

T.C.
KIRKLARELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**WIFI/5G UYGULAMALARI İÇİN ÇOK BANTLI, DİNAMİK YENİDEN
YAPILANDIRILABİLİR BANT DURDURAN FREKANS SEÇİCİ YÜZEY
TASARIMI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Aygün AKAN

OCAK - 2025

T.C.
KIRKLARELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**WIFI/5G UYGULAMALARI İÇİN ÇOK BANTLI, DİNAMİK YENİDEN
YAPILANDIRILABİLİR BANT DURDURAN FREKANS SEÇİCİ YÜZEY
TASARIMI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Aygün AKAN

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Sena Esen BAYER KESKİN
Eş Danışman: Prof. Dr. Nurhan TÜRKER TOKAN

Ocak – 2025

“WiFi/5G Uygulamaları için Çok Bantlı, Dinamik Yeniden Yapılandırılabilir Bant Durduran Frekans Seçici Yüzey Tasarımı” adlı tez çalışması **Aygün AKAN** tarafından hazırlanmış olup aşağıdaki jüri tarafından **OY BİRLİĞİ** ile Kırklareli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı:

Dr. Öğr. Üyesi Sena Esen BAYER KESKİN
Kırklareli Üniversitesi

.....

Eş Danışmanı:

Prof. Dr. Nurhan TÜRKER TOKAN
Yıldız Teknik Üniversitesi

.....

Jüri Üyeleri:

Prof. Dr. Burcu ERKMEN
Yıldız Teknik Üniversitesi

.....

Doç. Dr. Engin HÜNER
Kırklareli Üniversitesi

.....

Tez Savunma Tarihi: 10/01/2025

Doç. Dr. H. Hale KARAYER
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Kırkırelı Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez ve Proje Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında; tez içinde sunduğum bilgileri, verileri ve dokümanları, değişik sonuç verebilecek şekilde araştırma araç gereçleri kullanmadan, işlem veya kayıt sonuçlarını değiştirmeden akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu, tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi, bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Aygün AKAN
10/01/2025

ÖZET

WIFI/5G UYGULAMALARI İÇİN ÇOK BANTLI, DİNAMİK YENİDEN YAPILANDIRILABİLİR BANT DURDURAN FREKANS SEÇİCİ YÜZEY TASARIMI

Aygün AKAN

Yüksek Lisans Tezi

Kırklareli Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Sena Esen BAYER KESKİN

Eş Danışman: Prof. Dr. Nurhan TÜRKER TOKAN

Ocak 2025, 69 sayfa

Frekans seçici yüzeyler (FSY), belirli frekans bantlarında elektromanyetik dalgaları yansıtan veya ileten yapılar olarak tanımlanmaktadır. Bu yüzeyler, genellikle metalik veya dielektrik elemanların periyodik dizilimi ile oluşturulur. Modern telekomünikasyon, radar ve savunma teknolojilerinde bu tür yüzeylerin kullanımı büyük önem taşımaktadır. Ancak, geleneksel FSY'lerin sabit frekans karakteristikleri, dinamik ve değişken frekans gereksinimlerine sahip uygulamalarda sınırlayıcı olabilmektedir. Bu bağlamda, frekansı ayarlanabilir FSY'ler, farklı frekans bantlarında çalışma yeteneği ile öne çıkmaktadır. Bu tez çalışmasında CST Studio Suite yazılımı kullanılarak Wi-Fi ve 5G uygulamaları için çok bantlı, polarizasyon kararlı dinamik yeniden yapılandırılabilir bant durdurucu FSY tasarımı yapılmıştır. FSY tasarımında PIN diyotlar kullanılarak frekans bantları arasında dinamik olarak geçiş sağlanmıştır. Sonuçlar analiz edildiğinde 2.4 GHz, 3.5 GHz ve 5.8 GHz frekans bantları arasında üç farklı durum için dinamik olarak geçiş yapılabilen, TE ve TM polarizasyon kararlılığı bulunan ve 60 dereceye kadar açısız kararlılığa sahip özgün bir FSY tasarlanmıştır. Ayrıca, tasarlanan FSY'nin simülasyon sonuçları, ölçüm sonuçları ve eşdeğer devre modeli ile karşılaştırılmış ve uyumlu olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Frekans seçici yüzey, Yeniden yapılandırılabilir frekans seçici yüzey, Polarizasyon kararlılığı, Açısız kararlılık

ABSTRACT

DESIGN OF A MULTIBAND, DYNAMIC RECONFIGURABLE BAND-STOP FREQUENCY SELECTIVE SURFACE FOR WIFI/5G APPLICATIONS

Aygün AKAN

MSc Thesis

Kirklareli University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Supervisor: Dr. Öğr. Üyesi Sena Esen BAYER KESKİN

Co-supervisor: Prof. Dr. Nurhan TÜRKER TOKAN

January 2025, 69 pages

Frequency selective surfaces are defined as structures that reflect or transmit electromagnetic waves in certain frequency bands. These surfaces are usually formed by periodic arrangement of metallic or dielectric elements. The use of such surfaces is of great importance in modern telecommunications, radar and defence technologies. However, the fixed frequency characteristics of conventional frequency selective surfaces can be limiting in applications with dynamic and variable frequency requirements. In this context, frequency-adjustable frequency selective surfaces stand out with the ability to operate in different frequency bands. In this thesis, a multiband, polarisation stable dynamic reconfigurable band stop frequency selective surface for Wi-Fi and 5G applications has been designed using CST Studio Suite software. In the FSS design, PIN diodes are used to dynamically switch between frequency bands. When the results were analysed, a unique FSS was designed which can dynamically switch between 2.4 GHz, 3.5 GHz and 5.8 GHz frequency bands for three different states, has TE and TM polarisation stability and angular stability up to 60 degrees. In addition, the simulation results of the designed FSY were compared with the measurement results and the equivalent circuit model and found to be compatible.

Keywords: Frequency selective surface, Reconfigurable frequency selective surface, Polarisation stability, Angular stability

TEŞEKKÜR

Tez kapsamında yürütülen çalışmanın her aşamasında bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, en zor zamanında dahi ilgisini ve desteğini esirgemeyen, motivasyonumu sürekli yüksek tutan değerli hocam ve tez danışmanım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Sena Esen BAYER KESKİN'e, bilgi ve tecrübeleri ile bana büyük katkılar veren, pozitif enerjisi ile sürekli moral aşılayan, her aşamada destekleyen ve devam etmemi sağlayan eş danışmanım Sayın Prof. Dr. Nurhan TÜRKER TOKAN'a, en yoğun zamanında dahi sorularımı cevapsız bırakmayan, bu çalışma süresince sürekli yanımda olan değerli hocam Araş. Gör. Cem GÜLER'e sonsuz minnet ve teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca yüksek lisans eğitimim boyunca bana her zaman destek olan Türk Telekom ailesine ve yetkililerine gönülden teşekkür ederim.

Hayatım boyunca her anımda yanımda yer alarak destekleyen ve bugünlere gelmemde en büyük katkıya sahip olan sevgili aileme, hoşgörüsü, anlayışı ve sonsuz desteği ile her zaman yanımda olan sevgili eşim Betül BALKAN AKAN'a ve canım oğlum Doruk AKAN'a sabır ve sevgi dolu yaklaşımlarıyla hayatıma kattıkları anlam için sonsuz teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	viii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	ix
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. YENİDEN YAPILANDIRILABİLİR FREKANS SEÇİCİ YÜZEY TASARIMI	15
2.1. Çok Bantlı FSY Birim Hücresi.....	17
2.2. Yeniden Yapılandırılabilme İçin Aktif Eleman Kullanımı	22
2.2.1. Yeniden Yapılandırılabilme için Diyot Kullanımı	23
2.3. YY-FSY Birim Hücresi	26
2.4. YY-FSY Birim Hücresi Eşdeğer Devre Modeli.....	31
2.5. Analiz Sonuçları	35
3. BOYUTU KÜÇÜLTÜLMÜŞ, KOMPAKT YENİDEN YAPILANDIRILABİLİR FREKANS SEÇİCİ YÜZEY TASARIMI.....	39
3.1. KYY-FSY Birim Hücresi	39
3.2. KYY-FSY Birim Hücresi Eşdeğer Devre Modeli	41
3.3. Analiz Sonuçları	45
4. DENEYSEL DOĞRULAMA	53
4.1. Üretim.....	53
4.2. Ölçüm Düzenegi	54
4.3. Ölçüm Sonuçları.....	56
5. SONUÇLAR.....	61
KAYNAKLAR.....	63
ÖZGEÇMİŞ	69

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge 1.1. N78 yakınındaki frekans bantları	2
Çizelge 1.2. Tasarıma göre temel frekans seçici yüzey şekilleri.....	6
Çizelge 1.3. Farklı malzemelerin direnç ve iletkenlik değerleri.....	7
Çizelge 1.4. Yeniden yapılandırılabilir frekans seçici yüzey tasarımlarında mikroelektromekanik anahtarların karşılaştırılması	13
Çizelge 2.1. Rogers RT5880 dielektrik malzemenin özellikleri	18
Çizelge 2.2. Çok Bantlı FSY bakır tabakaya ait tasarım parametreleri.....	18
Çizelge 2.3. BAP 51-02 pin diyotun karakteristik tablosu	25
Çizelge 2.4. YY-FSY tasarım parametre değerlerine ait uzunluk ölçüleri.....	28
Çizelge 2.5. YY-FSY tasarımına ait oluşturulan modlar.....	28
Çizelge 2.6. YY-FSY aynı yüzeyde yatay ve dikey iletimde olan diyot modları	30
Çizelge 2.7. YY-FSY'in kullanılabilir modları	30
Çizelge 2.8. YY-FSY tasarımı sonucunda elde edilen durumlar	31
Çizelge 3.1. KYY-FSY tasarım parametreleri	41
Çizelge 3.2. KYY-FSY durum 1 için frekans ve sapma değerleri	48
Çizelge 3.3. KYY-FSY durum 2 için frekans ve sapma değerleri	50
Çizelge 3.4. KYY-FSY durum 3 için frekans ve sapma değerleri	51

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil 1.1. N78 bant frekansları	2
Şekil 1.2. Tasarıma göre temel frekans seçici yüzey karakteristikleri a) Alçak geçiren, b) Yüksek geçiren, c) Bant durduran, d) Bant geçiren.	5
Şekil 1.3. Elektromanyetik dalgaların farklı geliş açılarında etkisi.....	8
Şekil 1.4. Farklı polarizasyonda elektromanyetik dalganın frekans seçici yüzey üzerine gelmesi durumu	9
Şekil 2.1. Tasarlanan çok bantlı FSY birim hücresi	17
Şekil 2.2. Çok bantlı FSY a) Önden görünüş b) Perspektif görünüşü.....	19
Şekil 2.3. Tasarlanan çok bantlı FSY'nin S_{21} parametreleri	21
Şekil 2.4. Birim hücreye ait yüzey akımları	22
Şekil 2.5. Pin diyot sembolü ve pin diyot iç yapısı	23
Şekil 2.6. Smd pin diyot gösterimi	24
Şekil 2.7. Pin diyotun eşdeğer devre modeli	25
Şekil 2.8. BAP 51-02 pin diyotun kapasitans ve direnç karakteristiği	26
Şekil 2.9. YY-FSY yüzey görüntüleri ve parametreleri	27
Şekil 2.10. YY-FSY hücresine ait durum 1 için eşdeğer devre modeli	32
Şekil 2.11. YY-FSY durum 1 için simülasyon ve eşdeğer devre modeli (S_{21}) iletim katsayıları	32
Şekil 2.12. YY-FSY hücresine ait durum 2 için eşdeğer devre modeli	33
Şekil 2.13. YY-FSY durum 2 için simülasyon ve eşdeğer devre modeli (S_{21}) iletim katsayıları	33
Şekil 2.14. YY-FSY hücresine ait durum 3 için eşdeğer devre modeli	34
Şekil 2.15. YY-FSY durum 3 için simülasyon ve eşdeğer devre modeli (S_{21}) iletim katsayıları	34
Şekil 2.16. YY-FSY durum 1 için TE ve TM modunda (S_{21}) iletim katsayıları	35
Şekil 2.17. YY-FSY durum 2 için TE ve TM modunda (S_{21}) iletim katsayıları	36
Şekil 2.18. YY-FSY durum 3 için TE ve TM modunda (S_{21}) iletim katsayıları	36
Şekil 2.19. YY-FSY durum 1 için açısal kararlılık (S_{21}) analiz sonuçları.....	37
Şekil 2.20. YY-FSY durum 2 için açısal kararlılık (S_{21}) analiz sonuçları.....	37
Şekil 2.21. YY-FSY durum 3 için açısal kararlılık (S_{21}) analiz sonuçları.....	38
Şekil 3.1. KYY-FSY yüzey görüntüleri ve parametreleri	40

Şekil 3.2. KYY-FSY hücresine ait durum 1 için eşdeğer devre modeli.....	42
Şekil 3.3. KYY-FSY hücresine ait durum 1 için simülasyon ve eşdeğer devre modeli (S_{21}) iletim katsayıları.....	42
Şekil 3.4. KYY-FSY hücresine ait durum 2 için eşdeğer devre modeli.....	43
Şekil 3.5. KYY-FSY hücresine ait durum 2 için simülasyon ve eşdeğer devre modeli (S_{21}) iletim katsayıları.....	43
Şekil 3.6. KYY-FSY hücresine ait durum 3 için eşdeğer devre modeli.....	44
Şekil 3.7. KYY-FSY hücresine ait durum 3 için simülasyon ve eşdeğer devre modeli (S_{21}) iletim katsayıları.....	44
Şekil 3.8. KYY-FSY durum 1 için TE ve TM modunda (S_{21}) iletim katsayıları	45
Şekil 3.9. KYY-FSY durum 2 için TE ve TM modunda (S_{21}) iletim katsayıları	46
Şekil 3.10. KYY-FSY durum 3 için TE ve TM modunda (S_{21}) iletim katsayıları	47
Şekil 3.11. KYY-FSY durum 1 için açısal kararlılık (S_{21}) analiz sonuçları.....	47
Şekil 3.12. KYY-FSY durum 2 için açısal kararlılık (S_{21}) analiz sonuçları.....	49
Şekil 3.13. KYY-FSY durum 3 için açısal kararlılık (S_{21}) analiz sonuçları.....	50
Şekil 4.1. FSY Prototipi.....	54
Şekil 4.2. Ölçüm Düzenegi.....	55
Şekil 4.3. Durum 1 için TE ve TM mod ölçüm sonuçları	56
Şekil 4.4. Durum 2 için TE ve TM mod ölçüm sonuçları	57
Şekil 4.5. Durum 3 için TE ve TM mod ölçüm sonuçları	57
Şekil 4.6. Durum 1 için TE mod açısal kararlılık ölçüm sonuçları	58
Şekil 4.7. Durum 2 için TE mod açısal kararlılık ölçüm sonuçları	58
Şekil 4.8. Durum 3 için TE mod açısal kararlılık ölçüm sonuçları	59
Şekil 4.9. Durum 1 için TM mod açısal kararlılık ölçüm sonuçları	59
Şekil 4.10. Durum 2 için TM mod açısal kararlılık ölçüm sonuçları	60
Şekil 4.11. Durum 3 için TM mod açısal kararlılık ölçüm sonuçları	60

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim 2.1. YY-FSY'lere ait pcb örnekleri	16
Resim 2.2. YY-FSY diyot simülasyonu ve deneysel ölçüm görselleri	29
Resim 3.1. KYY-FSY'nin 3 boyutlu görseli ve farklı çalışma modları	40



SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

Açıklamalar

Ω	Ohm
S	Siemens
m	Metre
mm	Milimetre
ϵ	Dielektrik Sabiti
V	Volt
I	Amper
L	Endüktans
C	Kapasitans
R	Direnç
dB	Desibel
f	Frekans

Kısaltmalar

Açıklamalar

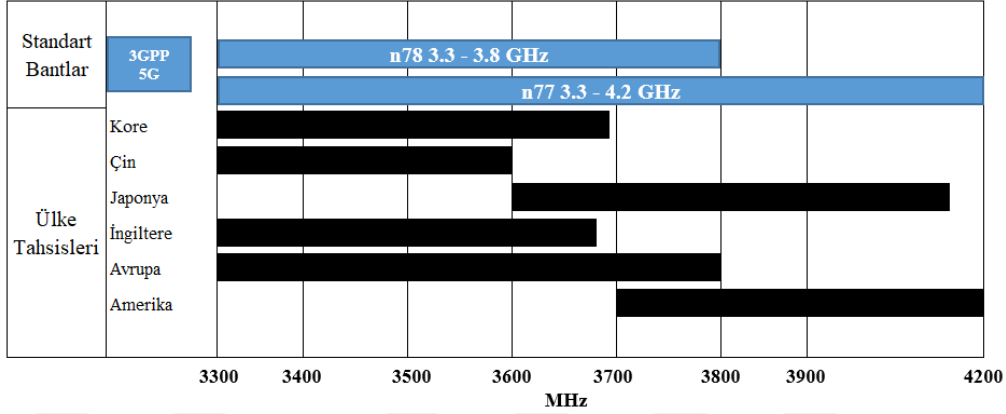
5G	Fifth Generation
ABD	Amerika Birleşik Devletleri
BPF	Band Pass Filter
CST	Computer Simulation Technology
ECM	Equivalent Circuit Model
EMC	Electromagnetic Compatibility
FCC	Federal Communications Commission

FDTD	Finite Difference Time Domain
FEM	Finite Element Method
FSY	Frekans Seçici Yüzey
GHz	Gigahertz
IRS	Intelligent Reflecting Surface
KYY-FSY	Küçültülmüş Yeniden Yapılandırılabilir Frekans Seçici Yüzey
Mbps	Mega Bits Per Second
MEMS	Micro Elektromechanical Systems
MHz	Megahertz
MoM	Method of Moments
nH	Nanohenry
PCB	Printed Circuit Board
pF	Picofarad
RF	Radio Frequency
RKA	Radar Kesit Alanı
SMD	Surface Mounted Device
SMP	Subminiature Package
SMT	Surface Mount Technology
TE	Transverse Electric
TM	TRansverse Magnetic
YY-FSY	Yeniden Yapılandırılabilir Frekans Seçici Yüzey
Wi-Fi	Wireless Fidelity

1. GİRİŞ

Kablosuz iletişim, insanlık tarihinin toplumsal yapısını şekillendiren en temel unsurlardan biri olup, 19. Yüzyılda elektromanyetik dalgaların haberleşme sistemlerinde kullanılabilir olduğunun keşfiyle giderek daha kritik bir öneme sahip olmaktadır [1]. Bu teknolojik dönüşüm, telgraf ile başlayarak, telefon, radyo ve televizyon gibi yeniliklerle küresel iletişimin temelini oluşturmuş ve 20. Yüzyılda dijital devrimle yeni bir boyuta taşınmıştır [2]. Özellikle lisanssız frekans bantlarının kullanıma açılması, kablosuz iletişim teknolojilerini günlük yaşamın vazgeçilmez bir parçası haline getirmektedir. Bu bağlamda, 2.4 GHz ve 5 GHz frekans bantları, modern Wi-Fi teknolojilerinin temel yapı taşları olarak öne çıkmaktadır. 2.4 GHz bandı, 2.400 GHz ile 2.4835 GHz arasında bir frekans aralığında çalışmakta ve teorik olarak 600 Mbps'ye kadar veri aktarım hızları sunmaktadır [3]. Daha uzun dalga boylarına sahip olması nedeniyle, fiziksel engellerin (örneğin duvarlar ve mesafeler) olduğu ortamlarda daha iyi kapsama performansı sergilemektedir. Bununla birlikte, kablosuz telefonlar, bebek telsizleri ve diğer birçok cihazın aynı frekans bandını kullanması, bu spektrumda yoğunluk ve parazit problemlerine yol açabilmektedir. Öte yandan, 5 GHz bandı, 5.150 GHz ile 5.825 GHz frekans aralığında faaliyet göstermekte ve teorik olarak 1300 Mbps'ye kadar yüksek veri aktarım hızları sağlamaktadır [4]. Bu bant, daha az kullanım yoğunluğuna sahip olduğundan, daha az parazit ve kesinti ile yüksek hızlı veri iletimi için avantaj sunmaktadır. Ancak, kısa dalga boyu nedeniyle sinyalin uzun mesafelerde veya fiziksel engellerin fazla olduğu ortamlarda zayıflaması, bağlantı kalitesinde düşüşe neden olabilmektedir. Bu frekans bantlarının 1985 yılında ABD Federal İletişim Komisyonu (FCC) tarafından lisanssız kullanıma açılması, Wi-Fi, Bluetooth ve ZigBee gibi kablosuz teknolojilerin gelişimine ivme kazandırmıştır [5]. Bunun sonucunda, hem bireysel hem de endüstriyel uygulamalar için düşük maliyetli ve pratik çözümler sunulmakta, bu teknolojiler geniş bir kullanım yelpazesıyla çeşitli sektörlerde yaygınlaşmaktadır. 2.4 GHz'in geniş kapsama alanı ve 5 GHz'in yüksek hız avantajları, farklı ihtiyaçlara hitap ederek kablosuz iletişimde esneklik ve çeşitlilik sağlamıştır. Günümüzde bu bantlar, mobil cihazlardan ev ağlarına kadar birçok alanda kullanılan kablosuz sistemlerin omurgasını oluşturmakta ve iletişim teknolojilerinin geleceğine yön vermektedir.

Yeni 5G teknolojisi, 3 GHz'in üzerindeki daha yüksek frekanslara geçiş yapmaktadır. Bu bandın, 6 GHz altı frekanslar arasında önemli bir yer tutması beklenerek yakın gelecekte daha fazla baz istasyonu ve cep telefonu cihazının n78 bandını desteklemesiyle, bu bandı kapsayan bant geçiş filtrelerine (BPF) olan talep artması öngörülmektedir [6].



Şekil 1.1. N78 bant frekansları

Çizelge 1.1. N78 yakınındaki frekans bantları [6]

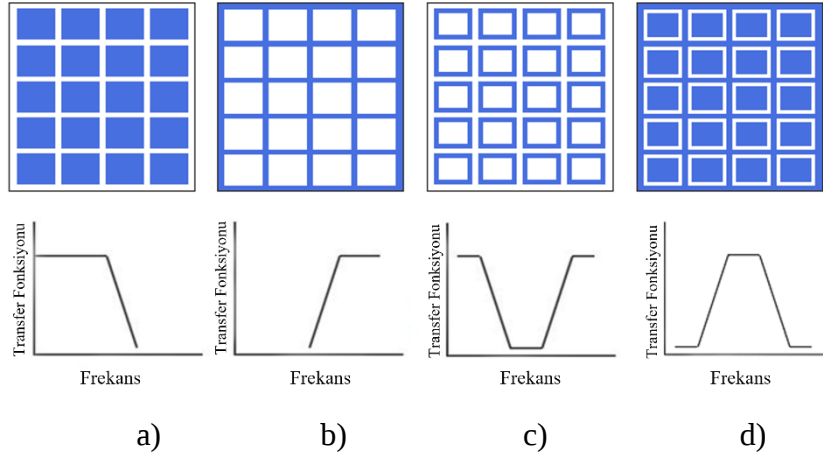
Frekans (GHz)	Frekans Bandı Adı
2 GHz Altı	N2-N5, N8, N20, N28, N50-52, N71-76
2,0 – 2,7 GHz	N1, N7, N38, N41, N66, N70, ISM
3,3 – 3,8 GHz	N78 (Geçiş Bandı)
3,3 – 4,2 GHz	N77
4,4 – 5,0 GHz	N79
4,9 GHz Üzeri	WLAN - 802.11a/h/j/n/ac/ax/p

Elektronik dünyasının temel taşlarından biri olan filtreler, sinyallerin işlenmesi, iletilmesi ve analiz edilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. İstenmeyen frekansları bastırarak veya belirli frekans bantlarını seçerek sinyal bütünlüğünü koruyarak elektronik sistemlerin performansını iyileştirmektedir [7]. Geleneksel filtreler, kapasitörler, indüktörler ve dirençler gibi pasif bileşenler kullanılarak tasarlanırken, teknolojinin ilerlemesiyle birlikte aktif bileşenler kullanan ve dijital sinyal işleme tekniklerine dayanan yeni filtre tipleri literatürde bulunmaktadır [8]. Bu yeni nesil filtreler, daha yüksek performans, daha küçük boyut ve daha fazla tasarım esnekliği gibi avantajlar sunmaktadır. Kuplör filtre (Coupled line), hairpin filtreler, Boşluk (cavity) filtreler, toplu eleman (lumped element) filtreler, tubular filtreler, seramik filtreler, dijital filtreler mikrodalga frekanslarında yaygın olarak kullanılan ve iletim hatlarının belirli geometrik düzenlemeleriyle oluşturulan filtre türleri arasında yer almaktadır. Coupled line filtreler, birbirine yakın yerleştirilmiş paralel iletim hatları arasındaki elektromanyetik kuplajı

kullanarak frekans seçiciliği sağlamaktadır [9-10]. Hairpin filtreler ise U şeklinde bükülmüş iletim hatlarından oluşmaktadır. Rezonans frekansları, hattın uzunluğu ve bükülme şekli tarafından belirlenmektedir [11]. Cavity filtre, radyo frekansı (RF) ve mikrodalga sistemlerinde sinyalleri belirli bir frekans aralığında iletmek veya engellemek için kullanılan yüksek kaliteli bir filtre türü olmaktadır. "Cavity" kelimesi, filtrede kullanılan içi boş, metalik bir boşluğu ifade etmektedir. Bu boşluk, filtreleme özelliklerini sağlamak için rezonatör olarak işlev görmektedir [12]. Lumped element filter, düşük frekanslı elektronik devrelerde sinyalleri belirli bir frekans aralığında iletmek veya engellemek için kullanılan bir tür pasif filtre türü olmaktadır. "Lumped element" terimi, devrede kullanılan bileşenlerin (indüktör, kapasitör ve direnç gibi) fiziksel olarak birbirinden ayrılmış (lumped) olduğunu ifade etmektedir [13]. Tubular filtre, radyo frekansı (RF) ve mikrodalga sistemlerinde kullanılan, içi boş bir tüp (genellikle silindirik veya prizmatik bir yapıya sahip) formunda tasarlanan bir filtre türü olmaktadır. Bu filtreler, elektromanyetik dalgaların belirli bir frekans aralığında iletilmesini veya engellenmesini sağlamaktadır [14]. Seramik filtre, seramik malzemeler kullanılarak üretilen, elektromanyetik sinyallerin belirli bir frekans aralığında iletilmesini veya bastırılmasını sağlayan bir filtre türü olmaktadır. Bu filtreler, özellikle radyo frekansı (RF) ve mikrodalga sistemlerinde kompakt, düşük maliyetli ve yüksek performanslı bir çözüm sunmaktadır [15]. Dijital filtreler, analog sinyalleri dijital formata dönüştürerek ve matematiksel algoritmalar kullanarak işleyen filtre türüdür. Dijital filtreler, son derece esnek ve programlanabilir olmaları nedeniyle, çok çeşitli filtreleme fonksiyonlarını gerçekleştirmek için kullanılmaktadır [16]. Bu yeni filtre teknolojileri, elektronik sistemlerin performansını ve yeteneklerini geliştirerek, daha hızlı, daha küçük ve daha verimli cihazların ortaya çıkmasını sağlamaktadır.

Frekans seçici yüzeylerin (FSY) tarihsel gelişimi 20. Yüzyıllarında başlarında radyo ve mikrodalga teknolojilerinin ortaya çıkmasıyla başlamaktadır [17]. İlk olarak 1930 lu yıllarda radyo dalgalarını kontrol etmek amacıyla geliştirilen metalik kafes şeklindeki yapılar özellikle savunma ve radar uygulamalarında kullanılmaya başlanarak ikinci dünya savaşının başlamasıyla giderek önem kazanır hale gelmektedir [18]. 1950'li yıllardan sonra bilgisayar ve bilgisayar destekli tasarım araçlarının gelişmesi daha karmaşık yapıda frekans seçici yüzeylerin ortaya çıkmasını sağlamaktadır [19]. Frekans seçici yüzeyler elektromanyetik dalgaların yansımaları, kırılmasını ve emilmesini kontrol edilmesinde genellikle metamateriyellere benzer şekilde doğal malzemelerin fiziksel özelliklerinin

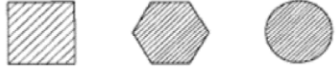
ötesinde hücrelerin boyutlarının şekillerinin ve düzenlerinin değiştirilerek özel olarak tasarlanılan yapılarıyla iletişim, radar ve savunma sanayi, elektromanyetik uyumluluk (EMC), radar kesit alanı (RKA), radomlarda, yansıtıcı antenlerde, mikroşerit yama antenlerde, mikrodalga fırınlarda fırın içerisindeki 2.4 GHz frekansındaki elektromanyetik dalgaların dışarı çıkmasının engellenmesi gibi bir çok alanda radyo ve mikrodalga sinyallerinin etkili bir şekilde yönlendirilmesinde kullanılmaktadır [20]. Ayrıca frekans seçici yüzeyler geleneksel kullanımlarının dışında iletişim sistemlerinin giderek gelişmesiyle özellikle bina içi duvarlarda istenmeyen sinyallerin engellenmesinde, istenilen sinyallerin geçişinde [21], parabolik reflektör antenlerin yansıtıcı yüzeyleri frekans seçici yüzeylerle desteklenerek anten ağırlığının azaltılması ve anten ışıma hüzmesinin daraltılarak anten kazancının artırılmasında önemli bir yardımcı olarak kullanılmaktadır [22]. Frekans seçici yüzeylerin bir diğer uygulama alanı ise frekans seçici pencere uygulamalarıdır. Bu pencereler istenmeyen kızılötesi ışınların radyasyon enerjisini engellerken görünür ışık ve radyo dalgalarının geçişine izin vererek enerji verimliliğini ve radyasyonu kontrol eden bir mekanizma gibi davranmaktadır [23]. Bir diğer frekans seçici yüzeylerin kullanım alanı ise Akıllı Yansıtıcı Yüzeyler (IRS'ler) olmaktadır. Özellikle elektromanyetik dalgaları gerçek zamanlı olarak kontrol etme kabiliyetleri nedeniyle modern kablosuz iletişim sistemlerinde frekans seçici yüzeylerin avantajlarından sıklıkla yararlanılmaktadır. Bu yüzeyler, pasif veya aktif olabilen ve sinyal kalitesini ve kapsamını iyileştirmek için stratejik olarak yerleştirilen düşük maliyetli yansıtıcı elemanlardan oluşmaktadır [24]. Frekans seçici yüzeyler birim eleman ya da birim hücre adı verilen yapıların bir araya gelerek periyodik bir yüzey oluşturduğu elektromanyetik filtreler olmaktadır. Frekans seçici yüzeylerin en küçük özdeş birim elemanı yama şeklinde tasarlanan yapılarda kapasitif etki bant durduran filtre gibi çalışmakta, oyuk şeklinde tasarlanan yapılarda endüktif etki ise bant geçiren filtre gibi çalışmaktadır. Bu etkiler elektrik devre teorisinin tanımları ile açıklanabilmektedir. Şekil 1.2'de gösterildiği gibi frekans seçici yüzeylerin yamalar ve oyukların durumuna göre bant geçiren, bant durduran, alçak geçiren ve yüksek geçiren olarak sınıflandırılabilir [25]. Babinet prensibine göre açıklık tipi frekans seçici yüzeylerde yüksek geçiren filtre işlevi görürken, ona tamamlayıcı olan yama tipi frekans seçici yüzeylerde alçak geçiren filtre işlevi görmektedir. Bu yapılar elektromanyetik dalgalarla olan etkileşimleri frekanslara göre seçici bir şekilde iletim yansıma sağlayarak iletim ve yansıma sağlayarak farklı filtre özellikleri sergilemektedir [26].



Şekil 1.2. Tasarıma göre temel frekans seçici yüzey karakteristikleri a) Alçak geçiren, b) Yüksek geçiren, c) Bant durdurucu, d) Bant geçiren.[25]

Frekans seçici yüzeylerin birim hücreleri dört ana grupta toplanabilmektedir. Çizelge 1.2’de gösterildiği gibi bu gruplar merkez bağlı veya N kutuplu yapılar, döngü tipi yapılar, plaka tipi yapılar ve bunları birleştiren hibrit yapılardan meydana gelmektedir [27]. İlk grup, N-kutuplu ya da merkeze bağlı yapılar olarak bilinmektedir. Bu yapılar, dipoller, üçlü kutuplar ve Kudüs Haçı gibi yapıları içeren geometrik yapılardan meydana gelmektedir. Bu geometriler, elektrik alanlarıyla doğrusal kutuplaşma oluşturarak ve rezonans frekansı genellikle dalga boyunun yarısına yakın bir değerde gerçekleştirmektedir. İkinci grup, döngü yapılarından oluşmaktadır. Bu grup, üç ya da dört bacaklı elemanlar, dairesel döngüler ve kare-altıgen döngüler gibi yapılardan meydana gelerek malzeme uzunluğunun dalga boyuna eşit olduğu durumlarda elde edilmektedir. Üçüncü grup ise içi dolu yapılar özellikle kareler, daireler ve altıgenler gibi geometriler, yarım dalga boyuna yakın rezonans frekanslarına sahip elemanlar olarak öne çıkmaktadır. Dördüncü grup ise hibrid yapılardır; bu yapılar, yukarıda belirtilen geometrik yapıların birleşiminden oluşarak genellikle tahmin edilen rezonans frekanslarından farklı sonuçlar verebilmektedir. Bu tez çalışması kapsamında ise dairesel konformasyonda birim hücre tasarımı tercih edilmektedir.

Çizelge 1.2. Tasarıma göre temel frekans seçici yüzey şekilleri [27]

GRUP	ŞEKİLLERİN TİPİ
Merkeze bağlı ya da N-kutuplu	
Döngü türleri	
Katı iç veya plaka tipi	
Kombinasyonlar	

Periyodik yüzey olarak adlandırılan yapılar bir boyutlu veya iki boyutlu sonsuz sayıda özdeş elemanın birleşiminden meydana gelerek oluşturulan yapılar olmaktadır. Frekans seçici yüzeylerde geometrik özelliklerinin yanı sıra iletkenlik, dielektrik tabakaların etkisi, dalgaların geliş açısı, ve polarizasyonu gibi faktörlerde frekans seçici yüzeylerin etkilerini belirleyen temel faktörler olmaktadır [28]. Frekans seçici yüzeylerin tasarımında kullanılan periyodik elemanlarının geometrileri ne olursa olsun iletkenlik özellikleri ise frekans seçici yüzeylerin davranışı doğrudan etkileyen önemli bir faktör olarak karşımıza çıkmaktadır [29]. Frekans seçici yüzeylerin tasarım aşamasında malzemenin elektrik iletkenliği iletken malzeme içinde akımın ne kadar kolay aktığını gösteren bir ölçüt olmaktadır. Frekans seçici yüzeye çarpan elektromanyetik dalga iletken elemanlar üzerinde akım indükleyerek elektromanyetik dalgaların tekrar yayılmasını ya da saçılmasını sağlamaktadır. Bu süreçte malzemenin iletkenliğinin azalması malzemenin kayıplı hale gelmesi gelen dalga enerjisinin büyük bir kısmının ısıya dönüşerek frekans seçici yüzey performansını düşürmektedir. Frekans seçici yüzey tasarımında kullanılan iletken elemanlar, genellikle periyodik olarak düzenlenmekte ve eşdeğer devre modelleriyle rahatlıkla tasvir edilebilmektedir. Bu eşdeğer devrelerde, enerji depolayan endüktif ya da kapasitif devre elemanları yer alırken, kayıplı iletken malzemeler kullanıldığında, sadece endüktif ve kapasitif elemanlar değil, aynı zamanda bir direnç elemanı da eklenerek devrenin daha doğru bir şekilde modellenmesi sağlanmaktadır. Bu direnç, malzemenin iletkenliğinin azalmasıyla artarak frekans seçici yüzeyin genel davranışını etkilemektedir. Örneğin, düşük iletkenliğe sahip dairesel döngülerle oluşturulmuş bir frekans seçici yüzeyin frekans davranışı ve eşdeğer devre modeli, seri

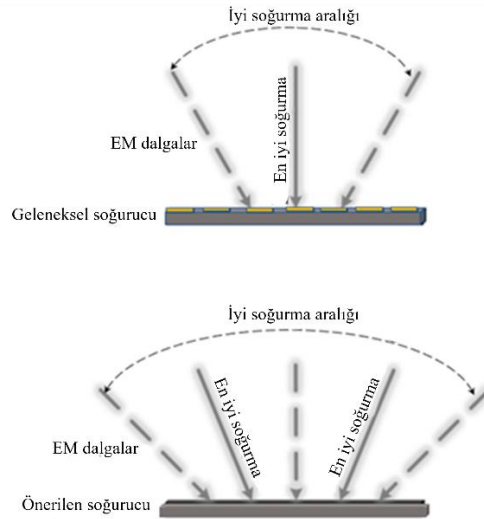
bağlı direnç elemanı ile temsil edilmektedir. Bu yapıda, rezonans frekansında frekans seçici yüzeye gelen elektromanyetik dalganın genliğinde meydana gelen zayıflama, elemanların artan direnci (azalan iletkenliği) nedeniyle azalmaktadır. Alüminyum, düşük maliyetli ve yüksek performanslı bir seçenek olarak sıklıkla tercih edilmektedir. Alüminyumun iletkenlik değeri 3.56×10^7 S/m olarak belirlenmiştir, bu da onu endüstriyel uygulamalarda oldukça yaygın kılmaktadır. Bunun yanı sıra, bakır (5.96×10^7 S/m) ve altın (4.561×10^7 S/m) gibi diğer iletken malzemeler, farklı performans gereksinimlerine göre seçilebilmektedir, farklı iletkenlik değerlerine sahip diğer malzemeler Çizelge 1.3'te gösterilmektedir. Her bir malzeme, frekans seçici yüzeyin performansını etkileyen özgül elektriksel özelliklere sahip olmaktadır. Özellikle yüksek iletkenliğe sahip malzemeler, daha verimli enerji iletimi ve daha iyi filtreleme performansı sağlamaktadır. Ancak, iletken malzemelerdeki kayıplar arttıkça, FSY'nin filtreleme etkinliği azalmaktadır. Sonuç olarak, frekans seçici yüzeylerin tasarımında kullanılan iletken malzemelerin türü ve iletkenlik değerleri, tasarımın genel performansını doğrudan etkileyen faktör olmaktadır [30].

Çizelge 1.3. Farklı malzemelerin direnç ve iletkenlik değerleri

Malzeme	Elektriksel Direnç ($\Omega \times m$)	Elektriksel İletkenlik (S / m)
Bakır	1.68×10^{-8}	5.96×10^7
Demir	1.0×10^{-7}	1.00×10^7
Alüminyum	2.82×10^{-8}	3.56×10^7
Gümüş	1.59×10^{-8}	6.3×10^7
Altın	2.44×10^{-8}	4.10×10^7
Nikel	6.99×10^{-8}	1.43×10^7

Frekans seçici yüzeyler iletken levhaların üzerine yerleştirilen dielektrik tabakalardan meydana gelmektedir. Bu dielektrik tabakalar frekans seçici yüzeylerde dielektrik tabakanın kalınlığı, dielektrik katsayısı frekans seçici yüzeylerin karakteristiklerini ve merkez frekans değerinin önemli ölçüde etkilemektedir. Bu neden frekans seçici yüzeylerin tasarım sürecinde dielektrik malzemelerin etkilerinin dikkate alınarak tasarım sürecinin yürütülmesi gerekmektedir [31]. Literatürde farklı dielektrik malzemeler üzerinde tasarımı yapılan frekans seçici yüzeyler bulunmaktadır. 2024 yılında fraktal şeklinde yapılan bir FSS çalışmasında 1.6 mm kalınlığa sahip dielektrik katsayısı 4.3 olan FR-4 Malzeme üzerine birim hücre yerleştirilmektedir [32]. 2024 yılında yapılan bir diğer çalışmada ise dielektrik katsayısı 2.2 olan Rogers RT/DUROID 5880 malzeme

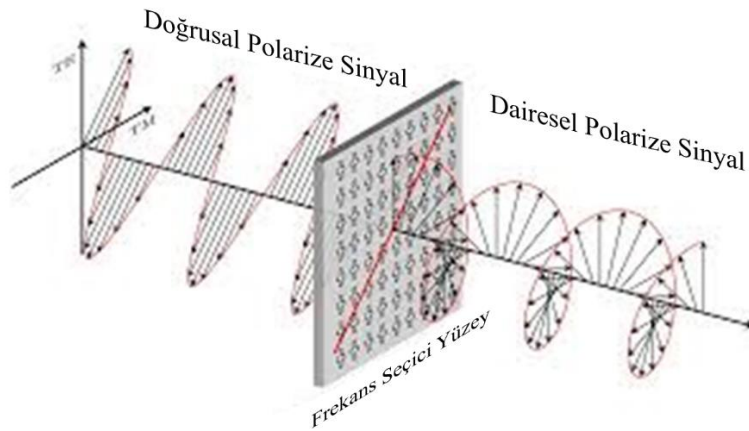
kullanılarak frekans seçici yüzey tasarımı tamamlanmaktadır [33]. Literatürde görüldüğü gibi farklı dielektrik katsayılarına sahip frekans seçici yüzey yapıları bulunmaktadır. Frekans seçici yüzeylerin frekans cevabını etkileyen bir diğer önemli faktör ise elektromanyetik dalgaların geliş açısı olmaktadır. Frekans seçici yüzeyin tasarımında kullanılan birim hücre konfigürasyonuna göre gelen dalgaların polarizasyon açısı frekans cevabının etkilemektedir [34]. Gelen dalganın elektrik alan vektörü metalik yapı ile aynı doğrultuda ise dalga metal yapı ile çarptığında burada bulunan elektronun hareketlenmesine sebep olarak elektromanyetik dalganın enerjisinin bu metalik yapı üzerinde kaybolmasına sebep olmaktadır. Tam tersi durumunda ise elektrik alan vektörü metal yüzeye farklı bir açıyla çarptığında mesafe değişimi (elektromanyetik dalgaların izlediği yolun uzunluğu) sebebiyle frekans seçici yüzeyin davranışı değişmektedir. Bu durum Şekil 1.3'te gösterilmektedir. Dalganın geliş açısının önemli olmasındaki faktör frekans seçici yüzeyin geometrik özelliği ile açıklanabilmektedir. Eğer birim hücrenin yapısı simetrik bir geometriye. Sahipse dalganın geliş açısı değişse bile simetrik frekans seçici yüzey geometrisi bu geliş açısının farklılığından etkilenmemektedir. Ancak açısal kararlılığa sahip frekans seçici yüzey yapıları ise dalganın geliş açısından çok az miktarda etkilenecek açısal kararlılık özelliğini koruyarak devam etmektedir. Bu özellikte frekans seçici yüzeyin daha geniş bir açıda çalışmasına imkân sağlamaktadır [35].



Şekil 1.3. Elektromanyetik dalgaların farklı geliş açılarında etkisi [35]

Frekans seçici yüzeylerde gelen elektromanyetik dalganın etkilerini anlamak için yalnızca geliş açısı değil ayrıca da dalganın polarizasyonu da önemli bir rol oynamaktadır. Elektromanyetik dalganın frekans tepkisi hem geliş açısına hem de polarizasyona bağlı

olarak değişmektedir. Şekil 1.4'te frekans seçici yüzeyin farklı polarizasyonlarda geliş açısını göstermektedir. Şekil 1.4'te gelen dalganın elektrik alan vektörü, düzlem Poynting vektörüne dik olduğunda, kaynağın E-vektörü aynı düzlemde yer almaktadır. Elektron üzerinde uygulanan kuvvetle, elektron salınım yapmaya başlamaktadır. Bu salınımın sürdürülebilmesi için gelen dalganın bir kısmı kinetik enerjiye dönüşmekte ve enerjinin korunmasını sağlamak adına, gelen gücün sadece bir kısmı iletilerek; geri kalan enerji ise elektron tarafından emilerek salınımına devam etmektedir. Bir diğer senaryo ise, metal yüzeyine çarpan düzlemsel dalganın E-vektörünün dipol elemanının boyuna dik olduğu durumu ele almaktadır. Bu durumda, elektronun hareketi çok az bir kısmı kinetik enerjiye dönüştürmektedir. Elektronun hareket sahası kısıtlı olduğu için, gelen dalga iletiminde çok az kayıpla karşılaşmakta ve bütün dalga karşı tarafa iletilmektedir. Bu senaryolar, elektromanyetik dalganın polarizasyonunun, yüzeyin frekans özelliklerini önemli ölçüde etkilediğini göstermektedir. Bununla birlikte, gelen dalganın transverse electric (TE) ve transverse magnetic (TM) polarizasyonları, yüzeyin filtreleme karakteristiğini belirleyen önemli faktörlerden olmaktadır [36]. Şekil 1.4'te görüldüğü gibi, dipol elemanının boyu ile elektrik alan vektörünün aynı düzlemde olduğu durumlarda, dalga tarafından yapılan salınımlar aynı yönde gerçekleşmekte ve bunun sonucunda elektromanyetik dalganın enerjisinin büyük kısmı kinetik enerjiye dönüşerek iletim seviyesi düşük olmaktadır. Diğer taraftan, elektrik alan vektörü ile dipol elemanının boyunun dik olduğu durumlarda ise, salınımlar daha az enerji harcamakta ve iletim seviyesi daha yüksek olmaktadır. Bu etkileşimler, yüzeyin iletim özelliklerinin sadece dalganın geliş açısına değil, aynı zamanda dalganın polarizasyonuna da bağlı olduğunu göstermektedir.



Şekil 1.4. Farklı polarizasyonda elektromanyetik dalganın frekans seçici yüzey üzerine gelmesi durumu

Frekans seçici yüzeylere ait periyodik yapılarda elektromanyetik dalgaların saçılmalarını analiz etmek amacıyla çeşitli teknikler bulunmaktadır. Yaygın olarak kullanılan teknikler arasında Momentler Metodu (MoM) [37], Sonlu elemanlar metodu (FEM) [38], Zamanda Sonlu Farklar Metodu (FDTD) [39] ve eşdeğer devre modeli (ECM) [40] bulunmaktadır. Momentler metodu (Method of Moments-MoM) frekans seçici yüzey tasarımlarının saçılma analizinde en çok tercih edilen metod olmaktadır. Bu yöntemde, elektromanyetik dalga frekans seçici yüzeye geldiğinde, periyodik iletken yapılar üzerinde bir akım indüklenmektedir. İletken yapının elektrik alanının teğetsel bileşeni, bu indüklenen akımın bir fonksiyonu olarak ortaya çıkmakta ve periyodik yapı, Floquet harmoniklerine ayrılabilir. Böylece, periyodik yapılar üzerindeki akımlar integral ifadelerle temsil edilerek bu ifadeleri çözülmesi daha kolay sayısal denklemlere indirgemektedir. Ancak, bu yöntem büyük ve karmaşık yapılar için yalnızca bilgisayar destekli çözümlerle uygulanabilir olmaktadır. MoM, homojen dielektrik tabakalarla desteklenen periyodik yapılar için uygun olmakla beraber, karmaşık geometriler ve homojen olmayan yapılar için FDTD veya FEM gibi diğer yöntemler daha etkili sonuçlar sunmaktadır [41]. Sonlu Elemanlar Metodu (FEM), elektromanyetik dalga saçılmalarının periyodik yapılarda analiz edilmesinde güçlü bir yaklaşım olmaktadır. İlk matematiksel temelleri 1943'te Courant tarafından atılan bu yöntem, MoM tekniği uygulama ve programlama açısından daha basit olsa da, FEM, karmaşık geometriler ve homojen olmayan yüzeylerin analizinde çok daha etkili sonuçlar sunmaktadır [42]. Bir diğer metod olan FDTD Zamanda Sonlu Farklar Metodu (FDTD), elektromanyetik dalga saçılmalarını zaman domeninde analiz eden bir tekniktir ve Momentler Metodu ile Sonlu Elemanlar Metodu'ndan farklı olarak frekans domeni yerine zaman domeninde hesaplamalar yapmaktadır. Bu yöntem, Maxwell'in zamanla değişen rotasyonel denklemlerinin doğrudan çözümü olmaktadır. FDTD, homojen olmayan dielektrik tabakalarla desteklenen üç boyutlu frekans seçici yüzey yapıları için oldukça etkili çözümler sunmaktadır. Özellikle dinamik ve zaman bağımlı sistemlerin modellenmesinde tercih edilen bir yaklaşım olmaktadır [43]. Bilgisayar destekli hesaplamalar gerektirmeyen yöntemlere göre daha basit bir çözüm sunan Eşdeğer Devre Modeli (ECM), frekans seçici yüzeylerdeki saçılmaları analitik olarak hesaplamak için oldukça kullanışlı bir teknik olmaktadır. Bu yöntemde, frekans seçici yüzeylerin iletim özellikleri, iletim hattında yer alan eşdeğer endüktif ve kapasitif elemanlarla modellenmektedir. Eşdeğer Devre Modeli modeli, analitik bir yaklaşım olduğu için doğrusal polarizasyonlar ve basit periyodik eleman geometrileriyle sınırlı olmaktadır. Ancak, dielektrik tabaka özelliklerinin ve

elektromanyetik dalgaların farklı geliş açılarını hesaplamak için etkili bir yöntemdir ve özellikle basit geometrilere oldukça başarılı sonuçlar sağlamaktadır [44]. Bu yöntemler, periyodik yapıların elektromanyetik analizleri için farklı avantajlar sunmakta olup, her biri belirli tipteki problemlerde daha etkin çözümler üretmektedir.

Frekans seçici yüzeylerin özel bir alt olanı Yeniden yapılandırılabilir frekans seçici yüzeyler (YY-FSY), elektromanyetik dalgaların iletimi ve yansımalarını kontrol etmek için kullanılan, son yıllarda önemli bir araştırma alanı haline gelmektedir. Bu yüzeyler, belirli frekanslarda elektromanyetik dalgaların geçişini engellerken, diğer frekanslarda dalgaların iletilmesine veya yansıtılmasına izin veren özel yapılarla tasarlanmaktadır. Yeniden yapılandırılabilir frekans seçici yüzeyler özellikle kablosuz iletişim, radar, uydu iletişimi ve diğer elektromanyetik uygulamalarda büyük bir potansiyele sahip olmaktadır. Bu yapılar, genellikle metalik elemanlardan veya iletken malzemelerden yapılmış hücrelerden oluşmaktadır ve her bir hücre, belirli elektromanyetik özelliklere sahip olacak şekilde tasarlanabilmektedir. Yeniden yapılandırılabilir frekans seçici yüzeylerin en önemli özelliklerinden biri, dinamik olarak ihtiyaca göre frekans seçici yüzeyin bant durdurma ya da geçirme özelliğinin değiştirilebilir yeniden yapılandırılabilir olmalarıdır. Geleneksel frekans seçici yüzeyler sabit tasarımlara dayanırken, yeniden yapılandırılabilir yapılar, dışsal uyarılarla (örneğin, elektriksel, manyetik veya mekanik) değiştirilebilir olmaktadır. Bu özellik, yeniden yapılandırılabilir frekans seçici yüzeyler dinamik ve esnek bir çalışma yeteneği kazandırarak ve onları çeşitli uygulamalarda kullanıma uygun hale getirmektedir. Bu sayede, farklı çevresel koşullar veya sistem gereksinimleri altında performanslarını optimize etmek mümkün olmaktadır. Yeniden yapılandırılabilir frekans seçici yüzeyler, genellikle mikroelektronik cihazlarla entegre edilebilen teknolojiler olarak öne çıkmaktadır. Örneğin, Yeniden yapılandırılabilir frekans seçici yüzeylerin çok bantlı anten sistemlerinde, radar sistemlerinde hedef algılama ve izleme, iletişim sistemlerinde ise kanal yönetimi gibi uygulamalarda kullanılabilmektedir. Ayrıca, bu yüzeyler, elektromanyetik spektrumun etkin bir şekilde yönetilmesine yardımcı olarak, spektrum verimliliğini artırma potansiyeline sahip olmaktadır [45]. Yeniden yapılandırılabilir frekans seçici yüzeylerin çalışma prensibi, elektromanyetik dalgaların yüzeyle etkileşimine dayanmaktadır. Bu etkileşim, yüzeyin geometrik düzeni, yapı malzemeleri ve dışsal uyarılarla değiştirilerek kontrol edilebilmektedir. Bu tür özellikler, Yeniden yapılandırılabilir frekans seçici yüzeylerin hem statik hem de dinamik sistemler olarak kullanıma uygun hale getirmektedir [46]. Son

yıllarda, Yeniden yapılandırılabilir frekans seçici yüzeylerin çeşitli uygulamalarda kullanımını mümkün kılacak pek çok yenilikçi yöntem geliştirilmektedir. Bunlar arasında, aktif malzemelerin kullanımı, mikroeletromekanik sistemler (MEMS), PIN diyotlar, elektroaktif polimerler ve sıvı kristaller gibi malzeme teknolojileri yer almaktadır. Ayrıca, bu yüzeylerin tasarımında kullanılan optimizasyon teknikleri ve hesaplamalı modelleme yöntemleri, daha verimli ve işlevsel yeniden yapılandırılabilir frekans seçici yüzeylerin geliştirilmesine olanak tanımaktadır [47-48]. Yeniden yapılandırılabilir frekans seçici yüzeyler (FSY) alanında yapılan literatür taramaları, bu teknolojinin özellikle modern haberleşme sistemlerinde, anten performanslarının artırılması ve elektromanyetik uyumluluk gibi alanlarda önemli bir potansiyele sahip olduğunu göstermektedir. Bu bağlamda, 2022 yılında yapılan bir çalışmada 10.2 GHz rezonans frekansına sahip, 4 GHz bant genişliği sunan bir frekans seçici yüzey yapısı tanıtılmaktadır. Bu yapı, 5×5 mm boyutlarında olup FR-4 tabakası üzerinde hem TE hem de TM modlarında 45°'ye kadar açısal kararlılık sergilemekte olup, bu özelliği ile geniş bir uygulama yelpazesinde kullanılabilir bir performans sergilediği belirtilmektedir [49]. Bir diğer çalışma, esnek ve düşük profilli FSY tasarımlarının teknolojik cihazlara entegrasyon potansiyelini ele alarak, X bandında çalışan bir frekans seçici yüzey tasarımı sunulmuş ve bu yapı, dielektrik sabiti 2.7 ve kalınlığı 0.125 mm olan bir dielektrik tabaka üzerine yerleştirilmektedir. Yapının birim hücre formu, temel dairesel rezonatör desenine dört adet saplama eklenerek, 7.5×7.5 mm boyutlarında olan bu yapı, hem TE hem de TM modlarında 45°'ye kadar açısal kararlılık sunarken, 10 GHz'de ise 37 dB seviyesinde sinyal zayıflaması sağlamaktadır. Bu sonuçlar, esnek FSY tasarımlarının modern kablolu iletişim cihazlarına entegrasyonu açısından önemli bir katkı sunduğunu göstermektedir [50]. Frekans seçici yüzeylerin mikroşerit anten tasarımlarında performans artırıcı bir bileşen olarak kullanılabileceği de yapılan bir diğer çalışmada gösterilmektedir. Bu çalışmada, X bandında çalışan bir FSY tasarımı ile mikroşerit antenin kazancı ve verimliliği iyileştirilmiştir. Dielektrik sabiti 2.2 olan ve yüksekliği 1.575 mm olan bir tabaka üzerine altıgen şeklinde yerleştirilen FSY deseni, anten üzerine yerleştirilmektedir. Bu tasarım, anten kazancında 3.5 dB, verimlilikte %2.7, geri dönüş kaybında ise 4 dB'lik bir iyileşme sağlamaktadır. Bu sonuçlar, FSY yapılarının anten performanslarını optimize etmek için etkili bir araç olduğunu göstermektedir [51]. Literatür incelemesi, mevcut çalışmaların genellikle belirli bir frekans bandına, örneğin C bandı veya X bandına, odaklandığını ortaya koymaktadır. Bunun yanı sıra, iki rezonans frekansına [52], üç rezonans frekansına [53] veya beş rezonans frekansına [54] sahip

tasarımlar bulunsa da, bu rezonans frekanslarının çoğunlukla tek bir bant içerisinde yer aldığı görülmektedir. Frekans bandı sayısının artışı, birim hücre boyutunun da artmasına yol açmaktadır. Bu durum, düşük verimlilik ve yüksek üretim maliyeti gibi dezavantajlara sebep olmaktadır [55]. Daha geniş bir bant genişliğini aynı anda kapsayabilecek FSY yapıları ise genellikle çok katmanlı olarak tasarlanmaktadır. Ancak bu tasarımlar, FSY profilinin artmasına ve dolayısıyla üretim maliyetlerinin yükselmesine neden olmaktadır [56]. Ayrıca, geleneksel frekans seçici yüzeylerin sabit (durağan) rezonans frekanslarına sahip olduğu ve çalışma koşullarına göre dinamik bir şekilde frekanslarını yeniden yapılandıramadığı bilinmektedir. Bu tür yapıların, frekans yanıtını değiştirme veya farklı bantlar arasında geçiş sağlama gibi özellikler sunamaması, geleneksel FSY tasarımlarının sınırlayıcı yanları arasında yer almaktadır [57]. Bu sınırlamaların üstesinden gelmek için yeniden yapılandırılabilir frekans seçici yüzey tasarımları geliştirilmektedir. Yeniden yapılandırılabilir frekans seçici yüzeyler, dinamik çalışma koşullarına uyum sağlama kabiliyetine sahip olup, frekans tepkilerini kolaylıkla değiştirebilmekte ve farklı frekans bantları arasında geçiş yapabilmektedir. Bu tür bir yapı elde etmek için optik, mekanik, mikro-akışkan, özellikleri değişebilen malzemeler ve elektronik devre elemanları kullanılmaktadır [58]. Elektronik olarak yeniden yapılandırılabilir frekans seçici yüzey tasarımlarında mikro elektromekanik anahtarlar (RF MEMS), varaktör diyotlar ve PIN diyotlar gibi devre elemanları kullanılmaktadır. Bu elemanların avantajları ve dezavantajları Çizelge 1.4’te özetlenmektedir [59].

Çizelge 1.4. Yeniden yapılandırılabilir frekans seçici yüzey tasarımlarında mikroeletromekanik anahtarların karşılaştırılması

	AVANTAJ	DEZAVANTAJ
RF MEMS	- İyi izolasyon - Düşük güç kaybı	- Kullanım ömrü - Düşük güvenilirlik
Varaktör Diyot	- Sürekli ve kolay ayar - Düşük enerji tüketimi	Karmaşık devre gereksinimi
Pin Diyot	- Kullanım ömrü uzun - Düşük enerji tüketimi - Güvenilir	- Yüksek besleme gerilimi - DC geri besleme devresi

Bu tez çalışması kapsamında, Wi-Fi ve 5G uygulamaları için çok bantlı, polarizasyon kararlı ve polarizasyon seçimi yapılmasına olanak tanıyan, PIN diyotlar kullanılarak frekansı dinamik olarak yeniden yapılandırılabilir bir FSY tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarımda, dielektrik malzemenin ön ve arka yüzeylerinde açısall kararlılığı sağlamak amacıyla dairesel şekilli yamalar kullanılmıştır. Ayrıca, birim hücre bazında küçültme ve özgün bir tasarım elde etmek için farklı boyut ve geometriler üzerinde çalışmalar yapılmış ve birim hücre boyutu alan olarak %52,6 oranında azaltılmıştır. Polarizasyon seçimi, FSY'nin birim hücresine yatay ve dikey yönde yerleştirilen PIN diyotların iletim durumlarının kontrol edilmesi ile sağlanmaktadır. Tasarlanan FSY, 2.4 GHz, 3.5 GHz ve 5.8 GHz frekans bantlarında bant durdurucu özellik göstermekte olup, TE ve TM polarizasyon kararlılığı ile 60 dereceye kadar açısall kararlılığa sahiptir. Ayrıca, tasarımın performansı ölçüm sonuçları ve eşdeğer devre modeli ile karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Bu çalışma, literatürdeki mevcut FSY tasarımlarına kıyasla hem dinamik yeniden yapılandırılabilirlik hem de polarizasyon ve açısall kararlılık açısından özgün bir katkı sunmaktadır.

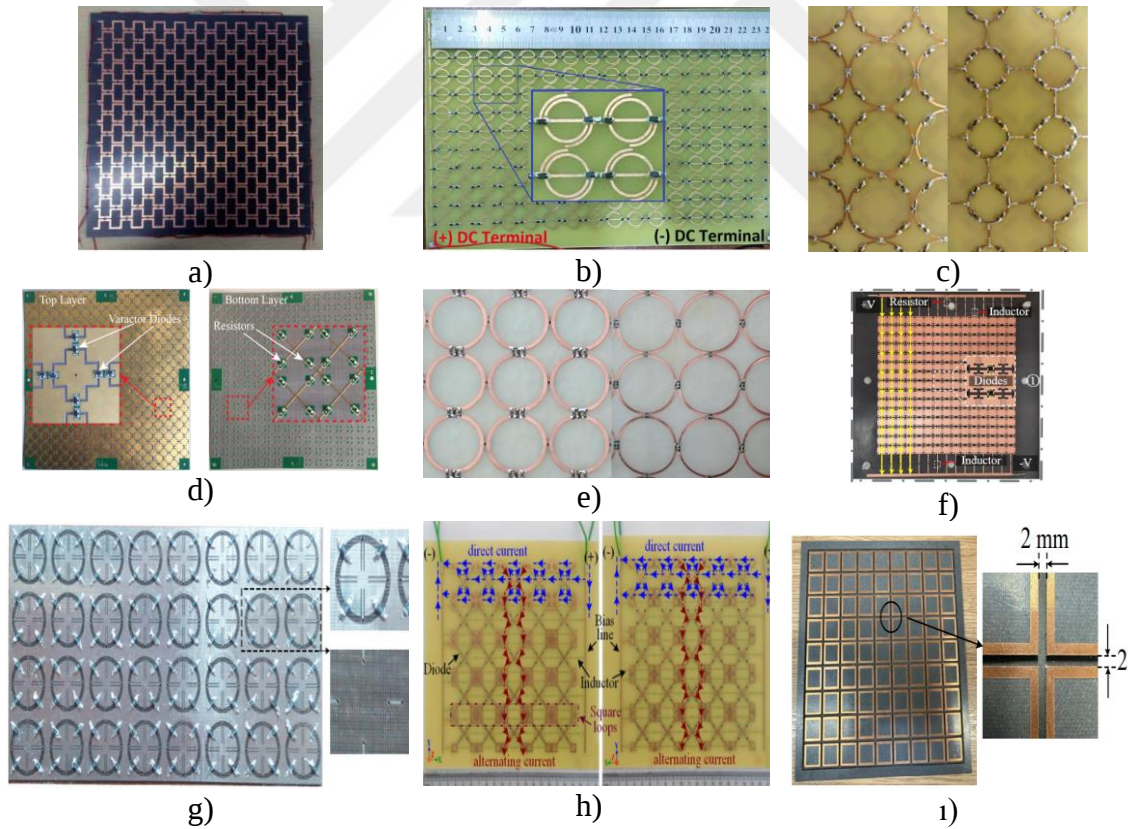
2. YENİDEN YAPILANDIRILABİLİR FREKANS SEÇİCİ YÜZEY TASARIMI

Geleneksel frekans seçici yüzeyler (FSY), belirli bir frekans aralığında sabit bir frekans cevabı sağlayan pasif yapılar olarak tanımlanmaktadır. Bu yapılar, tasarlandıktan sonra genellikle değiştirilemez ve sabit tasarım performanslarını korumaktadırlar. Ancak, geleneksel FSY'lerin sabit frekans cevapları, günümüzün hızla gelişen haberleşme teknolojileri, değişen iletim ortamları ve kullanıcı taleplerindeki dinamik değişimlerle uyumsuz kalmaktadır [60]. Özellikle 5G ve daha ileri seviye mobil iletişim sistemlerinin ihtiyaç duyduğu yüksek veri hızları, düşük gecikme süreleri ve geniş bant genişliği gereksinimleri, geleneksel FSY'lerin değişen ortam koşullarına ayak uyduramamasına neden olmaktadır. Bununla birlikte, çevresel koşullarda meydana gelen değişiklikler (örneğin, atmosferik etkiler, engellerin yer değiştirmesi vb.) ve kullanıcı yoğunluğunun zamanla değişmesi, sabit frekans cevabının yeterli olmamasına yol açmaktadır. Bu noktada, yeniden yapılandırılabilir frekans seçici yüzeyler (YY-FSY) devreye girmektedir [61]. YY-FSY'ler, tasarımlarında kullanılan aktif bileşenler veya akıllı malzemeler sayesinde, çalışma frekansını ve/veya frekans cevabını dinamik bir şekilde değiştirebilme yeteneğine sahip olmaktadır. Bu özellik, gelişen iletişim sistemlerinin gereksinimlerini karşılayabilmek için son derece önemlidir, çünkü kullanıcı talepleri, iletim ortamı ve ağ yapısındaki değişiklikler zaman içinde sürekli olarak evrilmektedir. YY-FSY'ler, özellikle çoklu kullanıcı ortamlarında, dinamik frekans ataması, spektrum verimliliği ve ağ kapasitesinin artırılması gibi kritik alanlarda önemli avantajlar sağlamaktadır. Bu nedenle, son yıllarda bu tür yüzeyler üzerine yapılan araştırmalar hız kazanarak ve birçok yeni yaklaşım geliştirilmektedir [62].

YY-FSY'ler, yalnızca tek bir frekans bandını durdurma ya da iletme karakteristiği gösterebildiği gibi, daha karmaşık tasarımlar sayesinde birden fazla frekans bandını aynı anda durdurma veya iletme yeteneğine de sahip olabilmektedir. Ayrıca, bu yüzeyler, çoklu frekans bantları arasında dinamik bir şekilde geçiş yapabilme özelliği sunarak, haberleşme sistemlerinin daha esnek ve verimli çalışmasını sağlamaktadır. Tek bir frekans bandı için yapılan tasarımlarda, YY-FSY'lerin frekans cevapları genellikle N-kutuplu yapılar (dipoller, tripoller, Jerusalem Cross gibi), döngüsel yapılar (daireesel döngüler, kare ve altıgen döngüler) ve yama yapıları (daireesel yama, kare ve altıgen

yamalar) gibi rezonans geometrilerinin tek bir katman üzerinde yerleştirilmesiyle elde edilmektedir. Bu yapılar, belirli bir frekans bandında rezonans göstererek, o bandın durdurulmasını veya iletilmesini sağlamaktadır. Ancak birden fazla frekans bandı için tasarım yapıldığında, bu geometrilerin daha karmaşık bir yapıya bürünmektedir. Çoklu frekans bandı tasarımlarında, FSY geometrileri farklı kombinasyonlarla iç içe yerleştirilebilir ya da farklı katmanlara serpiştirilebilmektedir. Bu tasarım esnekliği, her bir frekans bandı için ayrı rezonans noktaları sağlanmasını ve böylece farklı frekans bantlarının iletimi veya engellenmesi gerektiğinde, yüzeyin dinamik olarak uygun şekilde yapılandırılabilmesini mümkün olmaktadır. Bu tür yapıların kullanımı, kablosuz haberleşme sistemlerinin daha geniş spektrumda ve daha verimli çalışmasını sağlayan önemli bir avantaj sunmaktadır [63].

Resim 2.1’de YY-FSY’ler ile ilgili tek bant, çoklu bant, tek katman ve birden fazla katmana sahip tasarımlara ait görseller bulunmaktadır [64-72].

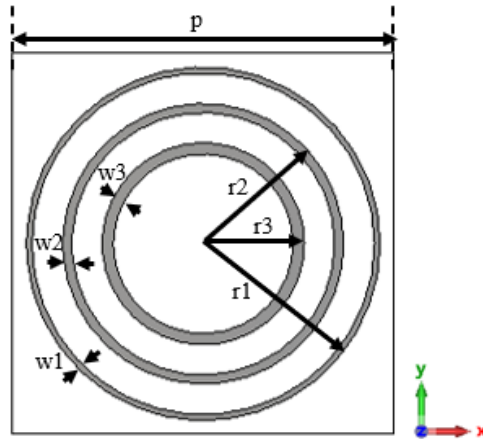


Resim 2.1. YY-FSY'lere ait pcb örnekleri

Bu tez çalışmasında Wi-Fi uygulamaları için 2,4 GHz ve 5,8 GHz frekans bantları ile 5G uygulamaları için 3,5 GHz frekans bandını durduran YY-FSY tasarımının

gerçekleştirilmesi amaçlanmaktadır. Bu hedef doğrultusunda, üç farklı frekans bandını aynı anda engelleyen bir FSY tasarımı üzerinde yoğunlaşılarak tasarım ve simülasyon adımları bu hedef doğrultusunda güncellenerek yerine getirilmektedir. Bu tür tasarımlar, çoklu bant durdurma işlemini sağlamak için karmaşık geometrik düzenlemelere ve rezonans yapılarına ihtiyaç duymaktadır. Bu bağlamda, polarizasyon kararlılığı yüksek olan dairesel döngü rezonatörleri tercih edilmektedir. Dairesel döngü rezonatörlerinde, birim hücredeki dairesel kısımlar metal ile kaplanırken, geri kalan kısımlar ise oyuk şeklinde bir geometri deseni oluşturacak şekilde tasarlanmaktadır. Bu yapı, belirli frekanslarda bant durdurma filtre özelliği göstererek, her bir istenilen frekans bandında etkili bir şekilde durdurma sağlamaktadır. Tasarımda, 2,4 GHz, 3,5 GHz ve 5,8 GHz frekans bantları için birim hücrede iç içe geçmiş üç dairesel döngü rezonatörü kullanılmaktadır. Bu çoklu frekans bandı durdurucu FSY tasarımı, her üç frekans bandında da etkili bir şekilde çalışacak şekilde optimize edilmiştir. Bu tasarım, Wi-Fi ve 5G gibi farklı uygulamalar için dinamik frekans yönetimi sağlayarak, sistemin performansını önemli ölçüde artırmayı hedeflemektedir.

2.1. Çok Bantlı FSY Birim Hücresi



Şekil 2.1. Tasarlanan çok bantlı FSY birim hücresi

Şekil 2.1’de, 2,4 GHz, 3,5 GHz ve 5,8 GHz frekans bantlarını durdurucu FSY tasarımının görseli sunulmaktadır. Bu tasarımda kullanılan FSY birim hücresinin boyutları 34 x 34 mm² olarak belirlenerek birim hücre, Rogers RT5880 dielektrik malzeme üzerine bakır tabakalar yerleştirilerek oluşturulmaktadır. Rogers RT5880 dielektrik malzeme, yüksek frekanslı uygulamalar için oldukça uygun olan bir malzeme olup, düşük kayıplı ve iyi bir dielektrik sabitine sahip olmasıyla bilinmektedir. Bu malzemenin özellikleri, Çizelge

2.1’de detaylı olarak verilmiştir. Bakır tabakanın kalınlığı ise 0,035 mm olarak belirlenmekte ve bu tabaka, birim hücredeki rezonans yapılarını destekleyen temel eleman olarak işlev görmektedir. Yapı, üç adet dairesel döngü rezonatöründen oluşmakta olup, bunlar en içte, ortada ve en dışta yer alacak şekilde yerleştirilmektedir. Her bir dairesel döngü, belirli bir frekans bandında rezonans yapacak şekilde optimize edilmektedir. Birim hücrede bulunan bakır tabakaya ait tasarım parametreleri, rezonans frekanslarının belirlenmesinde önemli rol oynamaktadır ve bu parametreler, Çizelge 2.2’de detaylı şekilde gösterilmektedir. Bu parametreler, her bir döngü rezonatörünün boyutları, yerleşimi ve kalınlıkları gibi önemli faktörleri içererek, FSY'nin yüksek performanslı bir şekilde çalışmasını sağlamaktadır.

Çizelge 2.1. Rogers RT5880 dielektrik malzemenin özellikleri

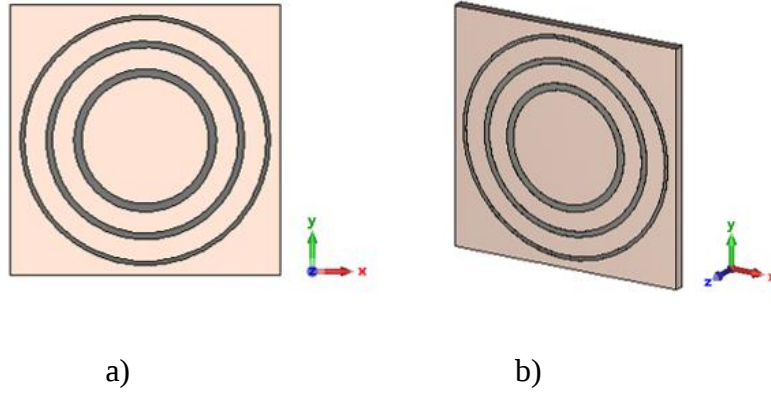
Malzeme	Rogers RT5880 (kayıplı)
Dielektrik Sabiti (ϵ)	2,2
Dielektrik Kalınlığı	1,57 mm

Çizelge 2.2. Çok Bantlı FSY bakır tabakaya ait tasarım parametreleri

Parametre	Değer (mm)
p	34
r1	15,75
r2	12,5
r3	9
w1	0,5
w2	0,8
w3	1

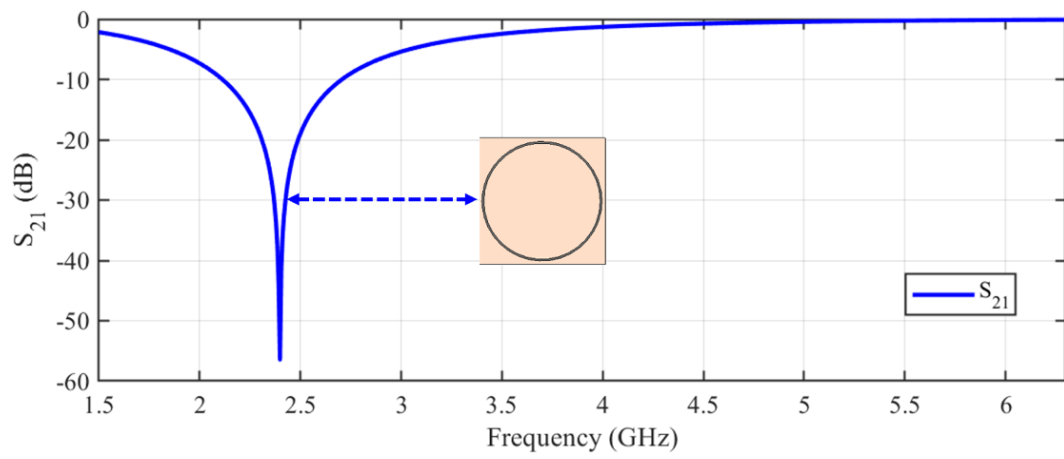
Şekil 2.2’de, tasarlanan çok bantlı FSY birim hücresinin önden ve perspektif görünüşü sunulmaktadır. Bu görünüşlerde, birim hücrenin her iki tarafı da detaylı bir şekilde gösterilmektedir. Birim hücrenin ön kısmı, frekans seçici yüzeyin aktif elemanları olan bakır tabakadan oluşmaktadır. Bu bakır tabaka, yüzeyin elektromanyetik özelliklerini belirleyen temel bileşen olup, rezonans frekanslarının etkili bir şekilde oluşturulmasını sağlar. Diğer tarafta ise, birim hücrenin arka kısmında Rogers RT5880 dielektrik malzeme yer almaktadır. Bu malzeme, elektriksel özellikleri sayesinde, yüzeyin performansını optimize etmek için kritik bir rol oynar ve yapı üzerindeki elektromanyetik dalgaların düzgün bir şekilde iletilmesini sağlar. Bu iki malzemenin bir arada

kullanılması, tasarlanan FSY'nin istenilen frekans bantlarında etkin bir şekilde çalışabilmesi için önemli bir yapı taşı olmaktadır.

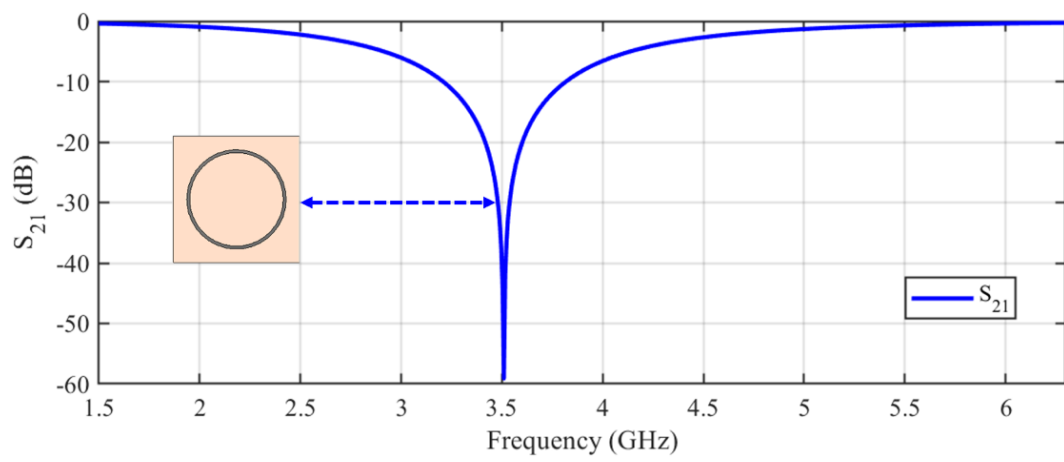


Şekil 2.2. Çok bantlı FSY a) Önden görünüş b) Perspektif görünüşü

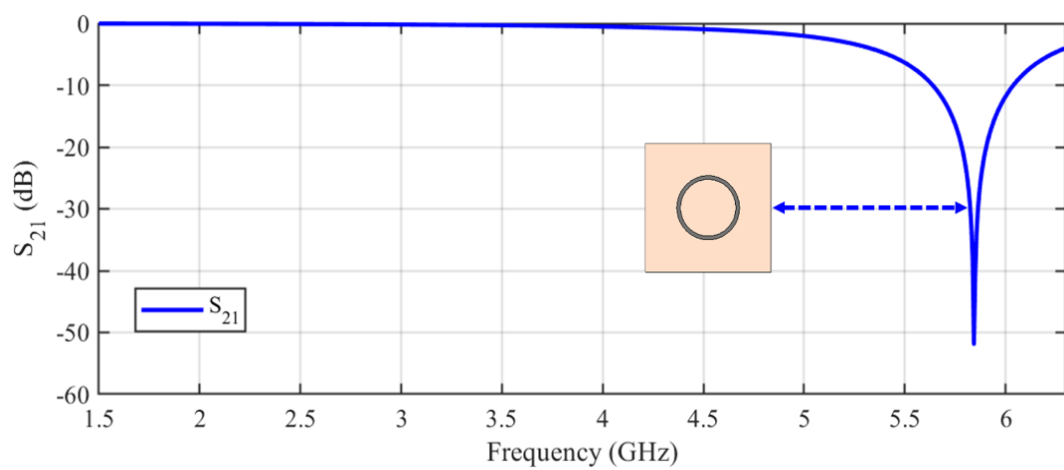
Şekil 2.3'te, tasarlanan çok bantlı FSY'nin CST Studio Suite yazılımı kullanılarak yapılan benzetimi sonucunda elde edilen S-parametreleri gösterilmektedir. Bu benzetim, yüzeyin elektromanyetik özelliklerini ve frekans cevaplarını analiz etmek için kullanılmaktadır. S_{21} parametreleri incelendiğinde, her bir rezonans katmanının spesifik bir frekans bandını durdurduğu açıkça görülmektedir. En dıştaki bakır daire katmanının 2,4 GHz frekansını durdurduğu, ortadaki katmanın 3,5 GHz frekansını durdurduğu ve en içteki katmanın ise 5,8 GHz frekansını durdurduğu belirlenmiştir. Bu üç katman, farklı frekans bantlarını engellemek amacıyla tasarlanmış ve tek bir birim hücrede birleştirilmiştir. S-parametrelerinin süperpozisyonu, her bir katmanın katkılarının birleşimini göstererek, tüm yüzeyin performansını ortaya koymaktadır. Şekil 2.3'te, S_{21} parametreleri ayrı ayrı analiz edilerek, böylece her bir frekans bandı için net bir durdurma cevabı gözlemlenmektedir. Ancak, birim hücrelerin bir araya getirilmesiyle birlikte yüzey akımları nedeniyle oluşan etkileşimler, rezonans frekanslarında kaymalara neden olmaktadır. Bu kaymalar, her bir dairesel döngü rezonatörünün istenilen frekansları durdurma kapasitesini etkileyerek, performansın optimize edilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Bu nedenle, her bir dairesel döngü rezonatörü için yeniden optimizasyon yapılmış ve böylece her üç frekans bandı için de daha doğru ve etkili bir durdurma cevabı elde edilmektedir.



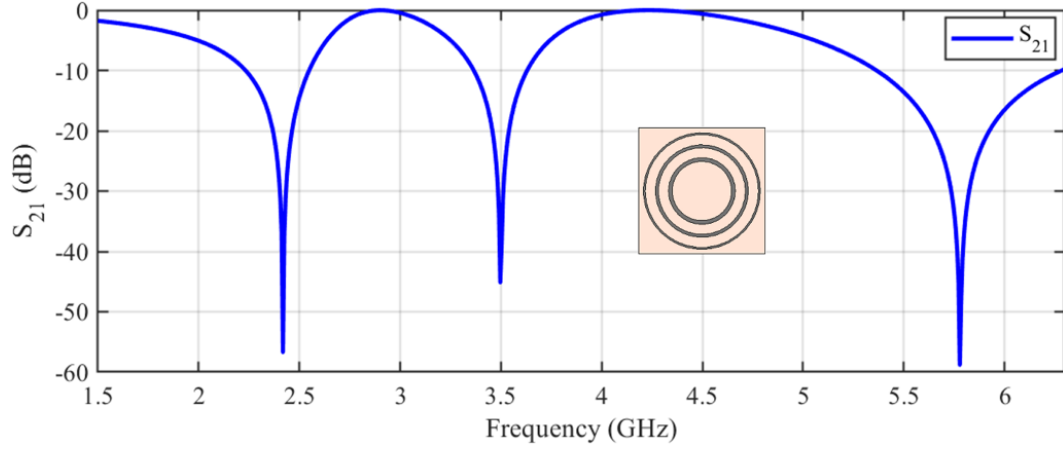
a)



b)



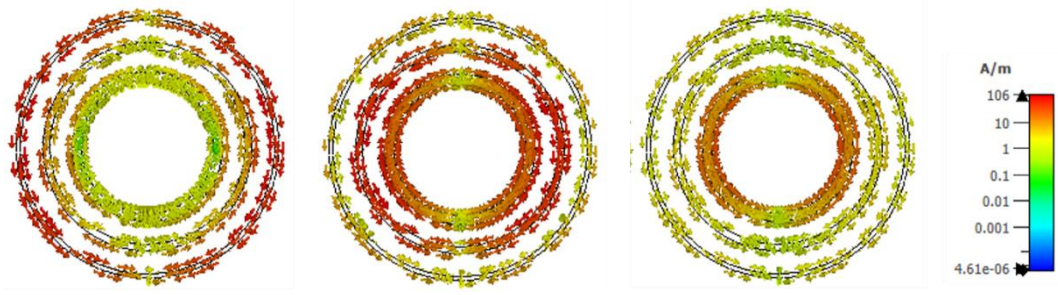
c)



d)

Şekil 2.3. Tasarlanan çok bantlı FSY'nin S_{21} parametreleri a) Birim hücrede yalnızca en dıştaki dairesel katmanın olduğu durum, b) Birim hücrede yalnızca ortadaki dairesel katmanın olduğu durum, c) Birim hücrede yalnızca içteki dairesel katmanın olduğu durum, d) Birim hücrede üç dairesel katmanın olduğu durum

S_{21} parametrelerine bakıldığında, tasarlanan birim hücrenin 2,4 GHz, 3,5 GHz ve 5,8 GHz frekanslarında bant durduran filtre olarak etkili bir şekilde çalıştığı gözlemlenmektedir. Bu parametreler, yüzeyin her bir katmanının belirli frekanslarda rezonans yaparak sinyalin iletilmesini engellediğini göstermektedir. Birim hücrenin yüzey akımları analiz edildiğinde, her bir rezonans frekansı için belirli bölgelerde yoğun akım kümeleri oluştuğu ve bu akımların yüzeydeki elektromanyetik etkileşimi temsil ettiği anlaşılmaktadır. Şekil 2.4'te, birim hücreye ait yüzey akımlarının dağılımı gösterilmektedir. Yüzey akımlarının minimum değerleri mavi renkle, maksimum değerleri ise kırmızı renkle belirtilmiştir. Yüzey akımlarının kırmızı renkteki maksimum değerlerinin dağılımlarına bakıldığında, her bir dairesel döngü rezonatörünün belirli bir frekansta çalıştığı açıkça görülmektedir. En dıştaki dairesel döngü, 2,4 GHz frekansında maksimum akım dağılımına sahipken, ortadaki dairesel döngü 3,5 GHz frekansında, en içteki dairesel döngü ise 5,8 GHz frekansında maksimum akım değerini göstermektedir. Bu bulgular, her bir döngü rezonatörünün farklı frekanslarda rezonans yaparak, tasarımın çok bantlı filtresi olarak işlev görmesini sağlamaktadır.



Şekil 2.4. Birim hücreye ait yüzey akımları

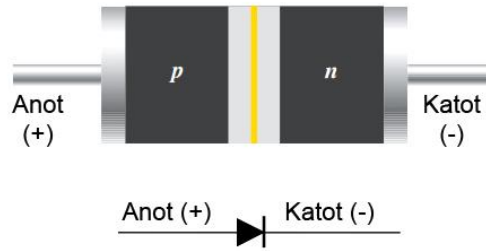
2.2. Yeniden Yapılandırılabilirlik İçin Aktif Eleman Kullanımı

Günümüzde hızla gelişen haberleşme teknolojisi ve kullanıcı gereksinimlerinin zaman içinde değişmesi, iletişim sistemlerinin çok daha esnek, verimli ve adaptif olmasını zorunlu hale getirmektedir. Bu bağlamda, farklı frekans bantları arasında dinamik olarak geçiş yapabilen, yeniden yapılandırılabilir Yüzey Yükleyici Frekans Seçici Yüzey (YY-FSY) tasarımlarına olan ihtiyaç giderek artmaktadır. Modern iletişim ağlarının karmaşık ve çeşitli ihtiyaçlarını karşılayabilmek için FSY'lerin birden fazla frekans seçiciliği özelliği göstermesi ve bu frekanslar arasında aktif elemanların kullanımıyla dinamik geçiş yapabilmesi büyük önem taşımaktadır. Bu tür tasarımlar, çoklu hizmet sunan haberleşme sistemleri, radar teknolojileri ve kablosuz sensör ağları gibi geniş bir uygulama yelpazesinde kritik bir rol oynamaktadır. FSY'lere dinamik yeniden yapılandırılabilirlik kazandırılması ve farklı frekans bantları arasında hızlı ve etkili bir şekilde geçiş yapabilmesi amacıyla çeşitli aktif elemanlar kullanılmaktadır. Bunlar arasında MEMS (Mikro-Elektro-Mekanik Sistemler), PIN diyotlar, varaktör diyotlar ve RF-MEMS elemanları bulunmaktadır. RF-MEMS anahtarlama devre elemanları, iyi izolasyon özellikleri, düşük ek güç kayıpları ve yüksek frekans performansı sayesinde oldukça cazip bir seçenek olarak görülmektedir. Ancak, kullanım ömrünün kısıtlı olması gibi dezavantajlar, bu elemanların geniş ölçekli uygulamalar için uygunluğunu sınırlamaktadır. Alternatif bir aktif eleman olarak varaktör diyotlar, kolay ayarlanabilirlik, düşük güç tüketimi ve süreklilik avantajları sunmaktadır. Bununla birlikte, bu diyotların karmaşık devre tasarımı gerektirmesi, pratik kullanımını zorlaştırmakta ve bazı uygulamalarda tercih edilmesini sınırlamaktadır. PIN diyotlar ise bu noktada daha güvenilir, düşük enerji tüketimine sahip ve maliyet etkin bir çözüm olarak öne çıkmaktadır. PIN diyotların bu özellikleri, özellikle tez çalışmasında hedeflenen uygulamalar için ideal bir tercih olmasını sağlamıştır. Bu çalışmada tasarlanan

YY-FSY yapılarında, 2.4 GHz, 3.5 GHz ve 5.8 GHz gibi farklı frekanslarda gelen elektromanyetik dalgaların iletim veya durdurulma işlemi, kullanıcı taleplerine göre özelleştirilebilmektedir. Bu amaçla, yüzey geometrisi içerisinde aktif elemanlar olarak PIN diyotlar entegre edilmiştir. PIN diyotların varlığı, tasarımın hem frekans seçici özelliklerini iyileştirmekte hem de yeniden yapılandırılabilirlik kazandırmaktadır. Bu sayede, belirli frekans bantlarının etkin bir şekilde bloke edilmesi veya iletilmesi sağlanarak, dinamik ve adaptif bir performans elde edilmiştir. Bu tür bir tasarım, yalnızca mevcut teknolojik gereksinimleri karşılamakla kalmayıp, aynı zamanda gelecekteki iletişim sistemlerinin değişen ihtiyaçlarına da yanıt verebilme potansiyeline sahiptir.

2.2.1. Yeniden Yapılandırılabilme için Diyot Kullanımı

PIN diyot, P-tipi, intrinsik (i) ve N-tipi katmanlardan oluşan bir yarı iletken cihaz olup, düşük frekanstan mikrodalga frekanslarına kadar birçok uygulamada kullanılmaktadır. Intrinsik bölge, cihazın temel özelliklerini belirleyen geniş bir yalıtkan bölge olarak görev yapmaktadır. Doğru polarize edildiğinde yük taşıyıcılar bu bölgeye akarak diyotun düşük dirençli bir iletken gibi çalışmasını sağlamaktadır, ters polarize edildiğinde ise intrinsik bölge boşalarak yüksek dirençli bir yalıtkan haline gelmektedir. PIN diyotlar düşük kapasitans, yüksek güç taşıma kapasitesi ve geniş frekans aralığında çalışma yeteneği sayesinde RF anahtarlama, zayıflatıcılar, faz kaydırıcılar ve modülatörler gibi birçok uygulamada kullanılmaktadır. Yüksek frekanslarda intrinsik bölgenin özel yapısı, sinyal işleme elemanı olarak çalışmasını PIN diyotları, iletişim ve radar sistemleri gibi alanlarda vazgeçilmez bir bileşen haline getirmektedir [61,73].



Şekil 2.5. Pin diyot sembolü ve pin diyot iç yapısı

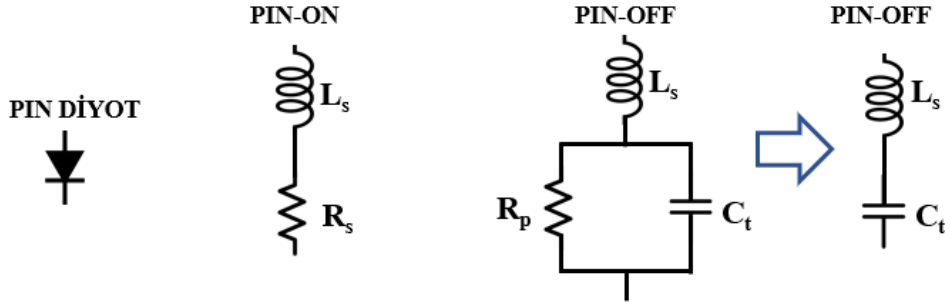
SMP (Subminiature Package) PIN diyotlar, genellikle küçük boyutlu, düşük profilli paketlerde sunulan ve RF (radyo frekansı) ve mikrodalga uygulamalarında kullanılan PIN

diyot türlerinden olmaktadır. SMP PIN diyotlar, özellikle yüksek performans gerektiren sistemlerde, alan kısıtlamalarının olduğu yerlerde ve düşük kayıplı uygulamalarda tercih edilmektedir. Bu tür PIN diyotlar, hem düşük maliyetli hem de kompakt olduklarından, yüksek doğruluk ve güvenilirlik sunarak RF anahtarlama, zayıflatıcılar, filtreler, faz kaydırıcılar ve diğer mikrodalga devreleri gibi uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. SMP PIN diyotlar, genellikle yüzey montaj teknolojisi (SMT) ile üretilmekte, bu da onları küçük form faktörleriyle devre kartlarına entegre edilebilir hale getirmektedir. Bu tip diyotlar, yüksek frekanslı sinyalleri hızlı bir şekilde geçirmekte ve aynı zamanda düşük kapasitans ve yüksek doğruluk sağlamaktadır. Bu tez çalışmada bu özelliklerinde dolayı bap 51-02 Pin diyotlar kullanarak anahtarlama sağlanmaktadır.



Şekil 2.6. Smd pin diyot gösterimi

PIN diyotun eşdeğer devre modeli, doğru ve ters polarma durumlarındaki elektriksel davranışını açıklamak için seriye bağlı bir direnç (R_s), bir endüktans (L_s) ve bir kapasitans (C_p) içerir. Seri direnç, doğru polarma altında diyotun iletim sırasında gösterdiği iç direnci temsil ederken, endüktans diyotun fiziksel bağlantılarından kaynaklanan parasitik etkileri ifade eder. Kapasitans ise, ters polarma altında P ve N bölgeleri arasındaki intrinsik bölgenin yalıtkan davranışından kaynaklanır ve ters gerilime bağlı olarak değişir. Düşük frekanslarda diyot, bir anahtar gibi davranırken, yüksek frekanslarda kapasitans ve endüktans etkisi belirgin hale gelir. Bu model, PIN diodun RF ve mikrodalga uygulamalarındaki performansını anlamak ve optimize etmek için kullanılmaktadır [74]. Şekil 2.7’de pin diyot eşdeğer devre modeli gösterilmektedir.



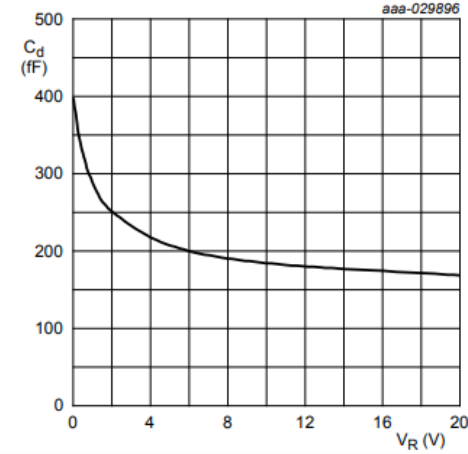
Şekil 2.7. Pin diyotun eşdeğer devre modeli

PIN diyotun gerilim-akım (V-I) grafiği, doğrusal olmayan bir karakteristik sergilemektedir ve doğrusal pn diyotlardan intrinsik bölgenin etkisiyle ayrılmaktadır. Doğru polarma durumunda, bir eşik gerilimi aşıldığında akım eksponansiyel olarak artmakta ve diyot düşük dirençli bir iletken gibi davranmaktadır. Ters polarma durumunda ise kaçak akım oldukça küçüktür ve intrinsik bölge bu akımı daha da azaltır, diyot yüksek dirençli bir yalıtkan olarak çalışmaktadır. Ancak ters polarma gerilimi kritik bir seviyeye ulaştığında ters akım hızla artar ve bu noktada diyot zarar görebilmekte ve PIN diyot, düşük doğru direnç ve yüksek ters yalıtım özellikleri sayesinde RF ve mikrodalga uygulamaları için uygun bir bileşen olmaktadır.

Bu tez çalışmasında NXP firmasına ait BAP 51-02 pin diyot kullanılmış olup pin diyota ait karakteristik tablosu Çizelge 2.3'te, pin diyotun kapasite-gerilim karakteristiği ile akım-direnç karakteristiği Şekil 2.8'de verilmiştir.

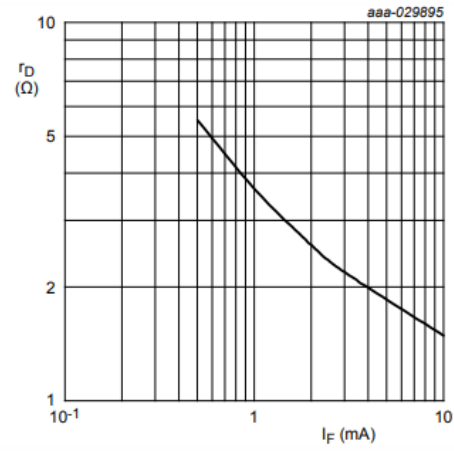
Çizelge 2.3. BAP 51-02 pin diyotun karakteristik tablosu

Symbol	Parameter	Conditions	Min	Typ	Max	Unit
V_F	forward voltage	$I_F = 50 \text{ mA}$	-	0.95	1.1	V
V_R	reverse voltage	$I_R = 10 \text{ } \mu\text{A}$	50	-	-	V
I_R	reverse current	$V_R = 50 \text{ V}$	-	-	100	nA
C_d	diode capacitance	$f = 1 \text{ MHz}$ (see Figure 1)				
		$V_R = 0 \text{ V}$	-	0.4	-	pF
		$V_R = 1 \text{ V}$	-	0.3	0.55	pF
		$V_R = 5 \text{ V}$	-	0.2	0.35	pF
r_D	diode forward resistance	$f = 100 \text{ MHz}$ (see Figure 2)				
		$I_F = 0.5 \text{ mA}$ [1]	-	5.5	9	Ω
		$I_F = 1 \text{ mA}$ [1]	-	3.6	6.5	Ω
		$I_F = 10 \text{ mA}$ [1]	-	1.5	2.5	Ω



$f = 1 \text{ MHz}; T_j = 25^\circ\text{C}$

a)



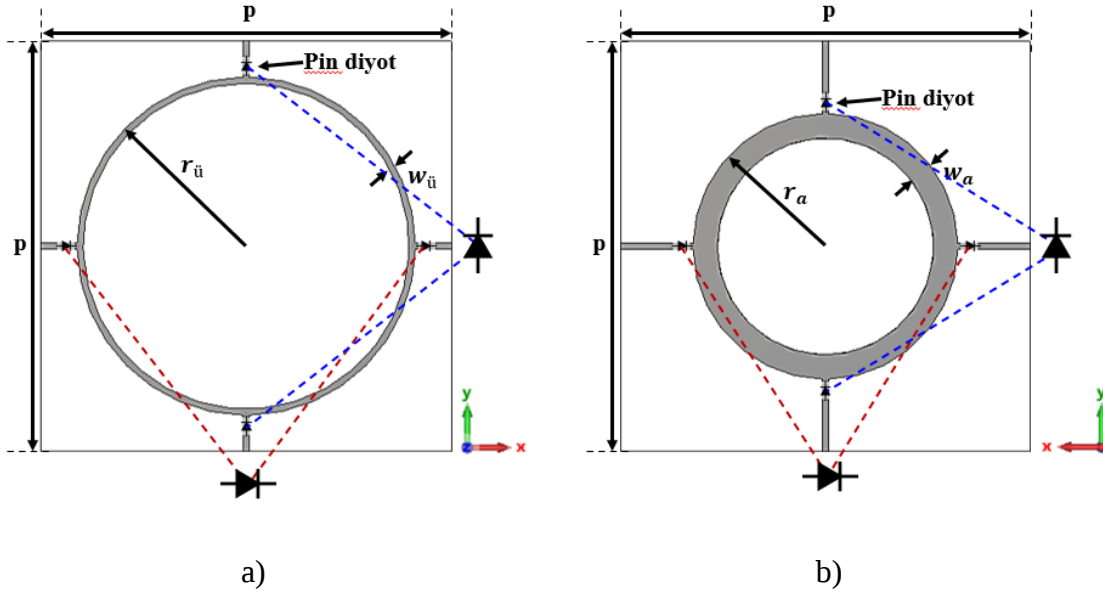
$f = 100 \text{ MHz}; T_j = 25^\circ\text{C}$

b)

Şekil 2.8. BAP 51-02 pin diyotun kapasitans ve direnç karakteristiği a) Ters gerilimin bir fonksiyonu olarak diyot kapasitansı b) İleri yönde akımın bir fonksiyonu olarak diyot direnci

2.3. YY-FSY Birim Hücresi

Birim hücrede oluşabilecek yüzey akımları kaynaklı istenmeyen etkileşimleri en aza indirmek ve bu etkileri önlemek amacıyla özel olarak tasarlanan geometriler, dielektrik alt tabakanın her iki yüzüne simetrik veya tamamlayıcı bir şekilde yerleştirilmektedir. Bu tasarım yaklaşımı, her bir katmanın farklı frekanslarda durdurma karakteristiği göstermesini sağlamakta ve istenmeyen frekansların etkili bir şekilde engellenmesine olanak tanımaktadır. Böylelikle, tasarımın çok katmanlı yapısı hem geniş bir frekans bandında hem de seçici frekanslarda yüksek performans sergilemektedir. Şekil 2.9'da tasarımı yapılan YY-FSY birim hücresine ait ön ve arka yüzey görüntüleri verilmiştir. Bu görüntülerde diyotların konumları ve birim hücre tasarımında kullanılan parametrelerin detaylı bir şekilde gösterimi yapılmıştır. Söz konusu tasarım, yüzey akımları ve frekans durdurma karakteristiklerinin optimize edilmesi amacıyla geliştirilmiş yenilikçi bir yapı sunmaktadır.



Şekil 2.9. YY-FSY yüzey görüntüleri ve parametreleri a) ön yüzey b) arka yüzey

FSY’lerde polarizasyon kararlılığının sağlanabilmesi amacıyla, literatürde sıklıkla simetrik birim hücre tasarımları tercih edilmektedir. Bu tür simetrik tasarımlar, farklı polarizasyon durumlarında aynı performansı gösterebilme yeteneğine sahip yapılar oluşturarak, tasarımın işlevselliğini ve esnekliğini artırmaktadır. Bu çalışmada tasarımı yapılan YY-FSY birim hücresinin dielektrik alt tabakası tam kare bir geometriye sahiptir ve her bir birim hücreye ait boyutlar $34 \times 34 \text{ mm}^2$ olarak belirlenmiştir. Tasarımda, birim hücreler üç katmandan oluşmaktadır: üst yüzeyde bakır tabaka katmanı, orta kısımda Rogers RT5880 dielektrik malzeme ve alt yüzeyde yine bakır tabaka katmanı yer almaktadır. Bu çok katmanlı yapı, hem mekanik dayanıklılık hem de elektromanyetik performans açısından avantaj sağlamaktadır. Kullanılan Rogers RT5880 dielektrik malzemenin kalınlığı 1.57 mm olup düşük kayıp faktörü ve yüksek dielektrik kararlılığı sayesinde, birim hücrenin yüksek frekanslardaki performansını optimize etmektedir. Bakır katmanların her biri ise 0.035 mm kalınlığındadır ve hem iletkenlik hem de yüzey akımlarını kontrol etme açısından önemli bir rol oynamaktadır. Ayrıca, tasarımın ön yüzeyinde yer alan PIN diyotlara ait pad’lerin genişliği 0.5 mm, uzunluğu 1.40 mm olarak tasarlanmışken, arka yüzeydeki PIN diyotlara ait pad’lerin genişliği yine 0.5 mm, ancak uzunluğu 4.40 mm olarak belirlenmiştir. Bu farklılık, ön ve arka yüzeydeki diyotların işlevselliğini optimize etmek ve tasarımın elektromanyetik özelliklerini dengelemek amacıyla yapılmıştır. Tasarımı yapılan YY-FSY birim hücresine ait ön ve arka yüzeylerde kullanılan tasarım parametrelerinin tamamı Çizelge 2.4’te detaylı bir şekilde

sunulmaktadır. Bu parametreler, hem mekanik yapının hem de elektromanyetik performansın optimize edilmesi amacıyla dikkatle seçilmiş ve tasarım sürecinin temelini oluşturmuştur. Böylelikle, YY-FSY birim hücresinin hem polarizasyon kararlılığı hem de frekans seçiciliği açısından yüksek performans sergileyen bir yapı olduğu ortaya konulmaktadır. Tasarım parametrelerinde bulunan p =birim hücre uzunluğunu, $r_{\bar{u}}$ = üst yüzey daire yarıçapını, r_a = alt yüzey daire yarıçapını, $w_{\bar{u}}$ = üst yüzey daire iletken genişliğini, w_a = alt yüzey daire iletken genişliğini ifade etmektedir.

Çizelge 2.4. YY-FSY tasarım parametre değerlerine ait uzunluk ölçüleri

Parametre	Değer (mm)
p	34
$r_{\bar{u}}$	14
r_a	11
$w_{\bar{u}}$	0,5
w_a	2

Tasarımı gerçekleştirilen YY-FSY birim hücresinin, CST Studio Suite yazılımı kullanılarak 2.4 GHz, 3.5 GHz ve 5.8 GHz frekans bantlarında yapılan analizlerinde, pin diyotlarının farklı on/off durumları ve TE/TM modlarına göre toplamda 16 farklı mod elde edilmiştir. Elde edilen modlar, Çizelge 2.5'te sunulmaktadır. Çizelge 2.5'in değerlendirilmesi neticesinde, tasarlanan birim hücrenin, mod 5, mod 7, mod 9, mod 10, mod 13, mod 14 ve mod 15 modlarında, hedeflenen frekans bantlarının dışında tepki verdiği gözlemlenmiştir.

Çizelge 2.5. YY-FSY tasarımına ait oluşturulan modlar

Modlar	DİYOT DURUMLARI				2.4 GHz		3.5 GHz		5.8 GHz	
	ÜY	ÜD	AY	AD	TE Mod	TM Mod	TE Mod	TM Mod	TE Mod	TM Mod
Mod 1	OFF	OFF	OFF	OFF	X	X	X	X	✓	✓
Mod 2	OFF	OFF	OFF	ON	X	X	✓	X	X	✓
Mod 3	OFF	OFF	ON	OFF	X	X	X	✓	✓	X
Mod 4	OFF	OFF	ON	ON	X	X	✓	✓	X	X
Mod 5	OFF	ON	OFF	OFF	✓	X	X	X	✓	✓
Mod 6	OFF	ON	OFF	ON	✓	X	✓	X	X	✓
Mod 7	OFF	ON	ON	OFF	✓	X	X	✓	✓	X
Mod 8	OFF	ON	ON	ON	✓	X	✓	✓	X	X
Mod 9	ON	OFF	OFF	OFF	X	✓	X	X	✓	✓
Mod 10	ON	OFF	OFF	ON	X	✓	✓	X	X	✓
Mod 11	ON	OFF	ON	OFF	X	✓	X	✓	✓	X
Mod 12	ON	OFF	ON	ON	X	✓	✓	✓	X	X
Mod 13	ON	ON	OFF	OFF	✓	✓	X	X	✓	✓
Mod 14	ON	ON	OFF	ON	✓	✓	✓	X	X	✓
Mod 15	ON	ON	ON	OFF	✓	✓	X	✓	✓	X
Mod 16	ON	ON	ON	ON	✓	✓	✓	✓	X	X

✓ - İletilir

X - Durdurulur

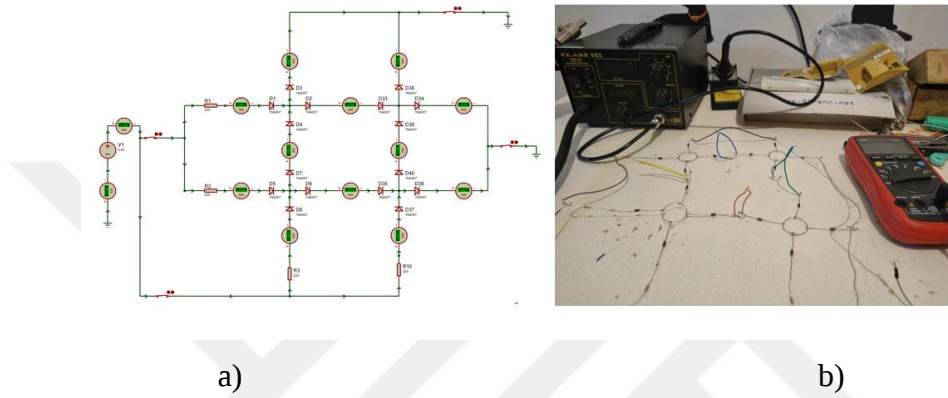
ÜY - Üst Yüzey Yatay Diyotlar

ÜD - Üst Yüzey Dikey Diyotlar

AY - Alt Yüzey Yatay Diyotlar

AD - Alt Yüzey Dikey Diyotlar

Hedeflenen frekans bantlarının dışında tepki veren 7 modun çıkarılmasının ardından kalan 9 mod için yapılan analizler sonucunda, 2.4 GHz, 3.5 GHz ve 5.8 GHz frekanslarında TE ve TM modları için farklı tepkiler oluşturduğu tespit edilmiştir. Bu bulgular doğrultusunda, pin diyotların on/off durumları 2x2 birim hücre oluşturularak hem simülasyon hem de deneysel yöntemlerle incelenmiştir. Proteus yazılımı ile gerçekleştirilen simülasyonlar ve deneysel ölçüm sonuçlarına ait görseller Resim 2.2'de sunulmaktadır.



Resim 2.2. YY-FSY diyot simülasyonu ve deneysel ölçüm görselleri a) Simülasyon
b) Deneysel ölçüm

Proteus yazılımında gerçekleştirilen simülasyon ve deneysel ölçüm sonuçları incelendiğinde, elde edilen verilerin tutarlı olduğu ve oluşturulan 2x2 birim hücrede yatay ve dikey diyotlar üzerinde uygulanan gerilim ile geçen akım değerlerinde belirgin farklılıklar olduğu gözlemlenmiştir. Simülasyon ve deneysel sonuçlara dayanarak, hücrenin köşegenlerinde yer alan diyotlar üzerinden daha fazla akım geçtiği, buna karşın diğer yönlerde bulunan diyotlar üzerinden geçen akımların beklenenden daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, hücre sayısı artırılarak yapılan simülasyonlarda yatay ve dikey diyotların bazılarının ilettime geçmediği gözlemlenmiştir. Bu bulgu, aynı yüzeyde bulunan yatay ve dikey diyotların aynı anda ilettime geçemeyeceği sonucunu desteklemektedir.

Simülasyon ve deneysel ölçüm sonuçlarına göre, tasarlanan YY-FSY birim hücrede aynı yüzeyde bulunan ve iletimde olması gereken yatay ve dikey diyotlar içeren mod 4, mod 8, mod 12 ve mod 16 durumları Çizelge 2.6'te sunulmuştur.

Çizelge 2.6. YY-FSY aynı yüzeyde yatay ve dikey iletimde olan diyot modları

Modlar	DİYOT DURUMLARI				2.4 GHz		3.5 GHz		5.8 GHz	
	ÜY	ÜD	AY	AD	TE Mod	TM Mod	TE Mod	TM Mod	TE Mod	TM Mod
Mod 1	OFF	OFF	OFF	OFF	X	X	X	X	✓	✓
Mod 2	OFF	OFF	OFF	ON	X	X	✓	X	X	✓
Mod 3	OFF	OFF	ON	OFF	X	X	X	✓	✓	X
Mod 4	OFF	OFF	ON	ON	X	X	✓	✓	X	X
Mod 5	OFF	ON	OFF	OFF	✓	X	X	X	✓	✓
Mod 6	OFF	ON	OFF	ON	✓	X	✓	X	X	✓
Mod 7	OFF	ON	ON	OFF	✓	X	X	✓	✓	X
Mod 8	OFF	ON	ON	ON	✓	X	✓	✓	X	X
Mod 9	ON	OFF	OFF	OFF	X	✓	X	X	✓	✓
Mod 10	ON	OFF	OFF	ON	X	✓	✓	X	X	✓
Mod 11	ON	OFF	ON	OFF	X	✓	X	✓	✓	X
Mod 12	ON	OFF	ON	ON	X	✓	✓	✓	X	X
Mod 13	ON	ON	OFF	OFF	✓	✓	X	X	✓	✓
Mod 14	ON	ON	OFF	ON	✓	✓	✓	X	X	✓
Mod 15	ON	ON	ON	OFF	✓	✓	X	✓	✓	X
Mod 16	ON	ON	ON	ON	✓	✓	✓	✓	X	X

✓ - İletilir ÜY - Üst Yüzey Yatay Diyotlar AY - Alt Yüzey Yatay Diyotlar
X - Durdurulur ÜD - Üst Yüzey Dikey Diyotlar AD - Alt Yüzey Dikey Diyotlar

Tasarımı yapılan YY-FSY birim hücrelerinin 2.4 GHz, 3.5 GHz ve 5.8 GHz frekans bantları için frekans tepkileri istenilen sınırlarda olan, üst ve alt yüzeydeki yatay ve dikey diyotların aynı anda iletimde olmadığı modlar, Çizelge 2.7’de sunulmuştur.

Çizelge 2.7. YY-FSY’in kullanılabilir modları

Modlar	DİYOT DURUMLARI				2.4 GHz		3.5 GHz		5.8 GHz	
	ÜY	ÜD	AY	AD	TE Mod	TM Mod	TE Mod	TM Mod	TE Mod	TM Mod
Mod 1	OFF	OFF	OFF	OFF	X	X	X	X	✓	✓
Mod 2	OFF	OFF	OFF	ON	X	X	✓	X	X	✓
Mod 3	OFF	OFF	ON	OFF	X	X	X	✓	✓	X
Mod 6	OFF	ON	OFF	ON	✓	X	✓	X	X	✓
Mod 11	ON	OFF	ON	OFF	X	✓	X	✓	✓	X

✓ - İletilir ÜY - Üst Yüzey Yatay Diyotlar AY - Alt Yüzey Yatay Diyotlar
X - Durdurulur ÜD - Üst Yüzey Dikey Diyotlar AD - Alt Yüzey Dikey Diyotlar

Birim hücrenin mod 1, mod 2, mod 3, mod 6 ve mod 11 için frekans tepkileri incelendiğinde, 2.4 GHz, 3.5 GHz ve 5.8 GHz frekansları arasında geçiş yapılabilen ve polarizasyona bağlı olarak modlar arasında dinamik geçişlerin sağlanabildiği, dolayısıyla polarizasyon kararlılığının da elde edilebildiği sonucuna varılmıştır. Bu üç duruma ait sonuçlar, Çizelge 2.8’de sunulmuştur.

Çizelge 2.8. YY-FSY tasarımı sonucunda elde edilen durumlar

DURUM	2.4 GHz	3.5 GHz	5.8 GHz	TE					TM				
				Mod	ÜY	ÜD	AY	AD	Mod	ÜY	ÜD	AY	AD
Durum 1	✓	✓	✗	6	X	ON	X	ON	11	ON	X	ON	X
Durum 2	✗	✓	✗	2	X	OFF	X	ON	3	OFF	X	ON	X
Durum 3	✗	✗	✓	1	X	OFF	X	OFF	1	OFF	X	OFF	X
				3	X	OFF	X	OFF	2	OFF	X	OFF	X
				11	X	OFF	X	OFF	6	OFF	X	OFF	X

✓ - İletilir
✗ - Durdurulur

ÜY - Üst Yüzey Yatay Diyotlar
ÜD - Üst Yüzey Dikey Diyotlar

AY - Alt Yüzey Yatay Diyotlar
AD - Alt Yüzey Dikey Diyotlar

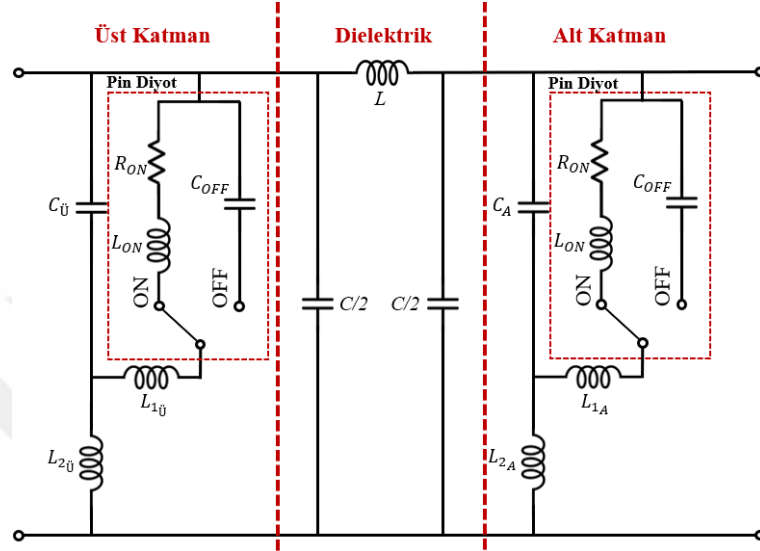
X - ON ya da OFF olabilir

Çizelge 2.8 incelendiğinde, Durum 1 için 2.4 GHz ve 3.5 GHz frekanslarının iletilip 5.8 GHz frekansının durdurulduğu, TE polarizasyonu için mod 6'ya, TM polarizasyonu için ise mod 11'e geçiş yapılarak polarizasyon kararlılığının sağlanabileceği anlaşılmaktadır. Durum 2'de ise 2.4 GHz ve 5.8 GHz frekanslarının durdurulup 3.5 GHz frekansının iletildiği, TE polarizasyonu için mod 2'ye, TM polarizasyonu için ise mod 3'e geçiş yapılarak polarizasyon kararlılığının sağlanabileceği anlaşılmaktadır. Durum 3 için, 2.4 GHz ve 3.5 GHz frekanslarının durdurulup 5.8 GHz frekansının iletildiği, TE polarizasyonu için mod 1, mod 3 veya mod 11'e, TM polarizasyonu için ise mod 1, mod 2 veya mod 6'ya geçiş yapılarak polarizasyon kararlılığının sağlanabileceği anlaşılmaktadır.

2.4. YY-FSY Birim Hücresi Eşdeğer Devre Modeli

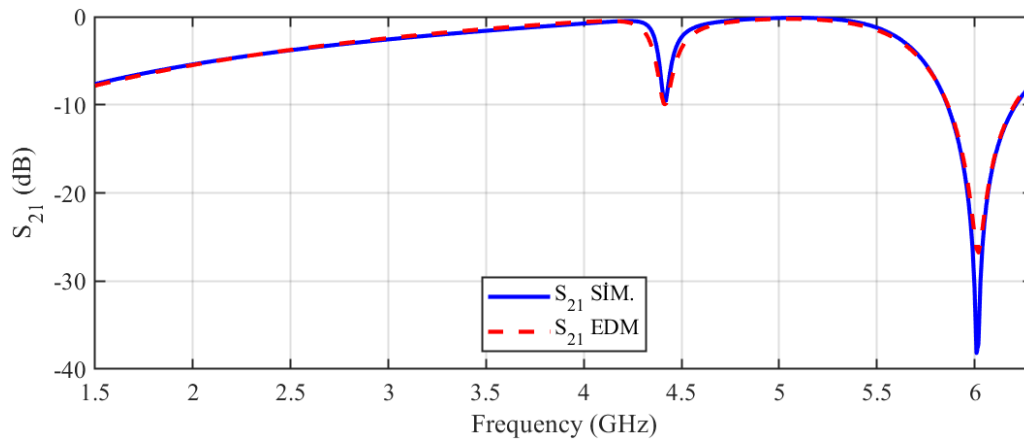
Eşdeğer devre modelinin çıkarılması, frekans seçici yüzeylerin (FSY) tasarım sürecinde elektriksel davranışlarını anlamak, optimize etmek ve performansını artırmak için kritik bir araçtır. Bu model, FSY'nin rezonans frekansları, dalga yayılımı, polarizasyon kararlılığı ve açılabilirlik gibi özelliklerini analiz etmeyi kolaylaştırmaktadır, böylece tasarımcılar istenen performansı elde etmek için gerekli parametreleri optimize edebilmektedir. Ayrıca, eşdeğer devre modeli, fiziksel yapının karmaşıklığını basitleştirerek, simülasyon yoluyla hızlı ve doğru sonuçlar elde edilmesini sağlayarak tasarım süresi ve maliyetleri önemli ölçüde azalmaktadır. Bu model, farklı parametrelerin ve yapısal değişikliklerin FSY'nin performansına etkisini hızlı bir şekilde görmek ve optimize etmek için yardım alınmaktadır, ayrıca uygulama alanlarına entegrasyonunu kolaylaştırarak sistemin genel verimliliğini artırmaktadır. Yüksek frekanslı ve karmaşık yapılarla çalışırken, eşdeğer devre modeli, deri etkisi ve rezonans gibi önemli etkileşimleri doğru bir şekilde modelleyerek daha güvenilir tasarımlar yapılmasını sağlamaktadır.

Şekil 2.10’da YY-FSY birim hücresinin durum 1 için eşdeğer devre modeli sunulmaktadır. Eşdeğer devre modelinin benzetimleri CST Studio Suite yazılımı ile yapılarak analiz edilmiştir. Devre modelinde bulunan elektronik devre elemanlarına ait değerler sırasıyla $C_{\bar{U}}=0,272$ pF, $R_{ON}=1,5$ Ohm, $L_{ON}=0,75$ nH, $L_{1\bar{U}}=2,85$ nH, $L_{2\bar{U}}=9$ nH, $L=4$ nH, $C=0,07$ pF, $C_A=0,406$ pF, $L_{1A}=2,85$ nH, $L_{2A}=29$ nH olarak belirlenmiştir.



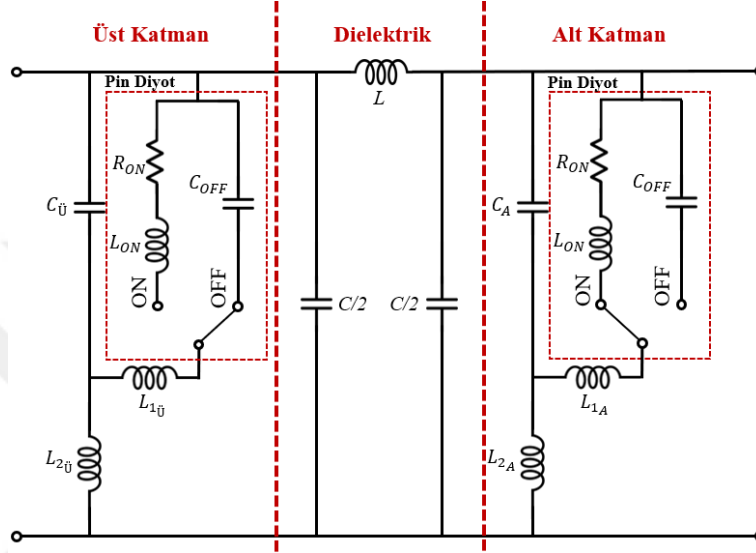
Şekil 2.10. YY-FSY hücresinin durum 1 için eşdeğer devre modeli

Şekil 2.11’de ise YY-FSY hücresinin simülasyon sonuçları ile eşdeğer devre modeline ait (S_{21}) iletim katsayıları yer almaktadır. Sonuçlar incelendiğinde birim hücreye ait simülasyon (S_{21}) iletim katsayıları ile eşdeğer devre modeli (S_{21}) iletim katsayılarının uyumlu olduğu görülmektedir.



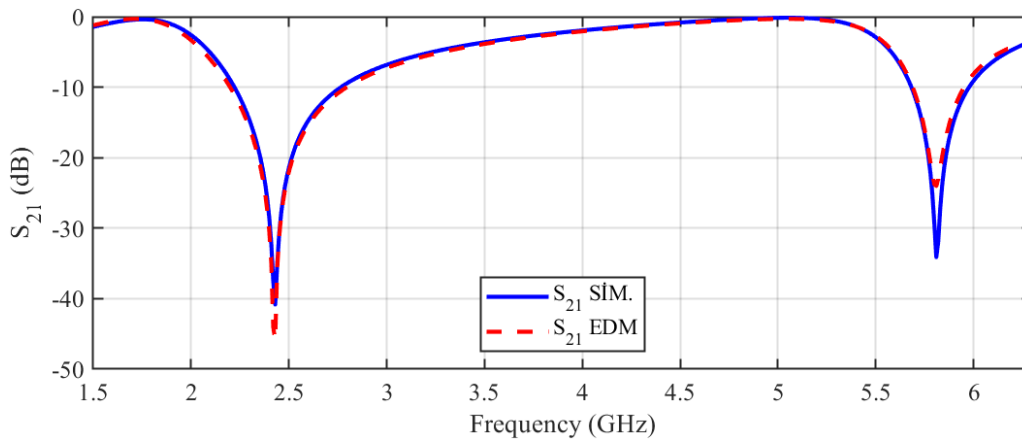
Şekil 2.11. YY-FSY durum 1 için simülasyon ve eşdeğer devre modeli (S_{21}) iletim katsayıları

Şekil 2.12’de YY-FSY birim hücresinin durum 2 için eşdeğer devre modeli sunulmaktadır. Eşdeğer devre modelinin benzetimleri CST Studio Suite yazılımı ile yapılarak analiz edilmiştir. Devre modelinde bulunan elektronik devre elemanlarına ait değerler sırasıyla $C_{\bar{U}}=0,005$ pF, $C_{OFF}=0,2$ pF, $L_{1\bar{U}}=2,1$ nH, $L_{2\bar{U}}=19$ nH, $L=4$ nH, $C=0,07$ pF, $C_A=0,277$ pF, $R_{ON}=1,5$ Ohm, $L_{ON}=0,75$ nH, $L_{1A}=2,85$ nH, $L_{2A}=11$ nH olarak belirlenmiştir.



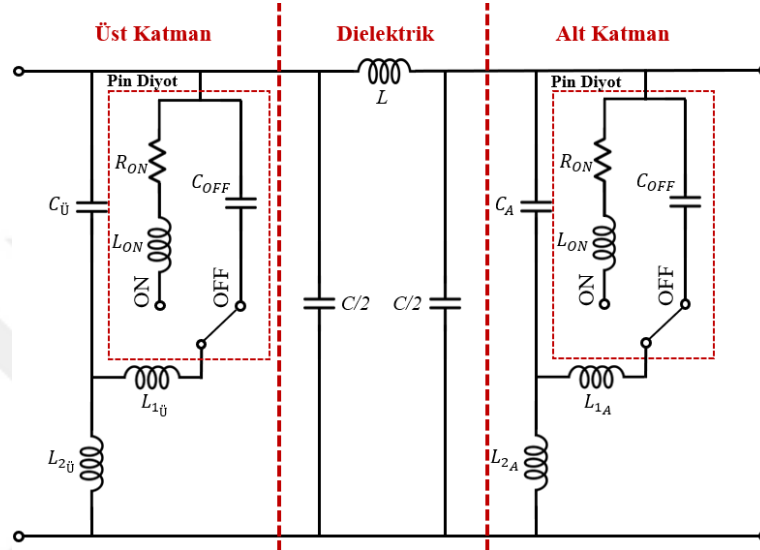
Şekil 2.12. YY-FSY hücresine ait durum 2 için eşdeğer devre modeli

Şekil 2.13’te ise YY-FSY hücresine ait simülasyon sonuçları ile eşdeğer devre modeline ait (S_{21}) iletim katsayıları yer almaktadır. Sonuçlar incelendiğinde birim hücreye ait simülasyon (S_{21}) iletim katsayıları ile eşdeğer devre modeli (S_{21}) iletim katsayılarının uyumlu olduğu görülmektedir.



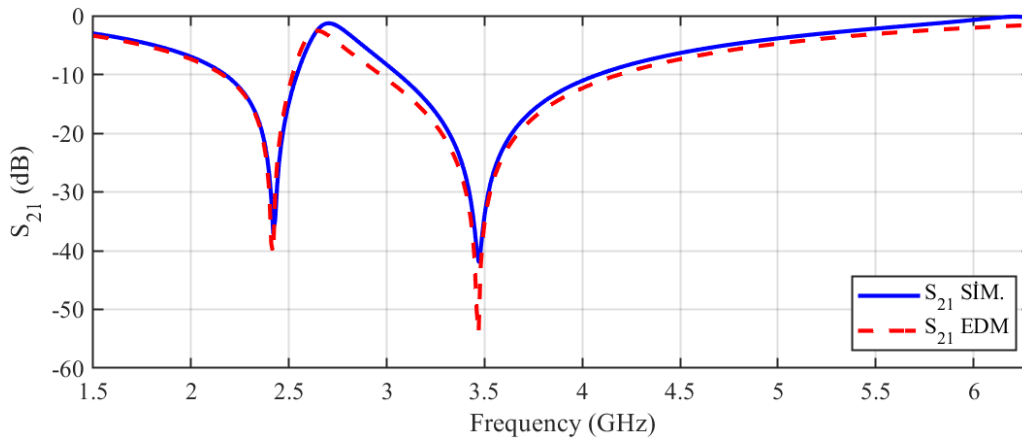
Şekil 2.13. YY-FSY durum 2 için simülasyon ve eşdeğer devre modeli (S_{21}) iletim katsayıları

Şekil 2.14'te YY-FSY birim hücrelerinin durum 3 için eşdeğer devre modeli sunulmaktadır. Eşdeğer devre modelinin benzetimleri CST Studio Suite yazılımı ile yapılarak analiz edilmiştir. Devre modelinde bulunan elektronik devre elemanlarına ait değerler sırasıyla $C_U=0,022$ pF, $C_{OFF}=0,2$ pF, $L_{1U}=1,9$ nH, $L_{2U}=18$ nH, $L=4$ nH, $C=0,07$ pF, $C_A=0,005$ pF, $L_{1A}=1,346$ nH, $L_{2A}=9$ nH olarak belirlenmiştir.



Şekil 2.14. YY-FSY hücresine ait durum 3 için eşdeğer devre modeli

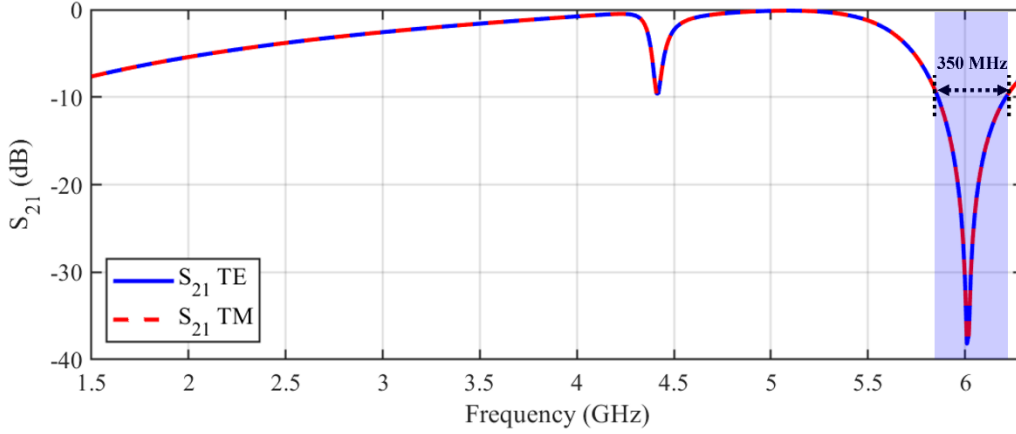
Şekil 2.15'te ise YY-FSY hücresine ait simülasyon sonuçları ile eşdeğer devre modeline ait (S_{21}) iletim katsayıları yer almaktadır. Sonuçlar incelendiğinde birim hücreye ait simülasyon (S_{21}) iletim katsayıları ile eşdeğer devre modeli (S_{21}) iletim katsayılarının uyumlu olduğu görülmektedir.



Şekil 2.15. YY-FSY durum 3 için simülasyon ve eşdeğer devre modeli (S_{21}) iletim katsayıları

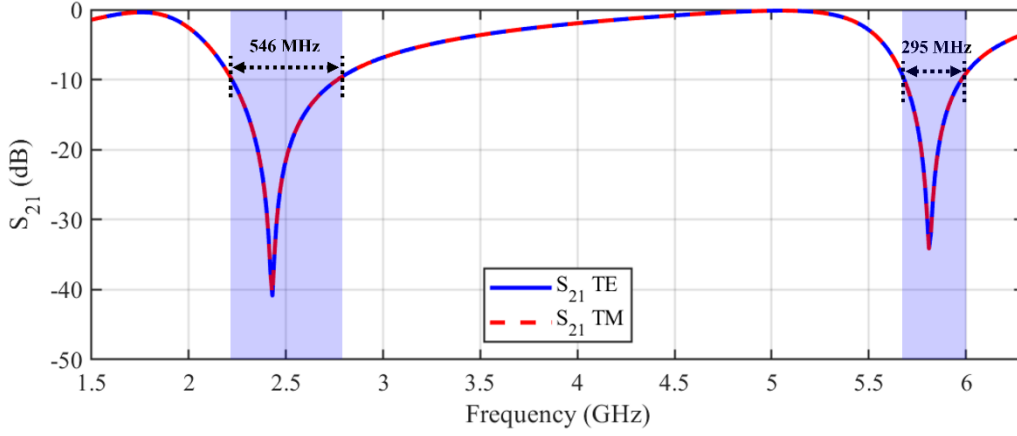
2.5. Analiz Sonuçları

Analiz sonuçları incelendiğinde, tasarlanan yapının durum 1 için hem TE (Transversal Electric) hem de TM (Transversal Magnetic) modlarında etkili bir bant durdurma özelliği sergilediği görülmektedir. Bu durum, hem TE hem TM modunda 350 MHz frekans bant genişliği sunmaktadır. Burada S_{21} parametresi, yapının iletim özelliklerini ifade eden bir ölçüttür ve iki portlu sistemlerde ikinci porta iletilen güç oranını tanımlar. Daha açık bir ifadeyle, S_{21} , giriş portundan (Port 1) çıkan sinyalin, çıkış portuna (Port 2) ne kadarının ulaştığını gösteren bir parametredir. Bu değer genellikle dB cinsinden ifade edilir ve negatif bir değer, enerjinin iletim kaybını temsil eder. Bant durdurma özelliği analiz edilirken, S_{21} parametresinin düşüş gösterdiği frekans aralıkları, bu özelliklerin gerçekleştiği bölgeler olarak belirlenmektedir.



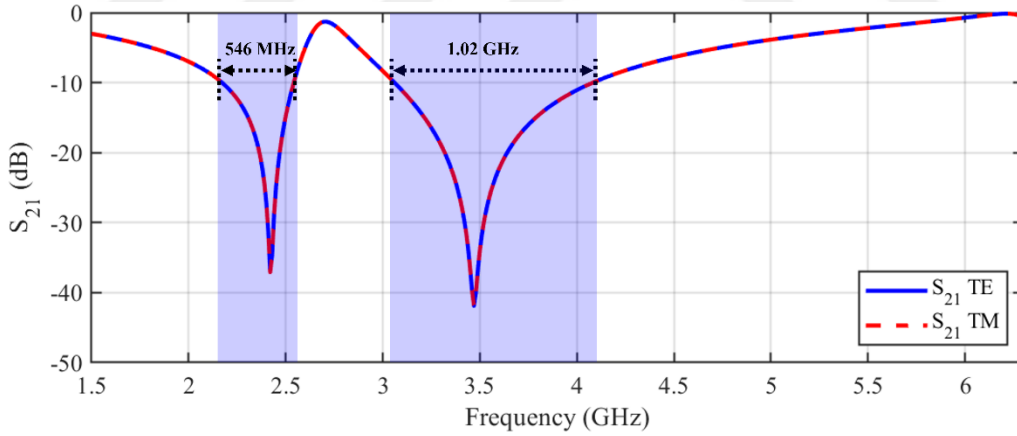
Şekil 2.16. YY-FSY durum 1 için TE ve TM modunda (S_{21}) iletim katsayıları

Analiz sonuçları incelendiğinde, tasarlanan yapının durum 2 için hem TE (Transversal Electric) hem de TM (Transversal Magnetic) modlarında etkili bir bant durdurma özelliği sergilediği görülmektedir. Bu durum, TE ve TM modunda 546 MHz ile 295 MHz frekans bant genişliklerini göstermektedir.



Şekil 2.17. YY-FSY durum 2 için TE ve TM modunda (S_{21}) iletim katsayıları

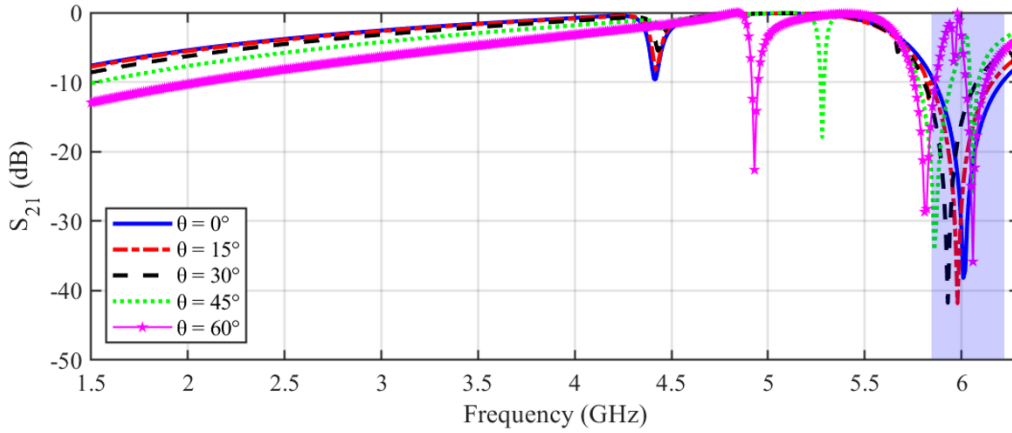
Analiz sonuçları incelendiğinde, tasarlanan yapının durum 3 için hem TE (Transversal Electric) hem de TM (Transversal Magnetic) modlarında etkili bir bant durdurma özelliği sergilediği görülmektedir. Bu durum, TE ve TM modunda 546 MHz ile 1.02 GHz frekans bant genişliklerinde kendini göstermektedir. Bu özellik, belirli frekans aralıklarında sinyalin geçişine engel olan filtreleme işlevinin başarıyla gerçekleştirildiğini ortaya koymaktadır.



Şekil 2.18. YY-FSY durum 3 için TE ve TM modunda (S_{21}) iletim katsayıları

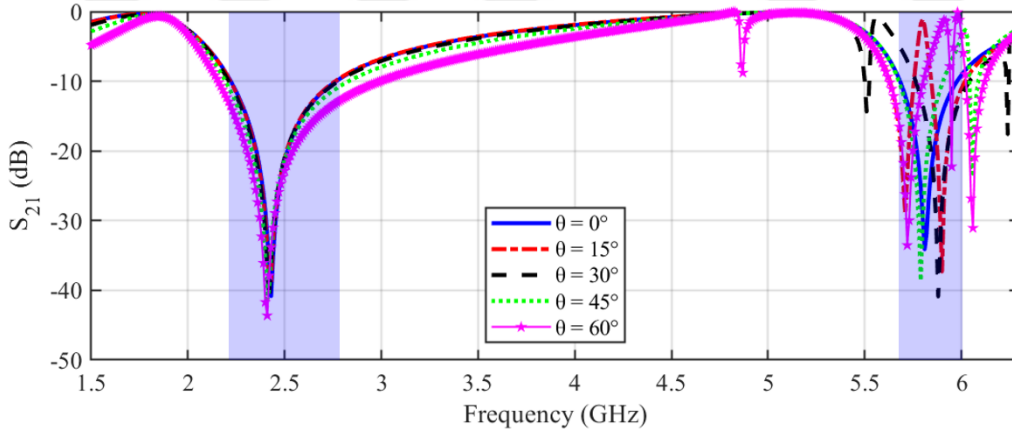
Açısal kararlılık analiz sonuçları incelendiğinde, Şekil 2.19. durum 1 için açısal kararlılık değerleri gösterilmektedir. Tasarlanan yapının durum 1 için değerlendirilmesi sonucunda, 30 dereceye kadar açısal kararlılık sergilediği görülmektedir. Bu durum, yapının belirli bir açısal aralık içerisinde kararlı bir performans gösterdiğini ve tasarımın hedeflenen gereksinimleri karşıladığını doğrulamaktadır. Özellikle, açısal kararlılığın bu seviyede

olması, yapının belirlenen uygulama alanlarında yüksek verimlilikle çalışabileceğini ortaya koymaktadır.



Şekil 2.19. YY-FSY durum 1 için açısal kararlılık (S_{21}) analiz sonuçları

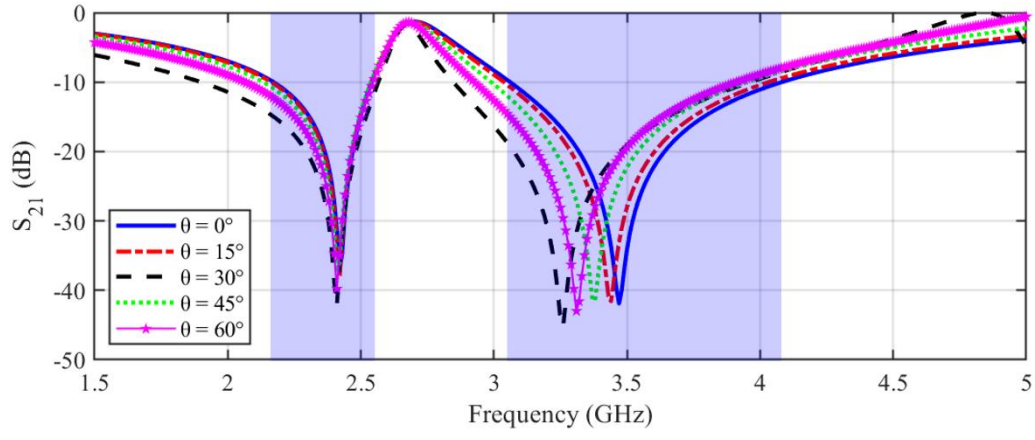
Analiz sonuçları incelendiğinde, tasarlanan yapının durum 2 için değerlendirilmesi sonucunda, Şekil 2.20’de gösterilmektedir. Durum 2 için ise 2.4 GHz frekansında 60 dereceye kadar açısal kararlılık sergilediği görülürken 5.8 GHz frekansı için belirli açılarda kararlılık sergilediği görülmektedir.



Şekil 2.20. YY-FSY durum 2 için açısal kararlılık (S_{21}) analiz sonuçları

Analiz sonuçları Şekil 2.21’de detaylı bir şekilde sunulmaktadır. Bu sonuçlar, tasarlanan yapının durum 3 için değerlendirilmesi sonucunda elde edilmiştir. İncelemeler, yapının 60 dereceye kadar etkili bir bant durdurma performansı sergilediğini göstermektedir. Bu, tasarımın belirli bir açısal aralık içerisinde stabil bir performans gösterebildiğini ve uygulama gereksinimlerini karşılayabildiğini göstermektedir. Özellikle, açısal

kararlılığın bu seviyede olması, yapının tasarım kriterleriyle uyumlu olduğunu ve belirli çalışma koşullarında kullanılabileceğini doğrulamaktadır.



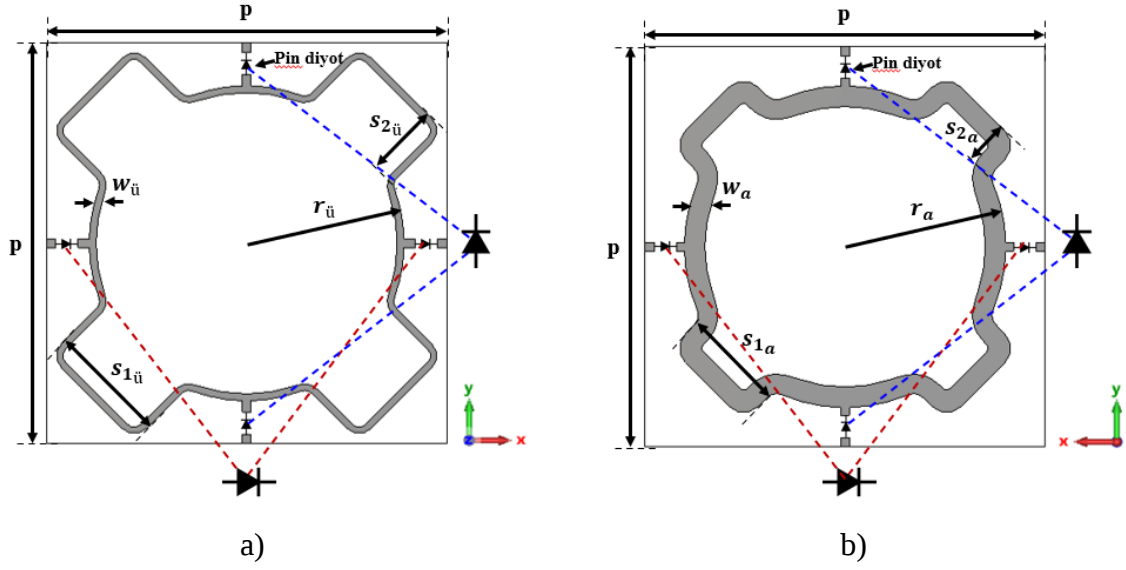
Şekil 2.21. YY-FSY durum 3 için açısal kararlılık (S_{21}) analiz sonuçları

3. BOYUTU KÜÇÜLTÜLMÜŞ, KOMPAKT YENİDEN YAPILANDIRILABİLİR FREKANS SEÇİCİ YÜZEY TASARIMI

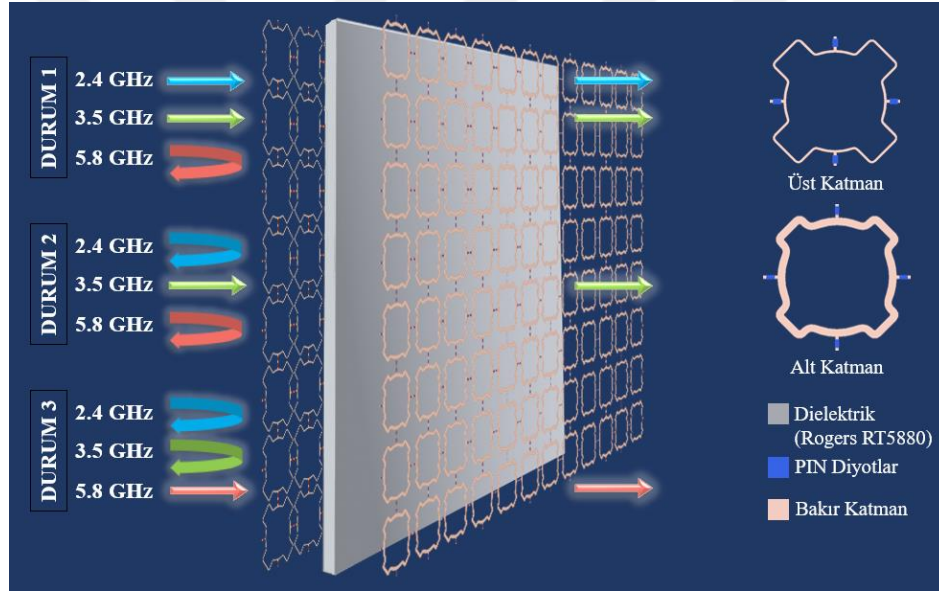
Frekans seçici yüzeylerin (FSY) küçültülmesi, modern elektronik sistemlerin kompakt ve taşınabilir tasarım gereksinimlerini karşılamak, hafif ve düşük profilli yapılar elde etmek, geniş bant çalışma yeteneğini artırmak ve yüksek frekanslı uygulamalarda verimli performans sağlamak için büyük bir önem taşımaktadır. Özellikle, küçük boyutlu FSY'ler, radar kesit alanını (RKA) azaltma, metamateryale teknolojileriyle entegrasyon sağlama ve üretim süreçlerini kolaylaştırma gibi birçok avantaj sunmaktadır. Bunun yanı sıra, bina cepheleri, cam yüzeyler veya giyilebilir cihazlar gibi estetik ve mühendislik kısıtlamaları bulunan uygulamalarda da boyutların küçültülmesi kritik bir gereklilik haline gelmektedir. FSY boyutlarının küçültülmesi yalnızca fiziksel boyutlarda değil, aynı zamanda performans optimizasyonunda da önemli zorluklar yaratmakta olup, bu zorlukların üstesinden gelmek için ileri tasarım yöntemleri ve detaylı modelleme tekniklerinin kullanılması gereklidir. Bu çalışmada, boyut küçültme amacı doğrultusunda tasarımı sunulan dairesel desenin kenar uzunlukları, dört köşeden eklenen kıvrım çıkıntıları ile optimize edilmektedir. Böylece dairesel yolun uzatılmasıyla istenilen frekans aralığında seçici özellik gösterecek bir yapı tasarımına ulaşılmaktadır. Bu yaklaşım, hem tasarımın boyutlarını küçültmekte hem de FSY'nin hedeflenen performansını koruyarak belirlenen frekans aralığında etkili bir şekilde çalışmasını sağlamaktadır.

3.1. KYY-FSY Birim Hücresi

CST Studio Suite yazılımı kullanılarak tasarlanan YY-FSY ile aynı S-parametrelerine sahip, boyutu daha küçük, polarizasyon kararlılığı ve açısal kararlılığa sahip birim hücre tasarımı için çeşitli benzetimler yapılmış ve bu benzetimlerin sonuçları analiz edilmektedir. Yapılan bu detaylı analizler sonucunda, Şekil 3.1'de verilen KYY-FSY tasarımı başarıyla ortaya çıkmıştır. Tasarımda, KYY-FSY'ye ait birim hücre boyutu 23,4 x 23,4 mm²'ye düşürülerek, birim hücre alanında %52,6 oranında bir küçültme sağlanmaktadır.



Şekil 3.1. KYY-FSY yüzey görüntüleri ve parametreleri a) ön yüzey b) arka yüzey



Resim 3.1. KYY-FSY'nin 3 boyutlu görseli ve farklı çalışma modları

CST Studio Suite yazılımı kullanılarak tasarlanan YY-FSY ile aynı S-parametrelerine sahip, boyutu daha küçük, polarizasyon kararlılığı ve açısal kararlılığa sahip birim hücre tasarımı için çeşitli benzetimler yapılmış ve bu benzetimlerin sonuçları dikkatlice analiz edilmiştir. Yapılan bu detaylı analizler sonucunda, Şekil 3.1'de verilen KYY-FSY tasarımı başarıyla ortaya çıkmıştır. Tasarımda, KYY-FSY'ye ait birim hücre boyutu 23,4 x 23,4 mm²'ye düşürülerek, birim hücre alanında %52,6 oranında bir küçültme sağlanmıştır. Bu küçültme, tasarımın daha kompakt hale gelmesini ve daha verimli bir şekilde kullanılmasını mümkün kılmaktadır. KYY-FSY tasarımının birim hücresi, YY-

FSY tasarımındaki yapıya benzer şekilde, üç katmandan oluşmaktadır. Üst yüzeyde bakır tabaka katmanı, ortada Rogers RT5880 dielektrik malzeme ve alt yüzeyde yine bakır katman yer almaktadır. Rogers RT5880 dielektrik malzemenin kalınlığı 1.57 mm, bakır katmanların kalınlığı ise 0.035 mm olarak belirlenmiştir. Tasarımda, ön yüzeyde bulunan PIN diyotlara ait pad'lerin genişliği 0.5 mm, dış pad'lerin uzunluğu 0.55 mm ve iç pad'lerin uzunluğu 0.65 mm olarak tasarlanmıştır. Arka yüzeyde ise PIN diyotlara ait pad'lerin genişliği yine 0.5 mm, dış pad'lerin uzunluğu 0.55 mm ve iç pad'lerin uzunluğu 0.45 mm olarak belirlenmiştir. Bu parametreler, tasarımın işlevselliğini ve verimliliğini artıracak şekilde optimize edilmiştir. Tasarlanan KYY-FSY'nin ön ve arka yüzeylerine ait tüm bu parametreler, Çizelge 3.1'de ayrıntılı bir şekilde verilmiş olup, bu veriler tasarımın doğruluğunu ve hedeflenen performansı sağlamak için kritik öneme sahiptir. Yapılan bu analiz ve tasarım iyileştirmeleri, daha küçük boyutlu, yüksek performanslı ve uygulama alanlarına daha uyumlu frekans seçici yüzeylerin geliştirilmesine katkı sağlamaktadır. Tasarım parametrelerinde bulunan p =birim hücre uzunluğunu, $r_{\bar{u}}$ = üst yüzey daire yarıçapını, r_a = alt yüzey daire yarıçapını, $w_{\bar{u}}$ = üst yüzey daire iletken genişliğini, w_a = alt yüzey daire iletken genişliğini, $s_{1\bar{u}}$ = üst yüzey dikdörtgen çıkıntının uzunluğunu, $s_{2\bar{u}}$ = üst yüzey dikdörtgen çıkıntının genişliğini, s_{1a} = alt yüzey dikdörtgen çıkıntının uzunluğunu, s_{2a} = alt yüzey dikdörtgen çıkıntının genişliğini ifade etmektedir.

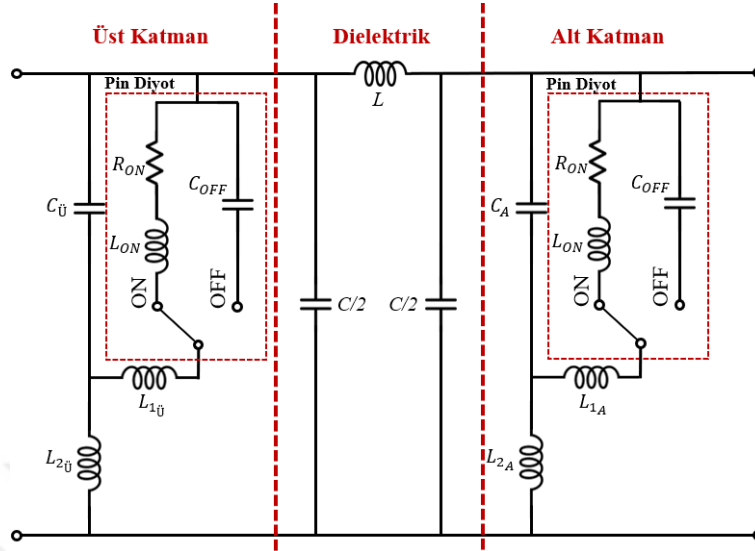
Çizelge 3.1. KYY-FSY tasarım parametreleri

Parametre	Değer (mm)
p	23,4
$r_{\bar{u}}$	9,2
r_a	9,4
$w_{\bar{u}}$	0,4
w_a	1,2
$s_{1\bar{u}}$	7
$s_{2\bar{u}}$	4
s_{1a}	6
s_{2a}	2

3.2. KYY-FSY Birim Hücresi Eşdeğer Devre Modeli

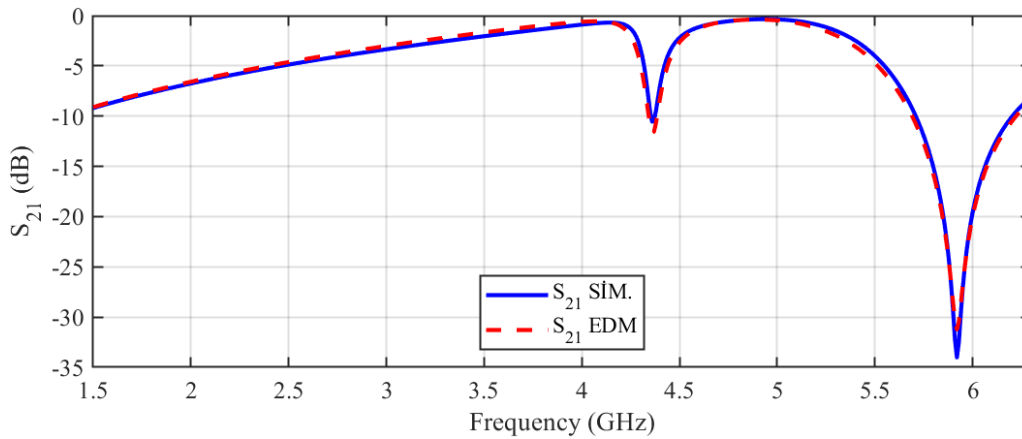
Şekil 3.2'de KYY-FSY birim hücresinin durum 1 için eşdeğer devre modeli sunulmaktadır. Eşdeğer devre modelinin benzetimleri CST Studio Suite yazılımı ile yapılarak analiz edilmiştir. Devre modelinde bulunan elektronik devre elemanlarına ait

değerler sırasıyla $C_{\bar{U}}=0,304$ pF, $R_{ON}=1,5$ Ohm, $L_{ON}=0,75$ nH, $L_{1\bar{U}}=2,85$ nH, $L_{2\bar{U}}=7$ nH, $L=4$ nH, $C=0,07$ pF, $C_A=0,423$ pF, $L_{1A}=2,85$ nH, $L_{2A}=25$ nH olarak belirlenmiştir.



Şekil 3.2. KYY-FSY hücresine ait durum 1 için eşdeğer devre modeli

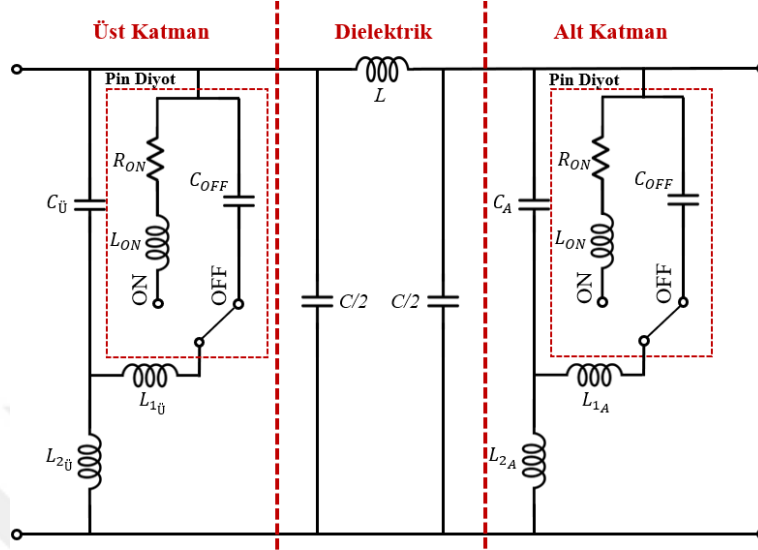
Şekil 3.3'te ise KYY-FSY hücresine ait simülasyon sonuçları ile eşdeğer devre modeline ait (S_{21}) iletim katsayıları yer almaktadır. Sonuçlar incelendiğinde birim hücreye ait simülasyon (S_{21}) iletim katsayıları ile eşdeğer devre modeli (S_{21}) iletim katsayılarının uyumlu olduğu görülmektedir.



Şekil 3.3. KYY-FSY hücresine ait durum 1 için simülasyon ve eşdeğer devre modeli (S_{21}) iletim katsayıları

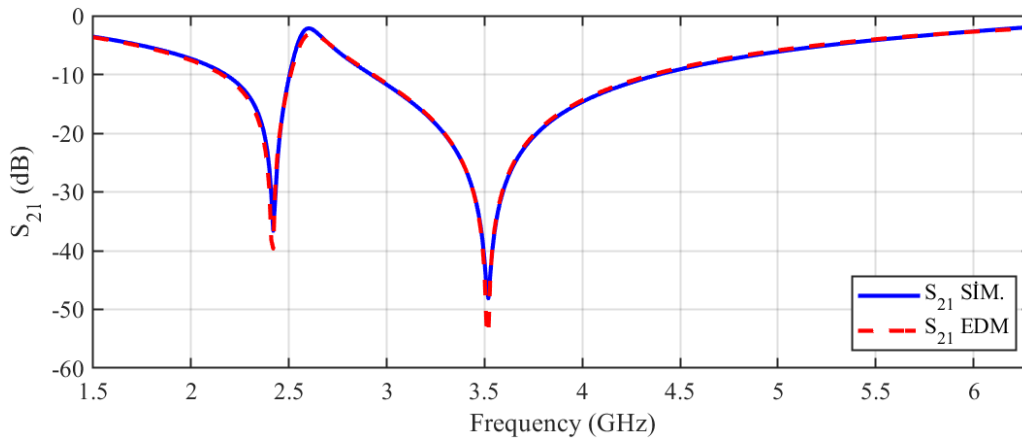
Şekil 3.4'te KYY-FSY birim hücresinin durum 2 için eşdeğer devre modeli sunulmaktadır. Eşdeğer devre modelinin benzetimleri CST Studio Suite yazılımı ile yapılarak analiz edilmiştir. Devre modelinde bulunan elektronik devre elemanlarına ait

yapılarak analiz edilmiştir. Devre modelinde bulunan elektronik devre elemanlarına ait değerler sırasıyla $C_{\bar{U}}=0,022$ pF, $C_{OFF}=0,2$ pF, $L_{1\bar{U}}=1,9$ nH, $L_{2\bar{U}}=18$ nH, $L=4$ nH, $C=0,07$ pF, $C_A=0,0397$ pF, $L_{1A}=2,15$ nH, $L_{2A}=7$ nH olarak belirlenmiştir.



Şekil 3.6. KYY-FSY hücresine ait durum 3 için eşdeğer devre modeli

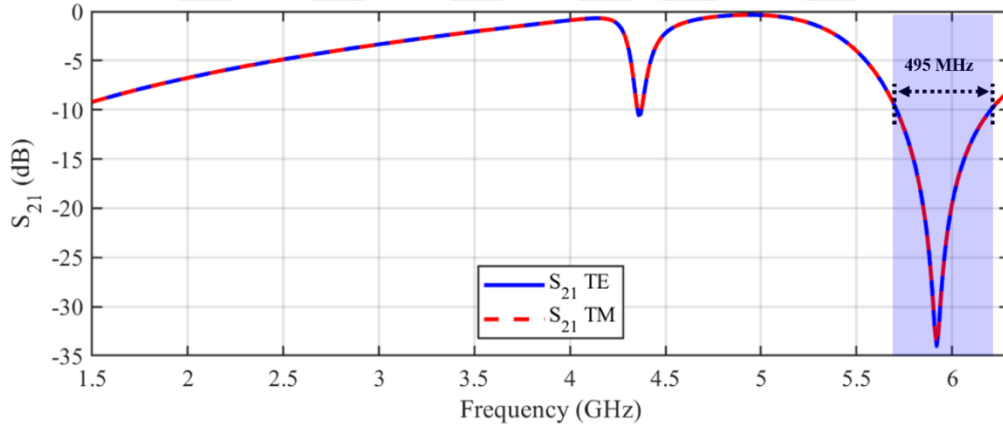
Şekil 3.7’de ise KYY-FSY hücresine ait simülasyon sonuçları ile eşdeğer devre modeline ait (S_{21}) iletim katsayıları yer almaktadır. Sonuçlar incelendiğinde birim hücreye ait simülasyon (S_{21}) iletim katsayıları ile eşdeğer devre modeli (S_{21}) iletim katsayılarının uyumlu olduğu görülmektedir.



Şekil 3.7. KYY-FSY hücresine ait durum 3 için simülasyon ve eşdeğer devre modeli (S_{21}) iletim katsayıları

3.3. Analiz Sonuçları

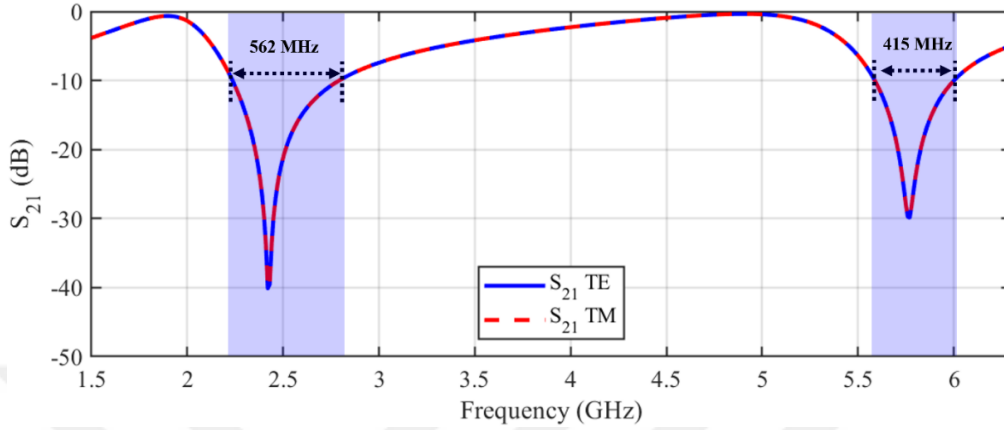
Bu tez çalışmasında tasarımı yapılan KYY-FSY'ye ait analiz sonuçları Şekil 3.8'de detaylı bir şekilde incelendiğinde, TE/TM modunda 495 MHz'lik bir bant genişliği değeri elde edilmektedir. Bu sonuç, durum 1 için yapılan analizlerde belirginleşmiş ve söz konusu durumun kararlı bir şekilde çalıştığını göstermektedir. Elde edilen bant genişliği, tasarlanan yapının belirli bir frekans aralığında etkin bir şekilde fonksiyon gösterdiğini ve sistemin performansının güvenilir olduğunu ortaya koymaktadır. Durum 1'in kararlılığı, tasarımın bu frekans aralığında istenen elektromanyetik özellikleri tutarlı bir şekilde sağladığını gösterirken, aynı zamanda polarizasyon kararlılığına sahip olduğu da gözlemlenmektedir. Polarizasyon kararlılığı, yapının farklı polarizasyon açılarına karşı duyarsız olmasını ve her iki modda da etkili bir performans sergilemesini sağladığından, tasarımın çeşitli uygulama senaryolarında daha geniş bir kullanım alanına sahip olmasını mümkün kılmaktadır. Bu bağlamda, YY-FSY'nin polarizasyon kararlılığı, yapının çoklu uygulamalara uyum sağlama yeteneğini artırmakta ve sistemdeki verimliliği üst düzeye çıkarmaktadır.



Şekil 3.8. KYY-FSY durum 1 için TE ve TM modunda (S_{21}) iletim katsayıları

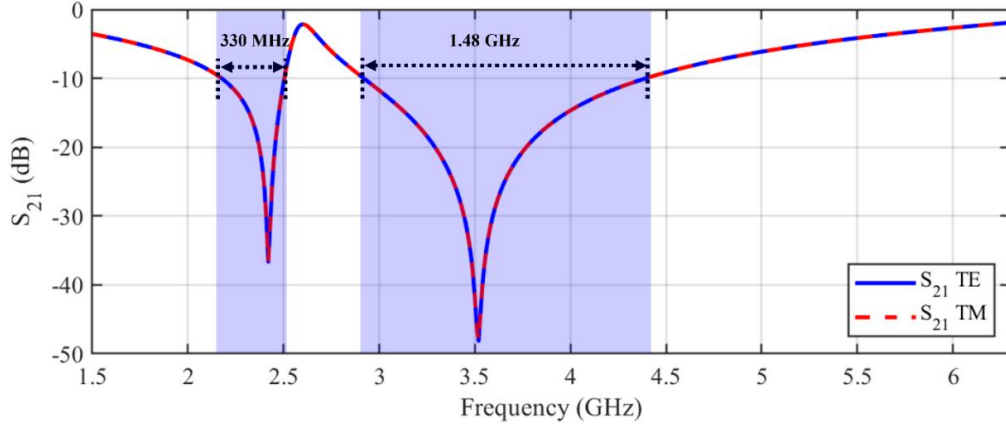
Durum 2'ye ait TE/TM mod analizi incelendiğinde, bu durumda elde edilen sonuçlar oldukça tatmin edici olup, 562 MHz'lik bant genişliği değeri ve 415 MHz'lik bant genişliği sağlanmıştır. Bu, tasarımın geniş bir frekans aralığında etkili bir şekilde çalışabileceğini ve verimli performans sunduğunu göstermektedir. Durum 2'de elde edilen bu bant genişlikleri, tasarlanan yapının yüksek frekanslı uygulamalarda da güvenilir sonuçlar verdiğini ve sistemin istenilen özellikleri belirli sınırlar içinde koruyarak stabil çalıştığını işaret etmektedir. Ayrıca, her iki modda, yani TE ve TM modlarında da polarizasyon kararlılığı sağlanmış olup, bu durum tasarımın hem lineer

hem de sarmal polarizasyonlarda tutarlı performans gösterdiğini ortaya koymaktadır. Polarizasyon kararlılığı, tasarımın farklı çevresel faktörlere ve uygulamalara karşı duyarsız olmasını sağlamakta, böylece sistemin her iki polarizasyonda da etkili bir şekilde çalışmasına olanak tanımaktadır.



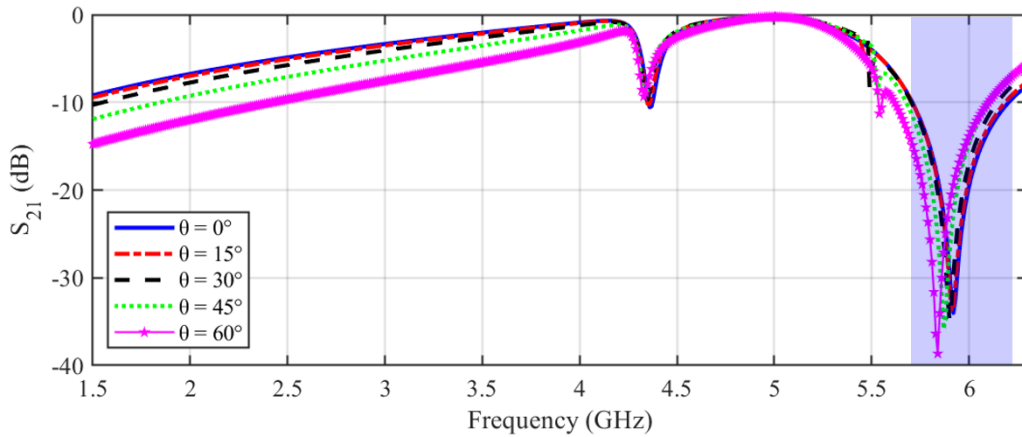
Şekil 3.9. KY-Y-FSY durum 2 için TE ve TM modunda (S_{21}) iletim katsayıları

Durum 3 incelendiğinde, yapılan analizler sonucunda hem TE hem de TM modlarında sırasıyla 330 MHz ve 1.48 GHz bant genişliği değerleri elde edilmektedir. Bu sonuçlar, Şekil 3.10'da detaylı bir şekilde gösterilmekte ve bu geniş bant genişliği değerleri, tasarımın geniş frekans aralıklarında etkin bir şekilde çalışabileceğini ve verimli bir performans sunduğunu açıkça ortaya koymaktadır. Elde edilen bu bant genişlikleri, sistemin frekanslar arasındaki geçişlerdeki kararlılığını ve genişletilmiş kullanım alanlarını da yansıtmaktadır. Durum 3'ün analiz sonuçlarına bakıldığında, durum 1 ve durum 2'de olduğu gibi, durum 3'te de polarizasyon kararlılığı sağlanmaktadır. Polarizasyon kararlılığı, tasarımın farklı polarizasyon açılarına karşı duyarsız olmasını ve her iki modda da etkili bir performans sergilemesini sağlayarak, tasarımın çeşitli uygulama senaryolarına daha iyi uyum sağlamasına olanak tanımaktadır. Bu durum, sistemin stabilitesinin ve güvenilirliğinin arttığını, farklı çevresel koşullar altında bile kararlı bir şekilde çalışmaya devam edeceğini göstermektedir. Durum 3'ün sonuçları, daha geniş frekans aralıklarında ve çeşitli polarizasyon modlarında kararlı çalışma sağlayarak, bu tasarımın çoklu uygulamalarda yüksek performans sunma kapasitesini desteklemektedir.



Şekil 3.10. KYF-FSY durum 3 için TE ve TM modunda (S_{21}) iletim katsayıları

Şekil 3.11'de, durum 1 için yapılan açısal kararlılık analizi detaylı bir şekilde sunulmaktadır. Bu analiz, tasarımın farklı açılarda nasıl performans gösterdiğini ve özellikle açısal değişimlere karşı ne kadar stabil olduğunu değerlendirmek amacıyla yapılmaktadır. Yapılan incelemelere göre, sunulan tasarımın açısal kararlılık değeri, 60 dereceye kadar kararlı bir şekilde devam etmektedir. Bu, tasarımın, belirli bir açı aralığında bile istenilen performansı sürdürmeye devam ettiğini ve yüksek verimlilikle çalıştığını göstermektedir. Açısal kararlılık, elektromanyetik dalga iletim sistemlerinde önemli bir parametre olup, tasarımın çevresel etkilere ve açı değişimlerine karşı duyarsız olmasını sağlamaktadır. Durum 1'in 60 dereceye kadar kararlı kalması, tasarımın hem esnekliğini hem de geniş uygulama alanlarında kullanılabilirliğini artırmaktadır. Bu özellik, farklı yönlerden gelen sinyallere veya cihazın hareket etmesine karşı sistemin performansını koruyarak, uygulamalarda verimli bir şekilde kullanılmasını mümkün kılmaktadır.



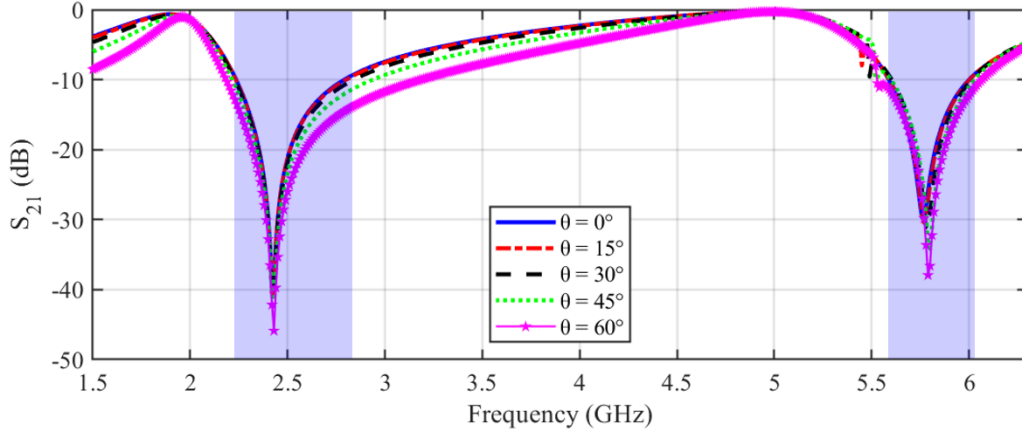
Şekil 3.11. KYF-FSY durum 1 için açısal kararlılık (S_{21}) analiz sonuçları

Çizelge 3.2'de, her 15 derecelik bir artışla merkez frekansındaki elektromanyetik dalganın geliş açısına bağlı olarak frekans değişimlerinin sapma miktarları sunulmaktadır. Bu çizelgede, belirli açılar için frekans değerleri ve bunların sapma yüzdeleri verilmektedir, böylece tasarımın farklı geliş açılarına karşı gösterdiği kararlılık daha net bir şekilde gözlemlenebilir. Verilen frekans değerleri, sistemin açısal değişikliklere karşı nasıl tepki verdiğini ve bu değişikliklerin tasarımın performansı üzerindeki etkisini ortaya koymaktadır. Örneğin, 0°'de frekans 5.92 GHz olarak ölçülmekte ve herhangi bir sapma gözlemlenmemektedir (0%). Ancak, 15°'de de frekans değeri yine 5.92 GHz olup, frekans değerinde herhangi bir sapma olmadığı görülmektedir. Bu, başlangıçtaki frekans değerinin oldukça stabil olduğunu göstermektedir. 30°'de frekans değeri 5.90 GHz'e düşerken, sapma %0.34 olarak kaydedilmiştir, bu da açısal değişimin tasarım üzerindeki minimal etkisini göstermektedir. 45°'te frekans 5.87 GHz'e inerken, sapma oranı %0.84'e yükselmiştir, bu da açının artmasıyla birlikte frekansın biraz daha değişim gösterdiğini göstermektedir. Son olarak, 60°'de frekans 5.84 GHz'e düşerken, sapma miktarı %1.35'e çıkarak en yüksek değere ulaşmaktadır. Bu veriler, tasarımın açısal kararlılığının incelenmesi için oldukça faydalıdır, çünkü her bir açıdaki frekans sapmalarının ne kadar küçük olduğunu gözler önüne sermektedir. Bu tür analizler, tasarımın hangi açılarda ne kadar kararlı çalıştığını anlamak ve sistemin performansını optimize etmek için kritik bir öneme sahip olmaktadır. Bu sonuçlar, tasarımın farklı açılarda da yüksek verimlilikle çalışabileceğini, ancak bazı açılarda küçük sapmaların görülebileceğini göstermektedir.

Çizelge 3.2. KYY-FSY durum 1 için frekans ve sapma değerleri

Frekans	DURUM 1									
	0°		15°		30°		45°		60°	
	f (GHz)	Sapma	f (GHz)	Sapma	f (GHz)	Sapma	f (GHz)	Sapma	f (GHz)	Sapma
5.8 GHz	5,92	0%	5,92	0,0%	5,90	0,34%	5,87	0,84%	5,84	1,35%

Şekil 3.12'de, Durum 2 için yapılan açısal kararlılık grafiği gösterilmektedir. Yapılan analizlere göre, 0°'den 60°'ye kadar olan açılar için frekans değerlerinin çok küçük sapmalarla korunduğu gözlemlenmektedir. Çizelge 3.2 ile karşılaştırıldığında, Durum 1 ve Durum 2 arasındaki açısal kararlılık farkları dikkatlice incelendiğinde, her iki durumda da frekansın büyük ölçüde stabil kaldığı ancak küçük farkların olduğu görülmektedir.



Şekil 3.12. KYF-FSY durum 2 için açısal kararlılık (S_{21}) analiz sonuçları

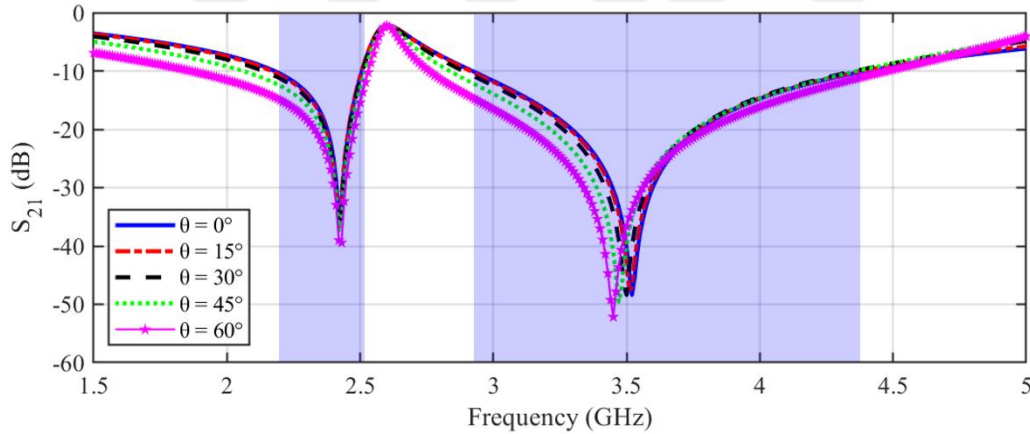
Durum 2 için verilen frekans değerleri ve bunlara ait sapma miktarları, açısal değişimlere karşı gösterilen kararlılığı net bir şekilde yansıtmaktadır. Frekans değerlerinin 0° 'deki başlangıç değeri olan 2.42 GHz, diğer açılarda da sabit kalmış ve hiçbir sapma gözlemlenmemiştir. 15° 'de yine frekans değeri 2.42 GHz olarak kalırken, sapma oranı %0 olarak kaydedilmiştir. Bu, 15° 'lik açıda frekansın tamamen stabil olduğunu ve tasarımın açısal kararlılığının oldukça yüksek olduğunu gösterir. 30° 'de de frekans aynı değeri koruyarak 2.42 GHz'de sabit kalmış ve sapma yine %0 olmuştur. 45° 'te de frekans 2.42 GHz'e ulaşırken, sapma miktarı yine 0%'dir. 60° 'de de frekans değişimi gözlemlenmemiş ve 2.42 GHz'de kalmıştır. Bu veriler, Durum 2'nin frekansının açısal değişimlere karşı oldukça duyarsız olduğunu ve sistemin yüksek stabiliteye sahip olduğunu ortaya koymaktadır. 5.8 GHz frekansındaki sapmalar ise Durum 2'de daha belirgin hale gelmiştir. 0° 'de 5.77 GHz olarak ölçülen frekans, 15° 'de de aynı değeri korumuş ve sapma %0 olarak kalmıştır. 30° 'de frekans 5.79 GHz'e çıkarken, sapma oranı %0.35 olarak kaydedilmiştir. Bu küçük artış, sistemin açı değişikliklerine karşı hafif bir duyarlılık gösterdiğini, ancak genel olarak kararlı bir performans sergilediğini gösterir. 45° 'te frekans 5.80 GHz'e yükselmiş ve sapma oranı %0.52 olarak hesaplanmaktadır. 60° 'de ise frekans 5.79 GHz'e gerileyerek sapma oranı %0.35 olmaktadır. Bu veriler, Durum 2'nin 5.8 GHz frekansında da açısal kararlılığı sağlamaya devam ettiğini ancak bu frekansta küçük dalgalanmaların gözlemlenebileceğini ortaya koymaktadır. Sonuç olarak, Durum 2'nin açısal kararlılığı, her iki frekansta da oldukça yüksek olup, 60° 'ye kadar minimal sapmalarla stabil kalmaktadır. Bu, tasarımın farklı açılarda güvenilir bir performans sergileyebileceğini ve genel olarak kararlı çalışabileceğini göstermektedir. Durum 1 ile karşılaştırıldığında, Durum 2'nin daha geniş bir frekans aralığında stabil

kalması ve 5.8 GHz'deki küçük sapmalarına rağmen frekans değerinin hala kabul edilebilir bir sınırdaki kalması, sistemin yüksek performansını desteklemektedir.

Çizelge 3.3. KYY-FSY durum 2 için frekans ve sapma değerleri

Frekans	DURUM 2									
	0°		15°		30°		45°		60°	
	f (GHz)	Sapma	f (GHz)	Sapma	f (GHz)	Sapma	f (GHz)	Sapma	f (GHz)	Sapma
2.4 GHz	2,42	0%	2,42	0,0%	2,42	0,00%	2,42	0,00%	2,42	0,00%
5.8 GHz	5,77	0%	5,77	0,0%	5,79	-0,35%	5,80	-0,52%	5,79	-0,35%

Şekil 3.13'te, Durum 3 için yapılan açısal kararlılık analizleri sunulmaktadır. Yapılan incelemelere göre, 0°'den 60°'ye kadar olan açılar arasında frekans değerlerinde yalnızca küçük sapmalar olmasına rağmen açısal kararlılık 60 dereceye kadar korunmaktadır. Çizelge 3.4 ile karşılaştırıldığında, Durum 3'ün frekans değişimleri, diğer durumlara kıyasla daha belirgin sapmalar göstermektedir, ancak yine de sistemin genel kararlılığı büyük ölçüde korunmaktadır.



Şekil 3.13. KYY-FSY durum 3 için açısal kararlılık (S_{21}) analiz sonuçları

2.4 GHz frekansındaki sapmalar: 0°'de frekans değeri 2.42 GHz olarak ölçülmüş ve herhangi bir sapma gözlemlenmemiştir. 15°'de frekans yine 2.42 GHz olarak kalmış, sapma oranı %0 olmuştur. 30°, 45° ve 60°'de de frekans değeri sabit kalmış ve her üç açı için de sapma oranı sırasıyla %0, %0 ve %0 olmuştur. Bu, Durum 3'ün 2.4 GHz frekansındaki açısal kararlılığının çok yüksek olduğunu ve hiçbir açısal değişiklikle frekansın değiştirilmediğini göstermektedir. Yani, 2.4 GHz'de tasarım, herhangi bir açıya duyarlı olarak kararlılığını korumaktadır. 3.5 GHz frekansındaki sapmalar: 0°'de frekans değeri 3.52 GHz ve sapma oranı %0 olarak simüle edilmektedir. 15°'de frekans

değeri 3.51 GHz'e düşmüş, ancak sapma oranı %0.3 ile oldukça düşük kalmıştır. 30°'de frekans değeri 3.50 GHz'e inmiş ve sapma %0.57'ye çıkmıştır. 45°'te ise frekans 3.47 GHz'e düşerken, sapma oranı %1.42 olmuştur. Son olarak, 60°'de frekans 3.45 GHz'e gerileyerek sapma oranı %1.99'a ulaşmıştır. Bu değişimler, Durum 3'ün 3.5 GHz frekansında açısal değişimlere karşı biraz daha hassas olduğunu ve 60°'ye kadar frekansın belirli bir oranda değiştiğini göstermektedir. Ancak, frekans kaymaları genel olarak düşük seviyelerde kalmıştır ve sistem hala büyük ölçüde stabil bir şekilde çalışmaktadır.

Çizelge 3.4. KYY-FSY durum 3 için frekans ve sapma değerleri

Frekans	DURUM 3									
	0°		15°		30°		45°		60°	
	f (GHz)	Sapma	f (GHz)	Sapma	f (GHz)	Sapma	f (GHz)	Sapma	f (GHz)	Sapma
2.4 GHz	2,42	0%	2,42	0,0%	2,42	0,00%	2,42	0,00%	2,42	0,00%
3.5 GHz	3,52	0%	3,51	0,3%	3,50	0,57%	3,47	1,42%	3,45	1,99%

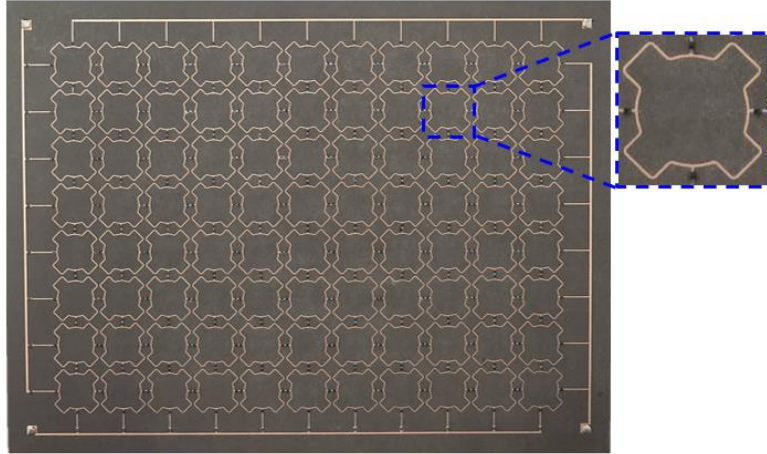
Durum 1, durum 2, durum 3 için açısal kararlılık analizlerinin karşılaştırılması yapılmaktadır. (Durum 1) ve Çizelge 3.3 (Durum 2) ile karşılaştırıldığında, Durum 3'teki 2.4 GHz frekansı, açısal kararlılık açısından çok benzer sonuçlar göstermektedir. Her iki durumda da 0°'den 60°'ye kadar frekans değeri sabit kalmakta ve hiçbir sapma gözlemlenmemektedir. Ancak 3.5 GHz frekansında, Durum 3'ün sapmaları, Durum 1 ve Durum 2'ye göre daha belirgindir. Özellikle 45° ve 60°'deki sapmalar, Durum 3'ün 3.5 GHz frekansında biraz daha yüksek olduğunu göstermektedir. Bu fark, Durum 3'ün açısal kararlılık açısından diğer durumlarla karşılaştırıldığında daha geniş bir frekans aralığında çalışmaya devam etse de, belirli bir açı aralığında daha büyük frekans kaymaları gösterdiğini ortaya koymaktadır.



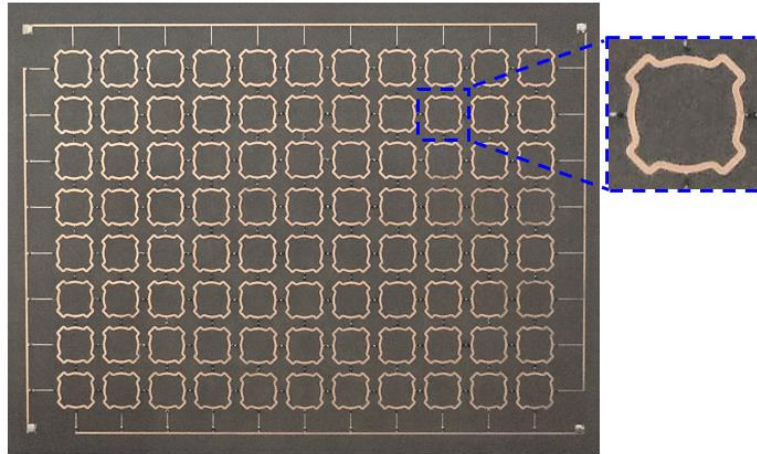
4. DENEYSEL DOĞRULAMA

4.1. Üretim

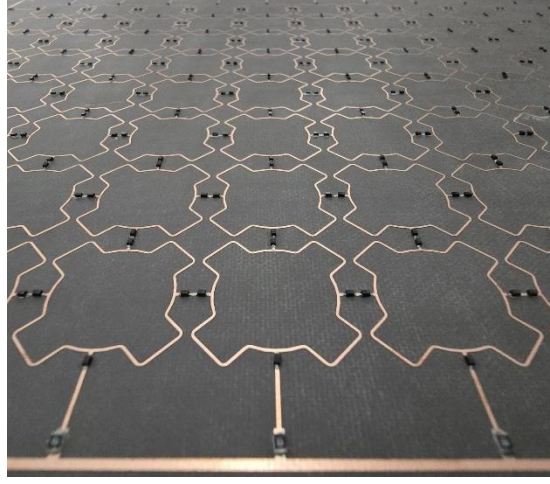
Tasarımı yapılan FSY'nin analiz sonuçlarını doğrulamak amacıyla prototipi üretilmiştir. Üretimi yapılan FSY 8x11 birim hücreden oluşmakta olup dikdörtgen yapıdadır. Üretimde 35µm bakır katmanına sahip Rogers RT5880 dielektrik malzeme kullanılmış olup 187,2 x 257,4 mm² boyuta sahiptir. Ayrıca pin diyetler üzerinden geçen akımı sınırlamak amacıyla ön ve arka yüzeyde bulunan yatay ve dikey konumdaki dizilerin her birine 100 Ω direnç eklenmiştir. Üretilen FSY'nin prototip görüntüleri Şekil 4.1'de verilmiştir.



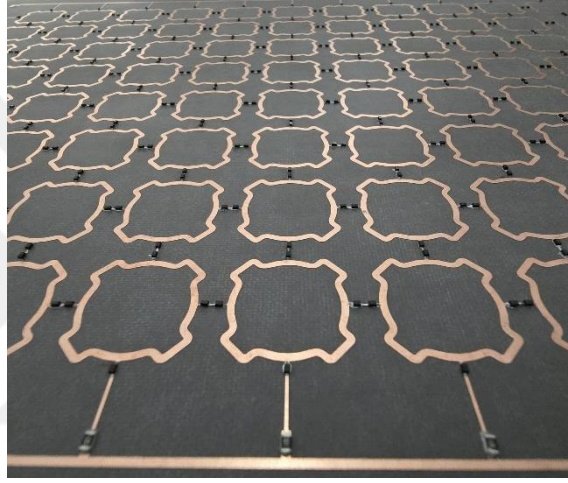
a)



b)



c)

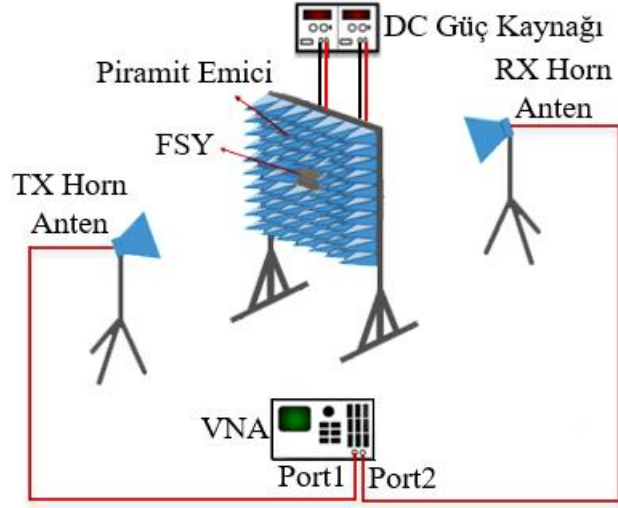


d)

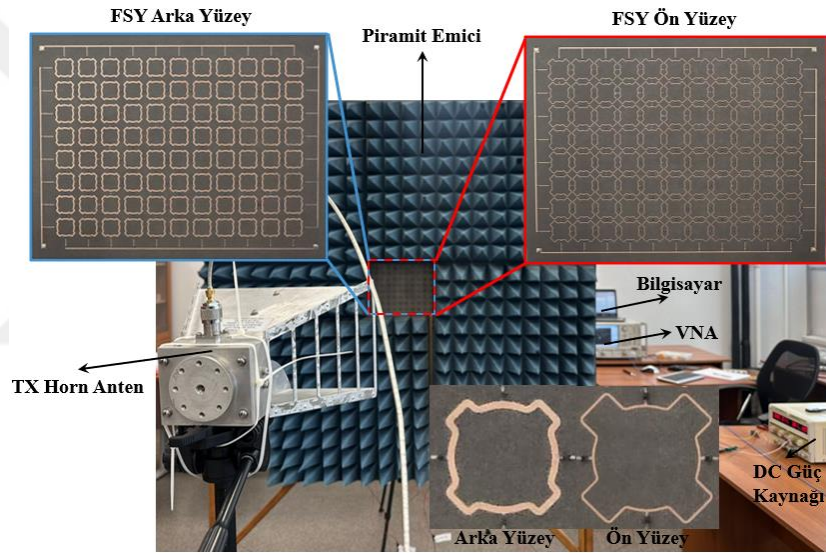
Şekil 4.1. FSY Prototipi, a) Ön yüzey ve genişletilmiş görünüm, b) Arka yüzey ve genişletilmiş görünüm, c) Ön yüzey perspektif görünümü, d) Arka yüzey perspektif görünümü

4.2. Ölçüm Düzenegi

Üretimi yapılan prototip FSY'nin S_{21} (iletim katsayısı) ölçümleri hazırlanan ölçüm düzenegi ile yapılmıştır. Ölçüm düzenegi TX (verici) horn anten, RX (alıcı) horn anten, antenler arasında bulunan FSY ve piramit emicilerden oluşan bir platform, vektör ağ analizörü (VNA) ve DC güç kaynağından oluşmaktadır. Hazırlanan ölçüm düzenegi Şekil 4.2'de verilmiştir.



a)



b)

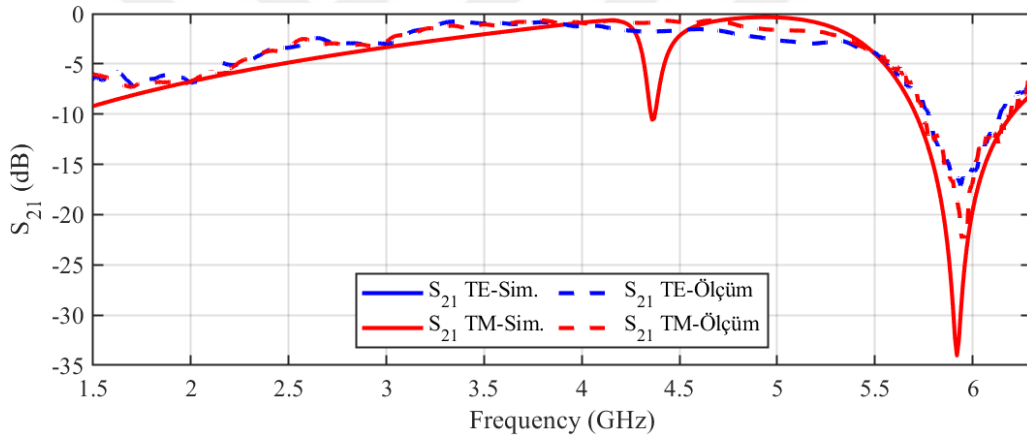
Şekil 4.2. Ölçüm düzeneği, a) Ölçüm düzeneğinin şematik görünümü, b) Ölçüm düzeneği görünümü

Ölçüm düzeneğinde A-INFO marka LB-8180-NF model horn antenler kullanılmıştır. Kullanılan bu horn antenler 0,8 ile 18 GHz arasında çalışmaktadır. Vektör ağ analizör (VNA) cihazı olarak ise 10 MHz ile 40,5 GHz arasında ölçüm yapabilen Anritsu markasının MS4644A modeli kullanılmıştır. DC güç kaynağı olarak ise 0 – 30V arasında ayarlanabilir çıkış gerilimine, 0 – 3A arasında ayarlanabilir çıkış akımına sahip TT TECHNIC MCH303D-II cihazı kullanılmıştır. Üretilen prototip FSY horn antenler arasında bulunan platformda açılan boşluğa yerleştirilmiştir. Horn antenler ve network ağ analizörü arasındaki kablo bağlantıları bu ölçüm düzeneği ile uygun olacak şekilde

yapılmıştır. Ölçüm yapılmadan önce kalibrasyon kiti kullanılarak network ağ analizörünün kalibrasyonu yapılmıştır. Gerekli kalibrasyon işlemleri yapıldıktan sonra üretilen prototip FSY'nin TE modunda S_{21} (iletim katsayısı) ölçümleri yapılmıştır. TM mod ölçümleri için platformda prototipin 90 derece döndürülmüş boyutlarında boşluk açılmış ve prototip buraya yerleştirilerek FSY'nin TM modunda S_{21} (iletim katsayısı) ölçümleri yapılmıştır.

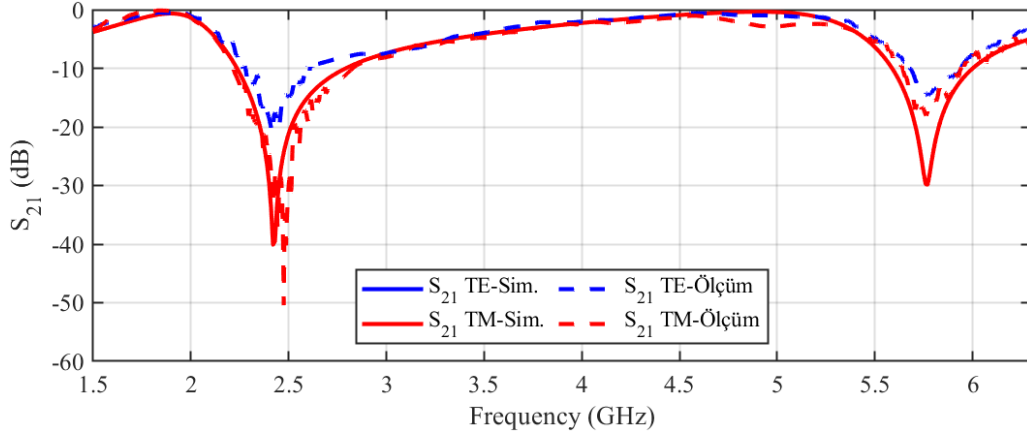
4.3. Ölçüm Sonuçları

Şekil 4.3'te durum 1 için TE ve TM modunda yapılan ölçüm sonuçları ve simülasyon sonuçları sunulmuştur. Ölçüm sonuçları ve simülasyon sonuçları karşılaştırıldığında, simülasyon sonuçlarında 4,36 GHz frekansında görülen durdurma karakteristiğinin ölçüm sonuçlarında görülmediği, bu anlamda üretilen FSY'nin simülasyon sonucuna göre daha iyi bir performans gösterdiği anlaşılmaktadır.



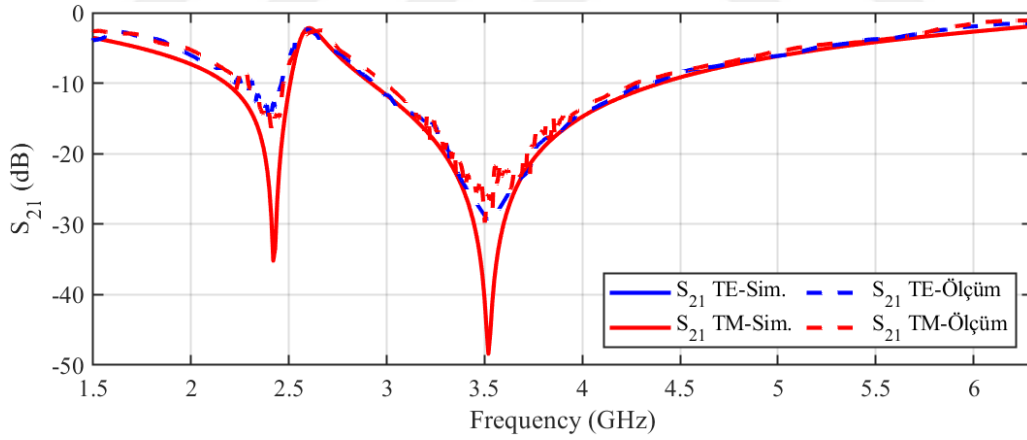
Şekil 4.3. Durum 1 için TE ve TM mod ölçüm sonuçları

Şekil 4.4'te durum 2 için TE ve TM modunda yapılan ölçüm sonuçları ve simülasyon sonuçları sunulmuştur. Ölçüm sonuçları ve simülasyon sonuçları karşılaştırıldığında ölçüm sonuçlarına ait S_{21} iletim katsayısı değerlerinde farklılıklar görülse de durdurulmak istenen 2,4 GHz ve 5,8 GHz rezonans frekanslarını kapsadığı görülmektedir. Bu anlamda üretilen FSY'nin TE ve TM modunda simülasyon sonuçları ile uyumlu olduğu söylenebilir.



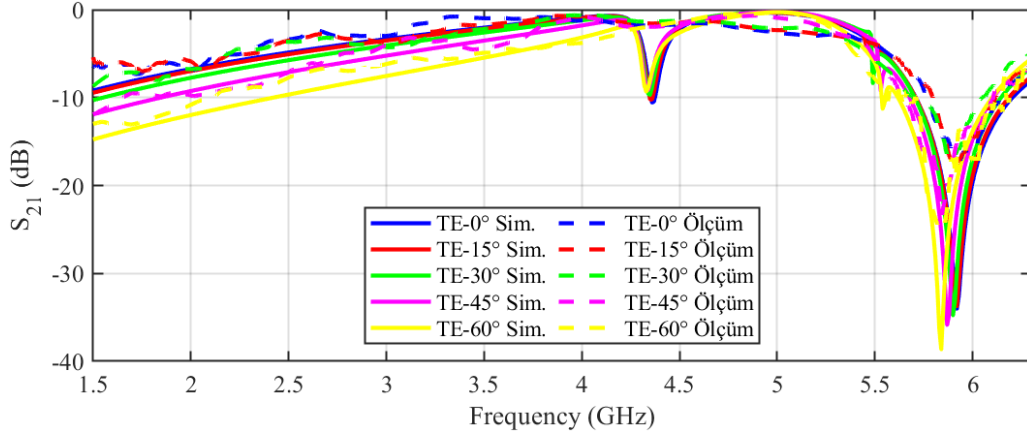
Şekil 4.4. Durum 2 için TE ve TM mod ölçüm sonuçları

Şekil 4.5'te durum 3 için TE ve TM modunda yapılan ölçüm sonuçları ve simülasyon sonuçları sunulmuştur. Ölçüm sonuçları ve simülasyon sonuçları karşılaştırıldığında ölçüm sonuçlarına ait S_{21} iletim katsayısı değerlerinde farklılıklar görülse de durdurulmak istenen 2,4 GHz ve 3,5 GHz rezonans frekanslarını kapsadığı görülmektedir. Bu anlamda üretilen FSY'nin TE ve TM modunda simülasyon sonuçları ile uyumlu olduğu söylenebilir.



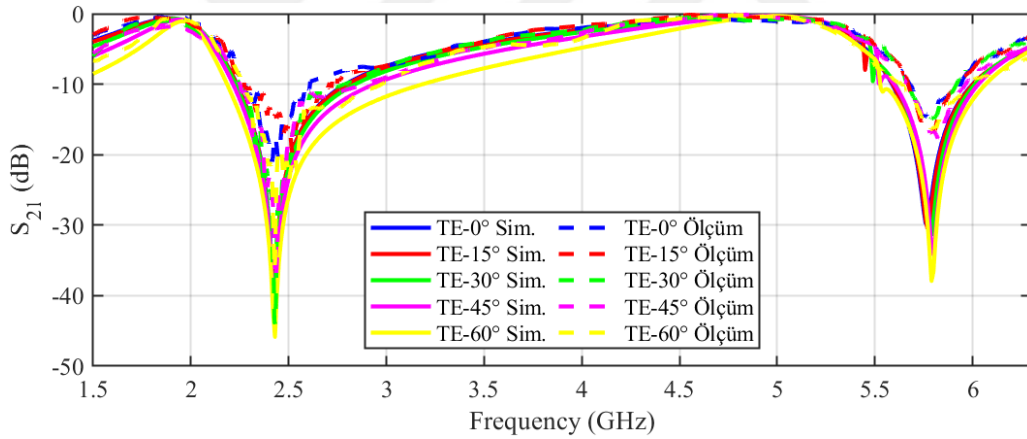
Şekil 4.5. Durum 3 için TE ve TM mod ölçüm sonuçları

Şekil 4.6'da durum 1 için açısız değişime göre TE modunda yapılan ölçüm sonuçları ve simülasyon sonuçları sunulmuştur. Ölçüm sonuçları ve simülasyon sonuçları karşılaştırıldığında açı değiştikçe üretilen FSY'nin kararlı bir davranış sergilediği bu anlamda simülasyon sonuçları ile uyumlu olduğu görülmektedir.



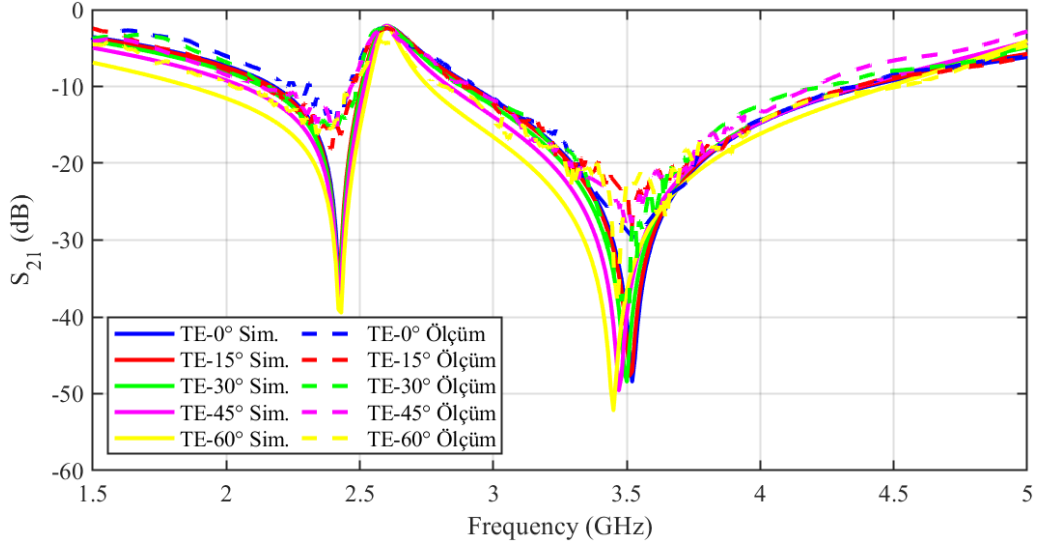
Şekil 4.6. Durum 1 için TE mod açısal kararlılık ölçüm sonuçları

Şekil 4.7’de durum 2 için açısal değişime göre TE modunda yapılan ölçüm sonuçları ve simülasyon sonuçları sunulmuştur. Ölçüm sonuçları ve simülasyon sonuçları karşılaştırıldığında açı değişikçe üretilen FSY’nin kararlı bir davranış sergilediği bu anlamda simülasyon sonuçları ile uyumlu olduğu görülmektedir.



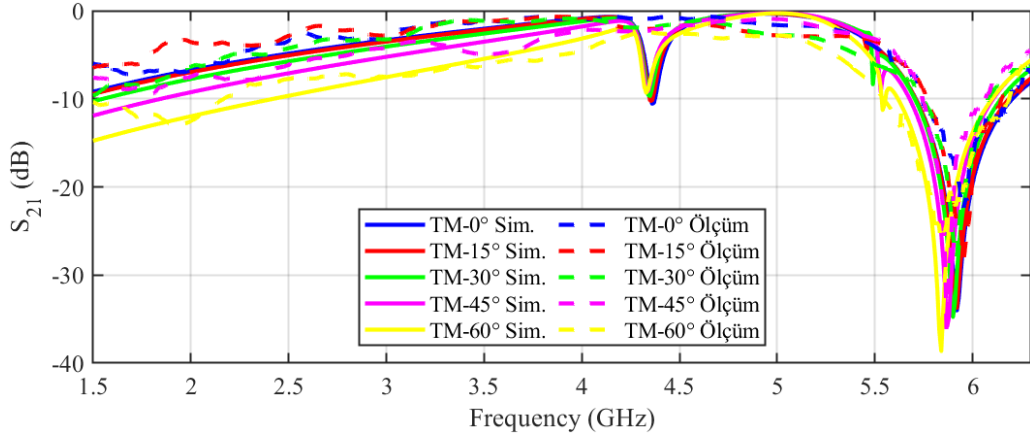
Şekil 4.7. Durum 2 için TE mod açısal kararlılık ölçüm sonuçları

Şekil 4.8’de durum 3 için açısal değişime göre TE modunda yapılan ölçüm sonuçları ve simülasyon sonuçları sunulmuştur. Ölçüm sonuçları ve simülasyon sonuçları karşılaştırıldığında açı değişikçe üretilen FSY’nin kararlı bir davranış sergilediği bu anlamda simülasyon sonuçları ile uyumlu olduğu görülmektedir.



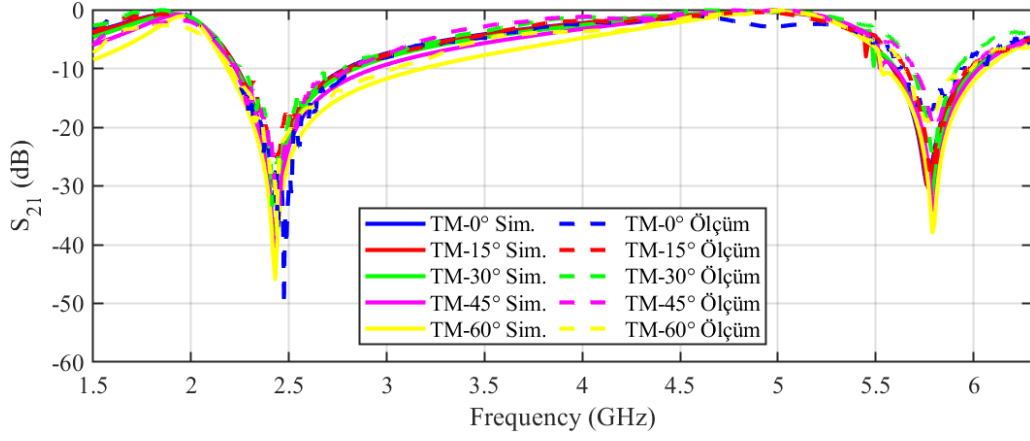
Şekil 4.8. Durum 3 için TE mod açısai kararlılık ölçüm sonuçları

Şekil 4.9’da durum 1 için açısai değışime göre TM modunda yapılan ölçüm sonuçları ve simülasyon sonuçları sunulmuştur. Ölçüm sonuçları ve simülasyon sonuçları karşılaştırıldığında açı değıştikçe üretilen FSY’nin kararlı bir davranış sergilediği bu anlamda simülasyon sonuçları ile uyumlu olduğu görölmektedir.



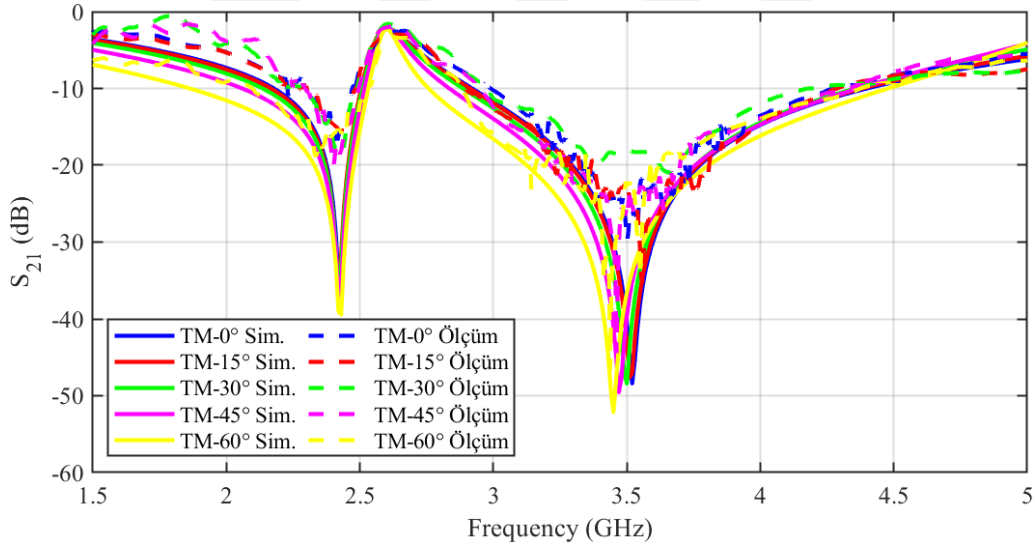
Şekil 4.9. Durum 1 için TM mod açısai kararlılık ölçüm sonuçları

Şekil 4.10’da durum 2 için açısai değışime göre TM modunda yapılan ölçüm sonuçları ve simülasyon sonuçları sunulmuştur. Ölçüm sonuçları ve simülasyon sonuçları karşılaştırıldığında açı değıştikçe üretilen FSY’nin kararlı bir davranış sergilediği bu anlamda simülasyon sonuçları ile uyumlu olduğu görölmektedir.



Şekil 4.10. Durum 2 için TM mod açısal kararlılık ölçüm sonuçları

Şekil 4.11’de durum 3 için açısal değişime göre TM modunda yapılan ölçüm sonuçları ve simülasyon sonuçları sunulmuştur. Ölçüm sonuçları ve simülasyon sonuçları karşılaştırıldığında açı değiştikçe üretilen FSY’nin kararlı bir davranış sergilediği bu anlamda simülasyon sonuçları ile uyumlu olduğu görülmektedir.



Şekil 4.11. Durum 3 için TM mod açısal kararlılık ölçüm sonuçları

5. SONUÇLAR

Bu tez çalışması ile Wi-Fi ve 5G uygulamaları için çok bantlı, polarizasyon kararlı dinamik yeniden yapılandırılabilir bant durdurucu FSY tasarımı yapılmıştır. Tasarlanan FSY'nin birim hücresi içerisinde elektronik devre elemanları kullanılarak Wi-fi (2.4 GHz ve 5.8 GHz) ve 5G (3.5 GHz) frekans bantları arasında dinamik geçiş sağlayarak aynı zamanda polarizasyon kararlılığı ve açısal kararlılığa sahip olması istenmiştir. Bu amaçla literatürde yeniden yapılandırılabilir frekans seçici yüzey tasarımları araştırılmış, CST Studio Suite yazılımı ile benzetimleri yapılmış ve bir çok farklı geometri üzerine çalışma yapılmıştır. Polarizasyon kararlılığı açısından yüksek verimliliğe sahip simetrik geometriler üzerinde yapılan benzetimler sonucunda birim hücre geometrisinin dairesel döngü şeklinde olmasına karar verilmiştir. Yapılan simülasyonlar sonucunda pin diyotların iletimde/kesimde olması durumuna göre on altı farklı mod oluşmuştur. Bu modlardan yedi adedine ait simülasyon sonuçları durdurulmak istenen frekans bantlarının dışında olduğundan çıkarılmıştır. Diğer dokuz mod için diyotların iletim ve kesim durumları simülasyon yazılımları ve deneysel olarak test edilmiş olup aynı yüzeyde bulunan x ve y polarizasyonundaki diyotların aynı anda iletime geçirilemediği görülmüştür. Dokuz mod içerisinde bu duruma uyan dört mod çıkarıldıktan sonra kalan altı mod için analiz yapıldığında üç durum için frekans bantlarını durduran ve TE ve TM modlarında polarizasyon kararlı bir FSY tasarımı oluşturulmuştur.

Yapılan simülasyon ve analizler sonucunda elde edilen veriler ışığında birim hücre bazında küçültme ve özgün bir tasarım için farklı boyut ve geometriler üzerinde çalışmalar yapılarak birim hücre boyutu alan olarak %52,6 düşürülmüş ve daha özgün bir tasarım elde edilmiştir. Elde edilen boyutu küçültülmüş, kompakt yeniden yapılandırılabilir FSY'in simülasyon ve analiz sonuçlarına göre bir önceki tasarımda frekanslarda meydana gelen kaymalar giderilmiş ve açısal kararlılığı daha da iyileştirilmiştir. Birim hücre bazında yapılan küçültme ile FSY'in kararlılığı da arttırılmıştır.

Tasarımı yapılan FSY'nin analiz sonuçlarını doğrulamak amacıyla prototipi üretilmiştir. Üretimi yapılan FSY'nin hazırlanan ölçüm düzeneği vasıtasıyla ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Tasarımın performansı ölçüm sonuçları ve eşdeğer devre modeli ile karşılaştırılarak doğrulanmıştır.

Bu yönüyle bu tez çalışması ile Wi-fi ve 5G uygulamaları için çok bantlı, polarizasyon kararlılığı bulunan ve 60 dereceye kadar açısal kararlılığa sahip olan, dinamik olarak yeniden yapılandırılabilir FSY tasarımı yapılmıştır.

Bu tez çalışması kapsamında elde edilen sonuçlar, gelecekte yapılacak çalışmalar için önemli bir temel oluşturmakla birlikte, tasarımın daha yenilikçi ve uygulama alanlarını genişletecek şekilde geliştirilmesi mümkündür. İleriki çalışmalarda, FSY tasarımında esnek ya da şeffaf bir dielektrik malzeme kullanımı ile uygulama alanlarının artırılması değerlendirilebilir. Esnek dielektrik malzeme kullanımı ile kavisli yüzeylerde FSY'nin entegrasyonu sağlanabilir. Şeffaf dielektrik malzeme kullanımı ise, tasarımın cam yüzeyler gibi optik şeffaflık gerektiren uygulamalarda kullanılmasını sağlayabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Nassa, V. K. (2011). Wireless Communications: Past, Present and Future. Dronacharya Research Journal, 50.
- [2] Coe, L. (2006). *Wireless radio: A history*. McFarland. McFarland & Company, Inc.
- [3] Shoemake, M. B. (2001). Wi-Fi (IEEE 802.11 b) and Bluetooth. Coexistence Issues and Solutions for the, 2.
- [4] Zhang, Y., Love, D. J., Krogmeier, J. V., Anderson, C. R., Heath, R. W., & Buckmaster, D. R. (2021). Challenges and opportunities of future rural wireless communications. IEEE Communications Magazine, 59(12), 16-22.
- [5] Chu, T. S., & Gans, M. (1987). High speed infrared local wireless communication. IEEE Communications Magazine, 25(8), 4-10.
- [6] K. R. Shin & K. Eiler. (2018). Compact low cost 5G NR n78 band pass filter with silicon IPD technology, IEEE 19th Wireless and Microwave Technology Conference, Sand Key, FL, USA, 1-3, doi: 10.1109/WAMICON.2018.8363892.
- [7] El-Habrouk, M., Darwish, M. K., & Mehta, P. (2000). Active power filters: A review. IEE Proceedings-Electric Power Applications, 147(5), 403-413.
- [8] Chen, W. K. (2018). Passive, active, and digital filters. Crc Press.
- [9] Orellana, M., Selga, J., Vélez, P., Sans, M., Rodríguez, A., Bonache, J., & Martin, F. (2017). Design of capacitively loaded coupled-line bandpass filters with compact size and spurious suppression. IEEE transactions on microwave theory and techniques, 65(4), 1235-1248.
- [10] Yeung, L. K., & Wu, K. L. (2007). A dual-band coupled-line balun filter. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 55(11), 2406-2411.
- [11] Ye, Y., Wu, Y., Chen, J., Su, G., Wang, J., & Liu, J. (2023). Intelligent design of hairpin filters based on artificial neural network and proximal policy optimization. Applied Sciences, 13(16), 9379.
- [12] Levy, R. (1967). Theory of direct-coupled-cavity filters. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 15(6), 340-348.
- [13] Joshi, H., & Chappell, W. J. (2006). Dual-band lumped-element bandpass filter. IEEE transactions on microwave theory and techniques, 54(12), 4169-4177.
- [14] Su Tao, Wu Bian & Liang Chang-hong. (2005). The designing and tuning methods of tubular filter, Asia-Pacific Microwave Conference Proceedings, Suzhou, China, 3, doi: 10.1109/APMC.2005.1607030.
- [15] Yan, W., Chen, Z., Li, G., Hong, S., & Li, N. (2024). Preparation and enhanced mechanical properties of novel Al₂O₃-C ceramic filter reinforced by

microporous powder and SiC whiskers. *Journal of the American Ceramic Society*, 107(4), 2725-2737.

- [16] Winder, S. (2002). *Analog and Digital Filter Design*. New York: Newnes.
- [17] Munk, B. A. (2000). *Frequency selective surfaces: theory and design*. John Wiley & Sons. Inc., Hoboken, NJ, USA.
- [18] Afzal, W., Baig, M. Z., Ebrahimi, A., Robel, M. R., Rana, M. T. A., & Rowe, W. (2024). Frequency Selective Surfaces: Design, Analysis, and Applications. *Telecom*, 5(4), 1102-1128. <https://doi.org/10.3390/telecom5040056>.
- [19] Kapoor, A., Mishra, R., & Kumar, P. (2022). Frequency selective surfaces as spatial filters: Fundamentals, analysis and applications. *Alexandria Engineering Journal*, 61(6), 4263–4293. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.09.046>.
- [20] Raptopoulos, M., & Stavrou, S. (2011). Frequency selective buildings through frequency selective surfaces. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 59(8), 2998–3005. <https://doi.org/10.1109/tap.2011.2158779>.
- [21] Ullah, I., Habibi, D., Zhao, X., & Kiani, G. (2011). Design of RF/Microwave efficient buildings using frequency selective surface. *IEEE 22nd International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, 2070-2074.
- [22] Nawaf, S. F., Abdulla, L. S., Abdulmutalib, A., & Husein, W. (2023). Reflector antenna design in different frequencies using frequency selective surfaces. *TELKOMNIKA (Telecommunication Computing Electronics and Control)*, 21(5), 981–989.
- [23] Farooq, U., Shafique, M. F., & Mughal, M. J. (2020). Polarization insensitive dual band frequency selective surface for RF shielding through glass windows. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 62(1), 93–100. <https://doi.org/10.1109/temc.2019.2893408>.
- [24] Liang, J. C., Zhang, L., Luo, Z., Jiang, R. Z., Cheng, Z. W., Wang, S. R., Sun, M. K., Jin, S., Cheng, Q., & Cui, T. J. (2024). A filtering reconfigurable intelligent surface for interference-free wireless communications. *Nature Communications*, 15(1), 3838. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-47865-6>.
- [25] Anwar, R., Mao, L., & Ning, H. (2018). Frequency Selective Surfaces: A Review. *Applied Sciences*, 8(9), 1689. <https://doi.org/10.3390/app8091689>.
- [26] Thirumal Murugan, J., Suresh Kumar, T. R., Salil, P., & Venkatesh, C. (2015). Dual frequency selective transparent front doors for microwave oven with different opening areas. *Progress In Electromagnetics Research Letters*, 52, 11–16. <https://doi.org/10.2528/pierl14121801>.
- [27] Jaiswal, R. K., Pandit, N., & Pathak, N. P. (2022). Metamaterial-FSS for THz Applications. In *Handbook of Metamaterial-Derived Frequency Selective Surfaces*, Singapore: Springer Nature Singapore, 1-23.
- [28] Wu, T. K. (1995). *Frequency Selective Surfaces and Grid Arrays*, John Wiley and Sons, New York.

- [29] Orta, R., Savi, P., & Tascone, R. (1990). The effect of finite conductivity on frequency selective surface behavior. *Electromagnetics*, 10(3), 213–227. <https://doi.org/10.1080/02726349008908240>.
- [30] Konoplev, I. V., Posthuma De Boer, D. W., Warsop, C. M., & John, M. (2020). Design and characterisation of frequency selective conductive materials for electromagnetic fields control. *Scientific Reports*, 10(1), 19351. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-76447-x>.
- [31] Wang, J., Qu, S., Li, L., Wang, J., Feng, M., Ma, H., Du, H., & Xu, Z. (2017). All-dielectric metamaterial frequency selective surface. *Journal of Advanced Dielectrics*, 7(5), 1730002.
- [32] Varshney, A., & Gençoğlu, D. N. (2024). High-Gain Multi-Band Koch Fractal FSS Antenna for Sub-6 GHz Applications. *Applied Sciences*, 14(19), 9022. <https://doi.org/10.3390/app14199022>.
- [33] Wang, Z., Li, X. Y., Wang, Y. R., & Tong, M. S. (2024). A novel narrow-band bandpass frequency selective surface. *2024 Photonics & Electromagnetics Research Symposium*, 1–4
- [34] Campos, A. L. P. S., Assunção, A. G., & Neto, A. G. (2002). Scattering characteristics of FSS on two anisotropic layers for incident co-polarized plane waves. *Microwave and optical technology letters*. 33, 57–61.
- [35] Kiani, G. I., Ford, K. L., Esselle, K. P., Weily, A. R., & Panagamuwa, C. J. (2007). Oblique incidence performance of a novel frequency selective surface absorber. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 55(10), 2931–2934.
- [36] Zhu, X. C., Hong, W., Wu, K., Tang, H. J., Hao, Z. C., Chen, J. X., & Zhou, H. (2013). Design of a bandwidth-enhanced polarization rotating frequency selective surface. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 62(2), 940–944.
- [37] de Siqueira Campos, A. L. P., de Oliveira Moreira, R. C., & Trindade, J. I. A. (2009). A comparison between the equivalent circuit model and moment method to analyze FSS. In *2009 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference*, Belm, Brasil, 760–765.
- [38] Teo, P. T., Lee, K. S., & Lee, C. K. (2002). FEM CAD for the analysis and design of frequency selective surfaces. In *2002 9th International Symposium on Antenna Technology and Applied Electromagnetics*, St. Hubert, QC, Canada, 1–4.
- [39] Ko, W., & Mittra, R. (1993). Implementation of Floquet boundary condition in FDTD for FSS analysis. In *Proceedings of IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, 14–17.
- [40] Barrera, M. A. R., & Carpes, W. P. (2017). Bandwidth for the equivalent Circuit Model in Square-loop frequency selective surfaces. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 65(11), 5932–5939.
- [41] Kinzel, E. C., Brown, R. L., Ginn, J. C., Lail, B. A., Slovic, B. A., & Boreman, G. D. (2013). Design of an MOM diode-coupled frequency-selective surface. *Microwave and Optical Technology Letters*, 55(3), 489–493.

- [42] Tukmakova, A., Tkhorzhevskiy, I., Sedinin, A., Asach, A., Novotelnova, A., Kablukova, N., Demchenko, P., Zaitsev, A., Zykov, D., & Khodzitsky, M. (2021). FEM Simulation of Frequency-Selective Surface Based on Thermoelectric Bi-Sb Thin Films for THz Detection. *Photonics*, 8(4), 119. <https://doi.org/10.3390/photonics8040119>.
- [43] Qiang, R., Chen, J., & Yang, F. (2006, July). FDTD simulation of infrared FSS transmission spectrum from oblique incidence. In 2006 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, 4179-4182.
- [44] Mao, S., Sun, S., Liu, X., & Wu, B. (2021, October). Novel Equivalent Circuit Analysis Method of FSS Based on Full-connected Neural Networks. In 2021 Cross Strait Radio Science and Wireless Technology Conference, 339-341.
- [45] Turpin, J. P., Bossard, J. A., Morgan, K. L., Werner, D. H., & Werner, P. L. (2014). Reconfigurable and tunable metamaterials: a review of the theory and applications. *International Journal of Antennas and Propagation*, 1, 429837.
- [46] Suri, A., & Jha, K. R. (2023). Active frequency selective surfaces: a systematic review for sub-6 GHz band. *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, 1-15.
- [47] Lu, Z., She, J., & Yan, X. (2016). A dual-band reconfigurable FSS composite structure based on MEMS switches. In 2016 11th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory, 630-632.
- [48] Alwahishi, R., Ali, M. M. M., Elzwawi, G. H., & Denidni, T. A. (2023). Beam-switching antenna using reconfigurable intelligent frequency selective surfaces for internet of things applications. *IEEE Internet of Things Journal*, 11(3), 4152-4162.
- [49] Kanchana, D., Radha, S., Sreeja, B. S., & Manikandan, E. (2022). Convolved FSF structure for shielding application in X-band frequency response. *IETE Journal of Research*, 68(3), 2157-2163.
- [50] Yong, W. Y., Rahim, S. K. A., Himdi, M., Seman, F. C., Suong, D. L., Ramli, M. R., & Elmobarak, H. A. (2018). Flexible convolved ring shaped FSF for X-band screening application, 6, 11657-11665.
- [51] Zaki, A. Z. A. (2016). High gain compact microstrip patch antenna for X-band applications. *International Journal of Antennas*, 2(1).
- [52] Huo, F., Bao, J., Zhu, M., Liu, F., & Tao, Y. (2021). Design of miniaturized dual-band frequency selective surface with spiral arrangement of meander lines. *IEICE Electronics Express*, 18-20210328.
- [53] Mahaveer, U., Chandrasekaran, K. T., Mohan, M. P., Alphones, A., Siyal, M. Y., & Karim, M. F. (2021). A tri-band frequency-selective surface. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 35(7), 861-873.
- [54] Martinez-Lopez, L., Martinez-Lopez, R., Martynyuk, A. E., Rodriguez-Cuevas, J., Fabian-Gongora, H., & Martinez-Lopez, J. I. (2021). Close Band Spacing Pentaband Frequency Selective Surfaces Based on Concentric Ring Slots. *IEEE Access*, 9, 57886-57896.

- [55] Chomtung, P., Krachodnok, P., Bandudej, K., & Akkaraekthalin, P. (2022). A Multiband FSY Director Using Aperture Interdigital Structure for Wireless Communication Systems, 10, 11206-11219.
- [56] Yao, Z., Xiao, S., Li, Y., & Wang, B. Z. (2020). On the design of wideband absorber based on multilayer and multiresonant FSY array. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 20(3), 284-288.
- [57] Dubal, S., & Chaudhari, A. (2020). Mechanisms of reconfigurable antenna: A review. In 2020 10th International Conference on Cloud Computing, Data Science & Engineering, 576-580.
- [58] Haupt, R. L., & Lanagan, M. (2013). Reconfigurable antennas. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 55(1), 49-61.
- [59] Ojaroudi Parchin, N., Jahanbakhsh Basherlou, H., Al-Yasir, Y. I., M. Abdulkhaleq, A., & A. Abd-Alhameed, R. (2020). Reconfigurable antennas: Switching techniques—A survey. *Electronics*, 9(2), 336.
- [60] Hong, I. P. (2023). Reviews based on the reconfigurable intelligent surface Technical Issues. *Electronics*, 12(21), 4489.
- [61] Karahan, M., & Aksoy, E. (2022). Design of a PIN Diode-Based Reconfigurable Frequency Selective Surface. In 2022 Workshop on Microwave Theory and Techniques in Wireless Communications, 95-99.
- [62] Sousa, T. R. D., Mamedes, D. F., Souza, J. D. S., & Silva, V. P. D. (2024). Single- and Multi-Stopband Reconfigurable FSS. *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, 23(4), e2024287661.
- [63] Andrabi, S. T. S., Jha, K. R., Sharma, S. K., & Singh, G. (2019). Active FSS design using multi-resonators. In 2019 IEEE MTT-S International Microwave and RF Conference, 1-5.
- [64] Yang, C., Li, H., Cao, Q., & Wang, Y. (2016). A dual-polarized switchable active frequency selective surface for lte-d band. *Progress in Electromagnetics Research M*, 48, 77–85. <https://doi.org/10.2528/PIERM16012003>.
- [65] Ali, H., Riaz, L., Kirmani, S. A. M., Khan, S. A., & Shafique, M. F. (2022). Dual Bandstop reconfigurable (Switchable) frequency Selective surface for WLAN applications at 2.4 and 5 GHz. *Archiv Fur Elektronik Und Ubertragungstechnik, International Journal of Electronics and Communications*, 143(154038), 154038.
- [66] Doken, B., & Kartal, M. (2019). An active frequency selective surface design having four different switchable frequency characteristics. *Radioengineering*, 27(1), 114–120. <https://doi.org/10.13164/re.2019.0114>.
- [67] Guo, Q., Li, Z., Su, J., Song, J., & Yang, L. Y. (2019). Active frequency selective surface with wide reconfigurable passband. *IEEE Access: Practical Innovations, Open Solutions*, 7, 38348–38355. <https://doi.org/10.1109/access.2019.2906219>.
- [68] Sanz-Izquierdo, B., & Parker, E. A. (2014). Dual polarized reconfigurable frequency selective surfaces. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 62(2), 764–771. <https://doi.org/10.1109/tap.2013.2292056>.

- [69] Wang, Z., Huang, J., Wan, F., Fu, J., Wu, Q., Song, M., Ran, L., & Denidni, T. A. (2024). Four-mode switchable frequency-selective surface featuring wide-band and angular stability. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/lawp.2024.3418195>.
- [70] Lin, B., Guo, J., Chu, P., Li, N., Wu, L., & Liu, X. (2018). Varactor-tunable frequency selective surface with an appropriate embedded bias network. *Radio Science*, 53(4), 535–543. <https://doi.org/10.1002/2017rs006394>
- [71] Ghosh, S., & Srivastava, K. V. (2020). A dual-band tunable frequency selective surface with independent wideband tuning. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 19(10), 1808–1812. <https://doi.org/10.1109/lawp.2020.3019584>.
- [72] Li, S., Njogu, P., Sanz-Izquierdo, B., Gao, S., & Chen, Z. (2023). Reconfigurable FSS based on movable 3D-printed metal-dielectric grids. *17th European Conference on Antennas and Propagation*, 1-5.
- [73] Jubadi, W. M. & Noor, S. N. M.. (2010). Simulations of variable I-layer thickness effects on silicon PIN diode I-V characteristics, *IEEE Symposium on Industrial Electronics and Applications*, Penang, Malaysia, 428-432, doi: 10.1109/ISIEA.2010.5679427.
- [74] Symanczyk, R., Jäger, D., & Schöll, E. (1991). Equivalent circuit model for current filamentation in p-i-n diodes. *Applied physics letters*, 59(1), 105-107.