



**METAMALZEME TABANLI RF YANSITICI
ÖZELLİĞİ ARTTIRILMIŞ BOYA İLE FREKANS
SEÇİCİ YÜZEY TASARIMI**

Hakan KIZILTAŞ

Danışman: Doç. Dr. Gökhan ÖZTÜRK

Yüksek Lisans Tezi

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

2025

(Her hakkı saklıdır)

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**METAMALZEME TABANLI RF YANSITICI ÖZELLİĞİ ARTTIRILMIŞ BOYA İLE
FREKANS SEÇİCİ YÜZEY TASARIMI**

(Frequency selective surface design with metamaterial-based paint with increased RF
reflective features)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Hakan KIZILTAŞ

Danışman: Doç. Dr. Gökhan ÖZTÜRK

Erzurum
Eylül, 2025



FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Graduate School of Natural and
Applied Sciences

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü
TEZ KABUL VE ONAY TUTANAĞI

**METAMALZEME TABANLI RF YANSITICI ÖZELLİĞİ ARTTIRILMIŞ BOYA İLE
FREKANS SEÇİCİ YÜZEY TASARIMI**

Doç. Dr. Gökhan ÖZTÜRK danışmanlığında, Hakan KIZILTAŞ tarafından hazırlanan bu çalışma, 20/08/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Elektrik-Elektronik Anabilim Dalı Elektromanyetik Alanlar ve Mikrodalga Tekniği Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak **oybirliği** ile kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı:	Doç. Dr. Yunus KAYA <i>Bayburt Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır
Danışman:	Doç. Dr. Gökhan ÖZTÜRK <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır
Jüri Üyesi:	Dr. Öğr. Üyesi Muhammed Fatih ÇORAPSIZ <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır
İkinci Tez Danışmanı	Dr. Öğr. Üyesi Mustafa Alptekin ENGİN <i>Bayburt Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır

Enstitü Yönetim
Kurulunun / ... / tarih
ve sayılı kararı.

Bu tezin Atatürk Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili maddelerinde belirtilen şartları yerine getirdiğini onaylarım.

Prof.Dr. Alper NUHOĞLU

Enstitü Müdürü

Aslı Islak İmzalıdır

ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU

Yüksek Lisans Tezi olarak Doç. Dr. Gökhan ÖZTÜRK danışmanlığında sunulan “Metamalzeme Tabanlı RF Yansıtıcı Özelliği Arttırılmış Boya ile Frekans Seçici Yüzey Tasarımı” başlıklı çalışmanın tarafımızdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını, yararlanılan eserlerin kaynakçada gösterildiğini, Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından belirlenmiş olan Turnitin Programı benzerlik oranlarının aşılmadığını ve aşağıdaki oranlarda olduğunu beyan ederiz.

Tez Bölümleri	Tezin Benzerlik Oranı (%)	Maksimum Oran (%)
Giriş	2	30
Kuramsal Temeller	4	30
Materyal ve Yöntem	2	35
Bulgular ve Tartışma	3	20
Sonuçlar	2	20
Tezin Geneli	10	25

Not: Yedi kelimeye kadar benzerlikler ile Başlık, Kaynakça, İçindekiler, Teşekkür, Dizin ve Ekler kısımları tarama dışı bırakılabilir. Yukarıdaki azami benzerlik oranları yanında tek bir kaynaktan olan benzerlik oranlarının %5'den büyük olmaması gerekir.

Beyan edilen bilgilerin doğru olduğunu, aksi halde doğacak hukuki sorumlulukları kabul ve beyan ederiz.

Tez Yazarı (Öğrenci)	Tez Danışmanı
Hakan KIZILTAŞ	Doç. Dr. Gökhan ÖZTÜRK
11.09.2025	11.09.2025
İmza: Aslı Islak İmzalıdır	İmza: Aslı Islak İmzalıdır

* Tez ile ilgili YÖKTEZ’de yayınlamasına ilişkin bir engelleme varsa aşağıdaki alanı doldurunuz.

☐ Tezle ilgili patent başvurusu yapılması / patent alma sürecinin devam etmesi sebebiyle Enstitü Yönetim Kurulunun/....../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 2 (iki) yıl süreyle engellenmiştir.

☐ Enstitü Yönetim Kurulunun/....../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 6 (altı) ay süreyle engellenmiştir.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam süresince bilgi ve tecrübeleriyle beni yönlendiren, akademik çalışma, azim ve kararlılığı veren, geniş hoşgörü ve yardımlarıyla tezimin gerek bilimsel gerekse biçimsel açıdan düzenlenmesinde katkıda bulunan saygıdeğer hocam Sayın Doç. Dr. Gökhan ÖZTÜRK ve Dr. Öğr. Üyesi Alptekin ERGİN'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalışmalarım süresince yardım ve desteğini esirgemeyen, her zaman yanımda olan Sayın Abdullah GÖZÜM'e, Sayın Doç. Dr. Oğuzhan AKGÖL'e, Sayın Derya BİRHAN'a ve Sayın Murat KÜÇÜKUĞURLU'ya, teşekkür ederim.

Tez çalışmalarım süresince yardımlarını esirgemeyen Elektrik-Elektronik Mühendisliği ve Kimya Mühendisliği Bölümünün öğretim üyelerine, araştırma görevlilerine ve diğer çalışan bütün personele ayrıca teşekkür ederim.

Eğitim ve öğrenim hayatım boyunca maddi, manevi desteklerini hiç esirgemeyen, sonsuz özveri ve sabır gösteren annem, babam ve aileme teşekkürü bir borç bilirim.

Hakan Kızıldaş

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

METAMALZEME TABANLI RF YANSITICI ÖZELLİĞİ ARTTIRILMIŞ BOYA İLE FREKANS SEÇİCİ YÜZEY TASARIMI

Hakan KIZILTAŞ

Danışman: Doç. Dr. Gökhan ÖZTÜRK

Amaç: Bu tez çalışmasının amacı, halka geometrik şekil kullanılarak tasarlanan bir frekans seçici yüzey (FSY) modeli ile elektromanyetik girişim (EMG) koruma, radyo frekansı (RF) filtreleme ve frekans seçici yüzey uygulamaları için yüksek verimli bir tasarım oluşturmaktır. Bu tasarımın geniş bant genişliği, düşük yansıtma, yüksek soğurma kapasitesi ve dalga geliş açısından bağımsızlık gibi özelliklere sahip olması hedeflenmiştir.

Yöntem: Tasarım sürecinde, halka geometrik şekilli FSY'nin birim hücre boyutu, dielektrik katman kalınlığı, iletken yüzey kalınlığı, iletken yüzey yarıçapı ve iletken yüzey genişliği gibi tasarım parametreleri incelenerek tasarım gerçekleştirilmiştir. Tasarım çalışmaları, elektromanyetik performansın iyileştirilmesi amacıyla CST Studio Suite 3D elektromanyetik simülasyon yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. FSY'nin frekans tepkisi, yansıma ve soğurma özellikleri analiz edilmiş ve en iyi performansı sağlayacak parametre değerleri belirlenmiştir. Tasarım çalışmaları sonucunda tasarlanan halka geometrik şekilli FSY'nin üretilen poliüretan boya ile tekstil üzerine serigrafi yöntemi kullanılarak üretimi tamamlanmıştır.

Bulgular: Tasarım çalışmaları sonucunda tasarlanan halka geometrik şekilli FSY'nin performans parametreleri bant genişliği: 1,75 GHz, maksimum yansıtma frekansı: 6,00 GHz ve maksimum soğurma değeri: -27,13 dB şeklinde özetlenebilir. Elde edilen bu sonuçlar, tasarımın oldukça verimli bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir. Tasarım, elektromanyetik dalgaları büyük oranda soğurma kapasitesine ve düşük yansıma değerine sahiptir. Ayrıca, bu FSY tasarımının, gelen elektromanyetik dalganın geliş açısına bağımsız bir performans sergilediği ve bant durduran filtre karakteristiği gösterdiği tespit edilmiştir. Bu, FSY'nin farklı açılardan gelen elektromanyetik dalgalara karşı aynı seviyede soğurma sağlaması anlamına gelmektedir.

Sonuç: Bu tez çalışmasında metmalzeme tabanlı bir FSY tasarımı gerçekleştirilmiş ve elektromanyetik performansı artırılmıştır. Optimizasyon sonucunda, FSY'nin bant genişliği, yansıma ve soğurma değerleri açısından istenilen hedeflere ulaşıldığı görülmüştür. Geniş bant genişliği, yüksek soğurma kapasitesi ve dalga geliş açısından bağımsız performans, FSY'nin EMI koruma, RF filtreleme ve radar sistemleri gibi birçok uygulama alanında kullanılabileceğini göstermektedir. Bu tezde geliştirilen tasarım süreci, FSY tasarımlarına yönelik yeni bir yaklaşım sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: frekans seçici yüzey, metmalzeme, bant durduran ve geçiren filtre, radyo frekansı kontrolü

Eylül 2025, 80 sayfa

ABSTRACT

MASTER DISSERTATION

FREQUENCY SELECTIVE SURFACE DESIGN WITH METAMATERIAL-BASED PAINT WITH INCREASED RF REFLECTIVE FEATURES

Hakan KIZILTAŞ

Supervisor: Assoc. Prof. Gökhan ÖZTÜRK

Purpose: The purpose of this thesis is to design a high-efficiency frequency selective surface (FSS) model using a ring-shaped geometry for applications such as electromagnetic interference (EMI) protection, radio frequency (RF) filtering, and frequency selective surface (FSS) systems. The design aims to achieve characteristics such as wide bandwidth, low reflection, high absorption capacity, and independence from the angle of incidence of electromagnetic waves.

Method: During the design process, the design parameters of the ring-shaped FSS, such as unit cell size, dielectric layer thickness, conductive surface thickness, conductive surface radius, and conductive surface width, were examined to achieve an optimal design. The design and optimization were carried out using the CST Studio Suite 3D electromagnetic simulation software to improve electromagnetic performance. The frequency response, reflection, and absorption characteristics of the FSS were analyzed, and the parameter values that provide the best performance were determined. As a result of the design process, the ring-shaped FSS was produced using screen printing on textile materials with polyurethane-based paint.

Findings: The performance parameters of the ring-shaped FSS designed as a result of the design studies can be summarized as follows: bandwidth: 1.75 GHz, maximum reflection frequency: 6.00 GHz, and maximum absorption value: -27.13 dB. These results demonstrate that the design has a highly efficient structure. The design exhibits a high absorption capacity for electromagnetic waves and a low reflection value. Additionally, it was determined that this FSS design shows a performance independent of the angle of incidence of incoming electromagnetic waves and exhibits the characteristics of a band-stop filter. This indicates that the FSS provides the same level of absorption for electromagnetic waves arriving from different angles.

Results: In this thesis, a metamaterial-based FSS was designed and its electromagnetic performance was improved. As a result of optimization, it was observed that the FSS achieved the desired targets in terms of bandwidth, reflection, and absorption values. The wide bandwidth, high absorption capacity, and independence from the angle of incidence make this FSS suitable for use in various application areas, such as EMI protection, RF filtering, and radar systems. The design and optimization process presented in this thesis provides a new approach to the design of FSS.

Keywords: frequency selective surface, metamaterial, band-stop and band-pass filter, radio frequency control

September 2025, 80 pages

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY TUTANAĞI.....	i
ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
TABLolar DİZİNİ.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
KISALTMA VE SİMGELER DİZİNİ	xi
GİRİŞ.....	1
Literatür özetleri.....	4
KURAMSAL TEMELLER.....	16
Metamalzemeler.....	16
Elekromanyetik Alan Etkileşimleri	24
Metamalzemelerin Sınıflandırılması.....	25
ENG malzemeler	26
MNG malzemeler.....	28
DNG malzemeler	32
Saçılım Parametreleri.....	33
Çoklu Yansıma ve Soğurma Teorisi.....	35
Frekans Seçici Yüzeyler	37
FSY'lerin Performansını ve Frekans Özelliklerini Etkileyen Faktörler	38
FSY Tipleri	39
FSY Geometrisinin Frekans Cevabına Etkisi	41
FSY'lerde Dielektrik Malzeme Etkisi.....	44
FSY'lerde Birim Hücre	46
EMD'nın FSY'ye Geliş Açısı ve Polarizasyonu.....	48
Frekans Seçici Yüzeylerin Uygulama Alanları.....	49
MATERYAL ve YÖNTEM	53
Materyaller.....	53
Yöntem.....	53
Poliüretan boya sentezi	53
FSY birim hücre tasarımı	53
Kumaş üzerine FSY tasarımı	54
BULGULAR ve TARTIŞMA	56
Halka geometrik şekil kullanılarak tasarlanan FSY analizleri.....	56

Halka şekilli FSY x'sinin değiştirilmesine frekans tepkileri	58
Halka şekilli FSY h'sinin değiştirilmesine frekans tepkileri	59
Halka şekilli FSY c'sinin değiştirilmesine frekans tepkileri.....	60
Halka şekilli FSY r'sinin değiştirilmesine frekans tepkileri	61
Halka şekilli FSY d'sinin değiştirilmesine frekans tepkileri	62
Halka şekilli FSY θ açısının değiştirilmesine frekans tepkileri	63
Üretimi yapılan halka şekilli bant durduran FSY'nin frekans tepkileri	64
Üretimi yapılan halka şekilli bant durduran FSY'nin frekans tepkileri	66
Literatürle Karşılaştırmalı Değerlendirme	67
SONUÇLAR.....	70
KAYNAKÇA	72
ÖZGEÇMİŞ.....	80



TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. Metamalzemelerin bazı uygulama alanları.....	33
Tablo 2. Tek ve çift katmanlı FSY karşılaştırması	45
Tablo 3. FSY'nin x değişimine bağlı elde edilen sonuçlar	59
Tablo 4. FSY'nin h değişimine bağlı elde edilen sonuçlar	60
Tablo 5. FSY'nin c değişimine bağlı elde edilen sonuçlar	61
Tablo 6. FSY'nin r değişimine bağlı elde edilen sonuçlar	62
Tablo 7. FSY'nin d değişimine bağlı elde edilen sonuçlar	63
Tablo 8. FSY'nin θ değişimine bağlı elde edilen sonuçlar	64
Tablo 9. Literatür karşılaştırma tablosu	69



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. İlk üretilen metamalzeme yapısı	18
Şekil 2. a) Sağ elli ve b) sol elli malzemelerde dalgaının ilerleme yönü	19
Şekil 3. Pendry tarafından oluşturulan periyodik kübik kafes yapısı.....	20
Şekil 4. İlk yüksek manyetik özelliklere sahip SSR.....	22
Şekil 5. a) SRR kompozitleri ile iletken tellerin birlikte oluşturduğu metamalzeme yapısı, b) ilgili yapının frekansa bağlı iletim spektrumu	22
Şekil 6. Shelby tarafından geliştirilen negatif kırılma indisine sahip tasarım.....	23
Şekil 7. Malzemelerin sınıflandırılması	26
Şekil 8. Farklı yapıya sahip ENG yapılar.....	28
Şekil 9. a) Basit SSR ve b) eşdeğer devresi	29
Şekil 10. a) Periyodik SSR ve b) eşdeğer devresi	30
Şekil 11. Malzemeleri tanımlamada kullanılan kara kutu sistemi	34
Şekil 12. İki kapılı devre şeması	35
Şekil 13. Yansıma teorisi	36
Şekil 14. Elektromanyetik dalga spektrumu ve kullanım alanları.....	38
Şekil 15. Farklı tasarlanmış FSY'ler için filtre karakteristikleri.....	38
Şekil 16. a) Yama ve b) oyuk tipi FYS'ler.....	40
Şekil 17. a) İki ve b) üç boyutlu FSY yapıları.....	41
Şekil 18. Geometrik şekillerine göre FSY grupları.....	43
Şekil 19. Şerit dipol ve dairesel döngü FSY yapılarına ait iletim karakteristiği.....	44
Şekil 20. Tek ve Çift katmanlı dielektrik yapıya sahip FSY'ler	45
Şekil 21. Örnek bir birim hücre yapısı	47
Şekil 22. Bir saçılım örüntüsünün gösterimi	47
Şekil 23. Dipol elemanı ile elektrik alan vektörünün aynı düzlemde olduğu durum.....	48
Şekil 24. Dipol elemanı ile elektrik alan vektörünün dik düzlemde olduğu durum.....	49
Şekil 25. Kutuplayıcı tipi FSY yapısı.....	50
Şekil 26. Anten randomu örneği.....	52
Şekil 27. Tasarlanan bant geçiren FSS yapısı için üretilen kalıp	54
Şekil 28. Kumaş üzerine uygulanan bant geçiren FSS yapısı	55
Şekil 29. Bant durduran FSY yapısı.....	56
Şekil 30. Bant durduran FSY yapısı yandan görünüş	57
Şekil 31. Bant geçiren FSY yapısı	58
Şekil 32. FSY'nin x değişimine bağlı frekans cevabı	59

Şekil 33. FSY'nin h değişimine bağlı frekans cevabı	60
Şekil 34. FSY'nin c değişimine bağlı frekans cevabı	61
Şekil 35. FSY'nin r değişimine bağlı frekans cevabı	62
Şekil 36. FSY'nin d değişimine bağlı frekans cevabı	63
Şekil 37. FSY'nin θ değişimine bağlı frekans cevabı	64
Şekil 38. Simülasyonda tasarlanan FSY'nin frekans cevabı	65
Şekil 39. Tasarlanan FSY'nin frekans cevabı	66
Şekil 40. Simülasyonda tasarlanan FSY'nin frekans cevabı	66
Şekil 41. Tasarlanan FSY'nin frekans cevabı	67



KISALTMA VE SİMGELER DİZİNİ

dB: desibel

c_0 : vakumda ışık hızı

f: frekans

MHz: megahertz

GHz: gigahertz

$\vec{D}$: elektrik akı yoğunluğu

$\vec{E}$: elektrik alan vektörü

$\vec{H}$: manyetik alan vektörü

$\vec{k}$: dalga vektörü

S : Poynting's vektörü

$\vec{B}$: manyetik akı yoğunluğu

S_{ij} : i ve j sayılarına karşılık gelen kapılara ait S-parametresi

v : dalganın hızı

ω : açısal frekans

ϵ_r : dielektrik geçirgenlik

μ_r : manyetik geçirgenlik

λ : dalga boyu

Γ : yansımaya katsayısı

T: iletim katsayısı

A: soğurma gücü

R: toplam yansımaya katsayısı

μ : mikro (10^{-6})

n: kırılma indisi

GİRİŞ

Elektronik harp ve radar sistemleri, askerî harekâtlar sırasında stratejik ve taktiksel verilere ulaşım imkânı sunarak operasyonel üstünlük sağlar. Bu verilerin karşı tarafın radar ya da elektronik harp sistemleri tarafından saptanmasını engellemek, geciktirmek veya gizlemek; muharebe başarısını doğrudan etkileyebilecek kritik bir unsurdur. Bu doğrultuda, elektromanyetik dalgaları soğurma yetisine sahip yapılar, savunma sistemlerinin ayrılmaz bir parçası hâline gelmiştir. Özellikle elektromanyetik gizlilik gereksinimlerinin arttığı günümüzde, bu tür yapılar kara, deniz ve hava platformlarında radar sistemlerine karşı görünürlüğü azaltmak amacıyla etkin şekilde kullanılmaktadır. Bu teknolojilerin askeri sistemlerde görünmezlik ve elektromanyetik spektrumda iz bırakmama gibi avantajlar sunması, uygulama alanlarını giderek genişletmiştir.

Mikrodalga soğurucu malzemelerin ve yankısız test ortamlarının gelişim süreci üzerine ilk kapsamlı değerlendirmelerden biri 1973 yılında Emerson tarafından sunulmuştur (Emerson 1973). Elektromanyetik soğurucu yapıların hem kuramsal hem de deneysel temelleri 19. yüzyılın ortalarına kadar uzanmakta olup, bilinen ilk uygulama örneği 2 GHz frekansında $\lambda/4$ rezonansa sahip bir soğurucuya dayanmaktadır. Bu yapı, yüksek dielektrik sabitli titanyum monoksit ile düşük kalınlık elde edilmiş ve saçılım etkinliğini artırmak üzere karbon karası ile optimize edilmiştir. Söz konusu tasarım için patent alınmış ve literatürde öncü bir çalışma olarak kaydedilmiştir.

Elektromanyetik dalga soğurucu yapıların kullanımı, II. Dünya Savaşı sırasında ve sonrasında büyük bir ivme kazanmıştır. Bu dönemde, savaş alanındaki radar sistemlerine karşı gizlilik sağlamak amacıyla elektromanyetik soğuruculara yoğun bir şekilde ihtiyaç duyulmuştur. Özellikle ABD ve Alman orduları, radar sistemlerinin savaş alanındaki stratejik öneminin farkında olarak bu teknolojilere yatırım yapmışlardır. Almanlar, denizaltılarının şnorkel ve periskoplarının radar tarafından tespit edilmesini önlemek amacıyla "Schornsteinfeger" (baca temizleyicisi) kod adıyla bilinen bir projeyi hayata geçirmiştir (Vinoy and Jha 1995). Bu proje kapsamında, karbon karası ve soğurucu materyallerin birleşiminden oluşan özel bir soğurucu yapı geliştirilmiştir.

Bu dönemde geliştirilen soğurucu yapıların başlıca iki türü dikkat çekmektedir. Bunlardan ilki, karbonil demir tozu ile takviye edilen ve yaklaşık 0,762 cm (0,3 inç) kalınlığında, yarı esnek bir kauçuk tabakadan oluşan soğurucudur. Bu yapı, yaklaşık 3 GHz frekansında rezonans soğurması sağlamaktadır. İkinci yapı ise "Jauman soğurucu" (Jauman

absorber) olarak adlandırılmıştır. Bu soğurucu, alternatif olarak yerleştirilmiş sert plastik ve dirençli tabaka katmanlarından oluşmaktadır. Yaklaşık 7,62 cm (3 inç) kalınlığında olan bu yapı, sert bir yapıya sahip olup, geniş bantlı soğurma kabiliyetiyle dikkat çekmektedir. Bu çok katmanlı yapı, düşük kayıplı bir ortamdan yüksek kayıplı bir ortama kademeli geçiş sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. Bu katmanlı yapılar sayesinde, 2 ila 15 GHz frekans aralığında -20 dB seviyesinin altında kalan yansıma katsayıları elde edilmekte ve böylece yüksek düzeyde elektromanyetik soğurma sağlanmaktadır. Söz konusu sistemler, elektromanyetik dalgaların yansımaları önemli ölçüde azaltarak radar tespitine karşı etkin bir elektromanyetik kalkan görevi üstlenmektedir.

Radar sistemlerinin performansını artırmak ve dış kaynaklı elektromanyetik parazitleri azaltmak amacıyla Amerika Birleşik Devletleri ordusu, Massachusetts Institute of Technology (MIT) bünyesindeki Radyasyon Laboratuvarı tarafından geliştirilen özel bir kaplama malzemesi olan Halpern Anti-Radyasyon Boyası'nı (HARP) uygulamaya koymuştur. Bu özel formülasyon, çevresel nesnelerden kaynaklanan istenmeyen radyasyon yansımalarını azaltarak, radar sinyallerinin daha temiz ve yüksek doğrulukla iletilmesini sağlamıştır. HARP boyasının, 8–12 GHz aralığını kapsayan X-bant frekanslarında yaklaşık %31 oranında (yaklaşık 15 dB) pik soğurma performansı sergilediği bildirilmiştir (Montgomery *et al.* 1987). Bu üstün soğurma kapasitesi, onu radar sistemlerinde dikkat çeken bir pasif elektromanyetik koruyucu malzeme hâline getirmiştir.

Bu gelişmelere paralel olarak, MIT Radyasyon Laboratuvarı tarafından başka bir öncü tasarım olan Salisbury ekran soğurucu da geliştirilmiştir. 1952 yılında bu yapının patenti alınmış ve mikrodalga soğurucu teknolojisinde önemli bir adım olarak kabul edilmiştir (Salisbury 1952). Bu yapı, üç katmanlı bir rezonans soğurucu sistem olarak yapılandırılmıştır: birinci katman yüzey direnci sağlayan iletken olmayan bir film, ikinci katman $\lambda/4$ kalınlığında bir hava boşluğundan ve üçüncü katman ise ideal iletkenlik sağlayan bir metal yüzeyden oluşmaktadır. Bu özel düzenleme, gelen elektromanyetik dalgaların yansıma yapmadan soğurulmasını sağlayarak sistemin elektromanyetik görünmezliğini artırmıştır. Ayrıca, bu yapıda kullanılan dirençli katmanın karakteristik empedansının boş uzayın empedansına (yaklaşık 377 Ohm) eşdeğer olduğu da deneysel olarak gösterilmiştir. Bu tasarım hem radar soğuruculuğu hem de elektromanyetik sızdırmazlık açısından önemli teknik avantajlar sunmuştur.

1960'lı yılların başlarında ve sonrasında, geniş bantlı soğurucuların tasarımı ve üretimine yönelik önemli gelişmeler yaşanmıştır (Wright 1974). Bu dönemde, geniş bantlı soğurucuların ticari üretimine yönelik önemli atılımlar gerçekleştirilmiştir. ABD Deniz

Araştırma Laboratuvarı'nda (US Naval Research Laboratory) Wright ve Emerson tarafından gerçekleştirilen çalışmalar, bu dönemin en kapsamlı ve başarılı projeleri arasında gösterilmektedir (Simmons and Emerson 1966). Bu çalışmalar kapsamında, geniş bantlı soğurucu olarak "hayvan kılından elde edilen" bir yapı kullanılmıştır. Emerson, geniş bant soğurucu tasarımında, yumuşak hayvan kılının karbon siyahı ile kaplanması veya püskürtme yöntemiyle boyanması sayesinde etkili bir soğurucu elde edilebileceğini göstermiştir (Emerson 1954). Bu yöntem, geniş bant frekans aralıklarında yüksek soğurma kapasitesi sunarak elektromanyetik dalgaların yansımaları büyük ölçüde azaltmıştır.

Bu tasarımlar ve üretim teknikleri, elektromanyetik soğurucu yapıların test edilmesi ve değerlendirilmesi için yeni ölçüm yöntemlerinin geliştirilmesine yol açmıştır. Özellikle, laboratuvar ortamında bu tür yapılarla testlerin gerçekleştirilmesi sırasında istenmeyen çevresel yansımaların önlenmesi gerektiği anlaşılmıştır. Bu nedenle, yankısız oda (anechoic chamber) konsepti geliştirilmiştir. Yankısız odaların iç yüzeyleri, çevresel yansımaları en aza indirmek amacıyla karbon karası içeren polimer köpüklerle kaplanmıştır. Bu odalar, elektromanyetik soğurucu malzemelerin performans testlerinin yapılmasında ve ölçüm doğruluğunun artırılmasında kilit bir rol oynamıştır (Emerson 1973). Bu yöntem, modern savunma ve iletişim teknolojilerinde kullanılan elektromanyetik girişim (EMI) önleyici yapıların test edilmesi için standart bir ölçüm yaklaşımı haline gelmiştir.

1968 yılında Ohio'dan araştırmacı Benedikt A. Munk, literatürde “Frekans Seçici Yüzeyler (FSS)” olarak bilinen yapılar üzerine kapsamlı teorik ve deneysel çalışmalar gerçekleştirerek bu alandaki analiz yöntemlerinin temelini atmıştır (Munk 2000). Munk'un bu çalışmaları, elektromanyetik dalgaların iletim ve yansımaları kontrol eden yenilikçi FSS yapılarının teorik temellerini atmıştır. FSS'ler, elektromanyetik dalgaların belirli frekanslarda iletilmesine veya engellenmesine olanak tanıyan periyodik yapılardır. Bu yapıların radar soğurucu malzemeler, antenler, filtreler ve elektromanyetik kalkanlama gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılmasına zemin hazırlamıştır.

Frekans seçici yüzeylerin tasarımı, Analog Devre soğurucularının temel ilkelerine dayanmaktadır. Analog devre tabanlı soğurucu yapılar, Salisbury'nin öncülüğünü yaptığı rezonans tipi soğurucuların gelişmiş bir versiyonu olarak değerlendirilmektedir (Watts *et al.* 2012). Bu tür yapılar hem direnç sağlayan hem de reaktif özellik gösteren elemanlardan oluşmakta olup, genellikle birden fazla katmandan meydana gelecek şekilde tasarlanmaktadır. Yapının temel işlevi, gelen elektromanyetik dalganın belirli bir kısmını absorbe ederken, kalan kısmını kontrollü biçimde iletmek veya geri yansıtmaktır. Analog devre soğurucularında tasarım kriterlerinden biri, iletken alt tabaka ile periyodik dizilim düzlemi arasındaki fiziksel

uzaklığın elektromanyetik dalganın dalga boyunun dörtte biri ($\lambda/4$) olacak biçimde optimize edilmesidir (Knott *et al.* 2004). Bu yapı, elektromanyetik dalgaların zemin düzlemi üzerinde yansımadan iletilmesini sağlar.

Modern Analog Devre soğurucularının tasarımları, geniş bant soğurma ve yüksek geliş açılarında etkin performans sunacak şekilde geliştirilmiştir (Costa *et al.* 2017). Bu özellikleri sayesinde, yüksek açılardan gelen elektromanyetik dalgaları bile soğurabilen bir yapı elde edilmiştir. Bu tür soğurucular, geleneksel rezonans soğuruculara kıyasla daha geniş bir frekans aralığında etkili performans sunmaktadır. Bu yapılar, yalnızca elektromanyetik soğurucular olarak değil, aynı zamanda frekans seçici yüzeyler olarak da kullanılmaktadır.

FSS yapılarının kullanım alanları oldukça çeşitlidir. Bu yapılar, anten sistemlerinde performansı artırmak, filtre uygulamalarında belirli frekansları engellemek veya iletmek, lens uygulamalarında elektromanyetik dalgaların yönünü değiştirmek ve radar soğurucu malzeme (RAM) olarak radar sistemleriyle tespit edilmemek için kullanılmaktadır (Costa and Monorchio 2012). Ayrıca, elektromanyetik kalkanlama uygulamalarında, belirli bir alandaki elektromanyetik girişimi kontrol etmek ve dışarıdan gelen istenmeyen elektromanyetik dalgaları engellemek amacıyla da yaygın olarak kullanılmaktadır (Costa *et al.* 2021).

Sonuç olarak, Frekans Seçici Yüzeyler (FSS), modern elektromanyetik yapıların tasarımında önemli bir role sahiptir. Munk'un çalışmalarıyla birlikte, FSS'lerin tasarım prensipleri daha net anlaşılmış ve bu yapıların radar soğurucu malzemeler, antenler, filtreler ve elektromanyetik kalkanlama gibi çeşitli alanlarda yaygın olarak kullanılması sağlanmıştır. Bu tasarımlar, modern askeri ve sivil sistemlerde elektromanyetik girişim (EMI) sorunlarını çözmede kritik bir teknoloji olarak kabul edilmektedir.

Literatür özetleri

“Metamalzeme” terimi, kelime anlamı olarak "geleneksel malzemelerin ötesindeki" yapıları ifade eder ve doğada doğal olarak bulunmayan; belirli frekans aralıklarında hem elektriksel geçirgenlik (ϵ_r) hem de manyetik geçirgenlik (μ_r) değerleri negatif olan, insan yapımı, fonksiyonel malzemeler için kullanılmaktadır. Sıradışı elektromanyetik davranışları sayesinde bu yapılar, özellikle elektromanyetik dalga etkileşimlerinin araştırıldığı alanlarda yoğun ilgi görmüş ve öncü konumuna yükselmiştir. Sahip oldukları kendine özgü fiziksel özellikler, metamalzemelerin pek çok ileri düzey uygulama için elverişli hale gelmesine olanak tanımış; bu durum da konuya yönelik bilimsel çalışmaların sayısında gözle görülür bir artışa neden olmuştur. Günümüzde metamalzemeler, plazmonik yapılar, fotonik kristaller, yapay olarak elde edilen elektromanyetik özellikli bileşikler, çift negatif (DNG) ve tek negatif (ENG

veya MNG) malzemeler ile kiral (chiral) ortamlar gibi çeşitli sınıflandırmalar altında incelenmektedir (Lindell *et al.* 1992; Smith *et al.* 2000; Zheludev 2010; Zheludev 2015).

Metamalzemelerin tarihsel gelişimi incelendiğinde, 1898 yılında Hintli bilim insanı Bose'un "Burkulmuş yapı üzerinde elektromanyetik dalgaların polarizasyon durumu" başlıklı çalışması, bu alandaki ilk araştırma olarak kabul edilmektedir (Bose and Strutt 1898). 912 yılında araştırmacı Karl, kiral ortamlarda elektromanyetik dalgaların davranışını deneysel olarak inceleyen ilk bilim insanı olarak literatüre geçmiştir (Lindell *et al.* 1992). 1957 yılında Tinoco, kiral yapılarda düzlem polarize elektromanyetik dalgaların polarizasyon dönüşümü üzerine çalışmalar gerçekleştirmiştir (Lindell *et al.* 1992). Harvey ise 1959 yılında yayımladığı "Mikrodalga frekanslarında optik teknikler" başlıklı çalışmasında, yapay malzemeler kullanılarak düşük frekanslı cihazların üretilebileceğini göstermiştir (Harvey 1959).

Metamalzemeler üzerine ilk sistematik çalışma, 1967 yılında Rus fizikçi Veselago tarafından gerçekleştirilmiştir. Veselago, malzemenin ϵ_r ve μ_r negatif olduğu durumda, ortamın negatif bir kırılma indisine sahip olabileceğini teorik olarak öne sürmüştür (Viktor 1968). Ayrıca, bu $\vec{k}$ ters yönlerde olduğunu göstermiştir. Ancak, böyle bir ortamın fiziksel olarak bulunmaması nedeniyle Veselago'nun bu teorisi uzun yıllar boyunca ilgi görmemiştir. Veselago'nun çalışmasından önce de çeşitli araştırmacılar, negatif kırılma indisi ve ters yönlü enerji yayılımı (geri ilerleyen dalgalar) konularında teorik yaklaşımlar ortaya koymuşlardır (Schuster 1905). Ancak bu fikirler, Veselago'nun 1967 tarihli çalışması kadar kapsamlı bir sistematik yaklaşım sunmamıştır (Silin 1972). Veselago'nun çalışması, 1968 yılında İngilizceye çevrilerek uluslararası literatürde yerini almış, ancak yaklaşık 30 yıl boyunca teorik bir çerçevede kalmıştır.

1996 yılında Pendry ve çalışma arkadaşları, metalik tel yapılar kullanarak malzemelerde negatif elektriksel geçirgenlik (ϵ_r) özelliğinin deneysel olarak elde edilebileceğini ortaya koymuştur (Pendry *et al.* 1996). Bunu takiben, 1999 yılında Split-Ring Resonator (SRR) adı verilen ayırık halka rezonatörleri kullanılarak negatif manyetik geçirgenlik (μ_r) özelliği de deneysel olarak doğrulanmıştır (Pendry *et al.* 1999; Smith *et al.* 2000). 2000'lerin başına gelindiğinde, Pendry ve ekibi hem dielektrik hem de manyetik geçirgenliğin negatif değerlerde olabileceğini deneysel olarak doğrulamış ve bu çalışmalar metamalzemeler alanında bir dönüm noktası olmuştur.

2000 yılında Smith ve ekibi, Split-Ring Resonator (SRR) yapıları ile metalik telleri bir arada kullanarak, eşzamanlı olarak negatif elektriksel geçirgenlik (ϵ_r) ve negatif manyetik geçirgenlik (μ_r) sergileyen çift negatif (Double Negative Material, DNM) bir yapı üretmeyi

başarmışlardır. Bu deneysel çalışma, metamalzeme araştırmalarında çığır açıcı bir gelişme olarak literatürdeki yerini almıştır (Smith *et al.* 2000).

2001 yılında Shelby ve araştırma ekibi, mikrodalga frekans bandında negatif kırılma indisi gibi sol-el özellikler sergileyen malzemeler üzerinde deneysel incelemeler gerçekleştirmiş ve bu özgün elektromanyetik özelliklere sahip yapıların fiziksel olarak üretilebileceğini deneysel olarak doğrulamışlardır. Geliştirilen bu yapı, iki farklı tipte ayrık halka rezonatör (SRR) ile metal çubukların bir araya getirilmesiyle oluşturulan periyodik bir dizilimden meydana gelmektedir (Shelby *et al.* 2001).

2006 yılında Engheta ve Ziolkowski, metamalzeme tasarımlarında kullanılan çeşitli geometrileri ve bu yapıların mikrodalga, optik ve terahertz bölgelerindeki uygulamalarını detaylı bir şekilde incelemişlerdir. Bu inceleme, metamalzemelerin potansiyel kullanım alanlarını genişleterek bu alandaki araştırmalara önemli bir katkı sağlamıştır (Rahmat-Samii and Yang 2006).

2007 yılında Sabah ve bir diğer araştırmacı, negatif kırılma indisine sahip kayıplı sol-el yapıların elektromanyetik dalgalarla etkileşimini inceleyerek; bu yapıların yayılım, yansıma ve iletim özelliklerine odaklanan deneysel ve sayısal bir çalışma gerçekleştirmiştir (Sabah and Uçkun 2007). Ertesi yıl, Sabah bu konuyu derinleştirerek sol-el kiral malzemelerin karakterizasyonu ve elektromanyetik analizine yönelik araştırmalar yapmıştır (Sabah 2008). Aynı yıl Li ve meslektaşları, kiral metamalzeme sistemlerinde mikrodalga frekanslarındaki manyetik rezonans davranışları ile optik özellikleri değerlendirmiştir. Bu çalışmalar neticesinde, iletim spektrumunda iki ayrı rezonans tepesinin ortaya çıktığı gözlemlenmiş; bu durum, birleşik manyetik dimer temelli sistemlerle ayarlanabilir optik bileşenler ve aktif ortam tasarımı için uygulanabilir bir yöntem sunmuştur (Li *et al.* 2008).

2009 yılında Wang ve araştırma grubu, düzlemsel olmayan yapılar içerisinde yer alan kiral metamalzemelerin optik özelliklerini hem deneysel yöntemlerle hem de sayısal analizlerle incelemiştir. Elde edilen bulgular, üç boyutlu izotropik kiral metamalzemelerin tasarımı ve üretimi açısından literatürde kayda değer bir ilerleme olarak değerlendirilmiştir (Wang *et al.* 2009).

Aynı yıl Zhou ve ekibi, iki katmandan oluşan çapraz tel yapılarına dayanan, düzlemsel olmayan ve negatif kırılma indisli bir metamalzeme modelini hem deneysel olarak hem de sayısal simülasyonlar aracılığıyla analiz etmişlerdir (Zhou *et al.* 2009). Geliştirilen bu yapı, negatif kırılma özelliği sergileyen metamalzemelerin daha sade geometrilerle ve yüksek verimlilikle üretilebileceğini göstermiştir. Devam eden araştırmalarında ise, terahertz (THz)

frekans aralığında çalışan, negatif kırılma indisine sahip düzlemsel olmayan metamalzemelerin fiziksel olarak üretimini başarıyla gerçekleştirmişlerdir (Zhang *et al.* 2009).

Metamalzemelere yeni işlevler kazandırmak ve mevcut uygulama alanlarını genişletmek amacıyla birçok çalışma yürütülmüştür. Bu araştırmalar özellikle anten sistemleri, lens tasarımları, sensör teknolojileri, radar uygulamaları ve kablosuz iletişim altyapıları gibi mühendislik disiplinlerinde yoğunlaşmaktadır. Örneğin, 2007 yılında Majid ve meslektaşları, kare ve dikdörtgen biçiminde düzenlenmiş ayrık halka rezonatörlerini kullanarak klasik bir metamalzeme yapısını mikroşerit anten sistemlerine entegre etmişlerdir. Sayısal simülasyonlar ile elde edilen sonuçlar, deneysel verilerle yüksek düzeyde uyum göstermiştir. Ayrıca, metamalzeme entegrasyonu sonucunda tasarlanan yama tipi mikroşerit antenin kazancında yaklaşık 4 dB'lik bir artış elde edilmiş; bant genişliği ise %2,9'dan %4,98'e yükselmiştir (Majid *et al.* 2009).

Başka bir anten uygulamasında ise Song ve ekibi, zaman bölgesinde sonlu farklar yöntemi (FDTD) kullanarak, I-şekilli sol-el metamalzeme esaslı bir yama anten üzerinde çalışmışlardır. Yürüttükleri çalışmalar neticesinde, 6,7 GHz frekansında anten kazancının arttığı ve geri dönüş kaybının belirgin şekilde azaldığı gözlemlenmiştir (Song *et al.* 2011).

2009 yılında Slyusar, metamalzeme teorisi ve bu teorinin anten tasarımındaki uygulamaları hakkında bir çalışma yayımlamıştır. Bu çalışma, metamalzeme teorisinin tarihsel gelişimini ve mühendislik uygulamalarını detaylı bir şekilde açıklamıştır (Slyusar 2009).

2009 yılında Melik ve araştırma ekibi, ayrık halka rezonatör (SRR) yapısından faydalanarak esnek yapıya sahip kablosuz gerinim sensörleri tasarlamış ve prototip üretimini gerçekleştirmiştir. Elde edilen sonuçlar, bu sensörlerin silikon tabanlı yapılarla karşılaştırıldığında daha hassas ve doğrusal bir tepki davranışı sergilediğini ortaya koymuştur. Ayrıca, farklı rezonatör geometrilerinin kullanıldığı uygulamalar aracılığıyla sensör tasarımının çeşitli teknik gereksinimlere göre uyarlanabilirliğinin mümkün olduğu gösterilmiştir. (Melik *et al.* 2009; Melik *et al.* 2010).

2013 yılında Sabah ve bir diğer araştırmacı, geniş kenarlarla birleştirilmiş üçgen biçimli ayrık halka rezonatörlerden oluşan bir yapı kullanarak terahertz (THz) frekans bandında çalışabilen bir sensör tasarlamış ve bu tasarımın sayısal simülasyonlarını gerçekleştirmiştir. Yapılan nümerik analizler, sensörün oldukça geniş bir frekans aralığında işlevsel olabileceğini ortaya koymuştur. Söz konusu yapı, yüksek duyarlılığı, çift yönlü algılama kapasitesi ve polarizasyona olan bağımlılığı ile THz tabanlı sensör uygulamaları için önemli bir potansiyel taşımaktadır (Sabah and Roskos 2013). Aynı yıl Withayachumnankul ve ekibi, ayrık halka

rezonatörlerin kullanıldığı bir mikro-akışkan sensör tasarımı geliştirmişlerdir (Withayachumnankul *et al.* 2013).

Aynı yıllarda Ekmekçi ve bir diğer araştırmacı, mikrodalga ve terahertz frekanslarında çalışabilecek şekilde tasarlanmış, çok işlevli ve kompakt bir metamalzeme sensör geliştirmiştir. Bu sensör, iki adet özdeş ayırık halka rezonatörün (SRR) arasına yerleştirilmiş bir algılama bölgesi ile yapılandırılmıştır. Sensörün rezonans frekansı; sıcaklık, nem, yoğunluk, konsantrasyon ve basınç gibi çevresel parametrelerdeki değişimlere bağlı olarak, ara katmanda meydana gelen dielektrik geçirgenlik ya da kalınlık farklılıklarına göre ayarlanmaktadır. X-bandı kapsamında yürütülen hem sayısal hem de deneysel analizler, tasarlanan sensörün yüksek düzeyde uyarlanabilirlik ve doğruluk sunduğunu ortaya koymuştur (Ekmekci and Turhan-Sayan 2013).

2015 yılında Jalil, tekstil bazlı, entegre çip gerektirmeyen bir RFID metamalzeme tasarımı üzerine çalışmalar yürütmüştür. Geliştirilen bu yapıda, dikdörtgen oyuklu tamamlayıcı bölünmüş halka rezonatör (CSRR) yapıları temel alınarak çoklu rezonatör konfigürasyonları kullanılmıştır. Tasarım, 50 Ohm empedansa sahip düzlemsel bir iletim hattına bağlanan ve alt tabakanın arka yüzeyine kazınan dört rezonatör elemanından oluşmaktadır. Her bir rezonatör, 200 MHz'lik bant genişliği içinde dört farklı ikili kodlama (00, 01, 10, 11) gerçekleştirebilecek şekilde yapılandırılmıştır. Elde edilen esnek RFID etiketi, 25 mm × 20 mm boyutlarındadır ve düşük kayıplı 8-bitlik bir sistem olarak 2,5 ila 6,5 GHz frekans aralığında çalışabilme kapasitesine sahiptir (Jalil *et al.* 2015).

2016 yılında Can ve bir diğer araştırmacı, tekstil tabanlı metamalzeme yapılar kullanılarak radar kesit alanının (RCS) azaltılmasına yönelik bir araştırma gerçekleştirmiştir. Bu kapsamda, tekstil esaslı metalik bir yüzey tasarlanmış ve mükemmel iletken plakalara kıyasla radar yansımalarını azaltacak biçimde, negatif dielektrik geçirgenliğe sahip bir model oluşturulmuştur. Elektromanyetik simülasyon çalışmaları CST Studio Suite yazılımı kullanılarak yürütülmüştür. Simülasyon sonuçları, yaklaşık 377 Ohm empedansa sahip bir yapı elde edildiğini ve bu yapının hava iç empedansı ile uyumlu olduğunu göstermiştir. Ayrıca, yapılan analizlerde toplam radar kesit alanının %29 oranında azalarak 430 mm²'den 304 mm²'ye düştüğü belirlenmiştir (Can and Yılmaz 2016).

2018 yılında Binion ve araştırma ekibi, gelişmiş metamalzeme tabanlı anten sistemlerine ilişkin kapsamlı bir literatür taraması yayımlamıştır. Söz konusu derlemede, metamalzeme yüzeylerinin ya da odaklayıcı özellik taşıyan mercekle geleneksel anten yapılarına entegre edilmesiyle anten performansında kayda değer iyileştirmeler elde edilebileceği vurgulanmıştır (Binion *et al.* 2018).

Aynı yıl içerisinde Kazak ve araştırma ekibi, optik metamalzemelerin geliştirilmesine yönelik olarak yeni metal-dielektrik nano yapılarının oluşumu ve fiziksel özellikleri üzerine kapsamlı bir çalışma yürütmüştür. Çalışma kapsamında, metal-polimer esaslı çok katmanlı yapılar tasarlanmış ve bu metamalzemelerin sentezi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen numunelerin dielektrik karakteristikleri ile rezonans davranışları hem kuramsal yaklaşımlar hem de deneysel yöntemlerle detaylı biçimde analiz edilmiştir. Bulgular, geliştirilen yapıların ultraviyole (UV) ile kızılötesi (IR) frekans aralığı boyunca geniş spektral bantta etkinliğini koruyabildiğini ortaya koymuştur. Özellikle bu tür metamalzemelerin, hem yakın hem de uzak alan optik uygulamaları için yenilikçi süper lens tasarımlarında kullanılma potansiyeline sahip olduğu ifade edilmiştir (Kazak *et al.* 2018).

Metamalzemelerin elektromanyetik sinyalleri soğurma amacıyla kullanılabileceği fikri, ilk kez Landy ve ekibi tarafından yürütülen öncü bir çalışmayla gündeme getirilmiştir. Bu kapsamda geliştirilen metamalzeme yapısı hem sayısal simülasyonlar hem de deneysel analizler ile değerlendirilmiş ve güçlü bir soğurucu potansiyele sahip olduğu gösterilmiştir. Tasarımda yer alan yapı, birbirini tamamlayan iki farklı rezonatörden oluşmakta olup hem dielektrik hem de manyetik rezonans etkileri sayesinde elektromanyetik enerjiyi etkili biçimde absorbe edebilmektedir. Söz konusu çalışma, bu alandaki sonraki araştırmalara temel oluşturan önemli bir referans noktası olarak kabul edilmektedir (Landy *et al.* 2008).

2009 yılında Tao ve araştırma grubu, terahertz (THz) frekans aralığında yüksek verimlilikle çalışan bir rezonans metamalzeme soğurucu tasarımı gerçekleştirmiştir. Geliştirilen yapı, elektriksel ve manyetik geçirgenlik özelliklerinin birbirinden bağımsız biçimde ayarlanmasına olanak tanıyan iki katmanlı bir birim hücre mimarisine dayanmaktadır. Bu metamalzemenin, 1,3 THz frekansında yapılan deneysel testlerde yaklaşık %70 oranında elektromanyetik soğurma sağladığı rapor edilmiştir (Tao *et al.* 2008). Aynı yıl Wang ve ekibi, geniş açılı ışınım koşullarına ve farklı polarizasyonlara duyarsız bir kiral metamalzeme soğurucu tasarımı üzerinde çalışmıştır. Gerçekleştirilen simülasyon ve deneysel analizler, bu yapının çeşitli geliş açıları ve polarizasyon durumlarında da etkin soğurma performansı sergilediğini ortaya koymuştur (Wang *et al.* 2009).

Metamalzeme üretim teknikleri geliştikçe, çeşitli geometrilerde yeni tasarımlar ortaya çıkmıştır. SRR'ler, metamalzemelerin üretiminde kullanılan en yaygın yapılardan biridir (Lee 2009). İlk tasarımlar, birbiri içerisine geçmiş kare "C" şekilli rezonatörlerden oluşmaktayken (Shelby *et al.* 2001), daha sonraki çalışmalarda π , U, çapraz, Ω , S, hilal, V, sekizgen, gamalı haç ve file tipi gibi farklı geometrik formlar geliştirilmiştir (Chen *et al.* 2005; Dong *et al.* 2007;

Sabah *et al.* 2010; Zhao *et al.* 2010; Zhao *et al.* 2011; Sabah and Roskos 2012; Li *et al.* 2013; Bute *et al.* 2017; Naskar *et al.* 2017; Tütüncü and Torpi 2018).

2010 yılında Cheng ve Yang tarafından yürütülen bir çalışmada, mikrodalga frekans aralığında yüksek düzeyde elektromanyetik enerji soğurabilen bir metamalzeme yapısı tasarlanmıştır. Bu tasarım, iki rezonatör ve 0,9 mm kalınlığındaki düzlemsel bir katmandan oluşmaktadır. Deneysel çalışmalar, 10,4 GHz frekansında %98, simülasyonlar ise %99,9 oranında soğurma elde edildiğini göstermiştir (Cheng and Yang 2010). Devamında Zhu ve arkadaşları, polarizasyondan bağımsız bir mikrodalga soğurucu tasarlamış, %97 oranında soğurma elde etmiş ve tasarımın farklı geliş açılara uyum sağladığını kanıtlamışlardır (Zhu *et al.* 2010). Aynı çalışmada, diyot ekleyerek ayarlanabilir bir metamalzeme reflektör/soğurucu yapısı tasarlamış ve bu yapının geliş açısı ve polarizasyona bağlı olarak kontrol edilebileceğini göstermişlerdir (Zhu *et al.* 2010).

2011 yılında Lee ve bir diğer araştırmacı, bant genişliğini artırmaya yönelik olarak çift rezonans prensibine dayalı bir mikrodalga soğurucu tasarlamışlardır. Geliştirilen yapının performansının, farklı polarizasyon koşullarında dahi istikrarlı kaldığı gözlemlenmiştir. Yapılan deneysel ölçümler, sayısal modelleme sonuçlarıyla yüksek oranda örtüşmüştür (Lee and Lim 2011). Aynı yıl Sun ve çalışma arkadaşları ise, 0 ila 70 GHz frekans aralığını kapsayan ve yaklaşık 60 GHz'lik bir bant genişliğine sahip bir metamalzeme soğurucu üretmişlerdir. Bu yapının tasarımında çok katmanlı ayırık halka rezonatör (SRR) konfigürasyonundan faydalanılmıştır (Sun *et al.* 2011).

2013 yılında Park ve araştırma ekibi, mikrodalga frekans bölgesinde çalışan çok bantlı metamalzeme soğurucular üzerine kapsamlı bir çalışma gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada, farklı boyutlara sahip çörek biçimli rezonatörler kullanılarak iki, üç ve dört rezonans tepe noktasında neredeyse tam soğurma başarılmıştır. Elde edilen tasarımların, hem polarizasyon durumundan hem de geliş açılarından bağımsız olarak kararlı performans sergilediği belirlenmiş ve bu yapıların pratik uygulamalarda kullanılabilirliği açısından oldukça umut verici olduğu ifade edilmiştir (Park *et al.* 2013).

2014 yılında Lee, çift rezonans prensibine dayalı olarak geniş bantta çalışan ve esnek özellik taşıyan bir metamalzeme soğurucu tasarlamıştır. Bu yapı, esnek poliimid esaslı bir katman üzerine yerleştirilmiş elektriksel-indüktif-kapasitif rezonatörlerden oluşmaktadır. Geliştirilen tasarım, 8,6 GHz ve 13,4 GHz frekanslarında yaklaşık %93 oranında maksimum soğurma performansı sergilemiştir. Ayrıca, radar kesit alanını azaltmak amacıyla elektromanyetik dalgaların geliş yönüne paralel biçimde yerleştirilen metal desenli bir yüzey

kullanılmış; bu sayede, hedef frekansların dışındaki bölgelerde dahi yüksek verim elde edilmiştir (Lee 2014).

2015 yılında He ve ekibi, 180 μm kalınlığa sahip dikdörtgen çubuk dizilimine dayanan hibrit yapılı, optik olarak kontrol edilebilen bir metamalzeme soğurucu geliştirmiştir. Bu hibrit yapı, yüksek dayanımlı silikon/polimer esaslı bir gofret yüzey üzerine, 25 μm kalınlığında esnek bir poliimid tabakası entegre edilerek üretilmiştir. Araştırmacılar, metamalzeme yapısını ve dikdörtgen birim hücrelerin uzunluğunu değiştirerek rezonans frekansının modüle edilebileceğini deneysel olarak göstermiştir. Bu sonuçlar, optik kontrollü hibrit bir metamalzeme yapısının, THz frekans bandında alternatif bir soğurucu olarak kullanılabileceğini ortaya koymuştur (He *et al.* 2015).

2017 yılında Xin ve araştırma ekibi, mikrodalga frekans aralığında çalışan esnek yapılı, çift bantlı bir metamalzeme soğurucu tasarlamış, üretmiş ve kapsamlı karakterizasyon çalışmalarını gerçekleştirmiştir. Geliştirilen bu yapı, T şeklinde düzenlenmiş periyodik bir dizilim ile oluşturulan sandviç mimariye sahiptir. Önerilen metamalzeme, 16,77 GHz ve 30,92 GHz frekanslarında iki belirgin soğurma tepe noktasına ulaşmakta; sırasıyla %98,7 ve %99,3 oranında yüksek soğurma verimliliği sunmaktadır. Araştırmacılar, elektromanyetik dalgaların polarizasyona olan etkisini incelemiş ve ölçülen sonuçların simülasyonlarla uyumlu olduğunu belirtmişlerdir. Bu esnek metamalzeme soğurucunun kolayca şekil değiştirerek farklı uygulamalara adapte edilebileceği ifade edilmiştir (Xin *et al.* 2017).

Aynı yıl içinde Omar ve araştırma arkadaşları, frekansa duyarlı üç boyutlu metamalzeme soğurucular üzerine bir çalışma yürütmüştür. Bu kapsamda, tekstil bazlı malzemeler kullanılarak tasarlanan 3D frekans seçici yapılar, çoklu rezonans modlarına sahip geniş bantlı soğurucu prototipler olarak geliştirilmiştir. Çalışmada iki farklı tasarım önerilmiştir: ilki, frekans seçici yansıtıcı özelliğe sahip soğurucu (AFSR); ikincisi ise frekans seçici geçirgen yapıya sahip soğurucu (AFST) olarak tanımlanmıştır. Özellikle AFSR tipi yapı, $0,12 \lambda$ kalınlıkla 14,4 GHz frekansında %55,7 oranında etkili bir soğurma bant genişliği sunmaktadır. AFST yapısı ise iletim penceresinin her iki tarafında geniş soğurma bantları sunmuş ve %54 ila %76 arasında bir soğurma performansı göstermiştir. Simülasyon ve deneysel ölçümler arasında yüksek bir uyum olduğu gözlemlenmiştir (Omar *et al.* 2017).

2017 yılında Lai ve çalışma arkadaşları, optik olarak şeffaf ve ultra geniş bantlı bir mikrodalga soğurucu tasarımı üzerine çalışmış ve 23,4 GHz'de maksimum performans sağlayan, 15,6 GHz ile 39,0 GHz arasında geniş bir bantta çalışan bir soğurucu geliştirmişlerdir. Bu tasarımda kullanılan malzeme, ölçüm yapılan frekans aralığında saydam özellik göstermiştir. Ayrıca, soğurucu yapının kalınlığı merkez dalga boyunun yaklaşık onda biri

olacak şekilde optimize edilmiştir. Yapılan analizler, bu yapının polarizasyon açısına karşı duyarlı olduğunu ve geliş açısının 30° 'nin altında kaldığı durumlarda soğurma performansında yalnızca sınırlı bir düşüş gözlemlendiğini göstermiştir. Elde edilen bulgular, söz konusu tasarımın hem görünür bölge hem de mikrodalga frekanslarında geniş bantlı düşük yansıma sağlama potansiyeline sahip olduğunu ve özellikle elektromanyetik görünmezlik gerektiren sistemler için yenilikçi bir çözüm olarak değerlendirilebileceğini ortaya koymuştur (Lai *et al.* 2017).

Metamalzeme tabanlı soğurucu sistemlerin kullanım alanlarını genişletmek amacıyla, esnek özelliklere sahip metamalzeme yapılar üzerine yapılan çalışmalar son yıllarda ivme kazanmıştır. Bu bağlamda, 2016 yılında Wakatsuchi ve ekibi, çok yönlü ve esnek yapıya sahip metamalzeme soğurucuların tasarımı ve geliştirilmesine yönelik kapsamlı bir araştırma yürütmüştür. Çalışmada, periyodik yapılar temel alınarak geliştirilen yeni nesil metamalzemeler ile yapısal kalınlık minimize edilirken yüksek soğurma verimliliği elde edilmesi amaçlanmıştır. Araştırmacılar, iki temel metamalzeme soğurucu kategorisi ortaya koymuştur: Bunlardan ilki, belirli frekans aralıklarında soğurma ve saçılma karakteristiklerinin hassas biçimde ayarlanabilmesine imkân tanırken; ikincisi, düşük güçlü sinyallerin iletimine izin verirken yalnızca yüksek güçlü mikrodalga sinyallerin soğurulmasını sağlayan bir yapıya sahiptir. Bu yapıların, özellikle elektromanyetik girişim ve parazitlerin önlenmesi açısından potansiyel çözüm sunduğu ifade edilmiştir (Wakatsuchi *et al.* 2016).

Esnek metamalzeme soğurucuların tasarımı için kullanılan dielektrik katmanlarda farklı malzemeler tercih edilmiştir. En yaygın olarak kullanılan malzemeler arasında polidimetilsiloksan (PDMS) (Ling *et al.* 2015), polimer (Kim *et al.* 2015; Yahiaoui *et al.* 2015), poliimid (Lee 2014; Kim *et al.* 2016; Kong *et al.* 2017; Nasr *et al.* 2017; Xin *et al.* 2017), silikon (He *et al.* 2015), polipropilen (Michalak *et al.* 2009), kompozit yapılar (Pa *et al.* 2012) ve tekstil tabanlı malzemeler (Cavalcante *et al.* 2014; Esen *et al.* 2014; Burgnies *et al.* 2015; Lee and Lim 2016; Can *et al.* 2017; Ghebrebrhan *et al.* 2017; Tak and Choi 2017; Burgnies *et al.* 2018) bulunmaktadır. Esnek metamalzeme üretiminde ise farklı yapışma teknikleri uygulanmıştır. Bu teknikler arasında serigrafi (Can *et al.* 2017), mürekkep püskürtmeli baskı (İbili *et al.* 2018), litografik süreçler (Yahiaoui *et al.* 2015) ve damgalama (Kim *et al.* 2015) yöntemleri yer almaktadır. Bu teknikler, metamalzeme yüzeyine periyodik şekillerin eklenmesiyle soğurucu özelliklere sahip yapılar oluşturmak için kullanılmaktadır.

Tekstil esaslı metamalzeme soğurucular, diğer esnek malzemelere kıyasla çeşitli avantajlar sunmaktadır. Bu avantajlar arasında giyilebilirlik, nefes alabilirlik, üretim kolaylığı, farklı uygulamalara uyarlanabilirlik, düşük ağırlık ve düşük maliyet gibi özellikler

bulunmaktadır. Bu nedenlerle, tekstil esaslı metamalzeme soğurucular üzerine yapılan çalışmalar hız kazanmıştır.

2014 yılında Cavalcante ve çalışma arkadaşları, tekstil tabanlı yüzeylerde bant durdurucu özellik gösteren frekans seçici yüzeylerin (FSS) geliştirilmesine yönelik bir araştırma gerçekleştirmiştir. Çalışmalarında, geleneksel dielektrik tabakalara kıyasla daha hafif ve esnek özellikler sunan tekstil malzemeler üzerine artı şekilli, kare halka ve üçgen yama biçimli rezonatör elemanları entegre edilerek FSS yapıları tasarlanmıştır. Geliştirilen yapıların elektromanyetik performansını doğrulamak amacıyla örnek prototipler üretilmiş ve ölçüm çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Elde edilen deneysel sonuçların, sayısal simülasyonlarla yüksek düzeyde tutarlılık gösterdiği rapor edilmiştir (Cavalcante *et al.* 2014).

2015 yılında Burgnies ve ekibi, negatif kırılma indisine sahip esnek metamalzemelerin geliştirilmesine yönelik olarak tekstil yapılarından esinlenen bir tasarım çalışması gerçekleştirmiştir. Araştırmada, elektromanyetik koruma uygulamalarında sıklıkla kullanılan ince dielektrik filmlerle kaplanmış metalik teller, dokuma kumaş yapısı içerisine entegre edilerek yeni bir metamalzeme prototipi oluşturulmuştur. Gerçekleştirilen sayısal simülasyonlar, düzenli biçimde yerleştirilmiş çift kıvrımlı metalik tellerin hem elektriksel hem de manyetik geçirgenlik değerlerinde negatiflik oluşturduğunu ve dolayısıyla yapının negatif kırılma indisi sergilediğini ortaya koymuştur. Ayrıca bu dokuma tabanlı metamalzemenin, 60°'ye kadar olan geliş açıları için yön bağımsız, kararlı bir elektromanyetik performans sunduğu tespit edilmiştir (Burgnies *et al.* 2015).

Aynı yıl Esen ve araştırma ekibi, tekstil tabanlı malzemelerin mikrodalga frekans bölgesindeki elektromanyetik soğurma kapasitesini inceleyen bir çalışma yürütmüştür. Bu çalışmada, insan sağlığına uyumlu olması ve yüksek sıcaklık koşullarında kararlılığını koruyabilmesi nedeniyle titanyum nanoparçacıkları tercih edilmiş; bu parçacıklar tekstil yüzeye püskürtme yöntemiyle uygulanarak kaplama işlemi gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda, rezonans frekansında %98'e varan soğurma düzeyine ulaşılmış ve soğurma performansının geliş açısına bağlı olmadığı ortaya konulmuştur. Ayrıca, önerilen tekstil esaslı soğurucu yapının, farklı frekans bantlarında çalışabilecek şekilde malzeme özelliklerinin ve yapısal parametrelerinin ayarlanabilmesine olanak tanıdığı belirtilmiştir. Bu yapının, radar sistemleri, uzun menzilli radyo iletişimi, elektromanyetik görünmezlik teknolojileri ve bilim kurgu temelli cihazların geliştirilmesi açısından önemli bir katkı sunabileceği öngörülmektedir (Esen *et al.* 2014).

2016 yılında Lee ve çalışma arkadaşı, tekstil tabanlı ve giyilebilir metamalzeme soğurucular üzerine bir çalışma gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada, bir birim hücre olarak moda

markası Chanel'in logosu kullanılmış ve tasarım serigrafi yöntemiyle tekstil yüzeyine basılmıştır. Tasarımın performansını ölçmek için dalga kılavuz ölçüm sistemi kullanılmıştır. Elde edilen veriler, geliştirilen soğurucu yapının 11 GHz frekansında yaklaşık %93'lük bir soğurma verimliliği sergilediğini göstermiştir (Lee and Lim 2016).

2017 yılında Can ve araştırma ekibi, tekstil yüzeylere entegre edilebilecek frekans seçici yüzeylerin tasarımı, üretimi ve ölçüm süreçlerine odaklanan bir çalışma gerçekleştirmiştir. Bu kapsamda, birim hücre yapısı olarak ayırık halka rezonatörleri (SRR) kullanılmış ve 4×6 elemandan oluşan bir dizilim oluşturulmuştur. Elde edilen yapı, yarıçapı 22,45 cm olan bir küresel yüzeye yerleştirilerek esnekliğe bağlı bükülme davranışı incelenmiştir. Bu çalışmada, düzlemsel ve eğimli yüzeylere uygulanmış yapıların elektromanyetik soğurma özellikleri karşılaştırılmış; her iki konfigürasyonun da başarılı bir soğurma performansı sergilediği belirlenmiştir (Can *et al.* 2017).

Aynı yıl, Ghebrebrhan ve arkadaşları, naylon tekstil kumaş üzerinde frekans seçici yüzeyler geliştirmiştir. Bu çalışmada, püskürtme yöntemiyle gümüş mürekkep kullanılarak kare rezonatör yapılar oluşturulmuştur. Üretilen yüzeyler, dar bantta milimetre dalga iletimini engellerken tekstilin esneklik ve nefes alabilirlik gibi özelliklerini korumuştur. Ayrıca, %8 ila %16 esneme durumlarında iletim tepe noktasında az bir kayma ve değerinde artış, yansıma tepe noktasında ise az bir kayma gözlemlenmiştir (Ghebrebrhan *et al.* 2017).

2017 yılında Tak ve bir diğer araştırmacı, mikrodalga frekans bölgesinde çalışabilen, giyilebilir özellikte bir metamalzeme soğurucu geliştirmiştir. Tasarım, farklı boyutlarda iki kare halka rezonatörden, iletken bir destek zemin katmanından ve 1 mm kalınlığında keçe esaslı bir ara tabakadan oluşmaktadır. İletken katman, iletken iplikler kullanılarak oluşturulmuş tekstil bazlı bir yapı ile üretilmiştir. Yapılan deneysel ölçümler, %90'ın üzerinde iki belirgin soğurma tepe noktası olduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca, bu yapının elektromanyetik dalgaların polarizasyon yönünden, 60°'ye kadar olan geliş açılara ve yapısal bükülmelere karşı duyarsız olduğu belirlenmiştir. Bu çok yönlü özellikleri sayesinde, iç mekânlarda kullanılan radar sistemleri için uygun bir çözüm sunabileceği öne sürülmüştür (Tak and Choi 2017).

2018 yılında Burgnies ve araştırma ekibi, dokuma tekstil malzemelerini kullanarak yüksek geçiren özellikte bir metamalzeme filtresi tasarlamıştır. Bu çalışmada, metalik ve dielektrik iplikler birlikte dokunarak özel bir metamalzeme yapısı elde edilmiştir. Elde edilen filtre, yaklaşık 500 GHz frekansında bir kesme noktası sunmakta olup, rezonans empedansları dikkate alınarak yansıma ve iletkenlik özellikleri eşdeğer devre modeli üzerinden analiz edilmiştir. Otomatik dokuma tezgâhında üretilen bu yapı, boş alan ölçüm yöntemiyle test

edilmiş ve elde edilen deneysel bulguların sayısal simülasyon sonuçlarıyla yüksek düzeyde tutarlılık gösterdiği belirlenmiştir (Burgnies *et al.* 2018).



KURAMSAL TEMELLER

Metamalzemeler

Cui ve arkadaşlarının (2010) tanımına göre, hücresel yapılarına bağlı olarak periyodik ya da düzensiz biçimde düzenlenmiş ve genellikle makroskobik ölçekte özel elektromanyetik özellikler sergileyen kompozit yapılar, metamalzeme olarak adlandırılmaktadır (Cui *et al.* 2010). Metamalzeme üretiminde kullanılan maddelerin fiziksel ve kimyasal özellikleri özellikleri yardımıyla kullanılacağı yere göre yapısal bileşenlerinin düzenlenmesi, olağandışı ve avantajlı elektromanyetik özellikler sağlayabilir. Tıpkı maddenin atomlardan oluşması gibi, metamalzemeler de farklı yapı taşlarına sahip olan elemanlardan oluşmaktadır. Bu bileşenler, bazen meta atomlar veya metamoleküller olarak adlandırılır ve istenilen özelliklerin elde edilebilmesi için bir, iki veya üç boyutlu düzenlerde periyodik olarak yerleştirilir.

Metamalzemelerin, etkili elektromanyetik özellikler sergileyebilmesi için genellikle gelen dalga boyuna kıyasla çok daha küçük boyutlardaki yapısal ölçeklerde tasarlanması gerekmektedir. Doğal malzemelerin elektromanyetik yanıtı, atomik veya moleküler düzeydeki rezonanslara dayanırken, metamalzemelerde bu tepki, yapının geometrik rezonanslarına bağlı olarak şekillenir. Eğer elektromanyetik dalganın dalga boyu, metamalzemenin birim hücre boyutundan çok daha büyükse, bu yapılar makroskopik ölçekte homojen bir ortam gibi davranır. Bu durumda, etkin elektriksel geçirgenlik ve etkin manyetik geçirgenlik gibi parametrelerle karakterize edilebilirler. Metamalzemeler, yalnızca elektriksel ya da manyetik değil, aynı zamanda kiral veya bianizotropik özellikler gösterecek şekilde de tasarlanabilir. Rezonans frekanslarına yakın bölgelerde malzeme parametrelerinde gözlenen geniş varyasyon, bu yapıların doğada bulunmayan elektromanyetik özellikler sunmasına olanak tanır. Tıpkı doğal malzemelerde olduğu gibi, metamalzemelerin özellikleri de içerdikleri bileşenlerin türüne ve mekansal dizilimine bağlıdır. Bu nedenle, istenen elektromanyetik yanıtın elde edilebilmesi için, yapıdaki bileşenlerin rezonans koşullarını sağlayacak biçimde özel olarak tasarlanması gerekmektedir.

Yapay malzeme kavramına yönelik bilinen ilk sistematik yaklaşım, 1898 yılında Jagadis Chunder Bose tarafından gerçekleştirilmiş ve mikrodalga bölgesinde bükülmüş yapılar üzerinde yürütülen deneylere dayanmaktadır (Bose and Strutt 1898). Bose, deneylerinin ardından yaptığı açıklamada, "şeker çözeltileri gibi sıvı ortamların optik dönüşüm etkisini taklit edebilmek için biri sağa (pozitif), diğeri sola (negatif) doğru bükülmüş iki farklı eleman tasarladım" ifadelerine yer vermiştir. Deneylerinde, bir kıvılcım jeneratörü ile bir dedektör arasına yerleştirilen bükülmüş yapılarla, dedektörün önüne yerleştirilen analizörü döndürerek

iletken elektromanyetik dalgaların polarizasyon düzlemindeki yönelim değişimini gözlemlemiştir. Bose'un bu deneysel düzenlemesi, spektrumun optik bölgesinde gözlemlenen polarizasyon rotasyonunun, yansıma simetrisi bulunmayan ortamlarda ve şeker çözeltilerinde görülen etkiye benzer bir sonucu, milimetre dalga boylarında yeniden üretmeyi başarmıştır. Bu yapıların, günümüz terimleriyle ifade edildiğinde, yapay kiral yapılara karşılık geldiği söylenebilir. Bu yaklaşımı takiben, 1914 yılında Lindman, farklı yönlerde rastgele hizalanmış küçük tel sarmallarını bir taşıyıcı ortam içerisine yerleştirerek, yapay kiral ortamlar üzerinde deneysel çalışmalar gerçekleştirmiştir (Lindman 1914).

1948 yılında Kock, periyodik yapılar aracılığıyla yapay ortamların etkin kırılma indislerini kontrollü biçimde ayarlayarak, iletken küreler, diskler ve şeritler kullanmak suretiyle hafif mikrodalga lensler geliştirmiştir (Kock 1948). Bu öncü çalışmanın ardından, yapay ve karmaşık yapıları malzemeler, dünya genelinde birçok araştırmacının ilgisini çeken bir çalışma alanı hâline gelmiştir. Son yıllarda sentezleme süreçlerindeki ilerlemeler ve yenilikçi üretim teknolojilerinin gelişimi sayesinde, yalnızca doğal malzeme tepkilerini taklit eden değil, aynı zamanda doğada rastlanmayan özgün elektromanyetik yanıtlar sergileyebilen fiziksel olarak gerçekleştirilebilir yapıların ve kompozit malzemelerin üretimi mümkün hâle gelmiştir. Negatif kırılma ve çift negatif malzeme kavramları ise ilk kez sırasıyla 1945 yılında Mandelstam ve 1967 yılında Victor Veselago tarafından teorik olarak ortaya atılmıştır. Mandelstam, yayımladığı çalışmasında kırılma ve yansıma olaylarının temelinde grup hızının işareti bulunduğuna dikkat çekmiş; pozitif grup hızına ilişkin bilinen yasaların, negatif grup hızına sahip ortamlar için de geçerli olması gerektiğini ifade etmiştir (Mandelstam 1945).

Victor Veselago, 1968 yılında yayınlamış olduğu makalesinde, elektromanyetik dalgaların bir madde içindeki hareketinin, o maddenin elektriksel geçirgenliği (ϵ) ve manyetik geçirgenliği (μ) tarafından belirlendiğini belirtmiştir (Viktor 1968). Bu parametreler, dağılım denklemindeki yapısal özelliklerdir ve negatif değerlere sahip olduklarında, madde içinde ışığın davranışı olağandışı özellikler gösterir. Veselago'nun çalışması, negatif kırılma indisi kavramının temelini oluşturmuştur.

$$\left| \frac{\omega^2}{c^2} \epsilon_{ij} \mu_{ij} - k^2 \delta_{ij} + k_i k_j \right| = 0 \quad (1)$$

Denklem (1)'de verilen eşitlik, monokromatik bir dalga için frekansı (ω) ile dalga vektörü (k) arasındaki ilişkiyi gösterir. Eğer denklem izotropik bir ortam için yeniden düzenlenirse denklem (1)'de verilen eşitlik denklem (2)'de verilen eşitlikle ifade edilebilir.

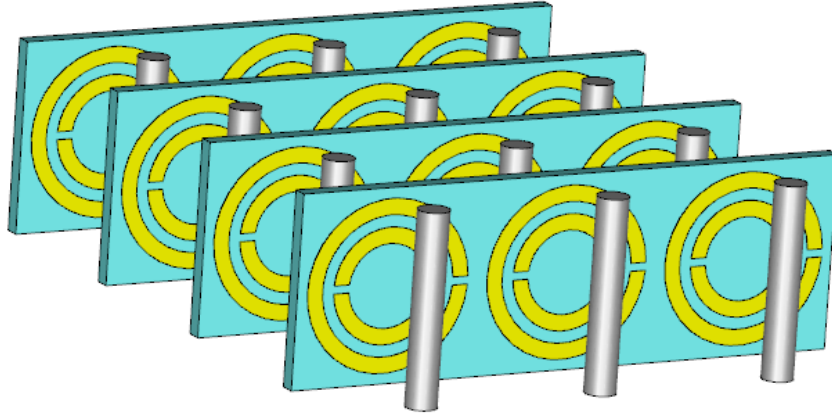
$$k^2 = \frac{\omega^2}{c^2} n^2 \quad (2)$$

$$n^2 = \epsilon\mu \quad (3)$$

Bu denklem, ortamın ϵ ve μ ile elektromanyetik dalganın yayılma hızını (c) ve kırılma indisinin karesini (n^2) içermektedir. Veselago'nun çalışması, bu parametrelerin negatif değerlere sahip olduğu durumlarda ortaya çıkan olağandışı optik ve elektromanyetik özellikleri incelemiştir.

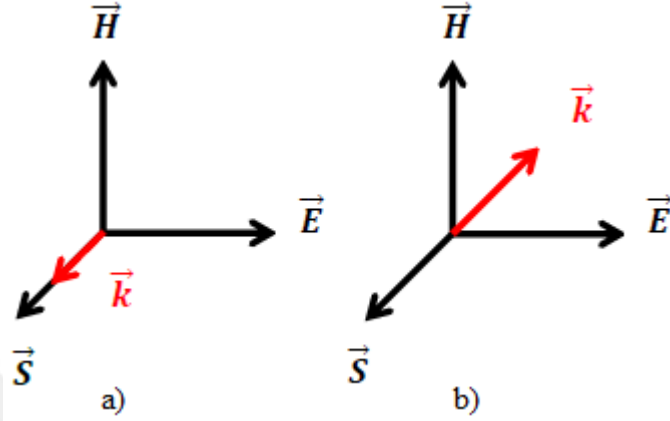
Victor Veselago, çalışmasında hem elektriksel geçirgenlik (ϵ) hem de manyetik geçirgenlik (μ) değerlerinin eşzamanlı olarak negatif olduğu durumlarda, denklemlerinin - özellikle denklem (3)'ün- geçerliliğini koruması gerektiğini ifade etmiştir. Bu durumu farklı fiziksel açılardan ele alarak, bir malzemenin elektromanyetik özelliklerinin yalnızca ϵ ve μ 'nün işaret değişiminden etkilenmeyeceğini vurgulamıştır. Ayrıca, bu değerlerin negatif olmasının bazı temel doğa kanunlarıyla çelişebileceğini, ancak yine de farklı özelliklere sahip maddelerin olabileceğini öne sürmüştür. Veselago, bu tür maddelerin doğada gözlemlenmediğini, ancak matematiksel ve teorik olarak incelenmesi gerektiğini savunmuştur. Bu malzemelerin nerede ve nasıl aranacağına dair argümanlar sunmuş ve fiziksel olarak gerçekleştirilmeleriyle ilgili soruları ele almıştır.

Veselago, teorisinde ters Doppler etkisi, ters Cerenkov ışıınımı ve terslenmiş Snell yasasını ortaya koymuştur. Bu yenilikçi fikirler, doğada böyle bir ortamın olmaması ve mevcut teknolojinin yetersizliği nedeniyle uzun süre ilgi görmemiştir. Ancak, 1990'lı yıllarda akademik ve teknolojik gelişmelerle bu konu yeniden ilgi çekmiştir. Pendry ve arkadaşları, 1996 ve 1999 yıllarındaki çalışmalarında negatif dielektrik sabitinin ($\epsilon < 0$) ve negatif manyetik geçirgenlik katsayısının ($\mu < 0$) yapay yapılarla elde edilebileceğini göstermiştir. Smith ve arkadaşları ise 2000 yılında bu çalışmalardan yola çıkarak Şekil 1'de gösterilen eş zamanlı negatif ϵ ve μ parametrelerine sahip ilk metamatlamayı üretmeyi başarmışlardır (Smith *et al.* 2000).



Şekil 1. İlk üretilen metamatlamayı yapısı

Şekil 2’den de görüleceği üzere, Victor Veselago, $\epsilon > 0$ ve $\mu > 0$ olduğunda elektrik alan ($\vec{E}$), manyetik alan ($\vec{H}$) ve dalga vektörünün ($\vec{k}$) sağ eli bir üçlü oluşturacağını, $\epsilon < 0$ ve $\mu < 0$ olduğunda ise sol eli bir üçlü oluşturacağını öngörmüştür. Bu, elektromanyetik dalgaların yayılım yönünün ve alan vektörlerinin tersine döndüğü anlamına gelir ve bu durum negatif kırılma indisine sahip malzemelerin belirleyici bir özelliğidir.



Şekil 2. a) Sağ eli ve b) sol eli malzemelerde dalga vektörü ile alan vektörleri arasındaki ilişkiyi gösteren vektör diyagramları

Ayrıca, dalga tarafından taşınan enerji akışı Poynting vektörü denklemiyle ifade edilir ve şu şekilde gösterilir:

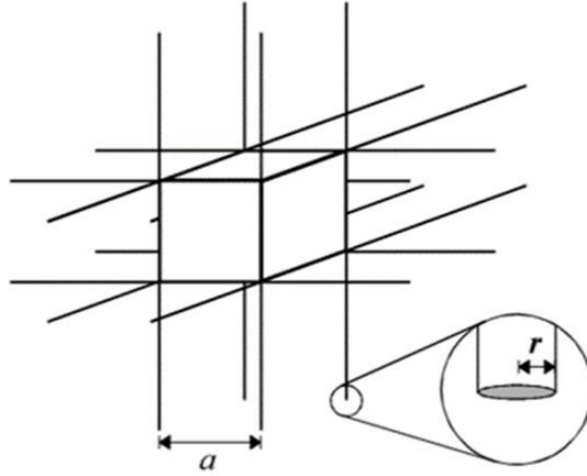
$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H} \quad (4)$$

Bu denklem, elektromanyetik dalgalarda enerji akışını tanımlar ve Poynting vektörü olarak adlandırılır. Bu vektör, $\vec{E}$ ile $\vec{H}$ vektörlerinin vektörel çarpımıyla elde edilir ve enerji akışının yönü ile büyüklüğünü temsil eder. Sağ eli (right-handed) ortamlarda, dalga vektörü $\vec{k}$ ile $\vec{S}$ daima aynı yönde yer alırken; sol eli (left-handed) malzemelerde bu iki vektör birbirine zıt yönelir. Bunun nedeni, $\vec{k}$ vektörünün faz hızı doğrultusunu temsil etmesidir. Bu zıt yönlü ilişki, sol eli malzemelerde negatif grup hızının söz konusu olduğunu göstermektedir. Veselago, bu malzemelerin negatif grup hızına sahip olduğunu ve bu özelliklerin, negatif ϵ ve μ ile bağlantılı olduğunu belirlemiştir.

Pendry ve arkadaşları, Veselago'nun öngörülerinden yıllar sonra, periyodik olarak yerleştirilmiş ince metalik tel yapıların bulunduğu kompozit ortamların negatif ϵ değeri gösterebileceğini deneysel olarak kanıtlamışlardır. Bu çalışma, metamalzeme araştırmalarında önemli bir adım olarak kabul edilir ve negatif ϵ değerlerinin pratikte elde edilebileceğini göstermiştir. Bu tür yapıların keşfi, metamalzemelerin pratik uygulamaları ve yeni teknolojilerin geliştirilmesi açısından büyük bir ilerleme sağlamıştır (Pendry 1996).

Pendry, 1996 yılında yayınladığı makalesinde, plazmonların plazma frekansını uzak kızılötesi ve hatta GHz bandına bastırmak için ince tellerden oluşan periyodik yapılar

önermiştir. Bu mekanizmanın, ortalama elektron konsantrasyonunu seyreltip, kendi kendine indüktans yoluyla etkin elektron kütlesini önemli ölçüde artıracakını belirtmiştir. Bu yeni yapının, GHz bandında daha önce görülmemiş özellikler ve süper iletkenlik üzerinde olası etkiler taşıdığını göstermiştir (Pendry 1996). Üretilen yapı, yarıçapı yaklaşık 1 μm olan ince metal tellerden oluşmaktaydı. Şekil 3'te görüldüğü üzere, teller, periyodik bir kafes şeklinde düzenlenmiş ve basit bir kübik kafes yapısına sahiptir. Bu düzenleme, etkin elektron kütlesini artırarak yeni özellikler kazandırmıştır.



Şekil 3. Pendry tarafından oluşturulan periyodik kübik kafes yapısı

Sievenpiper, Sickmiller ve Yablonovitch, metalik tel yapıların elektromanyetik özelliklerini araştıran öncü çalışmalar gerçekleştirmiştir. Ancak Pendry, bu yapılarda plazmonik davranışların oluşabilmesi için özellikle ince metal tellerin kritik bir rol oynadığını vurgulamıştır. Bu bağlamda, Veselago'nun 1967 yılında teorik olarak öne sürdüğü negatif ϵ kavramının, ince metalik tel dizileri kullanılarak fiziksel olarak uygulanabilir olduğu, Pendry ve çalışma arkadaşları tarafından 1996–1998 yılları arasında yayımlanan makalelerle deneysel ve teorik olarak ortaya konmuştur (Pendry 1996; Pendry *et al.* 1998). Bu gelişmelerin ardından Sievenpiper ve ekibi de metalik yapıların plazma benzeri davranışlarını detaylı olarak incelemiş ve bu yapıların elektromanyetik dalgalar üzerindeki etkilerini değerlendirmiştir (Sievenpiper *et al.* 1996; Sievenpiper *et al.* 1998).

Pendry ve arkadaşları çalışmalarına devam ederek, makro yapılar üzerinde yoğunlaşmış ve 1999-2000 yıllarında negatif özellikler elde edebilecekleri yapılar önermişlerdir (Pendry *et al.* 1999; Pendry 2000). Metamalzeme araştırmalarında öne çıkan önemli gelişmelerden biri, doğada manyetik özellik göstermeyen malzeme bileşimlerinde yapay olarak güçlü bir manyetik tepkinin oluşturulabilmesidir. Bu alandaki ilgi, yüksek frekanslarda doğal ferromanyetik malzemelerin sınırlı bulunurluğunun önemli bir engel oluşturmasından kaynaklanmaktadır.

Her malzeme temelinde atom ve moleküllerden oluşmakla birlikte, yapısal bütünlüğü açısından bir tür kompozit sistem olarak değerlendirilebilir. Elektriksel ve manyetik geçirgenlik kavramlarının tanımlanmasındaki temel amaç, ilgili ortamın elektromanyetik davranışlarını makroskopik ölçekte homojen bir şekilde temsil edebilmektir. Pendry ve çalışma arkadaşları, negatif ϵ özelliği sergileyen malzemelerin atomik düzeydeki yapılarının, daha büyük ölçekli yapay birim hücrelerle değiştirilerek benzer elektromanyetik tepkilerin elde edilebileceğini öne sürmüşlerdir. Bu yaklaşımda, birim hücre içerisinde yer alan yapısal elemanlar, sistemin makroskopik ölçekteki elektromanyetik yanıtını belirlemekte olup; bu hücrelerin boyutlarının, üzerine etki eden elektromanyetik dalga boyuna kıyasla oldukça küçük olması temel bir gerekliliktir.

Eğer bu koşula uyulmazsa, ortamın içyapısı gelen dalgayı kırınımına uğratarak yansıtarak yok etme olasılığını artırır. Bir malzemeyi belirli bir manyetik katsayıya sahip olacak şekilde yapılandırmak zordur, çünkü atomlar ve moleküller manyetik bir malzeme oluşturmak için sınırlayıcıdır. Bu, özellikle GHz frekanslarında doğrudur, çünkü çoğu malzemenin manyetik tepkisi bu aralıkta azalır. Ferritler bu özelliği gösterebilir, ancak ağır oldukları için mekanik özellikler bakımından uygun değildirler. Pendry ve çalışma arkadaşları, mikroyapılı düzenlemeler aracılığıyla güçlü manyetik tepkiler oluşturabilen ve aynı zamanda hafif yapılı metamalzemelerin tasarlanmasının mümkün olduğunu ortaya koymuşlardır.

Malzeme içerisinde güçlü manyetik tepki oluşumu, genellikle son derece heterojen yerel alan dağılımları ile ilişkilidir; bazı durumlarda bu lokal alanlar, boşluk ortamındaki alan şiddetinden çok daha yüksek seviyelere ulaşabilmektedir. Kompozit yapının bu yüksek alan yoğunlaşma bölgelerine doğrusal olmayan (nonlinear) malzemelerin entegre edilmesi, alan yükseltme katsayısı sayesinde enerji gereksinimini azaltmakta ve sistemin genel doğrusal olmayan yanıtını artırmaktadır. Bu tür bir yaklaşım, geleneksel manyetik malzemelerde elde edilmesi mümkün olmayan avantajlar sunmaktadır.

İlk yüksek manyetik özelliklere sahip tasarım şekil 4'te gösterilen SRR (Split Ring Resonator) olarak adlandırılan ayrıık halka rezonatörlerdir. Her katmanda, akımın halkadan geçmesini engelleyen bir boşluk bulunur. Bu tasarımın önemli bir özelliği, akımın herhangi bir halkadan geçmesini engelleyen bu boşluklardır. Ayrıca, iki halka elemanı arasında oluşan elektrostatik etkileşim sonucunda, akımın geçişine imkân tanıyan belirgin bir kapasitif bağ meydana gelir. Bu kapasitans, malzemenin manyetik özelliklerini artırır ve istenen rezonans frekanslarını elde etmeye yardımcı olur.

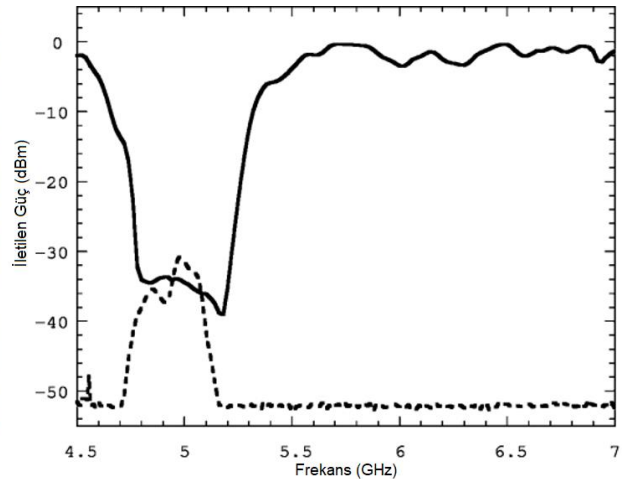


Şekil 4. İlk yüksek manyetik özelliklere sahip SSR

Pendry ve ekibi, manyetik özellik taşımayan iletken malzemeler kullanarak, elektromanyetik radyasyonun manyetik bileşenine güçlü yanıt verebilen yapay bir yapı önermiştir. Bu sistemde, rezonans koşullarının sağlanmasıyla birlikte hem büyük pozitif hem de negatif manyetik duyarlılıklar elde edilmiştir. Bu gelişmeyi takiben, Smith ve araştırma grubu, elektromanyetik alanın halkaların eksenine paralel olarak polarize edildiği modlara odaklanarak, bu halka yapıların manyetik alanla etkileşiminden kaynaklanan belirgin bir manyetik tepki oluşturmayı başarmıştır. Negatif etkin manyetik geçirgenliği ($\mu_{\text{eff}}(\omega)$) kavramı, sıradan malzemelerde gözlenmeyen özellikler sunduğundan, Smith ve ekibi bu kavramı negatif etkin elektriksel geçirgenliği ($\epsilon_{\text{eff}}(\omega)$) ile birleştirerek GHz frekans bandında negatif kırılma indisine sahip Şekil 5'te gösterilen bir malzeme geliştirdiler (Smith and Kroll 2000).



a)



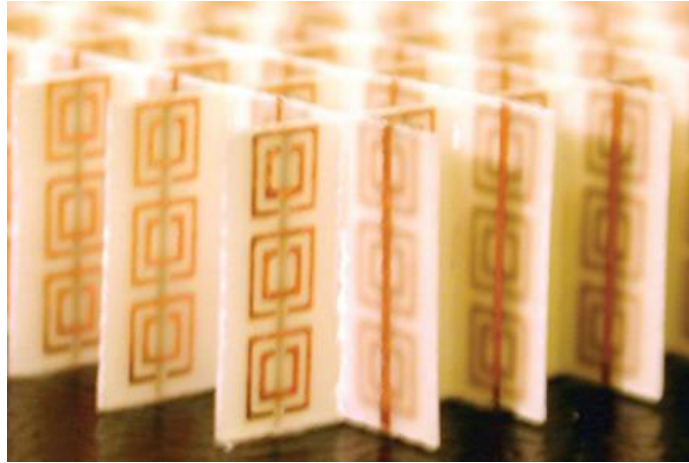
b)

Şekil 5. a) SRR kompozitleri ile iletken tellerin birlikte oluşturduğu metamateryal yapısı, b) ilgili yapının frekansa bağlı iletim spektrumu

Smith ve araştırma ekibi, 2000 yılında Şekil 5a'da sunulan yapıda olduğu gibi, iç içe geçmiş iletken SRR'ler ile sürekli iletken tellerden oluşan periyodik bir dizilim kullanarak,

eşzamanlı olarak negatif manyetik geçirgenlik ve negatif elektriksel geçirgenlik özelliklerine sahip ilk kompozit metamalzeme ortamını başarıyla sentezlemiştir. Bu yapının hedeflenen sol elli elektromanyetik davranışı sergileyebilmesi için, belirli bir polarizasyon düzenine sahip dalgalarla uyarılması gerekmektedir: elektrik alan bileşeni iletken tel dizilimi yönünde hizalanmalı, manyetik alan ise SRR düzlemine dik olacak şekilde yönlendirilmelidir. Smith ve ekibi, sadece paralel tellere sahip yapıların, sıfır frekanstan kesme frekansına kadar bir iletim bandı oluşturduğunu gözlemlemiştir. Şekil 5b'deki düz çizgi, yalnızca SRR'lerin kullanıldığı yapının iletim spektrumundaki bir bant aralığını gösterirken, kesikli çizgi SRR'ler ve tellerin birleştirilmesiyle oluşan geçiş bandını gösterir. Bu geçiş bandının SRR'lerin önceden yasaklanmış bandı içinde olması, iletken tellerin negatif $\epsilon_{\text{eff}}(w)$ ve SRR dizisinin negatif $\mu_{\text{eff}}(w)$ ile birleştiğini gösterir. Bu şekilde, sol elli özellikler sergileyen bir ortam elde edilmiş ve elektromanyetik dalgaların belirli bir frekans bandında iletilmesine olanak sağlanmıştır.

Smith ve ekibinin çalışmasından sonra, Shelby ve diğerleri negatif $\mu_{\text{eff}}(w)$ ve negatif $\epsilon_{\text{eff}}(w)$ değerline sahip olan ortamların negatif kırılma indisine sahip olacağını deneysel olarak doğrulamışlardır. Shelby ve ekibi, mikrodalga frekanslarında, etkin kırılma indisinin (n_{eff}) negatif olduğu bir metamalzeme üzerinde çalışmışlardır. Şekil 6'da sunulan metamalzeme yapısı, standart bir devre kartı tabanı üzerine yerleştirilmiş bakır şeritler ve SRR'lerden oluşan, iki boyutlu periyodik birim hücre diziliminden meydana gelmektedir. Bu çalışmalar, Maxwell denklemlerinin ϵ ve μ 'nün aynı anda negatif olduğu frekanslar için de geçerli olduğunu doğrulamıştır.



Şekil 6. Shelby tarafından geliştirilen negatif kırılma indisine sahip tasarım

Shelby ve ekibinin çalışmalarının ardından, birçok araştırmacı farklı SRR şekilleri kullanarak etkin manyetik geçirgenlik oluşturmaya çalışmıştır. Bu çalışmalar sonucunda, Shelby'nin tasarımında olduğu gibi ya da SRR yapıların devre kartının her iki yüzeyine yerleştirildiği konfigürasyonlarda, SRR ve iletken tellerin uygun biçimde düzenlenmesiyle yeni nesil çift negatif (DNG) metamalzeme yapıları geliştirilmiştir (Koschny *et al.* 2004; Sabah *et*

al. 2014). Mikrodalga rejiminde yaygın olan bu geometriler, kızılötesi ve optik rejimlerde gerekli mikron ve altı ölçeklerde bazı dezavantajlar taşır. Bu nedenle, THz ve optik frekans aralıklarında hem negatif ϵ hem de negatif μ elde edilebilmesini sağlamak amacıyla yeni metamalzeme tasarımları geliştirilmiştir. (Shalaev *et al.* 2005; Zhang *et al.* 2005).

Elektromanyetik Alan Etkileşimleri

Elektromanyetik alan, zamanla değişen elektrik yükleri tarafından üretilen elektrik ve manyetik alanların etkileşimini ifade eder. Statik elektrik alan üreten statik yüklerin aksine, zamanla değişen elektrik yükleri zamanla değişen elektrik alanlar oluşturur ve bu da manyetik alanların oluşmasına neden olur. Bu durum, Maxwell Denklemleri ile ifade edilir:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad \text{Gauss Elektrik Yasası} \quad (5)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad \text{Gauss Manyetizma Yasası} \quad (6)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad \text{Faraday İndüksiyon Yasası} \quad (7)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad \text{Ampère-Maxwell Yasası} \quad (8)$$

Bu denklemler, elektrik ve manyetik alanların nasıl oluştuğunu ve birbirleriyle nasıl etkileştiğini açıklar. Burada ρ yük yoğunluğu, ϵ elektriksel geçirgenlik ve $\vec{J}$ ortamda zamanla değişen akım yoğunluğudur. $\vec{D}$ ve $\vec{B}$ zamana bağlı elektrik ve manyetik akı yoğunluklarıdır.

Bu dört denklem, elektromanyetik teoremin temelini oluşturan Maxwell denklemleri olarak bilinir. Denklem 5, kapalı bir yüzeyden çıkan net elektrik akısının, o yüzeyin içinde bulunan toplam yüklerle doğru orantılı olduğunu ifade eder. Bu durum, elektrik yüklerinin (elektriksel monopoller) varlığını teorik olarak ortaya koyar. Denklem 6 ise kapalı bir yüzeyden geçen toplam manyetik akının sıfır olduğunu belirtir; bu, doğada bağımsız manyetik kutupların (manyetik monopoller) bulunmadığını ifade eder. Bunun temel nedeni, manyetik alan çizgilerinin daima kapalı döngüler oluşturması ve belirli bir başlangıç ya da bitiş noktasına sahip olmamasıdır. Bu nedenle tek kutuplu bir mıknatıs mümkün değildir. Denklem 7, zamanla değişen bir manyetik alanın, iletken bir ortamda elektromotor kuvvet (EMK) oluşturarak potansiyel fark meydana getireceğini açıklar. Denklem 8 ise elektrik akımı taşıyan bir iletkenin çevresinde manyetik alan oluşturduğunu ortaya koyar.

James Clerk Maxwell, 1864 yılında bu denklemler aracılığıyla, birbirini destekleyen elektrik ve manyetik alanların uzayda ışık hızında yayılan elektromanyetik dalgaları oluşturduğunu teorik olarak ispatlamıştır. Dalga denkleminde ortaya çıkan faz hızı, boşluktaki ışık hızına eşdeğer olup, deneysel ölçümlerle uyum göstermektedir. Elektrik ve manyetik

alanların birlikte oluşturduğu bu dalga yapısı, ışığın elektromanyetik dalga doğasına sahip olduğunu açık biçimde ortaya koymuştur.

Bir ortamda elektromanyetik dalgaların doğası ve yayılım özellikleri, elektriksel iletkenlik (σ) ile birlikte ε ve μ gibi temel yapısal parametreler tarafından belirlenmektedir. Bu üç büyüklük, ortamın elektromanyetik tepkisini karakterize eden başlıca fiziksel özelliklerdir. Söz konusu parametreler, ortamın sınır koşulları ile birlikte değerlendirildiğinde, gelen bir elektromanyetik dalgaya karşı sistemin nasıl bir yanıt vereceğini tayin eder. Bu ilişki, doğrusal ve izotropik bir ortam varsayımı altında, elektrik ve manyetik alan büyüklükleri arasındaki bağlantıyı tanımlayan aşağıdaki iki temel denklem ile ifade edilebilir:

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \quad (9)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (10)$$

Denklem 9 ve 10'da verilen ifadeler doğrultusunda, kayıplı ve dağıtıcı özellik gösteren ortamlarda ε ve μ parametreleri genellikle karmaşık sayı formunda olup frekansa bağlılık gösterir. Buna karşılık, kayıpsız ve izotropik ortam koşulları altında bu büyüklükler reel (gerçek) değerler olarak ele alınabilir. Aşağıda verilen denklemler, bir ortam içerisindeki dalga sayısı (k), kırılma indisi (n) ve iç dalga empedansı (η) gibi temel elektromanyetik parametrelerin matematiksel ifadelerini tanımlamaktadır.

Monokromatik düzlem dalgalar için tüm alanlar $e^{i(kz - \omega t)}$ ile orantılı olarak aşağıdaki şekilde indirgenebilir:

$$\vec{k} \times \vec{E} = \frac{\omega}{c} \mu \vec{H} \quad (11)$$

$$\vec{k} \times \vec{H} = -\frac{\omega}{c} \varepsilon \vec{E} \quad (12)$$

$$k = \omega \sqrt{\mu \varepsilon} \quad (13)$$

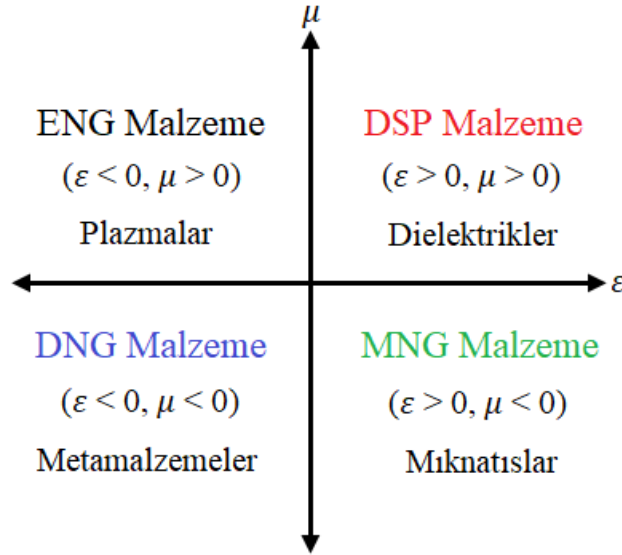
$$\eta = \omega \sqrt{\mu / \varepsilon} \quad (14)$$

$$n = \sqrt{\mu_{\text{eff}} \varepsilon_{\text{eff}}} \quad (15)$$

Burada ω açısal frekans (rad/sn) ve f frekans (Hz) olarak tanımlanmıştır. $\mu_{\text{eff}} = \mu / \mu_0$ ve $\varepsilon_{\text{eff}} = \varepsilon / \varepsilon_0$, etkin manyetik ve elektriksel geçirgenlikleri temsil ederken, μ_0 ($4\pi \times 10^{-7}$ H/m) ve ε_0 ($8,854 \times 10^{-12}$ F/m) sırasıyla boşluğun manyetik ve elektriksel geçirgenlikleridir

Metamalzemelerin Sınıflandırılması

Şekil 7'de gösterildiği üzere malzemeler ε ve μ katsayısına göre çeşitli kategorilere ayrılabilir. Bu kategoriler, malzemenin elektromanyetik dalgalara nasıl tepki verdiğini belirlemek için önemlidir ve malzeme özelliklerinin daha iyi anlaşılmasını sağlar.



Şekil 7. Malzemelerin sınıflandırılması

Pozitif ϵ ve μ değerine sahip olan ortamlar Çift Pozitif Ortam (DPS) olarak adlandırılır ve çoğu doğal dielektrik bu kategoriye girer. Negatif ϵ ve pozitif μ değerine sahip olan ortamlar Epsilon Negatif Ortam (ENG) olarak adlandırılır, belirli frekanslarda plazmalar ve metaller bu özellikleri gösterebilir. Pozitif ϵ ve negatif μ değerine sahip olan ortamlar Mü Negatif Ortam (MNG) olarak adlandırılır, bazı manyetik malzemeler bu özelliğe sahiptir. Son olarak, negatif ϵ ve μ değerine sahip olan ortamlar Çift Negatif Ortam (DNG) olarak adlandırılır ve bu malzemeler yalnızca yapay yapılarla elde edilebilen metamalzelerdir (Engheta 2006). Sonuç olarak, metamalzeler ϵ ve μ değerlerinin işaretine göre ENG, DNG ve MNG olmak üzere üç sınıfta incelenebilir.

ENG malzemeler

Altın, gümüş ve bakır gibi bazı metaller, doğada kızılötesi ve görünür spektral bölgelerde ENG özelliği sergiler; bu durumda μ pozitif kalırken, ϵ negatif bir değere sahiptir. Bu özellik, metal içindeki serbest elektronların kolektif titreşimleri olarak tanımlanan plazmonların salınımı sonucunda ortaya çıkar (Pendry 1996). Plazmonlar, bir malzeme içerisindeki elektron yoğunluğunun organize şekilde salınmasıyla karakterize edilen elektromanyetik modlardır. Bu tür metaller için karakteristik plazma frekansı (ω_p), aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır:

$$\omega_p^2 = \frac{Ne^2}{\epsilon_0 m_{eff}} \quad (16)$$

Bu ifadede, N serbest elektron yoğunluğunu, m_{eff} boşluktaki elektronun etkin kütlesini, e elektron yükünü ve ϵ_0 boşluğun elektriksel geçirgenliğini temsil etmektedir. Örneğin, altın için ω_p yaklaşık 9,010 eV, sönüm oranı (γ) ise yaklaşık 0,072 eV olarak

verilmiştir (Raether 1980). Bu değerler dikkate alındığında, γ 'nın ω_p 'ye göre oldukça küçük olduğu görülür; bu durum, söz konusu metallerde zayıf sönümlenmeye işaret eder. Genellikle, ω_p spektrumun UV bölgesine karşılık gelir. Plazmonlar, yalnızca elektromanyetik dalgalarla olan etkileşimlerde değil, aynı zamanda metalin dielektrik yanıt fonksiyonu üzerinde de belirleyici rol oynar. Bu bağlamda, optik frekanslarda metalin elektriksel geçirgenliği ($\epsilon(\omega)$), frekans bağımlı olarak aşağıdaki şekilde tanımlanabilir:

$$\epsilon(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + i\gamma)} \quad (17)$$

Elektriksel geçirgenlik yanıtı, ince metal teller kullanılarak oluşturulan homojen yapıları bir metamalzemenin etkin elektriksel geçirgenliğini temsil edebilir. Bu tür periyodik olarak düzenlenmiş metal çubuklardan oluşan kafes yapıları, elektromanyetik açıdan negatif iletkenlik sergileyen yapay ortamlar gibi davranabilir. Ancak bu etkinliğin sağlanabilmesi için, kullanılan iletken tellerin çapı, çalışılan dalga boyuna kıyasla oldukça küçük olmalıdır. Bu koşul sağlandığında yapı, makroskopik ölçekte homojen bir ortam gibi değerlendirilir.

İletken tel tabanlı yapılarda, söz konusu sistemin plazma frekansı, saf metal yapılarla karşılaştırıldığında iki temel nedenle belirgin biçimde düşer. Birincisi, etkin elektron yoğunluğu (N_{eff}), serbest elektronların yapının hacmindeki dağılımına bağlıdır ve bu yoğunluk, tellerin fiziksel olarak kapladığı alana oranla tanımlanır. Bu durum, elektronların yalnızca telin sınırları içerisinde hareket edebilmesi nedeniyle oluşan hacim sınırlaması ile ilişkilidir.

$$N_{eff} = N \frac{\pi r^2}{a^2} \quad (18)$$

Plazma frekansındaki azalmanın ikinci temel nedeni, Pendry tarafından açıklanan ve telde indüklenen akım ile buna bağlı olarak oluşan uyarılmış manyetik alanın etkisiyle ortaya çıkan "etkin elektron kütleindeki" artıştır. Metal tellerin kendi kendine endüktansı, Lenz yasasının bir sonucu olarak, akımın zamanla değişimine karşı direnç gösterir. Bu durum, elektronların hareketine karşı bir ataletsel etki oluşturarak, onların daha büyük bir kütleye sahipmiş gibi davranmalarına neden olur. Dolayısıyla bu "artan etkin kütle", sistemin plazma frekansını aşağı çekici bir rol oynar. Söz konusu etkin kütle, aşağıda verilen denklem aracılığıyla hesaplanabilir.

$$m_{eff} = \frac{\mu_0 \pi r^2 e^2 N}{2\pi} \ln\left(\frac{a}{r}\right) \quad (19)$$

İletken tellerden oluşan yapı için N_{eff} ve m_{eff} değerleri tanımlandığında, ortama ait ω_p hesaplanabilir:

$$\omega_p^2 = \frac{N_{\text{eff}} e^2}{\epsilon_0 m_{\text{eff}}} = \frac{2\pi c_0^2}{e^2 \ln(a/r)} \quad (20)$$

Yapılan çalışmalarda, düzenli bir yapı haline getirilen birçok metalik ince tel içeren bir mikroyapıların UV spektrumunda katı metallerin sergilemiş olduğu elektromanyetik özelliklere benzer GHz bölgesinde yeni özellikler sergilediği gösterilmiştir. Metallerin negatif elektriksel geçirgenlik tepkisini mikrodalga bölgesinde taklit eden kompozit malzemeler üretmek amacıyla çeşitli çalışmalar yapılmıştır (Pendry 1996; Pendry *et al.* 1998; Smith *et al.* 2000). Pendry ve çalışma arkadaşları, kübik kafes yapısında düzenlenmiş ince tel veya çubuklardan oluşan bir dizilimin, mikrodalga frekans aralığında Drude modeli ile tanımlanan biçimde negatif elektriksel geçirgenlik yanıtı verebileceğini göstermiştir. Aşağıda yer alan Şekil 8, bu tür bir periyodik ince tel diziliminin geometrik parametrelerinin doğru seçimiyle, belirli bir hedef plazma frekansının altındaki frekanslarda negatif ϵ elde edilmesini mümkün kılmaktadır. Böylece, bu yapı ile doğada kendiliğinden gözlemlenmeyen, yapay olarak oluşturulmuş negatif elektriksel geçirgenlik değerlerine ulaşmak mümkün hâle gelir.



Şekil 8. Farklı yapıya sahip ENG yapılar

MNG malzemeler

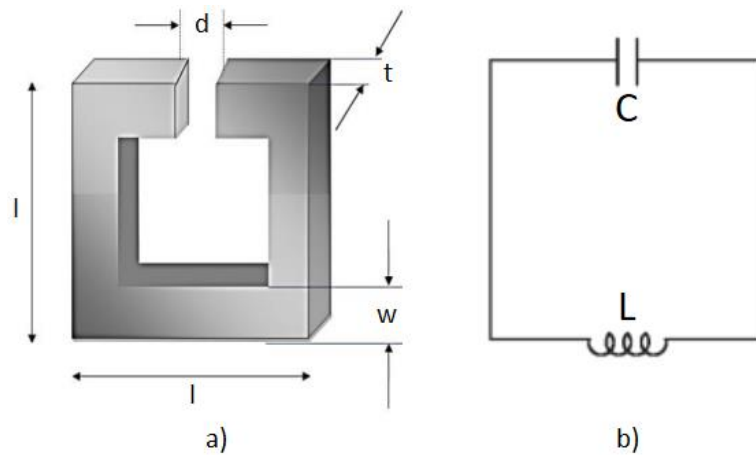
Çoğu malzemenin manyetik yanıtı, frekans arttıkça zayıflama eğilimi gösterir. Bu nedenle, mikrodalga frekansları ve üzerindeki bantlarda negatif manyetik geçirgenlik gibi özelliklerin doğal malzemelerle elde edilmesi mümkün değildir. Optik frekanslar söz konusu olduğunda, manyetizmanın doğal olarak gözlemlenememesinin temel nedeni, elektromanyetik dalgaının manyetik bileşeninin, atomlarla elektrik bileşenine kıyasla çok daha zayıf bir etkileşim göstermesidir. Bu nedenle, geleneksel optik sistemlerde ışığın yalnızca elektrik alan bileşeni doğrudan kontrol edilirken, manyetik alan bileşeni Maxwell denklemleri aracılığıyla elektrik alanla ilişkili dolaylı bir rol üstlenir. Atomik ölçekli orbital akımların neden olduğu manyetik etkiler, optik frekanslarda ihmal edilebilecek kadar küçük olduğundan, doğal malzemelerin bu bölgelerde anlamlı bir manyetik tepki oluşturması beklenmez.

Genel olarak, doğal malzemelerde gözlemlenen manyetik geçirgenlik, birkaç GHz frekansın üzerine çıktığında ciddi oranda zayıflar. Ayrıca, doğada serbest manyetik monopol bulunmadığı için, elektron gazlarında olduğu gibi manyetik plazma benzeri bir ortam

oluşturmak mümkün değildir. Bu durum, mikrodalga ve daha yüksek frekanslarda herhangi bir anlamlı manyetik yanıt elde etmeyi oldukça zorlaştırmakta; negatif manyetik geçirgenlik değerlerine ulaşmak ise geleneksel yöntemlerle neredeyse imkânsız hâle getirmektedir.

Ancak, alt dalga boyu ölçekli geometrilere sahip yapay olarak tasarlanmış metamalzemeler sayesinde, manyetik tepki artık atomik spin durumlarıyla sınırlı olmaktan çıkmıştır. Bu çerçevede, manyetik yanıt üretmek amacıyla kullanılabilecek en basit yapı, iletken bir metal plakadır. Ne var ki, bu yapı yalnızca zayıf bir manyetik etkileşim sergiler. Plakanın etrafında indüklenen akım, değişen manyetik alan karşısında Lenz yasasına uygun olarak bir karşı alan oluşturur ve bu da zayıf diamanyetik bir yanıtla sonuçlanır. Bu tür plakaların periyodik diziliminden oluşturulan yapılar, etkin manyetik geçirgenlik değeri $\mu < 1$ olan ortamlar yaratabilir; ancak, bu yaklaşımla manyetik geçirgenliğin negatif değerlere düşürülmesi mümkün değildir.

Dairesel akımın büyük ölçüde metal plakanın dış kenarlarında yoğunlaşması nedeniyle, plakanın merkez kısmı çıkarılarak bir halka geometrisine dönüştürüldüğünde, yapının dış manyetik alana karşı verdiği tepki tamamen indüktif karakter kazanır ve bu durumda rezonans oluşumu gözlemlenmez. Bu nedenle, rezonans davranışı sergilemek ve manyetik tepkiyi artırmak için kapasitans eklenmesi gerekmektedir (Markoš and Soukoulis 2008). Şekil 9.a'da gösterildiği gibi, halkada bir boşluk açılarak SRR oluşturulur. Bu boşluk, tam bir dairesel akım oluşumunu engeller ve boşluklar boyunca yük birikmesine neden olur. SRR hem kapasitif hem de endüktif özellikler taşıması nedeniyle, artık rezonans davranışı sergileyen bir elektromanyetik yapı olarak tanımlanabilir.



Şekil 9. a) Basit SRR ve b) eşdeğer devresi

SRR'ler farklı geometrik formlarda tasarlanabilir. Bu halkalar, yapısal olarak birer indüktans elemanı gibi davranırken; iç ve dış halkalar arasında kalan boşluk, kapasitif bir bileşen oluşturarak sistemi bir LC rezonans devresi eşdeğerine dönüştürür. SRR'nin elektromanyetik yanıtı, özellikle manyetik alana karşı gösterdiği tepki, Şekil 9b'de sunulan LC

devresiyle karşılaştırmalı olarak analiz edilebilir. Yapıda yer alan yarığın dielektrik sabiti göz önünde bulundurulduğunda, Şekil 9a'da gösterilen yarık, bir kapasitör; halka ise bir indüktans elemanı olarak modellenmektedir.

Şekil 9a'da gösterilmiş olan SSR'ye ait kapasitif ve indüktif değerler aşağıda verilmiş olan Denklem 21-22 ile hesaplanabilmektedir.

$$C = \frac{\epsilon_c \left(\frac{wt}{d} \right)}{4\pi} \quad (21)$$

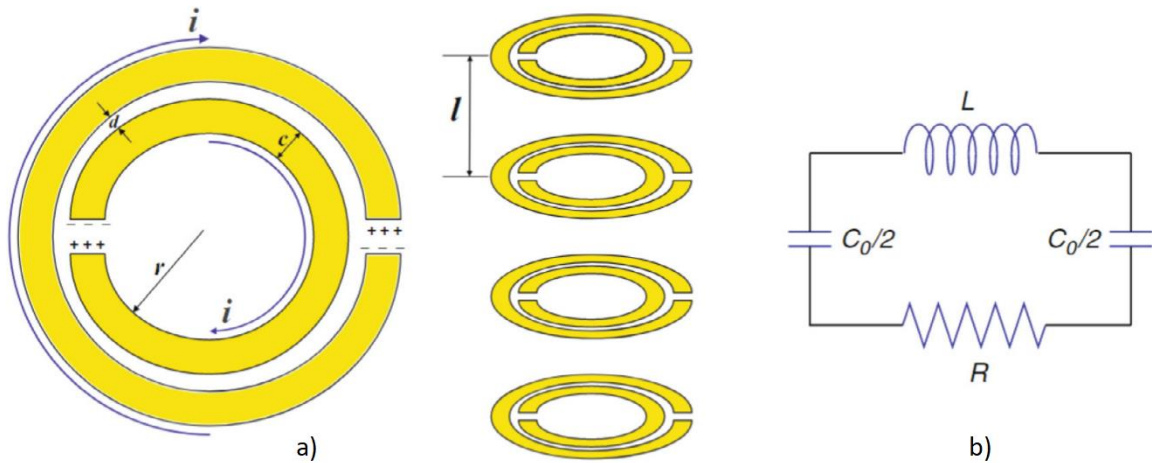
$$L = \frac{4\pi l^2}{c^2 t} \quad (22)$$

SSR'ye ait frekans ve boşluktaki dalga boyu Denklem 23-24 kullanılarak hesaplanabilmektedir.

$$\omega_{LC} = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{c}{l\sqrt{\epsilon_c}} \sqrt{d/w} \quad (23)$$

$$\lambda_{LC} = \frac{2\pi l\sqrt{\epsilon_c}}{c} \sqrt{w/d} \quad (24)$$

Ancak tek bir SRR kullanıldığında, yarık çevresinde biriken elektrik yükleri belirgin bir elektrik dipol momenti oluşturur ve bu durum, istenilen manyetik dipol tepkisini baskılayabilir. Bu nedenle, elektrik dipol etkisini minimize etmek ve manyetik yanıtı güçlendirmek amacıyla, açıklıkları birbirine 180° zıt yönlerde yer alan eşmerkezli SRR çiftlerinden oluşan bir yapı tasarlanmıştır. Bu çiftli yapı, elektromanyetik davranış açısından bir "mega atom" gibi hareket eder. Burada dikkat edilmesi gereken temel koşul, her bir SRR'nin boyutunun, hedeflenen frekans aralığındaki serbest uzay dalga boyuna göre oldukça küçük olmasıdır.



Şekil 10. a) Periyodik SSR ve b) eşdeğer devresi

Bu özelliklerinden ötürü, Şekil 10a'da gösterilen eşmerkezli SRR çiftleri, ortama negatif manyetik geçirgenlik kazandırmak amacıyla kullanılmaktadır. μ 'nün negatif, ϵ 'nin ise pozitif olduğu yapılar, literatürde μ -negatif ortamlar (MNG) olarak tanımlanmaktadır. Şekil 10b'de

sunulan basitleştirilmiş RLC devresi ile, Şekil 10a'daki SRR yapısı arasında doğrudan bir elektromanyetik eşdeğerlik ilişkisi kurulabilir. Bu eşdeğerlikte, metal halkalar sistemin direnç (R) ve endüktans (L) bileşenlerini temsil ederken; halkaların açıklıklarından kaynaklanan boşluklar, bir kapasitans (C) etkisi oluşturur. SRR'yi bir manyetik meta-atom gibi değerlendirebilmek için, eşdeğer L ve C parametrelerinin dikkatli biçimde tahmin edilmesi, rezonans frekansının doğru bir şekilde hesaplanmasını mümkün kılar.

Ayrıca, Şekil 10a'da gösterilen SRR yapısına gönderilen elektromanyetik dalganın manyetik alan bileşeni, yapı düzlemine dik olacak şekilde yönlendirilmiştir. Bu şekilde ayarlanmış manyetik alan, her bir ayrı halka üzerinde sirküler akımların indüklenmesine neden olur. Eğer SRR'ler ardışık düzlemler boyunca sıralanmış ve birbirine yeterince yakın konumlandırılmışsa, her bir sütundaki halkalar arasında oluşan manyetik akı kaybı ihmal edilebilecek düzeye iner. Bu durumda, yapının içerisindeki net manyetik akı aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

$$\Phi = \frac{\mu_0 \pi r^2 I}{l} \quad (25)$$

Denklem 25'te yer alan l parametresi, ardışık SRR'ler arasındaki merkezden merkeze mesafeyi; r ise her bir rezonatörün yarıçapını temsil etmektedir. Bu yapılar içerisinde, tekil bir SRR'nin indüktans değeri, aşağıda verilen ifadeyle matematiksel olarak tanımlanabilir.

$$L = \frac{\Phi}{I} = \frac{\mu_0 \pi r^2}{l} \quad (26)$$

Tüm SRR halkaları tarafından üretilen depolarize edici manyetik akı çizgilerinin, rezonatörlerin yer aldığı düzlem boyunca düzgün bir şekilde yayıldığı varsayılmaktadır. Bu düzenli manyetik akı dağılımı, komşu iki SRR arasında karşılıklı indüktans oluşumuna yol açar. Söz konusu karşılıklı indüktans değeri, aşağıda verilen matematiksel ifade yardımıyla hesaplanabilmektedir.

$$M = FL = \frac{\pi r^2}{a^2} L \quad (27)$$

Denklem 27'deki F , ayrı halka rezonatör yapısının işgal ettiği fraksiyonel hacmi ifade eder. İki silindir arasında oluşan kapasitans ise Denklem 28'de tanımlanmıştır.

$$C = \frac{\epsilon_0}{d} = \frac{1}{dc_0^2 \mu_0} \quad (28)$$

Sonuç olarak, elde edilen yapının μ_{eff} değeri, Denklem 29'da verilen ifade kullanılarak hesaplanabilir. Zamanla değişen bir manyetik alan H , rezonatör düzlemine dik olarak uygulandığında, yapı manyetik olarak uyarılır ve bu uyarım sonucu rezonant davranış

gözlemlenir. Oluşturulan metamalzemenin etkin manyetik geçirgenliği, klasik Lorentz salınım modeli kapsamında tanımlanmakta olup, frekansa bağlı olarak rezonans karakteristiği sergiler.

$$\mu_{\text{eff}} = 1 - \frac{F}{1 - \frac{1}{\omega^2 LC} + \frac{iR}{\omega L}} \quad (29)$$

Manyetik geçirgenlik sabiti, $\frac{1}{\sqrt{LC}} < \omega_p < \frac{1}{\sqrt{LC(1-F)}}$ aralığında negatif değer almaktadır.

Bu aralık düzenlenirse aşağıdaki denklemler elde edilir.

$$\omega_{LC} = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad \omega_{p0} = \frac{1}{\sqrt{LC(1-F)}} \quad (30)$$

Denklem 30'a göre, ω_{LC} sistemin rezonans frekansını temsil ederken, ω_{p0} , μ 'nün reel bileşeninin sıfır olduğu frekans olarak tanımlanır. Literatürde, doğal olarak oluşan hiçbir malzemenin veya ortamın, negatif manyetik geçirgenlik ya da negatif kırılma indisi özellikleri sergilemediği bilinmektedir. Bu bağlamda, negatif μ değerinin elde edilebilmesi, aynı anda hem ε hem de manyetik geçirgenliğin negatif olduğu malzemelerin tasarımı ve sentezi açısından kritik bir öneme sahiptir.

DNG malzemeler

Veselago'nun öne sürdüğü, hem ε 'nin hem de μ 'nün negatif olduğu DNG ortamların gerçekleştirilmesi yolunda atılan ilk adım, söz konusu sınırlamaların kaldırılmasıyla geliştirilen ENG (epsilon-negative) yapıların ortaya çıkışı olmuştur. Bu gelişmeyi takiben, doğal malzemelerde gözlemlenmeyen negatif manyetik geçirgenlik özelliği, periyodik olarak dizilmiş SRR'ler aracılığıyla yapay olarak elde edilmiştir. Böylece, iki temel negatif parametrenin tek bir yapıda bir araya getirilmesinin önündeki engeller ortadan kalkmıştır.

Aynı anda negatif elektriksel ve manyetik geçirgenlik değerlerine sahip ilk DNG metamalzeme, 2000 yılında Smith ve Kroll tarafından başarıyla sentezlenmiştir. Bu yapay ortam, iç içe geçmiş iletken SRR yapıları ile iletken metal çubukların birleşiminden oluşmakta olup, hedeflenen DNG özelliklerini fiziksel bir yapıda sunabilen ilk örnek olarak literatürde yerini almıştır.

İlk metamateryel yapısı literatüre kazandırıldıktan sonra, DNG ortamlarının iletim parametrelerinin geliştirilmesine ve metamalzemelerin farklı uygulama alanlarının genişletilmesine katkıda sağlayacak birçok araştırma gerçekleştirilmiştir. Bu araştırmalara ait bazı çalışmalar Tablo 1'de verilmiştir.

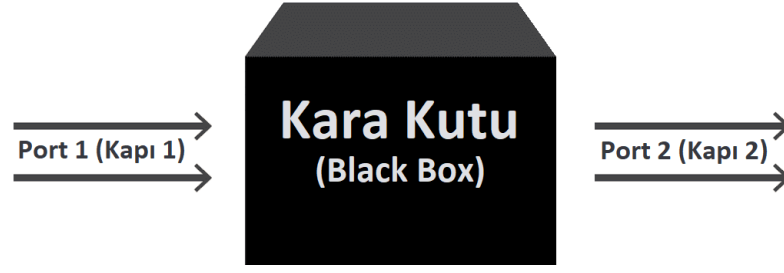
Tablo 1. Metamalzemelerin bazı uygulama alanları

Metamalzeme Türü	Reel Kısım		Sanal Kısım		Uygulama Alanları
	ϵ	μ	ϵ	μ	
MNG Malzemeler	+	-	+	+	Bant geçiren ya da bant durduran filtreler
					Elektromanyetik dalga soğucular ya da enerji hasatlayıcılar
					Elektromanyetik kalkanlamalar
					Antenlerin güçlendirilmeleri veya antenler arası eşleşmenin azaltılması
ENG Malzemeler	-	+	+	+	Küçük boyutlu sistemlerde bant geçiren ya da bant durduran filtreler
					Elektromanyetik kalkanlamalar
					Antenlerin güçlendirilmeleri veya antenler arası eşleşmenin azaltılması
DNG ortamı	-	-	+	+	Görünmezlik pelerini
					Süperlensleme ve görüntüleme
					Negatif kırılma geri dalga yayılımı

Saçılım Parametreleri

Malzemelerin dielektrik ve manyetik geçirgenlik gibi elektromanyetik parametreleri, elektromanyetik dalgaların bu ortamlarla nasıl etkileşime girdiğini anlamak açısından kritik öneme sahiptir. Bu parametrelerin karakterize edilmesinde en yaygın kullanılan yöntemlerden biri saçılma parametreleri (S-parametreleri) analizidir. Saçılma parametreleri aracılığıyla, araştırmacılar simülasyon ortamlarında tasarladıkları yapıları deneysel olarak üretilen prototiplerle karşılaştırabilir ve böylece sayısal ve deneysel veriler arasındaki uyumu değerlendirebilirler.

S-parametreleri ilk kez 1945 yılında Vitold tarafından literatüre kazandırılmıştır. Bunu takiben, 1947 yılında Henry, savaş döneminde radar sistemleri üzerine yaptığı çalışmalar sırasında bu parametreleri bağımsız olarak yeniden tanımlamıştır (Belevitch 1962). Günümüzde saçılma parametreleri; malzeme bilimi, elektronik, haberleşme teknolojileri, mikrodalga sistemleri ve radar mühendisliği gibi birçok teknik disiplinde yaygın olarak kullanılmaktadır.



Şekil 11. Malzemeleri tanımlamada kullanılan kara kutu sistemi

Şekil 11’de gösterilen kara kutu yöntemi ile S-parametreleri bir devreyi, sistemi veya malzemeyi tanımlamak ve kara kutunun içindeki sistem hakkında bilgi edinmek için kullanılır.

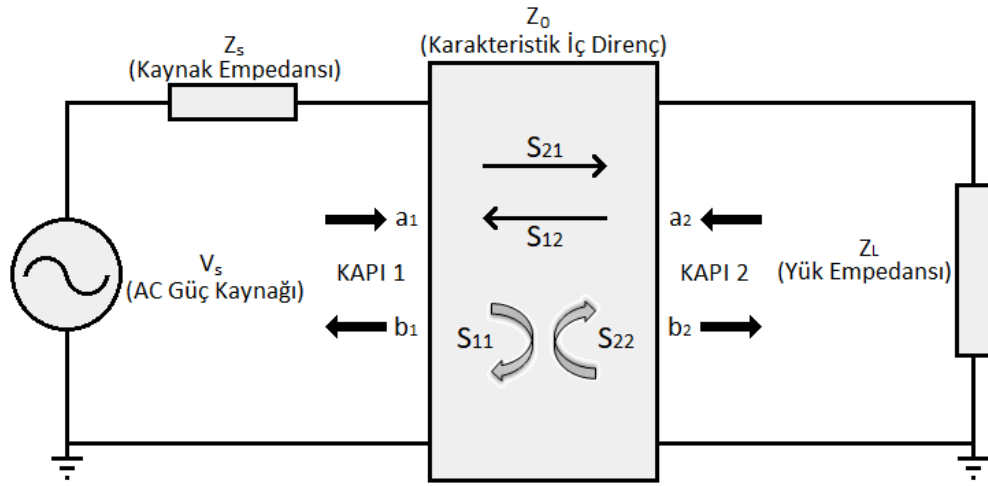
Frekans yükseldikçe, devre içerisindeki akım ve gerilimlerin doğrudan tanımlanması ve ölçülmesi giderek güçleşir. Yüksek frekanslı uygulamalarda, akım ve gerilim dağılımlarının belirlenmesi kritik öneme sahip olsa da bu parametreler yalnızca belirli frekans aralıklarında doğrudan ölçümlerle elde edilebilir. Bu nedenle, özellikle mikrodalga ve RF devre analizlerinde, sistemin giriş ve çıkış portları arasındaki davranışın karakterize edilmesinde S-parametreleri kullanılır.

S-parametreleri, frekansa bağlı olarak değişen karmaşık sayılarla ifade edilir ve hem genlik (büyüklük) hem de faz bilgilerini içerir. Bir sistem N adet port içeriyorsa, bu sisteme ait N^2 adet S-parametresi tanımlanmalıdır. S-parametre analizi en sık iki portlu devreler üzerinde gerçekleştirilir. Burada her port, elektriksel sinyallerin devreye giriş veya çıkış yaptığı noktayı temsil eder.

İki portlu bir sistem için:

- S_{11} , giriş portuna uygulanan sinyalin aynı porttan yansıyan kısmını (gerilim yansım katsayısı),
- S_{21} , girişten çıkışa iletilen sinyalin büyüklüğünü (ileri yönlü kazanç),
- S_{12} , çıkıştan girişe geri iletilen sinyali (geri yönlü kazanç),
- S_{22} ise çıkış portundan yansıyan sinyali (çıkış portu yansım katsayısı) temsil eder.

Bu dört temel parametre, Şekil 12’de şematik olarak gösterilen iki portlu bir sistem üzerinden analiz edilmiştir ve yüksek frekanslı sistemlerin karakterizasyonunda kritik rol oynar.



Şekil 12. İki kapılı devre şeması

İki portlu bir devrenin S-parametreleri, denklem 31-34'deki gibi tanımlanabilir.

$$S_{11} = \left. \frac{b_1}{a_1} \right|_{a_2=0} \quad (31)$$

$$S_{21} = \left. \frac{b_2}{a_1} \right|_{a_2=0} \quad (32)$$

$$S_{22} = \left. \frac{b_2}{a_2} \right|_{a_1=0} \quad (33)$$

$$S_{12} = \left. \frac{b_1}{a_2} \right|_{a_1=0} \quad (34)$$

Bu parametreler, denklem formunda denklem 35-36'da gösterildiği gibi ifade edilebilir.

$$b_1 = S_{11}a_1 + S_{12}a_2 \quad (35)$$

$$b_2 = S_{21}a_1 + S_{22}a_2 \quad (36)$$

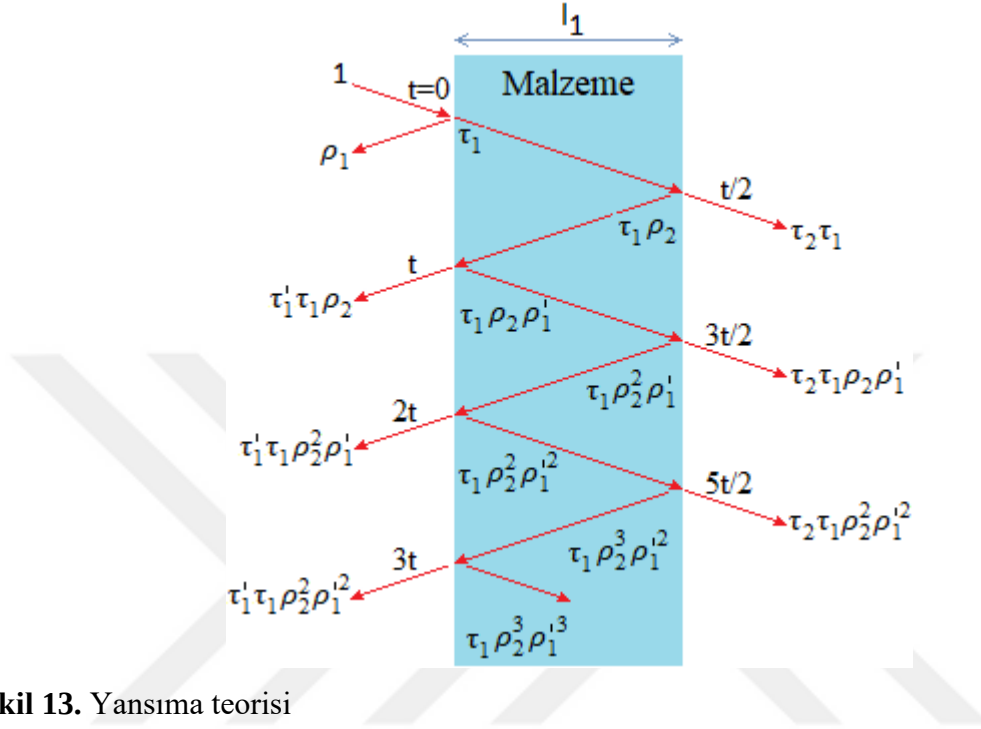
Matris formunda ise S-parametreleri denklem 37'de gösterildiği gibi yazılır.

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \quad (37)$$

Çoklu Yansıma ve Soğurma Teorisi

Bir malzemenin elektromanyetik dalgaları soğurma kapasitesi, gelen dalganın yansıma katsayısı ve iletim katsayısı üzerinden değerlendirilebilir. Yansıma katsayısı, malzeme yüzeyinden geri yansıyan elektromanyetik dalga bileşeninin oranını; iletim katsayısı ise malzeme ortamını geçerek çıkış yapan dalga miktarını temsil eder. Bu katsayıların davranışı, çoklu yansıma teorisi kapsamında açıklanır. Gelen elektromanyetik dalga, ilk temas ettiği yüzeyde kısmen yansır; kalan kısım ise malzeme içerisine geçer. İç ortama giren dalga, arka yüzeye ulaştığında tekrar kısmen yansır ve kısmen malzemeyi terk eder. Bu süreç, dalga enerjisi ortam içinde tamamen sönümlenene kadar devam eder. Bu ardışık yansıma ve iletim olayları,

kayıplı ortamlarda soğurma mekanizmasının temelini oluşturur. Söz konusu sürecin şematik temsili Şekil 13'te sunulmuştur. İlk yüzeyden sağa doğru yansıma katsayısı $\rho'_1 = -\rho_1$, iletim katsayıları ise $\tau_1 = 1 + \rho_1$ ve $\tau'_1 = 1 - \rho_1$ olarak verilmiştir. Toplam yansıma katsayısı, Denklem 38 ve 39'da verildiği üzere frekansın bir fonksiyonu olarak yazılarak S-parametreleri yardımıyla hesaplanabilir (Erdem and Yuzer 2020).



Şekil 13. Yansıma teorisi

$$\Gamma_1(\omega) = \rho_1 + \sum_{n=0}^{\infty} \tau_1 \tau'_1 (\rho'_1)^{n-1} \rho_2^n e^{-j\omega n t} \quad (38)$$

$$R(\omega) = \Gamma_1(\omega) = |S_{11}|^2 \quad (39)$$

Toplam iletim katsayısı, Denklem 40 ve 41'de verildiği üzere frekansın bir fonksiyonu olarak yazılarak S-parametreleri yardımıyla hesaplanabilir.

$$T(\omega) = \sum_{n=0}^{\infty} \tau_1 \tau_2 (\rho'_1)^n \rho_2^n e^{-j\omega n t} e^{-j\omega t/2} \quad (40)$$

$$T(\omega) = |S_{21}|^2 \quad (41)$$

Malzemelerin frekansa bağlı soğurma gücü (A), Denklem 42'de verilen denklem kullanılarak hesaplanabilir:

$$A(\omega) = 1 - R(\omega) - T(\omega) = 1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2 \quad (42)$$

Metamalzeme tabanlı soğurucu yapılarda, yapının elektromanyetik empedansı ile boşluk veya hava ortamının empedansının eşleştirilmesi sayesinde, gelen elektromanyetik dalgalarda yansıma meydana gelmez. Bu empedans uyumu, dalganın yapıya girişini maksimize

ederek soğurucu performansını artırır. Metamalzemelerde kullanılan periyodik rezonatör yapıları, gelen elektromanyetik dalganın dalga boyu ile orantılı olarak tasarlanır.

Elektromanyetik dalga metamalzeme yüzeyine ulaştığında, periyodik rezonatörler yüzey üzerinde elektriksel rezonans oluşturan akımlar indükler. Rezonatör katmanı ile bu yapının altında yer alan iletken zemin katmanı arasında, yüzey akımlarına zıt yönde bir akım meydana gelir ve bu durum manyetik rezonansa yol açar. Aynı frekans bandında hem elektriksel hem de manyetik rezonansın sağlandığı durumlarda, maksimum soğurma elde edilir. Bu koşul altında yapı, gelen elektromanyetik enerjinin tamamına yakını Ohmik kayıplar yoluyla ısı enerjisine dönüştürür (Landy *et al.* 2008).

Frekans Seçici Yüzeyler

Frekans seçici yüzeyler (FSY), gelen elektromanyetik dalgaların frekansına bağlı olarak iletim ve yansıma özellikleri değişen yapılar olarak tanımlanır. Şekil 14'te gösterildiği üzere, bu yapılar elektromanyetik spektrumun belirli frekans aralıklarında elektromanyetik dalgalarla etkileşim kurar. Özellikle mikrodalga frekans bölgesinde, FSY'ler elektromanyetik dalgalar için bir tür frekans filtresi işlevi görmektedir.

FSY'ler, genellikle iki temel yaklaşımla tasarlanır:

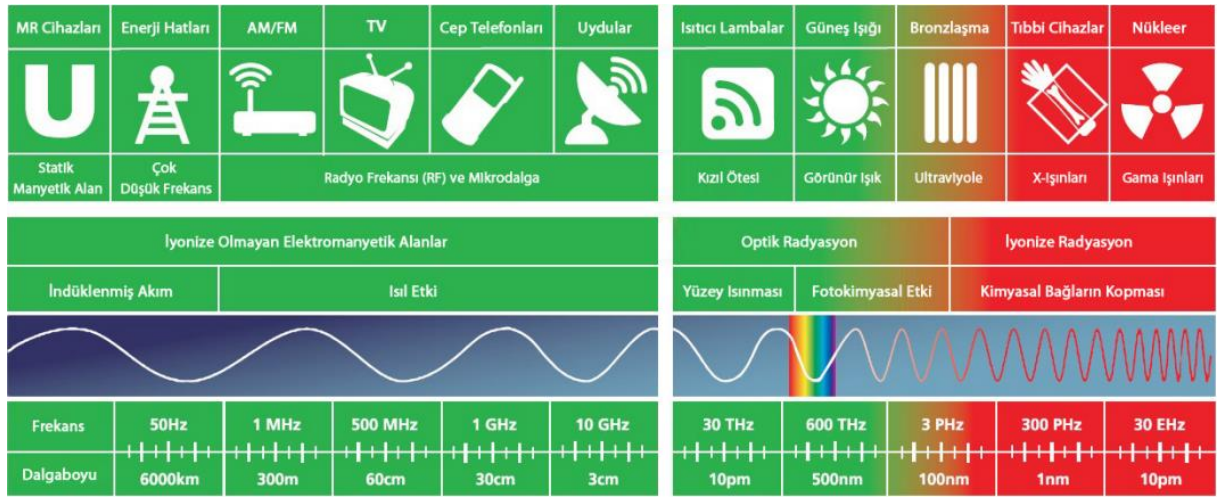
1. İletken yamaların dielektrik bir alt tabaka üzerinde periyodik olarak düzenlenmesi,
2. İletken yüzeylere periyodik oyuklar (boşluklar) açılması.

Yama tabanlı FSY yapılarında, dielektrik malzeme üzerine yerleştirilen iletken yamalar endüktif davranış sergilerken; oyuk tipi tasarımlar ise kapasitif özellikler gösterir. Bu iki farklı geometri, elektromanyetik dalgaların kontrolünde farklı rezonans özellikleri sunar.

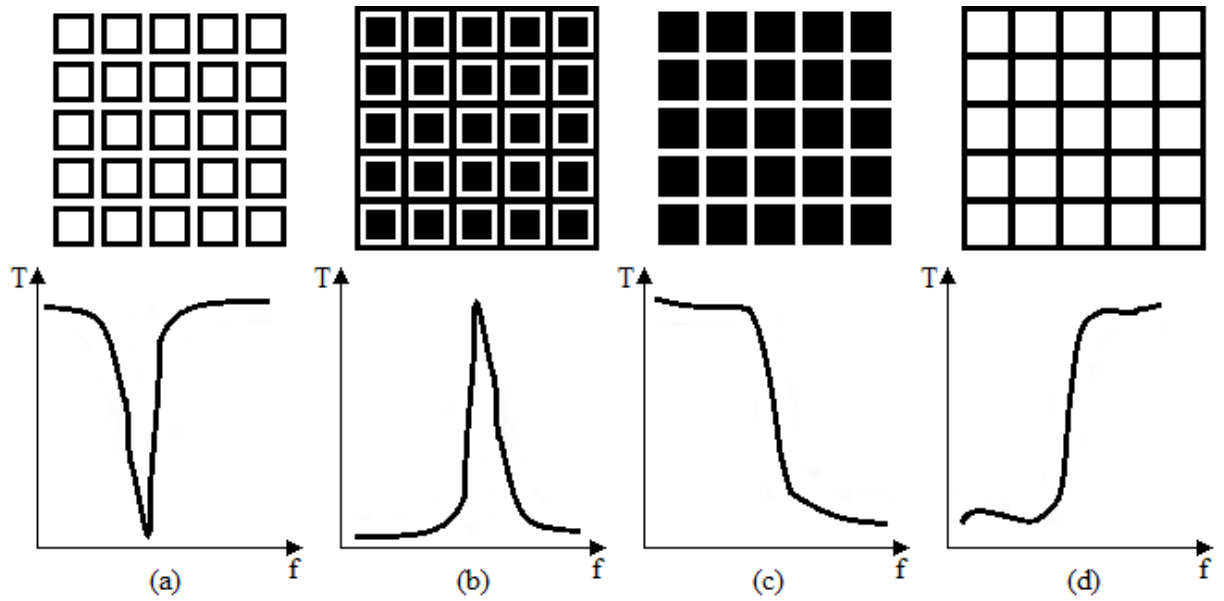
Şekil 15'te görüldüğü gibi, frekans seçici yüzeyler tasarım biçimine bağlı olarak dört temel filtre karakteristiği sergileyebilir:

- Alçak geçiren filtre (low-pass)
- Yüksek geçiren filtre (high-pass)
- Bant geçiren filtre (band-pass)
- Bant durduran filtre (band-stop)

Söz konusu şekilde, siyah alanlar iletken yüzeyleri temsil etmektedir ve tasarımın elektromanyetik tepkisi, bu iletken geometrilerin düzenine bağlı olarak belirlenmektedir.



Şekil 14. Elektromanyetik dalga spektrumu ve kullanım alanları



Şekil 15. Farklı tasarlanmış FSY'ler için filtre karakteristikleri a) alçak geçiren, b) yüksek geçiren, c) bant durduran ve d) bant geçiren filtre

FSY'lerin Performansını ve Frekans Özelliklerini Etkileyen Faktörler

FSY'lerin performansını etkileyen başlıca faktörler şunlardır:

- FSY yapısının iletkenlik katsayısı: Kullanılan malzemenin iletkenliği, yüzeyin elektromanyetik dalgalara karşı gösterdiği tepkiyi doğrudan etkiler.
- Hücre elemanlarının geometrik yapıları: Hücrelerin fiziksel özellikleri, iletken yamaların dizilimleri, aralarındaki mesafeler ile yalıtkan ve iletken yapıların kalınlıkları gibi faktörler performansta kritik rol oynar.
- FSY tabakalarının geçirgenliği: Dielektrik katmanların elektromanyetik dalgaları geçirme yeteneği tasarım için belirleyicidir.
- FSY dizisinin süresi: Frekans yanıtında belirgin bir etkiye sahiptir.

- Bir kademede kullanılan FSY dizilerinin sayısı: Kaskat yapılar tasarımı doğrudan etkiler.
- Kaskat yapıdaki FSY periyodikleri arasındaki elektriksel geçirgenlik mesafesi: Tasarımda uyum ve performans için dikkate alınmalıdır.
- Hücre eleman tiplerinin seçimi: Kullanılan elemanların tipi ve malzemesi, FSY'nin karakteristiğini belirler.
- Sonlu eleman sayısı: Periyodik yapılarda kullanılan eleman sayısı, sistemin sınırlamalarıyla belirlenir.
- İletken çerçeveler: FSY yapısını barındıran çerçevelerin özellikleri, mekanik dayanım ve performans açısından önemlidir.

FSY frekans özellikleri, bir dizi parametreye bağlıdır. Bu faktörler şunlardır (Munk 2000) :

- Periyodik yamaların ve oyukların şekli ve boyutları: Yüzeydeki elemanların geometrik tasarımı, frekans seçici yüzeyin özelliklerini doğrudan etkiler.
- Yamalar ve oyuklar arasındaki boşluk: Elemanlar arasındaki mesafe, frekans yanıtını ve filtreleme davranışını belirler.
- Malzemenin iletkenliği: Kullanılan iletken malzemenin elektriksel özellikleri, yüzeyin performansını etkileyen önemli bir faktördür.
- Dielektrik katmanın yapısı: Dielektrik tabakanın kalınlığı, malzemesi ve dielektrik sabiti, yüzeyin elektromanyetik dalgalarla etkileşimini şekillendirir.
- Elektromanyetik dalganın geliş açısı ve polarizasyonu: Dalgaların yüzeye hangi açıyla geldiği ve polarizasyon yönü, frekans seçici yüzeyin iletim ve yansıma özelliklerini değiştirir.

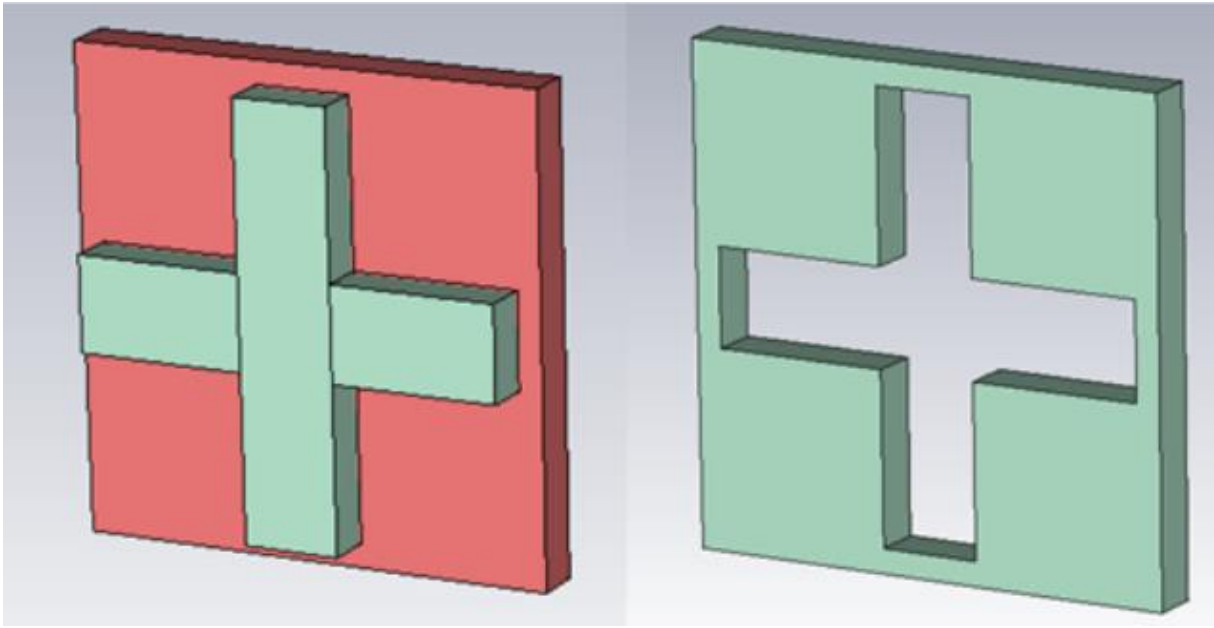
Bu faktörlerin her biri, FSY tasarımında göz önünde bulundurulması gereken kritik parametrelerdir ve yüzeyin belirli bir uygulamaya uygun şekilde optimize edilmesine olanak tanır.

FSY Tipleri

Frekans seçici yüzeyler (FSY), genellikle iki temel yöntemle tasarlanmaktadır: Bunlardan ilki, Şekil 16'da da gösterildiği üzere, periyodik olarak yerleştirilmiş iletken yamaların dielektrik bir tabaka üzerine konumlandırılmasıdır; diğeri ise iletken bir yüzey üzerine periyodik açıklıklar (oyuklar) açılması yöntemidir. Yapının elektromanyetik

karakteristiği, seçilen geometriye bağlı olarak değişir: iletken yamalardan oluşan tasarımlar kapasitif davranış sergilerken, açıklık (aperture) tabanlı yapılar ise endüktif özellik gösterir.

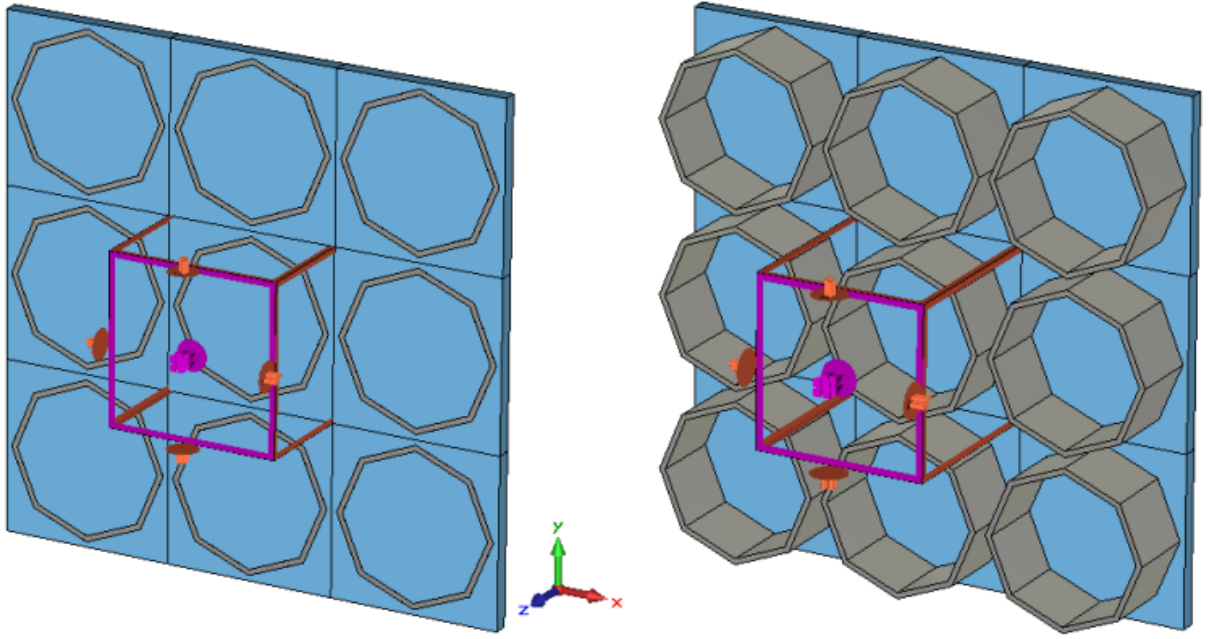
En temel düzeyde, iletken yamalarla oluşturulan FSY'ler alçak geçiren filtre işlevi görürken, açıklık temelli periyodik tasarımlar yüksek geçiren filtre karakteristiği sergiler. Bu iki temel yapı üzerinden yapılan tasarım geliştirmeleriyle, zamanla bant durduran ve bant geçiren filtre özelliklerine sahip farklı periyodik elemanlar da ortaya konmuştur. Böylece FSY yapıları, çok çeşitli elektromanyetik filtreleme uygulamaları için esnek ve özelleştirilebilir çözümler sunar.



şekil 16. a) Yama ve b) oyuk tipi FYS'ler

Frekans seçici yüzeyler (FSY), kullanılan yüzey malzemesinin kalınlığına bağlı olarak kalın ekran ya da ince ekran FSY olmak üzere iki sınıfa ayrılabilir. Ayrıca, bu yapılar iki boyutlu veya üç boyutlu olarak da tasarlanabilir (Azemi and Rowe 2011). şekil 17'de bu sınıflandırmaya ait iki ve üç boyutlu FSY rnekleri sunulmaktadır.

Bir FSY yapısı, metalik tabakanın kalınlığı rezonans frekansına karşılık gelen serbest uzay dalga boyunun λ_0 yalnızca %0,1'inden (yani $0,001\lambda_0$) daha küçükse, ince ekranlı FSY olarak kabul edilir. İnce ekran FSY yapıları, hafif ve kompakt olmaları sayesinde taşınabilir sistemlerde kullanım açısından önemli avantajlar sunar. Ayrıca, bu tür yapılar baskı devre teknolojileri ile kolayca üretilir ve düşük üretim maliyetleri nedeniyle uygulamalarda yaygın olarak tercih edilir (Wu *et al.* 1995).



Şekil 17. a) İki ve b) üç boyutlu FSY yapıları

Yüksek geçiren FSY uygulamalarında, genellikle kalın ekranlı metalik malzemeler tercih edilmektedir. Bu tür yapılar, alçak geçiren filtrelerden farklı olarak, kesim frekansına karşılık gelen dalga boyundan daha büyük bir yapısal kalınlığa sahip olacak şekilde tasarlanır. Ancak bu yaklaşım, bazı dezavantajları da beraberinde getirir. Özellikle malzeme kalınlığına bağlı olarak oluşan ağır yapı, üretim süreçlerini hem maliyet hem de hassasiyet açısından daha karmaşık hale getirmektedir.

Buna rağmen, kalın ekranlı FSY tasarımları, çoklu frekanslı uydu haberleşme sistemlerinde bant ayrımını (yani iletim ve yansıma frekansları arasındaki farkı) azaltma konusunda önemli bir avantaj sağlar. Bu özellik, yüksek frekanslı iletişim uygulamalarında daha verimli sinyal yönetimi ve parazit azaltımı açısından kritik bir performans parametresidir.

FSY Geometrisinin Frekans Cevabına Etkisi

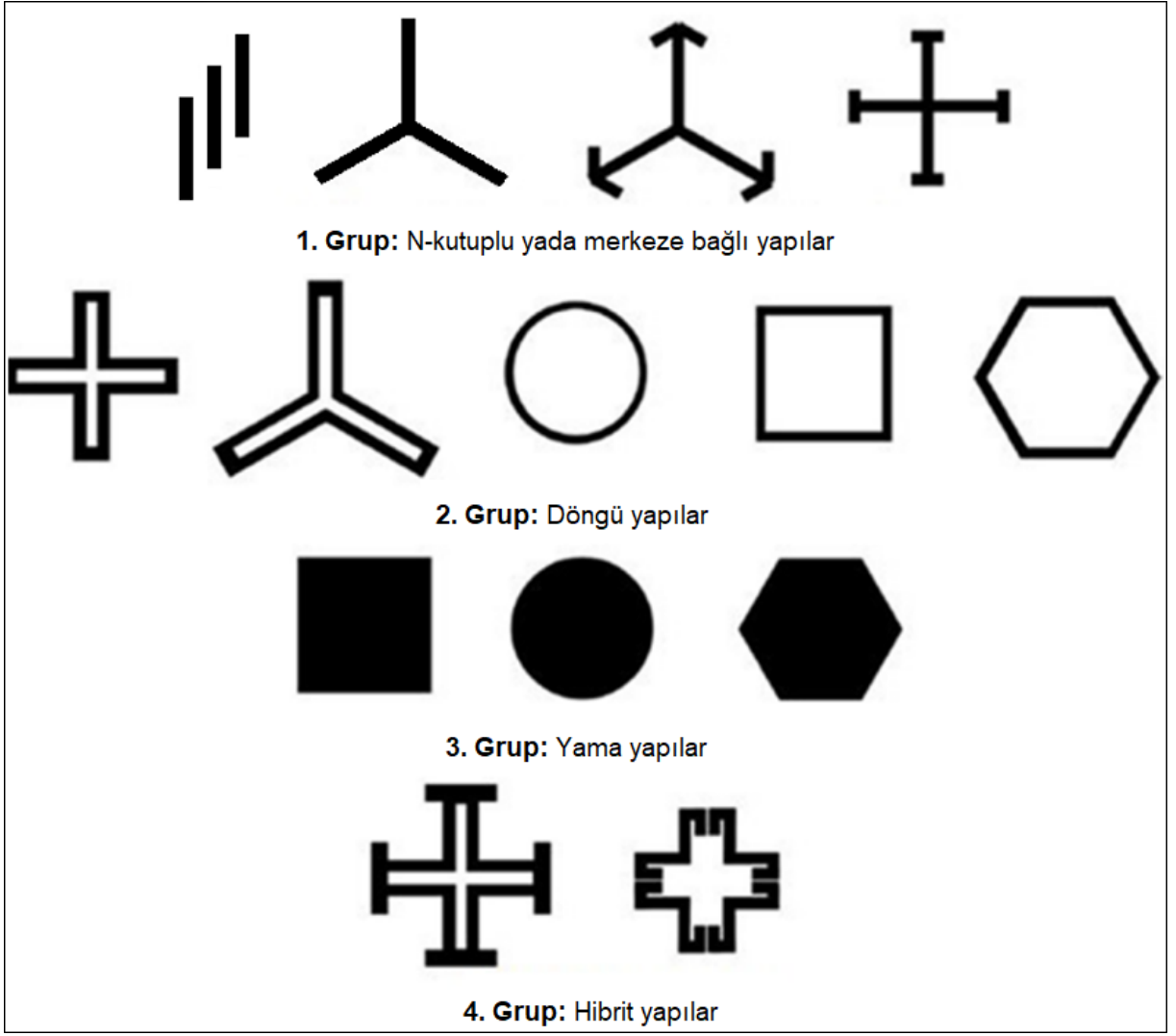
FSY'lerin geometrik yapısı, filtrelerin frekans yanıtını doğrudan belirleyen en kritik etkenlerden biridir. Seçilen geometri, elektromanyetik dalgaların (EMD) geliş açısına ve polarizasyon durumuna karşı sistemin gösterdiği duyarlılığı önemli ölçüde etkiler. Bazı FSY geometrileri, özellikle geliş açısına ya da polarizasyon yönelimine karşı daha hassas bir tepki sergilerken; bazıları ise rezonans frekansının bant genişliği üzerinde daha belirgin bir etki oluşturur.

Buna ek olarak, belirli FSY yapıları, yalnızca tek bir rezonans frekansına değil, birden fazla rezonansa sahip olacak şekilde tasarlanabilir. Bu tür yapılar, çoklu bant (multi-band) özelliği göstererek, aynı yapının farklı frekans bölgelerinde filtreleme işlevi görmesini mümkün

kılar. Bu durum, FSY'lerin çok bantlı haberleşme ve radar sistemleri gibi çok frekanslı uygulamalar için cazip bir çözüm haline gelmesini sağlar.

Şekil 18'de gösterildiği üzere geometrik şekillerine göre FSY'ler, genellikle dört temel grupta sınıflandırılabilir:

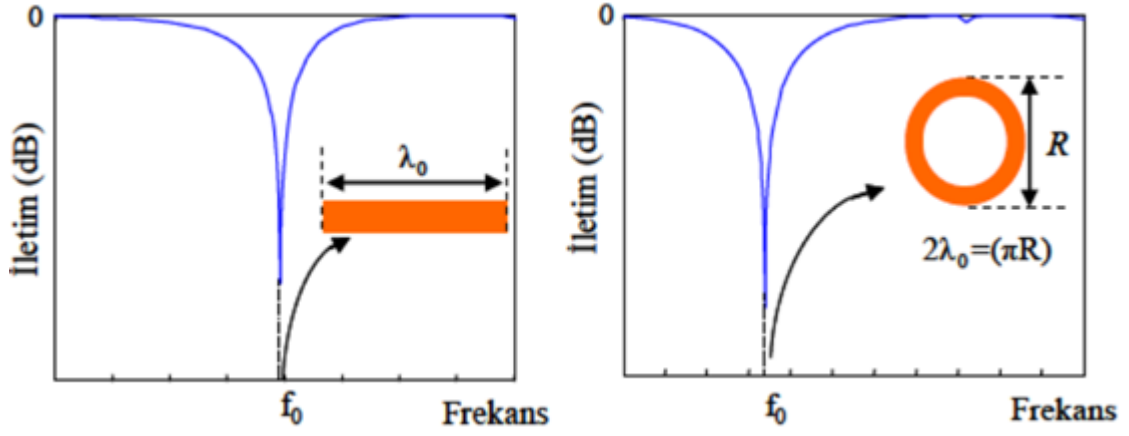
1. N Kutuplu veya Merkeze Bağlı Yapılar: Dipoller, tripoller ve köşeli çapraz kutuplu (örneğin, Jerusalem Cross) gibi geometrik şekilleri içerir. Bu tür yapılar, tek katmanlı veya çift katmanlı FSY'ler oluşturmak için diğer çeşitlerle birleştirilebilir. Genellikle dar bantlı bant durduran filtre özelliği gösterirler.
2. Halka Tipi Döngüsel Yapılar: Dairesel, kare veya üçgen halkalar gibi döngüsel geometrilere sahiptir. İlk gruptaki yapılara kıyasla daha geniş bantlı bant durduran filtre özelliği sunarlar ve bu nedenle daha geniş bir frekans aralığında çalışabilirler.
3. İçi Dolu Yama Tipi Yapılar: "Yama tipi" olarak bilinen bu grup, dairel ve kare yamalar gibi çeşitli şekilleri içerir. Bu yapıların en önemli avantajlarından biri, elektromanyetik dalganın geliş açısındaki değişimlere karşı daha kararlı bir frekans cevabı sergilemeleridir. Bu özellik, özellikle değişken koşullarda çalışması gereken FSY'ler için önemlidir.
4. Kompleks Geometrik Yapılar (Hibrit Modeller): Farklı geometrilerin birleştirilmesiyle oluşturulan periyodik elemanlar içerir. Genellikle ilk üç grubun özelliklerini birleştirerek, özgün ve istenilen özelliklere sahip FSY tasarımlarını mümkün kılar. Bu tür yapılara "hibrit modeller" de denir ve uygulamaya özel gereksinimlere uygun yapılar üretmek için idealdir.



Şekil 18. Geometrik şekillerine göre FSY grupları

Klasik FSY sınıflandırmalarına dâhil olmayan bir diğer yapı türü, burkumlu FSY (conformal FSS) olarak adlandırılmaktadır. Geleneksel FSY'ler genellikle düzlemsel yüzeyler üzerine tasarlanırken, burkumlu FSY yapıları eğri yüzeyler üzerine yerleştirilmektedir. Ancak, yüzeyin eğriliği, FSY elemanlarının geometrisinde deformasyonlara neden olabilir. Bu tür geometrik bozulmaları en aza indirmek amacıyla, aynı birim hücre geometrisi korunarak birim hücre boyutunun küçültülmesi, eğriliğin etkisini azaltmak açısından etkili bir yöntem olarak kullanılmaktadır.

FSY'nin boyutsal özellikleri, rezonans frekansı ve bant genişliği üzerinde belirleyici bir rol oynar. Örneğin, boyu $\lambda_0/2$ olan bir dipol tipi FSY elemanı, rezonans frekansı f_0 'da elektromanyetik dalgaya karşı yüksek yansıtıcılık özelliği gösterir. Benzer şekilde, dairesel halka (loop) biçimli FSY elemanları da çevre uzunluğunun yarısı $\lambda_0/2$ 'nin tam katı olduğunda benzer bir yansıtıcı karakter sergiler (Şekil 2.6). Bu durum, dairesel halkadaki her bir yarım halkanın dipol benzeri bir davranış gösterdiğini ortaya koymaktadır.

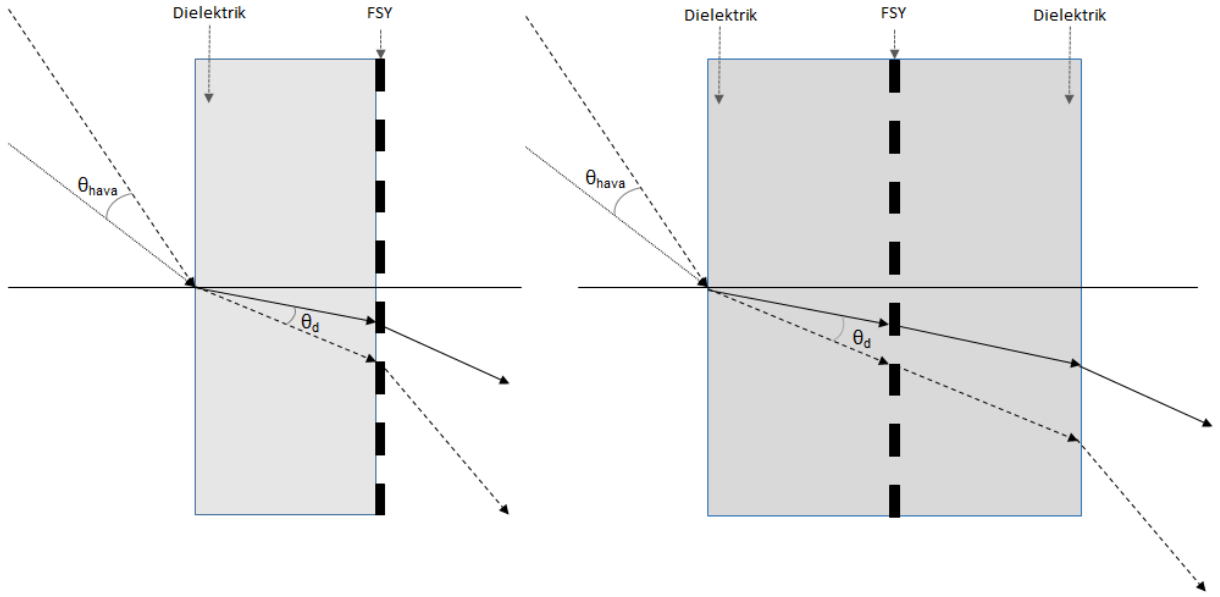


Şekil 19. Şerit dipol ve dairesel döngü FSY yapılarına ait iletim karakteristiği

FSY’lerde Dielektrik Malzeme Etkisi

FSY tasarımlarında, metalik elemanlara mekanik destek sağlamak ve farklı geliş açılarında rezonans frekansında meydana gelebilecek kaymaları azaltmak amacıyla dielektrik malzemelerin kullanımı kritik bir rol oynamaktadır. Kullanılan dielektrik malzemenin elektriksel geçirgenliğinin artması, çoğu durumda rezonans frekansının düşmesine neden olur. Bu nedenle, FSY yapılarında tercih edilen dielektrik malzemenin dielektrik sabiti ve kayıp faktörü gibi elektromanyetik özellikleri, hedeflenen frekans yanıtını optimize etmek açısından dikkatle belirlenmelidir.

Tek katmanlı FSY tasarımlarında, dielektrik malzeme kullanımı genellikle iki farklı şekilde gerçekleştirilir. Dielektrik tabakanın tek yüzüne yerleştirilen periyodik elemanlar tasarımı, periyodik FSY elemanları dielektrik bir tabakanın yalnızca bir yüzüne yerleştirilir. Bu yöntem, üretim süreçlerini basitleştiren bir yaklaşım sunar ve daha düşük maliyetli bir tasarım sağlar. Dielektrik tabakaların arasına yerleştirilen periyodik elemanlar tasarımı, periyodik FSY elemanları iki dielektrik tabaka arasında konumlandırılır. Bu yapı, elektromanyetik dalgalara karşı daha kararlı bir performans sergiler ve rezonans frekansında daha hassas bir kontrol sağlar.



Şekil 20. Tek ve Çift katmanlı dielektrik yapıya sahip FSY'ler

Çift katmanlı FSY yapılarında, periyodik elemanlar iki dielektrik tabaka arasına yerleştirilir. Bu tasarım, genellikle daha kararlı bir performans ve genişletilmiş bir frekans aralığı sunar.

Tek ve çift katmanlı FSY yapılarının farklı özelliklere ait karşılaştırılması Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Tek ve çift katmanlı FSY karşılaştırması

Özellik	Tek Katmanlı FSY	Çift Katmanlı FSY
Üretim Kolaylığı	Daha basit ve düşük maliyetli	Daha karmaşık ve yüksek maliyetli
Hafiflik	Daha hafif	Daha ağır
Kararlılık	Daha az kararlı	Elektromanyetik dalgalara karşı daha kararlı
Frekans Kontrolü	Temel düzeyde rezonans frekansı kontrolü	Hassas rezonans frekansı kontrolü
Uygulama Alanı	Düşük maliyet gerektiren basit sistemler	Hassasiyetin önemli olduğu gelişmiş sistemler

Dielektrik malzemenin elektrik geçirgenliğinin (ϵ_r) artışı, rezonans frekansını düşürerek dalga boyunu uzatır. Bu özellik, FSY yapısının hedeflenen frekans aralıklarına optimize edilmesinde kullanılır. Ancak, çok yüksek elektrik geçirgenliğine sahip malzemelerin kullanımı, yapının performansını olumsuz etkileyebilir, bu nedenle uygun bir denge sağlanmalıdır.

Bu tür dielektrik malzeme ve katman tasarımları, FSY yapılarının farklı uygulama alanlarına uyum sağlaması açısından önemlidir. Uygulama alanına bağlı olarak, tasarımlar arasında seçim yapılabilir.

Şekil 20'de gösterildiği gibi, dalganın optik kırınımına uğrayarak periyodik yüzeye geldiği görülmektedir. Gelen EMD'nin periyodik yüzeye ulaşma açısının artırılması veya azaltılması, yüzeyin duyarlılığı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Gelme açısı değiştikçe, periyodik yapının rezonans frekansı ve iletim/yansıma davranışı farklılık gösterebilir. Bu nedenle, gelme açısının yapı üzerindeki etkisini optimize etmek, FSY tasarımında kritik bir faktördür.

FSY yapılarında kullanılan dielektrik malzemenin fiziksel ve kimyasal özellikleri, yüzeyin elektromanyetik dalgalara verdiği tepkiyi doğrudan etkiler. Dielektrik malzemenin:

- Elektrik geçirgenliği (ϵ_r) rezonans frekansını değiştirerek dalganın davranışını etkiler.
- Kalınlığı ve homojenliği, iletim ve yansıma performansını belirler.
- Kimyasal stabilitesi, özellikle çevresel koşullara dayanıklılığı artırır.

Bazı FSY yapıları, polarizasyon değiştirici (polarizer) olarak tasarlanabilir ve bu durumda yüzeyin davranışı, gelen dalganın açısına ve polarizasyonuna bağlı olarak değişir. Örneğin 45° açıyla gelen doğrusal polarizasyonlu EMD için:

- Dalganın düşey bileşeni, yüzeydeki endüktif elemanlar tarafından kısa devre edilir ve topraklanmış gibi davranır.
- Yatay bileşeni ise kapasitif eleman karakteristiği sergiler.

Bu özellik sayesinde, yüzeyi geçen elektromanyetik dalganın yatay ve düşey bileşenleri arasında 90° 'lik bir faz farkı oluşur. Bunun sonucunda, doğrusal polarizasyonlu dalga, dairesel polarizasyonlu bir dalgaya dönüşür. Bu mekanizma, polarizasyon dönüşümü gerektiren uygulamalarda FSY'leri oldukça etkili hale getirir (Munk 2000).

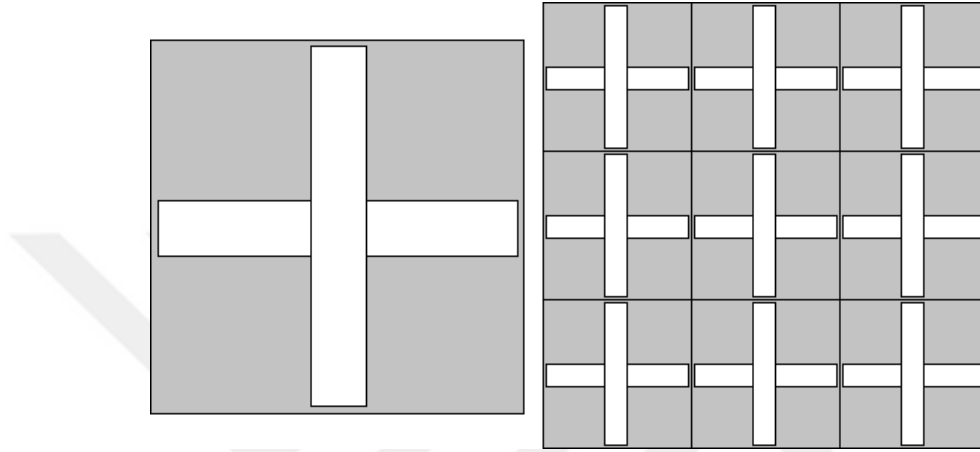
FSY'lerde Birim Hücre

FSY'lerin karakteristiği Şekil 21'de gösterildiği gibi, yerleştirilen birim hücrelerin (unit cell) birbirleriyle olan mesafelerine bağlıdır. Periyodik elemanlar arasındaki mesafe, FSY'nin performansını doğrudan etkileyen önemli bir faktördür. Bu mesafe, gelen elektromanyetik dalganın geliş açısını ve elemanlar arasındaki elektriksel etkileşimi belirler.

Gelen dalganın açısı: Elemanlar arasındaki mesafe, gelen dalganın açı değişikliklerine karşı duyarlılığına etki eder. Bu da rezonans frekansındaki kaymalara veya iletim ve yansıma özelliklerinin değişmesine neden olabilir.

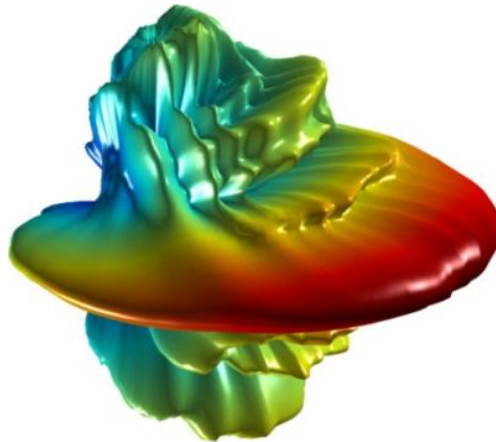
Elektriksel etkileşim: Elemanlar arasındaki mesafe, elemanlar arasında oluşan elektriksel ilişkileri etkiler. Uygun mesafe, elemanların birbirine uyguladığı elektriksel etkileşimi optimize eder ve böylece FSY'nin performansını iyileştirir.

Bu nedenle, FSY tasarımında birim hücrelerin doğru mesafede yerleştirilmesi çok önemlidir ve her bir elemanın birbirine karşı olan ilişkisi dikkatlice hesaplanmalıdır. Tasarımda bu faktörler göz önünde bulundurularak, FSY'nin belirli frekans bandında optimal performans göstermesi sağlanabilir.



Şekil 21. Örnek bir birim hücre yapısı

Bu durum, Şekil 22'de gösterildiği üzere, saçılım örüntülerini de etkileyerek hedeflenen frekans karakteristiğinin bozulmasına yol açabilir. Özellikle birim hücre boyutu, çalışma frekansına karşılık gelen dalga boyuyla uyumlu şekilde seçilmediğinde, grating lobları olarak bilinen istenmeyen ikincil hüzmeler oluşabilir. Bu hüzmeler, elektromanyetik enerjinin hedef dışı yönlerde yoğunlaşmasına neden olarak FSY'nin genel performansını düşürür ve tasarımın etkinliğini sınırlar. Dolayısıyla, birim hücre boyutunun çalışma frekansı ile uyumlu biçimde optimize edilmesi, frekans seçici yüzeyin verimli çalışabilmesi açısından kritik öneme sahiptir.



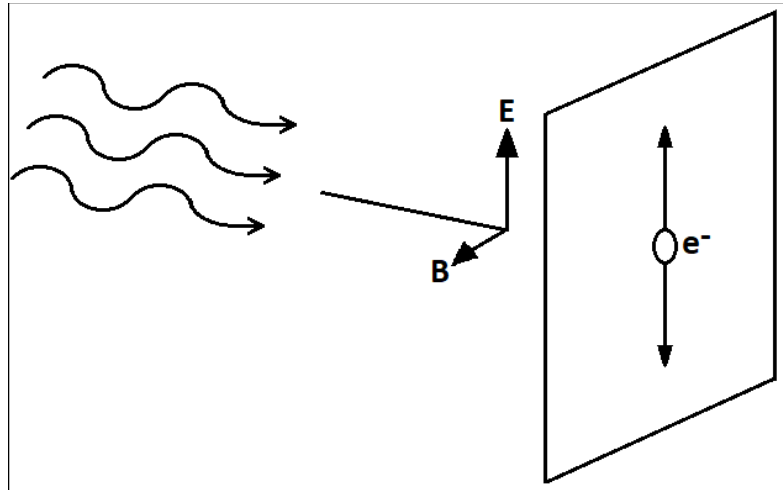
Şekil 22. Bir saçılım örüntüsünün gösterimi

EMD'nin FSY'ye Geliş Açısı ve Polarizasyonu

EMD'nin FSY'ye farklı geliş açılarından ulaşması, periyodik elemanlar arasındaki görelî mesafenin dalga boyuna göre değişmesine neden olur. Bu etki, FSY'nin frekans yanıtını belirleyen temel faktörlerden biridir. Elemanlar arasındaki mesafenin artırılması veya azaltılması, rezonans frekansı ve bant genişliği gibi kritik parametrelerde kaymalara yol açar. Bu nedenle, her FSY yapısının fiziksel tasarımına bağılı olarak etkili çalışabildiği belirli bir geliş açısı aralığı bulunmaktadır. Bu açı aralığının dışına çıkıldığında, yüzeyin frekans karakteristikleri bozulabilir ve istenmeyen saçılma davranışları ortaya çıkabilir.

Geliş açısının yanı sıra, elektromanyetik dalganın polarizasyonu da FSY'nin performansı üzerinde doğrudan etkilidir. Örneğin, Şekil 2.10'da gösterilen durumda, gelen düzlemsel dalganın elektrik alan vektörü, dipol elemanının boyutuna paralel olduğunda, dipol üzerinde yönelmiş bir serbest elektron, bu elektrik alanın etkisiyle doğrusal salınım hareketi yapar. Bu hareket sırasında, gelen dalganın enerjisi büyük ölçüde kinetik enerjiye dönüşerek soğurulur ve yüzeyin diğer tarafına iletilen enerji miktarı oldukça azalır. Bu mekanizma, FSY'lerin hem polarizasyon hem de geliş açısı gibi parametrelere karşı gösterdiği duyarlılığı açık biçimde ortaya koymaktadır (Lin *et al.* 2010).

Bu nedenlerle, FSY tasarımında geliş açısı ve polarizasyonun etkileri dikkatlice değerlendirilmelidir. İstenilen frekans karakteristiklerinin elde edilmesi için bu parametrelerin optimize edilmesi gereklidir.

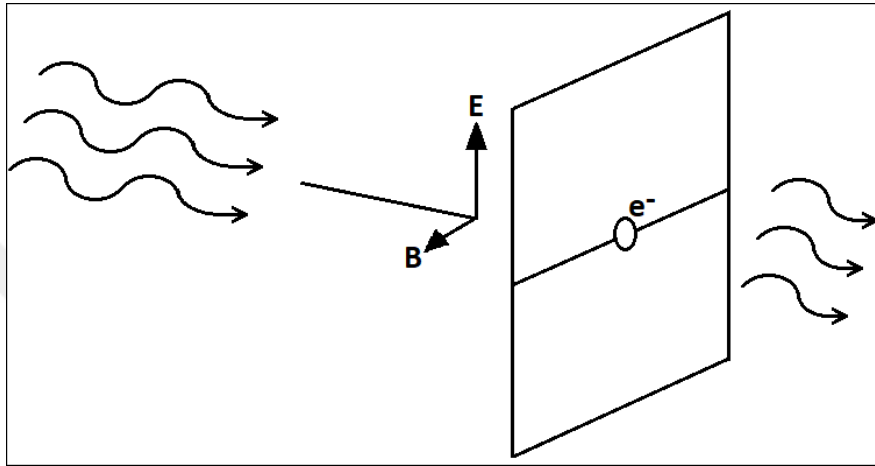


Şekil 23. Dipol elemanı ile elektrik alan vektörünün aynı düzlemde olduğu durum

Şekil 24'te gösterilen durumda, gelen düzlemsel elektromanyetik dalganın elektrik alan vektörü, dipol elemanının uzun eksenine dik bir düzlemde yer almaktadır. Bu durumda, elektrik alanın dipol üzerindeki etkisi, elektronların yalnızca kalınlık yönünde, yani oldukça kısa bir mesafe boyunca hareket etmesine yol açar. Elektronların bu sınırlı salınım hareketi, gelen elektromanyetik dalganın enerjisinin yalnızca küçük bir kısmının yüzeyde kinetik enerjiye

dönüşmesine neden olur. Sonuç olarak, dalganın enerjisinin büyük bir bölümü yüzeyden iletim yoluyla geçer ve yapının diğer tarafına ulaşır. Bu durum, frekans seçici yüzeyin polarizasyon yönüne bağlı geçirgenliğini ve soğurma karakteristiğini belirleyen önemli bir mekanizmadır.

Elektrik alan vektörünün dipol elemanı ile hizalanmaması, yüzeyde enerji tüketiminin düşük olmasına ve dolayısıyla elektromanyetik dalganın büyük ölçüde iletilmesine yol açar. Bu durum, yüzeyin gelen dalgaları daha az etkilediği ve enerjiyi daha çok iletmediği bir etkileşim örneğidir. Bu mekanizma, polarizasyon seçici tasarımlarda ve belirli bir polarizasyondaki dalgaların maksimum iletimi gereken uygulamalarda kullanılır.



Şekil 24. Dipol elemanı ile elektrik alan vektörünün dik düzlemde olduğu durum

Frekans Seçici Yüzeylerin Uygulama Alanları

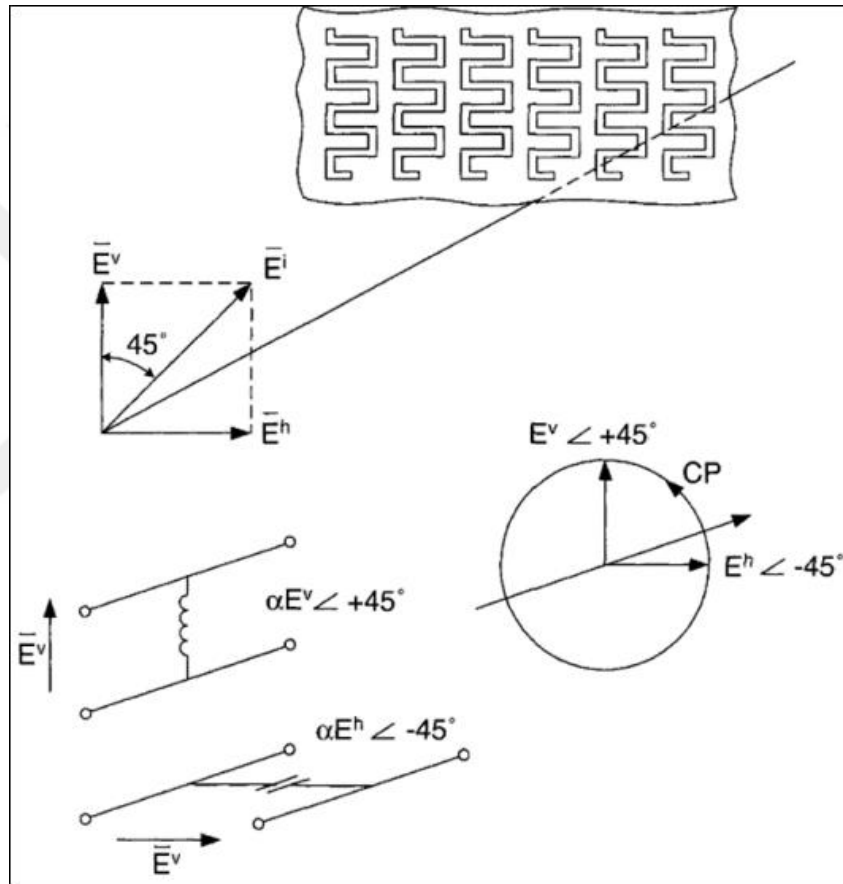
FSY'ler, elektromanyetik dalgalar üzerinde gösterdikleri frekans tabanlı filtreleme özellikleri sayesinde, birçok farklı uygulama alanında kullanılmaktadır. Özellikle mikrodalga frekans bölgelerinde, FSY'ler hem bant durduran hem de bant geçiren filtre tasarımlarında etkin rol oynamaktadır. Ayrıca, emici yüzey (absorber) tasarımları, polarizasyon dönüştürücüler (kutuplayıcılar), radom yapıları, dalga kılavuzu sistemleri, yapay manyetik iletken (AMC) üretimi, yansıtıcı antenler ve çok bantlı mikrodalga antenler gibi alanlarda da yaygın biçimde kullanılmaktadır.

FSY'lerin en bilinen ve yaygın kullanım örneklerinden biri, mikrodalga fırın uygulamalarıdır. Mikrodalga fırınların cam yüzeylerine yerleştirilen yüksek geçiren FSY yapıları, yalnızca belirli frekans aralıklarının geçişine izin vererek fırın içerisindeki elektromanyetik enerjinin dış ortama yayılmasını engeller. Bu sayede kullanıcı güvenliği artırılır. Bu uygulama, FSY'lerin elektromanyetik dalgaları seçici olarak iletme veya engelleme kapasitesinin pratikteki etkili bir örneğini temsil etmektedir.

Bunun yanı sıra, FSY'ler farklı tasarımlarda polarizasyon dönüştürücü (kutuplayıcı) olarak da kullanılır. Örneğin, Şekil 2.25'de gösterilen periyodik yapı, 45°'lik bir açıyla gelen

doğrusal polarizasyonlu elektromanyetik dalgalara karşı kutuplayıcı olarak davranır. Bu yüzey, gelen dalganın, düşey bileşeni için indüktif bir eleman gibi davranır ve toprağa kısa devre etkisi oluştururken, yatay bileşeni için ise kapasitif bir eleman gibi davranarak yine toprağa kısa devre etkisi gösterir.

Bu özellik sayesinde, yüzeyi geçen elektromanyetik dalganın yatay ve düşey bileşenleri arasında 90° faz farkı oluşur. Ortaya çıkan bu faz farkı, başlangıçta doğrusal polarizasyona sahip bir dalganın, dairesel polarizasyona dönüştürülmesini mümkün kılar. Bu tür polarizasyon dönüşüm mekanizmaları, özellikle haberleşme sistemleri ve radar teknolojileri gibi uygulamalarda kritik bir öneme sahiptir (Chen *et al.* 2009).



Şekil 25. Kutuplayıcı tipi FSY yapısı

Son yıllarda, kablosuz haberleşme sistemlerinin yaygınlaşması, bu sistemler arasında istenmeyen girişimlerin (interferans) artmasına neden olmuş ve bu durum önemli bir problem haline gelmiştir. Ortaya çıkan parazitik etkileşimler, haberleşme sistemlerinin performansını düşürmekte ve zaman zaman güvenlik risklerine yol açabilmektedir. Bu tür sorunların çözümüne yönelik olarak, ileri düzey sinyal işleme yöntemleri ve yenilikçi anten tasarımları geliştirilmekte; aynı zamanda fiziksel ortamı yönlendiren çözümler de araştırılmaktadır.

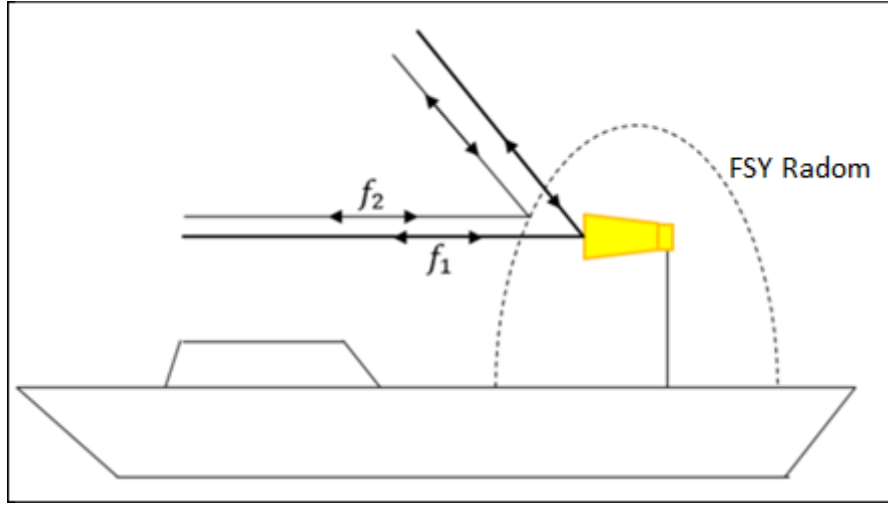
Bu bağlamda, bina içi duvarların FSY özellikleri kazandırılarak, bir tür frekans filtreleme aracı gibi davranması sağlanabilir. Böyle bir yapı, istenmeyen parazit sinyalleri

bastırırken, yalnızca belirli frekanslardaki iletilmesi gereken sinyalleri geçiren bant geçiren veya bant durduran filtre karakteristiği sergileyebilir. FSY'lerin bu tür uygulamalarda kullanımı, ortam kaynaklı girişimlerin azaltılması açısından etkili ve pasif bir çözüm sunmaktadır.

FSY'lerin bir diğer önemli kullanım alanı, radar kesit alanını azaltma ve anten ölçüm odalarındaki sağlıklı ölçümlerin gerçekleştirilmesi için gerekli olan emici yüzeylerin (absorber) tasarımıdır. Katmanlı frekans seçici yüzey yapıları, farklı materyallerin kullanılmasıyla tasarlanır ve belirli bir frekans bandında S_{21} için bant durduran filtre karakteristiği sergiler. Bu yapılar, gelen elektromanyetik dalgaları çeşitli enerji formlarına dönüştürerek hem dalgaların iletimini hem de yansımaları önler. Böylece radar kesit alanını azaltırken parazitlerin de önüne geçilmiş olur.

FSY önemli kullanım alanlarından biri de radom tasarımlarıdır. Radomlar, anten ve radar sistemlerini yağmur, rüzgâr, sıcaklık değişimleri gibi çevresel koşullardan koruyarak bu sistemlerin kararlı ve güvenilir bir şekilde çalışmasını sağlar. Şekil 26'da gösterildiği üzere, radom yapılarında entegre edilen FSY katmanları, belirli bir çalışma frekansında (f_1) elektromanyetik dalgaların geçişine izin verirken, istenmeyen frekanslardaki (f_2) dalgaların geçişini sınırlandırır. Bu seçici geçirgenlik özelliği, hem antenin hedef frekansta verimli çalışmasını sağlar hem de çevredeki diğer sinyal kaynaklarından gelebilecek girişim etkilerini bastırarak sistemin performansını artırır. Böylece FSY'li radom yapıları, yalnızca fiziksel koruma değil, aynı zamanda elektromanyetik uyumluluk ve parazit yönetimi açısından da kritik avantajlar sunar.

Sonuç olarak, frekans seçici yüzeyler, haberleşme sistemlerinden radar ve anten uygulamalarına kadar geniş bir yelpazede etkin çözümler sunmaktadır. Bu yapılar, girişim problemlerini azaltmak, parazitleri önlemek ve sistemlerin performansını artırmak için kritik bir rol oynar.



Şekil 26. Anten radomu örneği

MATERYAL ve YÖNTEM

Materyaller

Alifatik poliüretan reçine (APR, Pavistamp), HDI sertleştirici (HDI, Bossbon), iletken (bakır) pigment (İBP, Cuivre), metil etil keton (MEK, Sigma-Aldrich), aseton (Sigma-Aldrich), akış ve yüzey düzenleyiciler (AYD, Rheovis PU 1250) kimyasalları iletken boya üretiminde kullanılmıştır.

Yöntem

Poliüretan boya sentezi

Poliüretan boya, dayanıklılığı ve çok yönlü özellikleriyle bilinen bir kaplama malzemesidir. APR ve HDI, üretici talimatlarına uygun bir oranda (2:1) karıştırıldı. Bu oran, boyanın doğru sertleşmesini sağlamak açısından büyük öneme sahiptir. Daha sonra, İBP ve dolgu maddeleri, boyanın toplam ağırlığının %10-30'u oranında karışıma eklenir. Boyanın viskozitesini ayarlamak ve uygulanabilir hale getirmek için MEK ve aseton yavaşça ilave edilir.

Bileşenlerin birleştirilmesi sırasında, karışımın homojen bir yapıya kavuşması için elektrikli bir karıştırıcı kullanıldı. Karışımın düzgün bir yapıya sahip olması için bu süreç özenle gerçekleştirildi. Ardından, oluşabilecek topaklanmaları önlemek amacıyla karışım ince bir bez filtre yardımıyla süzüldü. Bu işlem boyanın yüzeyde düzgün bir şekilde dağılmasını sağlar. Karışım, viskozitenin sabitlenmesi için genellikle 15-30 dakika kadar dinlenmeye bırakıldı.

Boyanın uygulanmasından önce, viskozitenin ve kuruma süresinin uygun olduğundan emin olmak için bir test yüzeyinde deneme yapıldı.

FSY birim hücre tasarımı

FSY tasarımı, C-bandı (4–8 GHz) frekans aralığını kapsayacak şekilde, CST Studio Suite yazılımı üzerinden gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada elektromanyetik analizler için, CST yazılım paketinin en yaygın kullanılan modüllerinden biri olan Microwave Studio (MWS) aracı tercih edilmiştir. CST MWS; sahip olduğu gelişmiş çözüm algoritmaları, çoklu analiz seçenekleri ve geniş yapılandırma imkânı sayesinde, çeşitli frekans bandı uygulamaları için oldukça elverişli bir ortam sunmaktadır. Ayrıca, simülasyon çıktılarının deneysel sonuçlarla yüksek oranda örtüşmesi, bu yazılımı güvenilir ve etkin bir modelleme aracı haline getirmektedir.

Bu yaklaşıml, FSY tasarım sürecinde sistematik bir yol haritası sunar ve tasarımın başlangıcından analizine kadar tüm aşamaları adım adım yönlendirir. Bu sayede, tasarım süreci hem daha verimli hem de kullanıcı açısından daha anlaşılır hale gelmektedir.

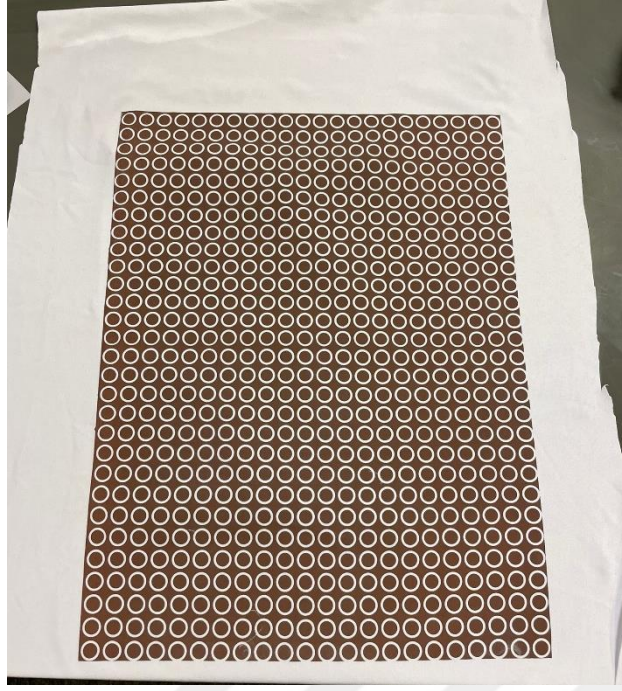
Kumaş üzerine FSY tasarımı

Tasarlanan bant geçiren FSS yapısı serigrafi yöntemi ve yansıtıcılığı yükseltilmiş boya kullanılarak tekstil üzerine basılmıştır. Bunun için gerekli kalıp üretimi Şekil 27'deki gibi yapılmıştır.



Şekil 27. Tasarlanan bant geçiren FSS yapısı için üretilen kalıp

İlgili kalıp kullanılarak pamuk kumaş üzerine uygulanan MTM yapısı Şekil 28'de görülmektedir. Boya uygulandıktan sonra kuruma süreci başlatılmıştır. Poliüretan boya, oda sıcaklığında 24 saat içerisinde kurur. Ancak daha iyi bir sertleşme ve dayanıklılık sağlamak için, 60°C'de 2 saat ısıtım işlemi uygulandı. Bu süreç, boyanın kimyasal ve fiziksel dayanıklılığını artırır ve uzun ömürlü bir kaplama sağlar. Hazırlanan poliüretan boya, tekstil yüzeylerden metal yüzeylere kadar geniş bir uygulama alanında kullanılabilir.



Şekil 28. Kumaş üzerine uygulanan bant geçiren FSS yapısı

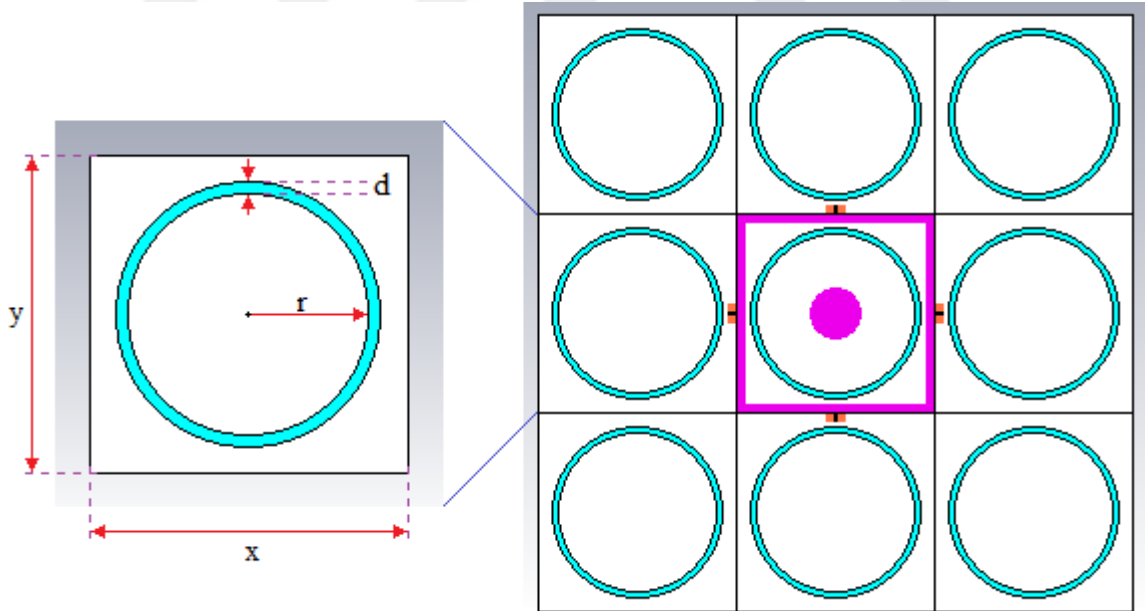
Üretilen FSS yapısının ölçümü için serbest uzay ölçüm yöntemi (Free-Space Measurement) kullanılmıştır. Bu yöntemde bir vektörel ağ analizörü (Vector Network Analyzer-VNA) cihazına iki tane doğrusal kutuplu ve geniş bantlı iki tane horn anten bağlanmıştır.

BULGULAR ve TARTIŞMA

Halka geometrik şekil kullanılarak tasarlanan FSY analizleri

Farklı filtreleme türlerinin gerçekleştirilebileceği FSS yapılarının boyutları ve şekillerine göre filtreleme özelliği ve çalıştıkları frekans bantları değişmektedir. Aşağıdaki çalışmalarda hem bant durduran hem de bant geçiren filtre özellikleri birbirinin tümleyeni olan halka şekilli yapılar kullanılarak analiz edilmiştir. Buna ek olarak, tercih edilen yapının şekli nedeniyle gelen sinyalin polarizasyonundan bağımsız olarak filtreleme işlemi gerçekleştirilmektedir.

Önerilen FSY yapılarında, temel tasarım parametreleri değiştirilerek, -10 dB kazanç eşiğinde maksimum bant genişliğinin elde edilmesi amaçlanmıştır. Bu doğrultuda, CST simülasyon yazılımı kullanılarak kapsamlı analizler gerçekleştirilmiş ve simülasyon sonuçları detaylı olarak değerlendirilmiştir. Tasarımın temelinde, halka formunda bir geometrik yapı esas alınmış olup, bu yapıya ait birim hücre modeli Şekil 29'da sunulmaktadır. Söz konusu birim hücreler, dielektrik bir tabaka üzerinde x-y düzlemine periyodik olarak yerleştirilerek tam yapının oluşturulması sağlanmıştır. Elde edilen bu periyodik yapı, Şekil 30'da ayrıntılı olarak gösterilmektedir.

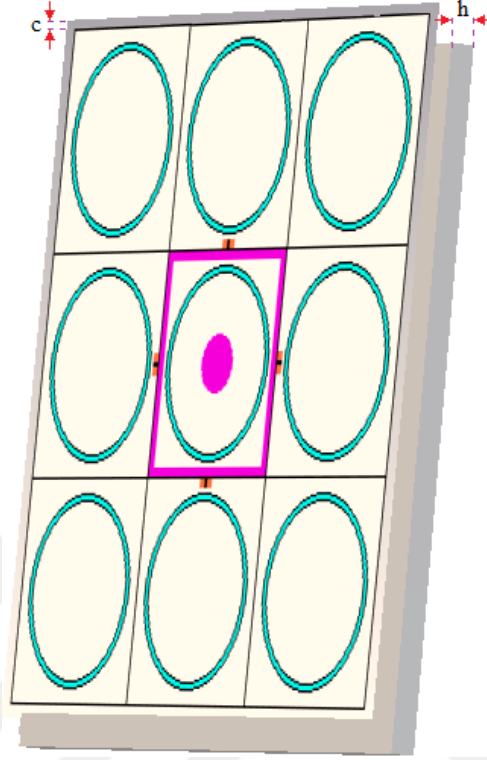


Şekil 29. Bant durduran FSY yapısı

Halka geometrik şekline sahip FSY tasarımında kullanılan temel boyut ve parametreler şu şekildedir:

- Birim hücre boyutu: $x=y=14$ mm

- Dielektrik katman kalınlığı: $h=0,5$ mm
- İletken yüzey et kalınlığı: $c=0,15$ mm
- İletken yüzey yarıçapı: $r=5,47$ mm
- İletken yüzey genişliği: $d=0,5$ mm

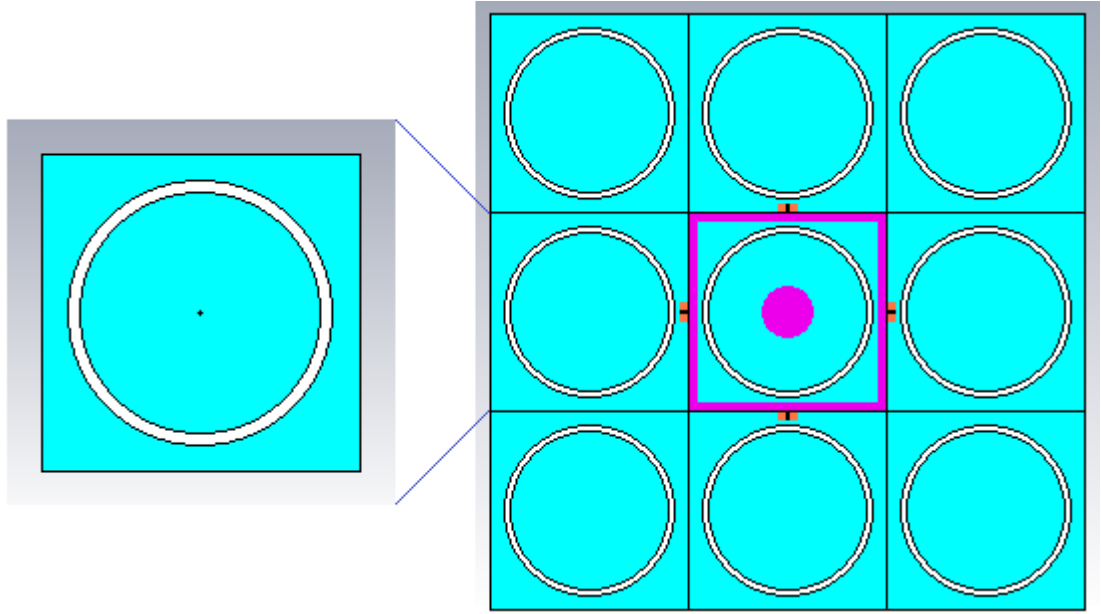


Şekil 30. Bant durduran FSY yapısı yandan görünüşü

Bu tasarım yaklaşımı, birim hücrelerin belirli bir düzende periyodik olarak yerleştirilmesiyle, yapı içerisinde oluşan elektromanyetik etkileşimlerin kontrol edilmesini sağlar. Özellikle, dielektrik katmanın kalınlığı, iletken yüzeyin boyutları ve periyodik hücre yapısı, FSY'nin bant genişliğini ve kazanç değerini doğrudan etkilemektedir. Bu parametrelerin dikkatlice optimize edilmesi, tasarımın istenilen performansa ulaşması açısından kritik bir öneme sahiptir.

Bu analiz sonucunda, -10 dB kazanç değerine sahip maksimum bant genişliği hedefi doğrultusunda halka geometrik şekilli FSY'nin tasarımı gerçekleştirilmiştir. Yapının, elektromanyetik dalgaları nasıl yönlendirdiği ve iletim özellikleri, elde edilen simülasyon grafikleri ile değerlendirilmiştir.

Yapılan Bant durduran FSY yapısının ardından, bu yapının tümleyeni olan Şekil 31'de gösterilen bir hücre tasarlanarak filtreleme davranışını tam tersine döndüren bant geçiren filtre özelliği elde edilmiştir.



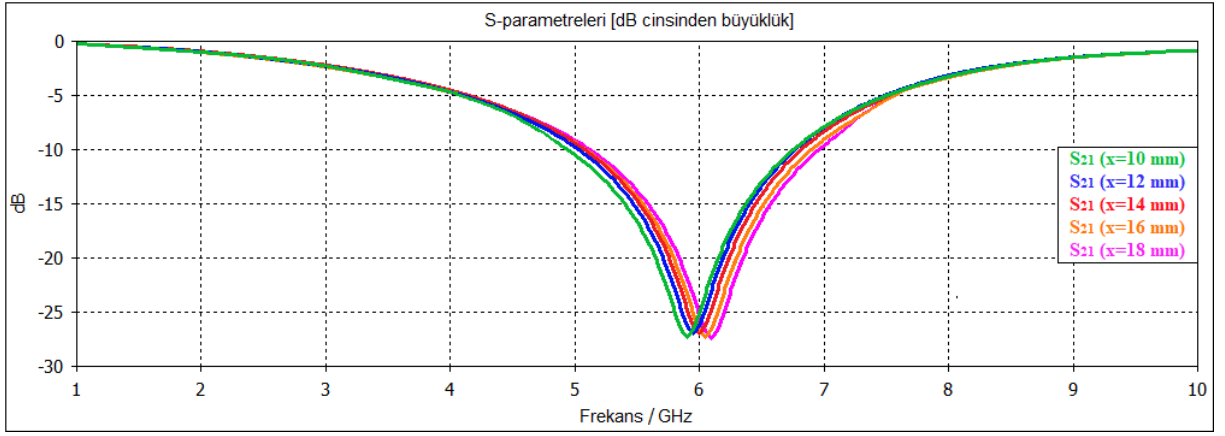
Şekil 31. Bant geçiren FSY yapısı

Halka şekilli FSY x'sinin değiştirilmesine frekans tepkileri

Belirlenen tasarım parametreleri doğrultusunda, halka biçimli FSY yapısında x yönündeki boyutun değiştirilmesiyle elde edilen frekans yanıtları Şekil 32 ve Tablo 3'te sunulmuştur. Bu analiz kapsamında, birim hücre boyutunda yapılan değişikliklerin hem rezonans frekansı hem de bant genişliği üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Simülasyon sonuçlarına göre, birim hücre boyutunun artırılması, rezonans frekansında yükselmeye neden olurken, bant genişliğinde daralma meydana getirmektedir. Özellikle, birim hücre uzunluğundaki her 1 mm'lik artış, bant genişliğinde yaklaşık 15 MHz'lik bir azalma ile sonuçlanmıştır. Bu bulgular, birim hücre boyutunun FSY'nin elektromanyetik karakteristikleri üzerindeki belirleyici etkisini açıkça ortaya koymaktadır.

Bu etki, birim hücre boyutunun artmasıyla, rezonans koşullarının değişmesine ve iletken yüzeydeki elektromanyetik dalgaların yayılma süresinin uzamasına bağlanabilir. Dolayısıyla, tasarım sürecinde birim hücre boyutunun doğru şekilde belirlenmesi, istenilen bant genişliği ve rezonans frekansına ulaşılması açısından kritik bir rol oynamaktadır.



Şekil 32. FSY'nin x değişimine bağlı frekans cevabı

Tablo 3. FSY'nin x değişimine bağlı elde edilen sonuçlar

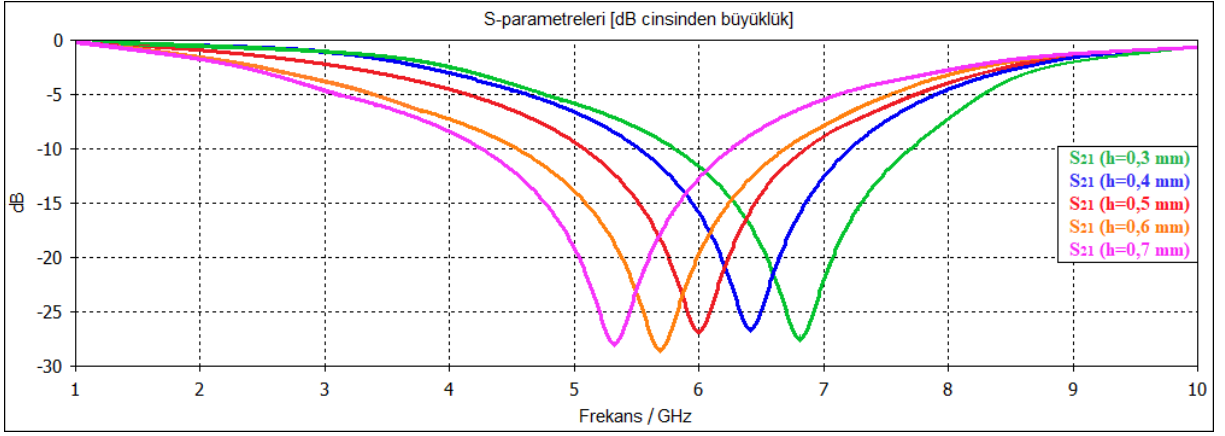
Birim Hücre Boyutu (mm)	Alt Kesim Frekansı (GHz)	Üst Kesim Frekansı (GHz)	Rezonans Frekansı (GHz)	Bant Genişliği (GHz)	Maksimum Soğurma Değeri (dB)
10	4,9327	6,7212	5,8942	1,7885	27,5532
12	5,0177	6,7692	5,9423	1,7515	27,2340
14	5,0577	6,7981	6,0001	1,7404	27,4468
16	5,0962	6,8846	6,0481	1,6884	27,3404
18	5,1538	6,9231	6,1058	1,6693	27,6596

Halka şekilli FSY h'sinin değiştirilmesine frekans tepkileri

Halka geometrisine sahip FSY yapısında, dielektrik katman kalınlığı olan h parametresinin değiştirilmesiyle elde edilen frekans yanıtları Şekil 33 ve Tablo 4'te sunulmuştur. Bu analizde, dielektrik tabakanın kalınlığındaki değişimlerin rezonans frekansı ve bant genişliği üzerindeki etkileri detaylı biçimde incelenmiştir.

Tablo 4'teki verilere göre, dielektrik katmanın kalınlığının artırılması, rezonans frekansının azalmasına, buna karşın bant genişliğinin artmasına neden olmaktadır. Bu ilişki, dielektrik kalınlığının elektromanyetik dalgaların yayılma hızı ve faz gecikmesi üzerinde doğrudan etkili bir parametre olmasından kaynaklanmaktadır. Katman kalınlığı arttıkça, elektromanyetik dalga daha uzun bir yol kat etmek zorunda kaldığı için, sistemin rezonans frekansı aşağı kaymaktadır.

Elde edilen sonuçlar, dielektrik kalınlığında yapılan her 0,1 mm'lik artışın, bant genişliğini yaklaşık 1,5 MHz oranında artırdığını göstermektedir. Bu bulgu, özellikle bant genişliğinin hassas kontrolü gereken tasarımlarda, dielektrik kalınlığının önemli bir ayar parametresi olarak kullanılabileceğini ortaya koymaktadır.



Şekil 33. FSY'nin h değişimine bağlı frekans cevabı

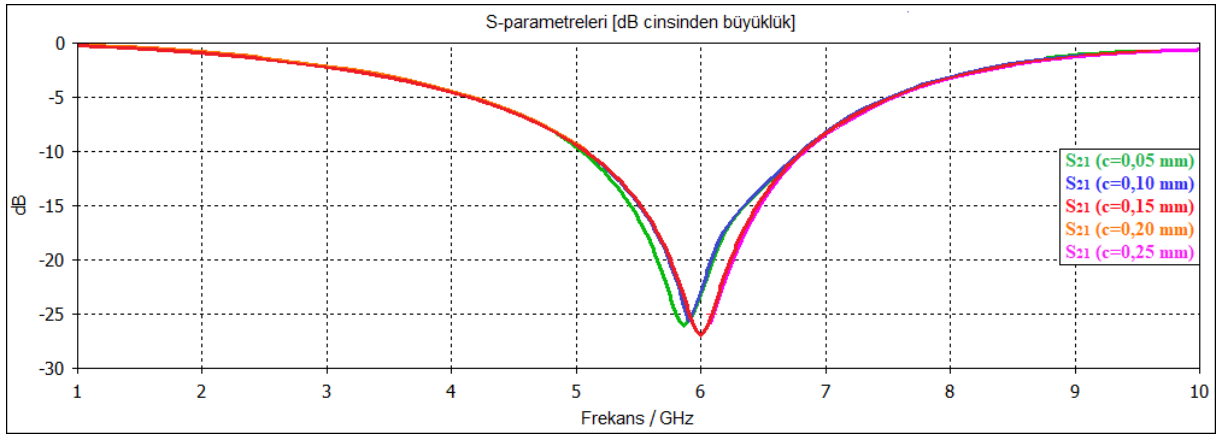
Tablo 4. FSY'nin h değişimine bağlı elde edilen sonuçlar

Katman Kalınlığı (mm)	Alt Kesim Frekansı (GHz)	Üst Kesim Frekansı (GHz)	Rezonans Frekansı (GHz)	Bant Genişliği (GHz)	Maksimum Soğurma Değeri (dB)
0,3	5,8173	7,6923	6,8173	1,5750	-27,7660
0,4	5,5288	7,2115	6,4135	1,6827	-26,9149
0,5	5,0865	6,8462	6,0000	1,7596	-27,2340
0,6	4,5288	6,6731	5,6731	2,1442	-28,7234
0,7	4,2308	6,2885	5,3077	2,1577	-28,2979

Halka şekilli FSY c'sinin değiştirilmesine frekans tepkileri

Halka biçimli frekans seçici yüzey (FSY) yapısında, iletken katman kalınlığının (c parametresi) değiştirilmesiyle oluşan frekans tepkileri Şekil 34 ve Tablo 5'te sunulmuştur. Bu analiz, iletken yüzey kalınlığının rezonans frekansı ve bant genişliği üzerindeki etkilerini değerlendirmeyi amaçlamaktadır.

Şekil 34 ve Tablo 5 incelendiğinde, iletken tabakanın kalınlığının artırılması durumunda hem rezonans frekansında hem de bant genişliğinde artış eğilimi gözlemlenmiştir. Başka bir ifadeyle, iletken yüzey kalınlığı ile bu iki parametre arasında doğrusal bir ilişki bulunmaktadır. Bu durum, iletken yüzeyin kalınlaşmasıyla birlikte elektromanyetik dalgaların yüzeyle olan etkileşim süresinin kısılması ve dolayısıyla iletim hattındaki kayıpların azalması ile açıklanabilir. Kalın iletken yüzey, elektromanyetik enerjinin daha düşük dirençle iletilmesine olanak tanıyarak daha geniş frekans aralıklarında etkili bir iletim sağlamaktadır.



Şekil 34. FSY'nin c değişimine bağlı frekans cevabı

Tablo 5. FSY'nin c değişimine bağlı elde edilen sonuçlar

Katman Kalınlığı (mm)	Alt Kesim Frekansı (GHz)	Üst Kesim Frekansı (GHz)	Rezonans Frekansı (GHz)	Bant Genişliği (GHz)	Maksimum Soğurma Değeri (dB)
0,05	5,0411	6,8365	5,8558	1,7954	-26,2766
0,10	5,0505	6,8295	5,8750	1,7790	-25,9574
0,15	5,0673	6,8177	6,0000	1,7504	-27,1277
0,20	5,0769	6,8085	6,0096	1,7316	-27,2340
0,25	5,0865	6,7988	6,0192	1,7123	-27,3404

Bu tablodaki verilere göre, c'deki her bir birimlik artış, rezonans frekansında ve bant genişliğinde belirgin bir artışa neden olmaktadır. Bu etki, tasarım sürecinde c'nin kalınlığının belirlenmesi açısından önemli bir içgörü sunmaktadır. İletken yüzey kalınlığı, elektromanyetik dalgaların yüzeyle etkileşim yoğunluğunu etkileyen temel bir parametredir.

Özellikle, bant genişliğinin azaltılması gereken uygulamalarda, c'nin artırılması etkili bir yöntem olarak değerlendirilebilir. Bununla birlikte, bu artışın, malzeme maliyetini ve üretim zorluklarını da artırabileceği göz önünde bulundurulmalıdır.

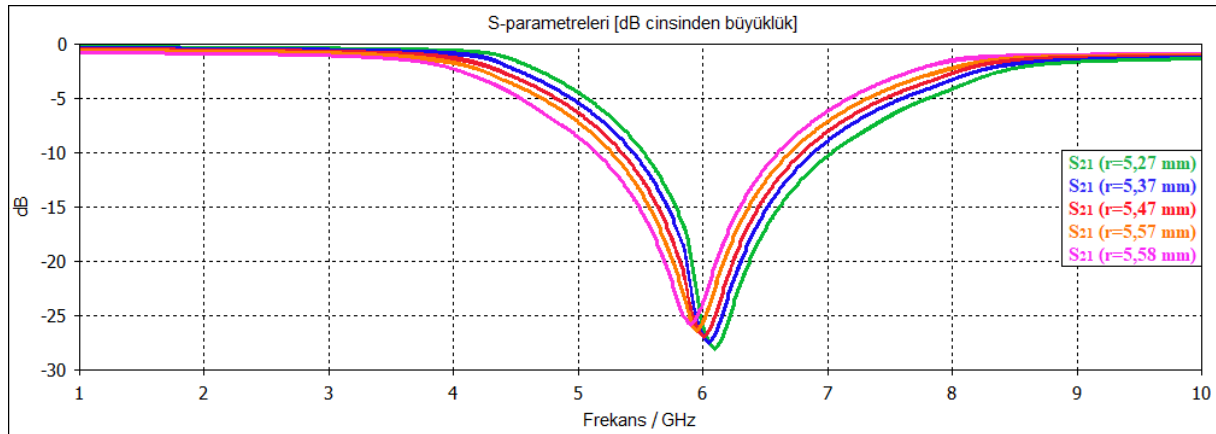
Halka şekilli FSY r'sinin değiştirilmesine frekans tepkileri

Halka geometrik şekilli FSY'nin r'nin değiştirilmesiyle frekans karakteristiğinde meydana gelen değişiklikler, Şekil 35 ve Tablo 6'da gösterilmiştir. Bu analiz, yarıçap değerinin rezonans frekansı ve bant genişliği üzerindeki etkilerini detaylı bir şekilde ortaya koymaktadır.

Elde edilen sonuçlar, r parametresindeki artışın, bant genişliğinde iyileşmeye yol açarken, rezonans frekansında düşüşe neden olduğunu ortaya koymaktadır. Başka bir deyişle, r büyüdükçe bant genişliği artarken, rezonans frekansı düşmektedir. Bu etki, r'deki artışın, elektromanyetik dalgaların daha uzun bir iletim yolunda ilerlemesine neden olmasıyla açıklanabilir.

FSY r'sinde her 0,1 mm'lik bir artış, rezonans frekansında yaklaşık 48 MHz'lik bir sapma meydana getirmektedir. Bu durum, r'nin elektromanyetik dalgaların iletim süresi ve iletim yolunu etkileyen önemli bir parametre olduğunu göstermektedir. Artan r, dalgaların daha geniş bir yüzeyle etkileşime girmesine neden olur ve bu da iletim süresinin uzamasına, dolayısıyla rezonans frekansının düşmesine yol açar.

Bu tasarım stratejisi, geniş bant genişliğine ihtiyaç duyulan uygulamalarda faydalı olabilir. Özellikle, geniş bant performansı sağlamak amacıyla iletken yüzey yarıçapının artırılması, tasarımcıya bant genişliğini optimize etme imkânı sunmaktadır. Bununla birlikte, rezonans frekansının düşmesi istenmeyen bir etki olarak değerlendirilebilir.



Şekil 35. FSY'nin r değişimine bağlı frekans cevabı

Tablo 6. FSY'nin r değişimine bağlı elde edilen sonuçlar

Yüzey Yarıçapı (mm)	Alt Kesim Frekansı (GHz)	Üst Kesim Frekansı (GHz)	Rezonans Frekansı (GHz)	Bant Genişliği (GHz)	Maksimum Soğurma Değeri (dB)
5,27	5,5385	6,9423	6,1058	1,4038	-28,1915
5,37	5,4615	6,8750	6,0577	1,4135	-27,6596
5,47	5,3654	6,7885	6,0000	1,4231	-27,1277
5,57	5,2788	6,7019	5,9519	1,4231	-26,5957
5,67	5,1538	6,5962	5,9135	1,4423	-26,0638

Halka şekilli FSY d'sinin değiştirilmesine frekans tepkileri

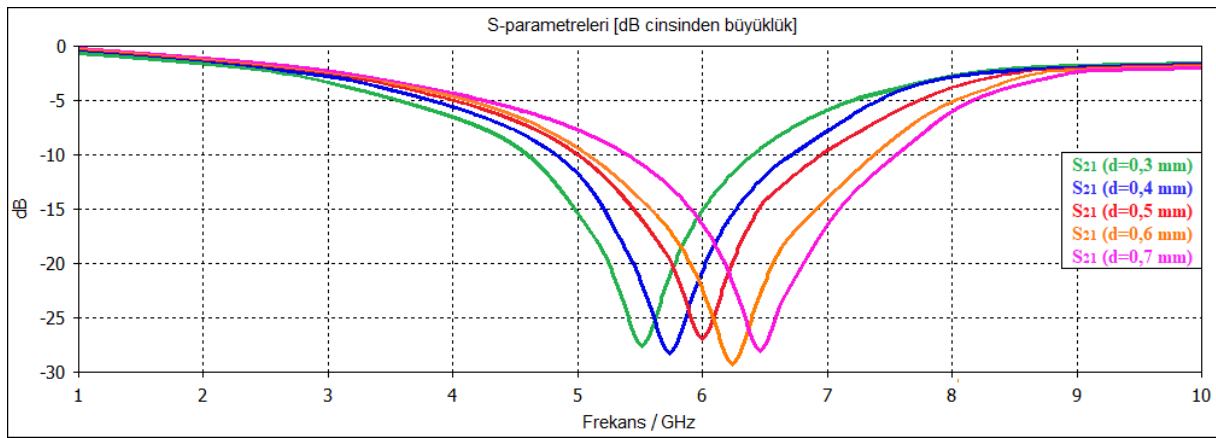
Halka geometrik şekilli FSY d'sinin değiştirilmesiyle, frekans tepkilerinin nasıl etkilendiği Şekil 36 ve Tablo 6'da gösterilmiştir. Bu analizde, d'nin rezonans frekansı ve bant genişliği üzerindeki etkileri detaylı bir şekilde incelenmiştir.

Elde edilen sonuçlar, d'nin, rezonans frekansı ve bant genişliği ile doğru orantılı olduğunu göstermektedir. Başka bir ifadeyle, d arttıkça, rezonans frekansı ve bant genişliği de artmaktadır. Bu etki, iletken yüzeyin yüzey akım yoğunluğunun değişmesi ve elektromanyetik dalgaların iletim yolunun kısalması ile ilişkilendirilebilir. FSY d'si arttıkça, elektromanyetik

dalganın yayılma yolu kısalmış ve bu durum dalganın iletim süresini azaltarak rezonans frekansının yükselmesine neden olur.

FSY d'si arttıkça hem rezonans frekansında hem de bant genişliğinde artış meydana gelmektedir. Bu artış, elektromanyetik dalgaların daha kısa bir iletim yolunda yayılması ile ilişkilendirilebilir. İletken yüzeyin daha geniş olması, yüzey akımının daha geniş bir alana yayılmasını sağlar ve bu da dalgaların yüzeyle olan etkileşim süresini kısaltır. Bu etki, rezonans frekansının artmasına neden olurken, aynı zamanda bant genişliğini de genişletmektedir.

Bu ilişki, bant genişliği ve rezonans frekansı kontrolünün, iletken yüzey genişliğini artırarak iyileştirilebileceğini göstermektedir. Genişletilmiş bir bant genişliği, çok bantlı cihazlarda istenilen bir özellik olup, daha geniş bir frekans aralığında kararlılık sağlar.



Şekil 36. FSY'nin d değişimine bağlı frekans cevabı

Tablo 7. FSY'nin d değişimine bağlı elde edilen sonuçlar

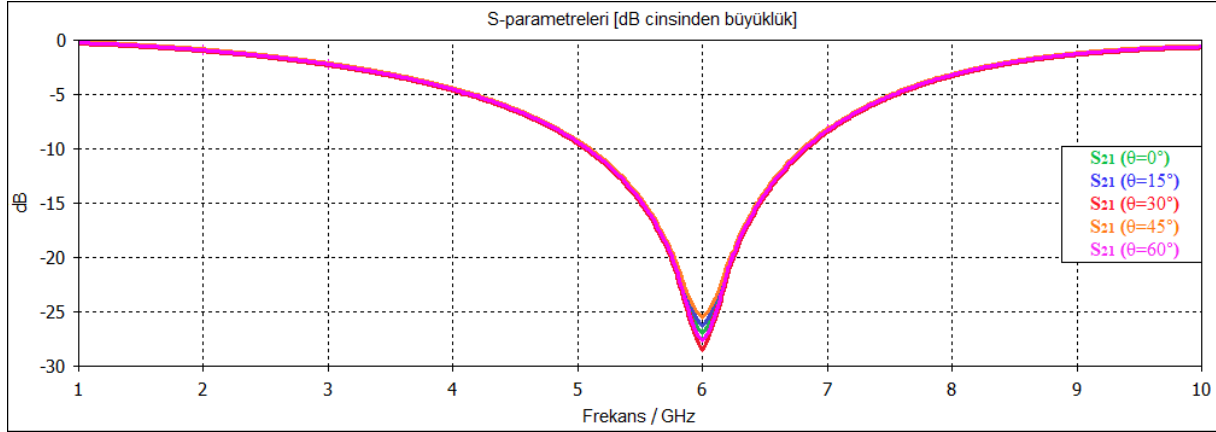
Katman Kalınlığı (mm)	Alt Kesim Frekansı (GHz)	Üst Kesim Frekansı (GHz)	Rezonans Frekansı (GHz)	Bant Genişliği (GHz)	Maksimum Soğurma Değeri (dB)
0,3	4,6058	6,4038	5,5000	1,7981	-27,7660
0,4	4,8462	6,7212	5,7212	1,8750	-28,4043
0,5	5,0192	6,9615	6,0000	1,9423	-27,2340
0,6	5,0962	7,2248	6,2500	2,1286	-29,2553
0,7	5,4135	7,5673	6,4712	2,1538	-28,1915

Halka şekilli FSY θ açısının değiştirilmesine frekans tepkileri

Halka geometrik şekilli FSY'nin θ açısının değiştirilmesiyle rezonans frekansı ve bant genişliği üzerindeki etkileri, Şekil 37 ve Tablo 8'de gösterilmiştir. Bu analizde, θ açısının 0° 'den 60° 'ye kadar 15° aralıklarla artırılarak, rezonans frekansı ve bant genişliğindeki değişimler incelenmiştir.

Elde edilen sonuçlar, θ açısındaki değişikliklerin rezonans frekansı ve bant genişliği üzerinde önemli bir etki yaratmadığını göstermektedir. Başka bir ifadeyle, 0° ile 60° arasındaki açı değişimlerinde FSY'nin performansında belirgin bir değişiklik gözlemlenmemiştir. Bu

durum, FSY'nin açığa ve polarizasyona karşı bağımsız bir yapı olarak tasarlandığını göstermektedir. Rezonans frekansı ve bant genişliği, dalga geliş açısındaki değişikliklere karşı duyarsız bir yapı sergilemiştir. Bu, FSY'nin açı ve polarizasyona bağımsız bir şekilde çalıştığını göstermektedir. Bu tür bir özellik, farklı açılardan gelen elektromanyetik dalgaları etkili bir şekilde soğurabilen veya iletebilen cihazların tasarımı açısından büyük bir avantajdır.



Şekil 37. FSY'nin θ değişimine bağlı frekans cevabı

Tablo 8. FSY'nin θ değişimine bağlı elde edilen sonuçlar

Dalga Geliş Açısı (°)	Alt Kesim Frekansı (GHz)	Üst Kesim Frekansı (GHz)	Rezonans Frekansı (GHz)	Bant Genişliği (GHz)	Maksimum Soğurma Değeri (dB)
0	5,0769	6,1923	6,0000	1,1154	-26,9149
15	5,0721	6,1923	6,0000	1,1202	-26,2766
30	5,0865	6,1923	6,0000	1,1058	-28,6170
45	5,0673	6,1923	6,0000	1,1250	-25,6383
60	5,0817	6,1923	6,0000	1,1106	-27,6596

Üretimi yapılan halka şekilli bant durduran FSY'nin frekans tepkileri

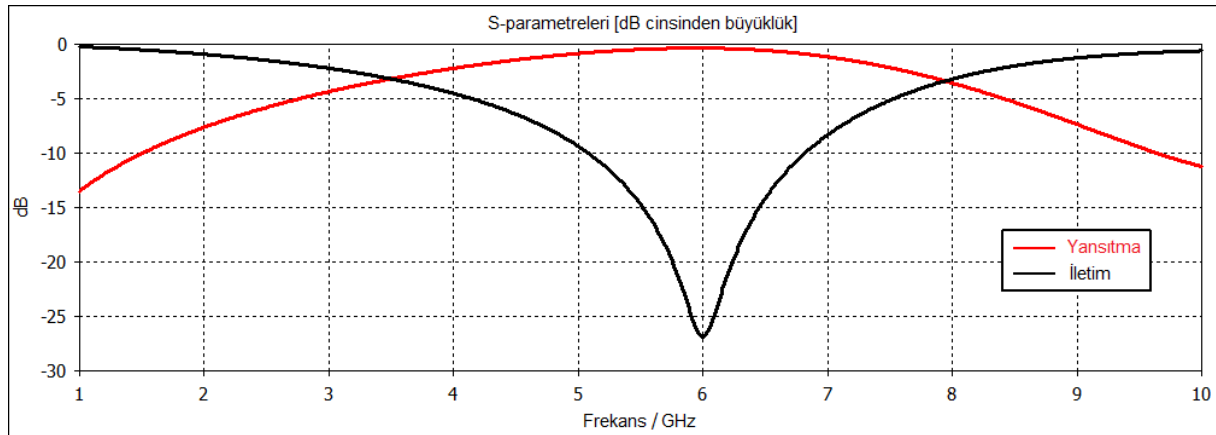
Yapılan kapsamlı tasarım çalışmaları sonucunda, halka geometrisine dayalı olarak geliştirilen en uygun FSY yapısına ait performans sonuçları Şekil 38'de sunulmuştur. Bu yapı, özellikle elektromanyetik dalga soğurumu, bant genişliği ve rezonans frekansı gibi temel performans ölçütleri açısından yüksek başarı göstermektedir. Optimizasyon sürecinde; birim hücre boyutu, dielektrik tabaka kalınlığı, iletken yüzey kalınlığı, yarıçap ve genişlik gibi geometrik parametreler sistematik olarak değiştirilmiş ve her bir değişkenin FSY performansı üzerindeki etkisi detaylı olarak analiz edilmiştir. Bu aşamalı iyileştirme süreci sonunda, tüm tasarım parametreleri için optimum değerler belirlenmiş ve yapı, hedeflenen performans kriterlerine en yüksek düzeyde yanıt verecek şekilde optimize edilmiştir.

Gerçekleştirilen tasarım süreci sonucunda, en yüksek performansın elde edildiği parametre değerleri ve ilgili sonuçlar aşağıda özetlenmiştir: Tasarlanan FSY yapısının bant genişliği 1,75 GHz olarak belirlenmiş, maksimum yansıtma frekansı 6,00 GHz seviyesinde

tespit edilmiştir. Ayrıca, yapı -27,13 dB'lik maksimum soğurma değeri ile dikkat çekici bir elektromanyetik enerji sönümleme kapasitesi göstermiştir. Bu bulgular, geliştirilen tasarımın yüksek verimlilikte çalıştığını ve frekans seçici uygulamalarda etkili bir çözüm sunduğunu açıkça ortaya koymaktadır.

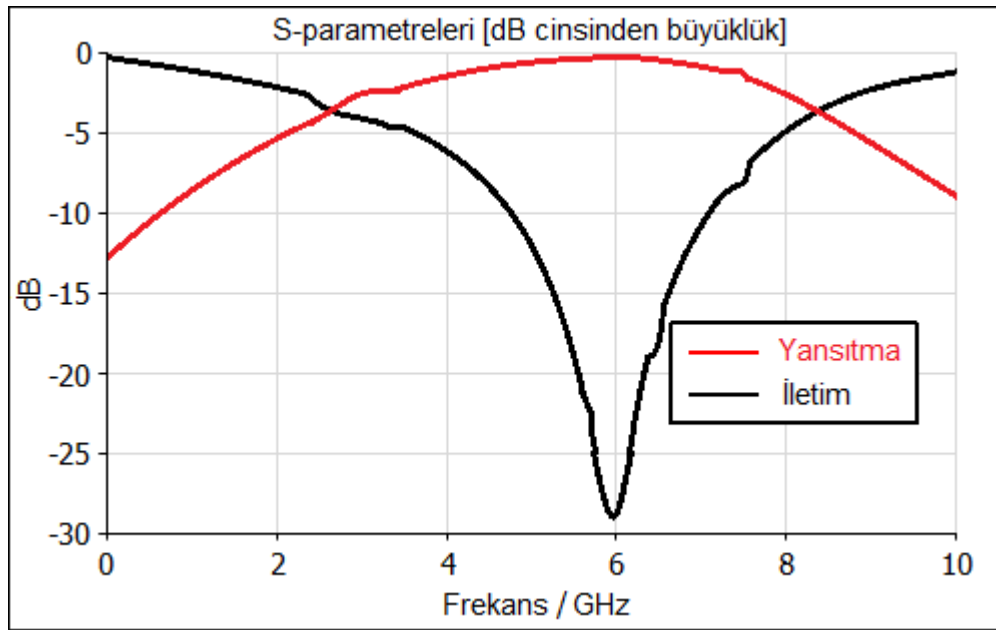
Bu tasarımın en dikkat çekici özelliği, elektromanyetik dalgaları çok büyük oranda soğurabilmesi ve yansımayı önemli ölçüde azaltmasıdır. Özellikle, -27,13 dB'lik maksimum soğurma değeri, elektromanyetik dalgaların büyük bir kısmının yüzeyde soğurulduğunu ve yansımanın minimize edildiğini göstermektedir. Bu özellik, elektromanyetik girişim (EMI) koruması gerektiren uygulamalarda oldukça önemlidir. Ayrıca, FSY'nin frekans seçici özelliği sayesinde, belirli bir frekans aralığında istenmeyen sinyalleri durdurarak bant durduran filtre (band-stop filter) işlevi görmesi sağlanmaktadır. Bu filtreleme karakteristiği, radyo frekansı (RF) uygulamalarında ve sinyal işleme sistemlerinde önemli bir avantaj sunar.

Bir diğer önemli bulgu, tasarlanan FSY'nin dalga geliş açısından bağımsız bir performans sergilemesidir. Bu, elektromanyetik dalgaların geliş açısına bağlı olmaksızın, belirlenen frekans bandında yüksek soğurma kapasitesinin korunmasını sağlamaktadır. Bu özellik, cihazın farklı yönlerden gelen sinyaller karşısında da aynı derecede koruma sağlamasına olanak tanır. Bu durum, elektromanyetik uyumluluk (EMC) standartlarına uyum sağlamak isteyen tasarımlar için büyük bir avantaj sunmaktadır. Özellikle, geniş bant koruması gerektiren cihazlarda, dalga geliş açısına bağımsızlık önemli bir gereksinimdir.



Şekil 38. Simülasyonda tasarlanan FSY'nin frekans cevabı

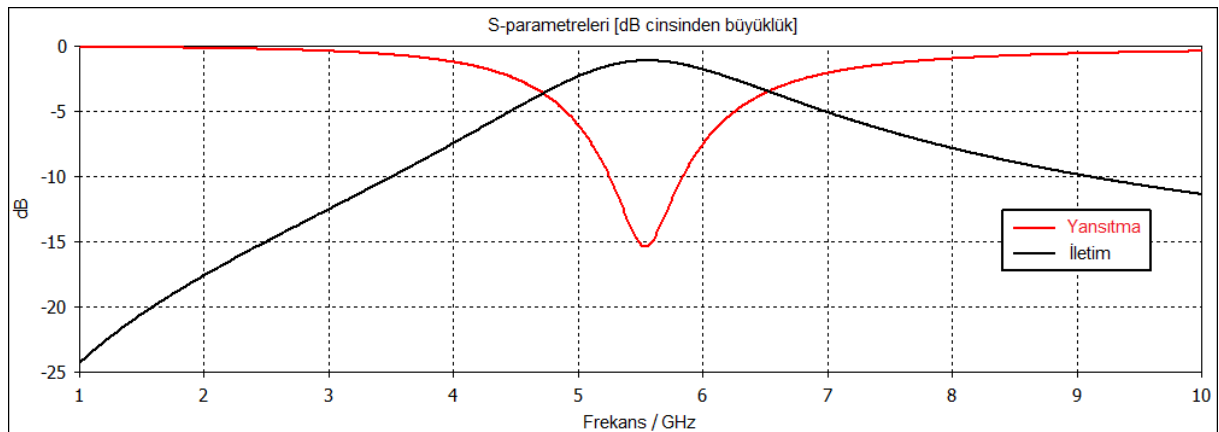
Poliüretan boya kullanılarak tekstil üzerinde gerçekleştirilen tasarıma ait frekans karakteristikleri Şekil 39'de gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlar ile simülasyonda elde edilen sonuçlar büyük benzerlikler göstermektedir. Ancak bazı frekans salınımlarının da olduğu görülmektedir. Bunun sebebinin ise yüzey de oluşan kusurlardan kaynakladığı düşünülmektedir.



Şekil 39. Tasarlanan FSY'nin frekans cevabı

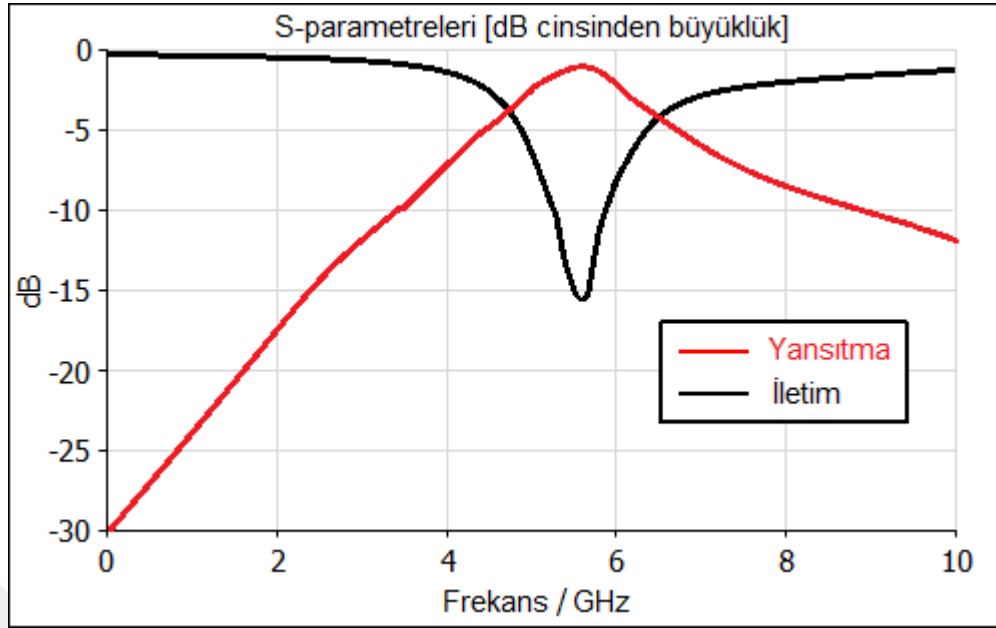
Üretimi yapılan halka şekilli bant durduran FSY'nin frekans tepkileri

Halka şeklinde tasarlanmış frekans seçici yüzeyin (FSY) en yüksek performans gösteren versiyonuna ait analiz sonuçları Şekil 40'ta sunulmuştur. Tasarım sürecinin sonunda, optimize edilen parametrelerle elde edilen performans değerleri şu şekilde özetlenebilir: Yapının bant genişliği yaklaşık 1,77 GHz olarak belirlenmiş, maksimum yansıtma frekansı 5,50 GHz olarak ölçülmüştür. Ayrıca, sistemin maksimum soğurma seviyesi -15,64 dB olarak kaydedilmiştir. Elde edilen bu sonuçlar doğrultusunda, tasarlanan yapı 5,5 GHz merkez frekansında bant geçiren bir filtre karakteristiği sergilemekte olup, seçici iletim özelliği sayesinde ilgili frekans bandında başarılı bir performans göstermektedir.



Şekil 40. Simülasyonda tasarlanan FSY'nin frekans cevabı

Poliüretan boya kullanılarak tekstil üzerinde gerçekleştirilen tasarıma ait frekans karakteristikleri Şekil 41'de gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlar ile simülasyonda elde edilen sonuçlar büyük benzerlikler göstermektedir.



Şekil 41. Tasarlanan FSY'nin frekans cevabı

Literatürle Karşılaştırmalı Değerlendirme

Bu tez çalışması, FSY tasarımında kullanılan halka geometrisi, üretim yöntemi ve uygulama yüzeyi bakımından literatürdeki benzer çalışmalardan önemli farklılıklar göstermektedir. Çalışmanın literatüre olan katkısı Tablo 9'da da gösterildiği üzere hem yapısal hem de işlevsel düzeyde açıkça ortaya konulmaktadır

Öncelikle, tezde kullanılan halka rezonatör geometrisi, hem band-stop hem de band-pass özellikleri aynı yapı üzerinden optimize edilebilir şekilde tasarlanmıştır. Bu durum, klasik SRR veya CSRR tabanlı yapıların aksine daha fazla işlevsellik ve tasarım esnekliği sunmaktadır. Örneğin, Jalil et al. (2015) tarafından geliştirilen CSRR tabanlı RFID etiket yapısı çok bantlı kodlama amacı taşıırken, yalnızca belirli bir uygulama alanına odaklanmıştır. Buna karşın, bu tezdeki halka yapısı haberleşme sistemleri, EMI koruması ve radar soğurucu yüzeyler gibi çoklu uygulamalar için kullanılabilecek parametrelerle zenginleştirilmiştir.

Üretim yöntemi açısından tez çalışması, literatürdeki birçok örnekten farklılaşmaktadır. Lee et al. (2017) çalışmasında, gümüş mürekkep ile Chanel logolu bir absorpsiyon yapısı serigrafi yöntemiyle tekstil yüzeye uygulanmış ve 10.8 GHz'de dar bantlı soğurma sağlanmıştır. Bu çalışma daha çok moda ve giyilebilir teknoloji bağlamında değerlendirilmiştir (Lee et al. 2017). Buna karşılık, bu tez çalışmasında geliştirilen FSY yapısı sade, mühendislik odaklı ve daha geniş bantta çalışabilecek şekilde tasarlanmış, üretimi kolay ve maliyeti düşük olan poliüretan bazlı iletken boya kullanılarak tekstil yüzey üzerine uygulanmıştır. Bu malzeme

seçimi ve üretim yaklaşımı, çalışmanın sanayiye entegrasyon potansiyelini önemli ölçüde artırmaktadır.

Çelenk et al. (2024) tarafından geliştirilen tamamen tekstil tabanlı metamalzeme yapısı, ultra geniş bantta (13.1–31.13 GHz) çalışmakta olup yüksek frekanslı uygulamalar için uygundur. Ancak bu frekans aralığı özel amaçlıdır ve daha az yaygın kullanım alanına sahiptir (Çelenk *et al.* 2024). Bu tez çalışmasında ise C-bandı olarak bilinen 5.0–6.2 GHz frekans aralığı hedeflenmiş ve bu bantta -27 dB'ye varan yüksek soğurma performansı elde edilmiştir. C-bandı, radar sistemleri, 5G altyapıları ve EMI filtreleme gibi uygulamalarda yaygın olarak kullanılmakta olup, bu durum çalışmanın pratik değerini artırmaktadır.

Yong et al. (2019) tarafından geliştirilen esnek frekans seçici yüzey yapısı, PET yüzey üzerine nanoparçacık mürekkep ile uygulanmış ve açılı bağımsız performans göstermiştir. Bu yönüyle bu tez çalışmasıyla benzerlik göstermektedir. Ancak önerilen halka şekilli yapı, daha düşük frekanslarda benzer geliş açısı kararlılığı sunmakta, ayrıca çoklu işlevsellik kazandırılmış bir tasarım yaklaşımı içermektedir (Yong *et al.* 2019). Benzer şekilde, Long et al. (2021) tarafından önerilen grafen bazlı geniş bantlı absorpsiyon yapısı yüksek performanslı olmasına rağmen, kullanılan grafen mürekkebin yüksek maliyeti ve işleme zorlukları nedeniyle endüstriyel üretim açısından bazı kısıtlar taşımaktadır (Long *et al.* 2021). Tez çalışmasında bu sorun, ucuz ve yaygın olarak uygulanabilen poliüretan esaslı boya ile aşılmıştır.

Can ve Yılmaz (2016) tarafından geliştirilen tekstil tabanlı negatif indeksli metamalzeme yapısı X-bandında radar kesit alanı azaltımı amacı taşımaktadır. Bu yapı, klasik SRR tipi rezonatörlerin sınırlı geometrik çeşitliliğiyle tasarlanmıştır (Can and Yılmaz 2016). Buna karşın bu tez çalışmasında, halka rezonatörün birim hücre boyutu, yarıçapı, genişliği ve kalınlığı gibi parametrelerinin sistematik biçimde değiştirilmesiyle yapı frekans cevabı üzerinde yüksek düzeyde kontrol sağlanmıştır.

Binion et al. (2018) tarafından yayımlanan derleme niteliğindeki çalışmada, metamalzeme tabanlı anten sistemlerinin genel eğilimleri tartışılmış ancak üretime dönük uygulamalara yer verilmemiştir (Binion *et al.* 2018). Bu tez çalışması ise yalnızca teorik analizlerle sınırlı kalmayıp, doğrudan üretilebilir bir tasarım sunmakta ve önerilen yapının farklı uygulamalarda test edilmesine olanak tanımaktadır.

Tüm bu karşılaştırmalar doğrultusunda, bu tez çalışmasının literatüre özgün katkıları şu şekilde özetlenebilir:

1. İlk kez poliüretan bazlı iletken boya kullanılarak tekstil yüzey üzerine serigrafi yöntemiyle FSY yapısı uygulanmıştır.

2. Geliştirilen halka yapısı, hem band-stop hem band-pass davranış gösterebilecek çok işlevli ve parametrik olarak optimize edilebilir bir geometri sunmaktadır.
3. C-bandı gibi yaygın ve kritik uygulama alanlarında çalışmakta, bu yönüyle literatürdeki yüksek frekanslı çözümlerden ayrılmaktadır.
4. Yapı, elektromanyetik dalgaların geliş açısına karşı duyarsızlık göstermekte ve bu durum yön bağımsız koruma gerektiren uygulamalar için büyük avantaj sağlamaktadır.
5. Kullanılan geometri, klasik SRR/CSRR yapılarına göre daha sade, daha düşük maliyetli ve üretim açısından daha uygun bir alternatif oluşturmaktadır.

Tablo 9. Literatür karşılaştırma tablosu

Çalışma	Yapı Türü	Uygulama Yüzeyi	Frekans Bandı	Simülasyon Aracı	Üretim Yöntemi	Öne Çıkan Katkısı
Bu Çalışma	Halka şekilli FSY (band-stop ve band-pass)	Tekstil yüzeye poliüretan iletken boya (serigrafi)	5.0–6.2 GHz (C-Band)	CST Studio Suite 3D	Serigrafi ile poliüretan iletken boya uygulaması	Düşük maliyetli, geniş bantlı ve açıdan bağımsız FSY yapısı
(Lee <i>et al.</i> 2017)	Chanel logolu absorpsiyon yapısı	Tekstil yüzeye gümüş mürekkep (serigrafi)	10.8 GHz	CST Microwave Studio	Serigrafi ile gümüş mürekkep uygulaması	Moda tasarımıyla entegre tek bantlı soğurucu
(Celenk <i>et al.</i> 2024)	Tam tekstil tabanlı geniş bant MTM absorpsiyon	Keçe kumaş (tam tekstil MTM)	13.1–31.13 GHz	CST Microwave Studio	İletken iplik ve keçe kumaş	UWB absorpsiyon, tamamen tekstil temelli üretim
(Yong <i>et al.</i> 2019)	Düşük profilli esnek FSS	PET yüzey (serigrafi)	9.1–11.0 GHz	CST Microwave Studio	Serigrafi ile nanoparçacık baskı	Esnek yapısı ve geliş açısı duyarsızlığı
(Long <i>et al.</i> 2021)	Grafen bazlı esnek MTM soğurucu	Poliamid yüzey (serigrafi)	7.88–18.01 GHz	CST Microwave Studio	Serigrafi ile grafen mürekkep uygulaması	Grafen bazlı yüksek esnekliğe sahip geniş bantlı absorpsiyon
(Can and Yılmaz 2016)	Textile tabanlı negatif indeksli MTM	Tekstil yüzey	8–12 GHz (X-Band)	CST Studio Suite	MTM yüzey kaplama	RCS azaltımı ve negatif indeksli MTM
(Binion <i>et al.</i> 2018)	MTM destekli anten sistemleri (derleme)	Antene entegre MTM yüzey	Çeşitli	Farklı platformlar	Genel MTM yüzey entegrasyonu	MTM uygulamalarının genel incelemesi

SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, elektromanyetik özellikleri geliştirilmiş bir metamalzeme tabanlı FSY yapısı tasarlanmış ve analiz edilmiştir. Geliştirilen yapı hem bant geçiren (band-pass) hem de bant durduran (band-stop) filtre davranışı sergileyebilecek biçimde kurgulanmıştır. Tasarım sürecinde, FSY performansını doğrudan etkileyen başlıca parametreler olan birim hücre boyutu, dielektrik katmanın kalınlığı, iletken katmanın kalınlığı, iletken yüzeyin yarıçapı ve genişliği gibi değişkenler dikkate alınmış; bu değişkenlerin elektromanyetik dalgaların iletimi ve soğurulması üzerindeki etkileri detaylı olarak değerlendirilmiştir. Yapılan analizler, her bir parametrenin sistem performansına katkısını ortaya koyarak, yapı için en uygun tasarım kombinasyonlarının belirlenmesini sağlamıştır.

Gerçekleştirilen simülasyon ve analizler sonucunda, halka formuna sahip bir FSY yapısı geliştirilmiştir. Tasarlanan yapı, geniş frekans bandı, yüksek elektromanyetik soğurma düzeyi ve düşük geri yansıma katsayısı gibi önemli performans kriterleri bakımından başarılı sonuçlar vermiştir. Geliştirilen FSY hem bant geçiren hem de bant durduran filtre özellikleri sergileyerek, EMI koruması, RF filtreleme ve radar uygulamaları gibi çeşitli mühendislik alanlarında kullanım potansiyeline sahiptir. Ayrıca, yapının dalga geliş açısına duyarlı bir yanıt vermesi, onu çok yönlü uygulamalarda tercih edilebilir kılan esnek ve adaptif bir çözüm haline getirmektedir.

Tasarım süreci sonunda geliştirilen frekans seçici yüzeyin (FSY) iki farklı çalışma moduna ait performans parametreleri aşağıdaki şekilde elde edilmiştir:

Bant Durduran (Band-Stop) Özellikli FSY Yapısı:

- Elde edilen bant genişliği yaklaşık 1,77 GHz olarak belirlenmiştir.
- Yapının maksimum yansıtma davranışı 5,50 GHz frekansta gözlemlenmiştir.
- Maksimum elektromanyetik soğurma düzeyi -15,64 dB olarak hesaplanmıştır.

Bant Geçiren (Band-Pass) Özellikli FSY Yapısı:

- Bu modda ölçülen bant genişliği 1,75 GHz'dir.
- Geçirgenliğin en yüksek olduğu merkez frekans 6,00 GHz olarak tespit edilmiştir.
- Maksimum soğurma performansı ise -27,13 dB seviyesine ulaşmıştır.

Elde edilen bulgular, tasarlanan yapının hem bant geçiren hem de bant durduran filtre işlevlerini başarılı bir şekilde yerine getirdiğini göstermektedir. Bu yapı, özellikle EMI ve EMC standartlarını karşılamayı hedefleyen sistemlerde uygulanabilir niteliktedir. Bant geçiren

FSY'nin belirli frekanslarda sinyal iletimine izin verme özelliği, haberleşme ve telekomünikasyon altyapılarında önemli avantajlar sunarken; bant durduran modda ise belirli frekanslardaki sinyalleri engelleme kabiliyeti sayesinde radar teknolojileri, RF filtreleme ve savunma sistemleri gibi alanlarda işlevsel bir çözüm sağlamaktadır.

Bu tez kapsamında geliştirilen tasarım süreci, geleneksel yaklaşımlardan farklı olarak hem geçirgen hem de engelleyici filtre karakteristiği sunabilen bir FSY yapısının elde edilmesine imkân tanımıştır. Elde edilen veriler, önerilen yapının yüksek performanslı EMI koruma çözümleri, frekans seçici RF sistemleri ve askeri radar uygulamaları gibi çok çeşitli mühendislik ve endüstriyel alanlarda uygulanabilirliğini açıkça ortaya koymaktadır. Sonuç olarak, bu tasarım yaklaşımı, elektromanyetik girişimin kontrolüne yönelik yenilikçi ve işlevsel bir çözüm önerisi olarak değerlendirilebilir.



KAYNAKÇA

- Azemi, S. and Rowe, W.S.T., 2011. Development and analysis of 3d frequency selective surfaces.pp.
- Belevitch, V., 1962. Summary of the history of circuit theory. Proceedings of the IRE, 50(5), 848-855.
- Binion, D., Werner, P.L., Werner, D.H., Lier, E. and Hand, T.H., 2018. Metamaterial enhanced antenna systems: A review. In2018 International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium (ACES). pp: 1-2.
- Bose, J.C. and Strutt, R.J., 1898. On the rotation of plane of polarisation of electric wave by a twisted structure. 63(389-400), 146-152.
- Burgnies, L., Huppé, C., Ducournau, G., Cochrane, C., Rault, F., Koncar, V. and É, L., 2018. High-pass sub-mmwave filtering by woven textile metamaterials. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 8(4), 427-433.
- Burgnies, L., Lheurette, É. and Lippens, D., 2015. Textile inspired flexible metamaterial with negative refractive index. Journal of Applied Physics, 117(14), 144506.
- Bute, M., Hasar, U.C. and Barroso, J.J., 2017. Retrieval parameters of chiral metamaterials with proposed crescent shaped split ring resonators. In2017 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC). pp: 1-3.
- Can, S. and Yılmaz, A.E., 2016. Radar cross section reduction of a plate with textile-based single negative metamaterial. In2016 10th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). pp: 1-4.
- Can, S., Yılmaz, A.E. and Karakaya, E., 2017. Conformai dual-band frequency selective surface on textile: Design, prototyping and expriment. In2017 USNC-URSI Radio Science Meeting (Joint with AP-S Symposium). pp: 17-18.
- Cavalcante, G.A., D'Assunção Jr, A.G. and D'Assunção, A.G., 2014. An iterative full-wave method for designing bandstop frequency selective surfaces on textile substrates. Microwave and Optical Technology Letters, 56(2), 383-388.
- Celenk, E., Lynch, C. and Tentzeris, M.M., 2024. An ultrawideband all-textile metamaterial absorber for ku-, k-, and ka-band applications. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 23(6), 1789-1793.
- Chen, H., Hou, X., Deng, L.-j.J.I.A. and Letters, W.P., 2009. Design of frequency-selective surfaces radome for a planar slotted waveguide antenna. 8, 1231-1233.
- Chen, H., Ran, L., Huangfu, J., Zhang, X., Chen, K., Grzegorzczuk, T.M. and Kong, J.A., 2005. Negative refraction of a combined double s-shaped metamaterial. Applied Physics Letters, 86(15), 151909.
- Cheng, Y. and Yang, H., 2010. Design, simulation, and measurement of metamaterial absorber. Journal of Applied Physics, 108(3), 034906.

- Costa, F., Borgese, M., Degiorgi, M. and Monorchio, A., 2017. Electromagnetic characterisation of materials by using transmission/reflection (t/r) devices. *Electronics*, 6(4), 95.
- Costa, F. and Monorchio, A., 2012. A frequency selective radome with wideband absorbing properties. *Ieee Transactions on Antennas and Propagation*, 60(6), 2740-2747.
- Costa, F., Monorchio, A. and Manara, G., 2021. An overview of equivalent circuit modeling techniques of frequency selective surfaces and metasurfaces. *Applied Computational Electromagnetics Society Journal (ACES)*, 29(12), 960-976.
- Cui, T.J., Liu, R. and Smith, D.R., 2010. Introduction to metamaterials. *Metamaterials: Theory, design, and applications*, T. J. Cui, D. Smith and R. Liu. Springer US, Boston, MA: pp: 1-19.
- Dong, Z.-G., Lei, S.-Y., Li, Q., Xu, M.-X., Liu, H., Li, T., Wang, F.-M. and Zhu, S.-N., 2007. Non-left-handed transmission and bianisotropic effect in a π -shaped metallic metamaterial. *Physical Review B*, 75(7), 075117.
- Ekmekci, E. and Turhan-Sayan, G., 2013. Multi-functional metamaterial sensor based on a broad-side coupled srr topology with a multi-layer substrate. *Applied Physics A*, 110(1), 189-197.
- Emerson, W., 1954. Development of broadband absorbing materials for frequencies as low as 500mc. *NRL Memorandum Report*.
- Emerson, W., 1973. Electromagnetic wave absorbers and anechoic chambers through the years. *Ieee Transactions on Antennas and Propagation*, 21(4), 484-490.
- Engheta, N., 2006. *Metamaterials : Physics and engineering explorations*.pp.
- Erdem, E. and Yuzer, A., 2020. Wearable textile fabric based 3d metamaterials absorber in x-band. *Applied Computational Electromagnetics Society Journal*, 35, 230-236.
- Esen, M., Ilhan, I., Karaaslan, M., Unal, E., Dincer, F. and Sabah, C., 2014. Electromagnetic absorbance properties of a textile material coated using filtered arc-physical vapor deposition method. *Journal of Industrial Textiles*, 45(2), 298-309.
- Ghebrebrhan, M., Aranda, F., Walsh, G., Ziegler, D., Giardini, S., Carlson, J., Kimball, B., Steeves, D., Xia, Z., Yu, S., Kingsley, E., Nagarajan, R., Torcedo, J., Williams, R. and Gatesman, A., 2017. Textile frequency selective surface. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 27(11), 989-991.
- Harvey, A.F., 1959. Optical techniques at microwave frequencies. 106(26), 141-157.
- He, Y., Zhang, B., Ting, H., Chen, T., Wang, G., Hou, Y., Xiong, W. and Shen, J., 2015. Optically-controlled metamaterial absorber based on hybrid structure. *Optics Communications*, 356.
- İbili, H., Karaosmanoğlu, B. and Ergül, Ö., 2018. Demonstration of negative refractive index with low-cost inkjet-printed microwave metamaterials. *Microwave and Optical Technology Letters*, 60(1), 187-191.

- Jalil, M.E., Samsuri, N.A., Rahim, M.K.A. and Dewan, R., 2015. Compact chipless rfid metamaterial based structure using textile material. In 2015 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP). pp: 1-4.
- Kazak, N.S., Agabekov, V.E., Kurilkina, S.N. and Belyi, V.N., 2018. Formation and properties of new types of metal–dielectric nanostructures for creating optical metamaterials. *Semiconductors*, 52(16), 2099-2102.
- Kim, H.K., Ling, K., Kim, K. and Lim, S., 2015. Flexible inkjet-printed metamaterial absorber for coating a cylindrical object. *Optics Express*, 23(5), 5898-5906.
- Kim, J.-H., Hokmabadi, M.P., Balci, S., Rivera, E., Wilbert, D., Kung, P. and Kim, S.M., 2016. Investigation of robust flexible conformal thz perfect metamaterial absorber. *Applied Physics A*, 122(4), 362.
- Knott, E.F., Schaeffer, J.F. and Tulley, M.T., 2004. Radar cross section. Institution of Engineering and Technology, pp.
- Kock, W.E., 1948. Metallic delay lenses. *The Bell System Technical Journal*, 27(1), 58-82.
- Kong, X., Xu, J., Mo, J.-j. and Liu, S., 2017. Broadband and conformal metamaterial absorber. *Frontiers of Optoelectronics*, 10(2), 124-131.
- Koschny, T., Kafesaki, M., Economou, E.N. and Soukoulis, C.M., 2004. Effective medium theory of left-handed materials. *Physical Review Letters*, 93(10), 107402.
- Lai, S., Wu, Y., Zhu, X., Gu, W. and Wu, W., 2017. An optically transparent ultrabroadband microwave absorber. *IEEE Photonics Journal*, 9(6), 1-10.
- Landy, N.I., Sajuyigbe, S., Mock, J.J., Smith, D.R. and Padilla, W.J., 2008. Perfect metamaterial absorber. *Physical Review Letters*, 100(20), 207402.
- Lee, D., Kim, H.K. and Lim, S., 2017. Textile metamaterial absorber using screen printed channel logo. *Microwave and Optical Technology Letters*, 59(6), 1424-1427.
- Lee, D. and Lim, S., 2016. Wearable metamaterial absorber using screen printed channel logo. In 2016 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP). pp: 928-929.
- Lee, H., 2014. A broadband flexible metamaterial absorber based on double resonance. *Progress In Electromagnetics Research Letters*, 46, 73-78.
- Lee, J. and Lim, S., 2011. Bandwidth-enhanced and polarisation-insensitive metamaterial absorber using double resonance. *Electronics Letters*, 47(1), 8-9.
- Lee, Y.-S., 2009. Principles of terahertz science and technology. pp.
- Li, T.Q., Liu, H., Li, T., Wang, S.M., Wang, F.M., Wu, R.X., Chen, P., Zhu, S.N. and Zhang, X., 2008. Magnetic resonance hybridization and optical activity of microwaves in a chiral metamaterial. *Applied Physics Letters*, 92(13), 131111.
- Li, Z., Mutlu, M. and Ozbay, E., 2013. Chiral metamaterials: From optical activity and negative refractive index to asymmetric transmission. *Journal of Optics*, 15(2), 023001.

- Lin, B.-q., Du, S., Zhang, H. and Ye, X., 2010. Design and simulation of frequency-selective radome together with a monopole antenna. *Applied Computational Electromagnetics Society Journal*, 25, 620-625.
- Lindell, I.V., Sihvola, A.H. and Kurkijarvi, J., 1992. Karl f. Lindman: The last hertzian, and a harbinger of electromagnetic chirality. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 34(3), 24-30.
- Lindman, K.F., 1914. Über elektrische und optische resonanz. *Annalen der Physik*, 350(20), 580-622.
- Ling, K., Kim, K. and Lim, S., 2015. Flexible liquid metal-filled metamaterial absorber on polydimethylsiloxane (pdms). *Optics Express*, 23(16), 21375-21383.
- Long, L.V., Khiem, N.S., Tung, B.S., Tung, N.T., Giang, T.T., Son, P.T., Khuyen, B.X., Lam, V.D., Chen, L., Zheng, H. and Lee, Y., 2021. Flexible broadband metamaterial perfect absorber based on graphene-conductive inks. *In Photonics*.
- Majid, H., Rahim, M.K.A. and Masri, T., 2009. Microstrip antenna's gain enhancement using left-handed metamaterial structure. *Progress in Electromagnetics Research M*, 8, 235-247.
- Mandelstam, L., 1945. Systems with periodical coefficients with many degrees of freedom and small non-linearity. *Zhurnal Eksperimental Teoreticheskoi Fiziki TEORETICHESKOI FIZIKI*, 15(11), 605-612.
- Markoš, P. and Soukoulis, C.M., 2008. Wave propagation from electrons to photonic crystals and left-handed materials. Princeton University Press, pp.
- Melik, R., Unal, E., Kosku Perkgoz, N., Puttlitz, C. and Demir, H.V., 2009. Flexible metamaterials for wireless strain sensing. *Applied Physics Letters*, 95(18), 181105.
- Melik, R., Unal, E., Perkgoz, N., Santoni, B., Kamstock, D., Puttlitz, C. and Demir, H., 2010. Nested metamaterials for wireless strain sensing. *Selected Topics in Quantum Electronics, IEEE Journal of*, 16, 450-458.
- Michalak, M., Brazis, R., Kazakevicius, V., Bilska, J. and Krucinska, I., 2009. Novel approach to textile design for barriers against electromagnetic radiation. *International Journal of Materials and Product Technology*, 36(1-4), 166-175.
- Montgomery, C.G., Dicke, R.H. and Purcell, E.M., 1987. Principles of microwave circuits. Iet, pp.
- Munk, B.A., 2000. Band-pass filter designs: The hybrid radome. *Frequency selective surfaces*. pp: 227-278.
- Munk, B.A., 2000. Band-stop and dichroic filter designs. *Frequency selective surfaces*. pp: 279-314.
- Naskar, M.A., Tamrakar, M. and Thiripurasundari, D., 2017. Compact 'v' shaped metamaterial based resonator for wide band rejection. *In 2017 International Conference on Nextgen Electronic Technologies: Silicon to Software (ICNETS2)*. pp: 88-91.

- Nasr, M., Richard, J.T., Skirlo, S.A., Heimbeck, M.S., Joannopoulos, J.D., Soljacic, M., Everitt, H.O. and Domash, L., 2017. Narrowband metamaterial absorber for terahertz secure labeling. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 38(9), 1120-1129.
- Omar, A.A., Shen, Z. and Huang, H., 2017. Absorptive frequency-selective reflection and transmission structures. *Ieee Transactions on Antennas and Propagation*, 65(11), 6173-6178.
- Pa, P., Mirotznik, M.S., McCauley, R., Yarlagadda, S. and Duncan, K., 2012. Integrating metamaterials within a structural composite using additive manufacturing methods. In *Proceedings of the 2012 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation*. pp: 1-2.
- Park, J.W., Van Tuong, P., Rhee, J.Y., Kim, K.W., Jang, W.H., Choi, E.H., Chen, L.Y. and Lee, Y., 2013. Multi-band metamaterial absorber based on the arrangement of donut-type resonators. *Optics Express*, 21(8), 9691-9702.
- Pendry, J.B., 1996. Calculating photonic band structure. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 8(9), 1085.
- Pendry, J.B., 2000. Negative refraction makes a perfect lens. *Physical Review Letters*, 85(18), 3966-3969.
- Pendry, J.B., Holden, A.J., Robbins, D.J. and Stewart, W.J., 1998. Low frequency plasmons in thin-wire structures. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 10(22), 4785.
- Pendry, J.B., Holden, A.J., Robbins, D.J. and Stewart, W.J., 1999. Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 47(11), 2075-2084.
- Pendry, J.B., Holden, A.J., Stewart, W.J. and Youngs, I., 1996. Extremely low frequency plasmons in metallic mesostructures. *Physical Review Letters*, 76(25), 4773-4776.
- Raether, H., 1980. *Excitation of plasmons and interband transitions by electrons*. Springer-Verlag, Berlin, Germany, pp., Germany.
- Rahmat-Samii, Y. and Yang, F., 2006. Development of complex artificial ground planes in antenna engineering. *Metamaterials*. pp: 313-349.
- Sabah, C., 2008. Left-handed chiral metamaterials. 6(4), 872-878.
- Sabah, C., Cakmak, A.O., Ozbay, E. and Uckun, S., 2010. Transmission measurements of a new metamaterial sample with negative refraction index. *Physica B: Condensed Matter*, 405(14), 2955-2958.
- Sabah, C. and Roskos, H.G., 2012. Terahertz sensing application by using planar split-ring-resonator structures. *Microsystem Technologies*, 18(12), 2071-2076.
- Sabah, C. and Roskos, H.G., 2013. Broadside-coupled triangular split-ring-resonators for terahertz sensing. *The European Physical Journal Applied Physics*, 61(3), 30402.
- Sabah, C., Turkmen-Kucuksari, O. and Turhan-Sayan, G., 2014. Metamaterial absorber-based sensor embedded into x-band waveguide. *Electronics Letters*, 50(15), 1074-1076.

- Sabah, C. and Uçkun, S., 2007. Electromagnetic wave propagation through frequency-dispersive and lossy double-negative slab. 15(3), 133-143.
- Salisbury, W.W., 1952. Absorbent body for electromagnetic waves. Google Patents.
- Schuster, A., 1905. An introduction to the theory of optics. *Nature*, 71(1846), 457-458.
- Shalaev, V.M., Cai, W., Chettiar, U.K., Yuan, H.-K., Sarychev, A.K., Drachev, V.P. and Kildishev, A.V., 2005. Negative index of refraction in optical metamaterials. *Optics Letters*, 30(24), 3356-3358.
- Shelby, R.A., Smith, D.R. and Schultz, S., 2001. Experimental verification of a negative index of refraction. *Science*, 292(5514), 77-79.
- Sievenpiper, D.F., Sickmiller, M.E. and Yablonovitch, E., 1996. 3d wire mesh photonic crystals. *Physical Review Letters*, 76(14), 2480-2483.
- Sievenpiper, D.F., Yablonovitch, E., Winn, J.N., Fan, S., Villeneuve, P.R. and Joannopoulos, J.D., 1998. 3d metallo-dielectric photonic crystals with strong capacitive coupling between metallic islands. *Physical Review Letters*, 80(13), 2829-2832.
- Silin, R.A., 1972. Optical properties of artificial dielectrics (review). *Radiophysics and Quantum Electronics*, 15(6), 615-624.
- Simmons, A. and Emerson, W., 1966. An anechoic chamber making use of a new broadband absorbing material. In 1958 IRE International Convention Record. IEEE: pp: 34-41.
- Slyusar, V., 2009. Metamaterials on antenna solutions. *International Conference on Antenna Theory and Techniques*, pp. 19-24.
- Smith, D.R. and Kroll, N., 2000. Negative refractive index in left-handed materials. *Physical Review Letters*, 85(14), 2933-2936.
- Smith, D.R., Padilla, W.J., Vier, D.C., Nemat-Nasser, S.C. and Schultz, S., 2000. Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity. *Physical Review Letters*, 84(18), 4184-4187.
- Smith, D.R., Vier, D.C., Kroll, N. and Schultz, S., 2000. Direct calculation of permeability and permittivity for a left-handed metamaterial. *Applied Physics Letters*, 77(14), 2246-2248.
- Song, X.-H., Wu, W.-Y., Shen, T.-G. and Zhou, Y.-Q., 2011. Investigation of a patch antenna based on i-shaped left-handed material. *Optik*, 122(16), 1426-1429.
- Sun, J., Liu, L., Dong, G. and Zhou, J., 2011. An extremely broad band metamaterial absorber based on destructive interference. *Optics Express*, 19(22), 21155-21162.
- Tak, J. and Choi, J., 2017. A wearable metamaterial microwave absorber. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 16, 784-787.
- Tao, H., Landy, N.I., Bingham, C.M., Zhang, X., Averitt, R.D. and Padilla, W.J., 2008. A metamaterial absorber for the terahertz regime: Design, fabrication and characterization. *Optics Express*, 16(10), 7181-7188.
- Tütüncü, B. and Torpi, H., 2018. Omega-shaped metamaterial lens design for microstrip patch antenna performance optimization at 12 ghz.pp.

- Viktor, G.V., 1968. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ . *Soviet Physics Uspekhi*, 10(4), 509.
- Vinoy, K.J. and Jha, R.M., 1995. Trends in radar absorbing materials technology. *Sadhana*, 20(5), 815-850.
- Wakatsuchi, H., Sievenpiper, D.F. and Christopoulos, C., 2016. Designing flexible and versatile metamaterial absorbers. *IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine*, 5(2), 76-82.
- Wang, B., Koschny, T. and Soukoulis, C.M., 2009. Wide-angle and polarization-independent chiral metamaterial absorber. *Physical Review B*, 80(3), 033108.
- Wang, B., Zhou, J., Koschny, T. and Soukoulis, C.M., 2009. Nonplanar chiral metamaterials with negative index. *Applied Physics Letters*, 94(15), 151112.
- Watts, C.M., Liu, X. and Padilla, W.J., 2012. Metamaterial electromagnetic wave absorbers. *Advanced Materials*, 24(23), OP98-OP120.
- Withayachumnankul, W., Jaruwongrungssee, K., Tuantranont, A., Fumeaux, C. and Abbott, D., 2013. Metamaterial-based microfluidic sensor for dielectric characterization. *Sensors and Actuators A: Physical*, 189, 233-237.
- Wright, R., 1974. Broadband microwave energy absorptive structure. Google Patents.
- Wu, T.K., John, W. and Sons, 1995. Frequency selective surface and grid array. A Wiley-Interscience Publication, pp. XIV, 331 s. : il. ; 25 cm + dyskietka 3,5". New York [etc.].
- Xin, W., Binzhen, Z., Wanjun, W., Junlin, W. and Junping, D., 2017. Design, fabrication, and characterization of a flexible dual-band metamaterial absorber. *IEEE Photonics Journal*, 9(4), 1-12.
- Xin, Y., Lan-Ju, L., Xin, D. and Jian-Quan, Y., 2017. Solid analyte and aqueous solutions sensing based on a flexible terahertz dual-band metamaterial absorber. *Optical Engineering*, 56(2), 027104.
- Yahiaoui, R., Tan, S., Cong, L., Singh, R., Yan, F. and Zhang, W., 2015. Multispectral terahertz sensing with highly flexible ultrathin metamaterial absorber. *Journal of Applied Physics*, 118(8), 083103.
- Yong, W.Y., Hartman, T. and Glazunov, A.A., 2019. Flexible low profile frequency selective surface for x-band shielding applications. In 2019 Joint International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Sapporo and Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC Sapporo/APEMC). pp: 435-438.
- Zhang, S., Fan, W., Malloy, K.J., Brueck, S.R.J., Panoiu, N.C. and Osgood, R.M., 2005. Near-infrared double negative metamaterials. *Optics Express*, 13(13), 4922-4930.
- Zhang, S., Park, Y.-S., Li, J., Lu, X., Zhang, W. and Zhang, X., 2009. Negative refractive index in chiral metamaterials. *Physical Review Letters*, 102(2), 023901.
- Zhao, R., Koschny, T. and Soukoulis, C.M., 2010. Chiral metamaterials: Retrieval of the effective parameters with and without substrate. *Optics Express*, 18(14), 14553-14567.

- Zhao, R., Zhang, L., Zhou, J., Koschny, T. and Soukoulis, C.M., 2011. Conjugated gammadion chiral metamaterial with uniaxial optical activity and negative refractive index. *Physical Review B*, 83(3), 035105.
- Zheludev, N.I., 2010. The road ahead for metamaterials. *Science*, 328(5978), 582-583.
- Zheludev, N.I., 2015. Applied physics. Obtaining optical properties on demand. *Science*, 348(6238), 973-974.
- Zhou, J., Dong, J., Wang, B., Koschny, T., Kafesaki, M. and Soukoulis, C.M., 2009. Negative refractive index due to chirality. *Physical Review B*, 79(12), 121104.
- Zhu, B., Feng, Y., Zhao, J., Huang, C., Wang, Z. and Jiang, T., 2010. Polarization modulation by tunable electromagnetic metamaterial reflector/absorber. *Optics Express*, 18(22), 23196-23203.
- Zhu, B., Wang, Z.b., Huang, C., Feng, Y., Zhao, J. and Jiang, T., 2010. Polarization insensitive metamaterial absorber with wide incident angle. *Progress In Electromagnetics Research*, 101, 231-239.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı:	Hakan Kızıлтаş
Doğum tarihi:	
Doğum Yeri:	
Uyruğu:	
Adres:	
Tel:	
E-mail:	
Eğitim	
Lise:	Divriği Lisesi
Lisans:	Atatürk Üniversitesi
Yüksek lisans:	Atatürk Üniversitesi
Doktora:	Atatürk Üniversitesi
Yabancı Dil Bilgisi	
İngilizce:	İyi
Üye Olunan Mesleki Kuruluşlar	
Tezden Üretilmiş Yayınlar	
Kiziltas, H., Öztürk, G. (2025). Design, Parametric Analysis, and Experimental Validation of a Screen-Printed Flexible Band-Stop Frequency Selective Surface	