



**MİKRODALGA UYGULAMALARI İÇİN YÜKSEK
VERİMLİLİKLİ, OLDUKÇA İNCE, GENİŞ AÇILI, S,
C, X, KU VE K BANTLARINDA ÇALIŞAN SİMETRİK
REZONATÖR YAPIYA SAHİP ÇOK BANTLI
METAYÜZEY SOĞURUCU TASARIMLARI**

Merve KURT

Danışman: Doç. Dr. Gökhan ÖZTÜRK

Doktora Tezi

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı

2025

(Her hakkı saklıdır.)

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

**MİKRODALGA UYGULAMALARI İÇİN YÜKSEK VERİMLİLİKLİ, OLDUKÇA
İNCE, GENİŞ AÇILI, S, C, X, KU VE K BANTLARINDA ÇALIŞAN SİMETRİK
REZONATÖR YAPIYA SAHİP ÇOK BANTLI METAYÜZEY SOĞURUCU
TASARIMLARI**

(High-Efficiency, Ultra-Thin, Wide-Angle, Multi-Band Metasurface Absorber Designs With a
Symmetric Resonator Structure Operating in the S, C, X, Ku, and K Bands for Microwave
Applications)

DOKTORA TEZİ

Merve KURT

Danışman: Doç. Dr. Gökhan ÖZTÜRK
İkinci Tez Danışmanı: Prof. Dr. Mehmet ERTUĞRUL

Erzurum
Ağustos, 2025

KABUL VE ONAY TUTANAĞI

Merve KURT tarafından hazırlanan “**Mikrodalga Uygulamaları İçin Yüksek Verimlilikli, Oldukça İnce, Geniş Açılı, S, C, X, Ku ve K Bantlarında Çalışan Simetrik Rezonatör Yapıya Sahip Çok Bantlı Metayüzey Soğurucu Tasarımları**” başlıklı çalışması 15/08/2025 tarihinde yapılan tez savunma sınavı sonucunda başarılı bulunarak jürimiz tarafından Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı: Prof. Dr. Uğur Cem HASAR
Gaziantep Üniversitesi
Danışman: Doç. Dr. Gökhan ÖZTÜRK
Atatürk Üniversitesi
Jüri Üyesi: Doç. Dr. Yunus KAYA
Bayburt Üniversitesi
Jüri Üyesi: Doç. Dr. Çağlar YÜKSEL
Marmara Üniversitesi
Jüri Üyesi: Dr. Öğr. Üyesi Ömer ÇOBAN
Atatürk Üniversitesi
İkinci Tez Danışmanı: Prof. Dr. Mehmet ERTUĞRUL
Karadeniz Teknik Üniversitesi

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

Prof.Dr. Alper NUHOĞLU
Enstitü Müdürü

Bu çalışma BAP projeleri kapsamında desteklenmiştir.
Proje No: FDK-2024-13656

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildiriş, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU

Doktora Tezi olarak Doç. Dr. Gökhan ÖZTÜRK danışmanlığında sunulan “**Mikrodalga Uygulamaları İçin Yüksek Verimlilikli, Oldukça İnce, Geniş Açılı, S, C, X, Ku ve K Bantlarında Çalışan Simetrik Rezonatör Yapıya Sahip Çok Bantlı Metayüzey Soğurucu Tasarımları**” 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	4	30
Kuramsal Temeller	2	30
Materyal ve Metot	0	35
Araştırma Bulguları ve Tartışma	8	20
Sonuçlar	0	20
Tezin Geneli	6	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
Merve KURT	Doç. Dr. Gökhan ÖZTÜRK
15.8.2025	15.8.2025
İmza:	İmza:

* Tez ile ilgili YÖKTEZ'de yayınlamasına ilişkin bir engelleme var ise 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

Doktora çalışmam süresince bilgi, tecrübe ve desteğiyle her zaman yanımda olan, akademik gelişimime büyük katkı sağlayan değerli danışmanım Doç. Dr. Gökhan ÖZTÜRK’e en içten teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, çalışmamın her aşamasında kıymetli katkılarını esirgemeyen eş danışmanım Prof. Dr. Mehmet ERTUĞRUL’a da teşekkür ederim.

Araştırma sürecinde birlikte çalışmaktan büyük mutluluk duyduğum ekip arkadaşlarım Fatih TUTAR ve Arş. Gör. Mustafa BULUT’a, verdikleri destek ve sağladıkları iş birliği için minnettarım.

Her koşulda yanımda olan, sabır ve sevgileriyle bana güç veren değerli Aileme sonsuz teşekkür ederim.

Bu tez Atatürk Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) tarafından FDK-2024-13656 numaralı proje ile desteklenmiştir.

Merve KURT

ÖZET

DOKTORA TEZİ

MİKRODALGA UYGULAMALARI İÇİN YÜKSEK VERİMLİLİKLİ, OLDUKÇA İNCE, GENİŞ AÇILI, S, C, X, KU VE K BANTLARINDA ÇALIŞAN SİMETRİK REZONATÖR YAPIYA SAHİP ÇOK BANTLI METAYÜZEY SOĞURUCU TASARIMLARI

Merve KURT

Danışman: Doç. Dr. Gökhan ÖZTÜRK

İkinci Tez Danışmanı: Prof. Dr. Mehmet ERTUĞRUL

Amaç: Metayüzey tabanlı soğurucular; görüntüleme, sensör, gizleme teknolojileri, 5G uygulamaları ve radar kesit alanı azaltımı gibi birçok alanda önemli rol oynamaktadır. Bu bağlamda çalışmanın amacı; çok bantlı, ultra ince, polarizasyona duyarlı, yüksek emilim verimliliğine sahip ve eğik geliş açılarında da etkili performans gösteren metayüzey soğurucu tasarımları geliştirmektir.

Yöntem: Metayüzey mikrodalga soğurucular öncelikle CST Microwave Studio ile modellenmiş ve elde edilen saçılma parametreleri MATLAB’da işlenerek analiz edilmiştir. İkinci aşamada, yapıların eşdeğer devre modeli ADS ile oluşturulmuştur. Üçüncü aşamada, prototip litografi yöntemiyle üretilmiş ve VNA (Vector Network Analyzer) ölçüm cihazı kullanılarak serbest uzay ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Son olarak, yapıların elektromanyetik gizleme yeteneği RCS analizleriyle değerlendirilmiştir.

Bulgular: Bu çalışmada tasarlanan çok bantlı soğurucular, %90’dan fazla soğurma oranıyla yüksek performans göstermiştir. S, C, X, Ku ve K mikrodalga bantlarındaki tasarımlar, dalga boyuna göre $0,012\lambda_0$ altındaki kalınlıklarıyla ultra incedir. Yapılar, 45° açığa kadar %80’in üzerinde performansını korumuş ve farklı polarizasyonlarda performans kaybı yaşamamıştır. Benzetim, eşdeğer devre modeli ve üretim sonuçları uyumludur. RCS analizleri ise radar görünürlüğünü 5 dBsm’den fazla azaltarak elektromanyetik gizlemede başarısını doğrulamıştır.

Sonuç: Geliştirilen çok bantlı soğurucular, yüksek soğurma performansı ve polarizasyona duyarlı yapısıyla, literatürde bant sayısı yediden az olan ve $0,012\lambda_0$ ’den daha kalın tasarımlara kıyasla üstünlük sunmaktadır ve savunma, haberleşme ile sensör teknolojileri için güvenilir bir alternatif oluşturmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Metayüzey, Soğurucu, CST Microwave Studio, ADS (Advanced Design System), RCS (Radar Cross Section) Azaltımı

Ağustos 2025, 90 sayfa

ABSTRACT

DOCTORAL DISSERTATION

HIGH-EFFICIENCY, ULTRA-THIN, WIDE-ANGLE, MULTI-BAND METASURFACE ABSORBER DESIGNS WITH A SYMMETRIC RESONATOR STRUCTURE OPERATING IN THE S, C, X, KU, AND K BANDS FOR MICROWAVE APPLICATIONS

Merve KURT

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Gökhan ÖZTÜRK

Co-supervisor: Prof. Dr. Mehmet ERTUĞRUL

Purpose: Metasurface-based absorbers play an important role in various fields such as imaging, sensing, cloaking technologies, 5G applications, and radar cross-section reduction. In this context, the aim of this study is to develop multiband, ultra-thin, polarization-insensitive metasurface absorber designs with high absorption efficiency and effective performance under oblique incidence angles.

Method: The metasurface microwave absorbers were initially modeled using CST Microwave Studio, and the obtained scattering parameters were processed and analyzed in MATLAB. In the second stage, equivalent circuit models of the structures were developed using ADS. In the third stage, the prototypes were fabricated through the lithography method, and free-space measurements were carried out using a Vector Network Analyzer (VNA). Finally, the electromagnetic cloaking capability of the structures was evaluated through RCS analyses.

Findings: The multiband absorbers designed in this study demonstrated high performance with an absorption rate exceeding 90%. The designs operating in the S, C, X, Ku, and K microwave bands are ultra-thin, with thicknesses below $0,012\lambda_0$ relative to the wavelength. The structures maintained over 80% performance up to a 45° incidence angle and showed no degradation under different polarizations. The simulation, equivalent circuit model, and fabrication results are in good agreement. RCS analyses further confirmed their effectiveness in electromagnetic cloaking by reducing radar visibility by more than 5 dBsm.

Results: The developed multiband absorbers, with their high absorption performance and polarization-insensitive nature, offer superiority over designs reported in the literature with fewer than seven bands and thicknesses greater than $0,012\lambda_0$, providing a reliable alternative for defense, communication, and sensing technologies.

Keywords: Metasurface, Absorber, CST Microwave Studio, ADS (Advanced Design System), RCS (Radar Cross Section) Reduction

August 2025, 90 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
KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ.....	xii
GİRİŞ.....	1
GHz Frekans Bölgesi Mikrodalga Soğurucular	9
KURAMSAL TEMELLER.....	16
Metamalzeme Özellikleri	16
Negatif Kırılma İndisinin Deneysel Görsel Etkisi	20
MATERYAL VE METOT.....	22
Saçılma Parametreleri (S-Parametreleri).....	22
Soğurma Analizi.....	24
Giriş empedansı ve empedans eşleşmesi	24
İnce Katman Yaklaşımı.....	25
Süreç Aşamaları	26
Kullanılan Yapı ve Malzemeler	26
Tasarım Süreci ve Kullanılan Yazılımlar.....	26
TRL Kalibrasyonu.....	29
ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	30
GHz Frekans Aralığında Gerçekleştiren Çalışmalar	30
S-, C-, X-, Ku- ve K-Band uygulamaları için yedi-bantlı ultra ince metayüzey soğurucu yedi bantlı soğurucunun birim hücre tasarımı ve gelişimi	30
Performans Analizi.....	33
Elektrik, Manyetik ve Yüzey Akım Alan Dağılımları	36
Parametrik Yapısal Analiz	39
Üretim ve Ölçüm Sonuçları	40

RCS Azaltma Performansı	42
Karşılaştırma	43
S, C, X, Ku ve K Bantlarında On Bant Soğurma ve RCS Azaltma Sağlayan Ultra İnce, Polarizasyona Duyarsız Metayüzey Tasarımı	45
Önerilen on bantlı birim hücre yapısının tasarımı ve gelişim süreci	45
Performans Analizi.....	50
Elektrik, Manyetik ve Yüzey Akım Alan Dağılımlar	54
Üretim ve Ölçüm Sonuçları	59
RCS Azaltma Performansı	60
Karşılaştırma	61
SONUÇLAR VE ÖNERİLER	64
KAYNAKLAR.....	66
EKLER	72
EK-1. Elektromanyetik Soğurucu Hesaplamalarına Ait MATLAB Kodları	72
ÖZGEÇMİŞ.....	75

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. Kırılma İndisi İşaret Kuralları	19
Tablo 2. Önerilen MSA'nın mm Cinsinden Parametre Ölçüleri	30
Tablo 3. Geçirgenlik Parametreleri ve Kırılma İndisi Değerleri	34
Tablo 4. Eşdeğer Devre Modelindeki Elektronik Bileşenlerin Değerleri.....	38
Tablo 5. Önerilen Hepta-bant MSA'nın diğer Bildirilen Soğurucu Tasarımlarıyla Karşılaştırılması.....	43
Tablo 6. Önerilen MSA'nın Birim Hücre Tasarım Parametreleri	45
Tablo 7. Nihai Tasarıma Ulaştıran Rezonatörlerin Metayüzey Tasarımına Etkileri	47
Tablo 8. Rezonas Frekanslarındaki FWHM'de ki Bant Genişlik ve Q Faktörü Değerleri.....	49
Tablo 9. Elektriksel ve Manyetik Geçirgenlik ile Kırılma İndisi Değerleri	50
Tablo 10. Önerilen Metayüzeyin Eşdeğer Devresinin RLC Bileşenlerinin Değeri.....	58
Tablo 11. Önerilen Dekaband Soğurucunun Benzer Çalışmalarla Karşılaştırılması	61

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Dalganın kırılması.....	3
Şekil 2. Plazma davranışı gösteren ince tel dizilimi.....	4
Şekil 3. SRR yapısı.....	6
Şekil 4. İlk üretilen, eş zamanlı negatif elektrik ve manyetik parametreye sahip metamalzeme.....	7
Şekil 5. Malzemelerin sınıflandırılması	17
Şekil 6. (a) Sağ elli metamalzeme (b) Sol elli metamalzeme.....	19
Şekil 7. İki farklı ortam arasındaki elektromanyetik dalga geçişi	20
Şekil 8. (a) Boş bardaktaki metal çubuk, (b) bardak $n = 1.3$ su ile doldurulunca ve (c) bardak $n = -1.3$ su ile doldurulunca oluşan görünümler	21
Şekil 9. İki portlu devre şematiği	23
Şekil 10. Yankısız oda koşullarında gerçekleştirilen ölçüm düzeneği.....	28
Şekil 11. Önerilen metayüzey tabanlı soğurucunun şematik görünümü: (a) Üstten görünüm ve (b) yan görünüm	30
Şekil 12. Önerilen metayüzey soğurucuya ait birim hücre yapısının, elektromanyetik benzetimler sonucunda elde edilen frekansa bağlı soğurma performansı	31
Şekil 13. Dört ayrı rezonatörün birleşimiyle oluşturulan yedi bantlı soğurucuya ait birim hücre geometrilerinin üstten görünümü: (a) Rezonatör 1, (b) Rezonatör 2, (c) Rezonatör 3 ve (d) Rezonatör 4.....	31
Şekil 14. Önerilen yedi bantlı metayüzey soğurucuyu oluşturan (a) Rezonatör 1, (b) Rezonatör 2, (c) Rezonatör 3 ve (d) Rezonatör 4'ün soğurma performansları	32
Şekil 15. Önerilen metayüzey soğurucu için a) normalize edilmiş empedans, (b) etkili elektriksel, (c) manyetik geçirgenlik ve d) kırılma indisi grafikleri.....	33
Şekil 16. Önerilen metayüzey soğurucu için, (a) TE ve (b) TM modlarında çeşitli geliş açılarının soğurma spektrumuna olan etkileri	34
Şekil 17. Polarizasyon açısı değişimlerinin soğurma spektrumu (a) TE modu, (b) TM modu üzerindeki etkisi	35
Şekil 18. Önerilen MSA birim hücre için (1) elektrik (E) , (2) manyetik (H) ve (3) yüzey akımı dağılım sunumları.....	36
Şekil 19. Önerilen yedi bantlı metayüzey soğurucusunun eşdeğer devre modeli (ECM).....	38

Şekil 20. Önerilen yedi bantlı (hepta-bant) MSA için ADS ve CST kullanılarak elde edilen S11 simülasyon sonuçları	39
Şekil 21. Önerilen MSA'nın (a) l2, (b) r3, (c) r5 ve (d) w3 parametrelerinin yansıma katsayısı spektrumu üzerindeki etkisi.....	39
Şekil 22. Önerilen metayüzey soğurucunun: (a) birim hücresi, (b) ölçüm amacıyla 13×13 birim hücreden oluşturulan yapının ön yüzeyi ve (c) arka yüzeyine ait görseller	40
Şekil 23. Gerçek zamanlı ölçümler için yankısız oda içerisinde oluşturulan deneysel ölçüm düzeneği.....	41
Şekil 24. Üretilen metayüzey tasarımının deneysel ve benzetim sonuçlarına göre soğurma performansının karşılaştırılması	41
Şekil 25. Önerilen MSA'ya ait (a) 13x13 birim hücreden oluşan yapısı, (b) metayüzeyin radar kesit alanı (RCS) dağılımı, (c) soğurma spektrumu üzerinde RCS azaltma performansı ve (d) 1,6 ölçekleme oranı altında yapının soğurucu yapısı.....	42
Şekil 26. Önerilen MSA tasarımının (a) üst ve (b) yan profil görünümü	45
Şekil 27. Önerilen birim hücrenin frekansa bağlı soğurma davranışı	46
Şekil 28. Önerilen MSA tasarımını meydana getiren dört farklı rezonatörün (a) Rezonatör 1, (b) Rezonatör 2, (c) Rezonatör 3 ve (d) Rezonatör 4 yapılarına ait geometrik görünüşleri	46
Şekil 29. Önerilen MSA yapısını oluşturan (a) Rezonatör 1, (b) Rezonatör 2, (c) Rezonatör 3 ve (d) Rezonatör 4'e ait bireysel soğurma performansları.....	47
Şekil 30. Önerilen metayüzeyin soğurma bantlarına ilişkin tam yarı maksimum (FWHM) yöntemiyle hesaplanan bant genişlikleri (BW)	48
Şekil 31. Önerilen MSA için (a) normalize edilmiş empedans, (b) elektriksel, (c) manyetik geçirgenlik ve (d) kırılma indisi grafikleri	50
Şekil 32. Önerilen MSA'nın yansıma katsayısı üzerindeki (a) p, (b) n, (c) r6, (d) h parametrelerinin ve (e) farklı dielektrik malzemelerin etkisi	51
Şekil 33. Polarizasyon açısı değişimlerinin soğurma spektrumu (a) TE, (b) TM modu üzerindeki etkisi	52
Şekil 34. Önerilen tasarımın (a) TE ve (b) TM modu farklı olay açısı değişimlerinin soğurma spektrumu üzerindeki etkisi.....	53
Şekil 35. Önerilen MSA'nın E-alan dağılımı	54
Şekil 36. Önerilen MSA'nın H-alan dağılımı	55
Şekil 37. Önerilen MSA'nın yüzey akımı dağılımı	56

Şekil 38. Önerilen metayüzey soğurucusunun elektromanyetik davranışını temsil eden eşdeğer devre şeması	58
Şekil 39. Önerilen MSA için ADS ve CST kullanılarak elde edilen S11 simülasyon sonuçları	59
Şekil 40. Önerilen on bantlı metayüzey soğurucuya ait 15×15 birim hücreden oluşturulan prototipinin ölçüm sonuçları ile benzetim sonuçlarının karşılaştırılması.....	60
Şekil 41. (a) Önerilen MSA yapısının 15×15 birim hücreden oluşan düzeni, (b) Önerilen metayüzey soğurucusunun ve ideal iletken yüzeyin (PEC) RCS azaltım karşılaştırması, (c) Soğurucu yapının frekansa bağlı RCS azaltım eğrisi	60



KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ

S_{ort}	: Ortalama güç vektörü
μ_r	: Bağıl elektriksel geçirgenlik
μ_0	: Boşluğun manyetik geçirgenliği
S_{11}	: 1. ortamdan yansıma katsayısı
S_{12}	: 2. ortamdan 1. ortama iletim katsayısı
S_{21}	: 1. ortamdan 2. ortama iletim katsayısı
S_{22}	: 2. ortamdan yansıma katsayısı
Z_{in}	: Giriş empedansı
Z_0	: Serbest uzayın karakteristik empedansı
c_0	: Boşluktaki ışık hızı
m_0	: Serbest elektron kütlesi
ϵ_r	: Bağıl elektriksel geçirgenlik
ϵ_0	: Boşluğun elektriksel geçirgenliği
μ	: Mutlak elektriksel geçirgenlik
ADS	: Advanced Design System (Gelişmiş Tasarım Sistemi)
BW	: Bandwidth (Bant genişliği)
C	: Etkin kapasitans
CST	: Computer Simulation Technology(Bilgisayar Simülasyon Teknoloji)
DNG	: Double Negative (Çift Negatif)
DPS	: Double Positive (Çift Pozitif)
E	: Elektrik Alan
ECM	: Equivalent Circuit Model (Eşdeğer Devre Modeli)
EMC	: Electromagnetic Compatibility (Elektromanyetik Uyumluluğu)
EMI	: Electromagnetic Interference (Elektromanyetik Girişim)
EMR	: Effective medium ratio (Etkin Orta Oran)
ENG	: Epsilon Negative
FWHM	: Full Width at Half Maximum (Yarı Maksimumda Tam Genişlik)
GHz	: Gigahertz
H	: Manyetik Alan
ITO	: Indium Tin Oxide
k	: Dalga sayısı

L	: Etkin endüktans
MA	: Metamaterial (Metamalzeme)
MMA	: Metamaterial Absorber (Metamalzeme Soğurucu)
MNG	: Mu Negative
MS	: Metasurface (Metayüzey)
MSA	: Metasurface Absorber (Metayüzey Soğurucu)
<i>n</i>	: Kırılma indisi
PCB	: Printed Circuit Board (Baskılı Devre Kartı)
PEC	: Perfect Electric Conductor (Mükemmel Elektriksel İletken)
Q-faktörü	: Kalite faktörü
RCS	: Radar Cross Section (Radar Kesit Alanı)
S	: Poynting vektörü
SNG	: Single Negative (Tek Negatif)
SRR	: Split Ring Resonator (Bölünmüş Halka Rezonatörü)
THz	: Terahertz
TRL	: Through-Reflect-Line
VNA	: Vector Network Analyzer (Vektör Ağ Analizörü)
<i>H*</i>	: Manyetik alanın kompleks eşleniği
<i>e</i>	: Elektron yükü
ϵ	: Mutlak elektriksel geçirgenlik

GİRİŞ

Elektromanyetik soğurucular, üzerine gelen elektromanyetik dalgaların büyük bir kısmını yansıtmadan ve iletmeden bünyelerinde hapseden; bu enerjiyi rezonans frekanslarında elektriksel ve manyetik alanlarda depolayarak ısıya dönüştüren yapılardır. Bu yapıların temel işlevi, elektromanyetik enerjinin ortama yayılmasını engelleyerek çevresindeki sistemleri korumak ve bu sistemlerin kararlı çalışmasına katkı sağlamaktır. Soğurucular aynı zamanda, belirli bir kaynaktan gelen dalgaların izlenebilirliğini azaltmak veya tamamen ortadan kaldırmak amacıyla, elektromanyetik görünürlüğün düşürülmesini hedefleyen uygulamalarda da kullanılmaktadır (Landy *et al.* 2008). Bu özellikleri sayesinde, haberleşme, savunma, güvenlik ve endüstriyel sistemlerde çeşitli görevler üstlenmektedirler (Karaaslan *et al.* 2017; Jorwal *et al.* 2023).

Elektromanyetik dalgaların kontrolü ve yönetimi, günümüzde çeşitli teknolojik uygulamalar açısından önem taşımaktadır. Bu gereklilik, özellikle askeri sistemlerde radar izini azaltma, haberleşme sistemlerinde sinyal kalitesini koruma ve elektromanyetik girişimin neden olabileceği arızaları önleme gibi farklı alanlarda kendini göstermektedir. Ayrıca, elektromanyetik çevre koşullarının kontrol altında tutulması, cihazların birbirinden etkilenmeden çalışmasını mümkün kılmakta ve sistemler arası uyumu desteklemektedir. Bu bağlamda, elektromanyetik soğurucu yapılar, elektromanyetik dalgaların yönlendirilmesi ve kontrol altına alınması açısından işlevsel çözümler sunmaktadır (Cui *et al.* 2014).

Geleneksel elektromanyetik soğurucu malzemeler, genellikle ferrit, karbon esaslı bileşenler veya iletken polimerler gibi yapı taşlarına dayanmaktadır (Jia *et al.* 2018). Bu malzemeler, belirli frekans aralıklarında etkin sonuçlar verebilmelerine rağmen kalınlık ve ağırlık gibi fiziksel sınırlamaların yanı sıra yalnızca dar bir frekans bandında etkili olmaları nedeniyle özellikle çok bantlı ya da geniş bantlı çalışmanın gerektiği uygulamalarda yetersiz kalmaktadır. Ayrıca, modern teknolojik sistemlerin artan taşınabilirlik, hafiflik ve ince yapı gereksinimleri göz önünde bulundurulduğunda bu geleneksel malzemelerin sunduğu çözümler yetersiz kalmakta ve kullanım alanlarını ciddi şekilde sınırlamaktadır. Bu teknik sınırlamaların aşılabilmesi amacıyla geliştirilen metamalzeme ve metayüzey (metasurface) temelli yapılar, elektromanyetik dalgaların kontrolü konusunda yeni bir yaklaşım sunmaktadır.

Metamalzemeler, kelime anlamı itibarıyla “malzemenin ötesi” anlamına gelmektedir. Geleneksel malzemelerde bulunmayan fiziksel özelliklere sahip bu yapılar, belirli frekans

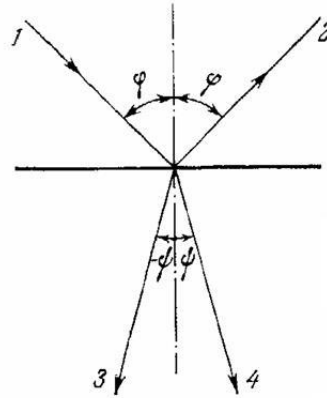
aralıklarında hem dielektrik geçirgenlik (ϵ) hem de manyetik geçirgenlik (μ) katsayılarının negatif değerler alabilmesiyle tanımlanmaktadır (Veselago, 1968). Yapay olarak tasarlanan bu malzemeler, klasik elektromanyetik tepkimelerin ötesinde davranışlar sergileyerek, negatif kırılma ve ters Doppler etkisi gibi geleneksel malzemelerde gözlemlenemeyen fiziksel olayların gerçekleşmesine imkân tanımaktadır (Smith *et al.* 2004). Elektromanyetik dalgalarla etkileşimlerinde ortaya çıkan farklılıklar nedeniyle metamalzemeler, elektromanyetik malzeme tasarımı ve uygulamalarında yeni araştırma alanları oluşturmuştur (Soukoulis & Wegener, 2011). Bu tür malzemeler, radar sistemleri (Murugesan *et al.* 2021), süperlens teknolojileri (Dhama *et al.* 2021), enerji toplama yapıları (Y. Liu *et al.* 2023) ve elektromanyetik soğurucular (Kurt *et al.* 2025) gibi çeşitli uygulamalarda kullanılmak üzere geliştirilmiştir.

Metayüzeyler ise metamalzeme prensiplerinin iki boyutlu düzlemlere indirgenmiş bir formudur. Genellikle tek katmanlı ve yüzeye entegre edilebilir yapıda olan bu sistemler, daha düşük profilli, hafif ve üretimi daha kolay çözümler sunmaktadır. Metayüzey yapılar, elektromanyetik dalgaların yansıma, kırılma, soğurma, polarizasyon dönüşümü ve faz kontrolü gibi birçok özelliğini tek bir düzlemsel yapı üzerinde kontrol edebilme potansiyeline sahiptir. Bu yönüyle, özellikle dar alanlarda ve düşük profil gerektiren uygulamalarda önemli avantajlar sağlamaktadır. Hem metamalzeme hem de metayüzey temelli soğurucu yapılar, belirli frekanslarda rezonans oluşturarak elektromanyetik enerjiyi yüksek verimlilikle soğurabilmektedir. Bu rezonans hücreleri, farklı geometri ve dizilimlerle çoğaltılarak, çok bantlı ya da geniş bantlı çalışma kabiliyeti kazandırılabilir. Böylece, hedeflenen frekans bantlarında yüksek soğurma sağlanırken, aynı zamanda yapının fiziksel kalınlığı minimum seviyede tutulabilir. Bu özellikler, bu tür yapıların radar soğurma, elektromanyetik girişim (EMI) bastırma, anten arayüzlerinin elektromanyetik uyumluluğu (EMC) ile optimize edilmesi ve genel elektromanyetik koruma uygulamaları için uygunluğunu artırmaktadır (Yu & Capasso, 2014).

Metamalzemelerin gelişim sürecinin temelinde, elektromanyetik dalgaların madde ile etkileşimini açıklayan fiziksel prensipler yer almaktadır. Bu etkileşimlerin teorik temeli ise, elektrik ve manyetik alanların ilişkisini ortaya koyan James Clerk Maxwell'in geliştirdiği Maxwell denklemlerine dayanmaktadır. Bu denklemler, elektromanyetik dalgaların davranışlarını matematiksel olarak tanımlayarak ışığın da bir elektromanyetik dalga olduğunu ortaya koymuştur. Maxwell'in bu çalışması, elektromanyetik dalgaların keşfine olanak sağlamış ve radyo dalgaları, radar, mikrodalgalar gibi teknolojilerin gelişiminin önünü açmıştır. Bu temel, elektromanyetik dalgaları kontrol etme ve yönlendirme potansiyelini anlamamız için önemli bir altyapı sunmuştur (Maxwell, 1865).

Hendrik Antoon Lorentz, çalışmasında sunduğu Lorentz rezonatör modelini, malzemelerin mikroskobik düzeyde elektromanyetik alanlarla etkileşimini açıklamak için geliştirmiştir. Bu model, malzeme içindeki atomların ve elektronların elektromanyetik dalgalara tepkisini açıklayarak, malzemenin makroskopik optik ve elektriksel özelliklerini tahmin etmeyi mümkün kılmıştır. Özellikle bu model dielektrik ve manyetik geçirgenlik gibi özelliklerin belirlenmesinde kullanılmıştır. Bu çalışma, metamalzemelerin belirli elektromanyetik özelliklere sahip olacak şekilde tasarlanmasının temelini oluşturmuştur (Lorentz, 1902).

Metamalzeme üzerine yapılan ilk çalışma, Sovyet fizikçi Victor Veselago tarafından gerçekleştirilmiştir. Veselago, bu çalışmasında metamalzemelerin teorik analizini detaylandırarak, geleneksel malzemelerden farklı olan bu malzemelerin özelliklerini açıklamıştır. Doğal malzemelerde elektriksel geçirgenlik (ϵ) ve manyetik geçirgenlik (μ) genellikle pozitif değerler alırken, Veselago'nun incelediği metamalzemelerde her iki parametrenin de negatif değer aldığı belirtilmiştir. Bu bağlamda, negatif kırılma indeksi kavramı ilk kez teorik olarak ortaya atılmıştır (Veselago, 1968).



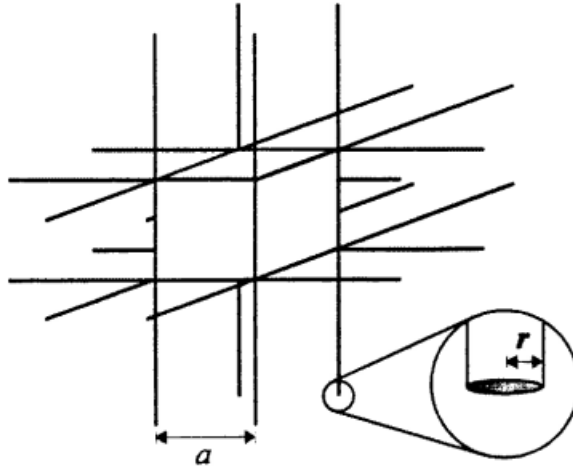
Şekil 1. Dalganın kırılması (Veselago, 1968)

Elektriksel ve manyetik geçirgenlikleri negatif olan malzemelerde, elektromanyetik dalgaların ters yönde kırılacağını teorik olarak gösteren Veselago, bu davranışı Şekil 1'de gösterildiği gibi görselleştirmiştir. Şekil 1'de, 1 ve 3 numaralı gelen dalgaların 2 ve 4 yönlerinde ters kırılmaları sunulmuştur. Veselago'nun bu çalışmaları, metamalzeme kavramının temelini oluştururken, o dönemde bu tür malzemelerin üretilmemesi nedeniyle çalışmalar teorik düzeyde kalmıştır. Ayrıca, metamalzemelerin elektromanyetik dalgaların yayılımını nasıl etkileyebileceğini de belirtmiştir (Veselago, 1968).

İngiliz fizikçi John Pendry ve arkadaşları yaptıkları çalışmada metalik mezoyapılar içinde çok düşük frekanslı plazmonik etkileri incelemişlerdir. Bu çalışma, elektromanyetik

özelliklerin malzeme yapısı ve geometrisine bağlı olarak nasıl kontrol edilebileceğini hem teorik hem de deneysel analizlerle ortaya koymuştur (Pendry *et al.* 1996).

Pendry ve arkadaşları, mikron kalınlığında düzenlenmiş ince tellerin mikrodalga frekanslarında plazma özellikleri gösterebileceğini ortaya koymuşlardır. Pendry ve arkadaşları, bu düzeneklerin negatif elektriksel geçirgenlik (ϵ) sağlamasına imkan tanıyarak, mikrodalga frekanslarından daha düşük plazma frekansına sahip malzemelerin üretilebileceğini göstermişlerdir (Pendry *et al.* 1998).



Şekil 2. Plazma davranışı gösteren ince tel dizilimi (Pendry *et al.* 1998)

Şekil 2’de, dielektrik katsayının yapay olarak negatife düşmesini sağlayan bir yapı gösterilmektedir. Bu yapıda, plazma frekansına etki eden elektronlar, metal tellerin içine hapsedilmiştir. Böyle bir düzenleme, ortamda bulunan birim hücre başına düşen elektron miktarını azaltarak dielektrik katsayının negatif olmasına imkân tanımaktadır. Böylece metal tellerin düzenlenmesiyle elektron yoğunluğu kontrol edilir ve malzemenin elektromanyetik özellikleri istenilen şekilde ayarlanmaktadır. Bu bağlamda, etkin yoğunluk veya etkin parçacık sayısı Denklem (1)’de belirtildiği gibi ifade edilmektedir.

$$n_{etkin} = \frac{\pi r^2}{a^2} n \quad (1)$$

Denklem (1)’de yer alan a parametresi, birim hücrenin kenar uzunluğunu; r , metal çubuğun yarıçapını; n ise birim hacimde bulunan elektron sayısını, yani elektron yoğunluğunu ifade etmektedir. Tasarlanan yapıda kullanılan ince metal çubukların sahip olduğu yüksek endüktans değeri, bu elemanlar üzerinden geçen akımın ani değişimini sınırlamaktadır. Bu durum, elektriksel iletimi sağlayan yük taşıyıcılarının, yani elektronların, daha büyük bir kütleye sahipmiş gibi davranmasına yol açmaktadır. Bunun nedeni, akımın oluşturduğu manyetik alanın, iletken tel üzerinde öz indüktans etkisi meydana getirmesidir. Söz konusu

elektromanyetik etkileşimler sonucunda, elektronun etkin kütlesi Denklem (2)'de sunulan formülasyonla belirlenmektedir.

$$m_{etkin} = \frac{m_0 \pi r^2 n e^2}{2\pi} \ln \frac{a}{r} \quad (2)$$

Denklem (2)'de m_0 serbest elektron kütlesi ve değeri yaklaşık olarak $9,11 \times 10^{-31}$ kg, e elektron yükünü ifade etmektedir. Elektron yükünün (e) değeri yaklaşık olarak $1,602 \times 10^{-19}$ C'dur. Bu durumda tel yapı için plazma frekansının ortamın makroskopik özelliklerine bağlı olarak ifade edilmesi Denklem (3) eşitliği ile mümkün olacaktır.

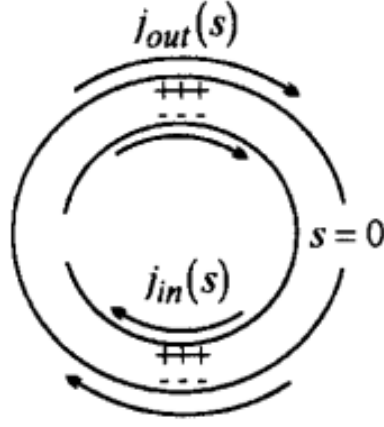
$$w_p = \frac{2\pi c^2}{a^2 \ln \left(\frac{a}{r} \right)} \quad (3)$$

Denklem (3)'de c ışık hızı olup değeri 3×10^8 m/sn'dir. 1998 yılında Pendry tarafından yapılan çalışmada, alüminyumdan yapılmış ve yarıçapı 1 mikrometre olan metal teller incelenmiştir. Teller arasındaki mesafe 10 mm olarak belirlenmiştir. Bu yapı içinde elektronların etkin kütlesinin, bir protonun kütlesinden 15 kat daha fazla olduğu hesaplanmıştır. Ayrıca, plazma frekansının yaklaşık 2 GHz'ye kadar düştüğü görülmüştür. Bu sonuçlar, ortamın elektromanyetik özelliklerinin tasarım yoluyla değiştirilebileceğini göstermektedir. Eğer metal tellerin kalınlığı, dalga boyu ve hücre boyutlarına göre çok küçükse, ortamın bağlı dielektrik sabiti Denklem (4)'te verilen formülle hesaplanmaktadır.

$$\epsilon_r = 1 - \frac{w_p^2}{w^2} \quad (4)$$

Denklem (4)'de w elektromanyetik açısal frekansını, w_p plazma frekansını temsil etmektedir. İncelenen bu yapı, yalnızca elektrik alanın telin yönüyle aynı doğrultuda olduğu durumlarda negatif dielektrik davranış sergilemektedir; bu da yapının yön bağımlı (anizotropik) olduğunu göstermektedir. Ortamın izotropik bir özellik kazanabilmesi amacıyla, metal teller tüm üç boyutta olacak şekilde yerleştirilmiştir (Pendry *et al.* 1998).

Bir sonraki önemli adımda, Pendry ve arkadaşları, Split Ring Resonator (SRR) yapıları kullanarak negatif manyetik geçirgenlik katsayısı (μ) elde etmişlerdir. SRR'ler, metamatzemelerde negatif manyetik özelliklerin oluşturulabilmesi için kullanılan temel yapılar hâline gelmiştir (Pendry *et al.* 1999).



Şekil 3. SRR yapısı (Pendry *et al.* 1999)

Şekil 3'te, Pendry'nin çalışmasında kullandığı SRR (Split Ring Resonator) yapısı gösterilmektedir. Bu yapının önemli özelliği, halkaların etrafındaki boşlukların, akımın halkalar boyunca akmasını engellemesidir. Ancak, bu iki halka arasında bir kapasitans oluşmaktadır ve bu sayede akımın geçişi sağlanır (Pendry *et al.* 1999). Bu yapı için manyetik geçirgenlik ise Denklem (5)'te verilmiştir.

$$\mu_{eff} = 1 - \frac{\frac{\pi r^2}{a^2}}{1 - \frac{dc^2}{2\pi^2(N-1)\omega^2 + i \frac{(2\rho)}{\mu_0 r \omega (N-1)}}} \quad (5)$$

Denklem (5)'te N halka sayısını, ω açısal frekansı, μ_0 ifadesi boşluğun manyetik geçirgenliğini, r SRR yapısının yarıçapını ve a ise periyodik SRR yapıları arasındaki uzaklığı ifade etmektedir.

Pendry, gerçekleştirdiği çalışmada, negatif kırılma indisli malzemelerin klasik optik teorisinin ötesine geçerek ışığı mükemmel bir şekilde odaklayabileceğini ve hatta geleneksel lenslerin sınırlamaları arasında yer alan kırınım sınırını aşabileceğini öne sürmüştür (Pendry, 2000).

David Smith ve arkadaşları, gerçekleştirdikleri araştırmada, Şekil 4'te gösterilen yapıyı kullanarak eş zamanlı olarak negatif elektriksel geçirgenlik (ϵ) ve negatif manyetik geçirgenlik (μ) değerlerine sahip bir kompozit malzeme tasarlamışlardır. Bu çalışma, metamateryallerin hem teorik hem de deneysel yönlerini bir araya getirerek, elektromanyetik dalgaların bu özel malzemelerle nasıl etkileşime girdiğini ortaya koymuştur (Smith, Padilla, *et al.* 2000).



Şekil 4. İlk üretilen, eş zamanlı negatif elektrik ve manyetik parametreye sahip metamalzeme (Smith, Padilla, *et al.* 2000)

Smith ve arkadaşları, gerçekleştirdikleri çalışmada sol elli metamalzemeler için elektriksel geçirgenlik (ϵ) ve manyetik geçirgenlik (μ) değerlerinin doğrudan hesaplanması yöntemini geliştirmişlerdir. Bu çalışma, metamalzemelerin elektromanyetik özelliklerinin doğru bir şekilde modellenmesini sağlayarak bu tür malzemelerin özel yapılarla üretilebileceğini göstermektedir (Smith, Vier, *et al.* 2000).

Shelby ve arkadaşları, Pendry ve arkadaşlarının 1999 yılında önerdiği 'Swiss Roll' ve ayırık halka rezonatör (Split Ring Resonator, SRR) tasarımlarına dayanan çalışmalarında, öne sürülen teorik modelleri deneysel olarak doğrulamışlardır. Bu doğrulama, metamalzemelerin gerçek dünyadaki uygulanabilirliğini ve potansiyel kullanım alanlarını kanıtlamaktadır (Shelby *et al.* 2001).

Metamalzemeler, yapılan bu temel çalışmalardan yararlanarak, gelişen teknolojiyle birlikte mükemmel lensler, hassas sensörler, gelişmiş antenler, görünmezlik pelerinleri, polarizasyon dönüştürücüler ve soğurucular gibi birçok yenilikçi alanda önemli bir potansiyele sahip malzemeler olarak öne çıkmıştır. Bu doğrultuda, metamalzemelerin tasarımı ve geliştirilmesi üzerine yapılan çalışmalar hız kesmeden devam etmiştir. Bu alanlarda yapılan çalışmalardan Xu ve arkadaşları, gerçekleştirdikleri çalışmalarında dönüşüm optiğini kullanarak eşlenik metamalzemeler tasarlamış ve bu malzemelerin çok yüksek çözünürlüklü lensler yapmak için kullanılabileceğini göstermiştir. Araştırmalarında, negatif kırılma indisli sol elli metamalzemelerin süperlenslerin (mükemmel lenslerin) oluşturulmasında önemli bir rol oynadığını vurgulamışlardır. Bu tür metamalzemeler, geleneksel lenslerin çözünürlük sınırlarını aşarak nesneleri daha net ve ayrıntılı bir şekilde görüntülemeyi mümkün kılmıştır (Y. Xu *et al.* 2015).

Öztürk yaptığı çalışmada X-band mikrodalga frekansında çalışan ultra ince, geniş açılı ve bant genişliği artırılmış doğrusal ve dairesel metayüzey tabanlı yansıma tipi polarizasyon dönüştürücüsünü incelemiştir. Bu çalışmada, metamalzeme tabanlı bir yüzey tasarımı kullanarak, polarizasyon dönüşüm verimliliğini artırmayı hedeflemiştir. Çalışmanın katkısını, geleneksel polarizasyon dönüştürücülere göre daha ince, daha verimli ve geniş açılı aralığında çalışan yeni bir çözüm önerisi olarak sunmuştur (Ozturk, 2022).

Guan ve arkadaşları, gerçekleştirdikleri çalışmada, metamalzemelerin yüksek performanslı akıllı sensörler için sağladığı avantajları incelemiştir. Çalışma, metamalzemeler ile gerçekleştirilen sensörlerin geleneksel malzemelerle gerçekleştirilen sensörlere göre daha yüksek duyarlılık, geniş algılama aralığı ve daha üstün performans sağlama potansiyeline sahip olduğunu vurgulamaktadır. Bu özellikler, metamalzeme tabanlı sensörlerin biyomedikal, çevresel izleme ve endüstriyel uygulamalar gibi çeşitli alanlarda önemli avantajlar sunduğunu göstermiştir (Guan *et al.* 2024).

Elalaouy ve arkadaşları gerçekleştirdikleri çalışmalarında metamalzemelerin kablosuz antenlerin performansını artırmadaki etkilerini incelemiştir. Bu çalışma, çeşitli metamalzeme tasarımlarını ve bunların anten teknolojisindeki uygulamalarını gözden geçirerek, bant genişliği, kazanç ve verimlilikteki iyileşmeleri vurgulamaktadır (Elalaouy *et al.* 2024).

Khan ve arkadaşları metamalzeme pelerinlerinin sınırlı bant genişliği ile çalışma sorununu aşmak için çeşitli teknikler önermişlerdir. Çalışmalarında, geniş bant görünmezlik sağlamak için meta-atomi tasarımı, çift katmanlı yapılar, frekans bağımlı materyal seçimleri, yüksek dinamik yapı tasarımları ve yapay arayüzler gibi yenilikçi yöntemler sunulmaktadır. Bu yöntemler, metamalzeme pelerinlerinin etkinliğini artırarak, nesnelerin geniş bir frekans aralığında algılanamaz hale gelmesini mümkün kılmaktadır (Khan *et al.* 2024).

Bu bölüme kadar, metamalzemelerin ilk kullanımından günümüze kadar çeşitli alanlardaki uygulamalarına yönelik yapılan çalışmalar özetlenmiştir. Devam eden kısımda ise, tez konusuyla ilgili olarak metamalzeme tabanlı soğurucular üzerine yapılan araştırmalar detaylı şekilde incelenmiş ve özet bilgiler sunulmuştur.

Metamalzeme tabanlı soğurucu yapıları ile ilgili ilk çalışmalardan biri, Landy ve arkadaşları tarafından geliştirilen metamalzeme tabanlı mikrodalga emici yapılarıdır (Landy *et al.* 2008). Landy ve arkadaşlarının öncü çalışmasından sonra literatürde çok sayıda farklı metamalzeme tabanlı soğurucu tasarımı geliştirilmiştir. Geliştirilen bu tasarımlara ait araştırmalar incelendiğinde; yüksek emilim performansı (Chen *et al.* 2024), dalgaların polarizasyon duyarlılığı (Shakibul Hasan *et al.* 2024), eğik açılı performansı (Ranjan & Sahoo,

2024), çalışma frekans bandı (Islam *et al.* 2021), bant sayısı (Edries *et al.* 2020) ve yapıların tek katmanlı (Genikala *et al.* 2023) veya çok katmanlı (Yao *et al.* 2022) olması gibi çeşitli niteliklere bağlı olarak farklılıklar gözlemlenmektedir. Metamalzeme soğurucuların soğurum özellikleri ise uygulama alanlarının gereksinimlerine göre dar bantlı (Zhong, 2020) veya geniş bantlı (Yao *et al.* 2022) olacak şekilde oluşturulmaktadır.

Geniş bantlı emilim performansını artırmak amacıyla, metamalzeme yüzeylerine R-L-C devre bileşenleri entegre edilmiş (Amer *et al.* 2022) veya ince film kaplamalar (Korkmaz *et al.* 2023) kullanılarak empedans uyumu sağlanarak geniş bantlı yapılar elde edilmiştir.

Bu yenilikçi yaklaşımlar, radar soğurucuların daha yüksek verimlilikle çalışmasını mümkün kılmış ve GHz (Tian *et al.* 2018) frekans bandının yanı sıra THz (Wu *et al.* 2021) frekans aralığında da uygulanabilir hale gelmiştir. Özellikle THz bölgesi için ayarlanabilir (tuneable) yapılar, VO_2 (vanadyum dioksit) ve grafen kullanımıyla farklı frekanslarda dinamik kontrol imkanı sunmaktadır (Hasankhani *et al.* 2024). Elektronik kontrollü soğurucular ise PIN diyotların entegrasyonu ile açma/kapama mekanizmasına dayalı olarak çalışmakta ve elektromanyetik yanıt üzerinde hızlı kontrol sağlamaktadır (G. Liu *et al.* 2024). Gelişmiş geometriye sahip 3D metamalzeme tasarımları, hem geniş bantta hem de çok yönlü (omnidirectional) soğurma özellikleri ile öne çıkmaktadır (Jiang *et al.* 2018) Ayrıca, uygulama tipine göre tasarlanan yapılar arasında radar görünürlüğünü azaltmaya yönelik yansıtıcı tip soğurucular (Badloe *et al.* 2017) ve enerji geçirgenliğini korurken belirli frekanslarda soğurma yapan iletim modlu metamalzemeler (Wang *et al.* 2024) bulunmaktadır.

Bu tez çalışmasının temel amacı, GHz frekans aralığında çalışan ve özellikle radar kesit alanı (RCS) azaltımına yönelik savunma ve haberleşme sistemleri gibi elektromanyetik uygulamalarda kullanılabilecek metayüzey tabanlı soğurucu yapılar geliştirmektir. Çalışmada, mevcut literatürdeki soğurucu tasarımlarından daha üstün performansa sahip tasarımlar oluşturmak hedeflenmiştir. Bu kapsamda bu kısımdan itibaren özellikle GHz frekans bölgesinde geliştirilen çok bantlı metayüzey soğurucu çalışmaları incelenmiştir.

GHz Frekans Bölgesi Mikrodalga Soğurucular

GHz bölgesinde çalışan metamalzeme soğurucular, çeşitli parametreler göz önünde bulundurularak genellikle metal–dielektrik–metal konfigürasyonunda tasarlanmaktadır. Bu parametreler arasında alttaşı türü, çalışma bant sayısı, eğik açı performansı, polarizasyon tepkisi ve dalga boyu cinsinden kalınlık gibi faktörler yer almaktadır. Çeşitli alttaşı malzemeleri, elektromanyetik dalgalarla etkileşimleri, kayıp faktörleri ve mekanik stabiliteyi açısından farklı avantajlar sunmaktadır. Öne çıkan alttaşı malzemeleri arasında Rogers (Ishrat Jahan *et al.*

2023) FR4 (Errajraji *et al.* 2024), Arlon (Teber, 2024)ve F4B (K. Da Xu *et al.* 2024) gibi dielektrik malzemeler bulunmaktadır. Bu malzemeler, çok bantlı ve ince profilli soğurucu tasarımlar için uygun olup, yüksek soğurma verimliliği sağlarken düşük profilli ve hafif yapılar elde edilmesine olanak tanımaktadır. Ayrıca, eğik açı kararlılığı ve polarizasyon bağımsızlığı gibi parametreler, geniş açılı ve çok yönlü elektromanyetik dalga soğurumu açısından kritik öneme sahiptir.

GHz frekans bölgesinde literatürde bulunan çalışmalardan; Saif Hannan ve arkadaşları, X, Ku ve K frekans bantlarını kapsayan bir metamalzeme soğurucu tasarımı geliştirmişlerdir. Tasarım, 9x9 mm boyutlarında ve 1,6 mm kalınlığındaki FR-4 dielektrik malzemesi üzerine oluşturulmuş; alt ve üst yüzeyleri bakır ile kaplanmıştır. Bu yapı, sırasıyla 11,23 GHz; 14,18 GHz; 17,3 GHz ve 19,18 GHz frekanslarında yüksek soğurma performansı sergilemektedir (Hannan *et al.* 2020).

Moniruzzaman ve arkadaşları, mikrodalga uygulamaları için asimetrik dairesel bölünmüş halka rezonatörüne dayalı bir metamalzeme soğurucu tasarlamışlardır. Bu yapı, FR-4 tabanlı olarak oluşturulmuş, dört bantta %90'ın üzerinde soğurma sağlamış ve C, X ile Ku bandı uygulamalarında kullanılmıştır (Moniruzzaman, Islam, Muhammad, *et al.* 2020).

Edries ve arkadaşları, 1,5 mm kalınlığındaki FR-4 tabanlı dört bantlı bir metamalzeme soğurucu tasarlamışlardır. Bu yapı, her bantta %90'ın üzerinde soğurma verimi göstermiş ve S ile C frekans bantlarında çalışmıştır (Edries *et al.* 2020).

Elakkiya ve arkadaşları, beş bantlı ve polarizasyona duyarsız bir mikrodalga metamalzeme soğurucu (MMA) tasarımı önermişlerdir. Önerilen MMA'nın birim hücresi, 0,8 mm kalınlığındaki FR4 dielektrik tabakası ile ayrılmış, üstteki yama ve alttaki toprak düzlemi olmak üzere iki bakır tabakadan oluşmaktadır. Tasarlanan soğurucu yapı 5,4 GHz (C bandı); 8,7 GHz (X bandı); 14,53 GHz; 15,25 GHz ve 15,68 GHz (Ku bandı) frekanslarında beş farklı soğurma zirvesi sunarak %90'ın üzerinde soğurma performansı göstermektedir (Elakkiya *et al.* 2021).

Islam ve arkadaşları, çok bantlı mikrodalga uygulamaları için tek-negatif meta-atom soğurucu tabanlı, beş bantlı kare kapalı yıldız biçimli modifiye edilmiş bölünmüş halka rezonatörüne (SRR) dayalı bir tasarım önermişlerdir. Düşük maliyetli FR-4 malzemesi kullanılarak gerçekleştirilen bu yapı, S, C, X ve Ku bantlarını kapsayan 3,80 GHz; 5,65 GHz; 8,45 GHz; 10,82 GHz ve 15,92 GHz frekanslarında sırasıyla %97,87; %93,65; %92,66; %99,95 ve %99,86 soğurma performansı göstermiştir (Islam *et al.* 2021).

Hakim ve arkadaşları, Ku ve K bandı uygulamaları için dört bantlı, polarizasyona duyarlı bir metamalzeme soğurucu (MMA) önermişlerdir. 1,6 mm kalınlığındaki FR-4 tabanlı olarak tasarlanan yapı, 12,62 GHz; 14,12 GHz; 17,53 GHz ve 19,91 GHz frekanslarında sırasıyla %97, %99,51, %99 ve %99,5 soğurma performansı sergilemiştir. Ayrıca, çalışmaları 39,43 kalite faktörü değeri ve 45° eğik açı performansı ile öne çıkmaktadır (Hakim *et al.* 2022)

Saxena ve arkadaşları, asimetrik dairesel bölünmüş halka rezonatörüne dayalı bir metamalzeme soğurucu (MMA) önermişlerdir. 1,5 mm kalınlığındaki FR-4 alt tabaka üzerinde oluşturulan bu tasarım, C, X, Ku, K ve Ka bantlarını kapsayan yedi farklı soğurma tepe noktası sergilemektedir. Birim hücre rezonatörü, dört eş merkezli ve birbirine bağlı dairesel bölünmüş halkadan oluşmaktadır. Önerilen yapı, sırasıyla %89,81, %99,5, %99,98, %99,61, %99,52, %99,95 ve %98,47 soğurma oranlarıyla 5,76 GHz, 10,39 GHz, 16,78 GHz, 18,49 GHz, 21,91 GHz, 29,81 GHz ve 35,06 GHz frekanslarında yüksek performans göstermiştir (Saxena *et al.* 2022).

Adnan Yousaf ve arkadaşları, X, Ku ve K bantlarını kapsayan, çok bantlı ve yüksek verimlilikte bir metamalzeme soğurucu (MA) tasarımı önermişlerdir. Önerilen MA yapısının birim hücresi; üst ve alt metal tabakaları bakırdan, orta dielektrik tabakası ise 0,65 mm kalınlığındaki FR-4 malzemesinden oluşmaktadır. Tasarlanan yapı, sırasıyla 8 GHz; 13,1 GHz; 16,08 GHz ve 19,2 GHz frekanslarında %90'ın üzerinde soğurma performansı göstermiştir (Yousaf *et al.* 2022).

Verma ve arkadaşları, asimetrik çift bölünmüş kare metal rezonatör, dielektrik alt tabaka ve bakır tabanlı toprak düzleminden oluşan beş bantlı bir metamalzeme soğurucu önermişlerdir. Önerdikleri tasarım, X, Ku, K ve Ka bantlarında %85'in üzerinde soğurma performansı sergilemektedir (Verma & Meena, 2023).

Yang ve arkadaşları, 1 mm kalınlığındaki FR-4 tabanlı altı bantlı bir metamalzeme soğurucu önermişlerdir. Tasarım, S, C, X, Ku ve K bantlarında sırasıyla 3,55 GHz; 5,15 GHz; 10,12 GHz; 12,52 GHz; 15,90 GHz ve 21,97 GHz'de çalışmış; bu frekanslarda %99,75, %99,96, %99,93, %98,79 ve %94,45 soğurma oranlarına ulaşmıştır (Yang *et al.* 2023).

Jin ve arkadaşları, ultra ince bir metamalzeme soğurucu tasarımı sunmuşlardır. Tasarım, 0,8 mm kalınlığında ve dielektrik sabiti 3,5 olan kayıplı bir malzeme olan poliimid (PI) alt tabakası üzerine yerleştirilen düzenli aralıklarla yerleştirilmiş yapılarla gerçekleştirilmiştir. Önerilen metamalzeme soğurucu C, X ve Ku bantlarını kapsayan 4,70 GHz; 10,19 GHz; 11,96 GHz ve 14,15 GHz frekanslarında dört soğurma zirvesi sağlamıştır. Ayrıca, dikey polarizasyonda 0° ile 30° arasındaki geliş açılarında kararlı bir soğurma performansı sergilemektedir (Jin *et al.* 2023).

Laxmikant Dewangan ve arkadaşları, K bandında gizlilik uygulamaları için geniş açılı ve polarizasyona duyarsız bir metamalzeme soğurucu tasarımı geliştirmişlerdir. Tasarlanan yapı 1,54 mm kalınlığında bir FR-4 dielektrik tabaka üzerine yerleştirilmiş, alt ve üst metal tabakası bakırdan imal edilmiş ve simetrik olarak düzenlenmiş merdiven şeklinde birim hücre geometrisine sahiptir. Benzetim sonuçlarına göre, bu yapı %91'in üzerinde soğurum sağlayarak 21,2 GHz ile 28,2 GHz arasındaki frekans aralığında toplam 7 GHz'lik geniş bir bant genişliği sunmaktadır (Dewangan *et al.* 2023).

Ranjan ve arkadaşları tarafından FR-4 alt tabakası üzerinde gerçekleştirilen tasarımda, birim hücre rezonatörü sırasıyla 4,59 GHz; 6,84 GHz; 9,35 GHz; 13,60 GHz ve 16,08 GHz frekanslarında beş soğurma noktası sergilemiştir. Bu frekanslar sırasıyla %97, %78, %92, %99 ve %95 soğurma performanslarıyla C, X ve Ku bantlarında çalışmaktadır (Ranjan & Sahoo, 2024).

Rabbani ve arkadaşları, S, X ve Ku bantlarında sırasıyla 3,26 GHz, 11,6 GHz ve 17,13 GHz'de tepe soğurmaları gösteren bir metamalzeme soğurucu (MMA) sunmuşlardır. Bu rezonans frekanslarında sırasıyla, %93,8, %96,47 ve %99,95 soğurma değerleri elde etmiştir. Ayrıca tasarım, polarizasyon açısındaki değişimlerden etkilenmeyerek hem TE hem de TM modunda aynı soğurum performansını göstererek polarizasyona duyarsız olarak çalışmaktadır. 1,6 mm kalınlığındaki FR-4 üzerine tasarlanan soğurucu, 51,9 kalite faktörü değeri ve 60° eğik açı performansı ile öne çıkmaktadır (Rabbani, Islam, Moniruzzaman, *et al.* 2024).

Shakibul ve arkadaşları, çift eliptik bölünmüş halka rezonatör tabanlı dört bantlı bir metamalzeme soğurucu (MMA) önermişlerdir. Bu rezonatör, yapının ortasına yerleştirilmiş iki eliptik bölünmüş halka ile bunların çevresine yerleştirilmiş dört kare halkadan oluşmaktadır. Rezonans yaması, 1,6 mm kalınlığındaki FR-4 dielektrik tabaka üzerine yerleştirilmiştir. Önerilen MMA, sırasıyla 2,57 GHz; 5,64 GHz; 8,32 GHz ve 13,45 GHz frekanslarında %92,87, %76,9, %94,12 ve %90,97 soğurma performansı göstermiştir (Shakibul Hasan *et al.* 2024).

Pati ve arkadaşları, radar kesit alanı (RCS) azaltımı ve anten performansı iyileştirmesi gibi uygulamalarda kullanılabilecek, açısal kararlı ve polarizasyona duyarsız bir metamalzeme tabanlı mikrodalga soğurucu tasarlamışlardır. Oluşturdukları tasarım 1,6 mm kalınlığında FR-4 alt tabakası üzerine gerçekleştirilmiştir. Soğurucu, C, X, Ku ve K bantlarında yedi farklı frekans noktasında yüksek performanslı soğurum yapabilmektedir. Belirtilen frekanslar 5,2 GHz; 8,65 GHz; 9,63 GHz; 13,53 GHz; 14,5 GHz; 16,6 GHz ve 18,92 GHz olup, tüm bu frekanslarda %90'ın üzerinde soğurum performansı sağlanmıştır. Ayrıca, eğik açı performansında tasarım, 65 dereceye kadar eğik gelen dalgalarda %80'in üzerinde verimle çalışmıştır (Pati & Sahoo, 2024).

Hasan ve arkadaşları çift eliptik rezonatörlere dayalı bir dört bantlı metamalzeme soğurucu tasarımı sunmuşlardır. Tasarımın soğurum performansı %90 üzerinde olup sırasıyla 2,576 GHz; 5,632 GHz; 8,304 GHz ve 13,44 GHz frekanslarında gelmiştir. Soğurucu, S, C, X ve Ku bantlarında gerçekleşmektedir. Tasarladıkları yapı, hem gelen dalga açısına hem de polarizasyon açısına karşı hassas olmayan bir performans sergileyerek, farklı açılardan gelen elektromanyetik dalgaları etkili bir şekilde soğurabilmektedir (Shakibul Hasan *et al.* 2024).

Md. Golam Rabbani ve arkadaşları, algılama uygulamalarına yönelik olarak çok bantlı bir metamalzeme soğurucu tasarlamış ve analiz etmişlerdir. Önerilen yapı, ortasında E şeklinde bir geometri ve çevresinde yer alan kare rezonatörlerden oluşan bir birim hücreye sahiptir. Bu tasarımda, 1,6 mm kalınlığında FR-4 dielektrik malzeme kullanılmış; üst ve alt metal katmanlar ise bakır olarak belirlenmiştir. Gerçekleştirilen benzetim analizleri sonucunda, yapının S, C ve X bantlarında dört farklı frekansta %90'ın üzerinde pik soğurum sağladığı rapor edilmiştir (Rabbani, Islam, Hoque, *et al.* 2024)

Errajraji ve arkadaşları, mikrodalga frekans spektrumunda yedi bantlı çalışan bir metamalzeme soğurucu önermişlerdir. Bu tasarım, üç rezonatörün birleşimine dayanmakta olup sırasıyla 3,15 GHz; 5,96 GHz; 8,73 GHz; 9,36 GHz; 13,22 GHz; 13,71 GHz ve 14,45 GHz frekanslarında %93,65, %85,75, %94,14, %99,51, %90,55, %97,87 ve %98,68 soğurum değerlerine sahiptir. Soğurucu, S, C, X ve Ku bantlarında çalışmakta, 50° eğik açı performansı göstermekte ve 1,6 mm kalınlığındaki FR-4 alt tabakası üzerinde gerçekleştirilmiştir (Errajraji *et al.* 2024).

Saxena ve arkadaşları, 1 mm kalınlığındaki FR-4 tabanlı bir metamalzeme soğurucu tasarlamışlardır. 20x20x1 mm³ boyutlarında olan bu yapı, C, X, Ku ve K bantlarında dokuz bantlı olarak %90'ın üzerinde soğurum performansı göstermiş ve 5,76 GHz frekansında yüksek kalite faktörü ($Q = 72$) elde etmiştir (Saxena *et al.* 2024).

Khalil ve arkadaşları, 10x10x1,57 mm³ boyutlarındaki birim hücreye sahip, uygun maliyetli FR-4 tabanlı bir metamalzeme soğurucu tasarlamışlardır. Bu yapı, S bandında 3,47 GHz'de ve C bandında 7,219 GHz'de olmak üzere çift soğurma noktası sergilemiş, her iki bantta da %98'in üzerinde performans göstermiş ve kalite faktörü değerini ise 91 olarak hesaplamışlardır (Khalil *et al.* 2024).

Rabbani ve arkadaşları, Rogers RT5880 alt tabakası üzerinde çift bantlı bir metamalzeme soğurucu tasarlamışlardır. Tasarım, S ve C bantlarında 3,12 GHz ve 4,58 GHz frekanslarında çalışmış, %99'un üzerinde soğurma performansı göstermiş ve 65 kalite faktörü değerinde bulunmuştur (Rabbani, Hoque, *et al.* 2024).

Uddin ve arkadaşları, S, C, X, Ku ve K bantlarında çalışan ve sekiz bantta %90'ın üzerinde soğurum performansı gösteren bir metamalzeme soğurucu önermişlerdir. 1,6 mm kalınlığındaki FR-4 üzerine tasarlanan bu yapı, polarizasyona duysız ve çok bantlı özelliğiyle öne çıkmaktadır (Uddin *et al.* 2024).

Mahfooz ve arkadaşları, 0,8 mm kalınlığındaki ince FR-4 dielektrik tabaka üzerine dört bantlı bir metamalzeme soğurucu tasarlamışlardır. Tasarım, 7,16 GHz; 10,175 GHz; 12,92 GHz ve 16,82 GHz frekanslarında sırasıyla %99,6, %97,2, %98,3 ve %94,8 soğurum performans oranı göstermiştir. Ayrıca yapı, 60° eğik açı performansı sergilemiş ve polarizasyondan bağımsız özellik göstermiştir (Mahfooz *et al.* 2024).

Alsaif ve arkadaşları, 1,575 mm kalınlığındaki düşük maliyetli Rogers RT5880 dielektrik alt tabakası üzerinde çalışan bir metamalzeme soğurucu önermişlerdir. Bu yapı, S ve C bantlarında 3,85 GHz ve 6,85 GHz frekanslarında %99'un üzerinde soğurma performansı göstermiş ve bu tasarım için 345 değerinde kalite faktörü elde edilmiştir (Alsaif *et al.* 2024).

Sakib ve arkadaşları, çok bantlı enerji hasat uygulamaları için polarizasyona duysız ve negatif kırılma indeksine sahip, ters U şeklinde esnek bir beş bantlı metamalzeme soğurucu tasarlamışlardır. Tasarımda, 0,508 mm kalınlığında olan ve 'Rogers RO4350B' olarak adlandırılan kayıplı bir dielektrik tabaka kullanılmış; alt ve üst yüzeyler metal tabakalarla kaplanmıştır. Bu yapı 1,975 GHz; 2,85 GHz; 5,265 GHz ve 5,5 GHz frekanslarında %90'ın üzerinde soğurum performansı göstermiştir. Ayrıca, tasarımın L, S ve C bantlarında geniş bir uygulama alanı sunduğu belirtilmiştir (Sakib *et al.* 2025).

Anowarul ve arkadaşları, 1,575 mm kalınlığındaki FR-4 üzerine tasarladıkları metamalzeme soğurucunun, 3,26 GHz, 4,10 GHz ve 7,202 GHz rezonans frekanslarında sırasıyla %99,82, %98 ve %99,30 soğurum oranlarıyla S ve C bantlarında güçlü performans gösterdiğini rapor etmişlerdir. Tasarım, yüksek kalite faktörü (150,32 Q faktörü) ve 80° eğik açı performansı ile öne çıkmaktadır (Anowarul Haque *et al.* 2025).

Bu tez çalışmasının temel amacı, GHz frekans aralığında çalışan ve özellikle radar kesit alanı (RCS) azaltımına yönelik savunma ve haberleşme sistemleri gibi elektromanyetik uygulamalarda kullanılabilecek metayüzey tabanlı soğurucu yapılar geliştirmektir. Çalışmada, mevcut literatürdeki çalışmaların zayıf noktalarını geliştirmek amacıyla daha ince, çok bantlı ve yüksek soğurma verimliliğine sahip yapılar hedeflenmiştir. Geliştirilen bu yapılar, düşük profil ve hafiflik gibi avantajlarıyla pratik uygulamalara uygun olup, geniş açıdan gelen dalgalara ve farklı polarizasyonlara karşı yüksek soğurma özellikleri göstermekte ve elektromanyetik görünürlüğün azaltılmasını desteklemektedir. Bu doğrultuda çalışma, literatürdeki mevcut tasarımlara kıyasla daha yüksek soğurma performansı sunan, ultra ince ve

çok bantlı metayüzey tabanlı soğurucu yapılar geliştirerek elektromanyetik soğurucu araştırmalarına özgün bir katkı sağlamaktadır.



KURAMSAL TEMELLER

Metamalzeme Özellikleri

Metamalzeme ve metayüzeyler; metal, dielektrik ve desenli metal tabakalardan oluşan çok katmanlı yapılar olup, elektromanyetik dalgalarla olan etkileşimleri bu katmanların geometrik düzenine ve periyodik yapısına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Yapının birim hücre boyutları ve dizilimleri, dalgaların yapıyla olan etkileşimini doğrudan etkileyerek istenen elektromanyetik yanıtın elde edilmesini sağlamaktadır. Bu yapıların çalışma prensibi; Maxwell denklemleri, dalga denklemleri, yansıma ve iletim katsayıları ile empedans uyumu gibi temel elektromanyetik teorilere dayanmaktadır. Elektromanyetik dalgaların bir ortam içerisindeki yayılımı, ortamın elektriksel geçirgenliği (ϵ) ve manyetik geçirgenliği (μ) gibi temel malzeme parametrelerine bağlıdır. Elektromanyetik alanların zamana bağlı harmonik çözümleri, Helmholtz denklemi formuna indirgenerek uzaysal dağılımları ile modellenmekte olup bu ilişki Denklem (6)'da matematiksel olarak ifade edilmiştir. (Pozar, 2012).

$$\nabla^2 \vec{E} + k^2 \vec{E} = 0 \quad (6)$$

Burada k dalga numarası olup Denklem (7)'de belirtildiği gibi ifade edilmektedir.

$$k = \omega \sqrt{\mu \epsilon} \quad (7)$$

Denklem (7) de bulunan ϵ ve μ ifadelerinin açılımı Denklem (8) ve (9) da belirtilmektedir.

$$\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \quad (8)$$

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r \quad (9)$$

Burada $\epsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12}$ F/m boşluğun elektrik geçirgenliği, ϵ_r yayılma ortamındaki malzemenin bağıl elektrik geçirgenliğini, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m boşluğun manyetik geçirgenliği ve μ_r yayılma ortamının bağıl manyetik geçirgenliği ifade etmektedir.

$$c_0 = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \quad (10)$$

Boşluktaki elektriksel geçirgenlik ve manyetik geçirgenlik, elektromanyetik dalgaların boşluktaki yayılma hızı olan ışık hızı (c_0) ile doğrudan ilişkilidir. Bu ilişki, Denklem (10)'da matematiksel olarak ifade edilmektedir.

Bir ortamın kırılma indisi, o ortamda ilerleyen ışığın veya elektromanyetik dalgaların boşluktaki hızının (c_0) ortamdaki hızına (v) oranını gösteren bir katsayıdır.

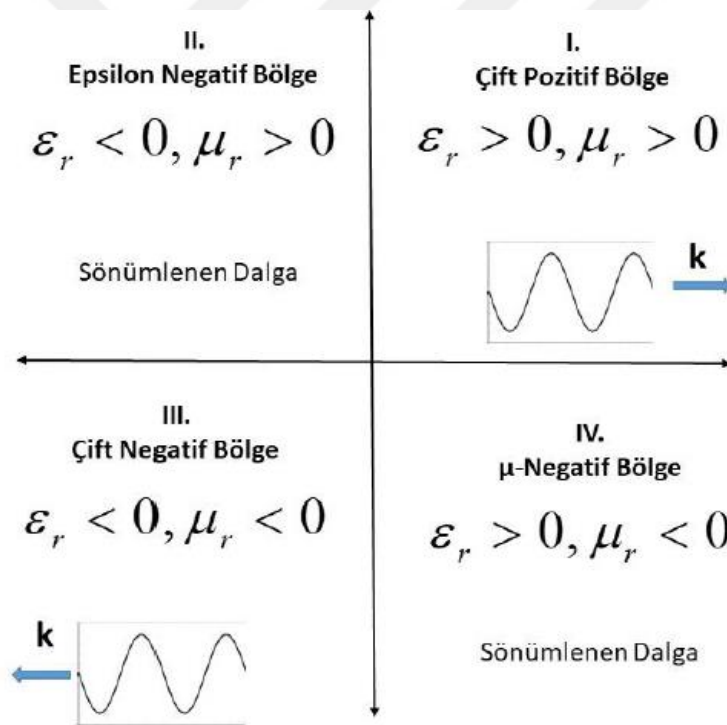
$$n = \frac{c_0}{v} \quad (11)$$

Matematiksel olarak kırılma indisi (n) Denklem (11)'de ki gibi ifade edilmektedir.

$$n = \sqrt{\epsilon_r \mu_r} \quad (12)$$

Kırılma indisi, ortamın dielektrik geçirgenliği ve manyetik geçirgenliği ile doğrudan ilişkilidir. Bu ilişkiyi veren Denklem (12)'de ifade edilmektedir. Veselago metamalzemelerin aynı anda negatif ϵ_r ve μ_r 'ye sahip olması durumunda negatif kırılma indisi elde edileceğini belirtmiştir (Veselago, 1968).

Malzemelerin bağıl dielektrik geçirgenlik ve bağıl manyetik geçirgenlik değerleri dört farklı işaret kombinasyonuna sahiptir.



Şekil 5. Malzemelerin sınıflandırılması (Caloz & Itoh, 2005)

Şekil 5'te gösterildiği üzere, malzemeler elektromanyetik özelliklerine göre dört farklı bölgeye ayrılarak sınıflandırılmaktadır.

I. Bölge; $\epsilon_r > 0$ ve $\mu_r > 0$ koşulunu sağlayan, yani hem dielektrik hem de manyetik geçirgenliği pozitif olan malzemeleri kapsamaktadır. Bu tür malzemeler doğada yaygın olarak bulunur ve çift pozitif ortamlar (double-positive, DPS) olarak adlandırılır. Bu bölgede kırılma indisi pozitifdir ve elektromanyetik dalgalar sağa doğru ilerleyen dalgalar şeklinde yayılır.

II. Bölge; $\epsilon_r < 0$ ve $\mu_r > 0$ olan ortamları ifade eder. Bu malzemeler, yalnızca dielektrik geçirgenliğin negatif olduğu epsilon negatif ortamlar (ENG) olarak tanımlanır. Bu bölgede kırılma indisi genellikle sanal bir değer alır. Bu da elektromanyetik dalgaların ortam içerisinde yayılmadan sönmelenmesine yol açar. Dolayısıyla, bu ortamlarda dalga yayılımı sınırlıdır.

III. Bölge; $\epsilon_r < 0$ ve $\mu_r < 0$ olduğu durumu ifade eder. Bu tür malzemeler, hem dielektrik hem de manyetik geçirgenliğin negatif olduğu çift negatif ortamlar (double-negative, DNG) olarak adlandırılır. Bu ortamda kırılma indisi negatif reel bir değer alır. Böyle bir durumda dalga vektörü (k) ile enerji akışı yönü (Poynting vektörü, S) birbirine zıt yönlü olur. Bu özellik, elektromanyetik dalgaların sola doğru ilerleyen dalgalar şeklinde yayılmasına neden olur.

IV. Bölge; $\epsilon_r > 0$ ve $\mu_r < 0$ koşulunu sağlayan, yani yalnızca manyetik geçirgenliği negatif olan mü negatif ortamlar (mu-negative, MNG) olarak tanımlanır. Bu bölgede de kırılma indisi genellikle sanal bir değerdedir ve dalga yayılımı sınırlı olup sönmülü gerçekleşmektedir (Caloz & Itoh, 2005).

$$\nabla \times \mathbf{E} = -j\omega\mu\mathbf{H} \quad (13)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = j\omega\epsilon\mathbf{E} \quad (14)$$

Önceki kısımda belirttiğimiz gibi geleneksel malzemelerde elektriksel (ϵ) ve manyetik geçirgenlik (μ) pozitif değer aldığında kırılma indisi de pozitif değere sahip olur. Metamalzemelerde ise bu parametreler negatif değerlere sahip olmaktadır. Bu farkı daha net şekilde belirtmek için Maxwell denklemlerini, harmonik zaman bağımlılığı altında Denklem (13) ve (14) de geleneksel malzemeler için ifade edilmektedir.

Eğer ϵ ve μ pozitifse, dalga vektörü (k), elektrik alan (E) ve manyetik alan (H) sağ el kuralına uygun bir ilişki içindedir. Bu tür malzemeler "sağ eli malzemeler" olarak adlandırılır ve bu durumda vektörler birbirine dik olur ($k \perp E \perp H$).

$$\nabla \times \mathbf{E} = j\omega\mu\mathbf{H} \quad (15)$$

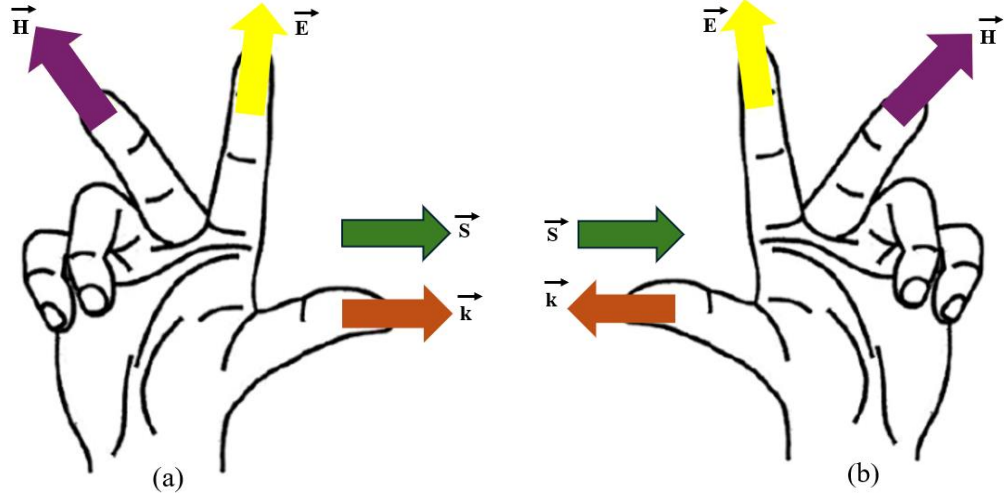
$$\nabla \times \mathbf{H} = -j\omega\epsilon\mathbf{E} \quad (16)$$

Eğer ϵ ve μ negatifse Maxwell denklemleri Denklem (15) ve (16)'de ki gibi ifade edilmektedir. Bu durumda, k , E ve H arasındaki ilişki tersine döner ve dalga vektörü (k) ile güç akışı (Poynting vektörü, S) zıt yönlü olur. Bu tür malzemelere "sol eli malzemeler" denir.

$$\mathbf{S}_{ort} = \frac{1}{2} \text{Re}(\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*) \quad (17)$$

Denklem (17)'da $\mathbf{S}_{ort}$ ortalama güç vektörünü, H^* manyetik alanın kompleks eşleniğini ifade eder. Sol eli malzemelerde, güç akışı (S) ile dalga vektörü (k) ters yönlüdür.

Bu durum, enerjinin yayılma yönü ile dalganın faz hızının zıt yönde olduğu anlamına gelir. Faz hızı güç akışıyla aynı yöndeyken, grup hızı (enerjinin taşınma hızı) faz hızına zıt yöndedir.



Şekil 6. (a) Sağ elli metamatizme (b) Sol elli metamatizme

Şekil 6’da sağ ve sol elli metamatizmeler için görsel olarak parametreler detaylandırılmıştır.

Negatif Kırılma İndisi ve Ters Snell Yasası

$$n(\omega) = \sqrt{\epsilon_r(\omega)\mu_r(\omega)} \quad (18)$$

Denklem (18) de kırılma indisi, frekans (ω) bağlı olarak ifade edilmektedir.

$$\epsilon_r(\omega) = |\epsilon_r(\omega)|e^{j\pi} \quad (19)$$

$$\mu_r(\omega) = |\mu_r(\omega)|e^{j\pi} \quad (20)$$

Metamatizmelerde, dielektrik ve manyetik geçirgenliklerin negatif olduğu durumlar, kutupsal (fazör) gösterimle Denklem (19) ve (20) de gösterildiği gibi ifade edilmektedir.

$$n(\omega) = \sqrt{|\epsilon_r(\omega)||\mu_r(\omega)|e^{j\pi}} = -\sqrt{|\epsilon_r(\omega)||\mu_r(\omega)|} \quad (21)$$

Denklem (19) ve (20), Denklem (18)’de kullanılırsa Denklem (21)’de gösterildiği gibi negatif bir kırılma indisi elde edilir. Bu durum, metamatizmelerin en karakteristik özelliği olan negatif kırılma davranışının temel matematiksel kanıtıdır.

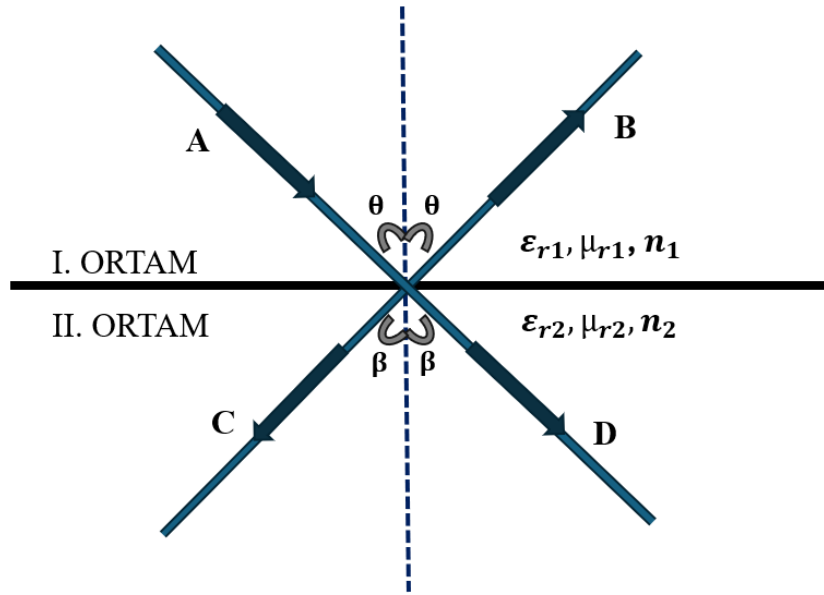
Tablo 1. Kırılma İndisi İşaret Kuralları

Durum	ϵ_r	μ_r	Kırılma İndisi (n)
Doğal Malzemeler	$\epsilon_r > 0$	$\mu_r > 0$	$n > 0$
Metamatizmeler (DNG)	$\epsilon_r < 0$	$\mu_r < 0$	$n < 0$
Sanal Kırılma İndisi	$\epsilon_r > 0$	$\mu_r < 0$	n sanal sönümleme
	$\epsilon_r < 0$	$\mu_r < 0$	veya

İki farklı ortam arasındaki sınırdaki elektromanyetik dalganın geçişi Snell Yasası ile tanımlanmaktadır (Balanis, 2012).

$$\frac{\sin \theta}{\sin \beta} = \frac{n_1}{n_2} = \sqrt{\frac{\epsilon_{r1}\mu_{r1}}{\epsilon_{r2}\mu_{r2}}} \quad (22)$$

Denklem (22)'de Snell yasa tanımını veren matematiksel ifade gösterilmektedir. Burada θ ve β sırasıyla elektromanyetik dalganın geliş ve kırılma açılarını, n_1 ve n_2 birinci ve ikinci ortamın kırılma indislerini, ϵ_{r1}, μ_{r1} ve ϵ_{r2}, μ_{r2} ise ilgili ortamların bağıl dielektrik ve manyetik geçirgenliklerini ifade etmektedir.

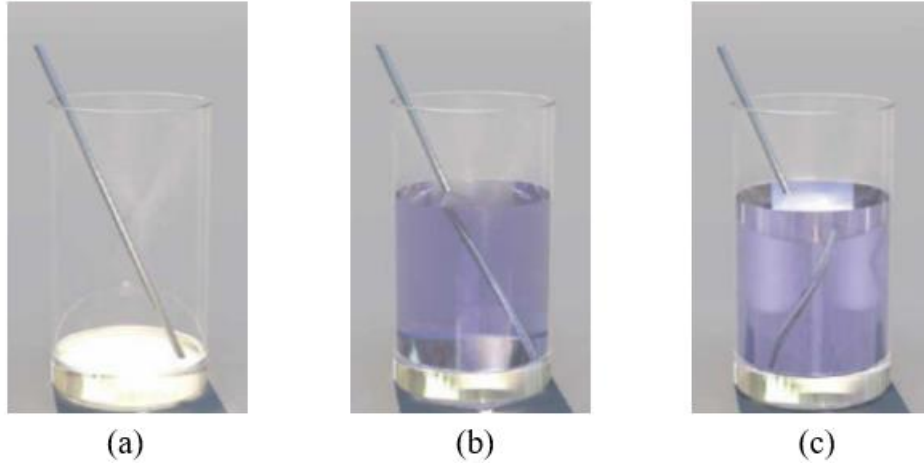


Şekil 7. İki farklı ortam arasındaki elektromanyetik dalga geçişi

Elektromanyetik bir dalganın iki farklı ortam arasındaki geçiş davranışı, kırılma indisine bağlı olarak Şekil 7’de sunulmuştur. Bu şekle göre, birinci ortamdan A yönünde gelen dalga, sınır yüzeyine ulaştığında bir kısmı yansiyarak B yönüne dönerken, bir kısmı ikinci ortama kırılarak D yönünde iletilmektedir. Ancak ikinci ortam metamalzeme özellikleri taşıyorsa, kırılma olayı klasik Snell yasasına uymak yerine ters Snell yasasına göre gerçekleşir ve bu durumda dalga, C yönünde iletilerek farklı bir kırılma davranışı sergilemektedir. Metamalzemelerde ($n_2 < 0$), kırılma açısı (β) negatif olur. Bu durumda, elektromanyetik dalga ters yönde kırılır. Bu olgu, ters Snell yasası olarak bilinmektedir (Balanis, 2012) .

Negatif Kırılma İndisinin DeneySEL Görsel Etkisi

Snell yasasının negatif kırılma indisi durumunda nasıl değiştiğini gözlemlemek için basit bir deneysel düzeneğe başvurulabilir.



Şekil 8. (a) Boş bardaktaki metal çubuk, (b) bardak $n = 1.3$ su ile doldurulunca ve (c) bardak $n = -1.3$ su ile doldurulunca oluşan görünüm (Dolling *et al.* 2006)

Şekil 8'de gösterildiği gibi, bir metal çubuk boş bir bardağa yerleştirildiğinde üç farklı durum gözlemlenir:

- (a) Bardak boşken, çubuk doğrusal ve doğal haliyle görünür.
- (b) Bardak sıradan bir sıvı (örneğin su) ile doldurulduğunda, ışık farklı yoğunlukta iki ortamdan geçerken kırılır ve çubuk gözle ters yönde kırılmış gibi bükülmüş görünür.
- (c) Eğer bardak, kırılma indisi $n = -1.3$ olan özel bir sıvı ile doldurulursa, bu kez çubuk alışılmışın aksine ters yönde bükülmüş gibi algılanır.

Bu deneysel gözlem, negatif kırılma indisinin ışığın yayılım yönünü nasıl belirgin şekilde değiştirdiğini açıkça ortaya koymakta ve metamalzemelerin alışılmadık optik davranışlarına somut bir örnek sunmaktadır (Dolling *et al.* 2006).

MATERYAL VE METOT

Saçılma Parametreleri (S-Parametreleri)

Saçılma parametreleri (S-parametreleri), bir malzemenin veya devrenin elektromanyetik dalgalar karşısındaki davranışını incelemeye kullanılan bir yöntemdir. Yüksek frekanslı sistemlerde gerilim ve akım ölçümlerinin zorlaşması nedeniyle, sistemin giriş ve çıkış portları arasındaki elektriksel durumu anlamak için bu parametreler tercih edilir. Her port için gelen (incident) ve giden (reflected) dalgalar arasındaki ilişkiyi gösterir. Böylece bir porttan gelen dalganın ne kadarının geri yansıdığı ve diğer portlara ne kadarının iletildiği hesaplanmaktadır. Bu yöntem, özellikle antenler, mikroşerit hatlar, dalga kılavuzları ve metamalzeme yapıları gibi çeşitli yüksek frekanslı uygulamalarda yapının geçirgenlik ve yansıtma özelliklerinin değerlendirilmesinde kullanılır (Pozar, 2012). Literatürde ilk olarak 1945 yılında Vitold'un çalışmasında yer alan bu kavram, 1947 yılında Henry tarafından radar sistemleri üzerine yapılan bağımsız bir çalışmada da ele alınmıştır (Belevitch, 1962; Van Valkenburg, 1974).

S-parametreleri, giriş ve çıkış portları arasında elektromanyetik dalgaların nasıl yayıldığını, yansıdığını ve iletildiğini kompleks sayı formatında tanımlamaktadır. Bu sayede sadece sinyal genliği değil, aynı zamanda faz bilgisi de elde edilmektedir. N portlu bir sistem için teorik olarak N^2 adet S-parametresi tanımlanır; fakat pratikte çoğu elektromanyetik soğurucu yapının karakterizasyonunda 2 portlu sistemler yeterlidir. Bu tür bir sistemde kullanılan temel S-parametreleri şu şekilde özetlenebilir.

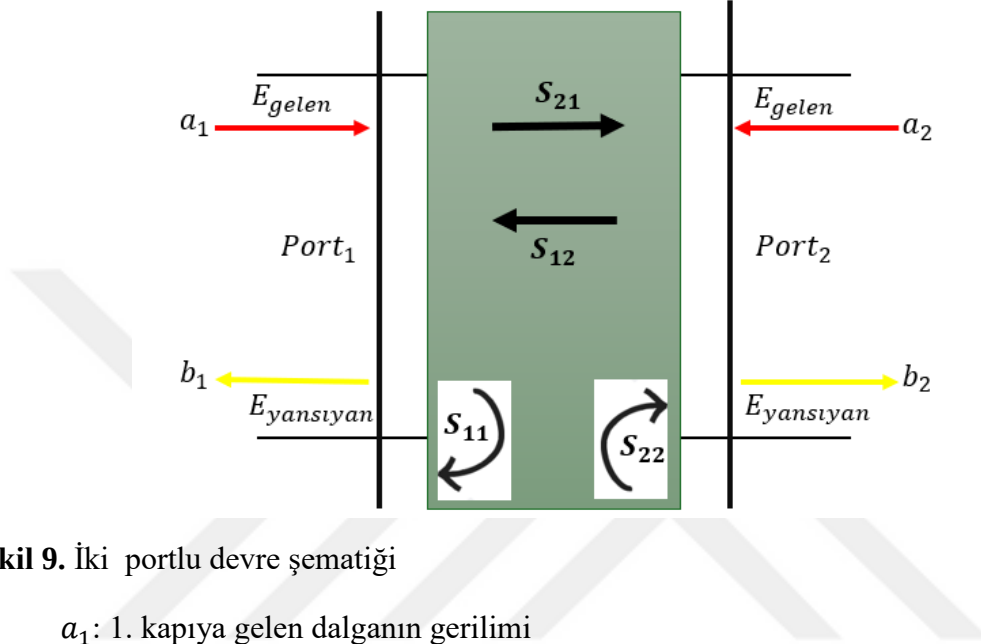
S_{11} : Giriş portuna uygulanan elektromanyetik dalganın aynı porttan ne kadarının geri yansıdığını gösteren yansıma katsayısıdır. Bu değer, yapının girişte ne kadar enerji soğurduğunu ya da yansıttığını değerlendirmede kullanılır.

S_{12} : Çıkış portuna uygulanan sinyalin giriş portuna ne kadar iletildiğini gösteren iletim katsayısıdır.

S_{21} : Giriş portundan uygulanan sinyalin çıkış portuna ne kadar iletildiğini tanımlayan iletim katsayısıdır.

S_{22} : Çıkış portuna uygulanan elektromanyetik dalganın aynı porttan ne kadarının geri yansıdığını gösteren yansıma katsayısıdır.

Bu parametreler, özellikle elektromanyetik soğurucu tasarımlarında soğurum performansını değerlendirmek için kullanılır. Örneğin, ideal bir soğurucuda iletim (S_{21}) ve yansıma (S_{11}) değerleri minimum seviyede olmalıdır; böylece gelen elektromanyetik dalgaların büyük bir bölümü yapı tarafından soğurulur. S-parametrelerindeki bu ölçümler, soğurum oranı hesaplamalarında temel teşkil eder ve yapının frekans bağımlı davranışını analiz etmede önemli bir rol oynar.



Şekil 9. İki portlu devre şematığı

a_1 : 1. kapıya gelen dalganın gerilimi

a_2 : 2. kapıya gelen dalganın gerilimi

b_1 : 1. kapıdan yansıyan dalga

b_2 : 2. kapıdan yansıyan dalga

Bu parametreler, Şekil 9'da verilen iki portlu devre modelinde gösterildiği gibi, elektriksel işaretlerin giriş ve çıkış noktalarındaki davranışlarını belirlemek için kullanılır. Matematiksel olarak, bu parametreler Denklem (23) ve (24) gösterildiği gibi gösterilmektedir (Pozar, 2012):

$$S_{11} = \frac{b_1}{a_1} |_{a_2=0}, \quad S_{21} = \frac{b_2}{a_1} |_{a_2=0} \quad (23)$$

$$S_{22} = \frac{b_2}{a_2} |_{a_1=0}, \quad S_{12} = \frac{b_1}{a_2} |_{a_1=0} \quad (24)$$

Bu ifadeler matris formunda Denklem (25)'de gösterildiği gibi ifade edilmektedir:

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \quad (24)$$

Denklem (26) ve (27) de gösterildiği gibi eşitlik haline dönüşmektedir:

$$b_1 = S_{11}a_1 + S_{12}a_2 \quad (25)$$

$$b_2 = S_{21}a_1 + S_{22}a_2 \quad (26)$$

Soğurma Analizi

Metamalzeme soğurucuların elektromanyetik dalgaları soğurma performansı, yapının geometrik konfigürasyonu, kullanılan malzemenin elektromanyetik özellikleri ve çalışma frekansına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Soğurucu yapıların temel amacı, üzerine gelen elektromanyetik dalganın iletimini ve yansımalarını minimize ederek, enerjinin mümkün olan en büyük kısmının yapının içinde sönümlenmesini sağlamaktır (Landy *et al.* 2008). Bu amaca ulaşmak için, yapı ile serbest uzay arasındaki empedans uyumu sağlanmalı ve yapının dielektrik ve/veya manyetik kayıpları yeterli düzeyde olmalıdır.

Soğurma katsayısı, bir yapıya gelen elektromanyetik enerjinin yapıda emilen kısmını tanımlar ve yansıma (R) ile iletim (T) katsayıları üzerinden Denklem (28)'de ki gibi ifade edilmektedir:

$$A(w) = 1 - R(w) - T(w) \quad (27)$$

Burada:

- $A(w)$: Soğurma oranı,
- $R(w) = |S_{11}(w)|^2$: Geri yansıyan güç oranı,
- $T(w) = |S_{21}(w)|^2$: İletilen güç oranıdır.

Metamalzeme soğurucular genellikle metalik bir arka tabakaya sahip olacak şekilde tasarlanır. Bu, iletilen güç oranının sıfıra yakın olmasını sağlar ($T(w) \approx 0$). Bu durumda Denklem (29)'da ki hale dönüşmektedir:

$$A(w) = 1 - |S_{11}(w)|^2 \quad (28)$$

Yani yapının soğurma performansı yalnızca yansıma katsayısına bağlı hale gelir. Maksimum soğurma için yansımanın en aza indirilmesi gerekir.

Giriş empedansı ve empedans eşleşmesi

Yansımanın azaltılması için metamalzeme yapının giriş empedansının (Z_{in}), serbest uzayın karakteristik empedansı ($Z_0 = 377\Omega$) ile eşleşmesi gerekmektedir. Giriş empedansı, metamalzemenin efektif elektriksel ve manyetik parametreleri ile ifade edilerek Denklem (30)'da gösterildiği gibi belirtilmektedir:

$$Z_{in} = \sqrt{\frac{\mu_{eff}(w)}{\epsilon_{eff}(w)}} \quad (29)$$

Bir metamateryelin soğurma kabiliyeti yalnızca empedans uyumu ile değil, aynı zamanda içerdiği kayıplar ile de ilgilidir. Yani, elektromanyetik dalga yapıya girdiğinde, yapı içerisinde yeterli sönümlenme sağlanmalıdır. Bu kayıplar aşağıdaki Denklem (31) ve (32) ile ifade edilmektedir:

$$\epsilon_{eff}(w) = \epsilon'(w) - j\epsilon''(w) \quad (30)$$

$$\mu_{eff}(w) = \mu'(w) - j\mu''(w) \quad (31)$$

Burada:

- ϵ'' : dielektrik kayıpları,
- μ'' : manyetik kayıplardır.

Giriş empedansının serbest uzay empedansına eşitlenmesi halinde yapının yansıması Denklem (33) ve (34)'de gösterildiği şekilde ifade edilmektedir:

$$\Gamma = \frac{Z_{in}(w) - Z_0}{Z_{in}(w) + Z_0} \quad (32)$$

$$R(w) = |\Gamma(w)|^2 = \left| \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \right|^2 \quad (33)$$

Empedans eşleşmesi sağlandığında, $Z_{in} = Z_0$ bu durumda $\Gamma = 0$ ve $R = 0$ dolayısıyla: $A(w) = 1$ bu da tam soğurma anlamına gelir (X. Liu *et al.* 2010).

İnce Katman Yaklaşımı

Yapı, çok ince bir katmandan oluşuyorsa ve kalınlığı dalga boyundan çok küçükse ($d \ll \lambda$), yapı içerisindeki yansıma ve iletim etkileri de farklı hesaplanabilir. Böyle durumlarda “yük eşdeğeri modeli” kullanılarak yüzey empedansı (Z_s) Denklem (35)'deki gibi tanımlanmaktadır:

$$Z_s = \frac{1}{Y_s} = \frac{1}{j\omega C - \frac{1}{j\omega L}} \quad (34)$$

Burada C ve L, metamaterye rezonatörlerinin etkin kapasitans ve endüktans değerleridir. Rezonans frekansında ($\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$) maksimum enerji soğurmaktadır (Watts *et al.* 2012).

Süreç Aşamaları

Bu tez çalışmasında, GHz frekans aralığında çalışan iki farklı metayüzey tabanlı elektromanyetik soğurucu tasarlanmıştır. İlk tasarım yedi bantta, ikinci tasarım ise on bantta etkili soğurum özellikleri göstermektedir. Geliştirilen metayüzey soğurucu yapılar, bilgisayar destekli elektromanyetik benzetim yöntemleriyle analiz edilmiştir. Analizler CST Microwave Studio 2023 yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiş; rezonans frekansları, yansıma katsayısı, yüzey akımı ile elektrik ve manyetik alan dağılımları ayrıntılı olarak incelenmiştir. Bu kapsamda çalışma, önce CST Microwave Studio benzetim programıyla modellenmiş, ardından deneysel doğrulama ile gerçekleştirilmiştir.

Kullanılan Yapı ve Malzemeler

GHz frekans bölgesi için tez çalışmasında önerilen her iki metayüzey tabanlı soğurucu yapıda üç katmanlı bir yapı tercih edilmiştir. Üst katmanda belirli bir rezonatör geometrisine sahip iletken desen, orta katmanda dielektrik malzeme ve alt katmanda ise elektromanyetik dalgaları tamamen yansıtan bir metal düzlem bulunmaktadır. Yapının tasarımında kullanılan malzemeler aşağıda sunulmuştur:

- **Rezonatör Malzemesi:** Bakır (Cu), kalınlık: 35 μm , üretici: CST malzeme veritabanı (benzetim amaçlı)
- **Ara Katman (Substrat):** FR-4 , dielektrik sabiti (ϵ_r): 4,3; manyetik geçirgenliği (μ) 1 ; kayıp faktörü ($\tan\delta$): 0,025; kalınlık: 1 mm
- **Alt Katman:** Tam kaplama bakır, iletim engellemek için kullanılmıştır.

Tasarım Süreci ve Kullanılan Yazılımlar

Bu tez kapsamında geliştirilen metayüzey tabanlı elektromanyetik soğurucu tasarımların birim hücre yapıları, CST Microwave Studio yazılımı kullanılarak tasarlanmış ve benzetim sonuçları elde edilmiştir.. Benzetim programında, sınır şartı olarak "Unit Cell" (sonsuz periyodik sınır şartı) seçildi ve "Frequency Domain Solver" ikonu üzerinden benzetimler elde edildi. Benzetimlerde düzlem dalga (plane wave) uyarıtımı kullanılmış, x-y düzlemleri için periyodik sınır koşulları, z eksenine boyunca ise açık sınır uygulanmıştır. Tasarlanan yapının birim hücre boyutlarının optimizasyonu, en yüksek soğurma performansını elde etmek amacıyla CST'nin parametrik süpürme algoritması aracılığıyla gerçekleştirilmiştir.

CST benzetimleri sonucunda elde edilen S parametre verileri, MATLAB R2021b yazılımına entegre edilerek, analiz için kullanılan formüller ile kodlama yapılarak (Ek kısmında verilen) elektromanyetik soğurucu karakteristiklerini değerlendirmek için gerekli hesaplamalar

yapılmıştır. Bu kapsamda, soğurum katsayısı, normalize edilmiş empedans, elektriksel geçirgenlik (ϵ), manyetik geçirgenlik (μ) ve kırılma indisi (n) değerleri uygun formülasyonlar aracılığıyla hesaplanmış ve grafiksel olarak sunulmuştur. Önerilen soğurucunun metayüzey özelliklerinin analizi için elektriksel ve manyetik geçirgenlik değerlerinin doğru bir şekilde hesaplanması gerekmektedir. Bu parametreleri belirlemek için pratik hesaplama ve uygulanma kolaylığı sağladığı için Nicolson–Ross–Weir (NRW) yöntemi tercih edilmiştir. NRW yöntemi ile, malzemenin elektromanyetik özelliklerini tanımlayan parametreler yansıma ve geçirgenlik parametreleri aracılığıyla Denklem (36), (37), (38) ve (39) da verilen ifadelerle hesaplanmaktadır (Moniruzzaman *et al.* 2020).

$$\epsilon_r = \frac{2}{j\omega d} \frac{1 - (S_{21} + S_{11})}{1 + (S_{21} + S_{11})} \quad (35)$$

$$\mu_r = \frac{2}{j\omega d} \frac{1 - (S_{21} - S_{11})}{1 + (S_{21} - S_{11})} \quad (36)$$

$$n_r = \sqrt{\mu_r * \epsilon_r} = \frac{c}{j\pi f d} \sqrt{\frac{(S_{21} - 1)^2 - (S_{11})^2}{(S_{21} + 1)^2 - (S_{11})^2}} \quad (37)$$

$$Z_r = \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} = \sqrt{\frac{(1 + S_{11})^2 - (S_{21})^2}{(1 - S_{11})^2 - (S_{21})^2}} \quad (38)$$

Metayüzey soğurucunun elektromanyetik alan dağılımı ve etkileşim mekanizmasının daha iyi anlaşılması için CST yazılımında yer alan “Field Monitor” modülü kullanılmıştır. Bu modül aracılığıyla, tasarlanan yapılar üzerinde elektrik alan (E), manyetik alan (H) ve yüzey akımı dağılımları ayrıntılı şekilde analiz edilmiştir. Ayrıca, yapının eğik geliş açılarındaki kararlılığı ve farklı polarizasyon açılarına karşı duyarlılığı da incelenerek, metayüzey soğurucunun geniş açılı ve polarizasyon bağımsız çalışabilirliği değerlendirilmiştir.

Benzetim sonuçlarının doğrulanması amacıyla hem deneysel ölçümler hem de eşdeğer devre modeli (Equivalent Circuit Model, ECM) analizleri gerçekleştirilmiştir. Yapının eşdeğer devre modeli, ADS (Advanced Design System) devre benzetim programı kullanılarak modellenmiş ve elde edilen sonuçlar yapının benzetim sonuçları ile kıyaslanmıştır.

Gerçek zamanlı ölçümler için, litografi yöntemiyle fiziksel prototip üretimi yapılmış ve üretilen yapı, Vektör Ağ Analizörü (Vector Network Analyzer, VNA) kullanılarak serbest uzay ölçümleri ile benzetim sonuçları doğrulanmıştır. İlk olarak ölçüm için önerilen soğurucu litografi yöntemiyle üretim aşamasına alınmıştır. Daha sonra ölçüm için vektör ağ analizörünün

(VNA) kullanıldığı ölçüm kurulumunun düzeneğinden faydalanılmıştır. Üretim aşamasındaki izlenecek adımlar aşağıdaki gibi sıralanmaktadır:

- 1- Bakır levhanın yüzeyinde iz kalmayacak şekilde temizlenir.
- 2- Bakır levha yüzeyi homojen bir şekilde pozitif-20 ile kaplanır.
- 3- Pozitif-20 ile kaplanan bakır yüzey 70^0 de 15-20 dk arasında fırınlanır.
- 4- Fırınlandıktan sonra pozlandırmak üzere levha yüzeye basılacak olan maskeyle birlikte 5 dk UV ışığına maruz bırakılır. Böylece maskedeki desen plakaya geçer.
- 5- Pozlandırma işleminden sonra sodyum hidroksit çözeltisi içine plaka atılır. Pozitif-20 çözülerek maskedeki desenin plakaya çıktığı görülür.
- 6- Desen çıktıktan sonra hidroklorik asit ve hidrojen peroksit karışımına atılır. Atılan bu plakada desenli kısımların erimediği gözlemlenir.
- 7- Plaka aseton ile yıkanarak pozitif-20 den desensiz kısımlar arındırılır.

Üretim aşamasının ardından, yapının elektromanyetik performansını incelemek amacıyla yankısız oda koşulları altında serbest uzay yansıma ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla Şekil 10'da gösterilen ölçüm düzeneği kullanılmıştır.



Şekil 10. Yankısız oda koşullarında gerçekleştirilen ölçüm düzeneği

Ölçüm düzeneğinde, 1–18 GHz frekans aralığında çalışan iki adet boynuz anten kullanılmıştır. Antenlerden biri sinyal kaynağı, diğeri ise yansıyan sinyalleri alıcı olarak bulunmaktadır. Antenler, düşük kayıplı koaksiyel kablolar aracılığıyla Keysight N9923A vektör ağ analizörüne (VNA) bağlanmıştır. Böylece GHz frekanslı sinyaller için serbest uzayda bir iletim hattı oluşturulmuştur.

Doğru ve güvenilir ölçüm sonuçları elde edebilmek için, ölçümlerden önce VNA'nın kalibrasyonu gerçekleştirilmiştir. Kalibrasyon işlemi, elektromanyetik ölçümlerde hatalı faz ve genlik etkilerini ortadan kaldırmak amacıyla kullanılan TRL (Through-Reflect-Line) yöntemi ile yapılmıştır. Kalibrasyon tamamlandıktan sonra, üretilen metayüzey prototipi boynuz antenlerin arasına yerleştirilmiş ve yansıma katsayısı (S11) ölçülmüştür.

TRL Kalibrasyonu

TRL (Through-Reflect-Line) kalibrasyonu, serbest uzay elektromanyetik ölçümlerinde sistem kaynaklı hata etkilerini (faz kaymaları, genlik zayıflamaları, kablo ve anten kayıpları) ortadan kaldırmak amacıyla kullanılan güvenilir bir yöntemdir.

Kalibrasyon üç temel adımdan oluşmaktadır:

1. **Through (Geçiş):** İki anten doğrudan karşı karşıya yerleştirilir. Bu adımda sinyalin serbest uzayda kayıpsız geçişi referans alınır.
2. **Reflect (Yansıma):** Antenlerin önüne yüksek iletkenliğe sahip metal bir plaka konularak tam yansıma koşulu sağlanır. Böylece sistemin yansıma davranışı kalibre edilir.
3. **Line (Hat):** Antenler arasındaki mesafe belirli bir miktar değiştirilerek ($\lambda/4$) farklı faz koşulları altında ölçüm yapılır. Bu adım, serbest uzayda sinyalin faz ilerlemesi ve dalga boyuna bağlı kayıpların düzeltilmesini sağlar.

Bu üç adımın tamamlanmasıyla, ağ analizörü üzerindeki sistem kaynaklı faz ve genlik hataları elimine edilir.

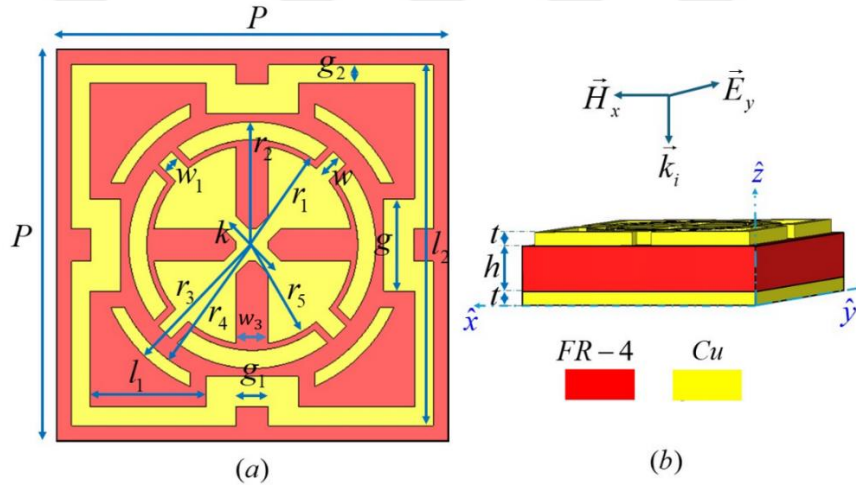
Elde edilen ölçüm ve benzetim yansıma sonuçları arasında sınırlı düzeyde farklılıklar bulunmakta olup, bu uyumsuzlukların üretim toleransları, malzeme özelliklerindeki sapmalar ve ölçüm sistemine ait çevresel etkiler gibi çeşitli dışsal faktörler etkilemektedir.

ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

GHz Frekans Aralığında Gerçekleştiren Çalışmalar

S-, C-, X-, Ku- ve K-Band uygulamaları için yedi-bantlı ultra ince metayüzey soğurucu yedi bantlı soğurucunun birim hücre tasarımı ve gelişimi

Tez kapsamında geliştirilen metayüzey soğurucu yapılardan biri, S, C, X, Ku ve K bantlarındaki mikrodalga uygulamaları için tasarlanmıştır. Yedi farklı frekansta yüksek soğurma sağlayarak çok bantlı (hepta-band) bir performans sergilemektedir. Üç katmanlı yapının üst ve alt yüzeyleri bakır ile kaplanmış, orta katman ise FR-4 dielektrik malzemeden oluşmaktadır.



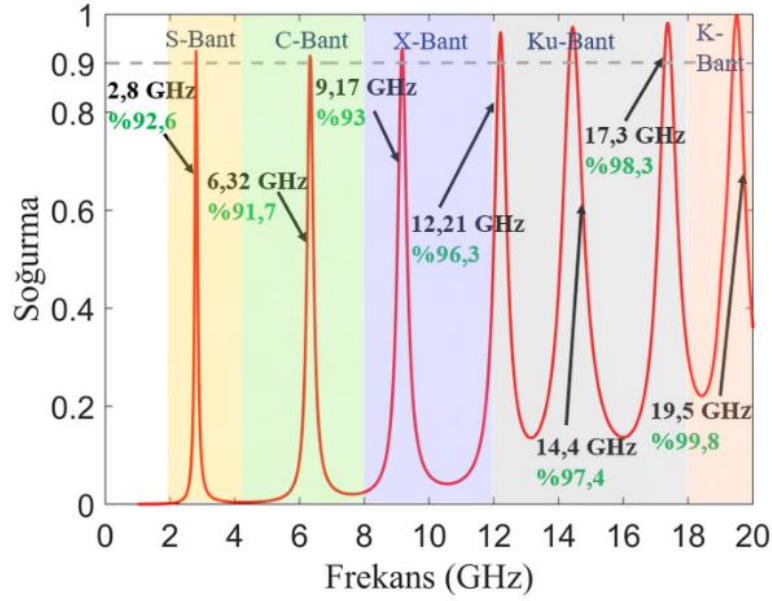
Şekil 11. Önerilen metayüzey tabanlı soğurucunun şematik görünümü: (a) Üstten görünüm ve (b) yan görünüm

Şekil 11 (a) ve (b)'de, önerilen metayüzey soğurucunun birim hücre tasarımı ile bu yapıya ait geometrik parametrelerin yerleşimi görsel olarak sunulmuştur.

Tablo 2. Önerilen MSA'nın mm Cinsinden Parametre Ölçüleri

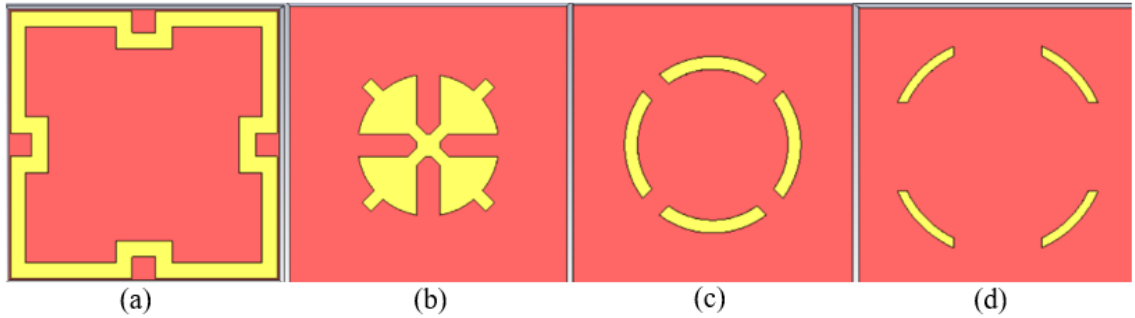
$l=15,7$	$g=3,7$	$g_1=1,3$	$g_2=0,75$	$w=0,97$	$w_1=0,7$	$t=2,54$	$h=1$
$p=14,5$	$l_1=4,65$	$r_1=4,23$	$r_2=4,95$	$r_3=6,2$	$r_4=5,7$	$r_5=4$	$t_1=0,035$

Önerilen yedi bantlı emici birim hücre yapısının milimetre (mm) cinsinden ölçüleri, Tablo 2'de ayrıntılı biçimde gösterilmiştir. Bu boyutlar, yapının en yüksek soğurma performansını göstereceği şekilde eniyilenmiş ve bu doğrultuda belirlenmiştir.



Şekil 12. Önerilen metayüzey soğurucuya ait birim hücre yapısının, elektromanyetik benzetimler sonucunda elde edilen frekansa bağlı soğurma performansı

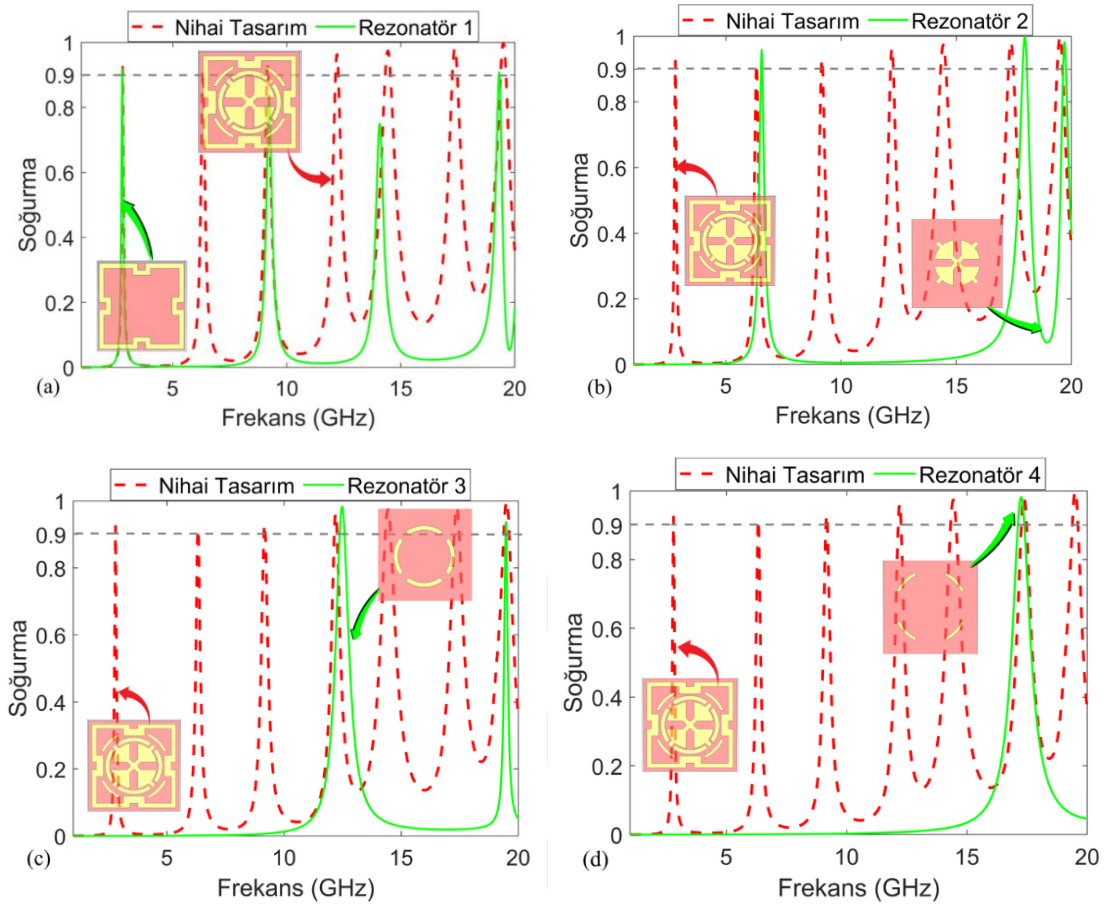
Şekil 12’de, CST Microwave Studio yazılımı ile benzetimi yapılan önerilen metayüzey (MS) soğurucusunun frekansa bağlı soğurma performansı gösterilmiştir. Benzetim sonuçları, tasarımın S, C, X, Ku ve K bantlarında 2,8 GHz; 6,32 GHz; 9,17 GHz; 12,21 GHz; 14,4 GHz; 17,3 GHz ve 19,5 GHz frekanslarında rezonans oluşturarak sırasıyla %92,6; %91,7; %93; %96,3; %97,4; %98,3 ve %99,8 oranlarında yüksek soğurma değerlerine ulaştığını göstermektedir. Bu bulgular, metayüzey soğurucunun çok bantlı ve yüksek verimli elektromanyetik dalgı soğurucu olarak performansını ortaya koymaktadır.



Şekil 13. Dört ayrı rezonatörün birleşimiyle oluşturulan yedi bantlı soğurucuya ait birim hücre geometrilerinin üstten görünümü: (a) Rezonatör 1, (b) Rezonatör 2, (c) Rezonatör 3 ve (d) Rezonatör 4

Sunulan metayüzey soğurucunun birim hücresinin geliştirme sürecinde, dört ayrı rezonatörün birbirine entegre edilerek temel çok bantlı soğurucu yapısının oluşturulduğu görülmüştür. Tasarım aşamalarında, bu rezonatörler arasındaki kapasitif kuplaj etkisinin, soğurma performansının artırılmasında ve farklı frekans bantlarında etkili emilimin

sağlanmasında önemli bir rol oynadığı tespit edilmiştir. Şekil 13 (a), (b), (c) ve (d)'de ise, bu dört aşamalı tasarım sürecine ait rezonatör yapıları gösterilmektedir.

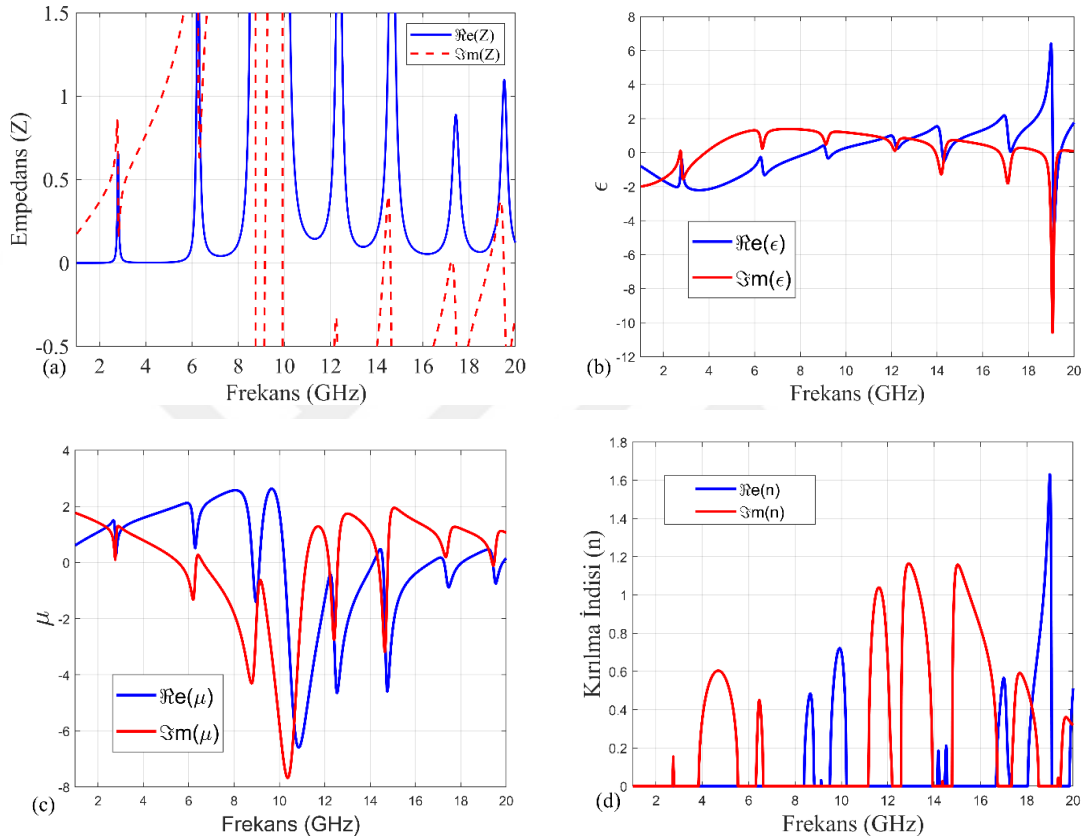


Şekil 14. Önerilen yedi bantlı metayüzey soğurucuyu oluşturan (a) Rezonatör 1, (b) Rezonatör 2, (c) Rezonatör 3 ve (d) Rezonatör 4'ün soğurma performansları

Şekil 14 (a), (b), (c) ve (d) metayüzey soğurucunun, birbirine entegre edilmiş dört farklı rezonatörden oluşan yedi bantlı yapısına ait her bir rezonatörün soğurma performanslarını göstermektedir. Bu grafiklerde, tasarım aşamaları ile metayüzey soğurucunun son halinin soğurma karakteristikleri birlikte sunulularak, son tasarımın performansındaki gelişmeler net şekilde ortaya konmuştur. Grafiklerde son tasarım kırmızı, ara tasarım adımları ise yeşil renkle belirtilmiştir. İlk rezonatör (Şekil 14 (a)), 2,78 GHz; 9,2 GHz; 14,07 GHz ve 19,3 GHz frekanslarında sırasıyla %92,3, %82,6, %74,9 ve %90 oranlarında soğurma sağlamaktadır; bu frekanslar, birinci tasarımın birinci, üçüncü, beşinci ve yedinci soğurma piklerini oluşturur. İkinci rezonatör (Şekil 14 (b)), C, Ku ve K bantlarında 6,5 GHz; 17,8 GHz ve 19,6 GHz frekanslarında sırasıyla %96, %99,8 ve %98,2 soğurma performansı sergilemektedir. Üçüncü rezonatör (Şekil 14 (c)), Ku ve K bantlarında 12,4 GHz ve 19,4 GHz'de %98,3 ve %93,7 oranlarında yüksek soğurma sağlar. Dördüncü rezonatör (Şekil 14 (d)) ise 17,2 GHz'de %98 soğurma performansı ile tek bir frekansta önemli bir iyileşme sunar. Dördüncü rezonatörün katkısıyla, metayüzey soğurucunun bant sayısı altıdan yediye çıkarılarak çok bantlı performans

geliştirilmiştir. Birinci, ikinci ve üçüncü rezonatörlerin entegrasyonu, 19,5 GHz'de %99,8 düzeyinde yüksek bir soğurma performansının elde edilmesini sağlamıştır. Tasarım adımları ile nihai tasarım karşılaştırıldığında, frekans konumları ve soğurma verimlerinde bazı farklılıklar gözlemlenir; bu farklar, rezonatörler arasındaki kuplaj ve kapasitif etkileşimlerin sonucu olarak ortaya çıkmaktadır.

Performans Analizi



Şekil 15. Önerilen metayüzey soğurucu için a) normalize edilmiş empedans, (b) etkili elektriksel, (c) manyetik geçirgenlik ve d) kırılma indisi grafikleri

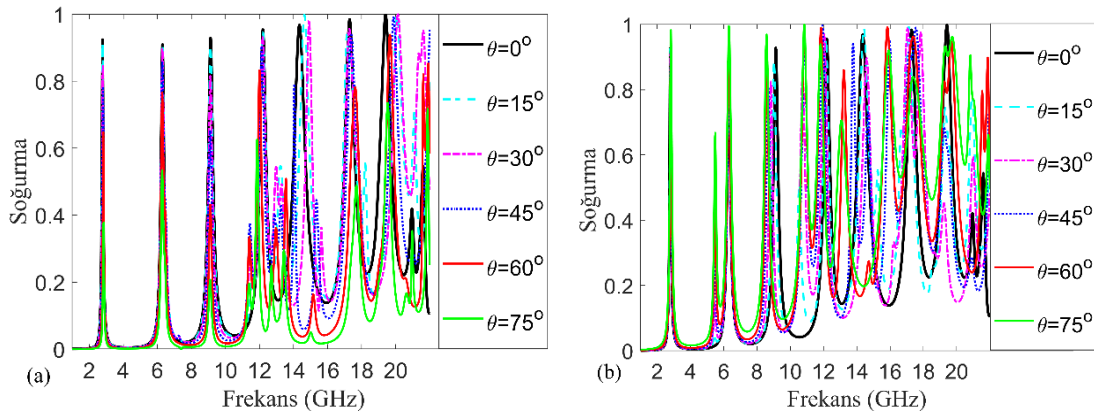
Şekil 15 (a), (b), (c) ve (d)'de, önerilen metayüzey soğurucunun 1–20 GHz frekans aralığındaki elektriksel özellikleri; normalize edilmiş empedans, kırılma indisi, elektriksel geçirgenlik ve manyetik geçirgenlik grafiklerinde gösterilmiştir. Şekil 15(a)'daki empedans grafiğinde, giriş empedansının gerçekte kısmının yaklaşık 1'e, sanal kısmının ise sifıra yakın olduğu görülmektedir. Bu durum, soğurucunun serbest uzay normalize empedansına uyum sağladığını, böylece elektromanyetik dalgaların soğurucu yüzeyde minimum yansıma ile maksimum oranda soğurulduğunu göstermektedir. Şekil 15(b) ve (c)'de elektriksel ve manyetik geçirgenlik değerleri frekansa bağlı olarak verilmiştir. Bazı frekanslarda elektriksel veya manyetik geçirgenlik negatif değerler almaktadır. Bu, soğurucunun tek negatif (SNG) metamalzeme özelliği taşıdığını, yani malzemenin elektriksel ya da manyetik özelliğinin

negatif olduğu gösterir. Şekil 15(d)'de kırılma indisinin rezonans frekanslarında sıfıra yakın değerler aldığı görülmektedir. Bu durum, metalmalzemelerin sıfır kırılma indisine sahip (Zero Refractive Index) özellik gösterdiğini işaret eder. Böylece önerilen metayüzey soğurucunun metalmalzeme özelliklerine sahip olduğu ve bu sayede yüksek verimli soğurma sağladığı doğrulanmaktadır.

Tablo 3. Geçirgenlik Parametreleri ve Kırılma İndisi Değerleri

Soğurma Frekansı	Re(ϵ)	İm(ϵ)	Re(μ)	İm(μ)	Re(n)	İm(n)
2,8 GHz	-0,4	-0,9	0,4	0,8	0	0
6,32 GHz	-0,7	0,2	0,7	-0,1	0	0,1
9,17 GHz	-0,3	0,5	0,6	-0,6	0,03	0
12,21 GHz	0,2	0,3	-0,4	-0,3	0	0
14,4 GHz	-0,1	0,5	0,4	-0,2	0	0
17,3 GHz	0,3	-0,09	-0,15	0,2	0,06	0,09
19,5 GHz	0,46	0,12	-0,7	-0,05	0	0,07

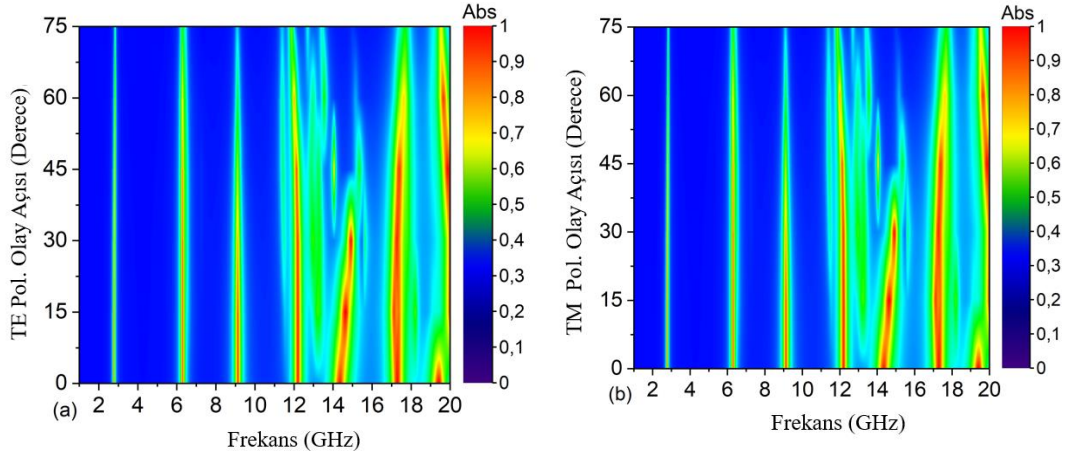
Tablo 3'te, önerilen metayüzey soğurucuya ait etkili elektriksel geçirgenlik, manyetik geçirgenlik ve kırılma indisi değerlerinin detaylı analizi sunulmuştur.



Şekil 16. Önerilen metayüzey soğurucu için, (a) TE ve (b) TM modlarında çeşitli geliş açılarının soğurma spektrumuna olan etkileri

Tasarımın gerçek zamanlı uygulamaları için aksiyon alındığında bir EM dalgası için geliş açısı belirsizdir ve soğurma frekanslarında metayüzey eğik açı kararlılığının analizini gerektirir. Etkili bir soğurucunun, geniş geliş açısı aralığında kararlı çalışması ve polarizasyondan bağımsız olması gerektiği, literatürde sıklıkla vurgulanmaktadır. Bu doğrultuda, Şekil 16 (a) ve (b)'de TE ve TM modları altında farklı geliş açılarına karşılık gelen soğurma spektrumları verilmiştir. Analizler, 0° ile 75° arasındaki açılar için, her 15 derecelik artışla yapılan benzetimlerle gerçekleştirilmiştir. Bu grafik analizlerinde, tasarımın TE ve TM

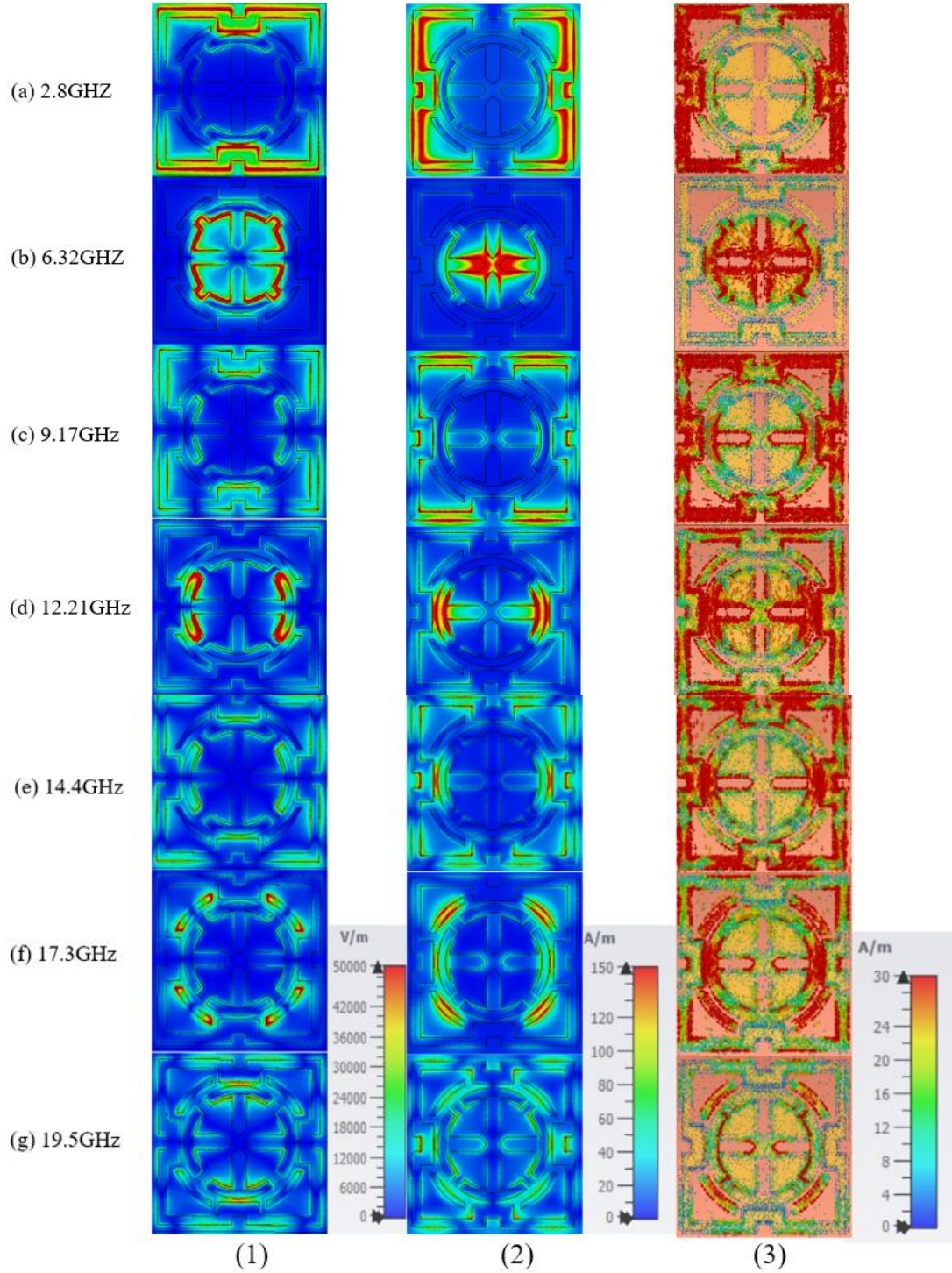
modları için farklı geliş açıları altında meydana gelen değişiklikler incelendiğinde, 45 dereceye kadar diğer piklerin %80 ve üzerinde performans gösterdiği sonucuna varılmıştır.



Şekil 17. Polarizasyon açısı değişimlerinin soğurum spektrumu (a) TE modu, (b) TM modu üzerindeki etkisi

Şekil 17(a) ve (b)'de, önerilen metayüzey soğurucusunun TE ve TM modlarındaki farklı polarizasyon açılarına göre gösterdiği soğurum performansı sunulmaktadır. Polarizasyon açıları, her iki mod için de farklı açılar incelendiğinde soğurum profili değişiklik göstermemiştir. Bu durum, tasarımın polarizasyona duyarlı olmadığını göstermektedir.

Elektrik, Manyetik ve Yüzey Akım Alan Dağılımları

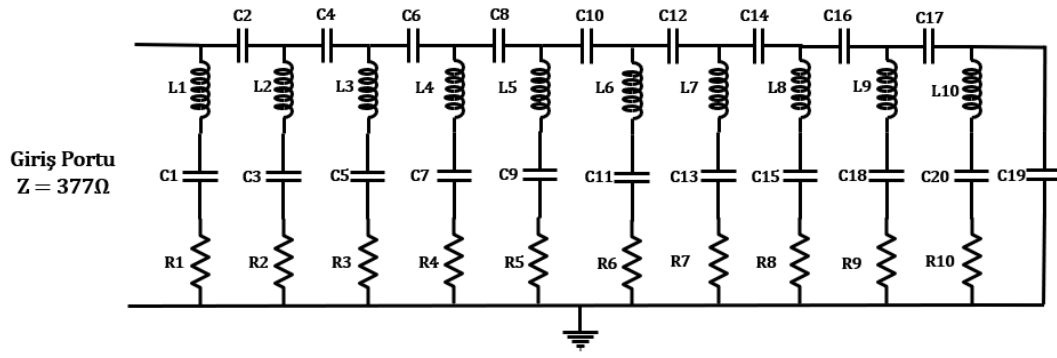


Şekil 18. Önerilen MSA birim hücre için (1) elektrik (E) , (2) manyetik (H) ve (3) yüzey akımı dağılım sunumları

Şekil 18 (1), (2) ve (3)'te, önerilen metayüzey tabanlı soğurucunun sırasıyla elektrik alan, manyetik alan ve yüzey akım dağılımları sunulmuştur. Burada kırmızı renk yüksek, mavi renk düşük alan yoğunluklarını göstermektedir. Soğurumun gerçekleştiği frekanslarda, Şekil 14 (a), (b), (c) ve (d)'deki rezonatörlerin soğurum etkileri dikkate alınarak elektrik alan, manyetik alan ve yüzey akım dağılımları analiz edilmiştir.

2,8 GHz frekansta, elektrik alan yalnızca birinci rezonatörün kare çerçevesinin alt ve üst kısımlarında yoğunlaşırken, yüzey akımları birinci dizayndaki çıkıntılı dış karenin sağ tarafında saat yönünde, sol tarafında ise saat yönünün tersinde akarak antiparalel akım akışı oluşturmuştur. 6,32 GHz frekansında, ikinci rezonatörün dairesel yapısının dış bölgelerinde elektrik alanın belirgin şekilde arttığı gözlemlenmiştir. Yüzey akımları ise rezonatörün iç kısmında yer almakta olup, sağ tarafta saat yönünde, sol tarafta ise saat yönünün tersine doğru ilerlemektedir. 12,21 GHz frekansında ise, üçüncü rezonatörde bulunan yarıklı halkada elektrik alan, hem sağ hem de sol taraflarda yoğunlaşmıştır. Bu bölgelerde sağ tarafta akım saat yönünün tersinde, sol tarafta ise saat yönünde hareket etmekte ve bu durum soğurum pikinin oluşmasına neden olmaktadır. 14,4 GHz frekansında, birinci rezonatörün çıkıntılarının üst ve alt kısımlarında elektrik alanın yoğunlaştığı gözlenmiş, akım yönü sağ çıkıntıda aşağıdan yukarıya, sol çıkıntıda ise ters yönde hareket etmiştir. 17,3 GHz’de ise ikinci ve dördüncü rezonatörlerdeki elektrik alan yoğunluklarının etkileşimi, %98,3 oranında yüksek bir soğurma değerine yol açmıştır. 19,5 GHz frekansta ise, birinci, ikinci ve üçüncü rezonatörlerdeki elektrik alan yoğunluklarının aynı anda artması, bu rezonatörlerin entegre etkisiyle soğurumun gerçekleştiğini göstermektedir. Birinci dizayndaki kare yapısının köşeleri, ikinci dizaynın çıkıntılı kısımları ve üçüncü rezonatördeki halkanın iç yüzeyindeki zıt yönlü akımlar güçlü bir soğurum sağlamıştır. Şekil 18 (1), (2) ve (3)’teki tasarıma ait elektrik, manyetik alan ve yüzey akım dağılımlarının analizi, soğurumun gerçekleştiği frekans noktalarında rezonatörlerin konsantrasyon sağladığı bölgelerde elektrik ve manyetik alanların birbirinin tam tersi bölgelerde yoğunlaştığını ortaya koymaktadır. Özellikle, elektrik alan ve manyetik alan dağılımları arasındaki ters yönlü yoğunlaşma, elektrik ve manyetik alanların sinüzoidal dalgalar olarak, birbirine dik yönde ve faz farkıyla hareket ettiğini göstermektedir. Ayrıca manyetik alanın yoğunlaştığı bölgelerle yüzey akım dağılımlarındaki akım akışlarının aynı bölgelerde ve eş zamanlı olarak gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Bu durum Maxwell’in yasaları ile uyumludur.

Sonuç olarak, elektrik, manyetik alan ve yüzey akım dağılımlarının Maxwell denklemleriyle tutarlı olduğu ve önerilen metayüzey soğurucunun tasarımının doğruluğunu desteklediği görülmüştür.



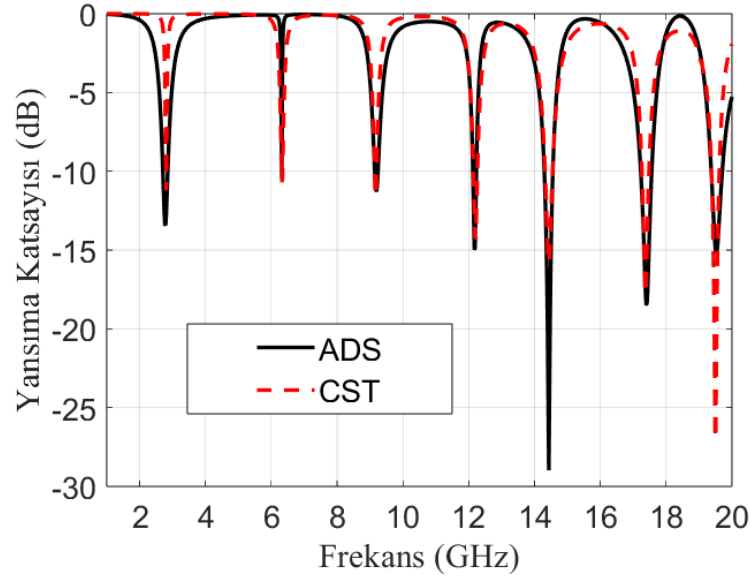
Şekil 19. Önerilen yedi bantlı metayüzey soğurucusunun eşdeğer devre modeli (ECM)

Önerilen metayüzey soğurucusunun eşdeğer devre modeli (Equivalent Circuit Model - ECM), ADS (Advanced Design System) devre benzetim programı kullanılarak oluşturulmuş ve ilgili devre yapısı Şekil 19'da sunulmuştur. Önerilen yedi bantlı metayüzey soğurucusunun birim hücresi, her bir rezonans frekansının oluşumunu sağlayan RLC rezonatörlerle eşdeğer devre modeli şeklinde temsil edilmiştir. Bu modeldeki dirençler (R1–R10), elektromanyetik dalga enerjisinin ısıya dönüşmesini sağlayarak enerji dağılımını yükseltir. Seri bağlı kapasitörler (C1, C3, C5, ..., C19) hem rezonans frekanslarını belirlemekte hem de elektrik alan enerjisinin depolamaktadır. Endüktanslar (L1–L10) ise rezonans sırasında manyetik alan enerjisinin depolanmasını sağlamaktadır.

Tablo 4. Eşdeğer Devre Modelindeki Elektronik Bileşenlerin Değerleri

Rezistans (Ω)	Seri Kapasitans (fF)	Paralel Kapasitans (fF)	Endüktans (nH)
R1=3234,506	C1=20,5836	C2=32,6912	L1=163,96
R2=0,107503	C3=3626,6	C4=17749,5	L2=1,45808
R3=3456,73	C5=26,1828	C6=21394,7	L3=22,3995
R4=28,2077	C7=27,7847	C8=784,428	L4=8,38011
R5=9,63747	C9=8,91515	C10=653,342	L5=11,9289
R6=3,01713	C11=4,6754	C12=451,501	L6=15,9811
R7=6,36665	C13=24,5904	C14=366,256	L7=6,81074
R8=36,7424	C15=120,473	C16=1940,06	L8=7,50434
R9=35,3775	C17=9,94992	C18=93,2629	L9=6376,74
R10=36,9289	C19=67,4036	C20=13,6784	L10=10,0918

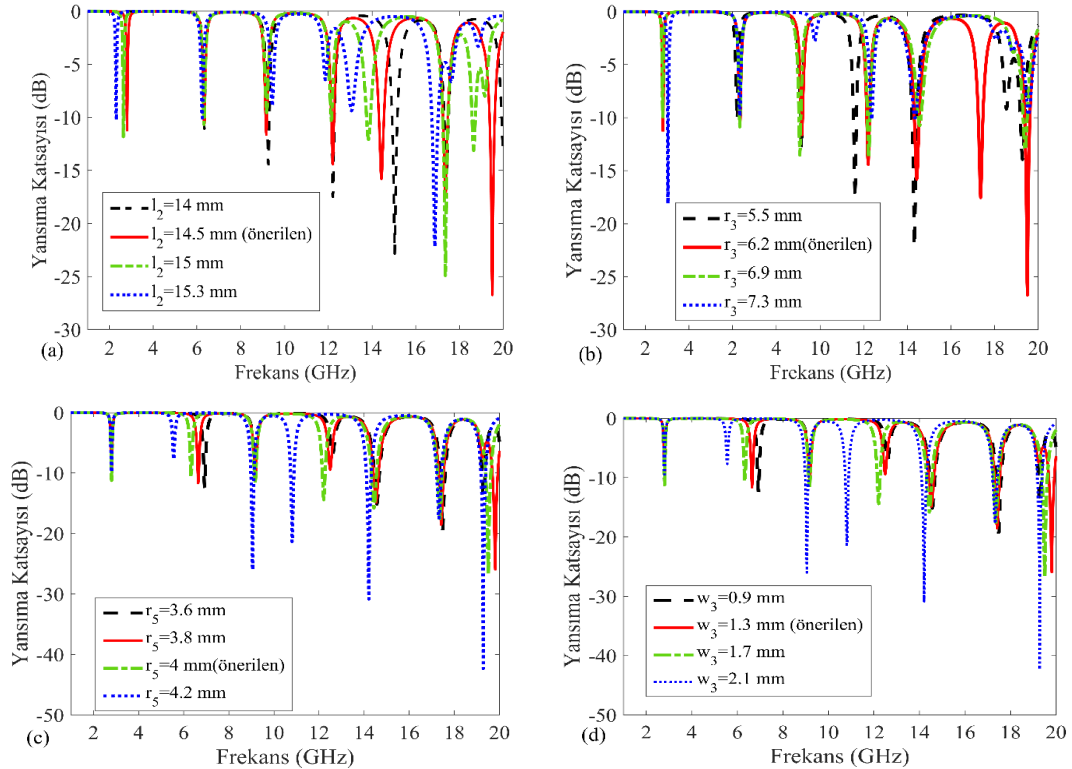
Eşdeğer devre modelinde kullanılan elektronik bileşenlerin (indüktans, kapasitans ve direnç) değerleri, Tablo 4'te ayrıntılı olarak sunulmuştur.



Şekil 20. Önerilen yedi bantlı (hepta-bant) MSA için ADS ve CST kullanılarak elde edilen S11 simülasyon sonuçları

Şekil 20'de, önerilen metayüzey soğurucuya ait S11 parametresi, hem ADS hem de CST Microwave Studio yazılımlarından elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Karşılaştırmaların uyumlu olması, önerilen tasarımın ECM modelinin elektromanyetik davranışı başarıyla temsil ettiğini ve rezonans tepe noktalarının fiziksel modelle tutarlı olduğunu doğrulamıştır.

Parametrik Yapısal Analiz

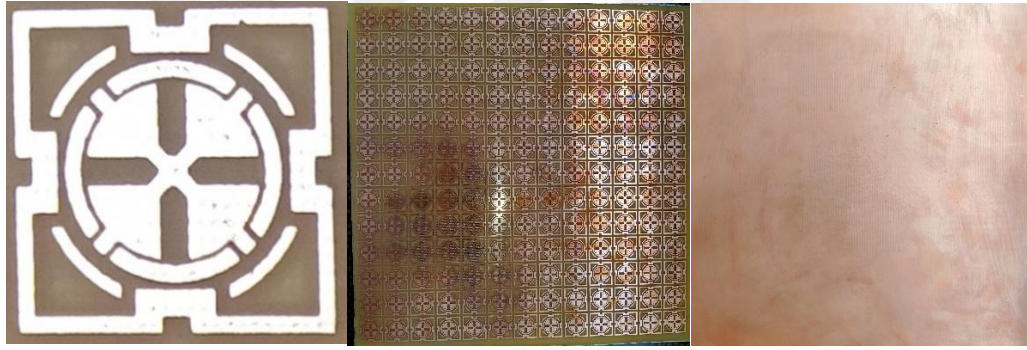


Şekil 21. Önerilen MSA'nın (a) l_2 , (b) r_3 , (c) r_5 ve (d) w_3 parametrelerinin yansima katsayısı spektrumu üzerindeki etkisi

Önerilen metayüzey soğurucunun (MSA) soğurma performansı, dört farklı geometrik parametrenin etkisi incelenerek değerlendirilmiştir. Bu kapsamda; (a) l_2 , (b) r_3 , (c) r_5 ve (d) w_3 parametreleri sırasıyla [14–15,3] mm, [5,5–7,3] mm, [3,6–4,2] mm ve [0,9–2,1] mm aralıklarında CST benzetim programında yer alan parametre süpürme seçeneği ile değiştirilmiş ve bu değişimlerin yansımaya katsayısı spektrumu üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar grafiksel olarak Şekil 21’de sunulmuştur. Grafikler incelendiğinde, en yüksek soğurma değerlerine, düşük yansımaya katsayısı sağlayan parametre değerlerinde ulaşıldığı görülmüştür. Bu değerlere göre en uygun geometrik boyutlar $l_2 = 14,5$ mm, $r_3 = 6,2$ mm, $r_5 = 4$ mm ve $w_3 = 1,3$ mm olarak belirlenmiştir.

Üretim ve Ölçüm Sonuçları

Önerilen metayüzey soğurucunun benzetim sonuçlarının doğruluğunu değerlendirmek amacıyla, laboratuvar ortamında gerçek zamanlı ölçümler yapılmıştır. Bu sayede, sayısal analizler sonucunda elde edilen performans değerlerinin deneysel verilerle ne ölçüde örtüştüğü karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.



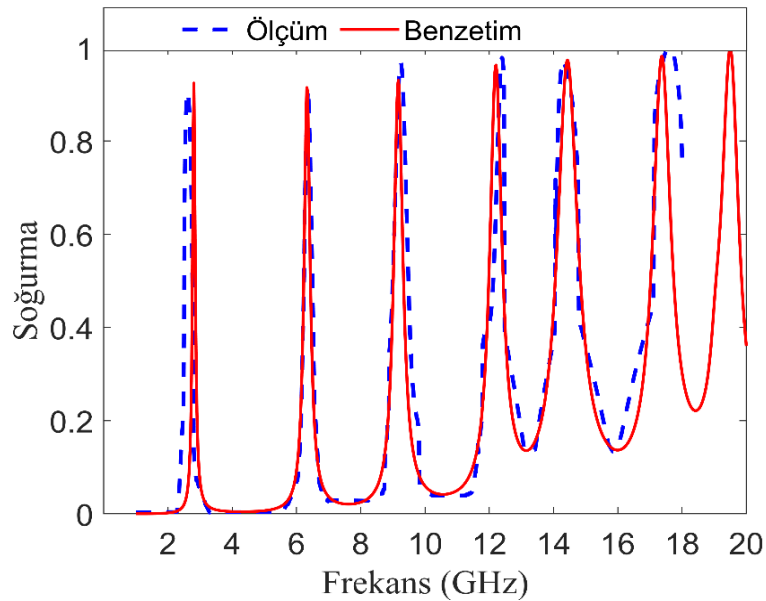
Şekil 22. Önerilen metayüzey soğurucunun: (a) birim hücresi, (b) ölçüm amacıyla 13×13 birim hücreden oluşturulan yapının ön yüzeyi ve (c) arka yüzeyine ait görseller

Üretimin ilk aşamasında, önerilen metayüzey tabanlı soğurucunun prototipi litografi teknikleriyle üretilmiştir. Şekil 22’de ise, tasarıma ait (a) birim hücre yapısı ve ölçümler için bir araya getirilmiş 13x13 birim hücre dizisi ile birlikte; (b) ön yüzey ve (c) arka yüzey görüntüleri gösterilmektedir.



Şekil 23. Gerçek zamanlı ölçümler için yankısız oda içerisinde oluşturulan deneysel ölçüm düzeneği

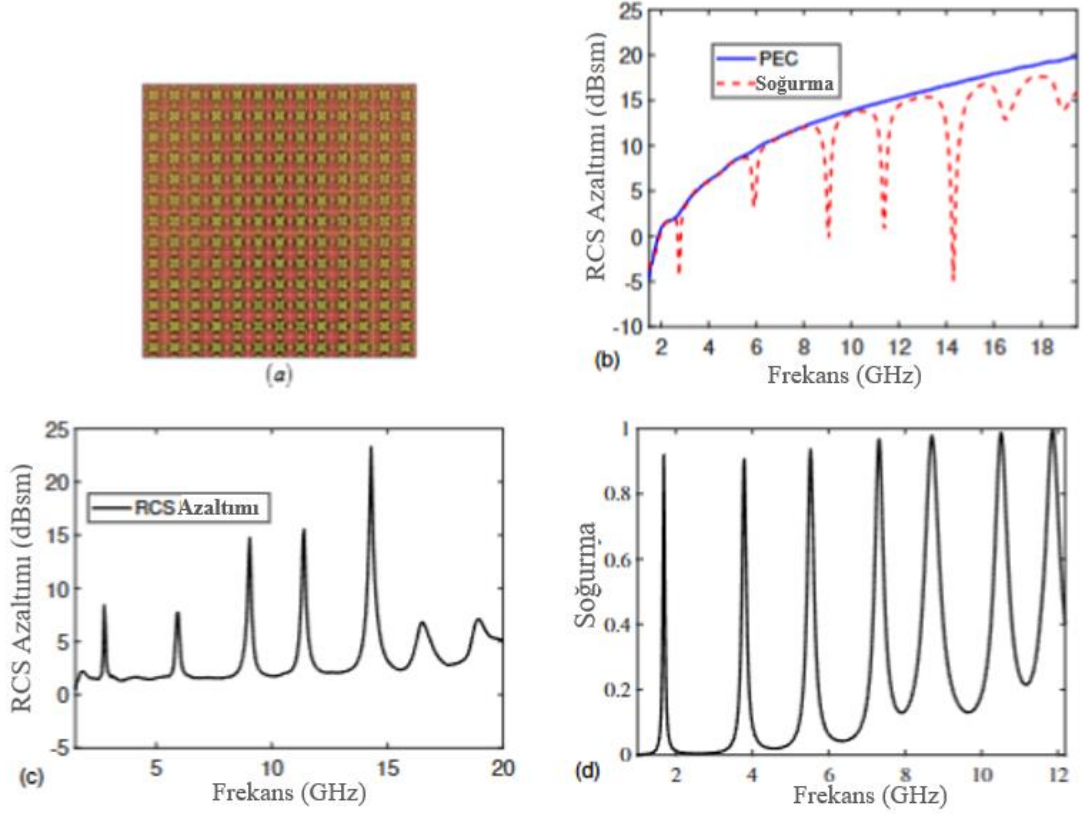
Şekil 23'de, deneysel çalışmalarda kullanılan ölçüm düzeneğine ait görsel sunulmuştur. Bu ölçüm düzeneğinde, 1–18 GHz frekans aralığında çalışan iki adet horn anten, Keysight N9923A model vektör ağ analizörüne (VNA) bağlanarak serbest uzayda bir iletim hattı oluşturulmuştur. Ölçüm hattının doğruluğunu sağlamak amacıyla kalibrasyon işlemi, TRL (Through-Reflect-Line) yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ölçüm öncesinde ağ analizörünün sistematik hatalarını gidermek amacıyla kalibrasyon süreci tamamlanmıştır. Kalibrasyonun ardından, üretilen metayüzey soğurucu prototipi horn antenlerin karşısına yerleştirilmiş ve yansımaya katsayısı (S_{11}) ölçülerek elektromanyetik performansı değerlendirilmiştir.



Şekil 24. Üretilen metayüzey tasarımının deneysel ve benzetim sonuçlarına göre soğurma performansının karşılaştırılması

Üretilen ve ölçümleri gerçekleştirilen metayüzeye ait soğurma performansının deneysel ve benzetim sonuçları Şekil 24'te karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Elde edilen sonuçlar arasındaki yüksek uyum, tasarımın hem doğruluğunu hem de pratikte uygulanabilirliğini açıkça ortaya koymaktadır.

RCS Azaltma Performansı



Şekil 25. Önerilen MSA'ya ait (a) 13x13 birim hücreden oluşan yapısı, (b) metayüzeyin radar kesit alanı (RCS) dağılımı, (c) soğurma spektrumu üzerinde RCS azaltma performansı ve (d) 1,6 ölçekleme oranı altında yapının soğurucu yapısı

Önerilen metayüzey soğurucunun, mevcut tasarımlara göre en önemli avantajlarından biri radar kesit alanı (RCS) azaltımı sağlayabilmesidir. Bu doğrultuda, Şekil 25(a)'da gösterilen 13x13 birim hücreden oluşan örnek yapı için monostatik RCS azaltım performansı incelenmiştir. Şekil 25(b)'de, PEC (Perfect Electric Conductor) olarak adlandırılan ideal düz iletken yüzey ile önerilen yapının RCS azaltım performansı karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Mavi çizgi PEC yüzeyini, kırmızı kesikli çizgi ise önerilen metayüzeyin performansını temsil etmektedir. Şekil 25(c)'de, önerilen yapının frekansa bağlı RCS azaltım değeri detaylı olarak verilmiş olup, soğurmanın gerçekleştiği tüm frekanslarda bu değer 5 dBsm'nin üzerinde olduğu görülmektedir. Ayrıca, Şekil 25(d)'de sunulan analizde, tasarım 1,66 oranında ölçeklendirilmiş ve L, S, C ve X bantlarında da benzer yüksek soğurma performansını koruduğu gösterilmiştir. Bu bantlarda %92,6 ile %99,8 arasında değişen soğurma oranlarına ulaşılmıştır.

Bu sonuçlar, önerilen yapının geniş frekans aralığında etkili bir RCS azaltımı sağladığını ve elektromanyetik gizleme uygulamaları için yüksek potansiyele sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

Karşılaştırma

Tablo 5. Önerilen Hepta-bant MSA'nın diğer Bildirilen Soğurucu Tasarımlarıyla Karşılaştırılması

Referans	Rezonans Frekansı-Soğurma Oranları	Çalışma Frekansı	Bant Sayısı	Kalınlık	Malzeme	Eğik Açısı
(Moniruzzaman, Islam, Muhammad, <i>et al.</i> 2020)	4,1(97,9%); 6,86(99,1%); 11,3(99,5%)ve 13,45 (99;95%)	C,X ve Ku	4	1,5mm $\lambda=0,02\lambda_0$	FR4	-
(Edries <i>et al.</i> 2020)	2,248(96%); 2,878(93%);4,3(93%) ve 5,872(95%)	S ve C	4	1,5mm $\lambda=0,011\lambda_0$	FR4	45
(Yang <i>et al.</i> 2023)	3,55(99,75%); 5,15(99,96%); 10,12(99,91%); 12,52(99,93%); 15,90(98,79%)ve 21,97(94,45%)	S,C,X, Ku ve K	6	1mm $\lambda=0,012\lambda_0$	FR4	90
(Verma & Meena, 2023)	10,4(99,9%); 12,80(98,44%); 21,05(86,78%); 24,29(92,74%)ve 30,41(93,65%)	X,Ku,K ve Ka	5	1mm $\lambda=0,03\lambda_0$	FR4	-
(Dewangan <i>et al.</i> 2023)	21,4(99,9%); 24,4(96%)ve 27,8(99,4%)	K ve Ka	3	1,54mm $\lambda=0,109\lambda_0$	FR4	45
(Jin <i>et al.</i> 2023)	4,70(90,89%); 10,19(90,18%); 11,96(94,80%)ve 14,15(90%)	C,X ve Ku	4	0,83mm $\lambda=0,013\lambda_0$	Polimid	45
(Ranjan & Sahoo, 2024)	4,59(97%); 6,84(78%); 9,35(92%); 13,60(99%)ve 16,08(95%)	C,X ve Ku	5	1,57mm $\lambda=0,024\lambda_0$	FR4	90
(Pati & Sahoo, 2024)	5,2(99,7%); 8,65(99,8%); 9,63(98,8%); 13,53(99,9%); 14,5(99,7%); 16,6(99,9%)ve 18,92(99,8%)	C,X, Ku ve K	7	1,6mm $\lambda=0,028\lambda_0$	FR4	TE=60 TM=70
(Rabbani, Islam, Hoque, <i>et al.</i> 2024)	3,64(91,46%); 5,99(99,72%); 7,47(96,89%)ve 10,01(98,45%)	S,C ve X	4	1,6mm $\lambda=0,019\lambda_0$	FR4	-

Tablo 5. (devamı)

(Afsar <i>et al.</i> 2024)	3,02(99,86%); 5,71(97,58%)ve 8,36(97,46%)	S,C ve X	3	1,6mm $\lambda=0,016\lambda_0$	FR4	75
(Rabbani, Islam, Moniruzzaman, <i>et al.</i> 2024)	3,26(93,8%); 11,6(96,47%)ve 17,13(99,95%)	S,X ve Ku	3	1,6mm $\lambda=0,017\lambda_0$	FR4	60
(Shakibul Hasan <i>et al.</i> 2024)	2,576(99,83%); 5,648(99,56%); 8,32(99,56%)ve 13,456(99,15%)	S,C,X ve Ku	4	1,6mm $\lambda=0,013\lambda_0$	FR4	90
(Errajaji <i>et al.</i> 2024)	3,15(93,65%); 5,96(85,75%); 8,73(94,14%); 9,36(99,51%); 13,22(90,55%); 13,71(97,87%)ve 14,45(98,68%)	S,C,X ve Ku	7	1,6mm $\lambda=0,0168\lambda_0$	FR4	50
Önerilen çalışma	2,8(92,6%); 6,32(91,7%); 9,17(93%); 12,21(96,3%); 14,4(97,4%); 17,3(98,3%)ve 19,5(99,8%)	S,C,X, Ku ve K	7	1mm $\lambda=0,0093\lambda_0$	FR4	45

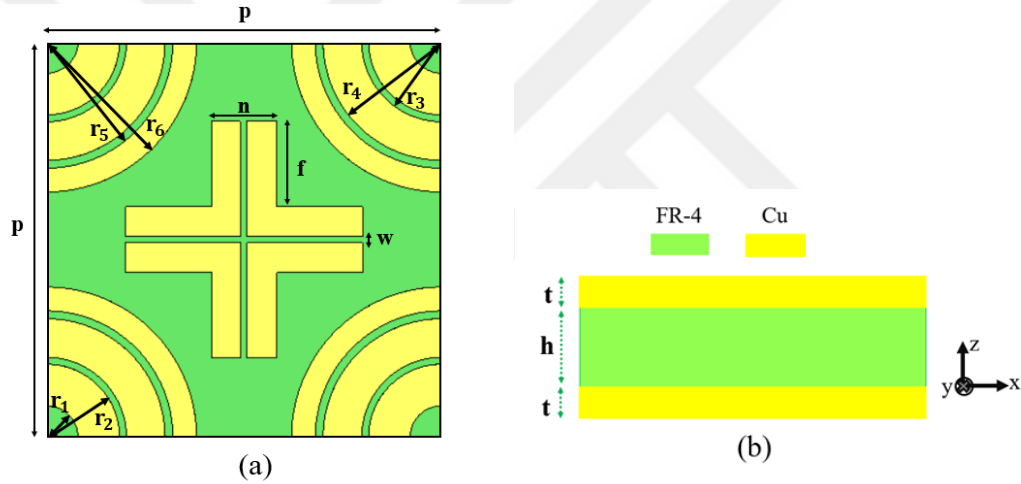
Tablo 5’te, bu tez kapsamında geliştirilen yedi bantlı metamalzeme soğurucunun performansı, literatürdeki benzer çalışmalarla karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Karşılaştırma; rezonans frekansları-soğurma oranları, çalışma frekans aralığı, soğurulan mikrodalga bant sayısı , yapının kalınlığı, kullanılan alt tabaka malzemesi ve eğik geliş açısına duyarlılığı (Eğik Açısı) kriterlerine göre yapılmıştır. Bu sayede önerilen tasarımın diğer çalışmalarla kıyaslandığında hangi açılardan üstünlük sağladığı ortaya konmuştur. Önerilen yapı, yedi farklı frekans bandında yüksek soğurma performansı göstererek, en fazla altı bantta çalışabilen önceki çalışmalardan (Moniruzzaman, Islam, Muhammad, *et al.* 2020; Edries *et al.* 2020; Yang *et al.* 2023; Verma & Meena, 2023; Dewangan *et al.* 2023; Jin *et al.* 2023; Ranjan & Sahoo, 2024; Rabbani *et al.* 2024; Afsar *et al.* 2024; Rabbani, Islam, Moniruzzaman, *et al.* 2024; Shakibul Hasan *et al.* 2024) ayrılmaktadır. Ayrıca, S, C, X, Ku ve K bantlarında etkili şekilde çalışabilmesi, genellikle en fazla dört bandı kapsayan benzer (Moniruzzaman, Islam, Muhammad, *et al.* 2020; Edries *et al.* 2020; Verma & Meena, 2023; Dewangan *et al.* 2023; Jin *et al.* 2023; Ranjan & Sahoo, 2024; Rabbani *et al.* 2024; Afsar *et al.* 2024; Rabbani, Islam, Moniruzzaman, *et al.* 2024; Shakibul Hasan *et al.* 2024) tasarımlara göre önemli bir avantaj sağlamaktadır. Önerilen metayüzey soğurucu dalga boyu cinsinden de diğer (Moniruzzaman, Islam, Muhammad, *et al.* 2020; Edries *et al.* 2020; Yang *et al.* 2023; Verma & Meena, 2023; Dewangan *et al.* 2023; Jin *et al.* 2023; Ranjan & Sahoo, 2024; Pati & Sahoo, 2024; Rabbani *et*

al. 2024; Afsar *et al.* 2024; Rabbani, Islam, Moniruzzaman, *et al.* 2024; Shakibul Hasan *et al.* 2024; Errajraji *et al.* 2024) çalışmalardan en ince yapılar arasında yer almaktadır. Bununla birlikte, düşük maliyetli ve ulaşılabilir FR-4 malzemesinin tercih edilmesi ile tasarım, Jin ve arkadaşlarının önerdiği çalışmasının aksine, PCB üretim teknolojileriyle uyumlu, hızlı ve ekonomik bir üretim süreci sunmaktadır. (Jin *et al.* 2023). Ayrıca, eğik açılarda da kararlı bir soğurma performansı sergilemektedir.

S, C, X, Ku ve K Bantlarında On Bant Soğurma ve RCS Azaltma Sağlayan Ultra İnce, Polarizasyona Duyarsız Metayüzey Tasarımı

Önerilen on bantlı birim hücre yapısının tasarımı ve gelişim süreci

Tez kapsamından yapılan metayüzey soğurucu uygulamalarından bir diğeri radar kesit alanını azaltmaya yönelik ultra ince, polarizasyona duyarsız ve on (deka) bantlı metayüzey soğurucu tasarımıdır.



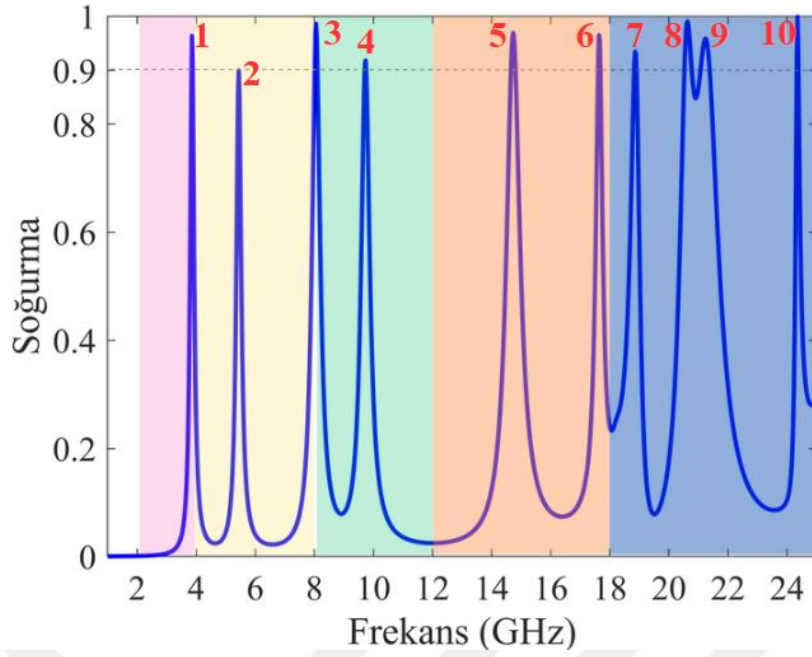
Şekil 26. Önerilen MSA tasarımının (a) üst ve (b) yan profil görünümü

Şekil 26(a) ve (b)'de, CST Microwave Studio programı ile oluşturulan soğurucu birim hücresinin üstten ve yandan görünümleri ile temel boyutsal parametrelerin yerleşimi gösterilmektedir.

Tablo 6. Önerilen MSA'nın Birim Hücre Tasarım Parametreleri

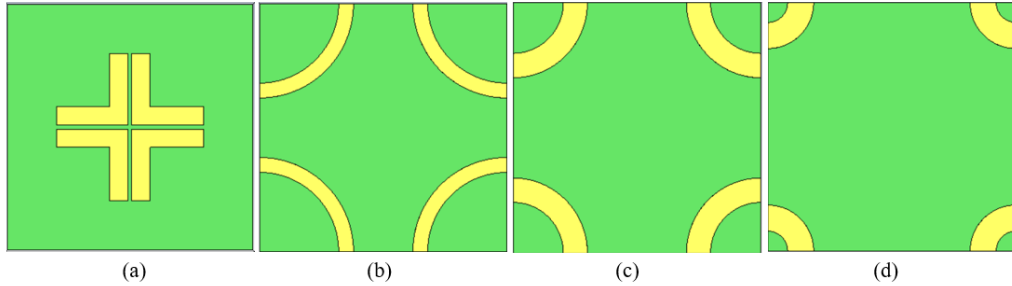
$p=20$ mm	$n=3,3$ mm	$r_1=1,6$ mm	$r_3=4,05$ mm	$r_5=6,4$ mm	$h=1$ mm
$f=4,35$ mm	$w=0,32$ mm	$r_2=3,7$ mm	$r_4=6$ mm	$r_6=7,6$ mm	$t=0,035$ mm

Önerilen soğurucunun birim hücre yapısına ait boyutları milimetre (mm) cinsinden Tablo 6'da ayrıntılı olarak verilmiştir.



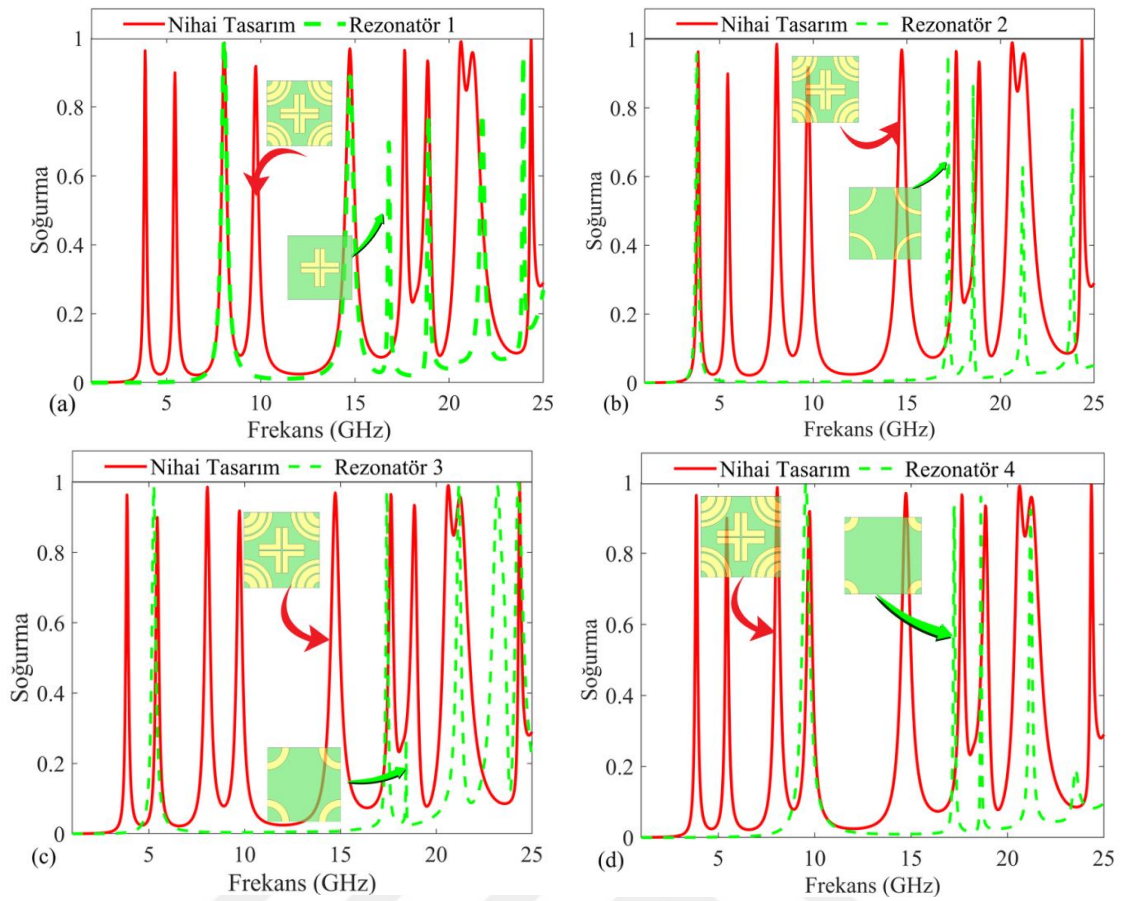
Şekil 27. Önerilen birim hücrenin frekansa bağlı soğurum davranışı

Şekil 27’de, önerilen metayüzey soğurucunun 1–25 GHz frekans aralığında yapılan benzetim çalışması sonucunda elde edilen soğurum performansı gösterilmiştir. Tasarım; 3,8 GHz; 5,4 GHz; 8 GHz; 9,7 GHz; 14,7 GHz; 17,6 GHz; 18,8 GHz; 20,6 GHz; 21,2 GHz ve 24,35 GHz frekanslarında sırasıyla %96,5, %90,2, %98,6, %91,9, %96,9, %96,5, %93,4, %99,1, %95,9 ve %99,9 oranlarında yüksek soğurum verimliliği göstermiştir. Bu sonuçlar, yapının toplamda on farklı frekansta etkili soğurum sağladığını ortaya koymaktadır.



Şekil 28. Önerilen MSA tasarımını meydana getiren dört farklı rezonatörün (a) Rezonatör 1, (b) Rezonatör 2, (c) Rezonatör 3 ve (d) Rezonatör 4 yapılarına ait geometrik görünimleri

Önerilen metayüzey soğurucunun çok bantlı soğurum karakteristiğini elde etmesini sağlayan dört farklı rezonatör tasarımı, sırasıyla Şekil 28(a), (b), (c) ve (d)’de sunulmuştur. Bu rezonatörlerin bir araya getirilmesiyle on bantta soğurum sağlayan metayüzey yapısı oluşturulmuştur.



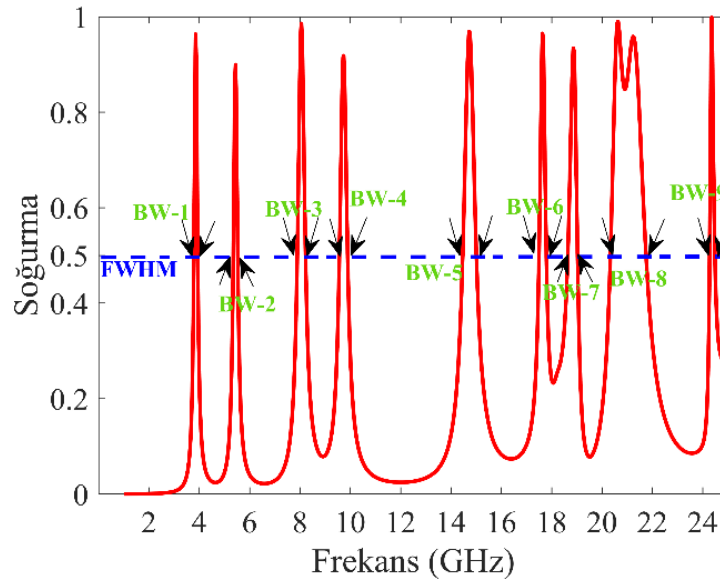
Şekil 29. Önerilen MSA yapısını oluşturan (a) Rezonatör 1, (b) Rezonatör 2, (c) Rezonatör 3 ve (d) Rezonatör 4'e ait bireysel soğurma performansları

Şekil 29(a), (b), (c) ve (d)'de, Şekil 28(a), (b), (c) ve (d)'de gösterilen her bir rezonatöre ait soğurma grafikleri ayrı ayrı sunulmakta ve elde edilen sonuçlar, nihai metayüzey tabanlı tasarımın genel soğurma performansı ile karşılaştırmalı olarak değerlendirilmektedir.

Tablo 7. Nihai Tasarıma Ulaştıran Rezonatörlerin Metayüzey Tasarımına Etkileri

Rezonatör	Emilim frekansı (GHz)	Max.Emilim (%)	Bulunduğu Bant Aralığı
Rezonatör-1	8,056; 14,7; 16,8; 18,9; 21,7 ve 24 GHz	%99,8, %88,8, %69,1, %77,6, %78,2 ve %95,2	X, Ku ve K
Rezonatör-2	3,78; 17,2; 18,5; 21,2 ve 23,8 GHz	%95,7; %95,4; %86,3; %62,8 ve %79,6	S, Ku ve K
Rezonatör-3	5,3; 17,4; 21,2; 23,2 ve 24,3 GHz	%98,9; %97,2; %99,4; %98,7 ve %99,7	C, Ku ve K
Rezonatör-4	9,6, 17,3, 18,6, 21,2 ve 23,6 GHz	%99,9; %93,7; %95,9; %92,9 ve %20,6	X, Ku ve K
Nihai (Rezonatör 1+2+3+4)	3,8, 5,4, 8, 9,7, 14,7, 17,6, 18,8, 20,6, 21,2 ve 24,35 GHz	%96,5; %90,2; %98,6; %91,9; %96,9, %96,5; %93,4; %99,1; %95,9 ve %99,9	S, C, X, Ku ve K

Tablo 7’de, on (deka) bantlı metayüzey soğurucunun performansına katkı sağlayan her bir rezonatörün etkileri, Şekil 29(a), (b), (c) ve (d)’de sunulan soğurma grafiklerinin detaylı analizi ile birlikte kapsamlı olarak açıklanmıştır. Yapılan analizler sonucunda, dört rezonatör arasındaki rezonansların karşılıklı etkileşimi nedeniyle soğurma tepe noktalarının yer değiştirdiği, azaldığı, arttığı ve bazı durumlarda kaybolduğu gözlemlenmiştir. En dikkat çekici sonuçlardan biri, paralel olarak eklenen boşluk kapasitansının rezonans bantlarının sayısını artırması olmuştur. Bu doğrultuda, köşelere yerleştirilen çeyrek halka yapıları, farklı parametrelerle üç kez tekrar edilerek bant sayısını artırdığı sunulmuştur. Ayrıca, metal uzantıların artırılması, elektromanyetik dalgalar ile metamatlamaya arasındaki etkileşimi güçlendirerek daha verimli rezonansların oluşmasına katkıda bulunmuştur. Farklı tasarım unsurlarının birleştirilmesi, birim hücrenin istenmeyen sinyalleri bastırmasını kolaylaştırarak nihai tasarım sonuçlarına ulaştırmıştır. Son olarak, tüm rezonatörlerde uygulanan ayna simetrisi, istenmeyen kuplaj etkilerini azaltarak elektromanyetik yanıtın daha tutarlı ve dengeli olmasını sağlamıştır.



Şekil 30. Önerilen metayüzeyin soğurma bantlarına ilişkin tam yarı maksimum (FWHM) yöntemiyle hesaplanan bant genişlikleri (BW)

Şekil 30’da, önerilen metayüzey soğurucunun her bir emilim bandındaki tam yarı maksimum (FWHM) değerleri kullanılarak bant genişlikleri (BW) gösterilmektedir. Yapı, kalite faktörü (Q-faktörü) açısından yüksek performans sergilemekte olup, ilgili parametre Denklem (40)’da verilen bağıntı ile hesaplanmaktadır.

$$Q = \frac{f_0}{FWHM} \quad (39)$$

Burada, f_0 ilgili bantta maksimum soğurum frekansını ifade etmektedir. Önerilen metayüzey, 24.35 GHz frekansında $Q=243.5$ değerine ulaşarak üstün bir kalite faktörü sunmaktadır. Bu yüksek Q-faktörü, yapının belirli frekans aralıklarında dielektrik algılama uygulamaları için oldukça uygun olduğunu göstermektedir.

Ayrıca, metayüzeyin kompaktlığını değerlendirmek amacıyla etkin ortam oranı (EMR) hesaplanmıştır. EMR değeri, Denklem (41)'de ki bağıntı ile belirlenmektedir:

$$EMR = \frac{\Lambda_0}{L} \quad (40)$$

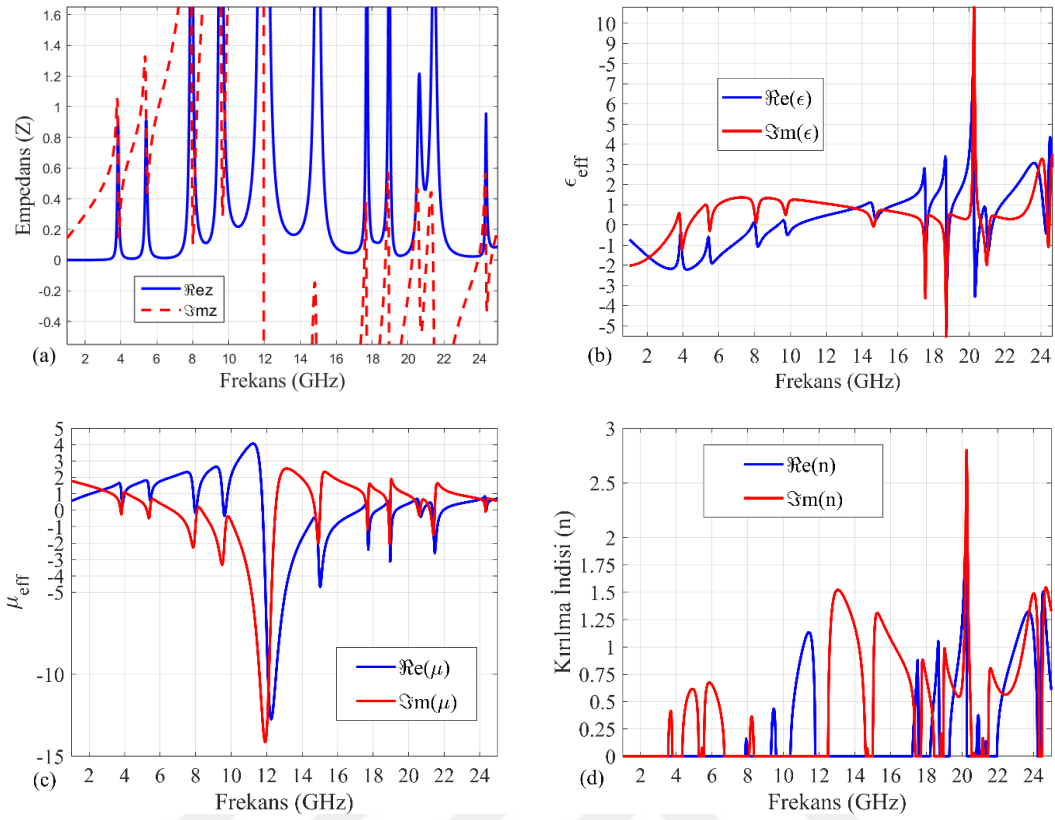
Burada, Λ_0 en düşük rezonans frekansında belirlenen serbest uzay dalga boyunu, L ise yapının en büyük fiziksel boyutunu ifade etmektedir. Önerilen yapının EMR değeri 3.95 olarak hesaplanmıştır.

Tablo 8. Rezonans Frekanslarındaki FWHM'de ki Bant Genişlik ve Q Faktörü Değerleri

Rezonans Frekansı (GHz)	FWHM BW ($f_{max}-f_{min}$)	Q Factor
3,8	0,086(3,906-3,82)	44,2
5,4	0,09(5,48-5,39)	60
8	0,19(8,15-7,96)	42,10
9,7	0,17(9,81-9,64)	57,2
14,7	0,3(14,88-14,58)	49
17,6	0,16(17,72-17,56)	110
18,8	0,2(18,95-18,75)	94
20,6-21,2	1,05(21,5-20,45)	19,9
24,35	0,1(24,4-24,3)	243,5

Tablo 8'de, önerilen soğurucu tasarımın rezonans frekanslarındaki bant genişlikleri ile (Q) kalite faktörü değerleri sunulmuştur.

Performans Analizi



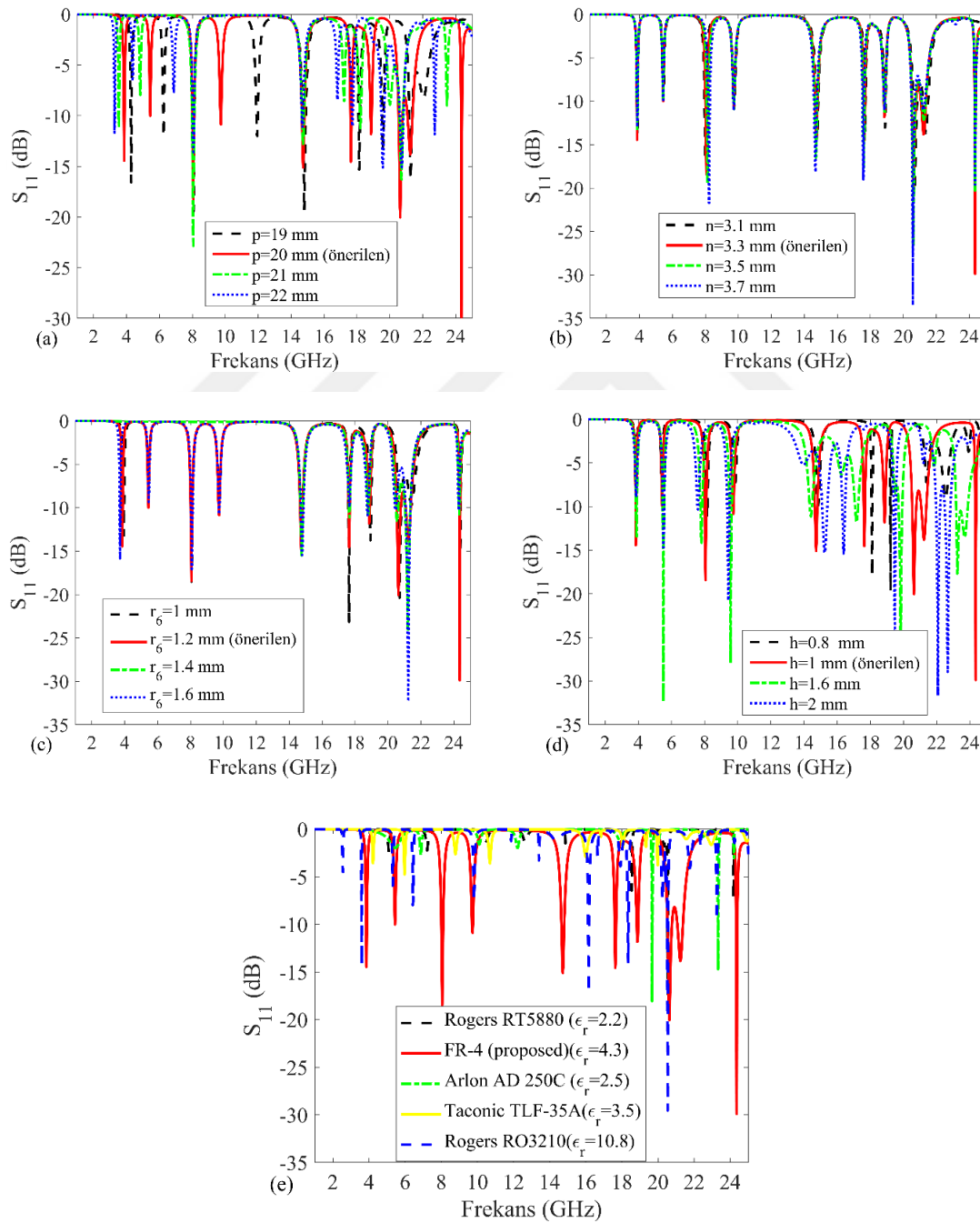
Şekil 31. Önerilen MSA için (a) normalize edilmiş empedans, (b) elektriksel, (c) manyetik geçirgenlik ve (d) kırılma indisi grafikleri

Şekil 31(a), (b), (c) ve (d)'de sırasıyla önerilen MSA'ya ait normalize edilmiş giriş empedansı, elektriksel geçirgenlik, manyetik geçirgenlik ve kırılma indisi grafikleri sunulmuştur. Şekil 31(a), soğurumun gerçekleştiği frekans bantlarında giriş empedansının gerçek kısmının yaklaşık bir, sanal kısmının ise sifıra yakın değerler alarak yapının serbest uzay ile etkin empedans uyumu sağladığını göstermektedir. Bu durum, rezonans frekanslarında yansımaların minimize edilmesini ve dolayısıyla maksimum soğurumun gerçekleşmesini desteklemektedir.

Tablo 9. Elektriksel ve Manyetik Geçirgenlik ile Kırılma İndisi Değerleri

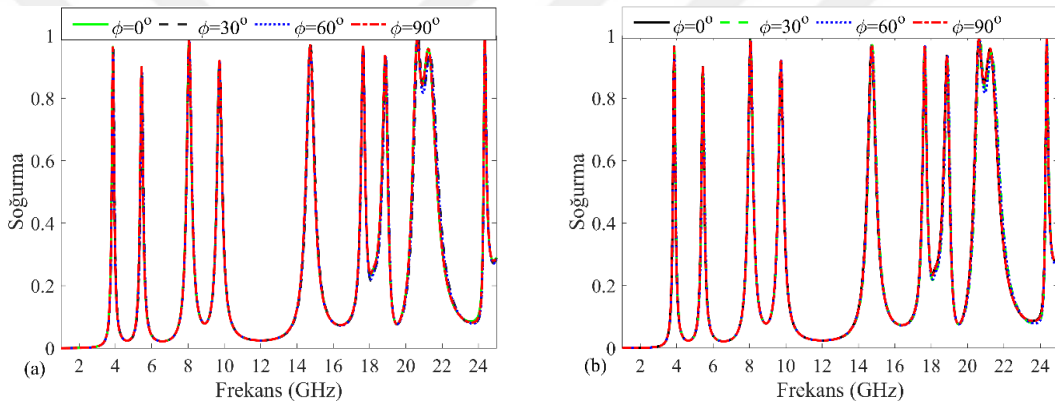
Soğurma Frekansı	$\text{Re}(\epsilon_r)$	$\text{Im}(\epsilon_r)$	$\text{Re}(\mu_r)$	$\text{Im}(\mu_r)$	$\text{Re}(n)$	$\text{Im}(n)$
3,8 GHz	-0,3	+0,32	+0,3	-0,24	0	0
5,4 GHz	-0,58	+0,38	+0,61	-0,4	0	0
8 GHz	0,13	+0,52	-0,134	-0,42	0	0
9,7 GHz	-0,161	+0,53	+0,162	-0,47	0	0
14,7 GHz	0,48	+0,36	-0,5	-0,31	0	0
17,6 GHz	-0,39	+0,261	+0,42	-0,063	0	0
18,8 GHz	-0,34	+0,11	+0,51	-0,15	0	0
20,6 GHz	0,38	+0,152	-0,22	-0,193	0,022	0,032
21,2 GHz	-0,4	+0,4	+0,46	-0,062	0	0
24,35 GHz	-0,447	-0,58	+0,62	+0,48	0,0751	0,784

Tablo 9’da, Şekil 31(b), (c) ve (d)’de sunulan elektriksel geçirgenlik, manyetik geçirgenlik ve kırılma indisi grafiklerinin ayrıntılı analizleri yer almaktadır. Tablo 9 incelenirse, önerilen yapının belirli frekans bölgelerinde elektriksel geçirgenlik veya manyetik geçirgenlik değerlerinin negatif olduğu, yani tek negatif (Single Negative - SNG) metamalzeme davranışı sergilediğini göstermektedir. Ayrıca, rezonans frekanslarında kırılma indisinin sıfıra yakın olması, elektromanyetik dalgaların yapıda etkili şekilde sönmülmesini sağlamaktadır. Bu durum, aynı zamanda yapı ile serbest uzay arasındaki empedans uyumunun başarılı şekilde sağlandığını ve böylece yansımaların minimize edildiğini doğrulamaktadır.



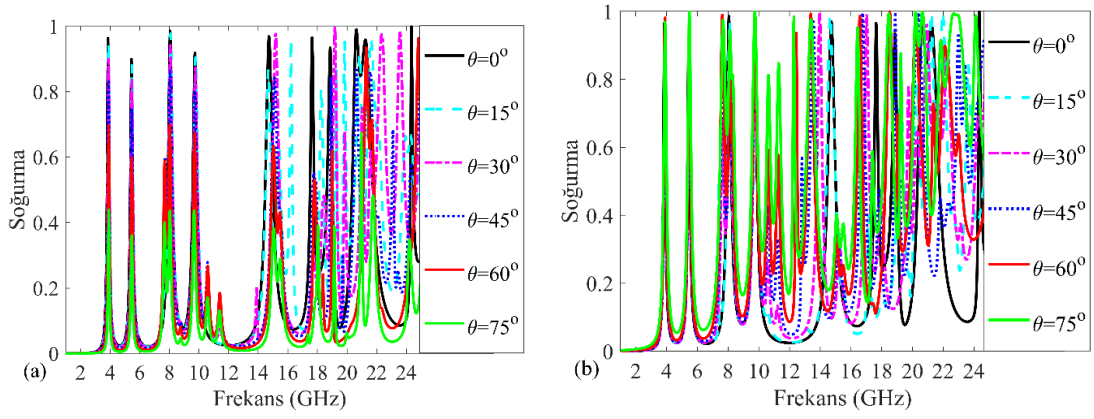
Şekil 32. Önerilen MSA’nın yansıma katsayısı üzerindeki (a) p , (b) n , (c) r_6 , (d) h parametrelerinin ve (e) farklı dielektrik malzemelerin etkisi

Şekil 32(a), (b), (c) ve (d)'de, belirli geometrik parametrelerin yansımaya katsayısı profili üzerindeki etkileri incelenmiş ve düşük yansımaya katsayısı ile maksimum soğurum için eniyileme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, p , n , r_6 ve h parametreleri sırasıyla [19–22] mm, [3,1–3,7] mm, [1–1,6] mm ve [0,8–2] mm aralıklarında CST benzetim programı parametre süpürme ikonu yardımı ile değiştirilerek yansımaya katsayısı performansına etkileri değerlendirilmiştir. Şekil 32(e)'de, önerilen MSA tasarımında farklı dielektrik alt tabaka malzemeleri ile yapılan karşılaştırmalar yer almaktadır. Rogers RT5880, Arlon AD 250C, Taconic TLF-35A ve Rogers RO3210 malzemeleri kullanılarak elde edilen S11 yansımaya katsayısı sonuçları analiz edilmiştir. Yapılan detaylı analizler sonucunda, parametre değerleri $p=20$ mm, $n=3,3$ mm, $r_6=1,2$ mm ve $h=1$ mm iken, alt tabaka malzemesi olarak FR4 kullanıldığında tasarımın en düşük katsayısı ile en yüksek soğurma verimliliğine ulaştığı belirlenmiştir.



Şekil 33. Polarizasyon açısı değişimlerinin soğurma spektrumu (a) TE, (b) TM modu üzerindeki etkisi

Şekil 33(a) ve (b)'de, önerilen metayüzey soğurucusunun TE ve TM modlarındaki farklı polarizasyon açılarına bağlı soğurma performansı sunulmaktadır. 0° - 90° arasındaki polarizasyon açılarında yapılan analizler, X ve Y eksenlerine ait elektrik ve manyetik alan vektörlerinin Z ekseninde dönmesinin soğurma performansı üzerinde belirgin bir etkisi olmadığını ortaya koymaktadır. Bu durum, yapının simetrik tasarımı sayesinde polarizasyondan bağımsız olarak yüksek soğurma verimliliği sergilediğini göstermektedir. Böylece, önerilen MSA yapısı, dalga polarizasyonundan bağımsız olarak kararlı bir performans sunmakta ve bu özelliği, yansımaya, saçılma veya çevresel koşulların polarizasyonu etkileyebileceği elektromanyetik uygulamalar için önemli bir avantaj sağlamaktadır.

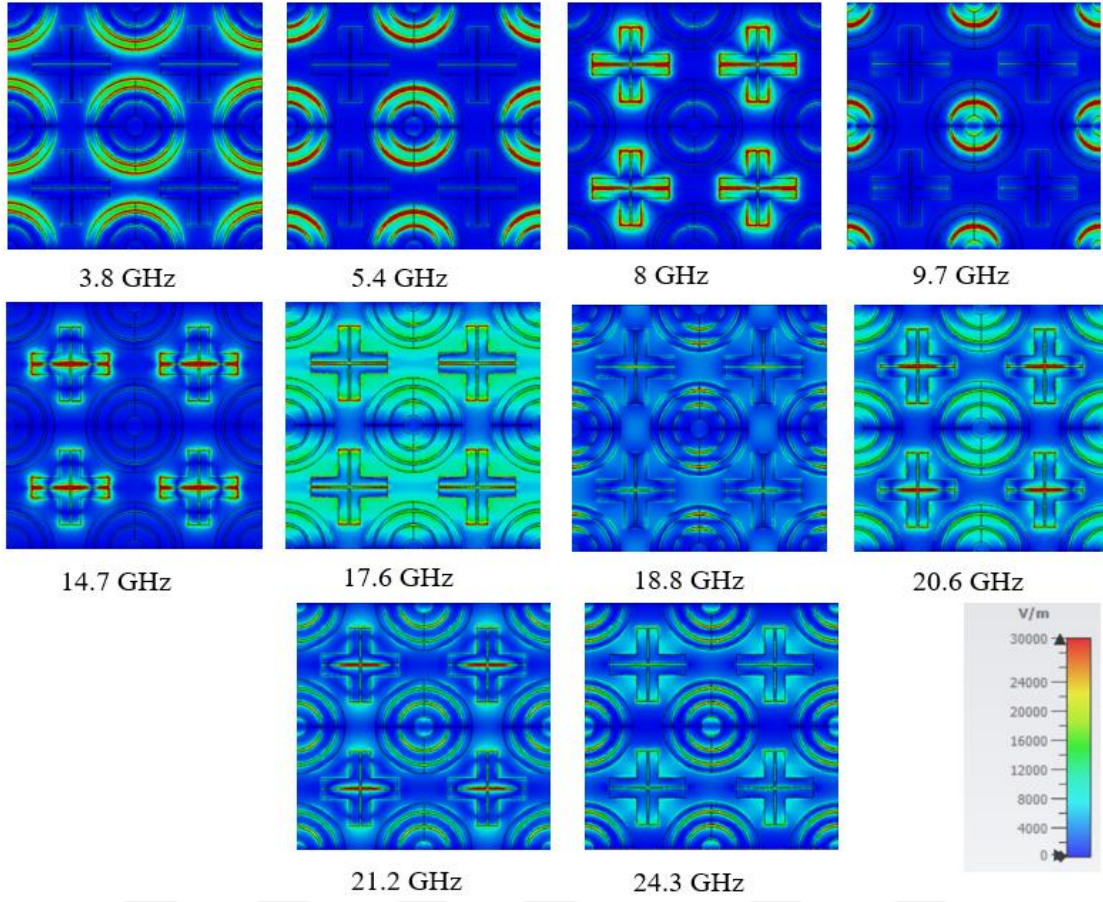


Şekil 34. Önerilen tasarımın (a) TE ve (b) TM modu farklı olay açısı değişimlerinin soğurma spektrumu üzerindeki etkisi

Şekil 34 (a) ve (b)'de, TE ve TM modlarında 0° ile 75° arasındaki farklı olay açıları altında, 15° 'lik artışlarla elde edilen soğurma performansları sunulmuştur. Önerilen metayüzey soğurucu, 45° 'ye kadar %80'in üzerinde performans sağlamıştır.

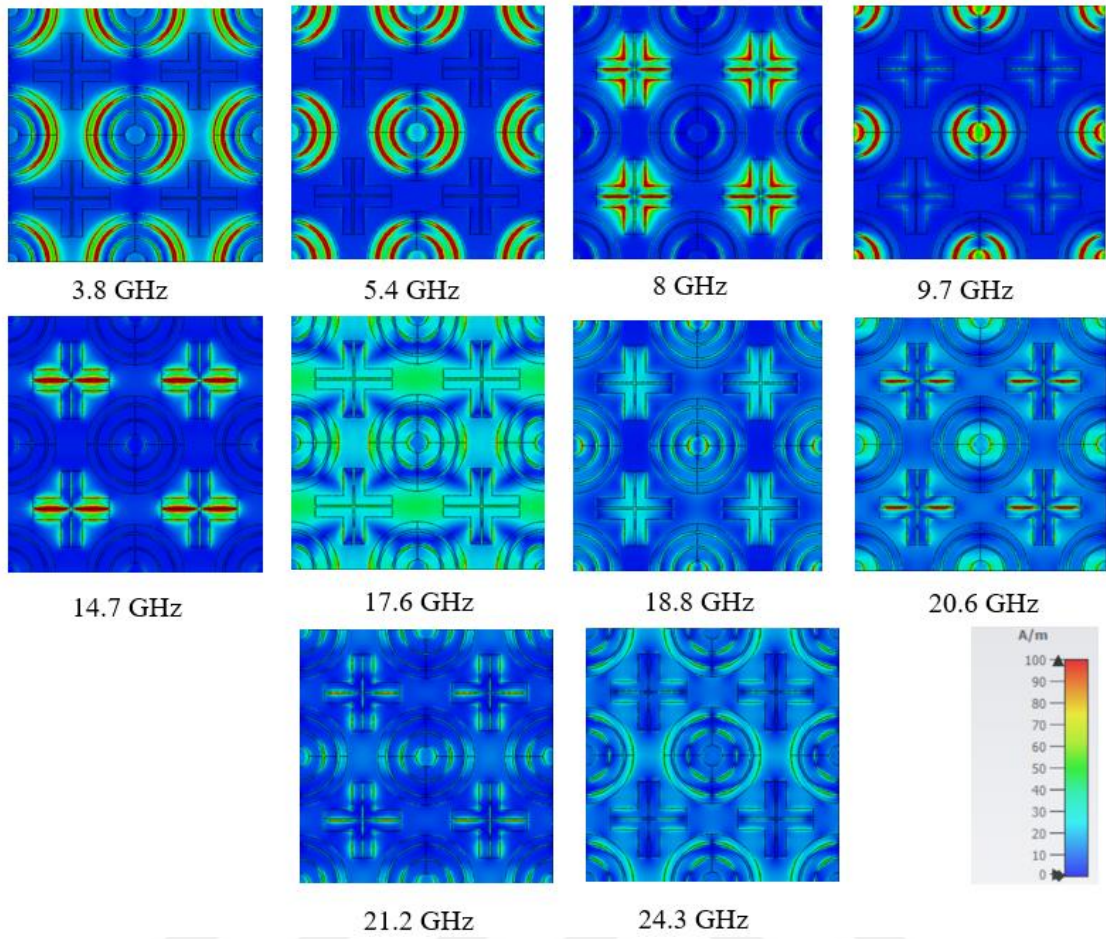
Analizler sonucunda, elektromanyetik dalganın geliş açısı arttıkça empedans profilinin değiştiği ve buna bağlı olarak soğurma karakteristiğinde açısal bağımlı farklılıklar olduğu gözlemlenmiştir. Olay açısı büyüdükçe, dalga yapıya daha uzun bir yol izleyerek ulaşmakta, bu durum kuplaj (eşleşme) etkisinin zayıflamasına ve dalganın soğurucu yüzeye daha teğetsel bir şekilde etkileşmesine yol açmaktadır. Bu fiziksel etkileşimler sonucunda, özellikle yüksek geliş açılarında soğurma düzeyinde azalmalar ve rezonans frekanslarında spektral kaymalar meydana gelmektedir. Bu durum, yapının geliş açısına duyarlı bir soğurma davranışı sergilediğini ortaya koymaktadır.

Elektrik, Manyetik ve Yüzey Akım Alan Dağılımlar



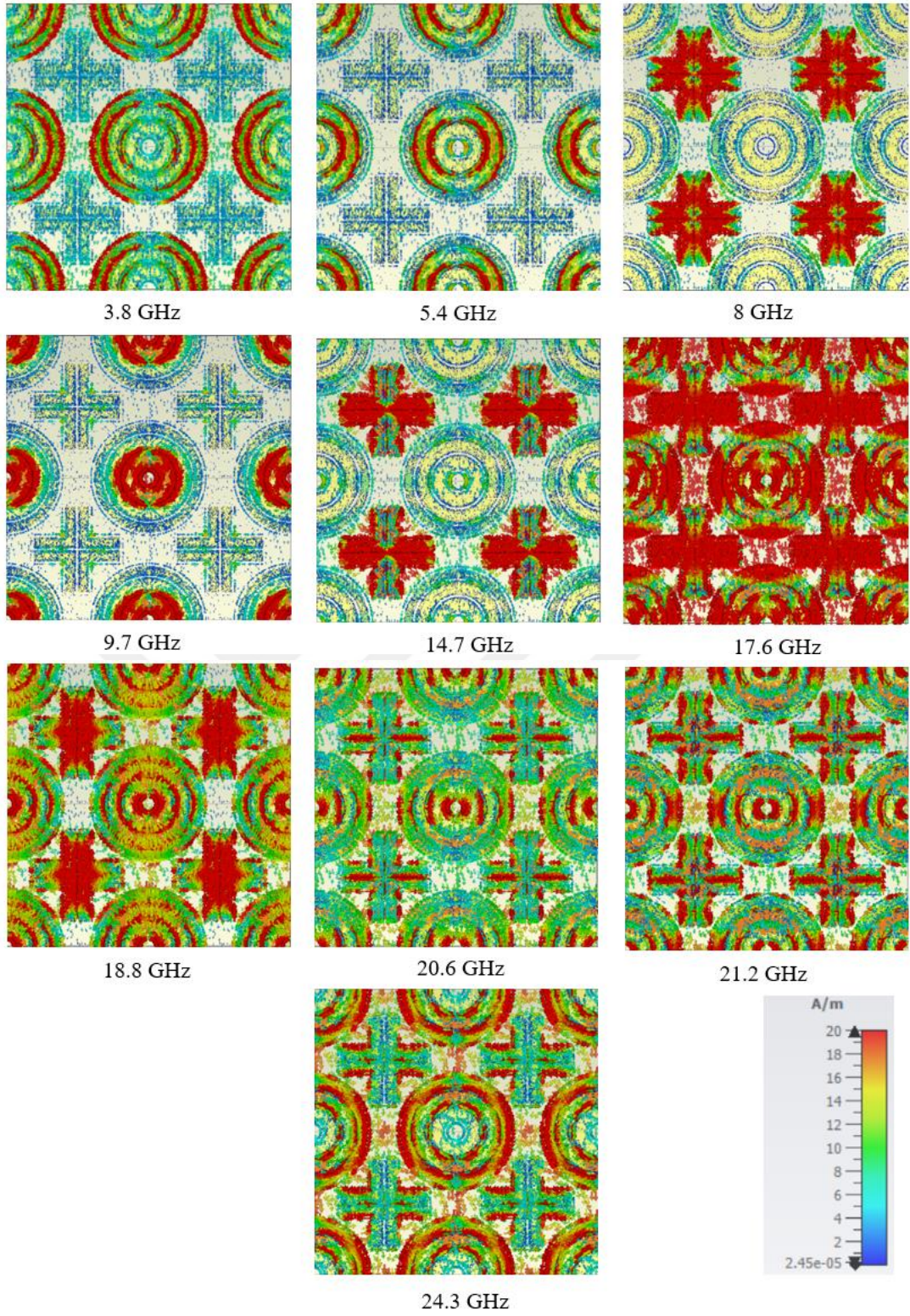
Şekil 35. Önerilen MSA'nın E-alan dağılımı

Şekil 35'de önerilen metayüzey soğurucu tasarımının elektrik alan dağılımları gösterilmiştir.



Şekil 36. Önerilen MSA'nın H-alan dağılımı

Şekil 36'da önerilen metayüzey soğurucu tasarımının manyetik alan dağılımları gösterilmiştir.



Şekil 37. Önerilen MSA'nın yüzey akımı dağılımı

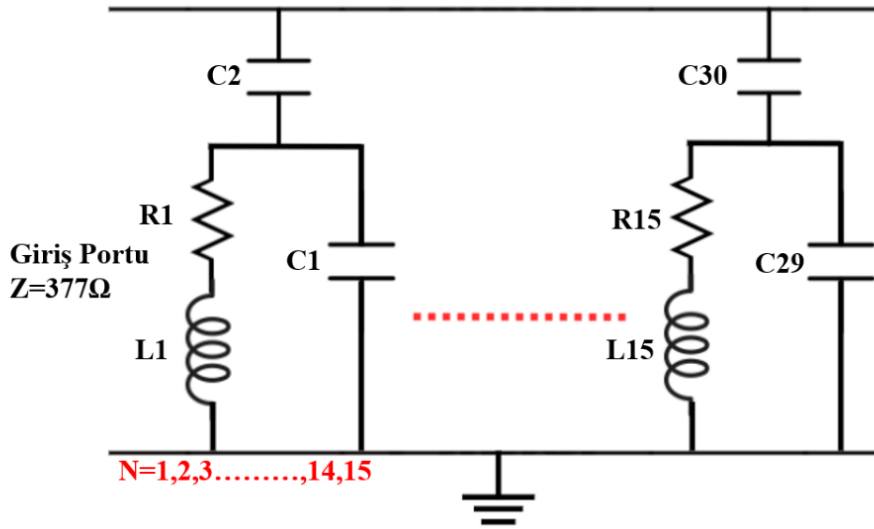
Şekil 37'de önerilen metayüzey soğurucu tasarımın yüzey akım dağılımları gösterilmiştir. 3.8 GHz frekansında, içteki çeyrek halka rezonatöründe sağ kısımda saat yönünde, sol kısımda saat yönünün tersinde yoğun akım akışı gözlemlenmiştir. Orta bölgedeki ikinci çeyrek halka yapısında, özellikle dış çerçeveye yakın bölgelerde, sağ tarafta saat yönünün tersinde, sol tarafta ise saat yönünde akım akışı meydana gelmiştir. 5,4 GHz frekansında,

köşede bulunan orta çeyrek halka rezonatöründe sağ tarafta saat yönünün tersinde, sol tarafta saat yönünde akım akışı oluşmuştur. 8 GHz frekansında, boşluklu artı işaretinin oluşturduğu L şeklindeki yapılar üzerinde, sağ üst ve sol alt köşelerde bulunan L şekillerinde saat yönünün tersinde, sol üst ve sağ alt köşelerdeki L şekillerinde ise saat yönünde akım akışı tespit edilmiştir. 9,7 GHz’de, köşelerde bulunan en dış çeyrek halka rezonatörünün sağ kısmında saat yönünün tersinde, sol kısmında saat yönünde akım hareketi meydana gelmiştir. 14,7 GHz frekansında, artı işaretinin boşluklarla bölünerek oluşturduğu L yapılarında, sağ üst ve sol altta bulunan L şekillerinde akım +x eksen yönünde, sol üst ve sağ altta bulunan L şekillerinde ise -x eksen yönünde hareket etmektedir. 17,6 GHz frekansında, tasarımın tüm rezonatör bölgelerinde ters yönlü akım akışı gözlemlenmiştir. 18,8 GHz’de, artı işaretinin y eksen boyunca zıt yönlü akım hareketi belirlenmiştir. 20,6 GHz frekansında, artı işaretinin x eksen doğrultusundaki boşluklarda ve köşelerdeki çeyrek halka rezonatörleri arasındaki boşluklarda zıt yönlü akım akışı meydana gelmiştir. 21,2 GHz frekansında, artı işaretinin x eksen yönündeki boşluklarında ve L şekillerinin y eksen boyunca ters yönlü akım akışı gözlemlenmiştir. 24,35 GHz frekansında, köşelerde bulunan çeyrek halka rezonatörleri arasında ve artı işaretinin x eksen doğrultusundaki dış çevresinde ters yönlü akım akışı gerçekleşmiştir.

Bu analizler sonucunda, rezonatörler arasındaki etkileşim nedeniyle oluşan zıt yönlü yüzey akımlarının ters yönlü manyetik alanlara yol açtığı belirlenmiştir. Elektromanyetik etkileşim sonucu ortaya çıkan bu ters yönlü manyetik alanlar, manyetik dipollerin oluşmasını sağlamaktadır.

Şekil 36’da, soğurumun gerçekleştiği frekanslara ait manyetik alan dağılımları analizleri sonucunda, manyetik alanın en yoğun olduğu bölgelerin yaklaşık 100 A/m seviyelerinde olduğu ve bu bölgelerin renk ölçeğinde kırmızı ile belirtildiği görülmüştür. Bu alanlarda manyetik enerjinin lokalize olduğu ve manyetik alan sıkışmasının meydana geldiği tespit edilmiştir. Ayrıca, manyetik alan dağılımları ile yüzey akım dağılımları karşılaştırıldığında, her iki dağılımın da benzer bölgelerde yoğunlaştığı gözlemlenmiştir. Bu durum, yapının rezonans davranışını desteklemektedir.

Şekil 35’te gösterilen farklı rezonans frekanslarındaki elektrik alan (E-alan) dağılımları incelendiğinde, elektrik alan yoğunluğundaki değişimlerin, manyetik alan dağılımlarıyla birlikte değerlendirildiğinde, Maxwell’in Amper Yasası ve Faraday’ın İndüksiyon Yasası doğrultusunda, zamanla değişen manyetik alanların elektrik alan oluşturduğu doğrulanmıştır.



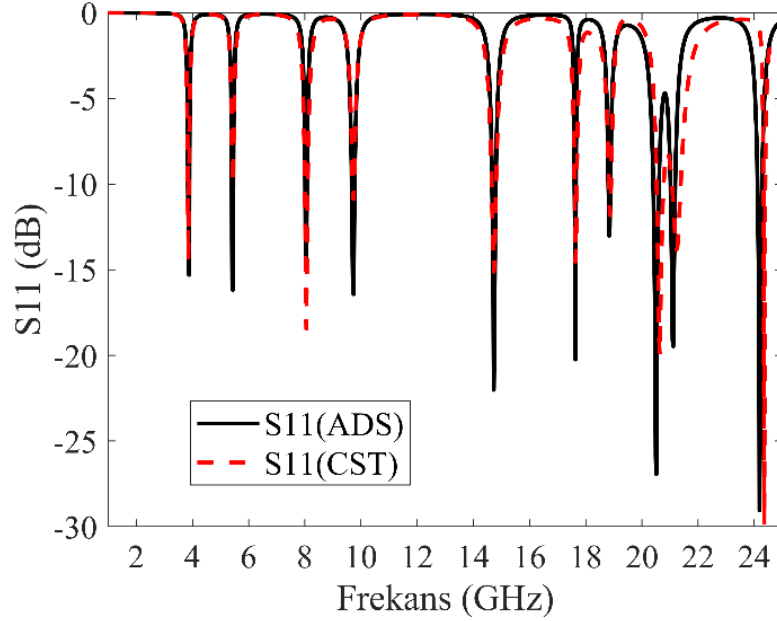
Şekil 38. Önerilen metayüzey soğurucusunun elektromanyetik davranışını temsil eden eşdeğer devre şeması

Önerilen MSA'nın eşdeğer devre modeli, Şekil 38'de gösterildiği üzere ADS (Advanced Design System) yazılımı kullanılarak tasarlanmış ve benzetimleri gerçekleştirilmiştir. Modelde, her rezonans tepe noktası kapasitans, endüktans ve direnç elemanlarından oluşmaktadır. Seri kapasitanslar (C1, C3, ..., C29), rezonans frekanslarını belirleyen temel bileşenler olup, bu kapasitanslar ile seri endüktanslar (L1, ..., L15) ilişkilidir.

Tablo 10. Önerilen Metayüzeyin Eşdeğer Devresinin RLC Bileşenlerinin Değeri

Rezistans (Ω)	Endüktans (nH)	Seri Kapasitans (fF)	Paralel Kapasitans (fF)
R1=8,81511	L1=8,04323	C1=5,96315	C2=3,05179
R2=12,6956	L2=22,8559	C3=11,8995	C4=5,51017
R3=14,2999	L3=31,27635	C5=19,9872	C6=9,5113
R4=30,219	L4=5,25046	C7=133780	C8=0,0283
R5=50	L5=0,5	C9=2,57	C10=4,71196
R6=14,2966	L6=36,2048	C11=35,9232	C12=11,2999
R7=14,2995	L7=15,4537	C13=11,709	C14=6,03404
R8=13,3988	L8=5,90008	C15=0,500003	C16=2,12151
R9=12,6942	L9=11,0689	C17=6,2749	C18=4,56474
R10=14,1998	L10=7,81515	C19=4,02032	C20=3,97454
R11=22,4936	L11=3,46	C21=0,500078	C22=1,37169
R12=22,2	L12=13,6	C23=2,8884	C24=1,34557
R13=4,49909	L13=10,7997	C25=5,34631	C26=2,279
R14=3	L14=3,92	C27=0,500148	C28=0,925526
R15=7,49911	L15=5,02644	C29=6,00608	C30=2,77924

Önerilen metayüzey soğurucunun eşdeğer devre modeli (ECM), analizi doğrultusunda metal rezonatörlerin boyutu ve mesafeleri endüktansı, rezonatörler arasındaki boşluk ise kapasitansı etkilediği belirlenmiştir. ECM'nin doğrulanması için ADS ile tasarlanan devre modelinde başlangıç bileşen değerleri 1 fF kapasitans ve 1 nH endüktans olarak atanmıştır. Daha sonra, bileşen değerleri optimize edilerek S11 parametreleri, CST'de elde edilen simülasyon sonuçlarıyla karşılaştırılarak şekil 14'te sunulmuştur. Elde edilen eşdeğer devre modeline ait direnç (R), endüktans (L) ve kapasitans (C) değerleri ise Tablo 10'da verilmiştir.

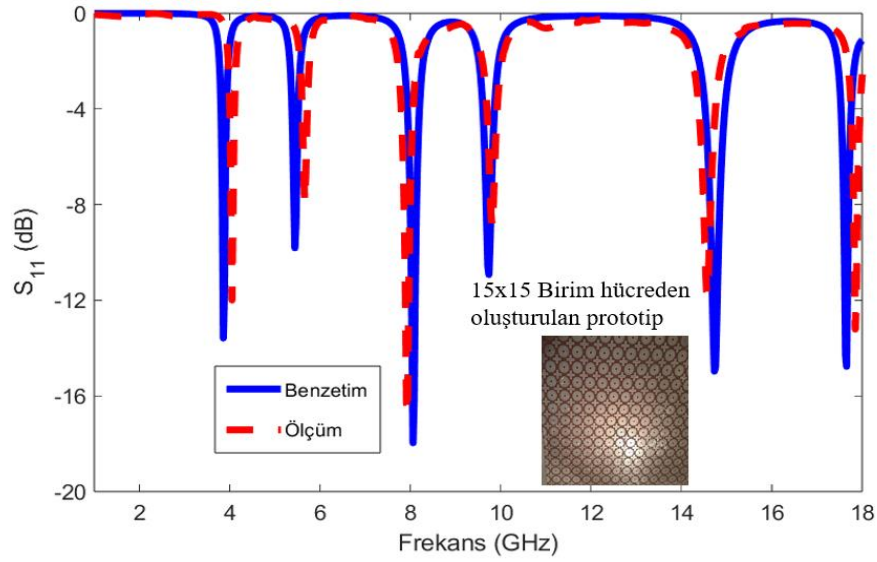


Şekil 39. Önerilen MSA için ADS ve CST kullanılarak elde edilen S11 simülasyon sonuçları

Önerilen metayüzey soğurucuya ait eşdeğer devre modeli, CST ortamında elde edilen simülasyon sonuçlarıyla karşılaştırılarak Şekil 39'da sunulmuştur. Önerilen metayüzey soğurucunun ADS ve CST'de elde edilen S11 grafikleri yüksek uyum göstermiştir. Bu doğrultuda, önerilen ECM'nin elektromanyetik davranışı başarıyla temsil ettiği, çalışmanın doğrulandığı ve rezonans tepe noktalarının fiziksel modelle tutarlı olduğu sunulmuştur.

Üretim ve Ölçüm Sonuçları

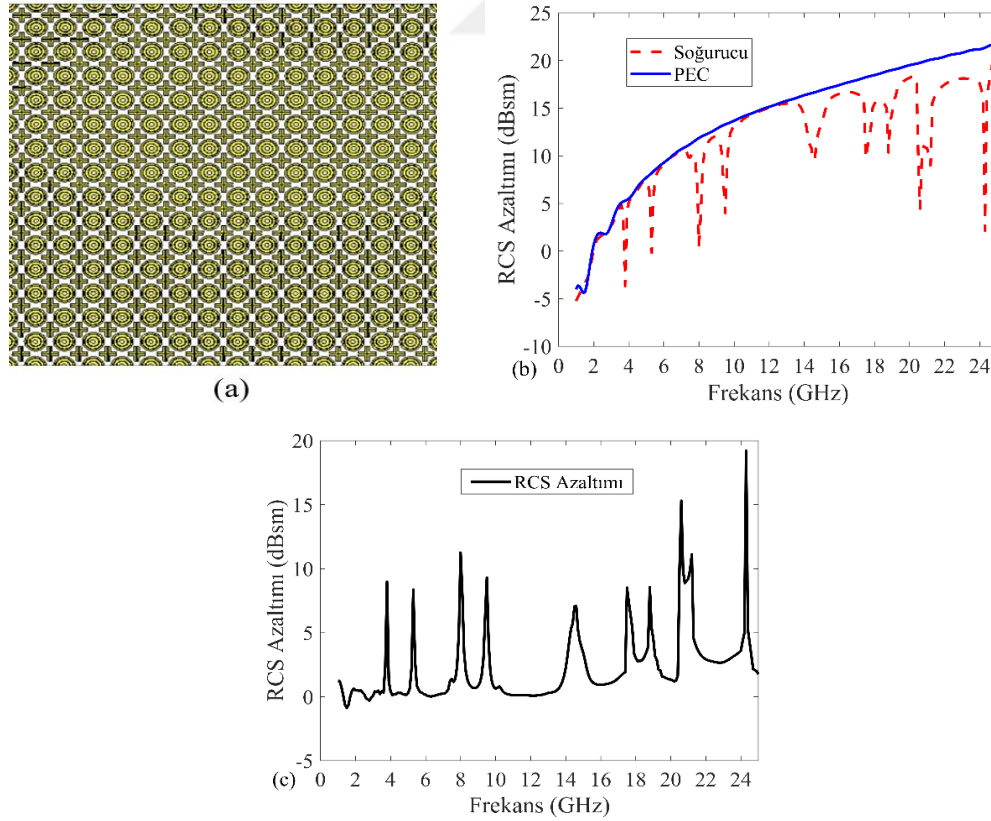
Şekil 40'ta, önerilen on bantlı metayüzey soğurucuya ait 15×15 birim hücreden oluşturulan prototip üretimin ölçüm ve benzetim sonuçları karşılaştırılarak sunulmaktadır.



Şekil 40. Önerilen on bantlı metayüzey soğurucuya ait 15×15 birim hücreden oluşturulan prototipinin ölçüm sonuçları ile benzetim sonuçlarının karşılaştırılması

Şekil 40'ta görüldüğü gibi sunulan on bantlı metayüzey soğurucunun ölçüm ve benzetim sonuçlarının uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar, yapının gerçek zamanlı uygulamalar için kullanılabilirliğini doğrulamaktadır.

RCS Azaltma Performansı



Şekil 41. (a) Önerilen MSA yapısının 15×15 birim hücreden oluşan düzeni, (b) Önerilen metayüzey soğurucunun ve ideal iletken yüzeyin (PEC) RCS azaltım karşılaştırması, (c) Soğurucu yapının frekansa bağlı RCS azaltım eğrisi

Önerilen metayüzey soğurucunun radar kesit alanı (RCS) azaltma performansı, elektromanyetik gizlilik uygulamalarına uygunluğunu değerlendirmek için yapılan benzetim sürecinde 15x15 birim hücreden oluşan metayüzey yapısı Şekil 41(a)'da gösterilmektedir. Şekil 41(b)'de, metayüzeyin monostatik RCS değerleri, referans olarak kullanılan mükemmel elektriksel iletken (PEC) yüzeyin değerleriyle karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, metayüzeyin farklı frekanslarda kayda değer RCS azalımı sağladığını göstermektedir. Ölçülen 10–20 dBsm arasındaki RCS düşüşleri, yapının gelen elektromanyetik enerjiyi etkin şekilde soğurduğunu ve radar yansımalarını önemli ölçüde azalttığını göstermektedir. Ayrıca, Şekil 41(c)'de, tasarımın soğurma piklerinin bulunduğu frekanslarda RCS azalımının 7 dBsm'den fazla olduğu gözlemlenmiş ve bu metayüzeyin elektromanyetik gizlilik uygulamalarındaki etkinliğini desteklemiştir.

Karşılaştırma

Tablo 11. Önerilen Deka-bant Soğurucunun Benzer Çalışmalarla Karşılaştırılması

Ref.	Rez F. (GHz)	B.S	Çalışma F.	Kalınlık	Malz.	Q Fak.	Soğurma Perf. (%)	Eğik Aç
(Islam <i>et al.</i> 2021)	3,80;5,65; 8,45;10.82 ve 15.92	5	S,C,X ve Ku	1,5 mm $\lambda=0,019\lambda_0$	FR-4	Q=30,41 3,8	>%90	90
(Zhu <i>et al.</i> 2022)	12,56	1	Ku	0,127 mm $\lambda=0,0053\lambda_0$	Rogers RT5880	Q = 69,8 12,56 GHz	>%99	70
(Hakim <i>et al.</i> 2022)	12,62;14,12; 17,53 ve 19,91	4	Ku ve K	1,6 mm $\lambda=0,067\lambda_0$	FR-4	Q= 39,43 12,62 GHz	>%95	45
(Saxena <i>et al.</i> 2022)	5,76;10,39; 16,78;18,49; 21,91; 29,81 ve 35,06	7	C,X,Ku, K ve Ka	1,5 mm $\lambda=0,029\lambda_0$	FR4	Q=73,968 18,492 GHz	>%88	–
(Yang <i>et al.</i> 2023)	3,55;5,15; 10,12;12,52; 15,9 ve 21,97	6	S,C,X, Ku ve K	1mm $\lambda=0,012\lambda_0$	FR-4	–	>%90	–
(Alsaif <i>et al.</i> 2024)	3,85 ve 6,85	2	S ve C	1,575 mm $\lambda=0,020\lambda_0$	(Rogers RT5880	Q=345 6,85 GHz	>%99	–
(Mahfooz <i>et al.</i> 2024)	7,16 ; 10,175 ; 12,92 ve 16,82	4	C, X, Ku	0,8 mm $\lambda=0,019\lambda_0$	FR4	Q= 19,88 7,16 GHz	>%90	60
(Shakibul Hasan <i>et al.</i> 2024)	2,57;5,64; 8,32 ve 13,45	4	S,C,X ve Ku	1,6 mm $\lambda=0,014\lambda_0$	FR4	Q=36.8 2,57 GHz	>%75	90
(Rabbani, Islam, Moniruzzaman, <i>et al.</i> 2024)	3,26;11,6 ve 17,13 GHz	3	S,Xve Ku	1,6 mm $\lambda=0,017\lambda_0$	FR4	Q=51,9 17,13 GHz	>%90	60

Tablo 11. (devamı)

(Rabbani, Hoque, Islam, <i>et al.</i> 2024)	3,12 ve 4,58	2	S ve C	1,57 mm $\lambda=0,016\lambda_0$	Rogers RT5880	Q=65 4,58 GHz	>%99	–
(Khalil <i>et al.</i> 2024)	3,47 ve 7,219	2	C	1,57 mm $\lambda=0,018\lambda_0$	FR-4	Q=191 3,47 GHz	>%98	–
(Saxena <i>et al.</i> 2024)	5,76;8,6; 12,68;14,38; 17,05;17,94; 19,20;20,88; 22,62ve 23,62	9	C,X,Ku ve K	1mm $\lambda=0,019\lambda_0$	FR-4	Q = 72 5,76 GHz	>%90	–
(Anowarul Haque <i>et al.</i> 2025)	3,26;4,1 ve 7,202	3	S ve C	1,575 mm $\lambda=0,017\lambda_0$	FR-4	Q=150,32 3,26 GHz	>%95	80
(Uddin <i>et al.</i> 2024)	3,349 ;5,06 ; 6,829 ;9,178; 14,54 ;17,96; 18,89 ve 20,4	8	S,C,X, Ku ve K	1,6 mm $\lambda= 0,018\lambda_0$	FR-4	–	>%90	80
(Kurt <i>et al.</i> 2025)	2,8;6,32;9,17 ;12,21;14,4; 17,3ve 19,5	7	S,C,X, Ku ve K	1mm $\lambda=0,0093\lambda_0$	FR-4	–	>%90	45
Önerilen Çalışma	3,8;5,4;8; 9,7;14,7; 17,6;18,8; 20,6;21,2 ve 24,35	10	S,C,X, Ku ve K	1 mm $\lambda=0,012\lambda_0$	FR-4	Q=243,5 24,35 GHz	>%90	45

Tablo 11’de, bu tez çalışmasında önerilen on (deka) bantlı soğurucu tasarımı ile literatürdeki benzer çalışmalar karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma, rezonans frekansı sayısı, çalışılan frekans bandı, kalınlık, kullanılan malzeme, Q faktörü, soğurma performansı yüzdesi ve eğik açıya karşı dayanıklılık gibi kriterler üzerinden yapılmıştır. Önerilen tasarım, en fazla 9 bantla çalışan diğer (Islam *et al.* 2021; Zhu *et al.* 2022; Hakim *et al.* 2022; Saxena *et al.* 2022; Yang *et al.* 2023; Alsaif *et al.* 2024; Mahfooz *et al.* 2024; Shakibul Hasan *et al.* 2024; Rabbani, Islam, Moniruzzaman, *et al.* 2024; Rabbani, Hoque, *et al.* 2024; Khalil *et al.* 2024; Saxena *et al.* 2024; Anowarul Haque *et al.* 2025; Uddin *et al.* 2024; Kurt *et al.* 2025) çalışmalara kıyasla 10 farklı frekans noktasında etkin soğurma sağlayarak performans açısından öne çıkmıştır. Önerilen soğurucu tasarımı, S, C, X, Ku ve K olmak üzere toplam beş farklı frekans bandında etkili soğurma sağlayarak, en fazla dört frekans bandında çalışan literatürdeki diğer (Islam *et al.* 2021; Zhu *et al.* 2022; Hakim *et al.* 2022; Alsaif *et al.* 2024; Mahfooz *et al.* 2024; Shakibul Hasan *et al.* 2024; Rabbani, Islam, Moniruzzaman, *et al.* 2024; Rabbani, Hoque, *et al.* 2024; Khalil *et al.* 2024; Saxena *et al.* 2024; Anowarul Haque *et al.* 2025) çalışmalara kıyasla daha geniş frekans bandında performans sunmaktadır. Ayrıca, dalga boyu cinsinden kalınlık bakımından da diğer (Islam *et al.* 2021; Hakim *et al.* 2022; Saxena *et al.* 2022; Alsaif *et al.* 2024;

Mahfooz *et al.* 2024; Shakibul Hasan *et al.* 2024; Rabbani, Islam, Moniruzzaman, *et al.* 2024; Rabbani, Hoque, *et al.* 2024; Khalil *et al.* 2024; Saxena *et al.* 2024; Anowarul Haque *et al.* 2025; Uddin *et al.* 2024) tasarımlara göre daha ince bir yapıdadır, bu da cihazın genel kalınlığının azaltılmasına katkı sağlamaktadır. Üretim açısından değerlendirildiğinde, önerilen tasarımda FR4 malzemesi tercih edilmiştir. Bunun sebebi, FR4'ün yaygın kullanılan PCB teknolojileri ile uyumlu ve ekonomik olmasıdır. Oysa literatürde benzer Zhu *et al.* 2022; Alsaif *et al.* 2024; Rabbani, Hoque, *et al.* 2024) çalışmalarda çoğunlukla daha pahalı olan ROGERS malzemesi kullanılmıştır. Q faktörü bakımından da önerilen soğurucu, diğer (Islam *et al.* 2021; Zhu *et al.* 2022; Hakim *et al.* 2022; Saxena *et al.* 2022; Yang *et al.* 2023; Mahfooz *et al.* 2024; Shakibul Hasan *et al.* 2024; Rabbani, Islam, Moniruzzaman, *et al.* 2024; Rabbani, Hoque, *et al.* 2024; Khalil *et al.* 2024; Saxena *et al.* 2024; Anowarul Haque *et al.* 2025; Uddin *et al.* 2024; Kurt *et al.* 2025) çalışmalardan daha üstün performans göstermiştir. Bu, tasarımın frekans bandındaki seçiciliğinin ve enerji soğurma etkinliğinin yüksek olduğunu göstermektedir. Son olarak, eğik açıdan gelen elektromanyetik dalgalara karşı soğurucu performansı da tatmin edici seviyededir; bu da gerçek uygulamalarda farklı açılardan gelen sinyallere karşı etkili bir koruma sağlayabileceği anlamına gelmektedir.

Özetle, önerilen on (deka) bantlı soğurucu tasarımı, bant sayısı, ince yapı, uygun üretim malzemesi ve yüksek Q faktörü gibi açılardan literatürdeki diğer benzer çalışmalara göre önemli avantajlar sunmaktadır.

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez kapsamında, GHz mikrodalga frekans bandında çalışan çok bantlı metayüzey tabanlı elektromanyetik soğurucu tasarımları gerçekleştirilmiştir. Literatürdeki mevcut çalışmalara kıyasla üstün performans sergileyen iki farklı yapı, düşük maliyetli FR-4 dielektrik tabakası kullanılarak tasarlanmış ve analiz edilmiştir.

İlk olarak geliştirilen yedi bantlı metayüzey soğurucu, CST Microwave Studio yazılımı aracılığıyla yapılan sayısal benzetimler sonucunda 2,8 GHz; 6,32 GHz; 9,17 GHz; 12,21 GHz; 14,4 GHz; 17,3 GHz ve 19,5 GHz frekanslarında rezonans göstermiştir. Bu frekanslarda sırasıyla %92,6; %91,7; %93; %96,3; %97,4; %98,3 ve %99,8 oranlarında yüksek soğurma değerleri elde edilmiştir. Tasarlanan yapı, S, C, X, Ku ve K bantlarını kapsamakta ve çok bantlı yüksek soğurma performansı göstermektedir. Ayrıca, bu yapının bant sayısı ve dalga boyuna oranla kalınlık değeri açısından literatürdeki benzer çalışmalarla karşılaştırması Tablo 5'te sunulmuş ve mevcut çalışmalara göre daha ince yapısıyla daha başarılı sonuçlar verdiği gösterilmiştir.

İkinci tasarımda ise 3,8 GHz; 5,4 GHz; 8 GHz; 9,7 GHz; 14,7 GHz; 17,6 GHz; 18,8 GHz; 20,6 GHz; 21,2 GHz ve 24,35 GHz frekanslarında sırasıyla %96,5; %90,2; %98,6; %91,9; %96,9; %96,5; %93,4; %99,1; %95,9 ve %99,9 oranlarında yüksek soğurma verimliliği sağlanmıştır. Böylece, toplamda on farklı frekans noktasında etkin soğurma gerçekleştiren çok bantlı bir metayüzey soğurucu tasarımı elde edilmiştir. Bu yapı, özellikle radar kesit alanı (RCS) azaltımına yönelik uygulamalar için potansiyel taşımaktadır. İkinci tasarım için kalite faktörü (Q-faktörü) hesaplanmış ve ilgili rezonans frekanslarında yüksek Q değerleri elde edilmiştir. Bu durum, yapının çok bantlı ve seçici soğurma karakteristiğini desteklemektedir. Söz konusu sonuçlar, literatürde yer alan benzer çalışmalarla Tablo 11'de karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

Önerilen iki metayüzey tabanlı elektromanyetik soğurucu tasarımı için yapılan benzetim analizleri, yüzey akımı ile elektrik ve manyetik alan dağılımlarının Maxwell denklemleriyle uyumlu olduğunu göstermiştir.

Gerçek uygulamalara geçişi desteklemek amacıyla iki yöntem izlenmiştir. İlk olarak, her iki çok bantlı metayüzey tasarımı için eşdeğer devre modelleri ADS benzetim programı kullanılarak oluşturulmuş ve elde edilen yansıma katsayıları, CST Microwave Studio benzetim sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Sonuçların birbiriyle uyumlu olması, tasarımların doğruluğunu

ortaya koymuştur. İkinci aşamada, prototip üretimi gerçekleştirilmiş ve yankısız oda ortamında yapılan ölçümlerle yansıma katsayısı elde edilmiştir. Ölçüm sonuçları ile benzetim verilerinden elde edilen yansıma katsayılarının birbiriyle uyumlu olması, tasarımların güvenilirliğini ortaya koymuş ve gerçek zamanlı uygulamalara yönelik potansiyelini desteklemiştir.

Sonuç olarak, bu tez kapsamında geliştirilen çok bantlı metayüzey soğurucular; yüksek soğurma verimi, geniş bant aralığı ve oldukça ince yapıları ile öne çıkmaktadır. Özellikle ikinci tasarım, yüksek Q-faktörü sayesinde dikkat çekmiş; her iki tasarım da hem teorik hem deneysel olarak başarılı sonuçlar sunarak savunma, haberleşme ve diğer elektromanyetik uygulamalarda güçlü birer aday olduğunu göstermiştir.



KAYNAKLAR

- Afsar, M. S. U., Faruque, M. R. I., Abdullah, S., & Hossain, M. J. (2024). Rotational symmetric solar system shaped triple band perfect metamaterial absorber for S-, C-, and X-band application. *Sensors and Actuators A: Physical*, 365. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2023.114839>
- Alsaif, H., Islam, M. R., Hoque, A., Soliman, M. S., Islam, M. S., & Islam, M. T. (2024). Dual circular complementary split ring resonator based metamaterial sensor with high sensitivity and quality factor for textile material detection. *APL Materials*, 12. <https://doi.org/10.1063/5.0196472>
- Amer, A. A. G., Sapuan, S. Z., Alzahrani, A., Nasimuddin, N., Salem, A. A., & Ghoneim, S. S. M. (2022). Design and Analysis of Polarization-Independent, Wide-Angle, Broadband Metasurface Absorber Using Resistor-Loaded Split-Ring Resonators. *Electronics (Switzerland)*, 11. <https://doi.org/10.3390/electronics11131986>
- Anowarul Haque, S. M., Ahmed, M., Alqahtani, A., Islam, M. T., Hossain, I., & Samsuzzaman, M. (2025). Split ring resonator based multiband metamaterial absorber for liquid oil detection sensing applications. *Optics and Laser Technology*, 181. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2024.111984>
- Badloe, T., Mun, J., & Rho, J. (2017). Metasurfaces-Based Absorption and Reflection Control: Perfect Absorbers and Reflectors. *Journal of Nanomaterials*, 2017(1), 2361042. <https://doi.org/10.1155/2017/2361042>
- Balanis, C. A. (2012). Advanced engineering electromagnetics. In *Wiley*.
- Belevitch, V. (1962). Summary of the History of Circuit Theory. *Proceedings of the IRE*, 50, 848–855. <https://doi.org/10.1109/JRPROC.1962.288301>
- Caloz, C., & Itoh, T. (2005). Metamaterials for high-frequency electronics. *Proceedings of the IEEE*, 93, 1744–1751. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2005.853540>
- Chen, Y., Liang, J., Chen, S., Yi, Z., Fu, L., & Yang, W. (2024). Bi-directional high-performance metamaterial perfect absorber for solar harvesting and refractive index sensing. *Materials Today Nano*, 26. <https://doi.org/10.1016/j.mtnano.2024.100487>
- Cui, T. J., Qi, M. Q., Wan, X., Zhao, J., & Cheng, Q. (2014). Coding metamaterials, digital metamaterials and programmable metamaterials. *Light: Science & Applications*, 3, e218–e218. <https://doi.org/10.1038/lsa.2014.99>
- Dewangan, L., Patinavalasa, M. S., Acharjee, J., Solunke, Y., Ghosh, S., & Mishra, N. K. (2023). Broadband metamaterial absorber for stealth applications at K-band. *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, 170. <https://doi.org/10.1016/j.aeue.2023.154828>
- Dhama, R., Yan, B., Palego, C., & Wang, Z. (2021). Super-resolution imaging by dielectric superlenses: Tio2 metamaterial superlens versus batio3 superlens. *Photonics*, 8. <https://doi.org/10.3390/photonics8060222>
- Dolling, G., Wegener, M., Linden, S., & Hormann, C. (2006). Photorealistic images of objects in effective negative-index materials. *Optics Express*, 14, 1842. <https://doi.org/10.1364/oe.14.001842>

- Edries, M., Mohamed, H. A., Hekal, S. S., El-Morsy, M. A., & Mansour, H. A. (2020). A New Compact Quad-Band Metamaterial Absorber Using Interlaced I/Square Resonators: Design, Fabrication, and Characterization. *IEEE Access*, 8, 143723–143733. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3009904>
- Elakkiya, A., Radha, S., Sreeja, B. S., & Manikandan, E. (2021). An Ultrathin Microwave Metamaterial Absorber for C, X, and Ku Band Applications. *Journal of Electronic Materials*, 50, 7275–7282. <https://doi.org/10.1007/s11664-021-09251-6>
- Elalaouy, O., El Ghzaoui, M., & Foshi, J. (2024). Enhancing antenna performance: A comprehensive review of metamaterial utilization. In *Materials Science and Engineering: B* (Vol. 304). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2024.117382>
- Errajaji, K., Jebbor, N., Das, S., Islam, T., Madhav, B. T. P., & El-Arrouch, T. (2024). Design and analysis of a multi-band miniaturized metamaterial absorber for wireless communication applications. *Optical and Quantum Electronics*, 56. <https://doi.org/10.1007/s11082-023-05813-6>
- Genikala, S., Ghosh, A., & Roy, B. (2023). Triple band single layer microwave absorber based on closed loop resonator structures with high stability under oblique incidence. *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, 164. <https://doi.org/10.1016/j.aeue.2023.154629>
- Guan, R., Xu, H., Lou, Z., Zhao, Z., & Wang, L. (2024). Metamaterials for high-performance smart sensors. In *Applied Physics Reviews* (Vol. 11). American Institute of Physics. <https://doi.org/10.1063/5.0232606>
- Hakim, M. L., Alam, T., Islam, M. T., Baharuddin, M. H., Alzamil, A., & Islam, M. S. (2022). Quad-Band Polarization-Insensitive Square Split-Ring Resonator (SSRR) with an Inner Jerusalem Cross Metamaterial Absorber for Ku-and K-Band Sensing Applications. *Sensors*, 22. <https://doi.org/10.3390/s22124489>
- Hannan, S., Islam, M. T., Sahar, N. M., Mat, K., Chowdhury, M. E. H., & Rmili, H. (2020). Modified-Segmented Split-Ring Based Polarization and Angle-Insensitive Multi-Band Metamaterial Absorber for X, Ku and K Band Applications. *IEEE Access*, 8, 144051–144063. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3013011>
- Hasankhani, M., Vahed, H., & Bemani, M. (2024). Switchable and tunable terahertz metamaterial absorber based on graphene and VO2 resonator with ultra-broadband and multi-band absorption. *Optics Communications*, 562, 130567. <https://doi.org/10.1016/J.OPTCOM.2024.130567>
- Ishrat Jahan, M., Rashed Iqbal Faruque, M., & Bellal Hossain, M. (2023). An X-shaped triple split ring resonator-based metamaterial perfect absorber with quad-band incident and polarization angle insensitivity for C, X, and Ku band applications. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 580. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2023.170940>
- Islam, M. R., Islam, M. T., Moniruzzaman, M., Samsuzzaman, M., & Arshad, H. (2021). Penta band single negative meta-atom absorber designed on square enclosed star-shaped modified split ring resonator for S-, C-, X- and Ku- bands microwave applications. *Scientific Reports*, 11. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-87958-6>
- Jia, Z., Lan, D., Lin, K., Qin, M., Kou, K., Wu, G., & Wu, H. (2018). Progress in low-frequency microwave absorbing materials. In *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* (Vol. 29, pp. 17122–17136). Springer New York LLC. <https://doi.org/10.1007/s10854-018-9909-z>
- Jiang, W., Yan, L., Ma, H., Fan, Y., Wang, J., Feng, M., & Qu, S. (2018). Electromagnetic wave absorption and compressive behavior of a three-dimensional metamaterial absorber

- based on 3D printed honeycomb. *Scientific Reports* 2018 8:1, 8(1), 1–7. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-23286-6>
- Jin, S., Zu, H., Qian, W., Luo, K., Xiao, Y., Song, R., & Xiong, B. (2023). A Quad-Band and Polarization-Insensitive Metamaterial Absorber with a Low Profile Based on Graphene-Assembled Film. *Materials*, 16. <https://doi.org/10.3390/ma16114178>
- Jorwal, S., Dubey, A., Gupta, R., & Agarwal, S. (2023). A review: Advancement in metamaterial based RF and microwave absorbers. In *Sensors and Actuators A: Physical* (Vol. 354). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2023.114283>
- Karaaslan, M., Bağmancı, M., Ünal, E., Akgol, O., & Sabah, C. (2017). Microwave energy harvesting based on metamaterial absorbers with multi-layered square split rings for wireless communications. *Optics Communications*, 392, 31–38. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2017.01.043>
- Khalil, M. A., Yong, W. H., Islam, M. S., Chiong, L. Y., Hoque, A., Ullah, N., Goh, H. H., Kurniawan, T. A., Soliman, M. S., & Islam, M. T. (2024). Design of dual peak star shaped metamaterial absorber for S and C band sensing applications. *Scientific Reports*, 14, 26609. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-77215-x>
- Khan, M. S., Shakoor, R. A., Fayyaz, O., & Ahmed, E. M. (2024). A focused review on techniques for achieving cloaking effects with metamaterials. *Optik*, 297. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2023.171575>
- Korkmaz, H., Hasar, U. C., & Ramahi, O. M. (2023). Thin-film MXene-based metamaterial absorber design for solar cell applications. *Optical and Quantum Electronics*, 55. <https://doi.org/10.1007/s11082-023-04810-z>
- Kurt, M., Ozturk, G., & Ertugrul, M. (2025). Hepta-Band Ultra-Thin Metasurface Absorber for S-, C-, X-, Ku-, and K-Band Applications. *Arabian Journal for Science and Engineering*. <https://doi.org/10.1007/s13369-025-10140-x>
- Landy, N. I., Sajuyigbe, S., Mock, J. J., Smith, D. R., & Padilla, W. J. (2008). Perfect metamaterial absorber. *Physical Review Letters*, 100. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.100.207402>
- Liu, G., Shu, G., Butt, M. A., Zhang, D., Zhang, L., Nobre, F. D. M., De Sousa, T. M. L., Campos, A. L. P. S., & Da Silva, M. W. B. (2024). Multifunctional Metasurface with PIN Diode Application Featuring Absorption, Polarization Conversion, and Transmission Functions. *Micromachines* 2024, Vol. 15, Page 1344, 15(11), 1344. <https://doi.org/10.3390/M15111344>
- Liu, X., Starr, T., Starr, A. F., & Padilla, W. J. (2010). Infrared spatial and frequency selective metamaterial with near-unity absorbance. *Physical Review Letters*, 104. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.104.207403>
- Liu, Y., Zhao, D., Yan, Z., Sun, W., Guo, P., & Tan, T. (2023). Reprogrammable acoustic metamaterials for multiband energy harvesting. *Engineering Structures*, 288. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116207>
- Lorentz, H. A. (1902). Some considerations on the principles of dynamics in connexion with Hertz's Prinzipien der Mechanik. *Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen Proceedings Series B Physical Sciences*, 4.
- Mahfooz, S., Wakeel, A., Sibghat Ullah, M., Alam, M., Masood Siddiqui, A., & Iftikhar, A. (2024). A novel, mutual coupling independent, ultra-thin, and polarization-insensitive tetra band metamaterial absorber for microwave applications. *Waves in Random and Complex Media*, 1–17. <https://doi.org/10.1080/17455030.2024.2370021>

- Maxwell, J. C. (1865). VIII. A dynamical theory of the electromagnetic field. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 155, 459–512. <https://doi.org/10.1098/rstl.1865.0008>
- Moniruzzaman, M., Islam, M. T., Muhammad, G., Singh, M. S. J., & Samsuzzaman, M. (2020). Quad band metamaterial absorber based on asymmetric circular split ring resonator for multiband microwave applications. *Results in Physics*, 19. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2020.103467>
- Moniruzzaman, M., Islam, M. T., Tarikul Islam, M., Chowdhury, M. E. H., Rmili, H., & Samsuzzaman, M. (2020). Cross coupled interlinked split ring resonator based epsilon negative metamaterial with high effective medium ratio for multiband satellite and radar communications. *Results in Physics*, 18. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2020.103296>
- Murugesan, A., Selvan, K. T., Iyer, A. K., Srivatsav, K. V., & Alphones, A. (2021). A Review of Metasurface-Assisted RCS Reduction Techniques. *Progress In Electromagnetics Research B*, 94, 75–103. <https://doi.org/10.2528/PIERB21081401>
- Ozturk, G. (2022). Ultra-thin, wide-angle and bandwidth-enhanced linear and circular metasurface-based reflection-type polarization converter at X-band microwave frequency. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 36, 1423–1435. <https://doi.org/10.1080/09205071.2022.2029722>
- Pati, S. S., & Sahoo, S. (2024). Metamaterial-Based Angular Stable Polarization-Insensitive Hepta-Band Microwave Absorber With Salient Features for RCS Reduction and Antenna Radiation Improvement. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 66, 761–775. <https://doi.org/10.1109/TEM.2024.3369735>
- Pendry, J. B. (2000). Negative refraction makes a perfect lens. *Physical Review Letters*, 85, 3966–3969. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.85.3966>
- Pendry, J. B., Holden, A. J., Robbins, D. J., & Stewart, W. J. (1998). Low frequency plasmons in thin-wire structures. *Journal of Physics Condensed Matter*, 10, 4785–4809. <https://doi.org/10.1088/0953-8984/10/22/007>
- Pendry, J. B., Holden, A. J., Robbins, D. J., & Stewart, W. J. (1999). Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 47, 2075–2084. <https://doi.org/10.1109/22.798002>
- Pendry, J. B., Holden, A. J., Stewart, W. J., & Youngs, I. (1996). Extremely low frequency plasmons in metallic mesostructures. *Physical Review Letters*, 76, 4773–4776. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.76.4773>
- Pozar, D. M. (2012). Microwave Engineering. In *University of Massachusetts at Amherst* (Vol. 26). <https://doi.org/10.23919/URSIRSB.2012.7910095>
- Rabbani, M. G., Hoque, A., Islam, M. T., Alzamil, A., & Soliman, M. S. (2024). A mirror symmetric dodecagon resonator based double band ENG-metamaterial with multilayer tunability and sensing application. *Journal of Sandwich Structures and Materials*. <https://doi.org/10.1177/10996362241297042>
- Rabbani, M. G., Islam, M. T., Hoque, A., Bais, B., Albadran, S., Islam, M. S., & Soliman, M. S. (2024). Orthogonal centre ring field optimization triple-band metamaterial absorber with sensing application. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 49. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2023.101588>
- Rabbani, M. G., Islam, M. T., Moniruzzaman, M., Alamri, S., Rahman, A. A. M., Moubark, A. M., Islam, M. S., & Soliman, M. S. (2024). Dumbbell shaped structure loaded modified circular ring resonator based perfect metamaterial absorber for S, X and Ku band

- microwave sensing applications. *Scientific Reports*, 14. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-56251-7>
- Ranjan, S. K., & Sahoo, S. (2024). Hexagon enclosed modified G- shaped polarization and incident angle independent metamaterial absorber for S, C, X and Ku band frequency. *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, 183. <https://doi.org/10.1016/j.aeue.2024.155348>
- Sakib, S., Hoque, A., Islam, M. T., Islam, M. S., Soliman, M. S., & Alsaif, H. (2025). Polarization-insensitive, negative indexed inverted U-shaped flexible metamaterial absorber based on microstructure resonator for multi-band energy harvesting. *Journal of Sandwich Structures and Materials*. <https://doi.org/10.1177/10996362241305576>
- Saxena, G., Devbanshi, N. K., Srivastava, M., & Yadav, N. K. (2022). High Q and High EMR Hepta Band Single Layer Metasurface Absorber for EMI and Sensing Applications in C, X, Ku, K and Ka Band. 2022 *IEEE Wireless Antenna and Microwave Symposium, WAMS 2022*. <https://doi.org/10.1109/WAMS54719.2022.9847668>
- Saxena, G., Verma, A., Kumari, R., Agarwal, R., Alam, M., Sherif, E. S. M., Awasthi, Y. K., & Singh, H. (2024). High Q ultra-thin nona-band polarization insensitive homogeneous single layer metasurface for electronics and space industry with electromagnetic interference and antenna radar cross section reduction. *Materials Today Communications*, 40. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2024.109674>
- Shakibul Hasan, M., Islam, M. T., Samsuzzaman, M., Alamri, S., Albadran, S., Moniruzzaman, M., & Soliman, M. S. (2024). Double elliptical resonator based quad-band incident angle and polarization angle insensitive metamaterial absorber for wireless applications. *Optics & Laser Technology*, 171, 110334. <https://doi.org/10.1016/J.OPTLASTEC.2023.110334>
- Shelby, R. A., Smith, D. R., Nemat-Nasser, S. C., & Schultz, S. (2001). Microwave transmission through a two-dimensional, isotropic, left-handed metamaterial. *Applied Physics Letters*, 78, 489–491. <https://doi.org/10.1063/1.1343489>
- Smith, D. R., Padilla, W. J., Vier, D. C., Nemat-Nasser, S. C., & Schultz, S. (2000). Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity. *Physical Review Letters*, 84, 4184–4187. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.84.4184>
- Smith, D. R., Pendry, J. B., & Wiltshire, M. C. K. (2004). Metamaterials and negative refractive index. In *Science* (Vol. 305, pp. 788–792). <https://doi.org/10.1126/science.1096796>
- Smith, D. R., Vier, D. C., Kroll, N., & Schultz, S. (2000). Direct calculation of permeability and permittivity for a left-handed metamaterial. *Applied Physics Letters*, 77, 2246–2248. <https://doi.org/10.1063/1.1314884>
- Soukoulis, C. M., & Wegener, M. (2011). Past achievements and future challenges in the development of three-dimensional photonic metamaterials. In *Nature Photonics* (Vol. 5, pp. 523–530). <https://doi.org/10.1038/nphoton.2011.154>
- Teber, A. (2024). Dual-Band Terahertz Metamaterial Absorber Based on LC Resonance and Dipolar Response and Its Applications. *Advanced Theory and Simulations*, 7. <https://doi.org/10.1002/adts.202300918>
- Tian, S. C., Xue, H., & Li, L. (2018). An broadband transparent metamaterial absorber using an ITO resistive-film. 2018 *IEEE International Workshop on Antenna Technology, IWAT2018 - Proceedings*, 1–3. <https://doi.org/10.1109/IWAT.2018.8379144>
- Uddin, M. K., Hakim, M. L., Alam, T., Islam, M. T., Alsaif, H., & Islam, M. S. (2024). Polarization insensitive eye-shape enclosed split ring resonator-based multi-band metamaterial absorber/sensor for S, C, X, Ku, and K-band microwave applications.

- Van Valkenburg, M. E. (Mac E. (1974). Circuit theory: foundations and classical contributions. In <https://cir.nii.ac.jp/crid/1130282270751560192>.
- Verma, A., & Meena, O. P. (2023). Design and analysis of a compact ultrathin penta-band metamaterial absorber. *Sadhana - Academy Proceedings in Engineering Sciences*, 48. <https://doi.org/10.1007/s12046-023-02352-4>
- Veselago, V. G. (1968). *The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ* . Soviet Physics Uspekhi.
- Wang, Y., Chen, F., Yang, W., Ke, S., & Shi, T. (2024). Double-band perfect absorber based on MoS2 monolayer for sensing applications. *Optical and Quantum Electronics*, 56(8), 1–16. <https://doi.org/10.1007/S11082-024-07303-9/TABLES/1>
- Watts, C. M., Liu, X., & Padilla, W. J. (2012). Metamaterial electromagnetic wave absorbers. *Advanced Materials*, 24. <https://doi.org/10.1002/adma.201200674>
- Wu, G., Jiao, X., Wang, Y., Zhao, Z., Wang, Y., & Liu, J. (2021). Ultra-wideband tunable metamaterial perfect absorber based on vanadium dioxide. *Optics Express*, 29, 2703. <https://doi.org/10.1364/oe.416227>
- Xu, K. Da, Wang, D., & Chen, Q. (2024). A Graphene-based Broadband Absorber at Terahertz Regime. *2024 Photonics and Electromagnetics Research Symposium, PIERS 2024 - Proceedings*. <https://doi.org/10.1109/PIERS62282.2024.10618038>
- Xu, Y., Fu, Y., Xu, L., & Chen, H. (2015). *Conjugate metamaterials and the perfect lens*.
- Yang, X., Zhang, X., Ding, Z., & Zhang, Z. (2023). Compact and ultra-thin absorber based on metasurface for multi-band energy absorption. *Optik*, 273. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2022.170478>
- Yao, X., Huang, Y., Li, G., He, Q., Chen, H., Weng, X., Liang, D., Xie, J., & Deng, L. (2022). Design of an ultra-broadband microwave metamaterial absorber based on multilayer structures. In *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering* (Vol. 32). John Wiley and Sons Inc. <https://doi.org/10.1002/mmce.23222>
- Yousaf, A., Murtaza, M., Wakeel, A., & Anjum, S. (2022). A highly efficient low-profile tetra-band metasurface absorber for X, Ku, and K band applications. *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, 154. <https://doi.org/10.1016/j.aeue.2022.154329>
- Yu, N., & Capasso, F. (2014). Flat optics with designer metasurfaces. In *Nature Materials* (Vol. 13, pp. 139–150). Nature Publishing Group. <https://doi.org/10.1038/nmat3839>
- Zhong, M. (2020). Design and measurement of a narrow band metamaterial absorber in terahertz range. *Optical Materials*, 100. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2020.109712>
- Zhu, H., Zhang, Y., Ye, L., Li, Y., Dang, Z., Xu, R., & Yan, B. (2022). A High Q-factor Metamaterial Absorber and Its Refractive Index Sensing Characteristics. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 70, 5383–5391. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2022.3218041>

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı:	Merve Kurt
Eğitim	
Lise:	Özel Final Lisesi
Lisans:	Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi
Yüksek lisans:	Erzurum Teknik Üniversitesi
Doktora:	Atatürk Üniversitesi
Yabancı Dil Bilgisi	
İngilizce:	İyi
Üye Olunan Mesleki Kuruluşlar	
Tezden Üretilmiş Yayınlar	
1. Kurt, M., Ozturk, G., & Ertugrul, M. (2025). Hepta-Band Ultra-Thin Metasurface Absorber for S-, C-, X-, Ku-, and K-Band Applications. <i>Arabian Journal for Science and Engineering</i> , 1-14.	