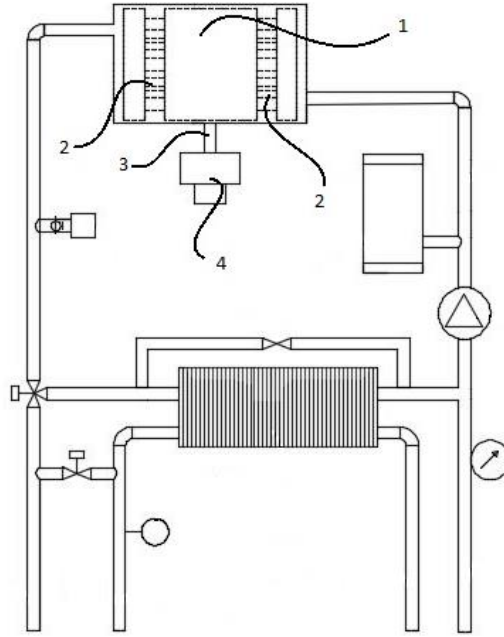
İlk ölçüm, horn antenler arasında boşluk ortam varken gerçekleştirilmiş ve iletim parametresi  $S_{21}$  ölçülmüştür. Şekil 26'da iletim katsayısının grafiği görülmektedir. İki anten arasında boşluk ortam varken  $S_{21}$  grafiği mavi renkli, iki anten arasında tasarlanan FSY yapı konulduğunda  $S_{21}$  grafiği kırmızı renkli verilmiştir. Şekil 26'da görülen mavi renkli grafikten de anlaşılacağı gibi, 2,45 GHz'de  $S_{21}$  değeri yaklaşık olarak -10 dB'dir. Bu durum, verici antenin gönderdiği sinyallerin neredeyse tamamının alıcı anten tarafından alındığının logaritmik ifadesi olarak değerlendirilmiştir.



Şekil 26.  $S_{21}$  ölçüm sonuçları

Daha sonra, üretilen FSY yapı Şekil 25.b’de görüldüğü gibi iki anten arasındaki boşluğa yerleştirilmiş ve iletim katsayısı  $S_{21}$  değeri yeniden ölçülmüştür. Ölçüm sonuçları Şekil 26’de görülen kırmızı renkli grafikte verilmiştir. Şekil 26’de görülen kırmızı renkli grafikten de anlaşılacağı gibi, 2,45 GHz’de  $S_{21}$  değeri yaklaşık olarak -50 dB civarındadır. Şekil 26’de görülen iki sonuç karşılaştırıldığında, iki sonuç arasında en az -40 dB’lik bir fark görülmektedir. Bu sonuç, tasarlanan FSY’nin çalıştığını, FSY var iken vericiden çıkan sinyallerin neredeyse tamamının alıcı antene ulaşmadan yansıtıldığı veya saçıldığı anlaşılmaktadır. Yapılan ölçüm sonuçlarından da anlaşılacağı gibi, tasarlanan FSY yapı boşluk ortamda 2,45 GHz’de yaklaşık -50 dB’lik  $S_{21}$  değeri ile oldukça başarılı bir şekilde bant durduran filtre görevini yerine getirmiştir, ayrıca simülasyon ve ölçüm sonuçlarının da uyum içerisinde olduğu görülmüştür.

### 4.3. Üretilen Frekans Seçici Yüzeyin Uygulama Projesi



Şekil 27. Tasarlanan FSY’li kombi şeması

Tasarlanması amaçlanan mikrodalga kombi sistemi Şekil 27’de görülmektedir. Şekil 29’da 1, 2, 3, 4 referans numaralı noktalar sırasıyla cihaz su konteyneri, FSY, dalga kılavuzu ve magnetrondur. Magnetrona suyun temas etmemesi için Şekil 27’de görülen 3 referans numaralı dalga kılavuzu uygun bir dielektrik ile doldurulmuş ve böylece, magnetron ile suyun temas etmesi engellenmiştir.

Şekil 27’da 2 numara olarak işaretlenen parça, bakır kaplamalı FR-4 malzemeden yapılmıştır, su akışının sağlanabilmesi için üzerinde periyodik delikler bulunmaktadır. Periyodik deliklerden oluşan bu yapının 2,45 GHz’de üzerine gelen elektromanyetik dalgayı birinci simülasyon sonucuna göre -41 dB, hava ortamında yapılan ikinci simülasyon sonucuna göre -41 dB, su ile dolu ortamda yapılan üçüncü simülasyon sonuçlarına göre ise -60 dB’lik  $S_{21}$  değeri elde edildiği görülmüştür. Ayrıca bu yapı, simülasyon sonuçları ile uyumlu bir şekilde, deneysel olarak da -50 dB’lik  $S_{21}$  değeri ölçülen özgün bir FSY’dır. Sonuçlardan da anlaşılacağı gibi önerdiğimiz sinyal yansıtıcı, geniş bir bant aralığında kapalı akışkan mekanik sistemlerde su akışını engellemeden 2,45 GHz lik mikrodalga enerjisinin neredeyse tamamını hazne içerisine geri yansıtmaktadır.

Üzerine gelen sinyalin yönü ve geliş açısına bakmaksızın 1 Ghz ile 6 Ghz aralığında gelen tüm elektromanyetik dalgaları yansıtacak şekilde optimize edilen ve üretilen delikli FSY oldukça başarılı bir performans göstermiş ve bu yapı ile 2,45 GHz’de  $S_{21}$  değeri yaklaşık olarak -50 dB olarak elde edilmiştir.

#### 4.3.1. FSY Uygulama 1

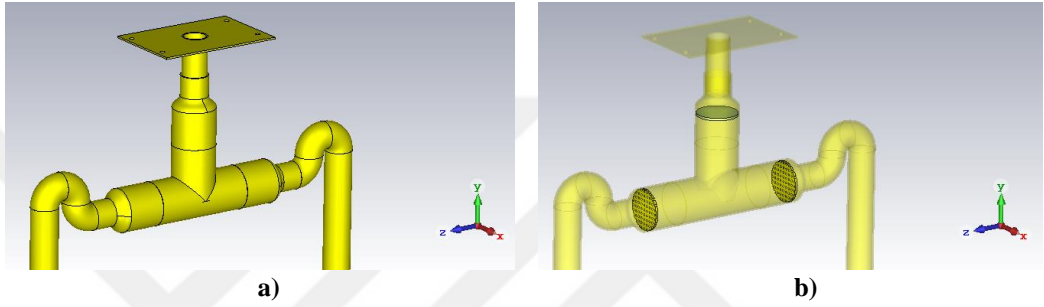
Bu bölümde mikrodalga ile çalışan ev tipi kombi projesinin tasarım ve üretim çalışmaları incelenecektir. Toplamda iki farklı uygulama yapılmış olup, bu ilk uygulamadır. İlk uygulamada, su haznesi kullanılmamış, suyun boru içerisinde ısıtılıp ısıtılamayacağı araştırılmıştır. İkinci uygulamada ise su haznesi konulmuş ve suyun hazne içerisinde ısıtılıp ısıtılamayacağı araştırılmıştır.

Üretilen FSY yapı, magnetron yardımıyla ısıtılan su giriş ve çıkış borularının içerisine, bakır yüzeyler birbirine bakacak şekilde monte edilmiştir. Bu sayede, magnetron aracılığıyla uygulanan elektromanyetik dalganın iki FSY yapı arasında kalması sağlanmış, su boruları aracılığıyla dışarıya sızması engellenmiştir. Cihazdaki genleşmeyi kontrol altına almak amacıyla genleşme tankı da bulunmaktadır. Cihazda bulunan genleşme tankı ve emniyet ventili aşırı basınç durumunda basıncı azaltmak amacıyla kullanılmıştır.

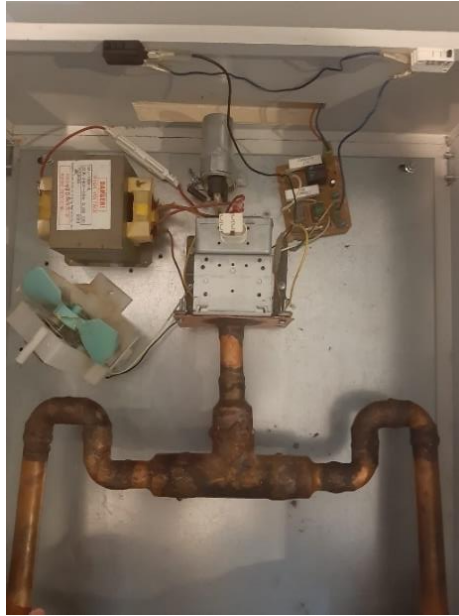
Magnetron tarafından üretilen 2,45 GHz’lik mikrodalga enerjisi iki FSY arasındaki boru içerisindeki suya aktarılarak, suyun ısınması sağlanacak, ısınan su pompa yardımıyla kalorifer sisteminde devir daim olacaktır. Su, FSY üzerindeki periyodik

deliklerden akarken, mikrodalga enerjisi iki frekans seçici yüzey arasında hapsedilecektir.

Şekil 28’de gösterildiği gibi 40 mm çapındaki borunun giriş çıkışı noktalarına FSY monte edilmiştir. Burada iki FSY arasındaki mesafe 10 cm’dir. İki FSY arasında açılan delik ile içerisi dielektrik geçirgenliği yüksek malzeme ile doldurulmuş, magnetron ile boru arasında su geçirmez olarak tasarlanan dalga kılavuzu yerleştirilmiştir. Su yalıtımı sağlanan dalga kılavuzunun bir tarafı iki FSY arasında açılan deliğe, diğer tarafı ise magnetrona bağlanmış ve böylece iki FSY arasındaki boru içerisindeki suya 2.45 Ghz frekansındaki yüksek güçteki elektromanyetik dalga gönderilmiştir.



**Şekil 28.** Tasarlanan FSY Uygulama-1  
a) perspektif görünümü, b) şeffaf görünüm



**Şekil 29.** Mikrodalga enerjisi ile çalışan ev tipi kombi projesine FSY uygulama-1

Şekil 27’de şematik görünümü verilen çalışma, Şekil 28’deki tasarım çalışması ile birleştirilerek- Şekil 29’de görülen mikrodalga kombi sistemi elde edilmiş ve üretimi gerçekleştirilmiştir. Şekil 29’da, içerisinde güç kondansatörü, güç diyotu, trafo ve

magnetron ile gerekli elektrik ve elektronik devrelerin ve mekanik aksamın bulunduğu mikrodalga kombi sistemi görülmektedir. Burada ayrıca, sistem güvenliği ve kullanıcı güvenliği sağlamak amacıyla cihaz kapaklarına switchler ve sıcaklık sensörleri de monte edilmiştir.

Burada, her iki ucu FSY ile kapatılmış silindirik bir boru, mikrodalga frekanslarında bir boşluk rezonatörü olarak düşünülebilir. Genel olarak boşluk rezonatörü, elektromanyetik enerjiyi sınırlayan metalik bir muhafazadır. Boşluk içinde depolanan elektrik ve manyetik enerjiler, eşdeğer endüktans ve kapasitansı belirler. Boşluk duvarlarının sonlu iletkenliği tarafından harcanan enerji, eşdeğer dirence karşılık gelir. Diğer taraftan, İletken duvarlarının düşük direnci nedeniyle boşluk rezonatörleri çok yüksek Q faktörlerine sahiptir; yani bant genişlikleri, rezonans yapacakları rezonans frekansı etrafındaki frekans aralığı çok dardır. Böylece dar bant geçiren filtreler gibi davranabilirler.

Teorik olarak belirli bir rezonatörün sonsuz sayıda rezonans modu vardır ve her mod belirli bir rezonans frekansına karşılık gelir. İç yarıçapı 'a' ve yüksekliği 'd' olan silindirik bir boşluk için iki olası dalga modu vardır: enine elektrik (TE) ve enine manyetik (TM). Boşluk rezonatörüne uygulanan sinyalin frekansı rezonans frekansına eşit olduğunda, duran dalganın maksimum genliği meydana gelir ve boşluk, elektromanyetik enerjiyi depolar. En düşük rezonans frekansına sahip olan mod, baskın mod olarak bilinir.

Silindirik bir rezonatörün baskın modu, boşluğun boyutlarına bağlıdır.

$d < 2a$  için baskın mod  $TM_{010}$ 'dur ve bu modun rezonans frekansı

$$f_{mnq} = \frac{c}{2\pi\sqrt{\mu_r\epsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{x_{mn}}{a}\right)^2 + \left(\frac{q\pi}{d}\right)^2} \quad (4)$$

$d > 2a$  için baskın mod  $TE_{111}$ 'dur.

$$f_{mnq} = \frac{c}{2\pi\sqrt{\mu_r\epsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{x'_{mn}}{a}\right)^2 + \left(\frac{q\pi}{d}\right)^2} \quad (5)$$

İki FSY yapı arasındaki boşluk 10 cm, suyun bağıl dielektrik sabiti  $\epsilon_r = 72$  olarak alınırsa  $TM_{010}$  ve  $TE_{111}$  modları için rezonans frekansları sırasıyla, 0,672 GHz ve 0,547 Ghz olarak hesaplanmıştır, yani rezonans elde edilememiştir. 2,45 GHz'de  $TE_{111}$  modunda rezonans elde edebilmek için iki FSY arasındaki boşluk 10 cm de sabit tutulursa, boru yarıçapının 4,25 mm olması gerekir. Diğer taraftan,  $TM_{010}$  modunda

rezonans elde edebilmek için iki FSY arasındaki boşluk 10 cm de sabit tutulursa, boru yarıçapının 5,5 mm olması gerekir. Bu boyutlar dikkate alınır, boru yarıçapının çok küçülmesi gerekmektedir. Su basıncı ve bu boyuttaki borunun alacağı su kapasitesi dikkate alındığında kalorifer sistemi için küçük boru yarıçapı uygun olmayacaktır.

Yukarıda bahsedilen sebeplerden dolayı, bu uygulama yönteminde, suyun ısıtılıp sisteme verilmesi gerçekleştirilememiştir. 2,45 GHz lik bir dalganın dalga boyunun yaklaşık 12 cm olduğu dikkate alındığında 40 mm çaplı bir boru içerisinde suyun ısıtılabilmesi mümkün olmamıştır. Dalga polarizasyonu, dalganın geliş açısı, mikrodalga kaynağın konumu gibi parametreler de dikkate alındığında, 2,45 GHz'lik bir sinyalin suya aktarılabilmesi için daha farklı bir ortama ihtiyaç vardır. Bu durum göz önünde bulundurularak ikinci bir tasarım uygulamasına geçilmiştir.

#### 4.3.2. FSY Uygulama 2

Şekil 30'de frekans seçici yüzeylerin kullanıldığı mikrodalga enerjisi ile çalışan ev tipi ısıtma cihazının ikinci uygulama yöntemi görülmektedir. Bu bölümde birinci uygulama yönteminde karşılaşılan problemler göz önünde bulundurularak, sisteme bir su tankı eklenmiş ve alternatif ikinci bir yöntem geliştirilmiştir.

Bu tasarımda, 15x15x20 cm boyunda ve 15x15x10 cm boyutunda bir hacme sahip olacak şekilde ikiye bölünmüş, toplamda 15x15x30 cm boyutunda bir su tankı tasarlanmıştır. Yani, içeride oluşacak sıcaklık, terleme, nem gibi etkenlere karşı magnetronu korumak amacıyla araya temperli cam koyarak ikiye bölünmüştür. Burada amaç, suyun, su buharının ve nemin magnetrona geçmesini engellemektir. Su tankının sağ yüzeyinin orta üst kısmında Ø 25'lik bir alana yayılacak şekilde ve FSY tasarımındaki ölçüler dikkate alınarak 2mm çapında delik, yine sol yüzeyinin de orta alt kısmında Ø 25'lik bir alana yayılacak şekilde frekans seçici yüzey tasarımındaki ölçüler dikkate alınarak 2mm çapında delik açılmıştır. Bu deliklere boru çıkışları kaynatılmıştır. Boru çıkışlarının birinin yukarıda birinin aşağıda olmasının sebebi ise ısınan suyun genişleyerek yukarıya çıkmasıyla ilgilidir. Bu durumun sıcaklık faktörünü iyileştireceği düşünülmektedir. Su tankının üst yüzeyine ise Ø15'lik bir delik açılarak magnetron anteni girişi yapılmıştır.

Üretilen FSY yapı, magnetron yardımıyla ısıtılan su tankının giriş ve çıkış borularının içerisine, bakır yüzeyler su tankının içerisine bakacak şekilde monte edilmiştir. Bu sayede, magnetron aracılığıyla tankın içerisine uygulanan elektromanyetik dalganın tankın içerisinde kalması sağlanmış, su buruları aracılığıyla dışarıya sızması engellenmiştir.



**Şekil 30.** Mikrodalga enerjisi ile çalışan ev tipi kombi projesine FSY uygulama-2

Şekil 30'de, içerisinde güç kondansatörü, güç diyotu, trafo ve magnetron ile gerekli elektrik ve elektronik devrelerin ve mekanik aksamın bulunduğu FSY uygulama yöntemi-2'yi içeren mikrodalga kombi sistemi görülmektedir. Bir önceki uygulama yöntemindeki gibi sistem güvenliği ve kullanıcı güvenliği sağlamak amacıyla cihaz kapaklarına switchler ve sıcaklık sensörleri monte edilerek güvenlik önlemleri alınmıştır.

FSY uygulama yöntemi-2'de uygulamam yöntemi-1'in aksine magnetronda üretilen 2,45 GHz lik elektromanyetik dalga suya aktarılabilmiş ve suyun ısınması gerçekleşmiştir. Tankın içerisindeki su 2 dakika içerisinde 85 dereceye kadar çıkarılabilmektedir. Kalorifer sisteminde bulunan pompa ile suyun borular içerisinde sirkülasyonu başladıktan sonra sıcaklık 65 dereceye kadar düşmüştür.

## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

### 5.1 Sonuçlar

Artan insan nüfusu ve sanayileşme sonucu iklim krizi ve küresel ısınma gibi problemleri de beraberinde getirmektedir. Bu sebeple, dünyada emisyon yapan ve karbon salınımı yapan cihazların alternatif arayışına girilmiştir. Bu çalışmada, mikrodalga enerjisi ile çalışan ev tipi ısıtma cihazı ısıtma sistemlerine alternatif olarak sunulmaktadır.

Bu çalışmada, 2,45 GHz'de bant durduran filtre özelliği gösteren FSY yapı, su ısıtmak için kullanılan mikrodalga enerjisinin su ile birlikte, borular aracılığıyla kalorifer sistemine geçmesi engellenmiştir.

FSY üretiminde, dielektrik sabiti  $\epsilon_r = 4,3$  ve kayıp tanjantı  $\tan \delta = 0,025$  olan üzeri bakır kaplı FR4 malzeme kullanılmıştır. FSY yapıda kullanılan periyodik oyukların çapı 2 mm'dir ve uyuklar arasında 1 mm yatay boşluk bulunmaktadır. Su akışını sağlamak için periyodik olarak yerleştirilen deliklerin derinliği ise dielektrik ve bakır tabakaların toplam kalınlığı kadar, yani 1,635mm dir.

Tasarlanan FSY yapının sayısal analizi sonlu elemanlar (FEM) ve sonlu entegrasyon tekniklerine (FIT) dayanan iki ayrı elektromanyetik simülasyon programı ile gerçekleştirilmiştir. Buna göre, FIT tabanlı simülasyon çalışmasında 1 GHz- 6 GHz bant aralığında FSY yapının  $S_{21}$  değerinin -38 dB olduğu gözlemlenmiştir. Diğer taraftan, FEM tabanlı simülasyon çalışmasında, 1 GHz- 6 GHz bant aralığında FSY yapının  $S_{21}$  değerinin -44 dB olduğu gözlemlenmiştir. Simülasyon çalışmaları dalga kılavuzu içerisinde gerçekleştirilmiştir. Simülasyon çalışmalarında, FSY yapı dalga kılavuzu içerisine önce boşluk ortama konuşmuş, daha sonra dalga kılavuzu içerisi su ile doldurulmuştur. Simülasyon sonuçları birbiri ile uyumludur. Simülasyonu çalışmalarından sonra, optimizasyon yapılarak boyutlar netleştirilmiş ve FSY yapının üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretimi yapılan FSY'nin ölçümleri Network Analizör cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ölçüm sonuçlarından da anlaşılacağı gibi, simülasyon sonuçları ile ölçüm sonuçları uyum içerisindedir. Ölçüm sonuçları dikkate alındığında, tasarlanan FSY yapı üzerine gelen sinyalin yönü ve geliş açısına bakmaksızın 1 Ghz ile 6 Ghz aralığında gelen tüm elektromanyetik dalgaları yansıtacak şekilde optimize edilen ve üretilen delikli FSY oldukça başarılı bir performans göstermiş ve bu yapı ile 2,45 GHz'de  $S_{21}$  değeri yaklaşık olarak -50 dB olarak elde edilmiştir.

Tasarlanan FSY yapının mikrodalga kombi sistemine entegrasyonu için iki uygulama gerçekleştirilmiştir. Birinci uygulama yönteminde, tasarlanan yapı 40 mm çaplı boru içerisine yerleştirilmiş ve mikrodalga enerjisi boru içerisine, iki FSY arasına uygulanmıştır. Bu uygulama yönteminde, silindirik boşluk rezonatörü gibi çalışan sistemde rezonans elde edilememiş, bu sebeple, suyun ısıtılıp sisteme verilmesi gerçekleştirilememiştir. 2,45 GHz lik bir dalganın dalga boyunun yaklaşık 12 cm olduğu dikkate alındığında 40 mm çaplı bir boru içerisinde suyun ısıtılabilmesi mümkün olmamıştır.

İkinci uygulama yöntemde ise birinci uygulama yöntemini başarısız kılan parametrelere dikkat edilerek sisteme bir su tankı eklenmiş ve mikrodalga enerjisi bu tankın içerisine uygulanmıştır. Magnetron yardımıyla ısıtılan su tankının giriş ve çıkış borularının içerisine, bakır yüzeyler su tankının içerisine bakacak şekilde üretilen FSY yapı monte edilmiştir. Bu sayede, magnetron aracılığıyla tankın içerisine uygulanan elektromanyetik dalganın tankın içerisinde kalması sağlanmış, su buruları aracılığıyla dışarıya sızması engellenmiştir. Tankın içerisindeki su 2 dakika içerisinde 85 dereceye kadar çıkarılabilmiş ve kalorifer sisteminde bulunan pompa ile suyun borular içerisinde sirkülasyonu olayı başladıktan sonra sıcaklık 65 dereceye kadar düşmüştür.

## 5.2 Öneriler

İkinci uygulama yönteminde sistem devreye alınmasıyla ilk çalışma sırasında ve periyodik olmayan aralıklarla su tankının yüzeyinde rastgele ark olayları ve parlamalar gerçekleşmektedir. Bu parlamaların sebebinin su tankının bakır malzemedan yapılmasıyla ilgili olduğu düşünülmektedir. Bu duruma önlem olarak ise cihazda kullanılacak malzemenin iletken olmayan bir malzemedan yapılması ve yüzeyinin de mikrodalga fırın camlarında olduğu gibi FSY ile kaplanması çözüm önerisi olarak değerlendirilebilir. Bir diğer çözüm önerisi ise, AISI 304, AISI 321, AISI316L gibi ekranlama özellikli malzemelerin kullanılması olarak düşünülebilir.

## 6. KAYNAKLAR

- Abadi, S.M.A.M.H.; Li, M.; Behdad, N. Harmonic-suppressed miniaturized-element frequency selective surfaces with higher order bandpass responses. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2014, 62, 2562–2571.
- Abdelrahman, A.H.; Elsherbeni, A.Z.; Yang, F. Transmission phase limit of multilayer frequency-selective surfaces for transmitarray designs. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2014, 62, 690–697.
- Anwar, Rana, Ling-Feng Mao, and Huansheng Ning. 2018. ‘Frequency Selective Surfaces: A Review’. *Applied Sciences* 8: 1689. doi:10.3390/app8091689.
- Anwar, Rana Sadaf, Lingfeng Mao, and Huansheng Ning. 2018a. ‘Frequency Selective Surfaces: A Review’. *Applied Sciences (Switzerland)* 8(9). doi:10.3390/app8091689.
- Bassett, HL. 1980. ‘Symposium on ElectroIşık, Hacı Mehmet. 2022. “FREQUENCY SELECTIVE SURFACES FOR AEROSPACEAPPLICATIONS”’.
- Murugan, Jaganathan, T R Sureshkumar, P Salil, ve Chakrapani Venkatesh. 2015. “Dual frequency selective transparent front doors for microwave oven with different opening areas”. *Progress In Electromagnetics Research Letters* 52: 11–16.
- Sharipov, Zafar vd. 2016. “HORN ANTENNAS WITH ENHANCED FUNCTIONALITIES THROUGH THE USE OF FREQUENCY SELECTIVE SURFACES”. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*.
- Işık, Hacı Mehmet. 2022. “FREQUENCY SELECTIVE SURFACES FOR AEROSPACEAPPLICATIONS”’.
- Murugan, Jaganathan, T R Sureshkumar, P Salil, ve Chakrapani Venkatesh. 2015. “Dual frequency selective transparent front doors for microwave oven with different opening areas”. *Progress In Electromagnetics Research Letters* 52: 11–16.
- Sharipov, Zafar vd. 2016. “HORN ANTENNAS WITH ENHANCED FUNCTIONALITIES THROUGH THE USE OF FREQUENCY SELECTIVE

- SURFACES". *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*.
- magnetic Windows, 15th, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA, June 18-20, 1980, Proceedings'. In *15th Symposium on Electromagnetic Windows*,.
- Delihacioglu, K, S Uckun and T Ege. 2007. 'Scattering Characteristics of FSY Comprised of L-Shaped and One-Turn Helix Shaped Conductors for TE and TM Excitation'. *Electrical Engineering* 89(3): 177–81. doi:10.1007/s00202-005-0335-x.
- Delihacioglu, Kemal, Cumali Sabah, Muharrem Karaaslan, and Emin Ünal. 2013. 'Zigzag Metallic Conductors as Frequency Selective Surfaces'. *IET Microwaves, Antennas and Propagation* 7(9): 722–28. doi:10.1049/iet-map.2013.0107.
- Delihacioglu, Kemal, Cumali Sabah, Muharrem Karaaslan, and Emin Unal. 2013. 'Zigzag Metallic Conductors as Frequency Selective Surfaces'. *Microwaves, Antennas & Propagation, IET* 7: 722–28. doi:10.1049/iet-map.2013.0107.
- Dincer, Furkan, Kemal Delihacioglu, Muharrem Karaaslan, Mehmet Bakir, and Cumali Sabah. 2016. 'U-Shaped Frequency Selective Surfaces for Single- and Dual-Band Applications Together with Absorber and Sensor Configurations'. *IET Microwaves, Antennas & Propagation* 10. doi:10.1049/iet-map.2015.0341.
- Duman, Mehmet. 2019. 'Frekans Seçici Yüzey Analizi Yöntemiyle Gerçekleştirilmiş 1.35 GHz Frekanslı Bant Durduran Süzgeç Tasarımı'. *DÜMF Mühendislik Dergisi* 10(3): 807–13. doi:10.24012/dumf.468164.
- English, Niall J., and J. M.D. MacElroy. 2003. 'Molecular Dynamics Simulations of Microwave Heating of Water'. *Journal of Chemical Physics* 118(4): 1589–92. doi:10.1063/1.1538595.
- Erdemli, Y E, K Sertel, R A Gilbert, D E Wright, and J L Volakis. 2002. 'Frequency-Selective Surfaces to Enhance Performance of Broad-Band Reconfigurable Arrays'. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 50(12): 1716–24. doi:10.1109/TAP.2002.807377.
- Euler, M, V F Fusco, R Cahill, and R Dickie. 2010. '325 GHz Single Layer Sub-Millimeter Wave FSY Based Split Slot Ring Linear to Circular Polarization Converter'. *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on* 58: 2457–59. doi:10.1109/TAP.2010.2048874.

- Fan, Xuanqing, Zijian Pan, Sihong Chen, Yuhang Li, Zhao Zhao, Yuxia Xin, and Taisong Pan. 2021. 'Soft Science Design and Fabrication of a Reconfigurable and Flexible Frequency Selective Surface with a Buckling Dipole via Mechanical Stretching'. *Soft Science* 1. doi:10.20517/ss.2021.18.
- 'General Overview'. 2000. In *Frequency Selective Surfaces*, John Wiley & Sons, Ltd, 1–25. doi:https://doi.org/10.1002/0471723770.ch1.
- Ghosh, Saptarshi, and Sungjoon Lim. 2019. 'A Miniaturized Bandpass Frequency Selective Surface Exploiting 3D Printing Technique'. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters* PP: 1. doi:10.1109/LAWP.2019.2915048.
- Gianvittorio, J P, J Romeu, S Blanch, and Y Rahmat-Samii. 2003. 'Self-Similar Prefractal Frequency Selective Surfaces for Multiband and Dual-Polarized Applications'. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 51(11): 3088–96. doi:10.1109/TAP.2003.818791.
- Gümüşderelioğlu, Menemşe, and Gökçe Kaynak. 2012. 'Mikrodalgalar ve Uygulamaları'. *Bilim ve Teknik*: 38–42.
- Harnois, Maxime, M Himdi, Wai Yong, Sharul Abdul Rahim, Karim Tekkouk, and Nicolas Cheval. 2020. 'An Improved Fabrication Technique for the 3-D Frequency Selective Surface Based on Water Transfer Printing Technology'. *Scientific Reports* 10: 1714. doi:10.1038/s41598-020-58657-5.
- Henchman, Richard H. 2016. 'Water's Dual Nature and Its Continuously Changing Hydrogen Bonds'. *Journal of Physics: Condensed Matter* 28(38): 384001. doi:10.1088/0953-8984/28/38/384001.
- Hooberman, Benjamin. 2005. 'Everything You Ever Wanted to Know About Frequency-Selective Surface Filters but Were Afraid to Ask'.
- Huang, C.; Ji, C.; Wu, X.; Song, J.; Luo, X. Combining FSY and EBG Surfaces for High-Efficiency Transmission and Low-Scattering Properties. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2018, 66, 1628–1632.
- Işık, Hacı Mehmet. 2022. 'FREQUENCY SELECTIVE SURFACES FOR AEROSPACE'.

- Kapoor, Ankush, Ranjan Mishra, and P Kumar. 2022. 'Frequency Selective Surfaces as Spatial Filters: Fundamentals, Analysis and Applications'. *AEJ - Alexandria Engineering Journal* 61: 4263–93. doi:10.1016/j.aej.2021.09.046.
- Karaaslan, Muharrem, Mehmet Bakir, Oguzhan Akgol, Emin Unal, and Cumali Sabah. 2017. 'Microwave Metamaterial Absorber For Sensing Applications'.
- Karaaslan, Muharrem, Emin Unal, and Faruk Karadag. 2018. 'Circular Ring Frequency Seletive Surface Backed By Bianisotropic Material'.
- Karadag, Faruk, Fatih Alkurt, Muharrem Karaaslan, and Emin Unal. 2019. 'Microwave Imager Design with 2.46 GHz Microstrip Patch Antennas'. *Adiyaman University Journal of Science*. doi:10.37094/adyujsci.552323.
- Katoch, Kanishka, Naveen Jaglan, and Samir Dev Gupta. 2019. 'A Review on Frequency Selective Surfaces and Its Applications'. In *2019 International Conference on Signal Processing and Communication (ICSC)*, 75–81. doi:10.1109/ICSC45622. 2019. 8938161.
- Kiani, G.I.; Ford, K.L.; Esselle, K.P.; Weily, A.R.; Panagamuwa, C.; Batchelor, J.C. Single-layer bandpass active frequency selective surface. *Microw. Opt. Technol. Lett.* 2008, 50, 2149–2151.
- Kutlu, Yakup. 2004. 'Frekans Seçici Yüzeyler, Teknikleri ve Uygulamaları'. Yüksek Lisans Tezi. İskenderun Teknik Üniversitesi.
- Lee, Shung-Wu, G Zarrillo, and Chak-Lam Law. 1982a. 'Simple Formulas for Transmission through Periodic Metal Grids or Plates'. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 30(5): 904–9. doi:10.1109/TAP.1982.1142923.
- Li, Long, Qiang Chen, Kunio Sawaya, and Qiaowei Yuan. 2011. 'Amplitude Controlled Reflectarray Using Non-Uniform FSF Reflection Plane'. : 2180–83. doi:10.1109/APS.2011.5996945.
- Li, L.; Li, Y.; Wu, Z.; Huo, F.; Zhang, Y.; Zhao, C. Novel polarization-reconfigurable converter based on multilayer frequency-selective surfaces. *Proc. IEEE* 2015, 103, 1057–1070.
- Li, B.; Shen, Z. Three-dimensional bandpass frequency-selective structures with multiple transmission zeros. *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* 2013, 61, 3578–3589.

- Lina, Moustafa, and B Jecko. 2010. 'Design and Realization of a Wide-Band EBG Antenna Based on FSF and Operating in the Ku-Band'. *International Journal of Antennas and Propagation* 2010. doi:10.1155/2010/139069.
- Liu, Ning, Xianjun Sheng, Chunbo Zhang, and Dongming Guo. 2017. 'Design of Frequency Selective Surface Structure With High Angular Stability for Radome Application'. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters* PP: 1. doi:10.1109/LAWP.2017.2778078.
- Liu, Tian, and Sung-Soo Kim. 2019. 'High-capacitive Frequency Selective Surfaces of Folded Spiral Conductor Arrays'. *Microwave and Optical Technology Letters* 62. doi:10.1002/mop.32006.
- Liu, Xiaochun, Weihua Tan, Zhongxiang Shen, and Cheng Jin. 2020. 'Integrated Frequency Selective Surface and Antenna Printed on a Transparent Substrate'. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters* 19(12): 2062–66. doi:10.1109/LAWP.2020.3022436.
- Mahouti, Peyman, Filiz Güneş, Mehmet Belen, Alper Caliskan, Salih Demirel, and Zafar Sharipov. 2016. 'HORN ANTENNAS WITH ENHANCED FUNCTIONALITIES THROUGH THE USE OF FREQUENCY SELECTIVE SURFACES'. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*.
- Marconi, G. and C. S. Franklin, "Reflector for use in wireless telegraphy and telephony," US Patent 1,301,473, April 1919.
- Martinez-Lopez, L.; Rodriguez-Cuevas, J.; Martinez-Lopez, J.I.; Martynyuk, A.E. A multilayer circular polarizer based on bisected split-ring frequency selective surfaces. *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* 2014, 13, 153–156.
- Momeni Hasan Abadi, Seyed Mohamad Amin, and Nader Behdad. 2015. 'Inductively-Coupled Miniaturized-Element Frequency Selective Surfaces With Narrowband, High-Order Bandpass Responses'. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 63(11): 4766–74. doi:10.1109/TAP.2015.2477850.
- Montenegro, Angelo, Chayan Dutta, Muhammet Mammetkuliev, Haotian Shi, Bingya Hou, Dhritiman Bhattacharyya, Bofan Zhao, Stephen B Cronin, and Alexander V Benderskii. 2021. 'Asymmetric Response of Interfacial Water to Applied Electric Fields'. *Nature* 594(7861): 62–65. doi:10.1038/s41586-021-03504-4.

- Munk, B. A., R. G. Kouyoumjian, and L. Peters, "Reflection properties of periodic surfaces of loaded dipoles," *IEEE Trans. on Ant. and Prop.*, Vol. 19, No. 5, 612-617, 1971.
- Murugan, Jaganathan, T R Sureshkumar, P Salil, and Chakrapani Venkatesh. 2015. 'Dual Frequency Selective Transparent Front Doors for Microwave Oven with Different Opening Areas'. *Progress In Electromagnetics Research Letters* 52: 11–16. doi:10.2528/PIERL14121801.
- Nisanci, M H, N B Tesneli, A Y Tesneli, F Ustuner, E Demirel, F de Paulis, and A Orlandi. 2017. 'Notice of Retraction: Experimental Validation of a 3D FSF Designed by Periodic Conductive Fibers Part-2: Band-Stop Filter Characteristic'. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility* 59(6): 1835–40. doi:10.1109/TEMPC.2017.2698835.
- Ortiz, Julian, Juan Baena, R Marques, and Francisco Medina. 2011. 'A Band-Pass/Stop Filter Made of SRRs and C-SRRs'. : 2669–72. doi:10.1109/APS.2011.5997074.
- Peitgen, Heinz-Otto, Hartmut Jürgens, and Dietmar Saupe. 2004. *Chaos and Fractals*.
- Pirhadi, Abbas, Hadi Bahrami, and Javad Nasri. 2012. 'Wideband High Directive Aperture Coupled Microstrip Antenna Design by Using a FSF Superstrate Layer'. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 60(4): 2101–6. doi:10.1109/TAP.2012.2186230.
- Pozar, David. 2012. *Microwave Engineering*.
- Qu, Meijun, Menglou Rao, Shufang Li, and li Deng. 2017. 'Tunable Antenna Radome Based on Graphene Frequency Selective Surface'. *AIP Advances* 7: 95307. doi:10.1063/1.5003020.
- Rashid, A.K.; Li, B.; Shen, Z. An overview of three-dimensional frequency-selective structures. *IEEE Antennas Propag. Mag.* 2014, 56, 43–67.
- Reed, Jeffrey, and Dale Byrne. 1998. 'Frequency-Selective Surfaces with Multiple Apertures within a Periodic Cell'. *Journal of The Optical Society of America* 15. doi:10.1364/JOSAA.15.000660.
- Samaddar, Poulami, Snehasish Saha, Sushanta Sarkar, Debasree (Sarkar, and Partha Sarkar. 2017. 'Design of Curved Frequency Selective Surface with High Roll Off'. *Microwave and Optical Technology Letters* 59: 2660–64. doi:10.1002/mop.30798.

- Singh, Deepika, Abhinav Jain, and R P Yadav. 2020. 'DEVELOPMENT OF CIRCULAR LOOP FREQUENCY SELECTIVE SURFACE USING 3-D PRINTING TECHNIQUE'. *Progress In Electromagnetics Research M* 90: 195–203. doi:10.2528/PIERM20011402.
- Sivasamy, Ramprabhu, and Malathi Kanagasabai. 2017. 'Novel Reconfigurable 3-D Frequency Selective Surface'. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology* PP: 1–5. doi:10.1109/TCPMT.2017.2688367.
- Song, K.; Mazumder, P. Design of highly selective metamaterials for sensing platforms. *IEEE Sens. J.* 2013, 13, 3377–3385.
- Sun, L.; Cheng, H.; Zhou, Y.; Wang, J. Broadband metamaterial absorber based on coupling resistive frequency selective surface. *Opt. Express* 2012, 20, 4675–4680.
- Sung, G.H.-H, Kevin Sowerby, Michael Neve, and Allan Williamson. 2006. 'A Frequency-Selective Wall for Interference Reduction in Wireless Indoor Environments'. *Antennas and Propagation Magazine, IEEE* 48: 29–37. doi:10.1109/MAP.2006.277152.
- Sung, Hui-Hsia. 'Frequency Selective Wallpaper for Mitigating Indoor Wireless Interference'.
- Takano, Ipppei, Daigo FURUSU, Yosuke WATANABE, and Masaya TAMURA. 2017. 'Cavity Resonator Wireless Power Transfer in an Enclosed Space with Scatterers Utilizing Metal Mesh'. *IEICE Transactions on Electronics* E100.C(10): 841–49. doi:10.1587/transele.E100.C.841.
- Tanaka, Motohiko, and Motoyasu Sato. 2007. 'Microwave Heating of Water, Ice and Saline Solution: Molecular Dynamics Study'. *The Journal of chemical physics* 126: 34509. doi:10.1063/1.2403870.
- Tıgılı, Ismail. 2014. 'Mutfak Tipi Bir Mikrodalga Fırının Mikroişlemci Ile Kontrolü'. 16(2): 87–99.
- Vasquez, Juan, J M Fernández, Pavel Valtr, and Jonathan Rigelsford. 2020. 'Inductive Frequency Selective Surface: An Application for Dichroic Sub-Reflectors'. *IEEE Access* PP: 1. doi:10.1109/ACCESS.2020.2970271.
- Vasquez, Juan, Adrian Tamayo-Dominguez, Gerardo Perez-Palomino, J M Fernández, and Thomas Wong. 2022. '3D Inductive Frequency Selective Structures Using

- Additive Manufacturing and Low-Cost Metallization'. *Sensors* 22: 552. doi:10.3390/s22020552.
- Wang, Min, Cheng Huang, Po Chen, Yanqing Wang, Zeyu Zhao, and Xiangang Luo. 2014. 'Controlling Beamwidth of Antenna Using Frequency Selective Surface Superstrate'. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters* 13: 213–16. doi:10.1109/LAWP.2013.2297175.
- Wu, Te-Kao. 2005a. 'Frequency Selective Surfaces'. *Encyclopedia of RF and Microwave Engineering*. doi:10.1002/0471654507.eme133.2005b. 'Frequency Selective Surfaces'. doi:10.1002/0471654507.eme133.
- Xu, Gengyu, Sean Victor Hum, and George V Eleftheriades. 2018. 'A Technique for Designing Multilayer Multistopband Frequency Selective Surfaces'. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 66(2): 780–89. doi:10.1109/TAP.2017.2772089.
- Xu, Rong-Rong, Zhi-Yuan Zong, and Wen Wu. 2009. 'Low-Frequency Miniaturized Dual-Band Frequency Selective Surfaces with Close Band Spacing'. *Microwave and Optical Technology Letters* 51(5): 1238–40. doi:https://doi.org/10.1002/mop.24338.
- Zhang, He, Jun Lu, Guancheng Sun, and Hongliang Xiao. 2008. 'Influence of Substrate Process Tolerances on Transmission Characteristics of Frequency-Selective Surface'. *Chin. Opt. Lett.* 6(1): 54–56. <https://opg.optica.org/col/abstract.cfm?URI=col-6-1-54>.
- Zhang, Wei, Jian-ying Li, and Jian Xie. 2017. 'A Broadband Linear-to-Circular Transmission Polarizer Based on Right-Angled Frequency Selective Surfaces'. *International Journal of Antennas and Propagation* 2017: 1–6. doi:10.1155/2017/8067574.