

ANKARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

NESNELERİN İNTERNETİ UYGULAMALARINA YÖNELİK
POLARİZASYON BAĞIMSIZ, GENİŞ BANT OPTİK GEÇİRGEN FREKANS
SEÇİCİ YÜZEY TASARIMI

Ömer Faruk GÜNAYDIN

ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ANKARA
2024

Her hakkı saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

NESNELERİN İNTERNETİ UYGULAMALARINA YÖNELİK POLARİZASYON BAĞIMSIZ, GENİŞ BANT OPTİK GEÇİRGEN FREKANS SEÇİCİ YÜZEY TASARIMI

Ömer Faruk GÜNAYDIN

Ankara Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Sultan CAN

Bugünün akıllı şehirlerinde, konferans mekânlarında, kulelerde, konutlarda ve çok katlı binalarda yoğun çalışma ortamları ortaya çıkmaktadır. İletişim ekipmanları ve sistemleri, operasyonel ömür boyunca çeşitli elektromanyetik etkilerle karşılaşmaktadır. Bu etkiler, akıllı şehirlerde Elektromanyetik Girişim ve Elektromanyetik Uyumluluk konularını insanlar için önemli endişeler haline getirmiştir. Özellikle mikrodalga ve optik frekans bantlarında, sinyal işleme sistemlerindeki önemli bir işlem olarak uzamsal filtreleme dikkat çeker, elektromanyetik dalgalarını bastırmayı veya ortadan kaldırmayı amaçlar. Gündelik yüzeylere entegre edilmiş frekans seçici yüzeyler, IoT uygulamaları için kilit bileşenler olarak önem kazanmaktadır. Bu çalışmada, IoT uygulamaları için çift katmanlı geniş bant frekans seçici bir yüzey önerilmiştir. Önerilen tasarımdaki katmanlar tek başlarına kullanıldığında, sub-6GHz'de en çok kullanılan frekans bantlarından biri olan 3.7 GHz (n77) ve 4.5 GHz (n79) için bant durdurma özellikleri sergilemektedir. Birleşik bir yapıda kullanıldıklarında ise, 3.61 GHz ile 5.0 GHz aralığında, 1.39 GHz bant genişliği göstermektedirler. TE ve TM modları için 0 ila 60 derece arasındaki gelen açılarda ekleme kaybındaki değişimleri gözlemlemek için önerilen FSY yapıları için simülasyonlar yapılmıştır. Bu simülasyonlar, tasarımın polarizasyon bağımsızlığını göstermektedir. Dielektrik sabiti 2.77 olan ve 1.48 mm kalınlığındaki şeffaf Polivinil klorür, alt tabaka malzemesi olarak kullanılmıştır. Optik geçirgenlik, Katman 1 için %96.7, Katman 2 için %95.7 ve çok katmanlı yapı için %92.4 olarak hesaplanmıştır. Önerilen tasarım, yüksek şeffaflığı, maliyet etkinliği, baskılama yeteneklerindeki güçlü performansı ve polarizasyon bağımsızlığı nedeniyle sub-6-GHz frekans bantlarında IoT uygulamaları için kullanışlı bir yapı olacaktır. 3D tam dalga simülasyonlarının sonuçları, ölçüm sonuçlarıyla karşılaştırılmış ve iyi bir uyum gözlemlenmiştir.

Nisan 2024, 71 sayfa

Anahtar Kelimeler: Akıllı Şehirler, Çift Katman, Frekans Seçici Yüzey, Geniş Bant, Polarizasyon Bağımsız, Optik Geçirgenlik.

ABSTRACT

Master Thesis

POLARIZATION-INDEPENDENT, WIDEBAND OPTICALLY TRANSPARENT FREQUENCY SELECTIVE SURFACE DESIGN FOR IoT APPLICATIONS

Ömer Faruk GÜNAYDIN

Ankara University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Electrical and Electronics Engineering

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Sultan CAN

In today's smart cities, dense working environments are emerging within conference venues, towers, condominiums, and multi-story buildings. Communication equipment and systems encounter various electromagnetic influences throughout their operational lifespan. These effects have raised significant concerns for people in smart cities regarding Electromagnetic Interference and Electromagnetic Compatibility. Particularly in microwave and optical frequency bands, spatial filtering stands out as a crucial operation in signal processing systems, aiming to suppress or eliminate EM waves. Frequency-selective surfaces integrated into everyday surfaces are becoming crucial components for IoT applications. This study introduces a double-layer wideband frequency-selective surface tailored for IoT applications. When the individual layers in the proposed design are used separately, they exhibit band-stop characteristics for two widely used frequency bands in sub-6GHz: 3.7 GHz (n77) and 4.5 GHz (n79). When combined in a unified structure, they demonstrate a bandwidth of 1.39 GHz, ranging from 3.61 GHz to 5.0 GHz. Simulations for the suggested FSS structures have been conducted to observe variations in insertion loss across incident angles ranging from 0 to 60 degrees for both TE and TM modes, demonstrating the design's polarization independence. Transparent polyvinyl chloride with a dielectric constant of 2.77 and a thickness of 1.48 mm has been utilized as the substrate material. The optical transmittance is calculated to be 96.7% for Layer 1, 95.7% for Layer 2, and 92.4% for the multilayer structure. The proposed design is well-suited for sub-6-GHz IoT applications due to its high transparency, cost-effectiveness, robust performance capabilities in suppression, and polarization independence. The results of 3D full-wave simulations have been compared with measurement outcomes, showing good agreement.

April 2024, 71 pages

Key Words: Double-layer, Frequency selective surfaces, Optically transparent, Polarization-insensitive, Smart cities, Wideband.

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Çalışmalarım sırasında beni sürekli destekleyen, bilgi birikimiyle çalışmama farklı açılardan bakmamı sağlayan çok değerli danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Sultan CAN'a teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Çalışma boyunca beni sürekli motive eden, yoğun çalışma şartlarıma rağmen desteğini hiç esirgemeyen hayatımın anlamı ve yol arkadaşım eşim Edanur GÜNAYDIN'a teşekkürlerimi ve sevgilerimi sunarım.

Hayatım boyunca beni yalnız bırakmayan ve her kararımı destekleyen canım babam Muhammet GÜNAYDIN'a, hayatını beni mutlu etmeye adanmış ve her daim yanımda olan canım annem Ayla GÜNAYDIN'a ve desteklerini her zaman hissettiğim canım kardeşlerim Halil İbrahim GÜNAYDIN, Yunus Emre GÜNAYDIN ve Emir Hamza GÜNAYDIN'a teşekkürlerimi ve sevgilerimi sunarım.

Eğitim ve iş hayatım boyunca bana sürekli yol gösteren, yeni fikirleriyle beni sürekli şaşırtan amcam Musa GÜNAYDIN'a, samimi sohbetleriyle beni yoğun çalışma ortamı stresinden uzaklaştıran ve desteklerini her zaman hissettiğim Fikret GÜNAYDIN ve Elmas GÜNAYDIN'a teşekkürlerimi ve sevgilerimi sunarım.

Ömer Faruk GÜNAYDIN
Ankara, Nisan 2024

İÇİNDEKİLER

TEZ ONAY SAYFASI

ETİK.....	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT	iii
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR.....	iv
KISALTMALAR DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
1. GİRİŞ	1
2. KAVRAMSAL TERİMLER.....	6
2.1 Frekans Seçici Yüzeyi Etkileyen Parametreler	7
2.1.1 Eleman şekli.....	8
2.1.2 Periyodik yapı.....	10
2.1.3 Eleman boyutu	12
2.1.4 Açısal kararlılık ve polarizasyon kararlılık.....	14
2.1.5 Elemanlar arası boşluk.....	16
2.2 Eşdeğer Devre Modeli.....	17
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	22
4. TASARIM, ANALİZ VE ÜRETİM	26
4.1 Dikdörtgen Yapılı Frekans Seçici Yüzey	26
4.1.1 Yapı ve mimari.....	26
4.1.2 Parametrik analiz.....	28
4.1.3 Ölçüm sonuçları	33
4.1.4 Tartışma.....	35
4.2 Frekans Seçici Yüzey Tabanlı Soğurucu	36
4.2.1 Yapı ve mimari.....	36
4.2.2 Parametrik analiz.....	37
4.2.3 Ölçüm sonuçları	40
4.2.4 Tartışma.....	43
4.3 Dairesel Döngü Yapıda Geniş Bant Frekans Seçici Yüzey	43
4.3.1 Yapı ve mimari.....	44
4.3.2 Parametrik analiz.....	45

4.3.3 Eşdeğer devre modeli.....	55
4.3.4 Ölçüm sonuçları	57
5. SONUÇ	62
KAYNAKLAR	65



KISALTMALAR DİZİNİ

C	Capacitance (Kapasitans)
CST	Computer Simulation Technology
dB	Decibel (Desibel)
ECM	Equivalent Circuit Model (Eşdeğer Devre Modeli)
EM	Electromagnetic (Elektromanyetik)
EMC	Electromagnetic Compability (Elektromanyetik Uyumluluk)
EMI	Electromagnetic Interference (Elektromanyetik Girişim)
FSS (FSY)	Frequency Selective Surface (Frekans Seçici Yüzey)
IoT	Internet of Things (Nesnelerin İnterneti)
ITO	Indium Tin Oxied (İndiyum Kalay Oksit)
L	Inductance (Endüktans)
LTE	Long Term Evolution
PCB	Printed Circuit Board (Baskı Devre Levhası)
PVC	Polyvinyl Chloride (Polivinil Klorür)
RF	Radio Frequency (Radyo Frekansı)
RFID	Radio Frequency Identification
TE	Transverse Electric (Enine Elektrik)
TM	Transverse Magnetic (Enine Manyetik)
WLAN	Wireless Local Area Network
Wi-Fi	Wireless Fidelity
5G	Fifth Generation (Beşinci Nesil)

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 FSY işlevselliği.....	7
Şekil 2.2 FSY eleman türleri.....	9
Şekil 2.3 FSY'lerin yapılarına göre tepkileri, (a) Alçak geçiren, (b) yüksek geçiren (c) Bant durduran (d) Bant geçiren filtre	11
Şekil 2.4 FSY Yapıları (a) Bant durduran (b) Bant geçiren.....	12
Şekil 2.5 Birim hücre (a) Üstten gösterimi (b) Yandan gösterimi	13
Şekil 2.6 Düzlem dalga geliş açısı ve polarizasyonu	15
Şekil 2.7 Elemanlar arası boşluk değişimi	17
Şekil 2.8 Eşdeğer devre modelleme, (a) bireysel elemanlar arasındaki boşluk (b) metalik elemanlar.....	18
Şekil 2.9 Kare döngü (a) Birim hücre tasarımı (b) Eşdeğer devre modeli.....	19
Şekil 3.1 FSY tasarım ve üretim süreci.....	24
Şekil 3.2 Ölçümlerin gerçekleştirildiği deney düzeneği	25
Şekil 4.1 Önerilen tasarıma ait (a) Birim hücre tasarımı (b) Sınır koşulları	27
Şekil 4.2 Artı şekilli rezonatör bakır yama kalınlığının üst frekansa etkisi	29
Şekil 4.3 Dikdörtgen bakır yama kalınlığının üst frekansa etkisi	30
Şekil 4.4 (a) Alttaş malzemenin frekans karakteristiğine etkisi (b) Alttaş malzemenin kalınlığının frekans karakteristiğine etkisi.....	31
Şekil 4.5 EM dalga açısının iletim karakteristiğine etkisi (a) Geliş açısı (b) Polarizasyon açısı.....	32
Şekil 4.6 Tasarıma ait yüzey akım dağılımları (a) alt frekans için (b) üst frekans için	32
Şekil 4.7 (a) İlk örnek (b) Dalga kılavuzu içine yerleştirilmiş ilk örnek	33
Şekil 4.8 (a) LPKF üretim makinası (b) Ölçüm düzeneği	34
Şekil 4.9 Simülasyon sonuçları ile ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması.....	34
Şekil 4.10 Önerilen tasarımın (a) Toprak yüzeyi (b) FSY yüzeyi	36
Şekil 4.11 Daire çapının değişiminin (a) $ S_{11} $ 'e etkisi (b) $ S_{21} $ 'e etkisi	38
Şekil 4.12 Arka yüzeyde bulunan iletkenin genişlik değişiminin (a) $ S_{11} $ 'e etkisi (b) $ S_{21} $ 'e etkisi	38
Şekil 4.13 (a) Alttaş malzemesinin $ S_{11} $ 'e etkisi (b) Alttaş malzeme kalınlığının $ S_{11} $ 'e etkisi.....	39
Şekil 4.14 Yüzey akım yoğunluğu (a) ön yüzey (b) arka yüzey	40
Şekil 4.15 (a) İlk örnek (b) Dalga kılavuzu içinde ilk örnek (c) Dalga kılavuzu içinde ilk örnek	41

Şekil 4.16 Ölçüm sonuçları (a) yansıma (b) iletim	41
Şekil 4.17 Simülasyon sonuçları ile ölçüm sonuçlarının karşılaştırması	42
Şekil 4.18 Birim hücre yapısı (a) Katman-1 (b) Katman-2.....	44
Şekil 4.19 İletim karakteristiği (a) Katman-1 (b) Katman-2.....	46
Şekil 4.20 Daire çapının iletim karakteristiğine etkisi (a) Katman-1 (b) Katman-2.....	47
Şekil 4.21 Bakır yama genişliğinin iletim karakteristiğine etkisi (a) Katman-1 (b) Katman-2	48
Şekil 4.22 Polarizasyon etkisi (a) Katman-1, TE modu (b) Katman-1, TM modu (c) Katman-2, TE modu (d) Katman-2, TM modu	49
Şekil 4.23 Alttaş malzemesinin elektriksel geçirgenliğinin iletim karakteristiğine etkisi (a) Katman-1 (b) Katman-2	51
Şekil 4.24 Alttaş malzemenin kalınlığının iletim karakteristiğine etkisi (a) Katman-1 (b) Katman-2	51
Şekil 4.25 Kayıp tanjant etkisi (a) Katman-1, güç kaybı (b) Katman-2, güç kaybı (c) Katman-1, verim (d) Katman-1, verim	52
Şekil 4.26 Yüzey akım yoğunluğu (a) Katman-1 (b) Katman-2.....	53
Şekil 4.27 Katmanlar arası mesafenin iletim karakteristiğine etkisi.....	55
Şekil 4.28 (a) Birim hücre yapısı (b) Eşdeğer devre modeli.....	56
Şekil 4.29 (a) İlk örnekler (b) Dalga kılavuzu içine yerleştirilmiş ilk örnek	57
Şekil 4.30 CST, ECM ve ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması (a) Katman-1 (b) Katman-2.....	58
Şekil 4.31 CST sonuçları ile ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması	59

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 4.1 Dikdörtgen yapılı FSY'ye ait birim hücre tasarım parametreleri	28
Çizelge 4.2 FSY tabanlı soğurucuya ait birim hücre tasarım parametreleri	37
Çizelge 4.3 Katmanların geometrik parametre değerleri	45
Çizelge 4.4 Ölçüm, CST ve ECM sonuçlarının karşılaştırılması.....	59
Çizelge 4.5 Önerilen optik olarak şeffaf çift katmanlı FSY yapısının son teknolojiye sahip alternatiflerle karşılaştırılması.	60



1. GİRİŞ

Son yıllarda, ekonomik fırsatlar, demografik değişimler ve kuşak tercihlerinin etkisiyle nüfus kırsal ve banliyö alanlarından büyük kentsel alanlara geçişi sürdürmeye devam ettikçe kentsel ekosistemler genişlemektedir. Yapılan çalışmalar, gelecek yıllarda kırsal bölgelerden şehirlere yapılan geçişlerin artmaya devam ederek, şehirlerdeki nüfusun önemli ölçüde artacağını göstermektedir (Achmad ve Nugroho 2018). Nüfus artışından dolayı çoğu şehir ve belediyenin sınırlı mali kaynakları göz önüne alındığında, giderek azalan altyapı kaynaklarını optimize etmek için yeni teknolojik çözümlere ihtiyaç duyulduğu sonucu çıkmaktadır. Şehirler, “Nesnelerin İnterneti” (IoT) teknolojileri de dâhil olmak üzere en son bilgi ve iletişim teknolojilerini büyük ölçekte kullandıklarında, “Akıllı Şehirler” olarak adlandırılmaktadırlar. Çağdaş dönemde, birçok küresel şehirde akıllı şehir modelini benimsemeye odaklanan araştırmalar ve çalışmalarda dikkate değer bir artış yaşanmaktadır (Achmad ve Nugroho 2018). Bu çalışmaların amacı, kaynak kullanımını optimize etmek, şehir altyapı verimliliğini artırmak ve şehir sakinlerinin kentsel yaşam kalitesini yükseltmektir. Bu modelleri destekleyen bir dizi çağdaş teknoloji ve metodoloji; sağlık, ulaşım, enerji, eğitim ve diğer önemli alanlarda performansı ve operasyonları artıran akıllı hizmetler sunmaktadır (Kanellopoulos vd. 2023, Jawhar 2018). Ayrıca, akıllı hizmetlerin akıllı şehir ortamlarında işletme giderlerini ve kaynak kullanımını azaltma potansiyeli de bulunmaktadır. Akıllı şehir hizmetleri sadece ileri teknolojilere değil aynı zamanda güvenilir, dayanıklı ağ ve iletişim altyapılarına da dayanmaktadır. Bu altyapılar, hizmet sistemleri içinde çeşitli bileşenler arasında verimli mesaj alışverişini kolaylaştırmaktadır. Hizmet sistemleri farklı ölçeklerde tasarlanmış olup sorunsuz uygulama ve işletme için geniş bir iletişim ve ağ teknolojisi yelpazesi gerektirmektedir (Jawhar 2018). Akıllı şehir hizmetlerini desteklemek için çeşitli ağ ve iletişim modelleri ve stratejileri kullanılmaktadır. Akıllı şehirlerde kullanılan ağ ortamı, enerji kullanımını ve ekipman hareketini izlemek için teknolojilerin entegrasyonunu ve özelleştirilmesini gerektirirken, aynı zamanda yaşam kalitesini önceliklendirmeli ve insan müdahalesini minimize etmelidir (Albino vd. 2015). Yaşam kalitesini arttırmak ve insan müdahalesini minimize etmek için cihazların birbiriyle iletişim halinde olması gerekmektedir. Bu yüzden IoT teknolojisi, diğer cihazlar ve sistemlerle internet üzerinden

veri bağlantısı kurduğu için akıllı şehirlerin tasarım ve uygulamasında merkezi bir rol oynamaktadır (Alharbi ve Soh 2019).

Veri transferini insanlar arası veya insan-bilgisayar etkileşimi gerektirmeksizin ağ üzerinden gerçekleştirebilen teknolojiye IoT denir (Ilyas 2021). IoT, çağdaş bir iletişim paradigmasını temsil eder ve gündelik nesneleri mikro denetleyiciler, dijital iletişim alıcı-vericileri ve uyumlu protokol yığınlarıyla donatarak, bu nesnelerin birbirleriyle ve kullanıcılarla etkileşime girmesini sağlayarak, bunları İnternet'in temel bir bileşeni olarak sorunsuz bir şekilde entegre edecektir (Al-Fuqaha vd. 2015, Atzori 2010). Bir IoT platformu, sensörler ve devreler aracılığıyla herhangi bir nesneden veri toplama, ağ üzerinden işleme ve iletim, depolama, görselleştirme ve kullanıcıların gereksinimlerine göre yapay zekâ düzenlemeleriyle veri işleme süreçlerini içeren bir sistemdir (John ve Ramson 2013). IoT, ileri elektronik sensörler ve aktüatörlerle desteklenmiş akıllı sistemler olan, cihazlar, binalar, evler, araçlar, güç üretimi, dağıtımı ve kullanım merkezlerinin, gelişmiş iletişim ve otomasyon teknolojileri aracılığıyla bağlı ve kontrol edilen bir ağıdır. Fiziksel nesnelerin veya akıllı cihazların kentsel ortamlara entegrasyonunu kolaylaştırır ve her etkinliği hizmet odaklı ve geliştirilmiş bir şekilde, herhangi bir yerden ve herhangi bir zamanda erişilebilir kılan yenilikçi hizmetlere olanak tanır (Zanella 2014). Küresel pazarda herhangi bir IoT'nin başarısı, diğer IoT cihazları, akıllı telefonlar, tabletler ve ilişkili yazılımı olan uygulamaların veya web sitelerinin hızlı bir şekilde iletişim kurma yeteneği tarafından belirlenen performansı ile doğrudan ilişkilidir. IoT'nun küresel pazarda başarılı olabilmesi için iki temel özelliğe ihtiyacı vardır. İlk olarak, IoT cihazları, telefonlar, tabletler ve ilişkili yazılımla hızlı iletişim sağlamalıdır. İkincisi, kilitler, güvenlik kameraları ve gerçek zamanlı güncellemelere dayanan diğer izleme sistemleri gibi cihazlar için güvenilir ve sürekli bir ağ bağlantısı sağlamalıdır (Zanella vd. 2014, Syed vd. 2021). Tüm bu özellikleri göz önünde bulundurarak, beşinci nesil (5G) teknolojisinin IoT alanında geniş uygulamalar bulacağı öngörülmektedir. 5G, daha yüksek veri hızı (mevcut 4G Long Term Evolution (LTE) teknolojisinden 100 kat daha hızlı), daha düşük gecikme süresi ve yüksek düzeyde veri sunmayı amaçlayan yeni nesil hücresel/kablosuz servis sağlayıcı ağıdır (Agiwal vd. 2016). 5G teknolojisi, önceki nesillerle karşılaştırıldığında bir hücresel ağın geniş bant, yüksek veri hızı ve sürekli hizmet kalitesi gibi temel zorluklarına daha etkili bir şekilde

çözüm sunmaktadır (Shafique vd. 2020). IoT uygulaması için belirlenen yeni iş modelleri, büyük ölçekli bağlantı, yüksek gizlilik ve güvenlik, tam kapsama, ultra yüksek güvenilirlik ve ultra düşük gecikme gereksinimleri içermektedir. Yükselen 5G destekli IoT, artan veri hızları, daha iyi kapsama ve yüksek verimlilik sunarak iş modellerine çözümler sağlamakta ve IoT'nin robotlara, aktüatörlere ve insansız hava araçlarına entegrasyonunu mümkün kılmaktadır (Niyato vd. 2017). IoT sistem gereksinimleri ve 5G teknolojisinin sunduğu özellikler karşılaştırıldığında, 5G teknolojisinin IoT alanında geniş uygulamalara sahip olacağı düşünülmektedir.

Akıllı şehirlerde, konferans mekânları, kuleler, apartmanlar ve çok katlı binalarda yoğun çalışma ortamları iletişim ekipmanlarına duyulan ihtiyacı arttırmaktadır. İletişim ekipmanları ve sistemleri, işletim ömürleri boyunca çeşitli elektromanyetik etkilerle karşılaşmaktadır. Elektromanyetik Uyumluluk (EMC) ve Elektromanyetik Girişim (EMI) koşullarına uyulmaması, ekipman hasarına, koruma cihazlarının yanlış çalışmasına (arızalar, gereksiz veya yanlış alarmlar), yalıtım çakışmasına, personel otomasyon istasyonlarının arızalanmasına vb. neden olabilir ve işin güvenilirliğini önemli ölçüde azaltabilir (Grychkin ve Stroganova 2023). EMC ve EMI koşullarını yerine getirme kriteri, tesisin her türlü elektromanyetik etkilerin, belirli ekipmanlar için izin verilen değerleri aşmamasını sağlayan bir elektromanyetik ortamı garanti etmektir (Babkin ve Stroganova 2018, Adebawale ve Sarhab 2017). "Akıllı şehir" kavramına bakıldığında, hem yeni şehirlerin oluşturulmasında hem de mevcut şehirlerin modernizasyonunda, elektromanyetik güvenlikle ilgili sorunların farkına varılmalıdır. Bu sorunlar, "Akıllı Şehir" sistemine dâhil edilen elektrik ve bilgi iletişim ekipmanlarının işleyişi için güvenlik hem de her bir birey için doğrudan etkiler içermektedir. Ağ yoğunluğu, akıllı şehirlerde EMI ve EMC konularını insanlar için önemli endişeler haline getirmiştir. Bu sadece cihazlar arasındaki elektromanyetik (EM) dalga etkileşimlerini ortadan kaldırmak veya filtrelemekle kalmaz, aynı zamanda insanlar ve cihazlar arasındaki etkileşimlere de dikkat çeker (Can ve Yılmaz 2016). Özellikle mikrodalga ve optik frekans bantlarında, uzamsal filtreleme, EM dalgalarını bastırmayı veya ortadan kaldırmayı amaçlayan sinyal işleme sistemlerinde önemli bir işlem olarak öne çıkar. Günlük yüzeylere entegre edilmiş frekans seçici yüzeyler (FSY'ler), IoT uygulamaları için önemli bileşenler olarak durmaktadır. Bunlar, radyo dalgalarının akıllı manipülasyonunu ve filtrelenmesini

sağlayarak nesnelerin ve çevrelerinin bağımsız etkileşimini kolaylaştırır (Sharma vd. 2018, Yang vd. 2011). Ayrıca oluşabilecek elektromanyetik girişimin sebep olacağı sinyal kalitesi düşüklüğü ve yanlış bilgi aktarımından kaynaklı düşük veri hızı gibi IoT için kritik parametreleri iyileştirme yeteneğine sahiptir.

FSY teknolojisini gelecekteki ilerlemeler ile beraber akıllı şehir altyapılarına entegre etmeye yönelik devam eden ilerici araştırmalar mevcuttur (Green vd. 2019, Cui vd. 2021). FSY'ler, çatıların üzerine, binaların içine veya pencerelere stratejik olarak yerleştirilir ve radyo frekansı sinyallerinin alımını ve iletimini geliştirmek için özenle tasarlanmaktadır. FSY'ler genellikle iletken yamalardan veya açıklıklı elemanlardan oluşan periyodik yapılar olarak tasarlanmıştır; elektromanyetik (EM) dalgaları yansıtmak, iletmek veya emmek amacıyla kullanılırlar (Kapoor vd. 2022, Li vd. 2019). Bir FSY, belirli frekanstaki dalgaları serbest uzayda iletebilir veya engelleyebilir; bu nedenle elektromanyetik alanında uzasal filtreler olarak da bilinirler. Son zamanlarda, farklı EM uygulamaları için FSY tasarımı ve analizi alanında büyük bir büyüme gözlemlenmiştir (Qu vd. 2021). Bu uygulamalar arasında ditroik alt-yansıtıcılar, radomlar (Costa ve Monorchio 2012), RFID'ler, kalkanlama (Qu vd. 2021, Koohestani vd. 2020, Can vd. 2017) ve EMI koruması (Lavanya vd. 2020) yer alır. Bu yüzeyler, geçiş bandı, durdurma bandı, düşük geçiş ve yüksek geçiş gibi çeşitli filtreleme özellikleri sergilemektedirler (Kapoor vd. 2022). Düşük geçişli filtreler düşük frekans aralıklarına izin verirken daha yüksek frekansları engellerken yüksek geçişli filtre ise tam tersi şekilde çalışır. Durdurma bandı FSY, istenmeyen frekansları engellemek için kullanılırken, geçiş bandı FSY filtreleri belirli bir frekans aralığına izin verirken diğerlerini reddeder (Munk 2000). FSY'lerde rezonans, metal yamaların veya yuvaların dielektrik bir malzeme üzerine işlenmiş periyodik dizileriyle elde edilir. FSY dizi elemanlarının, şekilleri, boyutları ve alttaş malzemeleri tasarım sürecinin en önemli yönünü oluşturmaktadır. Bu tasarım parametreleri optimize edilerek FSY'nin rezonans frekansı ve bant genişliği ayarlanabilmektedir. FSY sayesinde istenilen frekans bandı için bant geçiren veya bant durduran filtreler tasarlanabilir.

Bu çalışma, IoT uygulamaları için FSY tasarımında optimal elektromanyetik özelliklerin elde edilmesi ve aynı zamanda maksimum optik geçirgenliğinin sağlanması amacıyla

yürütülmüştür. Geliştirilmiş bant genişliği ve şeffaflık gibi işlevsellik, boyut ve maliyet arasında optimal bir denge sağlayarak amaçlanan tasarım hedeflerini gerçekleştirmeyi amaçlamaktadır. Bu çalışmada, en çok kullanılan 5G frekans bantlarından olan 3.7 (n77) GHz ve 4.5 GHz (n79) frekans bantları için ayrı ayrı iki farklı FSY tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmadaki katmanlar, tek başına kullanıldığında belirli bir frekans bandına odaklanarak iki farklı katmanın birleştirilmesiyle beraber 3.61GHz – 5GHz arasında geniş bantlı bir FSY elde etmeyi amaçlamaktadır. Önerilen tasarım yüksek optik şeffaflık, polarizasyon bağımsızlık ve maliyet etkin çözümler sunmaktadır. Önerilen yapının farklı EM dalga geliş açılarında istikrarlı bir çalışma gösterdiği ve yapının $\pm 60^\circ$ 'ye kadar polarizasyon bağımsız olduğu simülasyon çalışmaları ile gösterilmiştir. Alttaş malzeme olarak kullanılan şeffaf polivinil klorür (PVC)'ün esnek yapısı sayesinde yapı farklı teknolojilerde ve kaplamalarda kullanılabilir. Bölüm 2'de, önerilen tasarımın üretiminde kullanılan materyal ve yöntemler hakkında bilgi verilmektedir. Ayrıca ölçümlerde kullanılan test düzeneği, üretim ve simülasyonların süreçleri detaylı bir şekilde açıklanmıştır. Bölüm 3'de, FSY'nin performansını etkileyen parametreler ve FSY eşdeğer devre modeli verilmiştir. Rezonans frekansı, endüktans (L) ve kapasitans (C) değerleri tasarımın geometrisine ve dielektrik malzeme özelliklerine göre hesaplanmıştır. Hesaplanan rezonans frekansı, simülasyon sonuçları ve ölçüm sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Bölüm 4'te, tek katmanlı ve çok katmanlı tasarımlar için parametrik analizler gerçekleştirilmiştir. Parametre analizi kapsamında, kullanılan dielektrik malzemenin, daire çapının, iletken yama kalınlığının ve polarizasyon açısının (TE ve TM) önerilen tasarıma etkileri incelenmiştir. Üretimde kullanılan cihazlar ve prototipin üretim aşamaları hakkında detaylı bilgi verilmiştir. Son kısımda ise ölçüm sonuçları ile simülasyon sonuçları karşılaştırılmıştır.

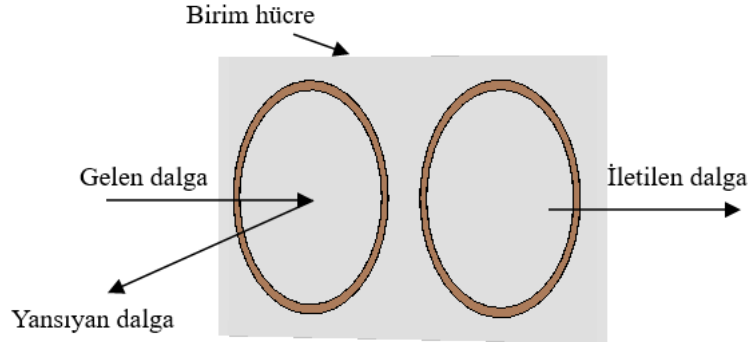
2. KAVRAMSAL TERİMLER

FSY, elektromanyetik (EM) biliminin yoğun olarak incelenen bir konusudur ve genellikle EM dalgaları yansıtmak, iletmek veya absorbe etmek üzere tasarlanmış iletken yama veya açıklık elemanları içeren periyodik yapılar olarak bilinir. (Mittra vd. 1988). Bu yapılar, belirli rezonans frekanslarında iletim ve yansıma gösterirler (Munk 2000). Dizi eleman tasarımına bağlı olarak, gelen düzlem dalga tamamen veya kısmen iletilmiş veya yansıtılmış olabilir. Bu durum, düzlem dalga frekansının FSY elemanlarının rezonans frekansı ile eşlendiğinde gerçekleşir. Dolayısıyla, bir FSY belirli frekanslardaki elektromanyetik dalgaları boş alanda iletebilir veya engelleyebilir; bu nedenle, bunlar uzamsal filtreler olarak tanımlanabilirler (Anwar vd. 2018). Mikrodalga ve optik frekans aralıklarında, tüm sinyal işleme sistemlerinde uzamsal filtreleme en çok istenen işlemlerdendir. Son yıllarda mikrodalga ve optik sinyaller için elektromanyetik filtreler olarak geniş bir şekilde kullanılmaları nedeniyle önemli ölçüde dikkat çekmişlerdir. Bunlar arasında radomlar, dikroik alt yansıtıcılar, bant geçiren ve bant durduran filtreler ve soğurucu gibi uygulamalar bulunmaktadır (Katoch vd. 2019).

FSY'lerin filtreleme özellikleri dört çeşide ayrılmaktadır: düşük geçiş, yüksek geçiş, durma bandı ve geçiş bandı. Düşük geçişli FSY filtreleri, yapı üzerinden daha düşük frekans aralıklarının geçmesine izin verirken, daha yüksek frekans aralıklarını engeller (Munk 2000). Durma bandı FSY filtresi istenmeyen frekansları engellerken, geçiş bandı FSY filtresi yalnızca belirli bir frekans aralığının geçmesine izin verir. FSY'lerin dizi elemanlarının, şeklinin, boyutunun ve alttaş malzemesinin uygun seçimi, tasarım sürecinin en önemli kısmını oluşturur.

Şekil 2.1, FSY'nin işlevselliğini, kendini tamamlayan bir rezonans ağı ile göstermektedir. FSY tabanlı gelişmiş EM yapıların işleyiş ilkesi, Munk (2000) tarafından detaylı bir şekilde açıklanmıştır. Bir EM dalga FSY yüzeyine çarptığında, FSY'nin yüzeyindeki dizi elemanlarıyla etkileşime girer. Gelen EM dalganın elektrik alan bileşeni iletken elemanlar içindeki serbest elektronlar üzerinde kuvvet uygular. Bu kuvvet iletken elemanlar üzerinde elektrik akımları indüklenir. Bu akımlar FSS içinde ve çevresinde dağınık alanlar olarak bilinen ikincil elektromanyetik alanlar oluşturur. Üretilen akımların şiddeti,

EM dalgası ile elemanlar arasındaki enerji bağlantısının gücüne bağlıdır. Bu ikincil dalgalar gelen dalgayla ve birbirleriyle etkileşime girerek yansıma ve iletim etkilerine yol açar. Böylece, tasarım elemanlarına dayalı olarak gereken filtre tepkisi (yani, saçılan alanlar) üretilebilir. FSY'nin frekans davranışı, akımın elemanların şekli üzerindeki dağılımına bağlı olarak belirlenebilir (Panwar ve Lee 2017).



Şekil 2.1 FSY işlevselliği

Şekil 2.1’de de görüldüğü gibi gelen bir EM dalga tasarlanan yapının frekans bant aralığında ise iletilir eğer o aralıkta değil ise yansıtılır. Yama elemanları (dipol FSY’ler), gelen düzlem dalgaları için duraklama bant filtreleri olarak çalışacak şekilde tasarlanmıştır ve belirli frekans aralığında tamamen yansıyan yüzeyler olarak işlev görürler. Karşıtları olan açıklık elemanları (yarıklı FSY’ler), geçiş bantı özellikleri sergiler, yani belirli frekans aralığında gelen EM dalgalarına karşı şeffaf yüzeyler olarak davranırlar. FSY tabanlı EM yapıların tasarımında birkaç önemli zorlukla başa çıkılmalıdır. Bunlar arasında uygun FSY eleman seçimi, iterasyonlar, alttaş parametreleri ve birim hücre boyutları öne çıkar. Bu gereksinimleri karşılamak zorlu olup genellikle EM davranışlarının kritik bir analizini gerektirir.

2.1 Frekans Seçici Yüzeyi Etkileyen Parametreler

FSY’lerin performansı, bir dizi kritik parametre tarafından etkilenir. Bant genişliği, rezonans frekansı, zayıflama oranı ve polarizasyon bağımsızlık gibi faktörler, bu yapıların çalışma karakteristiğini oluşturur. Bant genişliği, bir sinyal veya bir sistemdeki frekans aralığının genişliğini ifade eder. Belirli bir sinyalin taşıdığı frekansların arasındaki fark

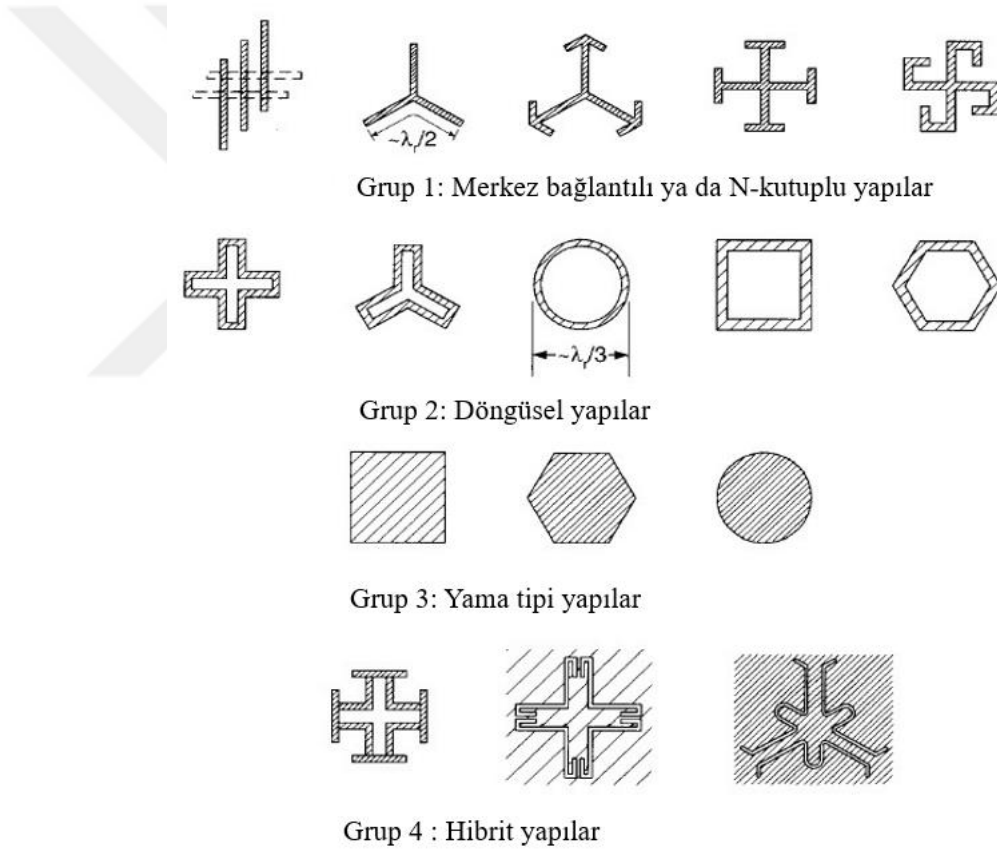
ya da bir sistemin çalıştığı frekans aralığı bant genişliği olarak adlandırılır. Örneğin, bir FSY'nin bant genişliği, belirli bir frekansta ne kadar geniş bir frekans aralığını engellediğini veya ilettiğini ifade eder. Rezonans frekansı, bir sistem veya bir yapıdaki doğal titreşim veya rezonansın gerçekleştiği frekansı ifade eder. Bu frekans, sistemdeki bir enerji depolama veya titreşim durumunda en yüksek etkinliğin görüldüğü frekansı temsil eder. Dizi elemanlarıyla ilgili olarak, bir düzlem dalga belirli bir frekans aralığında ya tamamen ya da kısmen iletilir veya yansıtılır. Bu durum, düzlem dalganın frekansı ile FSY elemanlarının rezonans frekansının eşleştiği durumlarda meydana gelir ve bu nedenle rezonans frekansı, sistemin tasarımı için kritik bir faktördür. Zayıflama oranı ise FSY'ye gelen düzlem dalganın ne ölçüde iletilip ne ölçüde engellendiğinin bir ölçütüdür. Bu oran, belirli bir frekans veya frekans aralığı için gelen dalgaların FSY üzerinden geçerken kaybettiği veya iletilen dalgaların gücü ile gelen dalgaların gücü arasındaki oran olarak ifade edilir. Zayıflama oranı, FSY'nin belirli bir frekans veya frekans aralığındaki performansını belirlemek için önemlidir. Özellikle bant durduran filtreler veya belirli frekanslarda yansıtma veya iletim istenen durumlarda, FSY'nin zayıflama oranı, istenen tepkiyi belirlemede kritik bir faktördür. Literatürdeki çalışmalarda -10dB altında kalan frekans bantları zayıflamış sayılmaktadır. Bant genişliği, rezonans frekansı ve polarizasyon bağımsızlık gibi FSY performansını belirleyen faktörleri etkileyen parametreler aşağıda verilmiştir;

- 1) Eleman Şekli
- 2) Periyodik Yapı
- 3) Eleman Boyutu
- 4) Açısal Kararlılık ve Polarizasyon Kararlılık
- 5) Elemanlar Arası Boşluk
- 6) Alttaş Malzemesi

2.1.1 Eleman şekli

Eleman şekli tasarımında çok önemli bir rol oynamaktadır. FSY, fiziksel yapısı ve geometrisine bağlı olarak, gelen elektromanyetik düzlem dalgasının iletimini ve yansımalarını etkin bir şekilde kontrol edebilir ve düşük geçişli, yüksek geçişli, bant

geçiren ve bant durduran davranışlar sergilemektedir. Bazı öğeler, doğası gereği diğerlerinden daha geniş bantlı veya daha dar bantlıdır, bazıları ise tasarıma bağlı olarak önemli ölçüde değişebilir. Elemanlar, Şekil 2.2'de gösterildiği gibi dört temel grup halinde düzenlenmiştir. Grup-1 (merkezi bağlantılı ya da N-kutuplu yapılar), Grup-2 (döngüsel yapılar, örn. daire, kare, altıgen döngüler), Grup-3 (yama tipi yapılar) ve Grup-4'ü (hibrit yapılar) içerir (Munk 2000). Her şeklin farklı frekans özellikleri bulunmaktadır. Bazıları gelen açılara daha duyarlı olabilirken, bazıları geçiş ve durma bantları arasında hızlı bir geçiş sağlayabilir. Diğer şekiller geniş bir çalışma bant genişliği sunabilir, ancak dikey ve yatay sinyal polarizasyonları arasında tutarsız performans sergileyebilir.



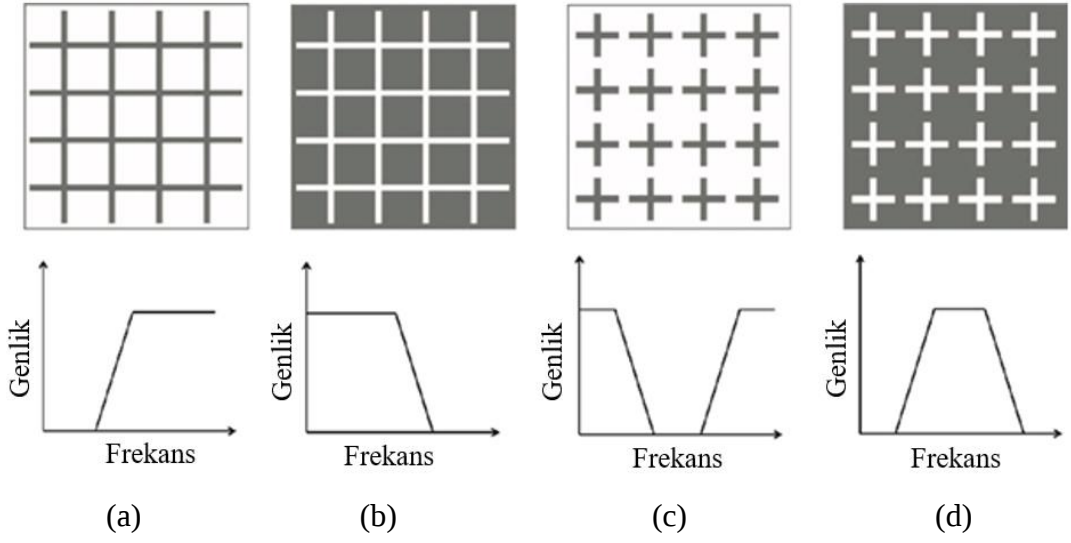
Şekil 2.2 FSY eleman türleri (Munk 2000)

Şekil 2.2'de gösterilen Grup-1, düzlem dalgalar için bant durduran filtre olarak çalışacak şekilde tasarlanmış merkez bağlantılı elemanlardan oluşur ve dar bir frekans aralığında tam yansıtıcı yüzey olarak görev yaparlar. Benzer şekilde, Grup-2'ye ait olan döngüsel

yapılar geçiş bandı özellikleri sergiler, yani çalışma frekans bandı içinde gelen elektromanyetik dalgalar için yarı-yansıtıcı yüzeyler olarak hareket ederler (Munk 2000). Uygulama tabanlı olarak FSY tasarımcıları bu gruplardan herhangi birindeki dizi elemanını seçebilir veya bu grupların kombinasyonlarını kullanabilirler. Hedeflenen uygulama için en iyi eleman, giriş açısındaki değişikliklerde ve farklı polarizasyonlarda kararlı bir rezonans tepkisi göstermelidir. FSY'ler, yalnızca birim hücredeki yama veya yarık boyutu dalga boyunun en az yarısı olduğunda hedef frekansta rezonansa geçmektedirler (Kapoor vd. 2021). Bu kısıtlama, bireysel elemanların elektriksel ölçümlerini dalga boyunun altına indirerek çözülebilir, bu da giriş açısındaki değişikliklere ve polarizasyon açılarındaki değişimlere karşı kararlılığı sağlar (Anwar vd. 2018).

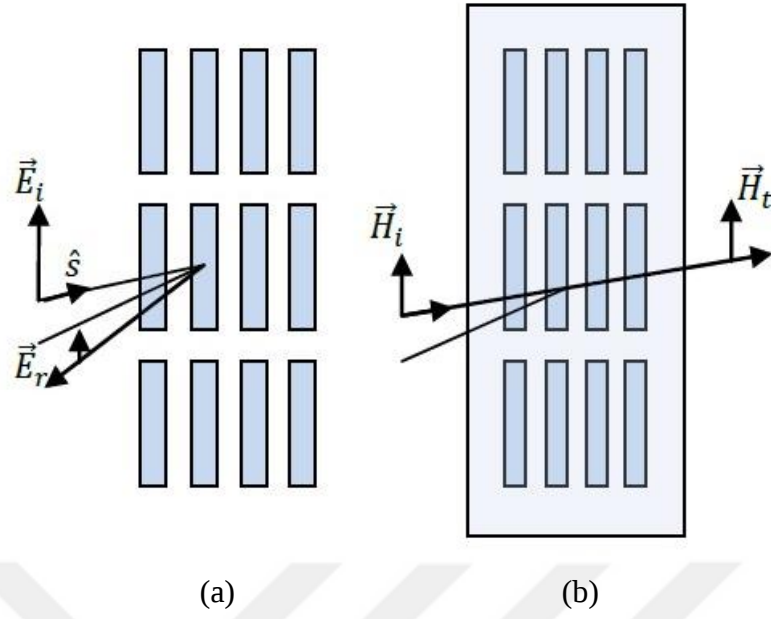
2.1.2 Periyodik yapı

FSY yapıları, iki farklı eleman tipi kullanılarak oluşturulur: metalik yamaların yer aldığı dielektrik levhalar veya metallerdeki boşluklar(açıklıklar). Metalik yamalar, kapasitif davranış ve düşük frekanslı filtreleme özellikleri sergiler. Bu yamalar ve açıklıklar değiştirilirse, yapı endüktif hale gelir ve yüksek frekanslı filtreleme özellikleri ortaya çıkar (Mohyuddin vd. 2018). şekil 2.3, çeşitli filtreler için benzer devreleri ve ilgili filtre tepkilerini göstermektedir. şekil 2.3'de beyaz ile gösterilen bölgeler dielektrik malzemeyi, gri kısım ise iletken elemanları ifade etmektedir. FSY'lerin yapılarına bağlı tepkileri şu şekilde sıralanabilir; şekil 2.3(a) açıklık dizisi yüksek geçişli filtre olarak, şekil 2.3(b) katı yama dizisi alçak geçiren filtre olarak, şekil 2.3(c) yama döngülü dizi bant durdurma filtresi olarak ve şekil 2.3(d) açıklık döngülü dizi bant geçiren filtre olarak tepki verir. FSY yamaları R ve L retecekken, FSY'ler arasındaki boşluklar (açıklıklar) C'ye neden olur (Kapoor vd. 2021). Elektrostatik bilgi, paralel plaka bir kondansatörün kapasitansı ve iki paralel telin indüktansı gibi çeşitli FSY'lerin bu C ve L değerlerinin fiziksel anlamını açıklamak için kullanılabilir. İstenilen filtreleme özelliklerini kontrol etmek için kapasitif ve endüktif modeller bir arada kullanılabilir.



Şekil 2.3 FSY'lerin yapılarına göre tepkileri, (a) Alçak geçiren, (b) yüksek geçiren (c) Bant durduran (d) Bant geçiren filtre (Xiao vd. 2022)

Farklı eleman tiplerinin kombinasyonu ve değişiklikleriyle düşük geçiren, yüksek geçiren, bant geçiren ve bant durdurucu gibi çeşitli filtreleme özellikleri elde edilebilir. Elemanlar yalnızca kapasitif olduğunda, bunun sonucu düşük geçiren bir filtre olur. Ancak, elemanlar tamamen endüktif olduğunda, yüksek geçiş karakteristiği gözlemlenir. Şekil 2.3(a)'da yamaların boyutları açıklıklardan daha büyük olduğundan, yüksek kapasitans ve neredeyse ihmal edilebilir bir endüktans elde edilir (Liu ve Kim 2019). Şekil 2.3(b)'de ise bir önceki durumun tam tersi yani açıklıkların boyut yamalardan oldukça büyük olduğu için ihmal edilebilir bir kapasitans ve yüksek bir endüktans elde edilir ve bu da sistemin yüksek geçiren filtre gibi çalıştığını gösterir. Bu yama ve açıklık kombinasyonları farklı boyutlarda ve kombinasyonlarda kullanılarak, hem kapasitif hem de endüktif özellikleri bir arada barındıracak şekilde bant geçiren ve bant durduran FSY tasarlanabilir.



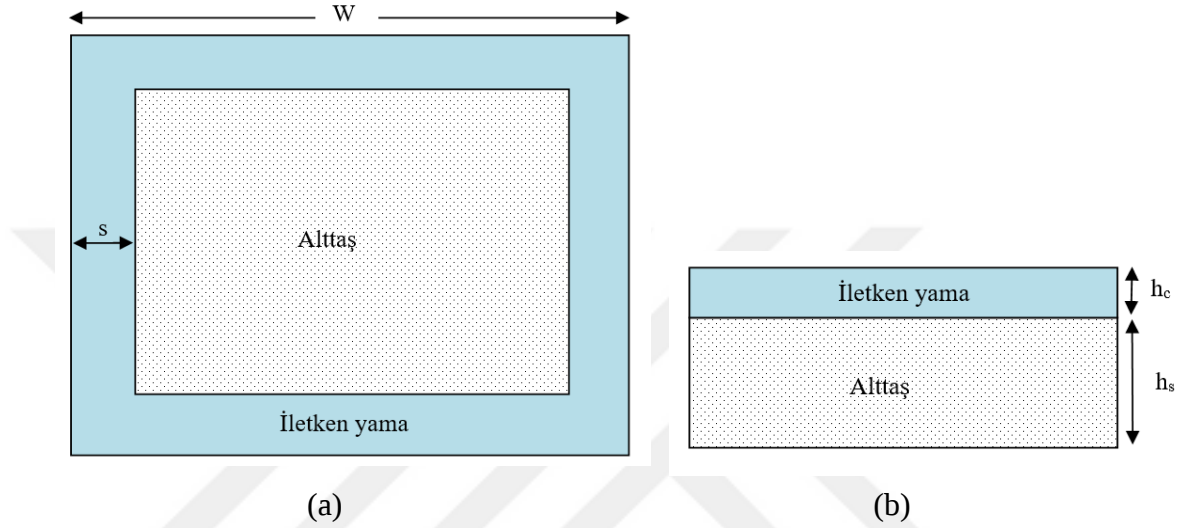
Şekil 2.4 FSY Yapıları (a) Bant durdurucu (b) Bant geçiren (Can ve Yılmaz 2013)

FSY'lerde periyodik yapı gelen dalgaları geçirme veya durdurma yeteneğine sahiptir. Şekil 2.4(a)'da gözlemlenen durum, gelen dalganın yansıtılmasıyla, bir bant durdurucu filtreye benzer bir işlev gösterdiğini belirtmektedir. Diğer taraftan, Şekil 2.4(b) incelendiğinde ise gelen dalganın iletim gösterdiği, dolayısıyla bant geçiren bir filtre gibi davrandığı görülmektedir. Özdeş elemanlar bir veya iki boyutlu sonsuz bir dizide düzenlendiğinde, periyodik bir yüzey oluşur (Hussein vd. 2018). Periyodik bir diziyi uyarmak için iki temel yol bilinmektedir: biri gelen düzlem dalgası yoluyla (pasif dizi tipi) veya bireysel elemana bağlı jeneratörler (aktif dizi tipi) aracılığıyla (Can ve Yılmaz 2013). İlk tipte, gelen düzlem dalgası (E_i) kısmen ileri yönde iletilecek (E_t) ve kısmen de yansıtılacaktır (E_r). Rezonans durumunda ve ızgara lobları olmadan, yansıyan dalga E_r 'nin genliği gelen dalga E_i 'ye eşit olabilirken iletilen sinyal E_t sıfıra eşittir.

2.1.3 Eleman boyutu

FSY'ler tasarlanırken eleman boyutu, performansı etkileyen kritik bir faktördür. Eleman boyutu, FSY'nin çalışma frekansını, bant genişliğini ve zayıflama oranını önemli ölçüde etkiler. Eleman boyutu, FSY'nin rezonans davranışını belirler ve rezonans frekansındaki

değişiklikleri ve rezonans zirvelerindeki keskinliği etkileyebilir. Ayrıca elemanların geometrisi ve düzeni, FSY'nin çeşitli polarizasyonlara karşı ne kadar hassas olduğunu etkilemektedir (Panwar ve Lee 2017). Şekil 2.5'de örnek bir birim hücre tasarımı ve geometri parametreleri verilmiştir. Şekil 2.5(a)'da birim hücrenin üstten görünümü, şekil 2.5(b)'de ise hücrenin yandan görünümü verilmiştir.



Şekil 2.5 Birim hücre (a) Üstten gösterimi (b) Yandan gösterimi

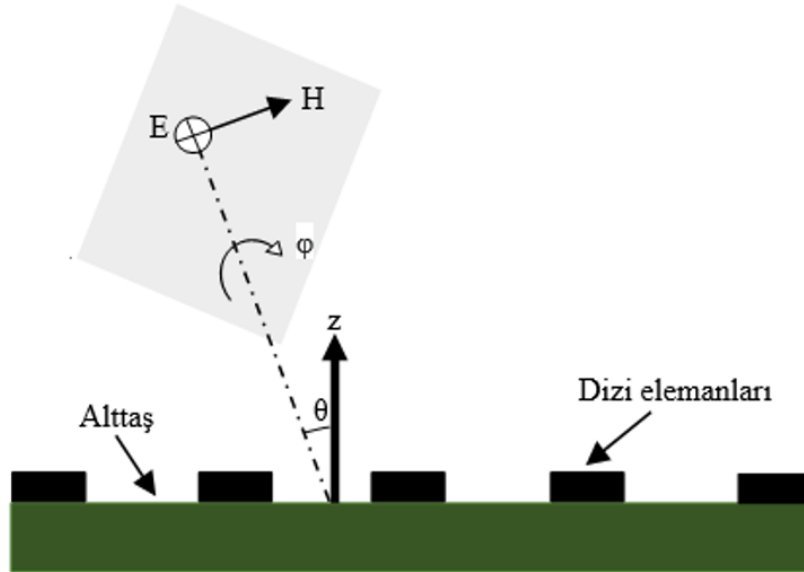
Eleman boyutları, dielektrik ve iletken malzemelerin ölçüleri olmak üzere iki ayrı parametre olarak incelenebilir. Bu iki elemanın boyutları değiştirilerek tasarımlar yeniden düzenlenebilir. Şekil 2.5(a) ve (b)'de verilen birim hücre geometrik parametrelerinin frekans karakteristiğine etkisi incelenmiştir. Alttaş malzemesinin kalınlığı ' h_s ' ile verilmiş olup FSY'nin frekans karakteristiği üzerinde önemli bir rol oynar. Alttaş malzemenin kalınlığı FSY'nin rezonans davranışını etkiler. FSY'de rezonans, elektromanyetik dalgalar periyodik yapıyla etkileşime girdiğinde ortaya çıkar ve belirli frekanslarda yapıcı girişime yol açar. Alttaş kalınlığı, dalgaların malzeme içinde ilerleme hızını etkiler, böylece rezonans davranışını etkiler (Filippo vd. 2011). Daha kalın alt tabakalar, alt tabakadan geçen dalgaların yol uzunluğunun artması nedeniyle daha yüksek iletim kayıplarına neden olabilir ve bu da genel verimliliği etkileyebilir. Tersine, daha ince alt tabakalar, gelen dalgalar ile alttaki yapı arasındaki etkileşimler nedeniyle daha güçlü yansımalar yol açabilir. Alttaş kalınlığı aynı zamanda FSY'nin mekanik kararlılığını ve desteğini de etkiler. Daha kalın alt tabakalar daha iyi mekanik destek sunar

ancak genel yapıya ağırlık ve hacim katabilir. Daha ince alt tabakalar daha esnek olabilir ancak mekanik bütünlüğü tehlikeye atabilir. İletken yamaların genişliği 's' ile gösterilmiş olup, seçici olarak ilettiği, yansıttığı veya bloke ettiği frekanslar açısından FSY'nin performansını doğrudan etkiler. İletken yamaların genişliği FSY yapısının rezonans frekansını etkiler. Yama genişliği artınca döngünün endüktansı küçülür ve böylece rezonans frekansı artar (Bayatpar ve Sarabandi 2008). FSY'nin bant genişliği ve seçiciliği ileten yama genişliğinden etkilenir. FSY periyodikliği, yüzey boyunca birim hücre yapılarının düzenliliğini veya tekrarını ifade eder ve Şekil 2.5(a)'da 'W' ile gösterilmiştir. Periyodiklik FSY'nin rezonans frekanslarını belirler. Daha küçük periyodiklik (daha yakın birim hücre aralığı) daha yüksek frekanslarda rezonansa girme eğilimindeyken, daha büyük periyodiklik daha düşük frekanslarda rezonansa girer. W değeri küçüldükçe ızgara loblarının frekansı rezonans frekansından uzaklaşır. FSY elemanının periyodik yapısı genellikle işletme frekansında yaklaşık bir yarı dalga boyu ($\lambda/2$) olarak seçilir. Bu, ızgara loblarının ortaya çıkmasını önlemek için yapılır (Lee vd. 2004). Periyodiklik, FSY'nin bant genişliğini ve seçiciliğini de etkiler. Daha küçük periyodiklik genellikle daha dar geçiş bantlarına veya durdurma bantlarına yol açar ve bu da belirli frekanslar için daha yüksek seçicilik sağlar. Daha büyük periyodiklik, daha geniş frekans aralıkları sunma eğilimindedir; bu da bant genişliğinin artmasına ancak potansiyel olarak seçiciliğin azalmasına yol açar (Anwar vd. 2018).

2.1.4 Açısal kararlılık ve polarizasyon kararlılık

İdeal bir sistemde, bir FSY genellikle normal yönde gelen radyasyon tarafından uyarılır. Ancak, gerçek bir uygulamada, yayılma yönü bilinmeyebilir veya kontrol edilemeyebilir. FSY'lerde açısal kararlılık, yüzeyin farklı geliş açılarındaki elektromanyetik dalgalara maruz kaldığında frekans seçici özelliklerini koruyabilme yeteneğini ifade eder. Elektromanyetik dalgaların geliş açısı normal geliş açısından saptığında FSY'nin davranışı değişebilmektedir. Gelen dalgaların farklı açılarla ulaştığı çeşitli uygulamalarda açısal kararlılık çok önemlidir. FSY'nin periyodikliği, boyutu, şekli ve birim hücrelerin düzeni dâhil olmak üzere özel tasarımı, açısal kararlılığını etkileyebilir. Bazı tasarımlar diğerlerine kıyasla daha geniş bir geliş açısı aralığında daha iyi kararlılık sergileyebilir.

Şekil 2.6’da düzlem bir dalga’nın geliş açısı ve polarizasyonu gösterilmiştir. Normal geliş için, FSY, yayılma vektörü (k) z eksenine, manyetik alan vektörü (H) x eksenine ve elektrik alan vektörü (E) y eksenine doğru olan bir elektromanyetik dalga tarafından uyarılır. Normal geliş, bir yüzeye veya ara yüze dik olarak çarpan, yani yüzeye 90 derecelik bir açıyla yaklaşan bir elektromanyetik dalgayı ifade eder. Normal olmayan gelişler için yani yüzeye gelen EM dalganın yüzeye 90 dereceden farklı bir açı ile gelmesi durumunda θ geliş açısını ifade eder. Geliş açısı, bir FSY rezonans frekansını, FSY yapısı içindeki etkili yol uzunluğu, faz kayması ve kuplaj verimliliğindeki değişikliklerle ilgili çeşitli mekanizmalar yoluyla etkileyebilir. FSY’deki sinyalin farklı geliş açısı faz farkına yol açar. Bu faz farkı rezonans frekansını değiştirerek FSY’nin kararsız olmasına yol açabilir. Bu sorunu hafifletmenin bir yolu, elemanlar arası mesafenin azaltılmasıdır (Munk 2000).



Şekil 2.6 Düzlem dalga geliş açısı ve polarizasyonu

Bunu yaparak, elemanlar arasındaki mesafe en aza indirilebilir, böylece giriş açısı tarafından neden olan elemanlar arasındaki faz farkının etkisi azaltılabilir. Bazı elemanların diğerlerine göre daha yakın bir şekilde düzenlenmesi daha kolaydır ve giriş açısı tasarım için kritik ise bu elemanlar kullanılmalıdır. Bunun için fraktal desenler, uygun toplu elemanların yüklenmesi ve tamamlayıcı konfigürasyonlar kullanılabilir (Sangeethalakshmi vd. 2021). Polarizasyon açısı (ϕ), gelen

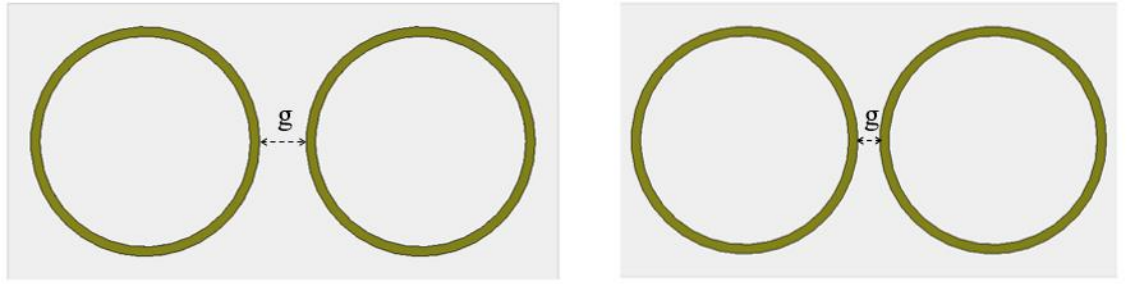
elektromanyetik dalganın elektrik alan vektörünün FSY yüzeyine göre yönelimini ifade eder (Ishimaru 2017). Polarizasyon açısı değiştiğinde, elektrik alanı FSY elemanlarıyla farklı şekilde etkileşime girer ve bu da yüzey empedansını ve dolayısıyla frekans tepkisini değiştirebilir.

Gelen elektromanyetik dalgaların polarizasyonu, FSY iletim, yansıma ve rezonans davranışlarını etkileyerek etkiler. Farklı polarizasyonlar FSS'nin belirli frekansları iletmeye veya yansıtmaya kabiliyetinde değişikliklere yol açabilir ve yapı içinde farklı rezonans modlarını uyarabilir. Dalganın polarizasyonu, hangi alan bileşeninin olay düzlemine paralel olduğuna bağlı olarak belirlenebilir. E-alanı geliş düzlemine paralel olduğunda, dalgaya E-polarize dalga denir. Manyetik alan geliş yönüne dik olduğundan düzlemde E-polarize bir dalgaya aynı zamanda enine manyetik (TM) denir. H-alanı geliş düzlemine paralel olduğunda, dalgaya H-polarize dalga denir. Elektrik alan geliş yönüne dik olduğundan düzlemde H-polarize bir dalgaya aynı zamanda enine elektrik (TE) denir.

2.1.5 Elemanlar arası boşluk

FSY'lerde elemanlar arası boşluk, bu yapıların frekans tepkisinin ve performansının belirlenmesinde kritik bir rol oynar. Bu boşluk Şekil 2.7'de 'g' ile gösterildiği gibi, bir dizideki bitişik elemanlar arasındaki mesafeyi ifade eder. Elemanlar arası boşluk tipik olarak gelen elektromanyetik dalganın dalga boyuna kıyasla küçük olacak şekilde seçilir. Bunun nedeni, elemanlar arasındaki boşluğun FSY'nin rezonans davranışını etkilemesidir. Elemanlar arası mesafe dalga boyuna yakın veya ondan daha küçük olduğunda, belirli frekanslarla etkileşime girebilecek rezonans yapılarının oluşturulmasını kolaylaştırır (Anwar vd. 2018). FSY'in rezonans frekansı üzerinde bu boşluk belirleyici bir etkiye sahiptir. Daha küçük boşluklar genellikle daha yüksek rezonans frekanslarına yol açarken, daha büyük boşluklar rezonans frekansını düşürebilir. Elemanlar arası boşluk çok artarsa, dalga boyunun yarısına yaklaşır veya aşarsa, ızgara loblarının oluşumuna yol açabilir (Wu 2005). Izgara lobları ek radyasyon veya yansıma yönleridir ve FSY'nin performansını düşürebilirler. Aralık çok büyük olduğunda, özellikle değişen geliş açılarında, ana rezonansın daha düşük frekanslara doğru

itilmesiyle ızgara loblarının erken başlamasına neden olabilir (Sangeethalakshmi vd. 2021). FSY elemanları arasındaki boşluk, bant genişliğini ve dolayısıyla çalışma aralığını dalga boyu açısından belirgin şekilde değiştirebilir. Daha küçük bir boşluk genellikle daha dar bir bant genişliği ve daha yüksek bir seçiciliğe yol açar. Bu durum, FSY'nin daha dar bir frekans aralığını daha hassas bir şekilde filtrelemesine imkân tanır. Elemanlar arası boşluğun azaltılması bant genişliğini artırabilir. Özellikle, belirli bir yakın mesafede elemanlar arası kapasitans artabilir ve bu da rezonans frekansını aşağıya çekebilir (Döken 2023).



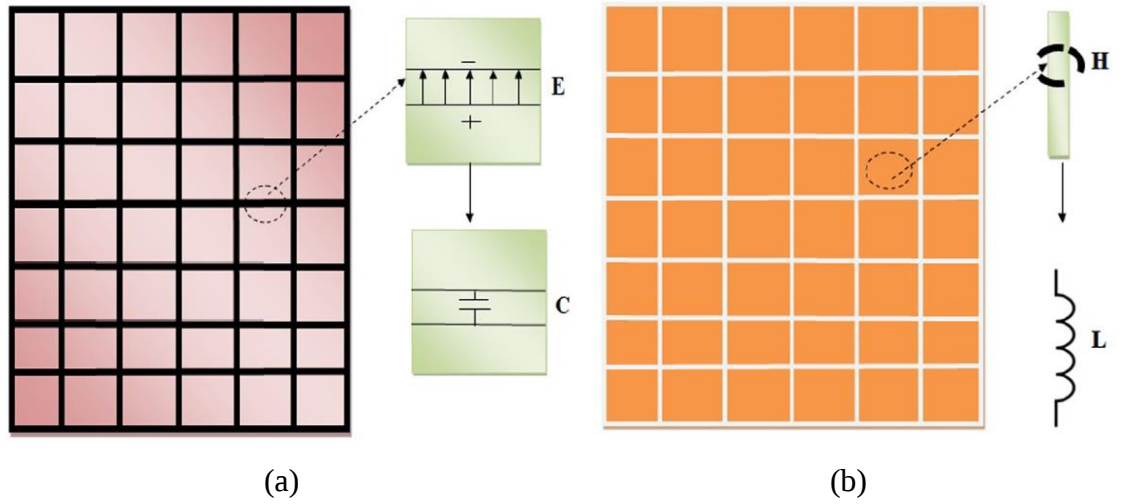
Şekil 2.7 Elemanlar arası boşluk değişimi

FSY'nin eğik geliş açısı performansının önemli olduğu durumlarda, elemanlar arasındaki boşluk, sinyalin saçılmasını önlemek için boşluk dalga boyunun yarısından az olmalıdır. Ancak, normal geliş karşılı bu boşluk bir dalga boyuna eşit veya daha az olabilir (Huang vd. 1994). FSY tasarımında elemanlar arası boşluk, istenilen özellikleri elde etmek için dikkatlice ayarlanması gereken kritik bir parametredir. Özellikle frekans filtreleme ve seçicilik gibi özellikler üzerinde belirgin etkilere sahiptir.

2.2 Eşdeğer Devre Modeli

FSY'leri analiz etmek ve özelliklerini tahmin etmek için eşdeğer devre modelleme yaklaşımı kullanılır. Şekil 2.8'de düşük ve yüksek geçişli cevaplar veren iki farklı tip element dizi geometrisi sunulmuştur. Şekil 2.8(a)'da gösterildiği gibi metalik elemanlar arasındaki boşluklar kapasitansı (C) temsil etmektedir. Elemanlar arasındaki bu boşluklar kapasitansa yol açarak rezonans ve iletim özelliklerini etkiler (Kapoor vd. 2022). Şekil 2.8(b)'de ile gösterilen metalik elemanlar indüklenen döngü akımları nedeniyle

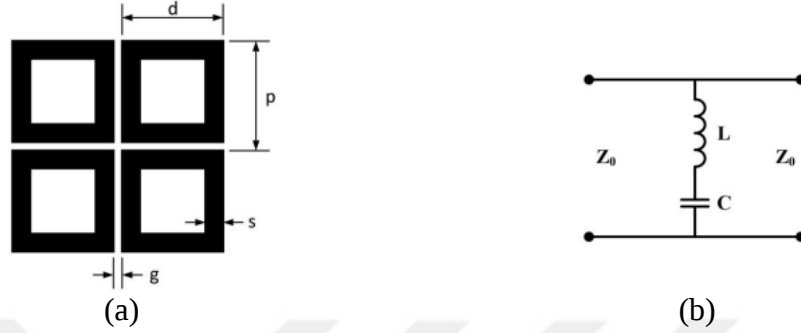
endüktans (L) etkisi gösterirler. İletken ve dielektrik malzeme kayıpları gibi faktörlerden dolayı ise direnç (R) oluşur ve bu FSY'deki kayıpları açıklar. Bir eşdeğer devre modelinin bileşenlerini düşünürken, L metal plakalardan çıkarılırken C bir dizinin elemanları arasındaki mesafeden kaynaklanır. Elektrostatik teori, FSY'lerin çıkış özelliklerini kontrol etmek için bir referans olarak alınır. Bu nedenle, bu eşdeğer kapasitif ve indüktif bileşenleri birleştirerek istenen filtreleme tepkisi üretilebilir. Aynı zamanda, FSY boyutsal parametrelerini değiştirerek, eşdeğer L ve C değerleri değiştirilebilir. Örneğin elemanlar arası boşluk arttırılırsa C değeri boşluk arttığı için azalacaktır. Bunun sebebi ise elemanlar arası elektrik alan kuvvet yoğunluğunun azalmasıdır. Bakır yama genişliği artınca akım yoğunluğu azalacağı için L değeri düşüş gösterir. Eşdeğer devre modeli (ECM), FSY'yi analiz etmek için hızlı ve basit bir yöntem sunar. Bu model, iletim hattı karşılaştırması üzerine çalışır ve FSY'yi L ve C bileşenlerinin eşdeğer toplu bileşenleri aracılığıyla temsil eder (Ferreira vd. 2015, Ferreira vd. 2014). L ve C değerlerinin hesaplamaları, Marcuvitz'in, iletken şeritlere özel olarak uyarlanmış yarı-statik bir ECM yaklaşımının geliştirilmesinden kaynaklanır (Marcuvitz 1986).



Şekil 2.8 Eşdeğer devre modelleme, (a) bireysel elemanlar arasındaki boşluk (b) metalik elemanlar (Kapoor vd. 2022)

Eşdeğer devre modeli, FSY yapısının karmaşıklığına ve ilgilenilen frekans aralığına bağlı olarak değişebilir. Tasarımcıların, ayrıntılı elektromanyetik simülasyonlara ihtiyaç duymadan geometrik parametreler, malzemeler veya çalışma frekanslarındaki

değişikliklerin FSY'nin performansını nasıl etkilediğini analiz etmelerine ve tahmin etmelerine olanak tanır, böylece FSY davranışının daha sezgisel ve basitleştirilmiş bir şekilde anlaşılmasını sağlar. Şekil 2.9(b)'de bir kare döngü FSY'nin eşdeğer devre modeli görülmektedir. İletim elemanları ve elemanlar arası boşluk sırasıyla L ve C'yi simgeler.



Şekil 2.9 Kare döngü (a) Birim hücre tasarımı (b) Eşdeğer devre modeli

Bu nedenle, rezonans frekansı aşağıdaki gibi belirlenir (Varkani vd. 2018);

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

Kesirli bant genişliği (FBW), her ikisi de -10 dB eşiği dikkate alınarak ölçülen üst ve alt frekans yanıtlarının arasındaki farkın merkez frekansına oranını temsil eder;

$$FBW = \frac{f_u - f_l}{f_0} \times 100\% \quad (2)$$

Kesirli bant genişliği eşitliğinde verilen f_u , üst frekansı; f_l , alt frekansı (-10dB eşiği dikkate alınarak); ve f_0 , merkez frekansı temsil eder. ECM kullanılarak eşdeğer indüktans ve kapasitans, bir FSY'yi karakterize eden belirli fiziksel parametrelerden türetilir. Şekil 2.9(a)'da kare bir döngünün tasarım parametreleri verilmiştir. Bu parametreler, periyodiklik (p), döngü uzunluğu (d), iletken yama genişliği (s), geliş açısı (θ) ve elemanlar arası boşluk (g)'dir. Eşdeğer Devre (EC) içinde hem L hem de C değerlerini hesaplama için tipik yaklaşım, (Ferreira vd. 2015, Marcuvitz 1986) tarafından verilen (3) ve (4) denklemlerini içerir.

$$\frac{X_L}{Z_0} = \omega L = \frac{d}{p} \cos \theta F(p, 2s, \lambda, \theta) \quad (3)$$

$$\frac{B_C}{Y_0} = \omega C = 4 \frac{d}{p} \sec \theta F(p, g, \lambda, \varphi) \varepsilon_{\text{eff}} \quad (4)$$

$$F(p, w, \lambda, \theta) = \frac{p}{\lambda} \left[\ln \left(\csc \frac{\pi w}{2p} \right) + G(p, w, \lambda, \theta) \right] \quad (5)$$

$$G(p, w, \lambda, \theta) = \frac{1}{2} \times \frac{(1 - \beta^2)^2 \left[\left(1 - \frac{\beta^2}{4} \right) (A_+ + A_-) + 4\beta^2 A_+ A_- \right]}{\left(1 - \frac{\beta^2}{4} \right) + \beta^2 \left(1 + \frac{\beta^2}{2} - \frac{\beta^4}{8} \right) (A_+ + A_-) + 2\beta^6 A_+ A_-} \quad (6)$$

ve

$$A_{\pm} = \frac{1}{\sqrt{\left[1 \pm \frac{2p \sin \theta}{\lambda} - \left(\frac{p \cos \theta}{\lambda} \right)^2 \right]}} - 1 \quad (7)$$

$$\beta = \sin \left(\frac{\pi w}{2p} \right) \quad (8)$$

Denklem, geliş açısı (θ), polarizasyon açısı (φ), dalga boyu (λ) ve G olarak gösterilen bir düzeltme terimi ile ilişkilidir (Ferreira vd. 2015, Marcuvitz 1986). Munk (2000), kare döngülü FSY için literatürde uygulanan $\varepsilon_{\text{eff}} = 0.5x(\varepsilon_r + 1)$ değeri ile ε_{eff} 'yi tanıttı. Altaş olarak kullanılan malzemenin bağlı dielektrik sabiti ε_r ile ifade edilmiştir. FSY yapısının efektif dielektrik sabiti ise ε_{eff} ile ifade edilmiştir. Bu parametre, dielektrik geçirgenliği değiştirmek için etkili bir yöntem olarak hareket eder. Ancak, birçok simülasyon yapıldıktan sonra, bu düzeltme faktörünün dahil edilmesi veya dışarıda bırakılmasının doğruluğunun özellikle dielektrik altaşın önemli ölçüde kalın ($> \lambda/5$) veya aşırı ince ($< \lambda/100$) olduğu senaryolara özgü olduğu gözlemlendi.

Sonuçta hafif bir sapma oluştursa da düzeltme faktörlerinin ihmal edilmesi, Denklem (3) ve (4)'ün aşağıdaki gibi yeniden yazılmasına izin verir.

$$\frac{\omega_{rL}}{Z_0} = \frac{d}{p} \cos \theta \times \frac{p}{\lambda} \ln \left[\csc \left(\frac{\pi w}{2p} \right) \right] \quad (9)$$

$$\frac{\omega_{rc}}{Y_0} = 4 \frac{d}{p} \sec \theta \times \frac{p}{\lambda} \ln \left[\csc \left(\frac{\pi g}{2p} \right) \right] \times \epsilon_{eff} \quad (10)$$

Yukarıda verilen denklemler kullanılarak tasarım parametrelerine bağlı olarak bir FSY'nin eşdeğer devre modeli oluşturulup kapasitans, endüktans ve rezonans frekansı değerleri bulunabilir. Bölüm 4.3.3'de tasarlanan dairesel döngü tipi FSY yapısının eşdeğer devre modeli verilmiştir.



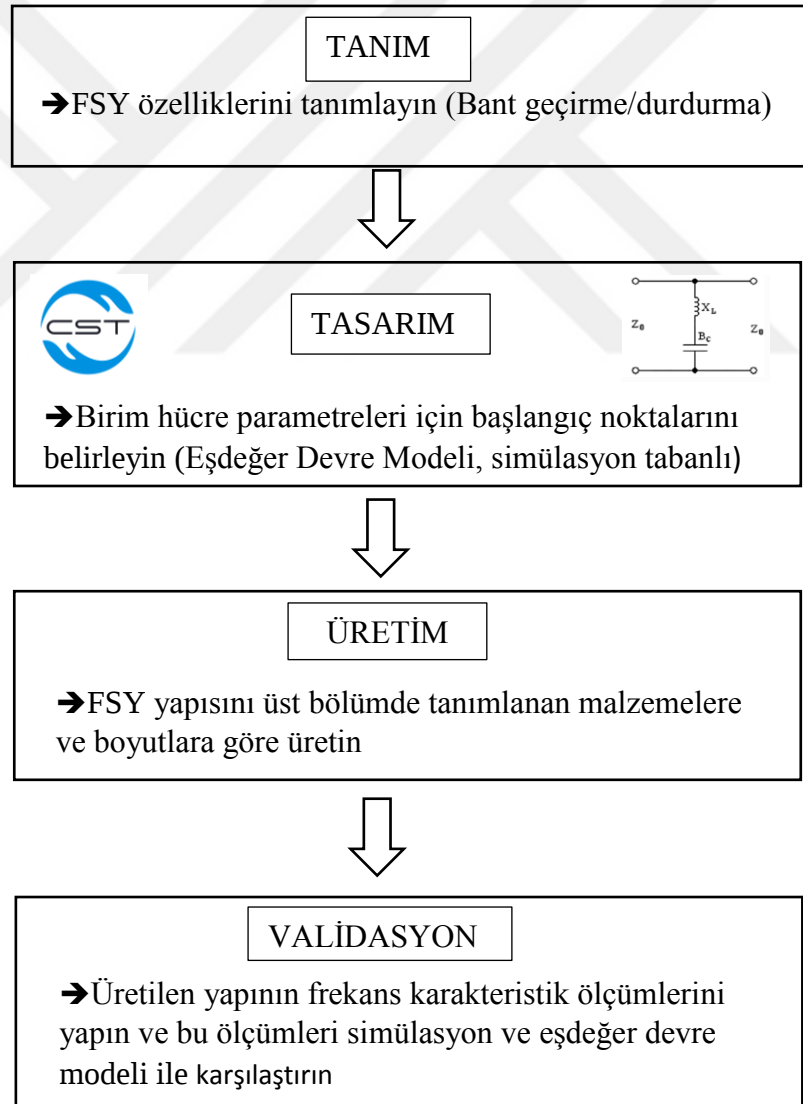
3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada iki farklı FSY tasarlanmıştır ve bu tasarımlar birlikte kullanılarak hedeflenen optik geçirgen geniş bant bir yapı elde edilmiştir. Bu yapının tasarım, analiz ve üretim yöntemleri bu bölümde verilecektir. Şekil 3.1’de tasarım ve üretim sürecinin anlatıldığı bir akış şeması bulunmaktadır. Akış şemasında da görüldüğü gibi ilk adım olarak çalışmada kullanılacak frekans bandı ve bant genişliği belirlenir. Bu çalışma, IoT uygulamalarını temel aldığından ve bu uygulamalarda 5G frekans bantlarının kullanılmasının yüksek ihtimal olduğundan, en çok kullanılan 5G frekans bantlarından olan 3.7 (n77) GHz ve 4.5 (n79) GHz bantları seçilmiştir. Frekans bantları seçildikten sonra uygulama için en uygun FSY elemanı seçilmesi gerekmektedir. Munk (2000)’a göre genel olarak dört temel FSY eleman grubu tanımlanmıştır. Potansiyel uygulamaya bağlı olarak, FSY tasarımcıları bu gruplardan herhangi birinden dizi elemanını seçer veya bunların bir kombinasyonunu da kullanabilir. İyi bir eleman, geliş açılarındaki değişikliklerle birlikte kararlı bir rezonans tepkisi sunmalıdır. Bu çalışmada kullanılacak frekans bantlarındaki dalga boyuna uygun olacağı düşünülen ve ayrıca yüksek bant genişliği sağlayabilen dairesel döngü elemanı seçilmiştir. FSY elemanı seçildikten sonraki adım ise katmanların boyutlarını belirlemektir. Eleman boyutu yapının rezonans frekansını, bant genişliğini ve izolasyonunu belirleyen en büyük etkenlerden biridir. WR229 dalga kılavuzuna hizalamak ve sıdırmak için alttaş malzemesinin boyutları, 29,083 mm genişliğinde ve 58,166 mm uzunluğunda olacak şekilde belirlenmiştir. Alttaş malzemesi olarak görünür bölgede optik geçirgenlik sağlaması için dielektrik sabiti 2.77 ve kalınlığı 1.48 mm olan optik olarak geçirgen şeffaf PVC kullanılmıştır. Literatürdeki çalışmalarda kullanılan indiyum kalay oksit (ITO) maliyeti yüksek olduğundan, temperli ve tempersiz cam ise hem ağırlık hem de esnek olmayan yapısından dolayı tercih edilmemiştir. Şeffaf PVC malzemesinin elektriksel ölçümleri Can (2017) tarafından gerçekleştirilmiştir. Temelde iki farklı uzunlukta mikroşerit hatların ölçümü yapılacak malzeme üzerine tasarlanması ile faz farkını da göz önünde bulundurarak ölçülmesi ile elde edilen elektriksel özellikler bu tez kapsamında da kullanılmıştır. Yenilikçi malzemeler kullanmak isteniyorsa önce malzemenin elektriksel özellikleri bulunmalıdır. Bunun yanı sıra parçadan parçaya üretim sebebi ile farklılık gösterebilecek bu özellikler bilhassa yüksek frekanslara çıkıldığında göz ardı edilmemeli, ilgili frekans aralığı için

ölçümler tekrarlanmalıdır. İletken malzeme olarak ise literatürde çokça kullanılan ve kolay ulaşılabilir bir malzeme olan 35 μm kalınlığında bakır kullanılmıştır. FSY elemanının boyutlarının belirlenmesi için tam dalga elektromanyetik benzetim programı CST Microwave Studio kullanılmıştır. Altaşın ölçüleri dalga kılavuzu temel alınarak belirlendiği için benzetim programı ile dairesel yapının boyutları yani dairenin çapının ve bakır yama genişliğinin ölçüleri optimize edilmiştir. Her bir katman tek frekans bandı için tasarlandığından yapıda bulunan iki adet dairesel FSY elemanının boyutları birbirine eşittir. Simülasyon yardımıyla parametre analizi yapılarak hedeflenen frekans bandı için eleman boyutları belirlenmiştir. Eleman boyutları belirlendikten sonra bu boyutları doğrulamak için en çok kullanılan metotlardan biri olan eşdeğer devre modeli kullanılmıştır. ECM, FSY'yi analiz etmek için hızlı ve basit bir yaklaşım sağlayarak geometrik parametreleri yaklaşık olarak hesaplamamıza olanak sağlar. Fakat tam dalga simülasyonlarına kıyasla daha düşük bir doğruluğa sahiptir. ECM, FSY'yi endüktans (L) ve kapasitans (C)'nin eşdeğer toplu bileşenleri aracılığıyla temsil eden bir iletim hattı karşılaştırması üzerinde çalışır. Bölüm 2.2'de eşdeğer devre modelinin detaylı açıklaması, katmanlar için oluşturulan eşdeğer devre modeli ve matematiksel hesaplamaları mevcuttur. Eşdeğer devre modelinin matematiksel hesaplanması için MATLAB ortamında bir program yazılarak katmanların L ve C değerleri ve bu değerler kullanılarak rezonans frekansı hesaplanmıştır. Üretim kısmına geçilmeden önce tasarımın doğruluğu eşdeğer devre modeli ile doğrulanmıştır. Fakat bu çalışmada üretimden önce bir adet daha doğrulama işlemi yapılmıştır. Advanced Design Systems (ADS) programında eşdeğer devre modeli yani elektrik devresi oluşturulmuş ve eşdeğer devre modeli ile hesaplanan L ve C değerleri ile devre simüle edilmiştir. Sonuç olarak üretime başlanmadan önce 3 farklı frekans karakteristiği elde edilmiştir. Bu karakteristikler birbiri ile karşılaştırılmış ve aralarında çok iyi bir uyum olduğu gözlemlenmiştir. Eleman boyutu yukarıda bahsedilen 3 farklı doğrulama metodu ile onaylandıktan sonra üretim sürecine geçilmiştir.

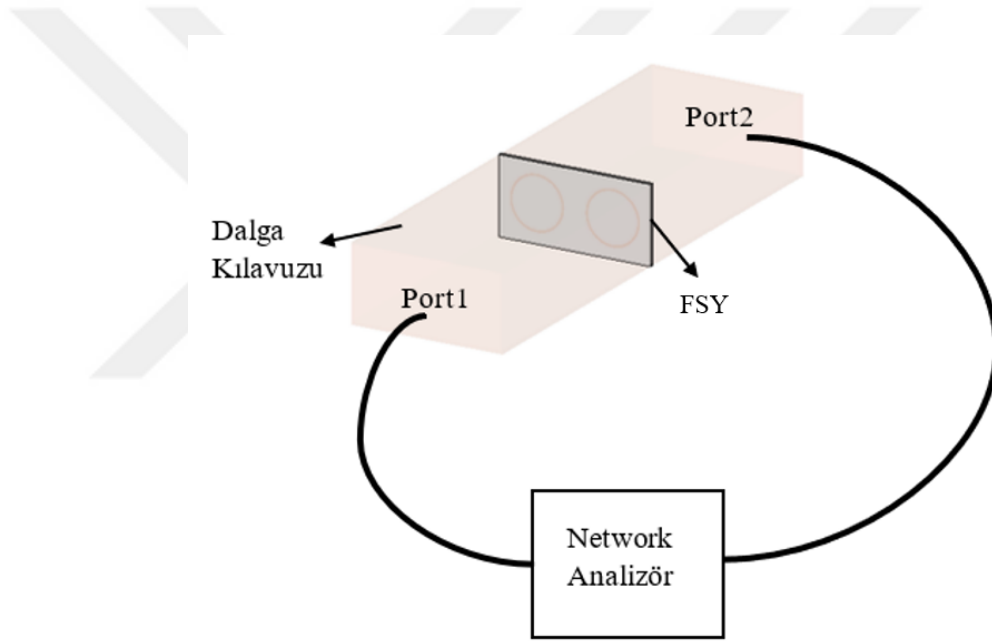
Optik olarak şeffaf çift katmanlı geniş bant tasarımını deneysel olarak doğrulamak için, Katman 1 ve Katman 2, hem baskı hem de kesme tekniklerini içeren bir süreçten geçirilmiştir. Şeffaf PVC, ölçümlerde kullanılan dalga kılavuzunun boyutlarına göre kesilmiştir. Önerilen tasarımın 2 boyutlu çizimi AutoCAD programında gerçek ölçülerle çizilmiştir. Bu 2 boyutlu çizim ve bakır bant aynı anda HP lazer-jet P1005

model yazıcıya gönderilerek bakır bant üzerine FSY yapısının çizimi gerçekleştirilmiştir. Böylece bakır bant üzerindeki referans çizimine göre gerekli iletken parçalar kesilerek şeffaf PVC üzerindeki gerçek pozisyonlarına yapıştırılmıştır. Üretimin tamamı manuel yöntemler kullanılarak el işi ile gerçekleştirilmiştir. Bu sebeple ölçümlerde küçük de olsa üretim kaynaklı hata payı olabilmektedir. Belirtilen yöntemler ile 2 farklı FSY üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretim işlemi tamamlandıktan sonra test düzeneği Şekil 3.2’deki gibi hazırlanmıştır. Ölçümlere başlamadan önce kullanılacak olan network analizörünün portlarının kalibrasyonu yapılmıştır. Kalibrasyon işlemi tamamlandıktan sonra network analizörün port1 ve port2 bağlantıları dalga kılavuzuna bağlanmıştır.



Şekil 3.1 FSY tasarım ve üretim süreci

Network analizör olarak ölçüm aralığı 9kHz ile 13.6GHz olan Rohde & Schwarz ZVL13 kullanılmıştır. Kullanılan WR229 dalga kılavuzunun alt kesim frekansı 2.577 GHz iken üst kesim frekansı ise 5.154 GHz'dir. Tüm bağlantılar tamamlandıktan sonra birinci katman dalga kılavuzu içine yerleştirilir, network analizörde ölçülmesi gereken frekans aralığı belirlenir ve ölçüm gerçekleştirilir. Aynı işlem katman 2 ve çoklu katman için de gerçekleştirilir. Çoklu katman ölçümlerinde katmanlar arasında belli bir hava boşluğu olması gerekmektedir. Bu hava boşluğunun uzunluğu simülasyon yardımıyla bulunmuş olup simülasyon sonuçları Bölüm 4'te sunulmuştur. Yapılan simülasyon sonucunda hedeflenen bant genişliğinin sağlanması için katmanlar arasındaki hava boşluğu 8mm olarak belirlenmiştir. Ölçümler esnasında bu hava boşluğunun dalga kılavuzu içinde



Şekil 3.2 Ölçümlerin gerçekleştirildiği deney düzeneği

hizalanmasında zorluk yaşanmıştır. Bu hizalamayı sağlamak için dielektrik sabiti havanın dielektrik sabitine yakın bir malzeme seçilmiş ve bu malzeme katmanlar arasına yerleştirilerek hizalama gerçekleştirilmiştir. Ölçüm sonuçları ve üretilen prototipin detayları Bölüm 4'te sunulmuştur. Ölçüm tamamlandıktan sonra veriler analizörden dışarı aktarılır ve MATLAB programı kullanılarak verilerin grafik çizimleri gerçekleştirilir.

4. TASARIM, ANALİZ VE ÜRETİM

Bu bölümde tasarlanan FSY'lerin önerilen uygulama alanları, tasarım aşamaları, parametrik analizleri, üretim süreci ve sonuçları verilmiştir. 3 farklı tasarım gerçekleştirilmiş olup bunların detayları alt bölümlerde verilmiştir. İlk çalışmada WLAN frekans bantları için dikdörtgen şekilli çift bant FSY tasarımı, ikinci çalışmada 5G frekans bandı için optik olarak geçirgen FSY tabanlı bir soğurucu tasarımı ve son çalışmada ise IoT uygulamaları için optik olarak geçirgen polarizasyon bağımsız geniş bant çift katmanlı FSY tasarımı gerçekleştirilmiştir.

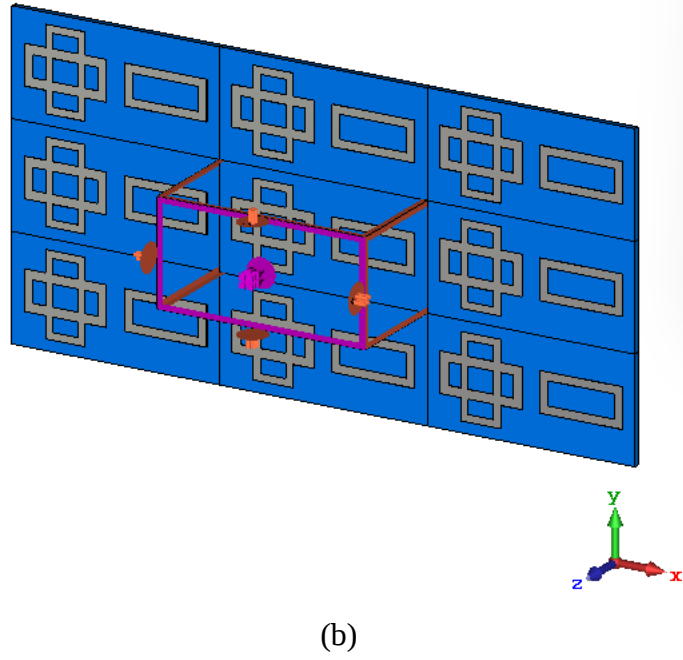
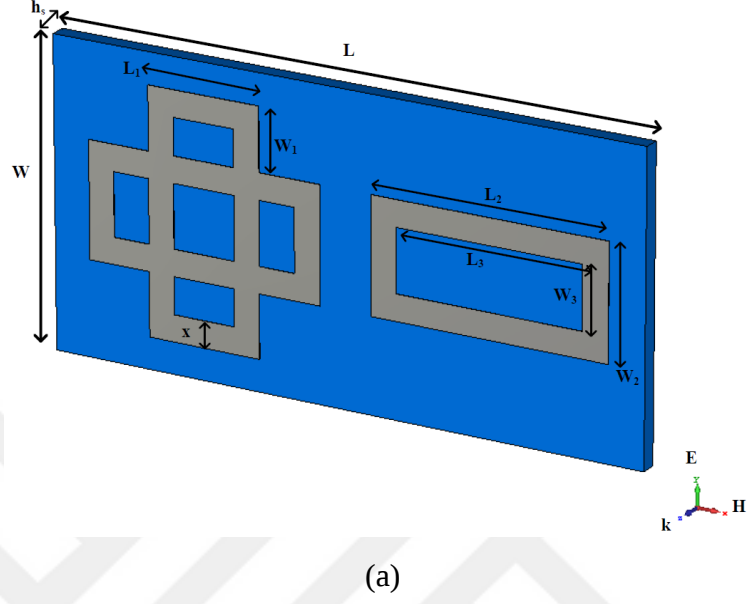
4.1 Dikdörtgen Yapılı Frekans Seçici Yüzey

Bu çalışmada, dikdörtgen yapılar kullanılarak özgün bir çift bantlı FSY tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarımın amacı, 3.6 GHz ve 4.9 GHz WLAN frekans bantlarını engelleyerek diğer frekans bantlarını geçirmek üzere çift bantlı bir yapı oluşturmaktır. Alttaş malzemesi olarak tek katmanlı FR-4 seçilmiştir ve FSY deseninin istenen frekansta tepki göstermesi için CST Studio Suite® adlı 3 boyutlu tam dalga elektromanyetik benzetim programı kullanılmıştır. FSY'nin üretimi, tek katmanlı FR-4 malzeme kullanılarak LPKF cihazında gerçekleştirilmiş olup deneysel ölçümler network analizörü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Parametrik analizler, deneysel verilerle karşılaştırılarak ölçümler doğrulanmıştır.

4.1.1 Yapı ve mimari

Önerilen birim hücre tasarımının üst yüzeyinin geometrisi Şekil 4.1(a)'da verilmiştir. Alttaş olarak kullanılan FR-4 malzemenin genişliği W , uzunluğu L ve kalınlığı h_s olarak gösterilmiştir. FR-4 malzemenin kalınlığı 1.48 mm ve dielektrik sabiti 4.3'dür. Üst yüzeyde gözüken iletken yamalar h_c ile ifade edilmiş olup 35 μ m kalınlığında bakır kullanılarak elde edilmiştir. Uyarımda, k dalga yayılım yönünü temsil ederken, elektrik alanı E ve manyetik alanı H ile sırasıyla gösterilmiştir. Çift bant tasarımını sağlamak için yapının sol tarafında bulunan dikdörtgene, soldaki dikdörtgen ile boyutları aynı bir

dikdörtgen dik olarak yerleştirilmiştir ve bu yerleştirilen dikdörtgen farklı bir rezonans frekansı oluşturmıştır.



Şekil 4.1 Önerilen tasarıma ait (a) Birim hücre tasarımı (b) Sınır koşulları

Önerilen yapının alttaş malzemenin eni W ile gösterilmiş olup değeri 29.083 mm boyu ise L ile gösterilmiş olup değeri 58.166 mm olarak seçilmiştir ve bu ölçüler WR229 dalga kılavuzunun ölçüleri ile aynıdır. Birim hücre tasarımın parametre değerleri Çizelge 4.1’de

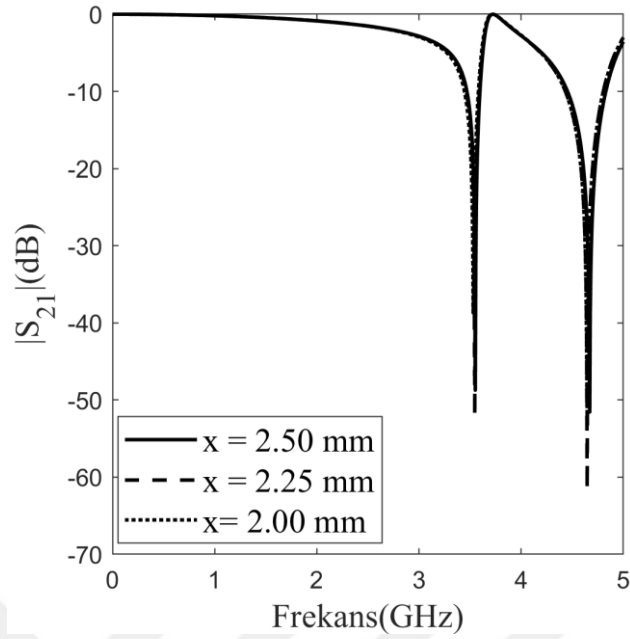
verilmiştir. Tasarımda kullanılan dikdörtgen yapıların enleri, boyları ve bakır yama genişlikleri eşittir.

Çizelge 4.1 Dikdörtgen yapılı FSY'ye ait birim hücre tasarım parametreleri

Parametre		Değer
x		2.5 mm
W		29.083 mm
W1		6 mm
W2		11 mm
W3		6 mm
L		58.166 mm
L1		11 mm
L2		23 mm
L ₃		18 mm
h _c		35 µm

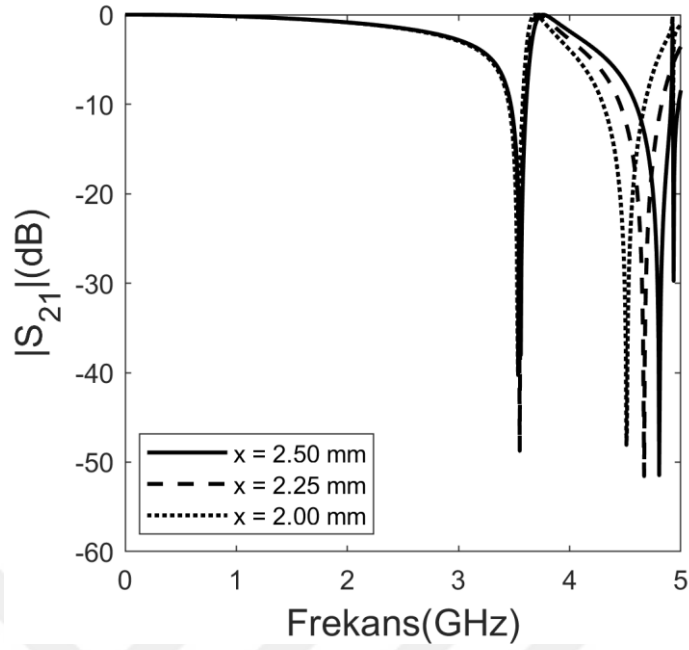
4.1.2 Parametrik analiz

Bu bölümde tasarımı optimize etmek için gerçekleştirilen parametrik analiz sonuçları gösterilmiştir ve sonuçların detaylı açıklamaları yapılmıştır. Parametrik analizi gerçekleştirmek için tam dalga elektromanyetik simülatörü CST Microwave Studio kullanılmıştır. Optimizasyon sonucu elde edilen tasarım parametreleri Çizelge 4.1'de verilmiştir. Genel olarak bu kısımda alttaş malzemenin, iletken yama genişliğinin (x) ve alttaş malzeme kalınlığının (h_s) frekans karakteristiğine olan etkisi incelenmiştir.



Şekil 4.2 Artı şekilli rezonatör bakır yama kalınlığının üst frekansa etkisi

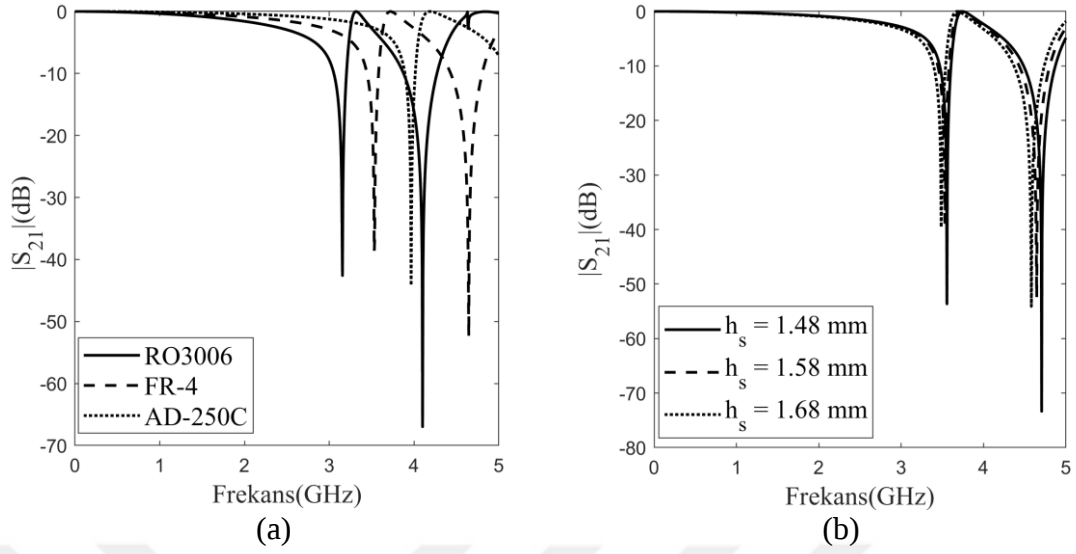
Şekil 4.2’de artı şekilli rezonatörün bakır yama genişliği değiştirilmiş ve üst frekansa olan etkisi incelenmiştir. Bakır yama genişliği 0.25 mm’lik adımlarla arttırılmıştır ve sırasıyla 2.0 mm, 2.25 mm ve 2.50 mm yama genişliği için simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.2’de görüldüğü gibi artı şekilli rezonatörün yama genişliğinin değişimiyle, alt ve üst bölge rezonans frekansında önemli ölçüde bir değişim gözlemlenmemiştir. Bunun sebebi ise birbirine dik olarak yerleştirilen dikdörtgenler arasında oluşan etkin bağlaşımın değişmemesidir. Şekil 4.3’de ise birim hücrenin sağ tarafında bulunan dikdörtgen rezonatörün bakır yama genişliği 2.0 mm, 2.25 mm ve 2.50 mm değerleri için analiz edilmiştir. Yama genişliğinin artmasının alt frekansa herhangi bir etkisi olmadığı görülmektedir. Fakat üst frekans bandında yama genişliğinin artmasıyla beraber rezonans frekansının arttığı görülmektedir. Rezonans frekansındaki artmanın nedeni ise yama genişliğinin artması ile birlikte döngünün endüktasının küçülmesidir.



Şekil 4.3 Dikdörtgen bakır yama kalınlığının üst frekansa etkisi

Bakır yama genişliğinin 2.50 mm olduğu durumda rezonans frekansı 4.81 GHz iken 2.25 mm olduğu durumda rezonans frekansı 0.14 GHz azalarak 4.67 GHz olmuştur. Bakır yama genişliğinin 2.00 mm olduğu durumda ise rezonans frekansı 4.52 GHz'dir. Yama genişliğinin değişmesinin bant genişliğine etkisinin oldukça az olduğu görülmektedir.

Farklı dielektrik alttaş malzemelerinin yapının frekans karakteristiğine olan etkisi incelenmiş olup sonuçlar Şekil 4.4(a)'da verilmiştir. Analizlerde 3 farklı dielektrik malzeme kullanılmıştır. Bunlar; AD-250C, FR-4 ve RO3006'dir ve elektriksel geçirgenlik değerleri sırasıyla 2.52, 4.3 ve 6.5'dir.

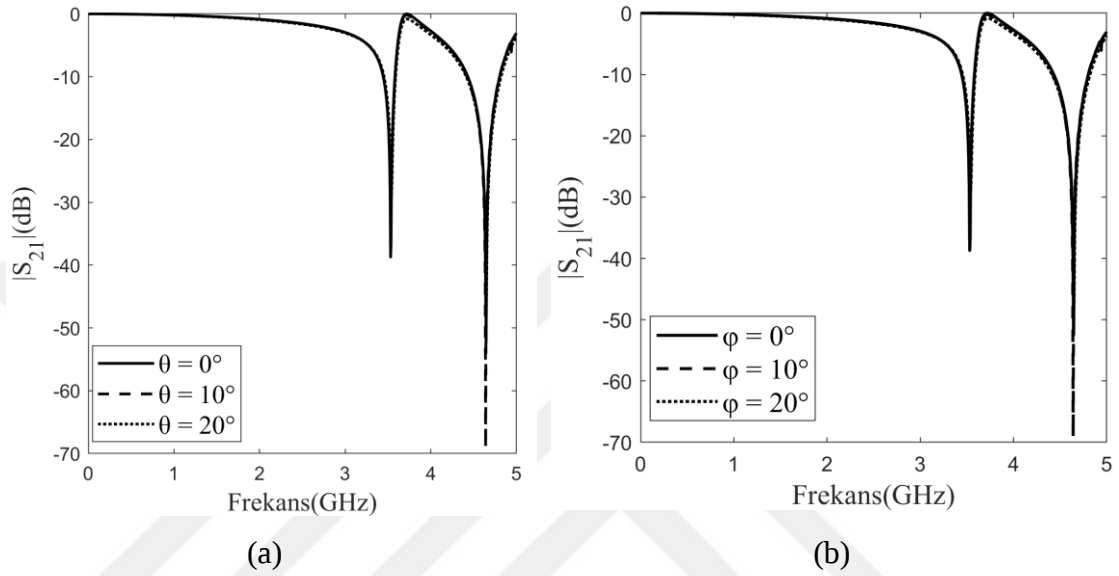


Şekil 4.4 (a) Alttaş malzemenin frekans karakteristiğine etkisi (b) Alttaş malzemenin kalınlığının frekans karakteristiğine etkisi

Simülasyonlarda sadece elektriksel geçirgenliğin etkisinin anlaşılması için alttaş kalınlıkları her 3 malzeme için sabit tutulmuştur. Şekilden de görüldüğü gibi alttaş malzemenin yani malzemenin dielektrik sabitinin değişmesiyle rezonans frekansının ciddi bir şekilde değiştiği görülmüştür. AD-250C malzeme kullanıldığında alt rezonans frekansı 3.53 GHz'den 3.97 GHz'e kaymıştır, üst frekans bandı ise dalga klavuzunun kesim frekansı dışına çıkmıştır. FR-4 malzeme kullanılmasıyla birlikte alt frekans bandının 3.53 GHz ve üst frekans bandının 4.65 GHz olduğu gözlemlenmiştir. RO3006 için ise alt frekans 3.12 GHz, üst frekans ise 4.1 GHz'dir. Simülasyon sonucunda dielektrik sabitinin azalmasıyla beraber rezonans frekansının arttığı saptanmıştır. Şekil 4.4(b)'de ise alttaş malzemenin kalınlığının frekans karakteristiğine etkisi incelenmiştir. Kalınlık değerinin 0.1 mm arttırılması ile birlikte alt ve üst frekans bantlarında çok küçük değişiklikler gözlemlenmiştir.

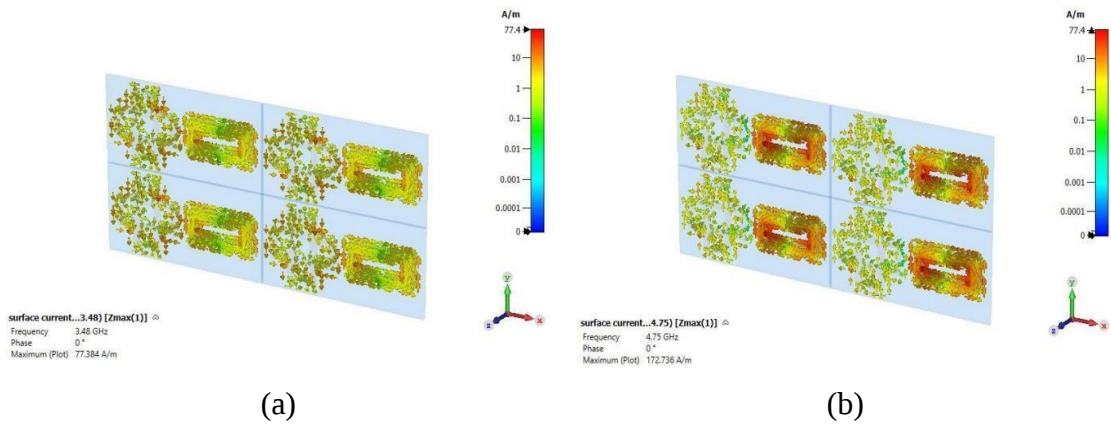
Tasarımların polarizasyon bağımsız olması oldukça önemli bir parametredir. Analizler, önerilen yapının polarizasyon bağımlılığını test etmek amacıyla düzlemsel dalganın elektrik alan bileşeninin yatay düzlemde z eksenine olan açısı (θ) kontrol edilerek yapının düzlemdeki açısal bağımlılığını incelemiştir ve sonuçlar Şekil 4.5(a)'da verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi 20° 'ye kadar yapının gelen açının değişimine karşı istikrarlı bir davranış göstermiştir. Şekil 4.5(b)'de ise polarizasyon açısının yapının frekans

karakteristiğine karşı tepkisi ölçülmüştür. Şekilden de görüldüğü gibi 20° 'ye kadar değiştirilen polarizasyon açısının alt ve üst frekans bandına herhangi bir etkisi yoktur. Fakat tasarlanan yapı asimetrik olduğu için 20° 'den büyük geliş ve polarizasyon açıları için stabil bir davranış göstermeyecektir.



Şekil 4.5 EM dalga açısının iletim karakteristiğine etkisi (a) Geliş açısı (b) Polarizasyon açısı

Dalga kılavuzunun kesme frekansları 2,557 GHz ile 5,154 GHz arasındadır. Bu kısıtlamalarla CST ile elde edilen yüzey akımları Şekil 4.6'da sunulmaktadır.

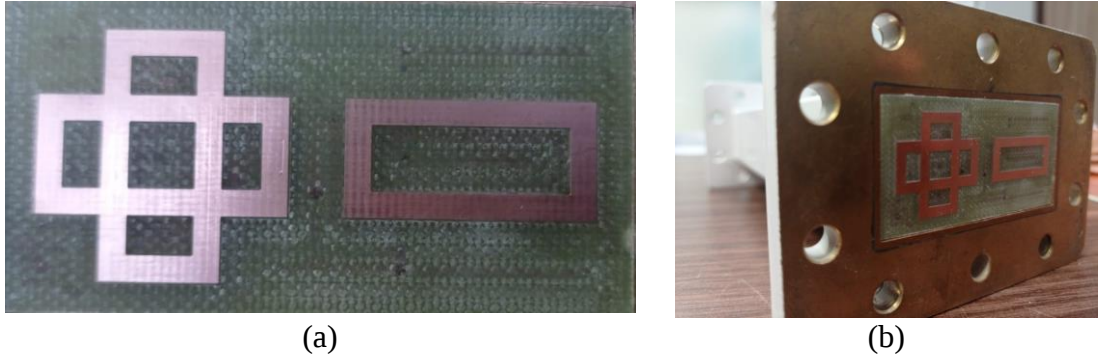


Şekil 4.6 Tasarıma ait yüzey akım dağılımları (a) alt frekans için (b) üst frekans için

Yapının akım dağılımları sırasıyla alt ve üst frekanslar için Şekil 4.6(a) ve Şekil 4.6(b)'de sunulmaktadır. Önerilen tasarım için alt ve üst bant durdurma frekansları, dalga kılavuzunun çalışma aralığı içerisinde sırasıyla 3,48 GHz ve 4,75 GHz olarak belirtilmektedir. Yüzey akım dağılımlarından görülebileceği gibi her bir rezonatörün frekanslar üzerinde etkisi vardır. Alt frekans artı şekilli rezonatörden etkilenirken üst frekans dikdörtgen rezonatörden etkilenir. Rezonans frekansına yaklaştıkça FSY yapısı gelen EM dalga ile güçlü bir etkileşime girdiği için akım yoğunluğu artmıştır.

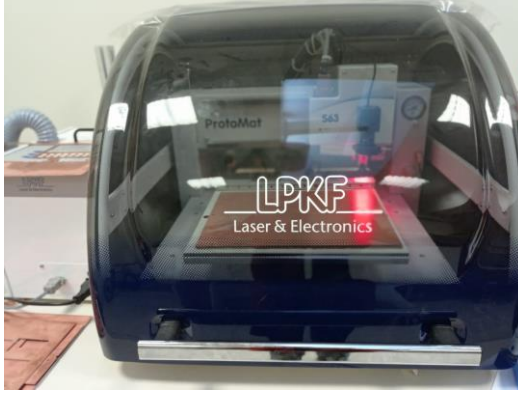
4.1.3 Ölçüm sonuçları

Tasarlanan yapının parametrik analiz sonuçları 4.1.2'de verilmiştir. Bu kısımda ise üretimi gerçekleştirilen FSY yapısının üretim aşamaları ve ölçüm sonuçları sunulmuştur. FSY üretimi için tasarlanan yapı 2 boyutlu bir çizim haline getirilir ve bu çizim Şekil 4.8(a)'da gösterilen lazer malzeme işleme cihazlarından biri olan LPKF'ye aktarılmış ve üretim gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.7(a)'da üretimi gerçekleştirilen yapının prototipi görülmektedir. Üretilen yapının boyutları WR229 dalga kılavuzuna uygun olduğundan ölçümler Şekil 4.7(b)'de görüldüğü gibi WR229 kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

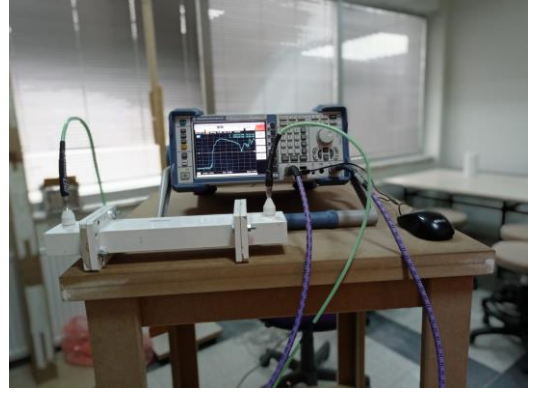


Şekil 4.7 (a) İlk örnek (b) Dalga kılavuzu içine yerleştirilmiş ilk örnek

Yapının üretimi tamamlandıktan sonra Şekil 4.7(b)'deki ölçüm düzeneği hazırlanmıştır. Ölçümde kullanılan network analizörü 9 kHz ila 13,6 GHz frekans aralığında karakteristik ölçümleri dağıtabilen Rohde Schwarz (R&S®ZVL13)'dır. Ölçümler başlamadan önce network analizörün tüm portları kalibre edilmiştir.



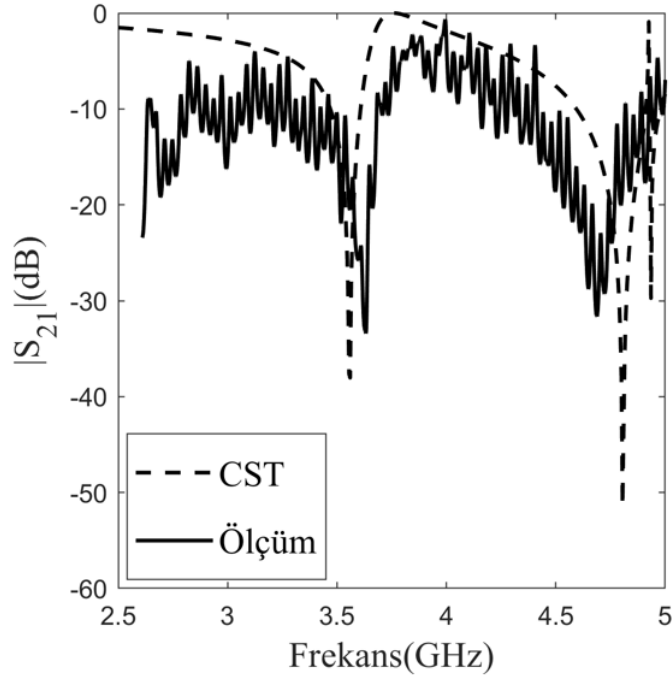
(a)



(b)

Şekil 4.8 (a) LPKF üretim makinası (b) Ölçüm düzeneği

Kalibrasyon işlemi tamamlandıktan sonra FSY dalga kılavuzu içine yerleştirilmiş ve port bağlantıları yapılmıştır. Tüm bağlantılar tamamlandıktan sonra dalga kılavuzunun kesim frekansları network analizörde limit olarak tanımlanmıştır. Ölçüm sonuçları kaydedilip MATLAB ortamında simülasyon çalışmaları ile karşılaştırılmıştır. Şekil 4.9’de ölçüm sonucunun ve simülasyon sonucunun karşılaştırılması verilmiştir.



Şekil 4.9 Simülasyon sonuçları ile ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması

Alt frekans bandı simülasyon sonuçlarında 3.56 GHz iken ölçüm sonuçlarında 3.60 GHz olarak görülmektedir ve bu da iki sonuç arasında 0.04 GHz gibi küçük bir fark olduğu anlamına gelmektedir. Alt frekans bant genişliği ise simülasyon sonuçlarında 0.12 GHz iken ölçüm sonuçlarında ise bant genişliği 0.19 GHz olarak görülmektedir. Üst frekans bölgesinde ise simülasyon sonuçlarında elde edilen rezonans frekansı 4.80 GHz iken ölçüm sonuçlarında bu değerin 4.69 GHz olduğu görülmektedir. Üst frekans bandında ölçüm ve simülasyon sonuçları arasında 0.11 GHz’lik bir fark olmuştur. Bant genişliği ise simülasyon sonuçlarında 0.31 GHz, ölçüm sonuçlarında ise 0.34 GHz’dir. Sonuçlara göre hem rezonans frekansında hem de bant genişliğinde simülasyon ve ölçüm sonuçları alt ve üst bant için birbirine çok yakındır. WLAN frekans bantlarından 3.6 GHz frekans bandının operasyonel frekans aralığı 3.55-3.70 GHz, 4.9 GHz frekans bandının ise 4.91-4.99 GHz arasındadır. Ölçüm sonuçlarına bakıldığında tasarlanan yapının 3.6 GHz ve 4.9 GHz WLAN frekans bandını tamamen yansıttığı görülmektedir. Ölçüm sonucundaki dalgalanmaların network analizör kaynaklı olduğu öngörülmektedir. Bunun dışında, deneysel sonuçlar ile benzetim sonuçları arasında uyum gözlemlenmektedir.

4.1.4 Tartışma

Bu bölümde, iki boyutlu dikdörtgen yapıli çift frekanslı FSY tasarımı gerçekleştirilmiştir. Önerilen yapı ile her bir rezonans frekansı ayrı ayrı kontrol edilebilmektedir. Ayrıca geliştirilen yapı ile

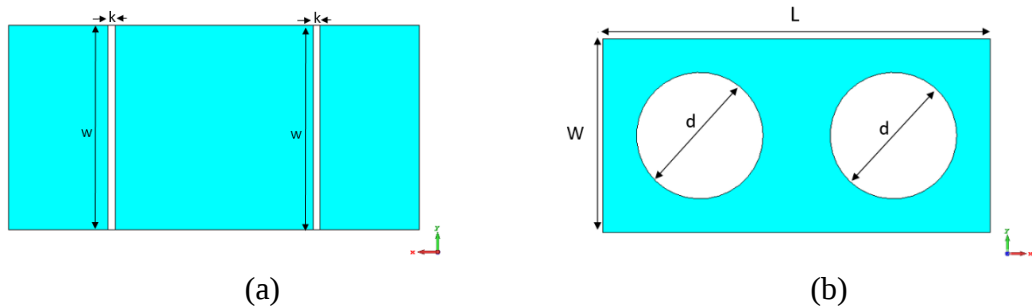
- 1) Baskı devre kartı teknolojisi, hızlı ve kolay üretim sağlayan 2B yapıların tasarım ve üretiminde dielektrik katman kullanımı sayesinde karşılaşılan dielektrik kayıpları etkili bir şekilde engellenmiştir.
- 2) Çift frekans bandı geometrik parametreler ile ayrı ayrı kontrol edilmiştir.
- 3) Gelen düzlemsel dalganın $\pm 20^\circ$ ’ye kadar polarizasyon bağımsız bir yapı olduğu gösterilmiştir.

4.2 Frekans Seçici Yüzey Tabanlı Soğurucu

Bu çalışmada, elektromanyetik kalkanlama için FSY tabanlı bir soğurucu, 5G uygulamalarında elektromanyetik koruma sağlamak amacıyla sunulmaktadır. EM kalkanlama, hassas elektronik cihazları elektromanyetik girişimden koruma konusunda güvenilir bir yöntem sunar, belirli frekans aralıklarını engelleyen bir uzamsal filtre olarak hizmet eder. Birçok EM kalkan yapısı geliştirilmiş olsa da, gelen dalgaları yansıtmak amacıyla tasarlanan bu yapılar, özellikle yoğun elektronik ortamlarda, yakındaki cihazlar ve ekipmanlar için EMI sorunlarına neden olabilir. Soğurucu tabanlı FSY kalkanlama, böyle ortamlarda etkili bir alternatif sunarak bu girişimleri azaltabilir. Çalışma, günümüzde yaygın olarak kullanılan 5G bandı olan 3.5 GHz (n77) için tasarlanmıştır. Bu çalışmanın bir önceki çalışmadan farkı ise arka yüzeyde toprak hattının bulunmasıdır. Arka yüzeyde bulunan toprak hattı gelen EM dalganın geçişine izin vermemektedir. Tasarlanan yapıda görünür bölgede optik geçirgenliği sağlamak adına alttaş olarak şeffaf PVC kullanılmıştır.

4.2.1 Yapı ve mimari

Önerilen birim hücre tasarımının üst ve alt yüzeylerinin geometrisi Şekil 4.10'da verilmiştir. Alttaş olarak kullanılan optik olarak şeffaf PVC'nin genişliği ' W ', uzunluğu ' L ' ve kalınlığı ' h_s 'dir. İletken kısımda üst yüzeyde görülen dairenin çapı ' d ', alt yüzeydeki yamanın uzunluğu ' W ' ve genişliği ' k 'dir. Şeffaf PVC'nin kalınlığı 1,48 mm



Şekil 4.10 Önerilen tasarımın (a) Toprak yüzeyi (b) FSY yüzeyi

olup elektriksel geçirgenlik değeri 2,77'dir. İletken kısmında malzeme olarak bakır kullanılmış olup kalınlığı 35 µm'dir. Önerilen yapının tasarım parametreleri Çizelge 4.2'de verilmiştir. Şekil 4.10(b)'de görüldüğü gibi üst yüzeyde FSY yapısında kullanılan dairelerin çapları birbirine eşit ve d ile gösterilmiştir. Ayrıca kullanılan tüm iletken şekillerin kalınlığı aynı olup 35 µm'dir.

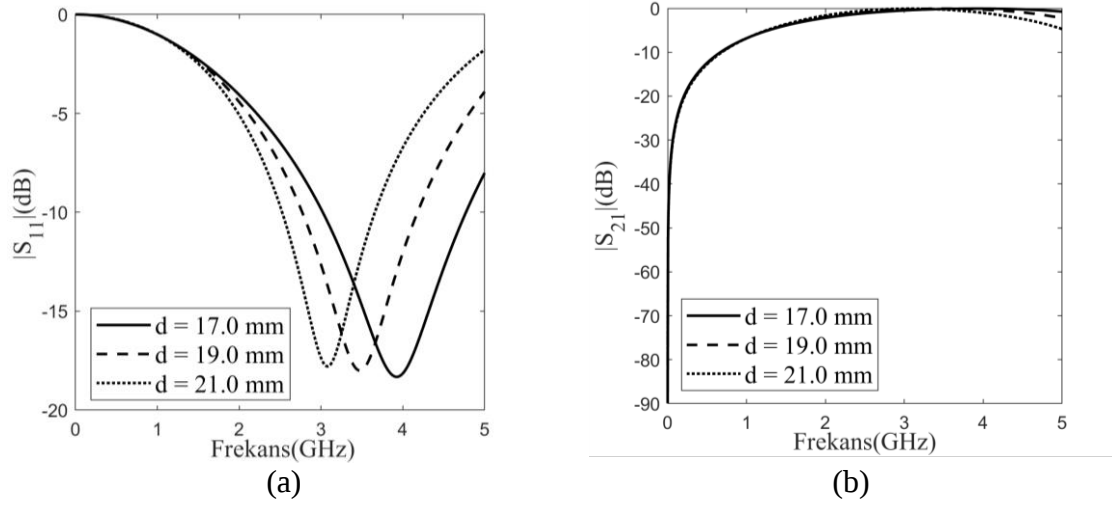
Çizelge 4.2 FSY tabanlı soğurucuya ait birim hücre tasarım parametreleri

Tasarım parametreleri					
W	L	k	d	h_s	h_c
29.083 mm	58.166 mm	1 mm	19 mm	1.48 mm	0.035mm

Tasarımda kullanılan PVC alttaş %100 şeffaftır. Ancak, kullanılan iletken bakır katmanlar önerilen topolojinin şeffaflık düzeyini sınırlamaktadır. Yapıların şeffaflığı, iletken alanın dielektrik alandan çıkarılmasıyla hesaplanır. Bu sınırlamaya ilişkin şeffaflık yüzdesi şu formül kullanılarak hesaplanır: $((\text{toplam fiziksel alan} - \text{iletkenin kapladığı alan}) / \text{toplam fiziksel alan}) \times 100$. Önerilen tasarımın hesaplamalar sonucunda optik geçirgenliği %66.5 bulunmuştur.

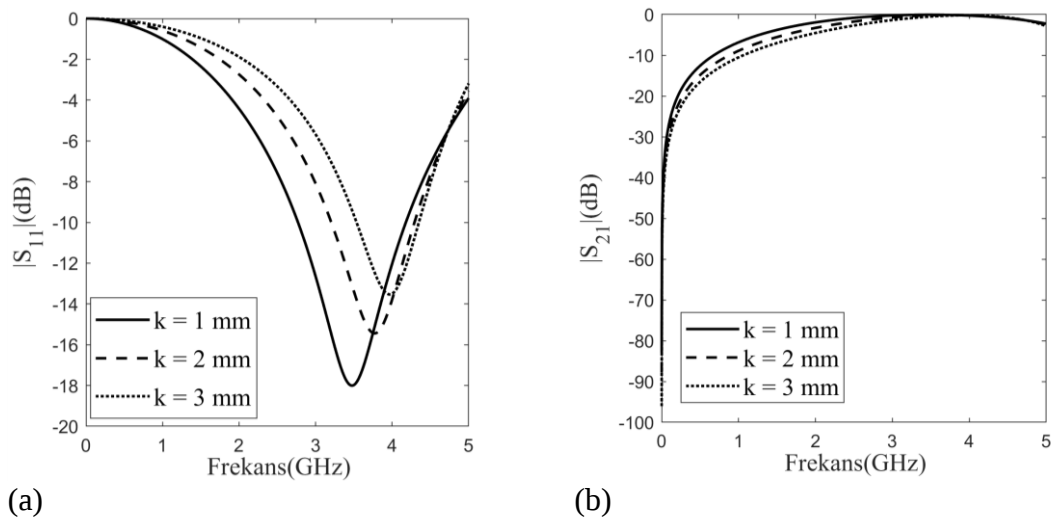
4.2.2 Parametrik analiz

Bu bölümde tasarımı optimize etmek için gerçekleştirilen parametrik analiz sonuçları gösterilip detaylı açıklamaları yapılmıştır. Parametrik analizi gerçekleştirmek için tam dalga elektromanyetik simülatörü CST Microwave Studio kullanılmıştır. Optimizasyon sonucu elde edilen tasarım parametreleri Çizelge 4.2'de verilmiştir. Genel olarak bu kısımda alttaş malzemenin, arka yüzeyde bulunan iletken yamanın genişliğinin (k), ön yüzeyde bulunan dairenin çapının (d) ve alttaş malzeme kalınlığının (h_s) frekans karakteristiğine olan etkisi incelenmiştir.



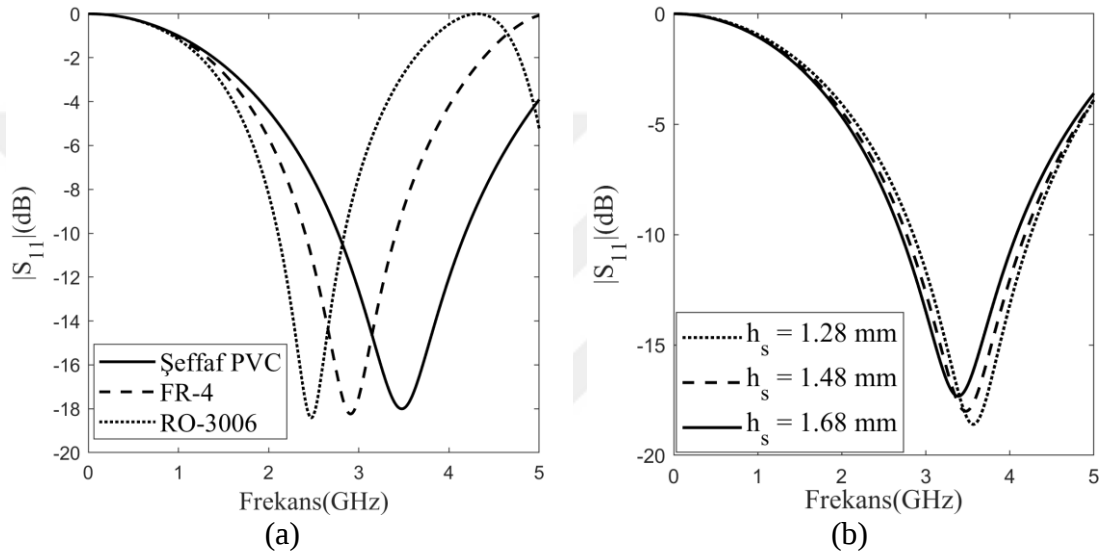
Şekil 4.11 Daire çapının değişiminin (a) $|S_{11}|$ 'e etkisi (b) $|S_{21}|$ 'e etkisi

Şekil 4.11(a)'da ön yüzeydeki dairenin çapı değiştirilerek yansıma karakteristiği üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çap 17 mm iken rezonans frekansı 3.92 GHz, bant genişliği ise 1.74 GHz'dir. Çap 2 mm arttırıldığında ise rezonans frekansı 3.47 GHz, bant genişliği ise 1.41 GHz olduğu gözlemlenmiştir. Çap 21 mm olduğunda ise rezonans frekansı 3.08 GHz, bant genişliğinin ise 1.13 GHz olduğu gözlemlenmiştir. Sonuç olarak çaptaki 2 mm'lik bir artışın, rezonans frekansında yaklaşık 0,4 GHz ve bant genişliğinde de yaklaşık olarak 0.3 GHz'lik bir azalmaya neden olduğu tespit edilmiştir. Şekil 4.12'de yapının arka yüzeyinde bulunan toprak hattı olarak görev yapan ve 'k' ile gösterilen bakır yama genişliğinin iletim ve yansıma karakteristiklerine etkisi incelenmiştir.



Şekil 4.12 Arka yüzeyde bulunan iletkenin genişlik değişiminin (a) $|S_{11}|$ 'e etkisi (b) $|S_{21}|$ 'e etkisi

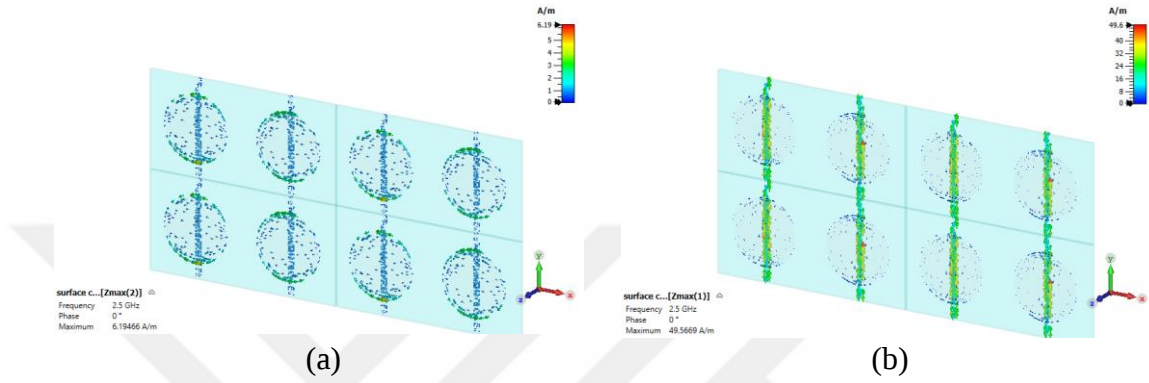
Genişliğin 1 mm olduğu durumda rezonans frekansı 3.49 GHz, izolasyon değeri -18 dB ve bant genişliği 1.41 GHz olarak gözlemlenmiştir. Kalınlık 1 mm arttırılınca rezonans frekansı 3.79 GHz, izolasyon değerinin -15.5 dB ve bant genişliğinin 1.08 GHz olduğu gözlemlenmiştir. Son olarak $k=3$ mm durumunda rezonans frekansı 3.97 GHz, izolasyon değeri -13.5 dB ve bant genişliği 0.81 GHz olduğu görülmektedir. Toprak yama genişliğinin artmasıyla beraber rezonans frekansının arttığını, izolasyon ve bant genişliğinin azaldığı tespit edilmiştir.



Şekil 4.13 (a) Alttaş malzemesinin $|S_{11}|$ 'e etkisi (b) Alttaş malzeme kalınlığının $|S_{11}|$ 'e etkisi

Yapının elektriksel geçirgenliğe olan tepkisinin analiz edilmesi için farklı elektriksel geçirgenliğe sahip alttaşlar simüle edilmiş ve sonuçları Şekil 4.13(a)'da verilmiştir. Alttaş malzeme olarak 3 farklı malzeme simüle edilmiştir. Malzemeler sırasıyla şeffaf PVC, FR-4 ve RO-3006'dır ve bunların elektriksel geçirgenlikleri sırasıyla 2.77, 4.3 ve 6.5'dir. Alttaş malzemesi olarak şeffaf PVC kullanıldığı takdirde rezonans frekansının 3.49 GHz ve bant genişliğinin 1.41 GHz olduğu görülmektedir. FR-4 malzemesinde ise rezonans frekansı 2.91 GHz ve bant genişliği 1 GHz'dir. Son olarak RO3006 malzemesi kullanılması takdirde rezonans frekansının 2.47 GHz ve bant genişliğinin 0.76 GHz olduğu görülmektedir. Alttaş malzemenin elektriksel geçirgenliğinin artmasıyla beraber rezonans frekansının arttığı, bant genişliğinin azaldığı ve izolasyon değerinin değişmediği görülmektedir.

Şekil 4.14(b)'de alttaş malzemenin kalınlık değişiminin yansıma karakteristiğine olan etkisi incelenmiştir. Alttaş malzemenin kalınlığı (h_s) 0.2 mm'lik adımlarla arttırılmış ve rezonans frekansı, bant genişliği ve izolasyona olan etkisi incelenmiştir. Şekilde görüldüğü gibi h_s arttığında rezonans frekansında 0.09 GHz'lik küçük bir değişim gözlemlenmiştir. Bant genişliğinde ve izolasyondaki değişimler çok küçük olduğu için ihmal edilebilir.



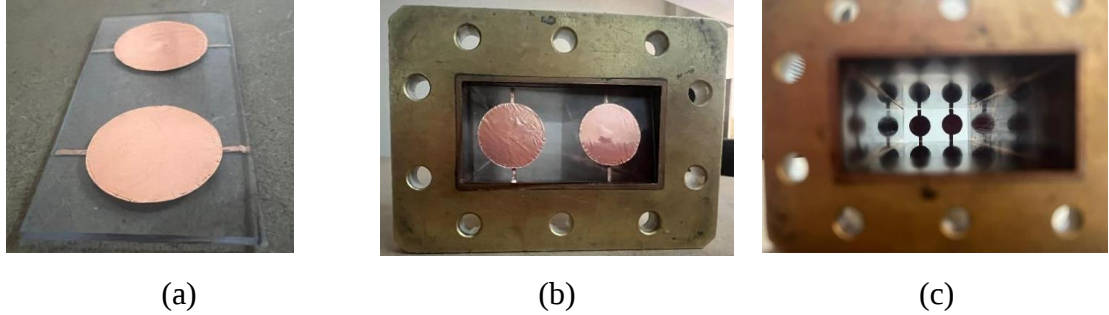
Şekil 4.14 Yüzey akım yoğunluğu (a) ön yüzey (b) arka yüzey

Şekil 4.14'de önerilen yapının yüzey akım yoğunlukları verilmiştir. Ön yüzeyde akım yoğunluğunun dairelerin üst ve alt kısımlarda yoğunlaştığı görülmüştür ve sonuçlar Şekil 4.14(a)'da gösterilmiştir. Arka yüzeyde ise akım yoğunluğu bakır yama boyunca neredeyse eşit bir şekilde dağılmış olduğu gözlemlenmiştir. Sadece bakır yamanın merkezinin kenarlarında akım yoğunluğunun daha fazla olduğu görülmüştür ve sonuçlar Şekil 4.14(b)'de verilmiştir.

4.2.3 Ölçüm sonuçları

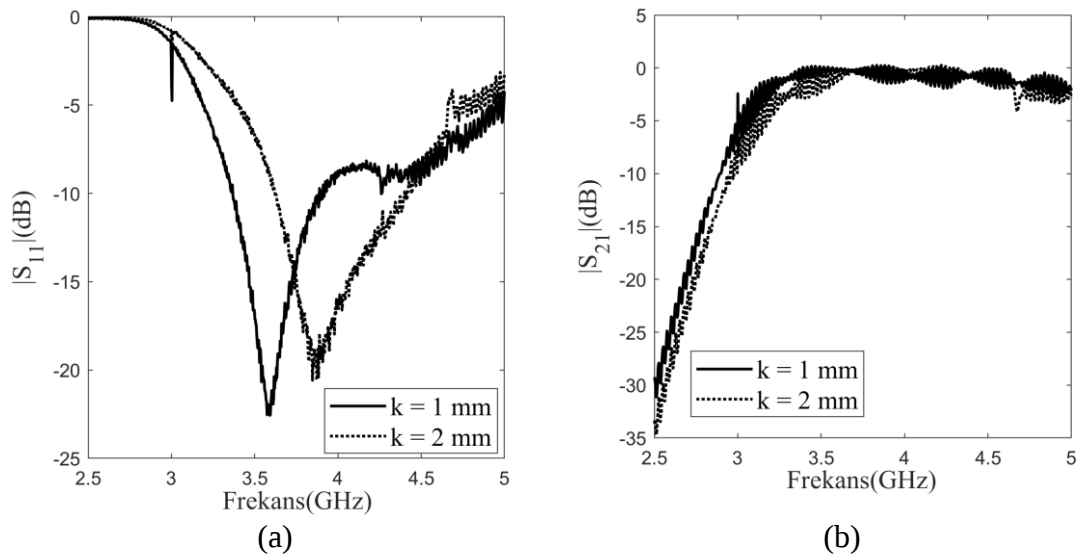
Bu çalışmada önerilen birim hücre yapısında alttaş malzemesi olarak şeffaf PVC, iletken malzeme olarak ise bakır kullanılmıştır. Şeffaf PVC, ölçümlerde kullanılan WR229 dalga kılavuzunun boyutlarına göre kesilmiştir. İletken malzemenin üretiminde bakır bant kullanılmıştır. Önerilen tasarımın 2 boyutlu çizimi AutoCAD programında gerçek ölçülerle çizilip, bu 2 boyutlu çizim ve bakır bant aynı anda yazıcıya gönderilerek bakır bant üzerine çizim bastırılmış oldu. Böylece bakır bant üzerindeki referans çizimine göre gerekli iletken parçalar kesildi. Kesilen iletken bakır yamalar şeffaf PVC üzerindeki gerçek pozisyonlarına yapıştırıldı. Şekil 4.15(a)'da üretilen ilk örnek görülmektedir. Şekil

4.15(b) ve (c)'de ise üretilen ilk örnek dalga kılavuzu içine yerleştirilmiş ve farklı açılardan görüntüleri gösterilmiştir.



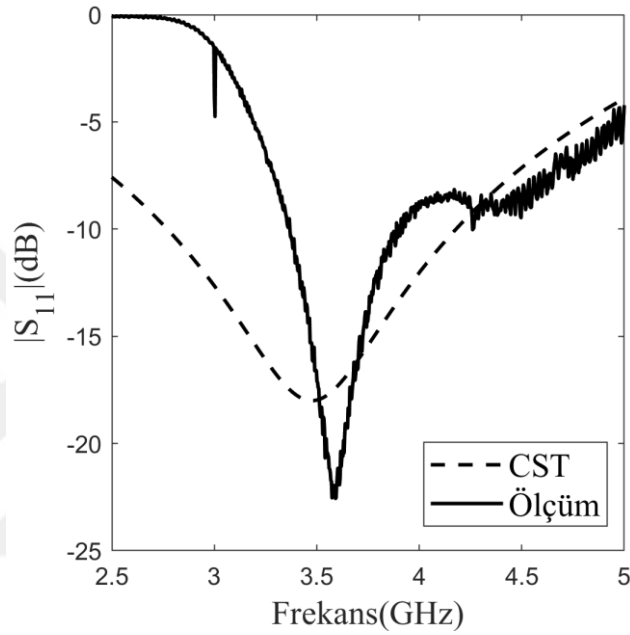
Şekil 4.15 (a) İlk örnek (b) Dalga kılavuzu içinde ilk örnek (c) Dalga kılavuzu içinde ilk örnek

Üretim tamamlandıktan sonra deney düzeneği Şekil 4.8(b)'deki gibi kurulmuştur. Deneye başlamadan önce kullanılacak olan network analizörün ölçümleme işlemleri yapılmış ve frekans aralığı WR229 dalga kılavuzunun kesim frekanslarına göre ayarlanmıştır. Hazırlık süreci tamamlandıktan sonra ölçüm işlemi başlamıştır. İlk örnek için alt yüzeyde bulunan bakır yamanın genişliği 1 mm olarak üretilmiş ve ölçümler gerçekleştirilmiştir. Ardından bakır yama sökölerek yerine 2 mm genişliğinde bir bakır yama yapıştırılmıştır. Böylece k 'nın iki farklı değeri için de ölçümler gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.16(a)'da k 'nın 1 mm ve 2 mm değerleri için yansıma karakteristikleri gösterilmiştir.



Şekil 4.16 Ölçüm sonuçları (a) yansıma (b) iletim

Genişliğin 1 mm olduğu durumda rezonans frekansının 3.59 GHz ve bant genişliğinin 0.55 GHz olduğu görülmektedir. Genişliğin 1 mm arttırılmasıyla birlikte rezonans frekansı 0.28 GHz artarak 3.87GHz, bant genişliği ise 0.25 GHz artarak 0.8 GHz olmuştur. Şekil 4.16(b)'de de bakır yama genişliğinin değişiminin iletim karakteristiğine olan etkisi gösterilmiştir. Şekilde de görüldüğü gibi gelen EM dalganın büyük bir kısmı soğurulmuştur.



Şekil 4.17 Simülasyon sonuçları ile ölçüm sonuçlarının karşılaştırması

Tasarım esnasında gerçekleştirilen simülasyon sonuçları ile ölçüm sonuçları karşılaştırılmış olup sonuçlar Şekil 4.17'de verilmiştir. Simülasyon çalışmalarında elde edilen rezonans frekansı 3.49GHz ve bant genişliği 1.41GHz'dir. Ölçüm sonuçlarında ise elde edilen rezonans frekansı 3.59GHz ve bant genişliği 0.55GHz'dir. Rezonans frekansındaki sapma sadece 0.1GHz olup, iyi bir uyum sağlanmıştır. Fakat bant genişliğindeki sapma daha büyüktür. Bunun nedeni network analizör veya üretim sürecinin manuel olmasından kaynaklı olabilir.

4.2.4 Tartışma

Bu bölümde, iki boyutlu dairesel yama yapılı FSY tabanlı soğurucu tasarımı gerçekleştirilmiştir. Önerilen yapı ile rezonans frekansının ve bant genişliğinin parametrik olarak değiştirilebileceği gösterilmiştir. Ayrıca geliştirilen yapı ile;

- 1) Kullanılan şeffaf alttaş malzeme ile birlikte görünür bölgede %66.5'lik optik olarak geçirgenlik sağlanmaktadır.
- 2) Yapı esnek bir özelliğe sahip olduğu için farklı şekillerde ve farklı kaplama teknolojilerinde kullanılabilir.
- 3) Yapının geometrik parametrelerinin kontrol edilmesiyle soğurulması gereken frekans bandı kolayca kontrol edilebilir.

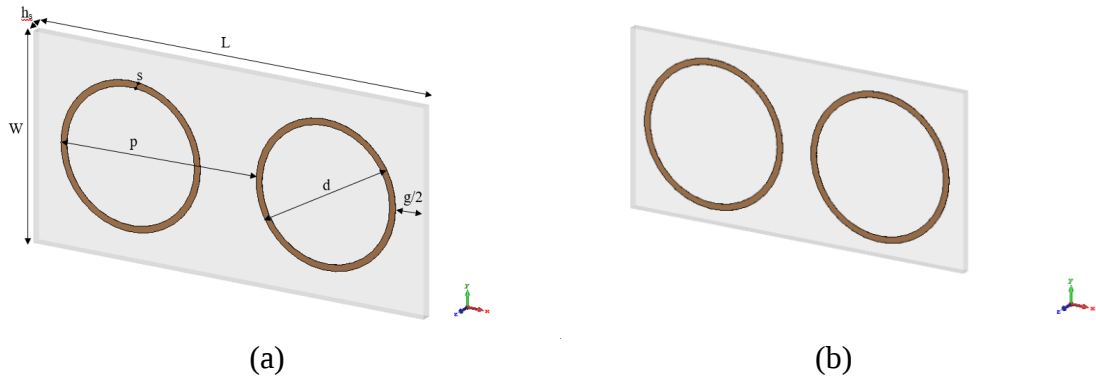
4.3 Dairesel Döngü Yapıda Geniş Bant Frekans Seçici Yüzey

Bu çalışmada IoT uygulamaları için polarizasyon bağımsız optik şeffaflığa sahip çift katmanlı geniş bant bir FSY önerilmiştir. Önerilen tasarımdaki katmanlar ayrı ayrı kullanıldığında, 6 GHz altı en çok kullanılan frekans bantlarından ikisi için bant durdurma özellikleri sergilerler: 3,7 GHz (n77) ve 4,5 GHz (n79). Katmanlar beraber kullanıldığında, 3,61 GHz ile 5,0 GHz arasında değişen 1,39 GHz bant genişliği oluştururlar ve çift katmanlı yapı, %32'lik kesirli bant genişliğine sahip bir UWB önerir. Önerilen FSY yapılarının 0 ile 60 derece arasında değişen geliş ve polarizasyon açıları boyunca iletim karakteristiğindeki değişiklikleri gözlemlemek için simülasyonlar yapılmıştır. Simülasyon sonuçlarına göre, her iki katmanın da 60°'ye kadar gelen EM dalganın geliş ve polarizasyon açısından etkilenmediği ve açısal olarak kararlılık sağladığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, her iki katmanın da TE ve TM polarizasyonlarına karşı aynı iletim karakteristiğini sergilediği ve polarizasyon bağımsız bir yapıya sahip olduğu gösterilmiştir. Alttaş malzemesi olarak dielektrik sabiti 2,77 ve kalınlığı 1,48 mm olan şeffaf PVC kullanılmıştır. Optik geçirgenlik Katman 1 için %96,7, Katman 2 için %95,7, çift katmanlı yapı için ise %92,4 olarak hesaplanmış ve hesaplanan optik geçirgenlik değerlerinin literatürdeki çalışmalara göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Önerilen tasarım, geniş bant yansıtabilmesi, yüksek optik şeffaflığı, maliyet etkinliği, bastırmada

güçlü yüksek performans yetenekleri ve polarizasyon bağımsız olması nedeniyle 6 GHz'in altındaki IoT uygulamaları için çok uygundur. 3 boyutlu tam dalga simülasyonlarının sonuçları, ölçüm sonuçlarıyla karşılaştırıldığında, sonuçlar arasında iyi bir uyum olduğu gözlemlenmiştir.

4.3.1 Yapı ve mimari

Bu çalışmada tasarlanan birim hücre yapıları Şekil 4.18'de verilmiştir. Üretim ve ölçümün basitleştirilmesi ve önerilen yapının WR229 dalga kılavuzuna sığabilmesi için dalga kılavuzunun boyutları alttaş boyutu olarak belirlenmiştir. Alttaş malzemesi olarak dielektrik sabiti (ϵ_r) 2,77 olan görünür bölgede optik olarak şeffaf PVC kullanılmıştır. Önerilen tasarımın iletken bölümü, çapı 'd' olarak gösterilen dairesel bir döngü rezonatöründen oluşur. İletken kısımda 35 μm kalınlığında bakır iletken şeritler kullanılmıştır. Önerilen yapı çift katmanlı bir yapı olduğu için iki farklı katman tasarlanmış olup Şekil 4.18(a)'da katman-1 ve Şekil 4.18(b)'de ise katman-2 gösterilmiştir. İki farklı katman için de aynı boyutlarda ve aynı malzemeden oluşan alttaş tasarlanmıştır. Ayrıca kullanılan iletken bakır yamanın kalınlığı iki katman için de aynıdır.



Şekil 4.18 Birim hücre yapısı (a) Katman-1 (b) Katman-2

Alttaş malzemenin genişliği 'W' ile gösterilmiştir ve değeri 29.058mm, uzunluğu 'L' ile gösterilmiştir ve değeri 58.166 mm ve kalınlığı 'h' ile verilmiş olup değeri 1.48 mm'dir.

Çizelge 4.3 Katmanların geometrik parametre değerleri

Katman Numarası	p (mm)	d (mm)	g (mm)	s (mm)
1	29.083	20.8	8.283	0.9
2	29.083	24.2	4.883	1.0

Katmanların tasarımında kullanılan geometrik parametreler Çizelge 4.3’de verilmiştir. Çizelge 4.3’ verilen parametrelerin yapının frekans karakteristiğine etkisi bir sonraki bölümde incelenmiştir.

4.3.2 Parametrik analiz

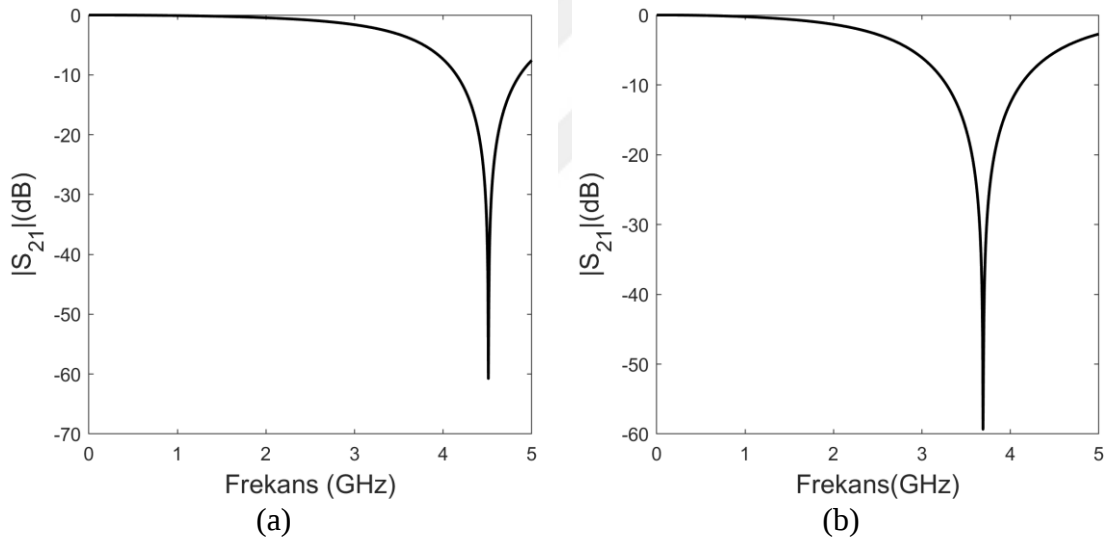
Bu bölümde, birim hücre tasarımlarının detayları, tam dalga simülasyonları ve analizleri gerçekleştirilmiş olup sunulmuştur. Tek katmanlı tasarımlar için yapılan çalışmalar ve nihai tasarımın bant genişliğini artırmak için çift katmanlı tasarımın yapılmasıyla ilgili detaylar sunulmuştur.

4.3.2.1 Tek katman

Yukarıda bahsedilen topoloji, her biri belirli frekans noktaları için uyarlanmış iki ayrı katmandan oluşur. Her iki tasarım da WR229 dalga kılavuzuna hizalanmış ve uyumştur. FSY'nin frekans tepkisi öncelikle yapısal şekil ve boyutsal nitelikler tarafından belirlenir. Bunlar arasında, FSY filtrelerinin etkinliğini etkileyen temel boyut parametreleri arasında döngü uzunluğu "d" (dairesele döngülerin çapı), döngü genişliği "s", birim hücre periyodikliği "p" ve döngüler arasındaki boşluk "g" yer alır. Bu parametreler FSY'nin performans özelliklerini belirlemede çok önemli bir rol oynar. İki farklı katman oluşturulmuş olup bu katmanların uyardığı frekans bantları sırasıyla 4.5 (n79) GHz ve 3.7 (n77) GHz'dir. Tasarım parametreleri Çizelge 4.3’de verilmiş olup simülasyon sonuçları Şekil 4.19’da verilmiştir. Şekil 4.19(a)’da 4.5 GHz frekans bandı için tasarlanan birinci katman, Şekil 4.19(b)’de ise 3.7 GHz için tasarlanan ikinci katman gösterilmiştir. Katman 1 için simülasyon sonuçlarında elde edilen rezonans frekansı 4.51 GHz, bant genişliği ise 0.72 GHz olarak gözlemlenmiştir. Katman 2 için ise rezonans frekansı 3.69 GHz ve bant

genişliği 0.84 GHz olduğu gözlemlenmiştir. Simölasyon sonuçlarına bakılırsa odaklanılan n77 ve n79 frekans bantlarının frekansına eşit bir rezonans frekansı elde edilmiştir.

Dairesel FSY elemanının çapını ve dğü genişliğini değiştirmenin frekans karakteriştiği üzerindeki etkisi, şekil 4.20 ve şekil 4.21'de tasvir edildiği gibi her katman için incelenmiştir. Katmanlar arasında, dairenin çapını 0.2 mm'lik bir adımla değiştirerek tam dalga simölasyonları gerçekleştirildi ve bu simölasyon sonuçları Katman 1 için şekil 4.20(a)'de, Katman 2 için ise şekil 4.20(b)'de gösterilmiştir. Bu değişikliğin rezonans frekansı ve bant genişliği üzerindeki etkilerini değerlendirmek için sonuçlar incelenmiştir.

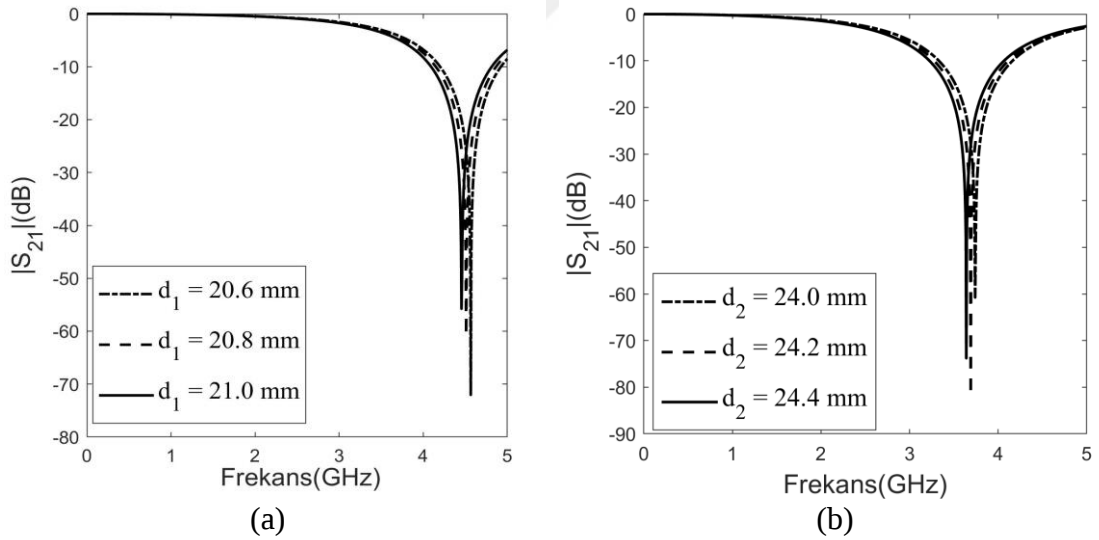


şekil 4.19 İletim karakteriştiği (a) Katman-1 (b) Katman-2

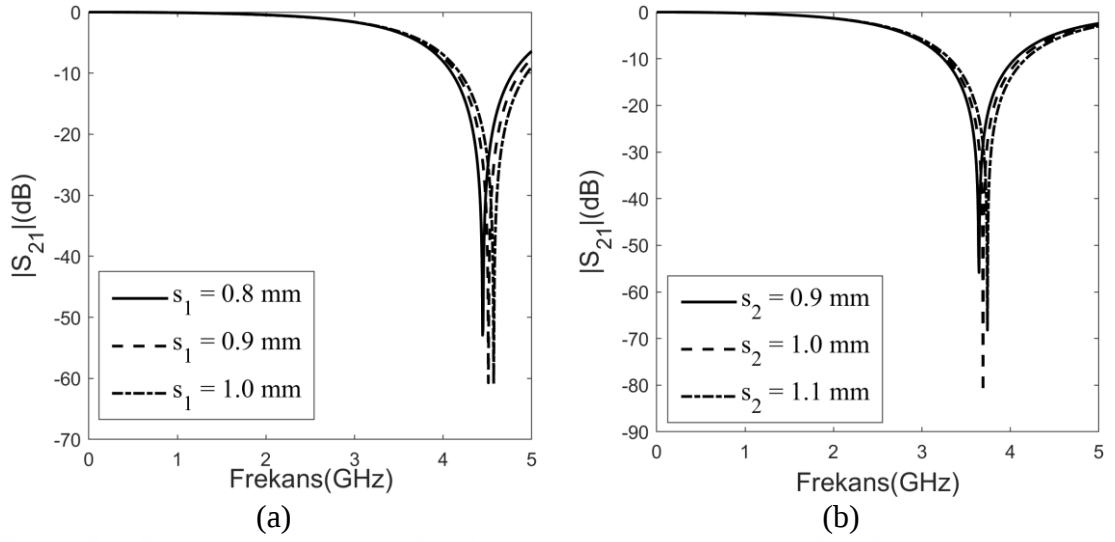
Katman 1'de, dairenin çapını büyütmek, rezonans frekansında yaklaşık 0.05 GHz'lik bir düşüşe neden olmuştur aynı zamanda bant genişliği, tüm çap artışları boyunca 0.72 GHz'de sabit kalmıştır. Katman 2, katman 1'e benzer rezonans frekansı davranışını sergilemiş olup her 2 mm çap artışı için yaklaşık 0.05 GHz'lik düşüş göstermiştir. Katman 1 simölasyon sonuçlarına benzer şekilde, katman 2 için de bant genişliği üç durumda da 0.84 GHz olarak sabit kalmıştır. Sonuç olarak dairesel dğü FSY elemanının çapının

artışı rezonans frekansında azalmaya sebep olurken bant genişliğinde herhangi bir değişiklik gözlemlenmemiştir.

Katmanlarda kullanılan dairenin yama kalınlığı, 0.1 mm'lik artışlarla değiştirilerek tam dalga simülasyonları gerçekleştirildi. Katman 1 için simülasyon sonuçları Şekil 4.21(a)'de gösterilmişken, Katman 2 için olanlar Şekil 4.21(b)'de sunulmuştur. Katman 1'de, yamanın genişletilmesi, rezonans frekansında yaklaşık 0.07 GHz'lik bir artışa neden olmuştur aynı zamanda bant genişliğinin, genişlikteki tüm artışlar için 0.74 GHz'de sabit kaldığı tespit edilmiştir. Katman 2, katman 1'e benzer rezonans frekansı davranışını sergilemiş olup her 0.1 mm genişlik artışı için 0.05 GHz artmıştır. Benzer şekilde, bant genişliği üç senaryo boyunca 0.84 GHz'lik sabit değerini korumuştur. Simülasyonlar, dairenin çapını veya yama genişliğini arttırmanın bant genişliği üzerinde herhangi bir etkisi olmadığını, ancak daire çapının artmasının rezonans frekansında düşüşe, yama genişliğinin artmasının ise rezonans frekansında artışa neden olduğunu göstermektedir.

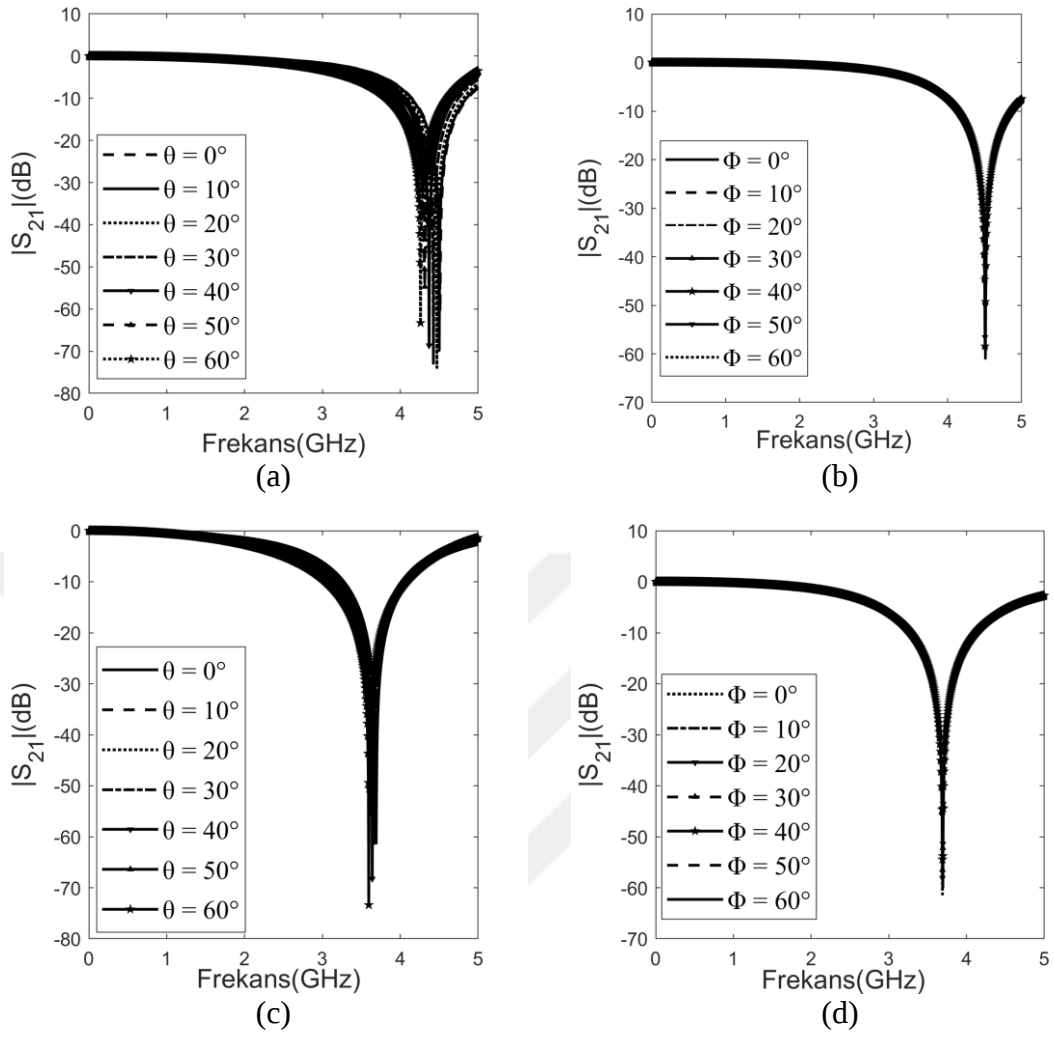


Şekil 4.20 Daire çapının iletim karakteristiğine etkisi (a) Katman-1 (b) Katman-2



Şekil 4.21 Bakır yama genişliğinin iletim karakteristiğine etkisi (a) Katman-1 (b) Katman-2

Yapılan analizler, önerilen yapının açısal kararlılığını test etmek amacıyla düzlemsel dalganın yatay düzlemdeki z eksenine ile yaptığı açı (θ) ve polarizasyon açısı (Φ) kontrol edilerek, yapının düzlem içindeki açısal bağımlılığı incelenmiştir. Önerilen yapı simetrik bir tasarım olduğu için açı değişimlerine karşı benzer tepkilerin elde edilmesi beklenmektedir, çünkü asimetrik desenler FSY'lerin performansını bozabilir. Şekil 4.22, 0° ile 60° arasındaki geliş ve polarizasyon açılarındaki değişimlerin önerilen FSY'lerde gözlemlenen iletim karakteristiğine etkisini göstermektedir. Şekil 4.22(b) ve (d)'de görüldüğü gibi, katmanlar 0° ile 60° arasında değişen polarizasyon açılarındaki aynı tepkiyi sergilemiştir ve polarizasyon açı değişimlerine karşı kararlı davranmıştır.

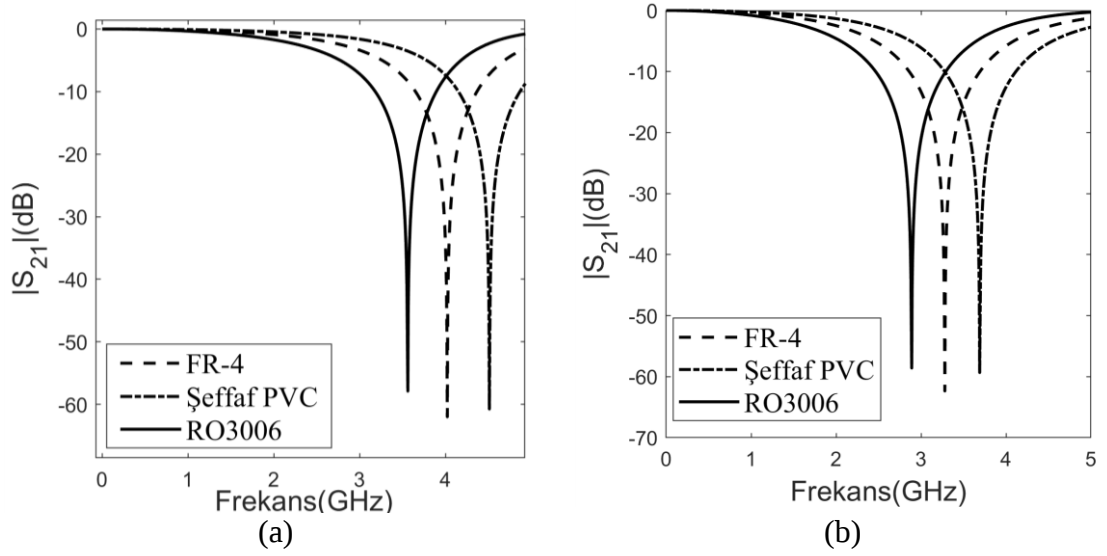


Şekil 4.22 Polarizasyon etkisi (a) Katman-1, TE modu (b) Katman-1, TM modu (c) Katman-2, TE modu (d) Katman-2, TM modu

Şekil 4.22(a) ve (c)'de, gelen EM dalganın geliş açısının 0° ile 60° arasındaki değişiminin iletim karakteristiğini etkilemediği ve katmanların geliş açısına karşı kararlı davrandığı gösterilmiştir. Katman 2'nin tepkisi, her 10 derece artış için rezonans frekansında yaklaşık 0.015 GHz'lik bir kayma sergiler. Ancak Katman 1'de, bu frekans kayması, her 10 derece artış için yaklaşık 0.5 GHz olarak belirlenmiştir. Tüm katmanlarda, odaklanılan frekans ve bant genişliğinin (-10 dB) değişmeden kaldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca önerilen katmanlar TE ve TM polarizasyonlarında aynı tepkiyi sergilemiş olup polarizasyon bağımsız yapılar olduklarını göstermişlerdir. Sonuç olarak, simülasyonlar, geliş ve polarizasyon açılarındaki değişikliklerin hem TE hem de TM modları için izolasyon miktarı, bant genişliği ve rezonans frekansı üzerinde fark edilebilir bir etkisi olmadığını

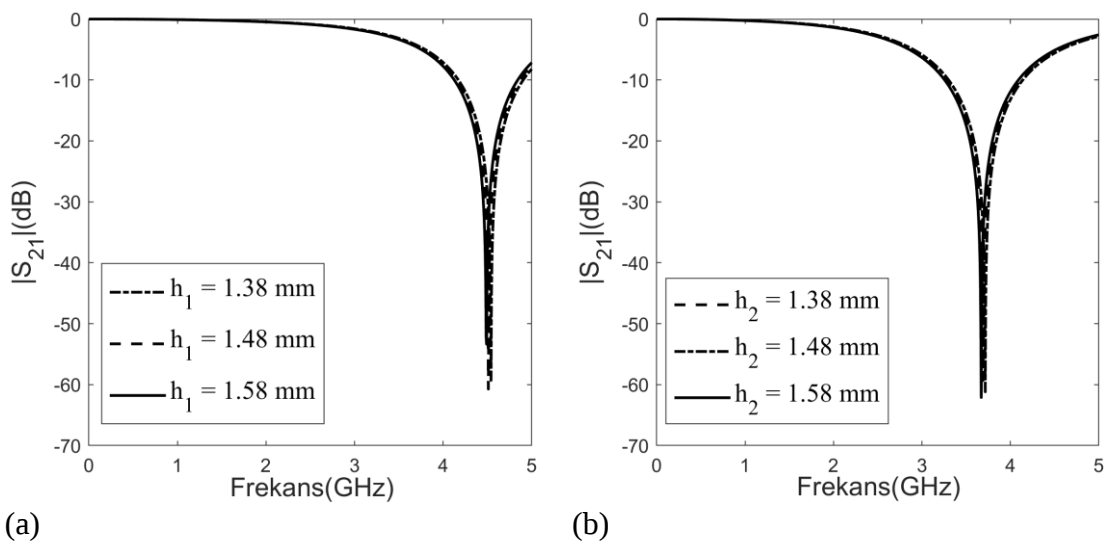
ortaya koymuştur. Bu, önerilen tasarımların polarizasyon bağımsız ve açısal kararlı olduğunu göstermektedir. Önerilen FSY, TE ve TM polarizasyonları için neredeyse benzer tepkileri göstererek, her iki polarizasyon için kullanıldığında herhangi bir yapısal değişikliğe ihtiyaç duymamaktadır.

Alttaş malzeme olarak elektriksel geçirgenliği 2.77 olan şeffaf PVC'nin kullanıldığı daha önce belirtilmiştir. Bu malzemenin kullanım amacı görünür bölgede %100 şeffaf olmasıdır. Farklı elektriksel geçirgenliğe sahip alttaş malzemeler kullanılarak iletim karakteristiğine olan etkileri her iki katman için incelenmiş olup sonuçlar Şekil 4.23'de verilmiştir. Analizler için elektriksel geçirgenliği 2.77 olan şeffaf PVC, 4.3 olan FR-4 ve 6.5 olan RO3006 malzemeleri kullanılmıştır ve sonuçlar Şekil 4.23'de verilmiştir. Katman 1 analizlerinde rezonans frekansı PVC için 4.51 GHz, FR-4 için 4.02 GHz ve RO3006 için 3.56 GHz olduğu görülmektedir ve sonuçlar Şekil 4.23(a)'da verilmiştir. Elektriksel geçirgenlik arttıkça rezonans frekansında azalma olduğu görülmektedir. Fakat 3 farklı malzeme için de bant genişliği 0.74 GHz değerinde olduğu görülmektedir. Ayrıca izolasyon değerinde de büyük bir değişiklik gözlemlenmemiştir. Katman 2 analizlerinde rezonans frekansı PVC için 3.69 GHz, FR-4 için 3.28GHz ve RO3006 için 2.89 GHz olduğu görülmektedir ve sonuçlar Şekil 4.23(b)'de verilmiştir. Katman 1 analizinde olduğu gibi elektriksel geçirgenlik arttıkça rezonans frekansında azalma olduğu görülmektedir. Fakat 3 farklı malzeme için de bant genişliği 0.84 GHz değerinde olduğu görülmektedir. Ayrıca izolasyon değerinde de büyük bir değişiklik gözlemlenmemiştir. Sonuç olarak alttaş malzemesinin elektriksel geçirgenliği arttıkça rezonans frekansının düştüğü görülmüştür. Bunun sebebi ise EM dalganın dielektrik ortamda yayılma hızının serbest uzaydan daha düşük olmasıdır.



Şekil 4.23 Alttaş malzemesinin elektriksel geçirgenliğinin iletim karakteristiğine etkisi (a) Katman-1 (b) Katman-2

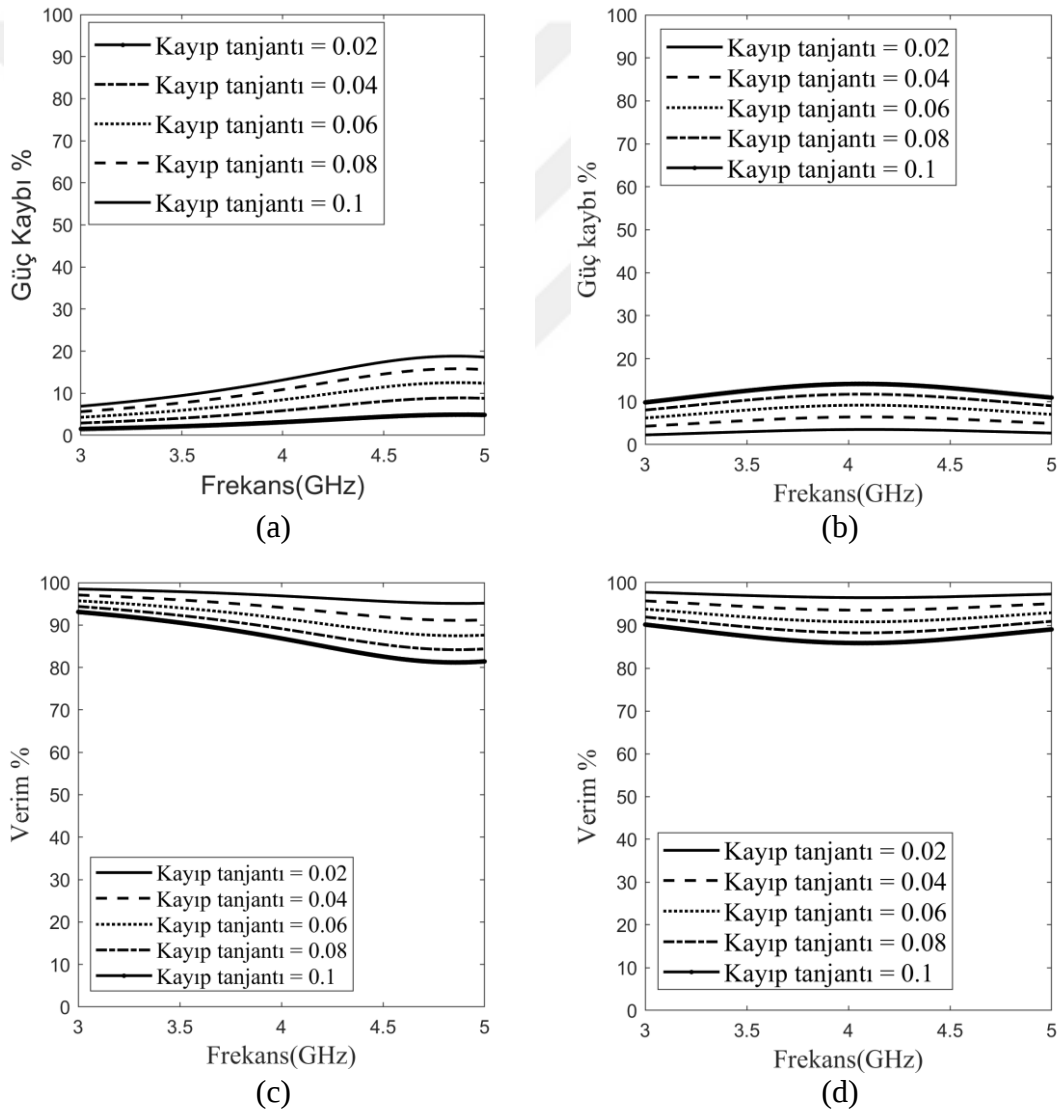
Alttaş malzemesinin kalınlığının iletim karakteristiğine etkisi incelenmiş olup sonuçlar Şekil 4.24'de verilmiştir. Malzeme kalınlığı 0.1 mm'lik adımlarla arttırılmış ve sonuçlar kaydedilmiştir. Birinci katmanın alttaş malzeme kalınlığı değiştirilmiş ve sonuçlar Şekil 4.24(a)'da verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi kalınlık arttıkça rezonans frekansında çok küçük bir azalma gerçekleşmiştir. Alttaş malzemenin kalınlığının artması EM dalganın yayılım hızını azaltacağı için bir faz kayması meydana gelir ve rezonans frekansı aşağı kaymaktadır.



Şekil 4.24 Alttaş malzemenin kalınlığının iletim karakteristiğine etkisi (a) Katman-1 (b) Katman-2

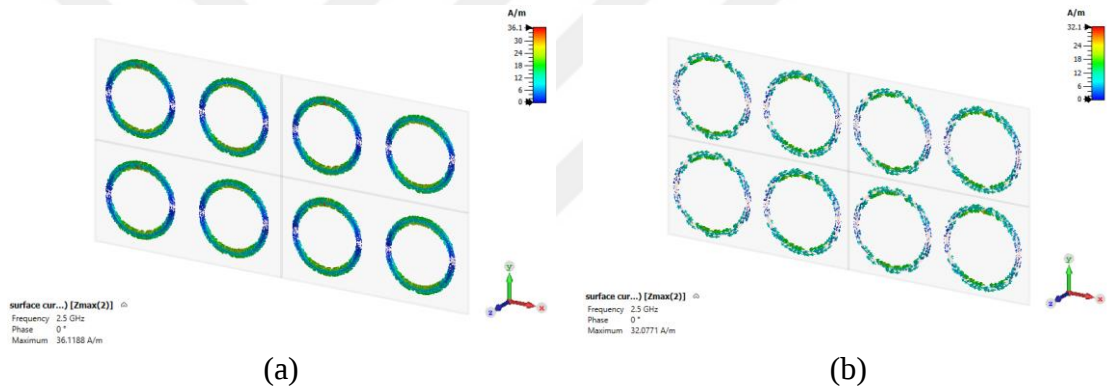
Fakat bant genişliği ve izolasyon oranında herhangi bir değişiklik gözlemlenmemiştir. Aynı şekilde ikinci katmana da bakıldığında aynı sonuçlar elde edilmiştir.

Bant durduran ve geçiş bantlarının performansı birlikte değerlendirilmiş ve frekansla ilgili güç kaybı açısından verimlilik tartışılmıştır. Geçiş bandı için güç kaybı, $Güç\ kaybı = 1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2$ olarak tanımlanır ve verimlilik (verim = 1-güç kaybı) olarak tanımlanır. Ancak, burada sunulan değerlerin, önerilen tasarımlarda kullanılan PVC gibi günlük nesne malzemelerinin homojen olmayan doğası nedeniyle bu kaybın bu değerleri aşabileceği unutulmamalıdır.



Şekil 4.25 Kayıp tanjant etkisi (a) Katman-1, güç kaybı (b) Katman-2, güç kaybı (c) Katman-1, verim (d) Katman-2, verim

Kayıp tanjant, elektromanyetik dalgaların FSY malzemesinden geçerken veya onunla etkileşime girdiğinde ne kadar enerjinin kaybolduğunu ölçen bir ölçüdür. Yüzeyin verimliliği ve performansı üzerinde önemli bir etkiye sahip olabilir. Belirli frekanstaki etkinlik ve güç kaybına olan etkilerini değerlendirmek amacıyla katman 1 ve katman 2 için çeşitli kayıp tanjant değerleri incelenmiş ve sonuçlar Şekil 4.25’de sunulmuştur. Kayıp tanjantı, 0.02’den başlayarak 0.10’a kadar 0.02’lik adımlarla analiz edilmiş ve kayıp tanjantın artmasıyla birlikte güç kaybının arttığı ve verimliliğin buna bağlı olarak azaldığı görülmüştür. Özellikle keskin rezonans zirvelerine yakın rezonans frekanslarında, FSY elemanları tarafından gelen elektromanyetik dalgaların artan etkileşimi ve soğurması nedeniyle güç kaybı artabilir. Örneğin Şekil 4.25(a) ve (b)’ye bakılacak olursa en büyük güç kaybının rezonans frekansına yakın frekans bantlarda olduğu açıkça görülmektedir.



Şekil 4.26 Yüzey akım yoğunluğu (a) Katman-1 (b) Katman-2

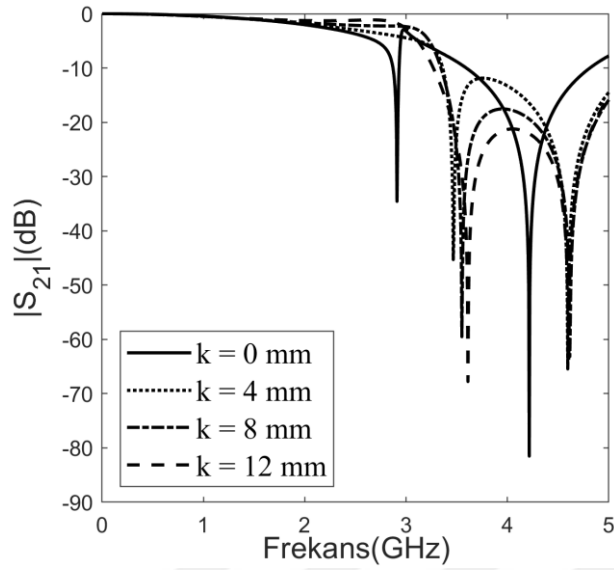
Frekans seçici yüzeylerdeki yüzey akım dağılımı, yüzey üzerindeki elektrik akımının dağılımını ifade eder. Bu akım dağılımı, yüzey yapısının elektromanyetik özelliklerini belirler ve yayılan ya da soğurulan elektromanyetik dalgaların karakteristiklerini etkiler (Majidzadeh vd. 2016). Yüzey akımı, frekans seçici yüzeylerin performansını belirleyen temel bir faktördür çünkü yüzeyin davranışını, geçirgenliğini ve rezonans özelliklerini etkiler (Katoch vd. 2021). Bu nedenle, yüzey akımı, yüzeyin elektromanyetik davranışını belirleyerek, frekans seçici yüzeylerin işleyiş prensiplerini ve performansını tanımlayan kritik bir ölçüdür. Şekil 4.26(a)'da, katman 1'in normal bir dalga tarafından uyarıldığında yüzey akım dağılımları gösterilmektedir ve Şekil 26(b)'de, normal dalga uyarımı altında katman 2 için yüzey akım dağılımı tasvir edilmiştir. Katmanları gözlemlediğimizde, yüzey akım yoğunluğunun dairenin üst ve alt kısımlarında daha yüksek olduğu ve

kenarlar arasındaki bağlantıdan dolayı yan taraflarda belirgin şekilde daha düşük olduğu görülmektedir.

4.3.2.2 Çift katman

Tek katmanlı bölümde detaylandırılan her katman, bant genişliğini artırmak için çift katmanlı bir tasarım oluşturmak üzere bir araya getirilmiştir. Çift katmanlı bir tasarım oluşturmanın amacı geniş bant bir FSY elde etmektir. Önceki bölümlerde her katman için hesaplanan optik şeffaflık, bu bölümde farklı katman kombinasyonları için hesaplanmıştır. Katman 1 - katman 2 kombinasyonu için elde edilen optik şeffaflık %92.4'tür. Sonuçlara göre, çift katmanlı yapıda dahi yüksek optik şeffaflığın sağlandığı görülmektedir.

Yapının mekanik olarak ayarlanabilir bir versiyonu için hava boşluğu katmanı düşünülmüş ve katmanlar arasındaki mesafe olarak belirtilen hava boşluğu kalınlığı 'k' olarak adlandırılmıştır. Farklı 'k' değerleri için simülasyon çalışmaları, Şekil 4.27'de gösterildiği gibi yürütülmüştür. Simülasyonlar, 'k' değeri için 0 ile 12 mm arasında 4 mm'lik adımlarla gerçekleştirilmiş, bu değer bant genişliği ve izolasyon üzerindeki etkisini incelemiştir. Örneğin Şekil 4.27'de detaylı bir inceleme yapıldığında, 'k' değeri 0 mm olduğunda, yani katman 1 ve katman 2 birbirine yapışık olduğunda, bant genişliği 1.20 GHz ölçülmüştür. 'k' değeri 4 mm olduğunda, bant genişliği 1.65 GHz'e ulaşırken, 'k' değeri 4 mm ve 8 mm için aynı ölçümü korumuştur. 'k' 12 mm olduğunda ise bant genişliği 1.69 GHz olarak gözlemlenmiştir.



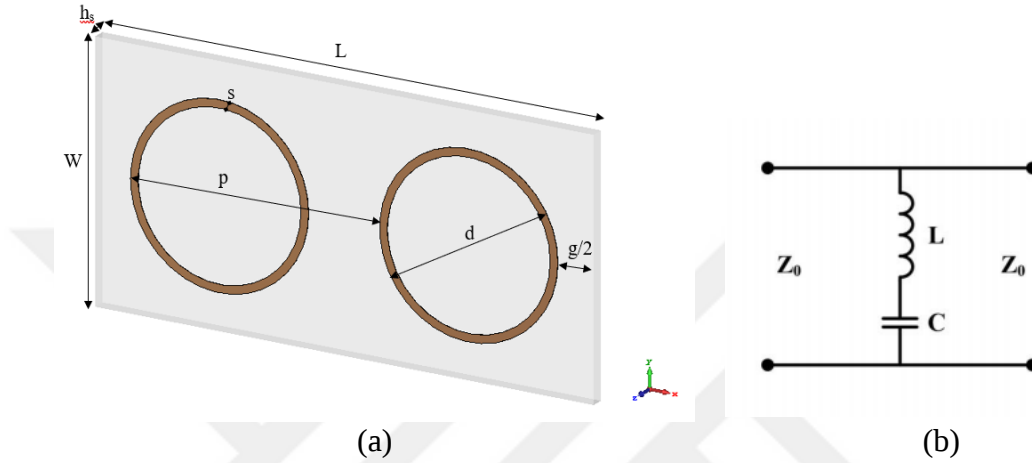
Şekil 4.27 Katmanlar arası mesafenin iletim karakteristiğine etkisi

'k' değerleri bant genişlikleri cinsinden karşılaştırıldığında, 0 mm ve 4 mm değerleri arasında yaklaşık 0.45 GHz'lik bir fark olduğu görülmektedir. Diğer 'k' değerleri için önemli bir bant genişliği artışı gözlemlenmemiştir ancak izolasyon değerlerinde değişim gözlemlenmiştir. 'k' değerindeki artış, hesaplanan frekans aralığında gelişmiş izolasyon ile ilişkilidir (-10 dB'nin altında). Örneğin, 'k' değeri 4 mm olduğunda, minimum izolasyon değeri -11.96 dB iken; 8 mm'de -17.65 dB ve 12 mm'de -21.32 dB'dir. Bu simülasyon sonuçlarına dayanarak, 'k' değeri olarak 8 mm'nin en uygun seçim olduğu belirlenmiştir, ancak bu hava boşluğunun ayarlanması, fiziksel istikrar nedeniyle zorlu bir süreçtir. Hava boşluğu kalınlığının 8 mm seçilmesinin nedenleri, iyi bir bant genişliği, yüksek izolasyon değeri ve amaçlanan uygulamalar için katmanlar arasında makul bir mesafe sağlaması olarak sıralanabilir.

4.3.3 Eşdeğer devre modeli

Eşdeğer devre modelinin detayları ve hesaplama yöntemleri bölüm 3.2'de verilmiştir. Bu bölümde ise tasarlanan iki farklı katmanın rezonans frekansları, L ve C değerleri hesaplanmış ve simülasyon sonuçları ile karşılaştırılmıştır. FSY'nin boyutsal parametreleri, tasarım aşamasında, tasarım boyutlarına göre eşdeğer devre modellerinin hesaplanmasıyla doğrulanmıştır. Şekil 4.28(a)'da birinci katmanın geometrik

parametreleri birim hücre üzerinden gösterilmiştir. Bu parametrelerin tanımları önceki bölümlerde detaylı bir şekilde aktarılmıştır. Şekil 4.28(b)'de ise dairesel döngü elemanına ait eşdeğer devre modeli gösterilmektedir. Metalik elemanlar arasındaki boşluklar C'yi temsil ederken, metalik elemanlar indüklenen döngü akımları nedeniyle L etkisi gösterirler. Eşdeğer devre modeli seri bağlı L ve C elemanlarından oluşmaktadır.



Şekil 4.28 (a) Birim hücre yapısı (b) Eşdeğer devre modeli

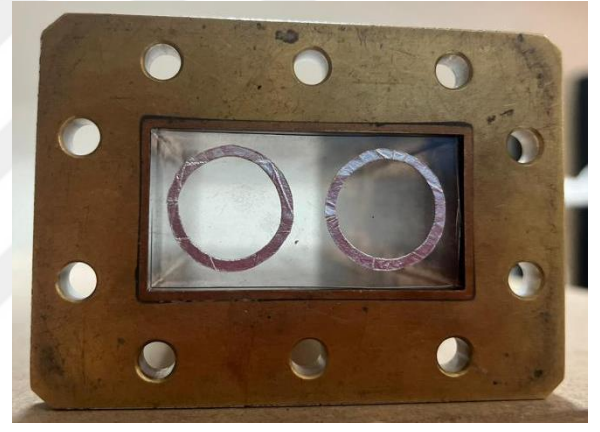
Bu bölümde, Çizelge 4.3’de belirtilen parametre değerleri kullanılarak bireysel katmanlar için toplu elemanların (L ve C) hesaplanması gerçekleştirilmiştir. L ve C değerlerini hesaplamak için ECM kullanılarak katmanlar için rezonans frekansı belirlenmiştir. Katman 1 için parametreler şunlardır: $p = 29.083$, $d = 20.8$, $g = 8.283$ ve $s = 0.9$ mm. Bu değerler ile, hesaplanan rezonans frekansı 4.53 GHz, C ve L değerleri ise sırasıyla 0.048 pF ve 25.74 nH olarak hesaplanmıştır. Katman 2 için , hesaplanan rezonans frekansı 3.77 GHz, L değeri 28.60 nH ve C değerini 0.059 pF olarak hesaplanmıştır. CST tam dalga simülatörü kullanılarak yapılan simülasyonlar sonucunda katman 1 için gözlemlenen rezonans frekansı 4.51 GHz, eşdeğer devre hesaplamalarında ise rezonans frekansı 4.53 GHz olarak belirlenmiştir. Simülasyon sonucuna göre, katman 2 için rezonans frekansı 3.69 GHz olarak belirlenirken, ECM’de göre rezonans frekansı 3.77 GHz olarak hesaplanmıştır. ECM kullanılarak hesaplanan rezonans frekansının her iki katman için de simülasyon sonuçları ile yakından eşleştiği gözlemlenmiştir.

4.3.4 Ölçüm sonuçları

Optik olarak şeffaf çift katmanlı geniş bant tasarımını doğrulamak için katman 1 ve katman 2, hem baskı hem de kesme tekniklerini tek tek içeren bir süreçten geçerek fabrikasyona tabi tutulur. Şeffaf PVC malzeme, ölçümlerde kullanılan WR229 dalga kılavuzunun boyutlarına uygun olarak kesilmiştir. İletken malzeme olarak bakır bant kullanılmıştır. Tasarım, AutoCAD programında gerçek ölçülerle çizilmiş ve bu 2 boyutlu çizim ile bakır bant aynı anda yazıcıya gönderilerek bakır bant üzerine çizim basılmıştır. Daha sonra iletkenler hassas bir şekilde kesilir ve şeffaf PVC malzeme üzerinde önceden belirlenmiş konumlara yapıştırılarak periyodiklik gerekliliklerine uyum sağlanır.



(a)

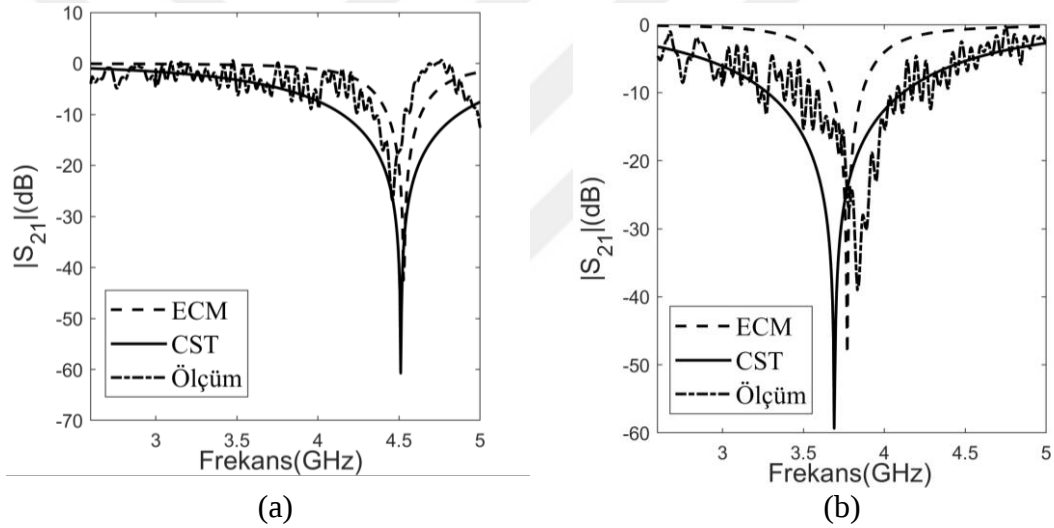


(b)

Şekil 4.29 (a) İlk örnekler (b) Dalga kılavuzu içine yerleştirilmiş ilk örnek

Birim hücreler için manuel olarak üretilen katman 1 ve katman 2, Şekil 4.29(a)'da, dalga kılavuzundaki temsili ise Şekil 4.29(b)'de gösterilmektedir. WR-229 dalga kılavuzu ve Rohde & Schwarz ZVL13 vektör ağ analizörü kullanılarak bireysel katmanların ve çift katmanın iletim karakteristikleri ölçülmüştür. Ölçülen iletim karakteristikleri, hem simülasyon çalışmaları hem de ECM ile karşılaştırılmıştır. Şekil 4.30'da simülasyon sonuçları, ECM sonuçları ve ölçüm sonuçları karşılaştırılmıştır. Rezonans frekansı için ölçülen sonuçlar, simülasyon sonuçları ve ECM sonuçları Çizelge 4.4'de sunulmuştur. Katman 1 için rezonans frekansı, ölçüm sonuçlarında 4.46 GHz, ECM sonuçlarında 4.53 GHz ve simülasyon sonuçlarında 4.51 GHz olarak belirlenmiştir ve karşılaştırma Şekil 4.30(a)'da verilmiştir. Rezonans frekansı için ölçülen sonuçlara göre hata oranlarını

değerlendirildiğinde, simülasyon sonuçları %1.1 sapma gösterirken, ECM sonuçları %1.5 sapma göstermektedir. Ölçüm sonuçlarda, Katman 2 için rezonans frekansı 3.83 GHz olarak belirlenmiş, ECM sonuçlarında 3.77 GHz ve simülasyon sonuçlarında 3.69 GHz olarak bulunmuştur ve karşılaştırma Şekil 4.30(b)'de sunulmuştur. Rezonans frekansı için ölçülen sonuçlara göre hata oranlarını değerlendirildiğinde, simülasyon sonuçları %3.7 sapma gösterirken, ECM sonuçları %1.6 sapma göstermektedir. Katman 1 için üst ve alt bant çalışma frekansları sırasıyla 4,34 GHz ve 4,53 GHz'dir. Bu, Katman 1 için 0,19 GHz bant genişliğine işaret etmektedir. Katman 2 için üst ve alt bant çalışma frekansları sırasıyla 3,6 GHz ve 4,09 GHz olup, Katman 2 için 0,59 GHz bant genişliği ortaya çıkmaktadır.



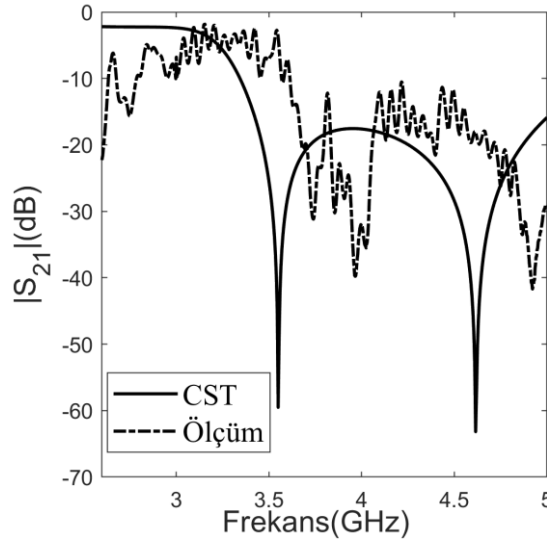
Şekil 4.30 CST, ECM ve ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması (a) Katman-1 (b) Katman-2

Sonuçlar incelendiğinde; her iki katman için ölçülen rezonans frekanslarının ECM ve simülasyon sonuçlarıyla yakından eşleştiği görülmektedir.

Çizelge 4.4 Ölçüm, CST ve ECM sonuçlarının karşılaştırılması

Katman Numarası	Ölçüm Aracı	Rezonans Frekansı (GHz)	Ölçüme göre hata payı
1	Ölçüm	4.46	-
	ECM	4.53	1.5%
	CST	4.51	1.1%
2	Ölçüm	3.83	-
	ECM	3.77	1.6%
	CST	3.69	3.7%

Katmanlara ilişkin ölçümlerin tamamlanmasının ardından dalga kılavuzu içerisine aralarında 8 mm aralık olacak şekilde iki katman yerleştirildi ve çift katmanın iletim özellikleri ölçülmüştür. Çift katmana ait ölçüm sonuçları ve simülasyon sonuçları Şekil 4.31'de sunulmaktadır. Ölçüm sonuçlarında üst ve alt bantların çalışma frekanslarının sırasıyla 3,61 GHz ve 5,0 GHz, bant genişliğinin ise 1,39 GHz olduğu görülmektedir. Simülasyon çalışmalarında üst ve alt bant frekanslarının sırasıyla 3,39 GHz ve 5,0 GHz, bant genişliğinin ise 1,61 GHz olduğu görüldü. Simülasyon ve ölçüm sonuçları karşılaştırıldığında bant genişliğinde 0,22 GHz'lik bir sapma gözlemlenmiştir. Ölçüm sonuçları ile diğer ölçüm yöntemleri arasında iyi bir uyum yakalanmıştır.



Şekil 4.31 CST sonuçları ile ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması

Çizelge 4.5 Önerilen optik olarak şeffaf çift katmanlı FSY yapısının son teknolojiye sahip alternatiflerle karşılaştırılması.

Referans	Katman Sayısı	f_L/f_U (GHz)	U.C. Boyutu ($\lambda_0 \times \lambda_0$)	Polarizasyon bağımsızlık f_L/f_U	Iso. (dB) f_L/f_U	Bant Genişliği (GHz) (-10dB)	Şeffaflık (%)
(Can 2023)	1	3.30/4.43	0.43x0.43	Evet/Hayır	20/40	0.10/0.95	93
(Can 2023)	1	3.52/4.46	0.43x0.43	Evet/Evet	23/40	0.19/0.85	93
(Yang vd. 2011)	1	0.90/1.90	0.39x0.39	Evet/Hayır	14/12	0.54/0.43	81.60
(Can vd. 2017)	1	2.50/5.10	0.85x0.85	Evet/Evet	30/20	1.05/0.36	65.48
(Can vd. 2011)	3	3.38/4.66	0.45x0.90	Evet/Hayır	30/40	1.28	52.50
(Bagci vd. 2017)	2	2.45/5.82	0.58x0.58	Evet/Evet	20/30	0.35/0.20	5>
(Farooq vd. 2019)	1	2.45/5.50	0.36x0.36	Evet/Evet	30/50	1.03/1.08	86
K1	1	4.34/4.53	0.44x0.44	Evet/Evet	28	0.19	96.7
K2	1	3.6/4.09	0.40x0.40	Evet/Evet	39	0.59	95.7
K1+K2	2	3.61/5	0.48x0.48	Evet/Evet	39	1.39	92.4

f_L : Alt bant operasyon frekansı, f_U : Üst bant operasyon frekansı, Iso.: İzolasyon miktarı, λ_0 : Üst bandın merkez frekansında yönlendirilen dalga boyu. K1:Katman1, K2:Katman2

Literatürdeki en son çalışmalar, şeffaflık, bant genişliği, birim hücre boyutu, izolasyon değerleri, katman sayısı ve polarizasyon bağımlılığı gibi parametreler açısından dikkate alınmış ve önerilen çalışmayla karşılaştırılmıştır. Sonuçlar Çizelge 4.5'de sunulmuştur. Bu çalışmalarla karşılaştırıldığında, önerilen FSY'ler her bir katman ve çift katman için en yüksek optik şeffaflığı ve bant genişliğini sağlamaktadır. Üstelik kapalı alan ve izolasyon kombinasyonu göz önüne alındığında diğerlerine göre tatmin edici bir performans sergilemektedir. Ayrıca özel tasarım süreci sayesinde önerilen tasarım, uygun maliyetli çözümleri kolaylaştıracaktır. Tüm bireysel katmanlar ve çift katmanlı yapı, hem üst hem de alt çalışma frekansı bantlarında, polarizasyon bağımsız ve açısal kararlıdır.

4.3.5 Tartışma

Bu bölümde, iki boyutlu dairesel döngü yapılı optik geçirgenliği yüksek geniş bant FSY tasarımı gerçekleştirilmiştir. Önerilen yapı ile rezonans frekansının ve bant genişliğinin parametrik olarak değiştirilebileceği gösterilmiştir. Ayrıca geliştirilen yapı ile;

- 1) Kullanılan şeffaf alttaş malzeme ile birlikte görünür bölgede çift katman için %92.2'lik çok yüksek optik geçirgenlik sağlanmaktadır.
- 2) Yapı esnek bir özelliğe sahip olduğu için farklı şekillerde ve farklı kaplama teknolojilerinde rahatça kullanılabilir.
- 3) Yapı $\pm 60^\circ$ 'ye kadar gelen düzlemsel dalgalarda stabil bir çalışma sergileyip polarizasyon bağımsız olduğunu göstermiştir.
- 4) 5GHz ve altı frekans bantları için 1.39GHz'lik geniş bir bant durdurma özelliği vardır.
- 5) Tasarım süreci sayesinde önerilen tasarım, uygun maliyetli çözümleri kolaylaştıracaktır.

5. SONUÇ

Bu tez kapsamında gerçekleştirilen çalışmalarda nesnelerin interneti uygulamalarına yönelik farklı frekanslar için çeşitli yapılarda frekans seçici yüzey tasarımları, optimizasyonu ve tasarlanan yapıların üretim ve ölçümü gerçekleştirilmiştir. Tez çalışması kapsamında 3 farklı çalışma gerçekleştirilmiş olup çalışmanın sonuçları bu bölümde tartışılmıştır.

Bölüm 4.1’de WLAN uygulamaları için dikdörtgen yapılı çift bant FSY tasarımı gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen çift bant çalışmada her bir rezonans frekansının geometrik parametreler ile ayrı ayrı kontrol edilebileceği gösterilmiştir. Tasarlanan yapının üzerine gelen düzlemsel dalganın $\pm 20^\circ$ ’ye kadar polarizasyon bağımsız olduğu gösterilmiştir. Parametrik analizler gerçekleştirilmiş olup bu analizler ölçüm sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır ve iyi bir uyum yakalanmıştır. Üretim ve malzeme tedarikinin kolaylığı sunulan çalışmayı cazip hale getirmektedir. Çalışmanın bu kısmından bir adet ulusal konferans bildirisi yayınlanmıştır.

Bölüm 4.2’de 5G frekans bantlarından olan 3.5GHz bandını soğurması için FSY tabanlı bir soğurucu tasarlanmıştır. Soğurucu tasarımında görünür bölgede optik geçirgenlik sağlamak için şeffaf PVC kullanılmıştır ve %66.5 optik geçirgenlik sağlanmıştır. Parametrik analizler gerçekleştirilerek rezonans frekansının ayarlanabilir olduğu gösterilmiştir. Alttaş olarak kullanılan şeffaf PVC malzeme esnek bir yapıda olduğu için kullanım alanı genişletilebilir. Yapının parametrik analizleri gerçekleştirilip bu analizlerin sonuçlarının ölçüm sonuçları ile örtüştüğü gösterilmiştir. Çalışmanın bu kısmından bir adet ulusal konferans bildirisi yayınlanmıştır.

Bölüm 4.3’de, IoT uygulamaları için önerilen çift katmanlı geniş bant FSY, polarizasyon bağımsız ve optik şeffaflığa sahiptir. Tasarımın katmanları, ayrı ayrı kullanıldığında 3.7 (n77) ve 4.5 (n79) frekans bantları için bir bant durduran filtre görevi görmektedir. Geniş bant bir FSY elde etmek için iki farklı katman tasarlanmış olup bu katmanlar birlikte kullanıldığında ise 3.61 GHz ile 5.0 GHz frekans bantları arasında geniş bant, bant durduran filtre işlevi görmektedir. Çift katmanlı bir yapı kullanıldığında, katmanlar

arasındaki mesafe mekanik olarak kontrol edilebilirse, FSY'nin filtre davranışı kolayca değiştirilebilir. Örneğin, daha yüksek izolasyon gerektiren durumlarda, katmanlar arasındaki mesafenin artırılması bu gereksinimi karşılayabilir. Tasarımın önemli avantajlarından biri, görünür bölgede çok yüksek optik geçirgenliğe sahip olmasıdır. Örneğin, bu teknolojinin evdeki pencerelere uygulanması durumunda, optik şeffaflık, kullanıcıların konforunu etkileyen önemli bir faktör olur. Bu nedenle, bu çalışmada FSY'nin sağladığı yüksek optik şeffaflık, evlerde kullanılabilirliklerini arttırabilir. FSY tasarımında esnek bir alttaş malzeme kullanıldığı için, önerilen tasarım geniş bir uygulama yelpazesi sağlar. Önerilen tasarım 0° ile 60° aralığında gelen düzlemsel dalgalara karşı kararlı bir davranış sergiler ve polarizasyon bağımsız olduğunu gösterir. Önerilen tasarım, yüksek şeffaflığı, maliyet etkinliği, bastırmada yüksek performans yetenekleri ve polarizasyon bağımsız olması nedeniyle 6 GHz'in altındaki IoT uygulamaları için çok uygundur. Literatür araştırmaları sonucunda önerilen yapının polarizasyon bağımsız, ultra geniş bant çalışmasını desteklerken şeffaflık açısından da daha önce sunulan yapılardan daha üstün olduğu görülmektedir. Ayrıca yapı eşdeğer devre modeli ve tam dalga simülatörü açısından da değerlendirilmiştir. Ölçüm sonuçları ECM sonuçları ve simülasyon sonuçları karşılaştırılmış olup yüksek doğrulukta uyum olduğu gözlemlenmiştir.

Bu çalışmada çift katmanlı yüzey tasarlanarak geniş bant bir FSY oluşturulabileceği gösterilmiştir. Literatürde bulunan çalışmalar aksine yüksek optik geçirgenlik sağlayan bir çalışma sunulmuştur. Kullanılan şeffaf PVC malzemenin yüksek optik geçirgenliği, esnek yapısı ve hafif oluşundan dolayı gelecekteki FSY çalışmalarında kullanılabileceği gösterilmiştir. Katmanlar arası mesafe mekanik olarak ayarlandığı takdirde yapının frekans karakteristiği, bant genişliği ve izolasyon miktarı kontrol edilebilir. Gelecekteki çalışmalarda yapının katman sayısı artırılıp frekans karakteristiğine etkisi incelenebilir. İletken malzeme olarak fiyatı ve yoğunluğu bakırdan daha düşük alüminyum kullanılarak deneyler gerçekleştirilebilir. Alüminyum kullanılarak gerçekleştirilecek sonuçlar bakır kullanılarak elde edilen sonuçlara yakın olması durumunda hem maliyet düşebilir hem de daha hafif bir yapı elde edilebilir. Kullanılan şeffaf PVC'nin kalınlığı düşürüldüğü takdirde dielektrik malzeme kayıpları azaltılabilir ve aynı zamanda yapı daha esnek hale gelebilir. Ayrıca birim hücre yapısı değiştirilerek istenen frekans aralığı için geniş bant

bir FSY tasarlamak mümkün olabilir. Üretim işlemi manuel olarak gerçekleştirildiği için ölçüm ve simülasyon sonuçları arasında küçük sapmalar meydana gelmiştir. Üretim adımı, insan etkileşimi minimuma indirilebilirse üretim sürecindeki küçük hatalar iyileştirilebilir ve simülasyon sonuçları ile çok daha iyi bir uyum sağlanabilir. Ayrıca ölçümlerde network analizör kaynaklı gürültüler de mevcuttu. Bu gürültüleri en aza indirmek için laboratuvarında kullanılan analizörün kalibre edilmesi gerekmektedir. Sonuç olarak bu çalışma ile birlikte, çift katman kullanılarak geniş bant bir yapı elde edilebileceği, aynı zamanda bu yapının doğru bir malzeme seçimi ile yüksek optik geçirgenliğe sahip olabileceği ve birim hücre yapısının düzgün tasarlandığı takdirde polarizasyon ve geliş açısı bağımsız olabileceği gösterilmiştir.



KAYNAKLAR

- Achmad, K.A., Nugroho, L.E., & Djunaedi, A. (2018). Smart city model: A literature review. In Proceedings of the 2018 10th International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE) ,488-493.
- Adebowale, E.S., & Sarhan, M.M. (2017). Electromagnetic compability issues in critical smart grid infrastructure. IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine, 6(4):63-70.
- Agiwal, M., Roy, A., & Saxena, N. (2016). Next Generation 5G Wireless Networks: A Comprehensive Survey. IEEE Communications Surveys & Tutorials. 18(3):1617-1655.
- Albino, V., Berardi, U., & Dangelico, M. (2015). Smart Cities: Definitions, Dimensions, Performance, and Initiatives. Journal of Urban Technology, 22(1):3-21.
- Al-Fuqaha, A., Guizani, M., Mohammadi, M., Aledhari, M., & Ayyash, M. (2015) Internet of things: A survey on enabling technologies, protocols, and applications. IEEE Commun. Surv. Tutor.,17:2347-2376.
- Alharbi, N., & Soh, B. (2019). Roles and challenges of network sensors in smart cities. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci., 322 012002.
- Anwar, R.S., Mao, L., & Ning, H. (2018). Frequency selective surfaces : A review. Applied sciences. 8(9):1689.
- Atzori, L., Iera, A., & Morabito, G. (2010). The internet of things: A survey. Computer Networks, 54(10): 2787-2805.
- Babkin, V.A., & Stroganova, E.P. (2018). Principles of Indicators Formation for Quality of Communication Networks Monitoring. Proc. Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF), 8604357.
- Bagci, F., Mulazimoglu, C., Can, S., Karakaya, E., Yilmaz, A.E., & Akaoglu, B. (2017). A glass based dual-band frequency selective surface for protecting systems against WLAN signals. AEU Int J Electron Commun., 82:426- 434.
- Bayatpur, F., & Sarabandi, K. (2008). Single-layer high-order miniaturized-element frequency-selective surfaces. IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques., 56(4):774-781.
- Can, S. (2023). Dual- band sub- 6 GHz frequency filtering with optically transparent single- layer dual- polarized smart surface. Microw Opt Technol Lett., 1- 7.

- Can, S., Kapusuz, K.Y., & Yilmaz, A.E. (2017). A dual-band polarization-independent FSS having a transparent substrate for ISM and Wi-Fi Shielding. *Microw Opt Technol Lett.*, 59:2249–2253
- Can, S., & Yilmaz, A.E. (2016). Reduction of specific absorption rate with artificial magnetic conductors. *Int J RF and Microwave Comp Aid Eng.*, 26:349-354.
- Can, S., & Yilmaz, A.E. (2013). Parametric performance analysis of the square loop frequency selective surface. *Elektrotehniski Vestnik/Electrotechnical Review*, 80(3):110-115.
- Can, S., Kapusuz, K.Y., & Yilmaz, A.E. (2017). Optically transparent frequency selective surface for ultrawideband applications. *Microw Opt Technol Lett.*, 59(12):3197- 3201.
- Costa, F., & Monorchio, A. (2021). A frequency-selective radome with wideband absorbing properties. *IEEE Trans Anten Propag.*, 60(6):2740- 2747.
- Cui, Y., Nauroze, S.A., Bahr, R., & Tentzeris, M.M. (2021). A Novel Additively 4D Printed Origami-inspired Tunable Multi-layer Frequency Selective Surface for mm-Wave IoT, RFID, WSN, 5G, and Smart City Applications. *IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS)*, 86-89.
- da Silva, B.S., Campos, A.L.P.D.S., & Neto, A.G. (2020). Equivalent circuit model for analysis of frequency selective surfaces with ring and double concentric ring apertures. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 14(7):600-607.
- Döken, B. (2023). The effect of the distance between unit cells on the frequency stability of frequency selective surfaces. *Erzincan University Journal of Science and Technology*, 16(3):643-653.
- Farooq, U., Shafique, M.F., & Mughal, M.J. (2019). Polarization insensitive dual band frequency selective surface for RF shielding through glass windows. *IEEE Trans Electromagn Compat.*, 62(1):93- 100.
- Ferreira, D., Caldeirinha, R.F.S., Cuiñas, I., & Fernandes, T.R. (2015). Square loop and slot frequency selective surfaces study for equivalent circuit model optimization. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 6(9):3947-3955.
- Ferreira, D., Cuiñas, I., Caldeirinha, R.F.S., Fernandes, T., & Reis J. (2014). A square loop frequency selective surface parametric study for EC model optimization. *Loughborough Antennas and Propagation Conference (LAPC)*, 102-105.
- Filippo, C., Claudio, A., Agostino, M., & Prati, E. (2011). Waveguide dielectric permittivity measurement technique based on resonant FSS filters. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters.*, 21(5): 273-275.

- Green, R.B. (2019). Optically Transparent Antennas and Filters: A Smart City Concept to Alleviate Infrastructure and Network Capacity Challenges. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 61(3):37-47.
- Grychkin, S.E., & Stroganova, E.P. (2023). Smart City: Electromagnetic Compatibility Problem. *Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF)*, 1-5.
- Huang, J., Wu, T.K., & Lee, S.W. (1994). Tri-band frequency selective surface with circular ring elements. *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 42:166–175.
- Hussein, M., Hung, Y., & Zhou, J. (2018). Frequency selective surface with miniaturized different elements: a different approach. University of Liverpool, UK.
- Ilyas, M. (2021). IoT applications in smart cities. *IEEE International Conference on Electronic Communications, Internet of Things and Big Data*. 44-47
- Ishimaru, A. (2017). *Electromagnetic wave propagation, radiation, and scattering*. Wiley. ISBN : 978-1-118-09881-3.
- Jawhar, I., Mohamed, N., & Al-Jaroodi, J. (2018). Networking architectures and protocols for smart city systems. *Journal of Internet Services and Applications*, 26.
- Kanellopoulos D., Sharma, V.K., Panagiotakopoulos, T., & Kameas, A. (2023). Networking architectures and protocols for IoT applications in smart cities: recent developments and perspectives. *Electronics*, 12(11):2490.
- Kapoor, A., Mishra, R., & Kumar, P. (2021). Frequency selective surfaces as spatial filters: fundamentals, analysis, and applications. *Alexandria Engineering Journal*, 61:4263-4293.
- Katoch, K., Jaglan, N., Gupta, S.D., & Sharawi, M.S. (2021). Design of a triple band-notched polarization independent compact FSS at UWB frequency range. *Int J RF Microw Comput Aided Eng.*, 31:e22631.
- Katoch, K., Jaglan, N., & Gupta, S.D. (2019). A Review on Frequency Selective Surfaces and its Applications. *2019 International Conference on Signal Processing and Communication (ICSC)*, 75-81.
- Koohestani, M., Perdriau, R., Ramdani, M., & Carlsson, J. (2020). Frequency selective surfaces for electromagnetic shielding of pocket-sized transceivers. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 62(6): 2785-2792.
- Lavanya, V., Ramya, R., Geetha, V., & Vasudevan, K. (2020). Frequency shielding with FSS for 5G applications. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 7(6):4811-4814.

- Lee, Y.J., Yeo, J., Mittra, R., & Park, W.S. (2004). Design of a high-directivity Electromagnetic Band Gap (EBG) resonator antenna using a frequency-selective surface (FSS) superstrate. *Microw. Opt. Technol. Lett.*, 43: 462-467.
- Li, Y., Ren, P., & Xaing, Z. (2019). A dual-passband frequency selective surface for 5G communication. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 18(12):2597-2601.
- Liu, T., & Kim, S.S. (2019) High-capacitive frequency selective surfaces of folded spiral conductor arrays. *Microwave and Optical Tech. Letters*, 62(1):301-307.
- Majidzadeh, M., Ghobadi, C., Nourinia, J. (2016). Novel single-layer reconfigurable frequency selective surface with UWB and multi-band modes of operation. *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, 70(2):151-161.
- Marcuvitz, N. (1986). *Waveguide Handbook*. New York, Peter Peregrinus Ltd, pp. 278-280.
- Mittra, R., Chan, C.H., & Cwik, T. (1988). Techniques for analyzing frequency selective surfaces-a review. In *Proceedings of the IEEE*, 76(12):1593-1615.
- Mohyuddin, W., Kim, D.H., Choi, H.C., & Kim, K.W. (2018). Comparative Study of Square and Circular Loop Frequency Selective Surfaces for Millimeter-Wave Imaging Diagnostics Systems. *Sensors*, 18:3079.
- Munk, B.A. (2000) *Frequency Selective Surfaces: Theory and Design*. Hoboken, NJ, USA: Wiley, ISBN 0-471-37047-9.
- Niyato, D., Maso, M., Kim, D.I., Xhafa, A., Zorzi, M., & Dutta, A. (2017). Practical perspectives on IoT in 5G networks: From theory to industrial challenges and business opportunities. *IEEE Commun. Mag.*, 55(2): 68-69.
- Panwar, R., & Lee, J.R. (2017). Progress in frequency selective surface-based smart electromagnetic structures: A critical review. *Aerospace Science and Technology*. 66:216-234
- Sangeethalakshmi, K., Rukmani Devi, S., Gangatharan, N., & Sivalakshmi, P. (2021). Challenges & opportunities in frequency selective surfaces for EMI shielding application: A theoretical survey. *Materials Today: Proceedings*. 43(6):3947-3950.
- Shafique, K., Khawaja, B.A., Sabir, F., Qazi, S., & Mustaqim, M. (2020). Internet of Things (IoT) for Next-Generation Smart Systems: A Review of Current Challenges, Future Trends and Prospects for Emerging 5G-IoT Scenarios. *IEEE Access*. 8:23022-23040.

- Sharma, S.K., Zhou, D., Luttgen, A., & Sarris, C.D. (2018). A micro copper mesh- based optically transparent triple- band frequency selective surface. *IEEE Antennas Wireless Propag Lett.*, 18(1): 202- 206.
- 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.
- Syed, A.S., Sierra-Sosa, D., Kumar, A., & Elmaghraby, A. (2021). IoT in Smart Cities: A Survey of Technologies, Practices and Challenges. *Smart Cities*, 4:429-475.
- Varkani, A.R., Firouzeh, Z.H., & Nezhad, A.Z. (2018). Equivalent circuit model for array of circular loop FSS structures at oblique angles of incidence, *IET Microwaves Antennas & Propagation*, 12:749-755.
- Yang, Y., Li, W., Salama, K.N., & Shamim, A. (2011). Polarization insensitive and transparent frequency selective surface for dual band GSM shielding. *IEEE Trans Antennas Propag.*, 69(5): 2779- 2789.
- Zanella, A., Bui, N., Castellani, A., Vangelista, L., & Zorzi, M. (2014). Internet of Things for Smart Cities. *IEEE Internet of Things Journal*, 1(1): 22-32.
- Qu, M., Feng, Y., Su, J., & Shah, S.M.A. (2021). Design of a single- layer frequency selective surface for 5G shielding. *IEEE Microwave Wireless Compon Lett.*, 31(3):249- 252.
- Wu, T.K. (1995). *Frequency Selective Surface and Grid Array*. John Wiley and Sons Inc.
- Wu, T.K. (2005). Frequency selective surfaces. In *Encyclopedia of RF and Microwave Engineering*.
- Xiao, H., Shi, M., & Chen, J. (2020). *Electromagnetic Function Textiles, Electromagnetic Materials and Devices*. IntechOpen.