



T.C.  
NECMETTİN ERBAKAN  
ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**KU ve KA-BANT UYGULAMALARI İÇİN  
GENİŞ BANTLI ULTRA İNCE VE  
POLARİZASYONA DUYARLI OLMAYAN  
METAMALZEME SOĞURUCU**

**Mahad Ali İBRAHİM**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Haziran-2025  
KONYA  
Her Hakkı Saklıdır**

## TEZ KABUL VE ONAYI

MAHAD ALI IBRAHİM tarafından hazırlanan “Ku ve Ka-Bant Uygulamaları için Geniş Bantlı Ultra İnce ve Polarizasyona Duyarlı Olmayan Metamalzeme Soğurucu” adlı tez çalışması 30/06/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından **oy birliği** ile Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS olarak kabul edilmiştir.

### Jüri Üyeleri

### İmza

#### Başkan

Prof. Dr. Ercan YALDIZ

.....

#### Danışman

Prof. Dr. Emin ÜNAL

.....

#### Üye

Doç. Dr. Muhammed Fahri ÜNLERŞEN

.....

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun ....../.../2025 gün ve ..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Havvanur UÇBEYİAY  
FBE Müdürü

## **TEZ BİLDİRİMİ**

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

## **DECLARATION PAGE**

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

Mahad Ali IBRAHİM

Tarih: 30.06.2025

# ÖZET

## YÜKSEK LİSANS TEZİ

### KU ve KA-BANT UYGULAMALARI İÇİN GENİŞ BANTLI ULTRA İNCE VE POLARİZASYONA DUYARLI OLMAYAN META MALZEME SOĞURUCU

**Mahad Ali İBRAHİM**

**Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü  
Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Danışman: Prof. Dr. Emin ÜNAL**

**2025, 58**

**Jüri**

**Danışmanın Unvanı: Prof. Dr. Emin ÜNAL**

**Prof. Dr. Ercan YALDIZ**

**Doç.Dr. Muhammed Fahri ÜNLERŞEN**

Bu tezde, mikrodalga frekansında çalışan metamalzeme soğurucu tabanlı yapılar tasarlanmıştır. Bu çalışma, Ku/Ka-bant uygulamaları için özel olarak tasarlanmış geniş bantlı, ultra ince ve polarizasyona duyarsız bir metamalzeme soğurucuya dayanmaktadır. Uydur iletişiminde ve yeni 5G teknolojilerinde yaygın olarak kullanılan Ku/Ka bandı, kompakt ve hafif bir profili korurken geniş bir frekans aralığında verimli bir şekilde çalışabilen soğuruculara ihtiyaç duymaktadır. Mikrodalga ve optik frekanslarda çalışan sinyal soğurucu yapıların sayısal çalışmaları, sonlu entegrasyon tekniği (FIT) tabanlı bir simülasyon programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Önerilen soğurucular, TE ve TM polarizasyon için normal gelişte tüm Ku/Ka bandını kapsayan %90'ın üzerinde neredeyse mükemmel bir soğuruculuğa sahiptir.

Ayrıca, mikrodalga frekans bandında çalışan sinyal soğurucu yapıları LPKF ProtoMat E33 kullanılarak üretilmiş ve deneysel ölçümler, horn anten ve PNA-L N5234A Mikrodalga Ağ Analizörü ile yapılmıştır. Sayısal ve deneysel sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Bu çalışma, ileri elektromanyetik kalkanlama, gizleme teknolojileri ve anten sistem entegrasyonunun geliştirilmesi açısından önem taşımaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Metamalzeme, Soğurucu, 5G uygulamaları, Mikrodalga, TE polarizasyonu, TM polarizasyonu.

## **ABSTRACT**

### **MS THESIS**

# **BROADBAND ULTRA-THIN AND POLARIZATION-INSENSITIVE METAMATERIAL ABSORBER FOR KU AND KA-BAND APPLICATIONS**

**Mahad Ali IBRAHIM**

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF  
NECMETTİN ERBAKAN UNIVERSITY  
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE  
IN ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERING**

**Advisor: Prof. Dr. Emin ÜNAL**

**2025, 58**

**Jury**

**Advisor: Prof. Dr. Emin ÜNAL**

**Prof. Dr. Ercan YALDIZ**

**Assoc. Prof. Dr. Muhammed Fahri ÜNLERŞEN**

This thesis focusses on designing metamaterial absorber-based structures that operate at microwave frequencies. This work is based on a broadband, ultra-thin, and polarization-insensitive metamaterial absorber specifically designed for Ku/Ka-band applications. The Ku/Ka-band, widely used in satellite communication and emerging 5G technologies, demands absorbers that can operate efficiently across a wide frequency range while maintaining a compact and lightweight profile. Numerical studies of signal absorber structures operating in microwave and optical frequencies have been carried out using a finite integration technique (FIT) based simulation program. The reported absorbers have a nearly perfect absorptivity above 90% covering the entire Ku/Ka band at normal incidence for both transverse electric (TE) and transverse magnetic (TM) polarizations.

In addition, signal absorber structures operating in the microwave frequency band were fabricated by using the LPKF ProtoMat E33 and experimental measurements were made with PNA-L N5234A Microwave Network Analyzer with horn antennas. The numerical and experimental results were compared with each other. This study has significance for the development of advanced electromagnetic shielding, stealth technologies, and antenna system integration.

**Keywords:** Metamaterial, Absorber, 5G applications, Microwave, TE polarization, TM polarization.

## ÖNSÖZ

Rahman ve Rahim olan Allah'ın adıyla, tezimi tamamlamadaki güç ve nimet için Allah'a hamd ve şükürler olsun. Yüksek lisans eğitimim ve tez çalışmalarım boyunca yardımlarını esirgemeyerek, sürekli destek olan Necmettin Erbakan Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Öğretim Üyesi Danışmanım Prof. Dr. EMİN ÜNAL'a saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Bana her koşulda desteğini esirgemeyen aileme teşekkür ederim.

Mahad Ali IBRAHİM  
KONYA-2025

# İÇİNDEKİLER

<b>ÖZET .....</b>	<b>iv</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>v</b>
<b>ÖNSÖZ .....</b>	<b>vi</b>
<b>İÇİNDEKİLER.....</b>	<b>vii</b>
<b>ŞEKİLLER LİSTESİ .....</b>	<b>ix</b>
<b>SİMGELER VE KISALTMALAR.....</b>	<b>x</b>
<b>1. GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
1.1. Metamalzemeler.....	2
1.2. Mükemmel Metamalzeme Soğurucular.....	2
1.3. Çalışma Frekans Bantları.....	3
1.4. Bu Çalışmanın Amaçları.....	5
1.5. Tez Yapısı.....	5
<b>2. KAYNAK ARAŞTIRMASI.....</b>	<b>6</b>
2.1. Metamalzeme Soğurucular (MA).....	6
2.1.1. Geniş bant soğurucular için ma tasarımları.....	9
2.1.2. Ultra-ince ma tasarımları.....	11
2.1.3. Polarizasyona duyarlı ma soğurucu tasarımları.....	14
2.1.4. Ku/Ka-bantları için ma tasarımları.....	16
<b>3. MATERYAL VE YÖNTEM.....</b>	<b>20</b>
3.1. Elektromanyetik Teori.....	20
3.1.1. Maxwell denklemleri.....	21
3.1.2. Kırılma indisi.....	22
3.1.3. Negatif kırılma.....	24
3.2. Metamalzeme Teorisi.....	25
3.2.1. Metamalzemelerin sınıflandırılması.....	26
3.2.2. Soğurucu olarak metamalzemeler.....	27
3.2.3. Metamalzeme uygulamaları.....	29
3.3. Materyal ve Yöntem.....	31
3.3.1. Kullanılacak simülasyon yazılımının seçimi.....	31
3.3.2. Sonlu elemanlar yöntemi (FEM).....	32
3.3.3. Sonlu farklar zaman domaini (FDTD).....	32
3.3.4. Sonlu entegrasyon tekniği (FIT).....	33
3.3.5. Simülasyon.....	33
3.4. Ölçüm Yöntemleri.....	34

<b>4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....</b>	<b>36</b>
4.1. Simülasyon Çalışmaları .....	36
4.2. Tasarım Yöntemi .....	37
4.2.1. Geometrik parametrelerin seçimi.....	37
4.3. Araştırma Sonuçları .....	40
4.3.1. Açısal rotasyonun soğurmaya etkisi .....	44
4.3.2. Soğurma mekanizmasının incelenmesi.....	48
4.4. Ölçüm Düzenegi ve Elde Edilen Sonuçlar .....	50
<b>5. SONUÇLAR.....</b>	<b>52</b>
5.1 Gelecekteki Çalışmalar .....	53
<b>6. KAYNAKLAR .....</b>	<b>54</b>



## ŞEKİLLER LİSTESİ

ŞEKİL	SAYFA
Şekil 1.1. Elektromanyetik spektrum.....	3
Şekil 3.1. Farklı malzemelerin dielektrik sabiti ( $\epsilon$ ) ve manyetik geçirgenlik ( $\mu$ ) işaretlerine göre sınıflandırılması.....	23
Şekil 3.2. Pozitif indisli ortamdan ve negatif indisli ortamdan dalğanın yansması....	24
Şekil 3.3. Malzemelerin dielektrik sabiti ve manyetik geçirgenliklerine göre sınıflandırılması.....	25
Şekil 3.4. Mikrodalga metamalzeme yapılarının sınıflandırılması.....	27
Şekil 3.5. (a) Ağ Analiz Cihazı , (b) korna anteni ve (c) LPKF-E33 üretim cihazı.....	35
Şekil 4.1. Örnek SSR şekilleri.....	38
Şekil 4.2. Dielektrik plaka ve Toprak düzlemi.....	38
Şekil 4.3. Ku/Ka-bandı için çift bölünmüş halka rezonatörlerin (DSRR) optimize edilmiş geometrisi.....	39
Şekil 4.4. Ku bandı için S11 grafiği .....	40
Şekil 4.5. Ka-bandı için S11 grafiği.....	41
Şekil 4.6. Ku bandı için soğurma grafiği .....	42
Şekil 4.7. Ka-bandı için soğurma grafiği.....	42
Şekil 4.8. Ku bandında normal gelişte (incidence) farklı polarizasyon açıları ( $\phi$ ) için soğurma sonuçları.....	43
Şekil 4.9. Ka-bandında normal gelişte farklı polarizasyon açıları ( $\phi$ ) için soğurma sonuçları.....	44
Şekil 4.10. Ku-bandı için açısız rotasyon (a) $\theta = 0^0$ (b) $\theta = 30^0$ (c) $\theta = 45^0$ (d) $\theta = 60^0$ (e) $\theta = 90^0$ .....	45
Şekil 4.11. Ka-bandı için açısız rotasyon (f) $\theta = 0^0$ (g) $\theta = 30^0$ (h) $\theta = 45^0$ (i) $\theta = 60^0$ (j) $\theta = 90^0$ .....	47
Şekil 4.12. Ku-bantlı TE modu için 15 GHz'de simülasyon sonucu. (a) E-alan dağılımları. (b) H-alan dağılımları. (c) yüzey akımı dağılımları, Ka-bantlı TE modu için 32,47 GHz'de simülasyon sonucu. (d) E-alan dağılımları. (e) H-alan dağılımları. (f) yüzey akımı dağılımları.....	48
Şekil 4.13. (a) Üretilen 10x10 yapı ve b) ölçüm cihazı.....	51
Şekil 4.14. Gelen sinyalin yansımaya değerleri .....	51

## SİMGELER VE KISALTMALAR

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

### SİMGELER

- $\sigma$  : Elektrik İletkenliği  
 $\delta$  : Kayıp Tanjantı  
 $\varepsilon$  : Elektriksel Geçirgenlik  
 $\varepsilon_0$  : Boş Uzayın Elektriksel Geçirgenliği  
 $\varepsilon_r$  : Bağlı Elektriksel Geçirgenlik  
 $\varepsilon''$  : İkinci Dereceden Dielektrik Sabiti  
 $\mu$  : Manyetik Geçirgenlik  
 $\mu_0$  : Boş Uzayın Manyetik Geçirgenliği  
 $\mu_r$  : Bağlı Manyetik Geçirgenlik  
 $k$  : Dalga Yayılımı  
 $\omega$  : Açısal frekans  
 $E$  : Elektrik Alan Şiddeti  
 $H$  : Manyetik Alan Şiddeti  
 $D$  : Elektrik akı yoğunluğu  
 $B$  : Mağnetik akı yoğunluğu  
 $n$  : Kırılma İndisi  
 $Z$  : Empedans  
 $c_0$  : Işık hızı  
 $\rho$  : Yansımaya Katsayılarını  
 $J_e$  : Elektrik Akım Yoğunluk Vektörü  
 $J_m$  : Manyetik Akım Yoğunluk Vektörü  
 $\theta$  : Polarizasyon dönme açısı  
 $A(\omega)$  : Soğurma  
 $R(\omega)$  : Yansımaya değeri  
 $T(\omega)$  : İletim değeri  
 $S_{11}$  : Yansımaya değerleri  
 $S_{21}$  : İletim değerler

## **KISALTMALAR**

- DNG** : Çift negatif  
**DPS** : Çift pozitif  
**DSRR** : Çift bölünmüş halka rezonatör  
**EM** : Elektromanyetik  
**EMI** : Elektromanyetik Girişim  
**ENG** : Epsilon-Negatif  
**FIT** : Sonlu toplamlar metodu  
**FEM** : Sonlu elemanlar metodu  
**FDTD** : Sonlu farklar zaman domeni  
**MNG** : Mu negatif  
**MA** : Metamalzeme Soğurucu  
**PMA** : Mükemmel Metamalzeme Soğurucu  
**SNG** : Tek Negatif Medya  
**SRR** : Ayrık halka rezonatör  
**TE** : Dik elektrik alan  
**TEM** : Enine elektromanyetik alan  
**TM** : Dik manyetik alan

## 1. GİRİŞ

Kablosuz iletişim teknolojilerinin, özellikle Ku/Ka-bant frekans aralığında (12-18 GHz ve 26,5-40 GHz) hızla ilerlemesi, sinyal paraziti, radar kesit alanı azaltma ve enerji hasadı gibi zorluklarla başa çıkabilen verimli elektromanyetik soğuruculara olan ihtiyacı artırmıştır. Bu alanda, metalmalzemeler, elektromanyetik radyasyonu alt dalga boyu ölçeklerinde manipüle etme konusundaki benzersiz yetenekleri nedeniyle dönüştürücü bir çözüm olarak ortaya çıkmıştır (Pendry ve ark., 2006). Yapay olarak tasarlanan bu malzemeler, negatif kırılma indisi ve aşırı anizotropi gibi doğada bulunmayan özellikler sergileyerek ultra ince, hafif ve yüksek performanslı soğurucuların tasarlanmasını mümkün kılmıştır.

Metalmalzeme soğurucuları, belirtilen frekans bantları içinde neredeyse mükemmel soğurma kabiliyetleri nedeniyle önemli bir ilgi görmüştür ve bu da onları uydu iletişimi, 5G ağları ve gizli teknolojilerdeki uygulamalar için uygun hale getirmiştir (Singh ve ark., 2021). Ancak, potansiyellerine rağmen, mevcut metalmalzeme soğurucuları sıklıkla dar bant genişliği, hantal yapılar ve gelen dalgaların polarizasyonuna duyarlılık gibi gerçek dünya senaryolarında pratik kullanımını kısıtlayan sınırlamalarla karşı karşıya kalmaktadır.

Bu çalışma, özellikle Ku/Ka-bant uygulamaları için tasarlanmış geniş bantlı, ultra ince ve polarizasyona duyarlı bir metalmalzeme soğurucu önererek bu sınırlamaları ele almaya odaklanmaktadır. Uydu iletişiminde ve gelişmekte olan 5G teknolojilerinde yaygın olarak kullanılan Ku/Ka-bant, kompakt ve hafif bir profili korurken geniş bir frekans aralığında verimli bir şekilde çalışabilen soğurucuları gerektirir. Mevcut tasarımlar genellikle bu dengeyi sağlamakta zorlanır, çünkü artan bant genişliği genellikle birçok uygulama için pratik olmayan daha kalın yapılar veya karmaşık geometriler gerektirir.

Ayrıca, gerçek hayattaki elektromanyetik dalgalar değişken polarizasyon durumlarına sahip olabileceğinden, polarizasyon duyarlılığı kritik bir sorun olmaya devam etmektedir. Önerilen soğurucu, ultra ince bir form faktörü içinde yüksek soğurma verimliliği, geniş bant genişliği ve polarizasyon duyarlılığı elde etmek için yenilikçi tasarım stratejileri ve gelişmiş malzemelerden yararlanarak bu zorlukların üstesinden gelmeyi amaçlamaktadır.

## 1.1. Metamalzemeler

Metamalzemeler, mühendislik malzemelerinin etkili elektrik ve manyetik tepkisini uyarlayarak doğada bulunmayan olağanüstü optik özelliklere sahip malzemeler geliştirmeye odaklanan bir araştırma alanıdır. Bu malzemeler, genellikle birim hücre boyutu çalışma dalga boyundan çok daha küçük periyodik hücreler şeklinde düzenlenmiş, periyodik desenlerden oluşur. Metamalzemelerin özellikleri, gelen elektromanyetik dalgaları farklı şekillerde kontrol etmek, yönlendirmek, yeniden yönlendirmek, odaklamak, emmek ve yansıtmak için hassas bir şekilde ayarlanabilir. EM dalgalarının bu kadar hassas bir şekilde kontrol edilmesi, EM gizleme, mükemmel soğurucular, enerji hasadı ve kırınım sınırının ötesinde görüntüleme gibi alanlarda, metamalzemelerin kullanım alanı bulmasına yol açmaktadır.

Negatif kırılma indeksli metamalzemeler, sol elli metamalzemeler olarak da bilinir, yapay elektrik ve manyetik rezonanstan (sırasıyla dielektrik sabiti,  $\epsilon < 0$  ve manyetik geçirgenlik,  $\mu < 0$ ) yararlanarak negatif kırılma indeksi elde eden metamalzemelerin en bilinen örneklerinden biridir (Smith ve ark., 2004). Bu keşif, süper lens, kırınım ötesi görüntüleme, görünmezlik ve gizleme ve gibi yeni tür uygulama alanlarının doğmasına neden olmuştur. Başka bir metamalzeme türü, geometrik şekilleri ve boyutları, faz kayması ve frekans seçici tepkiler gibi istenen özellikleri sergilemek üzere hassas bir şekilde kontrol edilen metal ve dielektrik ince film katmanlarından oluşan yüksek empedanslı yüzeylerdir. Yüksek yüzey empedansına sahip bir yüzeyin efektif yüzey empedansı, serbest uzayın empedansıyla eşleştiğinde, belirli bir bant aralığında mükemmel soğurma elde edilebilir (Engheta, 2002). Bu yüzeyler yaygın olarak mükemmel metamalzeme soğurucular olarak adlandırılırlar ve mikrodalgalardan optik spektruma kadar geniş bir elektromanyetik bant içerisinde kullanım alanı bulabilmektedirler.

## 1.2. Mükemmel Metamalzeme Soğurucular

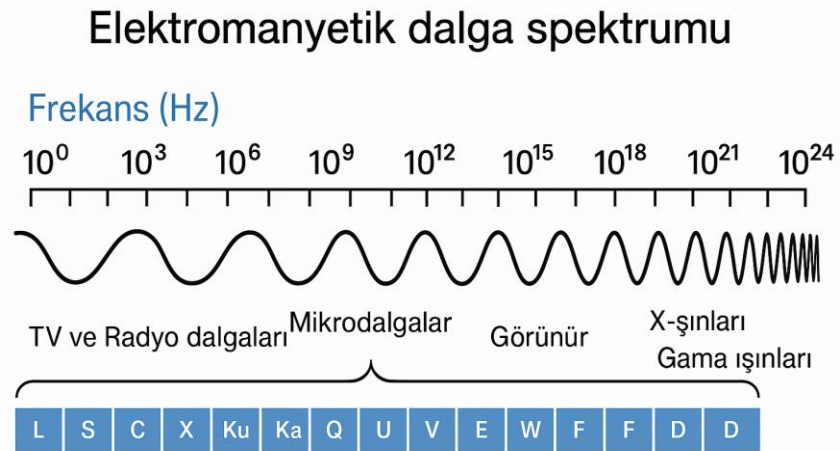
Mükemmel soğurucuların, kablosuz iletişim, termal yayıcılar, sensörler, fotodedektörler ve fotovoltaik yapılar gibi çeşitli uygulamalar için uzun süredir araştırıldığı bilinmektedir. Bir soğurucuda, yansıyan ve iletilen güç en aza indirilir ve çoğu durumda, gelen güç ısıya dönüşür ve bu da başka bir formda enerji hasatlamak için kullanılabilir. Genellikle kayıpların önlenmesi gereken diğer metamalzeme özellikli

cihazların aksine, metamalzeme soğurucular, esas olarak sistemdeki metalin sonlu öz direncine veya dielektrik kaybına bağlı olarak ortaya çıkan kayıplardan yararlanır (Watts ve ark., 2012).

Uygun bir şekilde tasarlanan metamalzeme soğurucular, radyo frekansları (RF), mikrodalgalar, THz bölgesi, kızılötesi ve görünür spektrum da dahil olmak üzere hemen hemen tüm elektromanyetik spektrumda uygulama alanı bulabilir. Birçok metamalzeme soğurucu neredeyse mükemmel soğurucu olarak karakterize edilse de, uygulamaya özgü metamalzeme soğurucuları tasarlarken bant genişliği, geliş açısı ve polarizasyon hassasiyeti gibi dikkate alınması gereken önemli parametreler bulunmaktadır.

### 1.3. Çalışma Frekans Bantları

Yukarıda belirtildiği gibi, RF'den görünür bölgeye kadar geniş elektromanyetik spektrumda yüksek soğurma elde etmek için çeşitli türlerde metamalzeme soğurucuları araştırılmaktadır. Ku/Ka-bandı, 12 ila 18 GHz ve 26,5 ila 40 GHz frekans aralığını kapsayan elektromanyetik spektrumun bir parçasıdır. Daha geniş mikrodalga frekans aralığına (3–30 GHz) girer ve K-bandının (18–27 GHz) ve milimetre-dalga (mm Dalga) spektrumunun bir parçasıdır (Choudhary ve ark., 2023). Ka-bandındaki "Ka", "K-üstü" anlamına gelir ve K-bandının üzerindeki daha yüksek frekans aralığı olduğunu gösterir. Bu bant, çeşitli gelişmiş iletişim ve radar uygulamaları için uygun yüksek frekansları ve kısa dalga boylarıyla bilinmektedir.



Şekil 1.1. Elektromanyetik spektrum

Ku/Ka-bandı, tipik olarak 16.7 mm ile 25 mm ve 7,5 mm ile 11,3 mm arasında değişen dalga boyuyla karakterize edilir. Bu özellikler, kompakt antenlerin ve yüksek çözünürlüklü sistemlerin tasarlanmasını kolaylaştırır. Ek olarak, Ka-bandı, yüksek veri iletim hızlarına izin veren geniş bir bant genişliği sunar ve bu da onu hızlı ve etkili iletişim gerektiren uygulamalar için ideal hale getirir.

Önemi, aşağıdaki uygulamalardaki kullanımı ile vurgulanmaktadır:

- ✓ Uydu İletişimleri: Ka-bandının daha yüksek frekansları daha fazla bant genişliği sağlayarak geniş bant internet, televizyon yayıncılığı ve özellikle uzak bölgelerde küresel bağlantı gibi yüksek veri hızı uygulamalarına olanak tanır.
- ✓ Radar Sistemleri: Daha kısa dalga boyuyla Ka-bandı, yüksek çözünürlüklü görüntüleme, hassas hedef takibi ve gelişmiş füze kılavuzluğu sağlayarak savunma ve havacılık uygulamaları için olmazsa olmazdır.
- ✓ 5G Ağları: Milimetre dalga spektrumunun önemli bir bileşeni olan Ka-bandı, yeni nesil mobil ağlar ve Nesnelerin İnterneti (IoT) için kritik öneme sahip olan ultra hızlı veri iletimi ve düşük gecikmeli iletişimi destekler.

Ku/Ka-bandı, geniş bant genişliğine atfedilebilen yüksek veri hızları gibi çeşitli avantajlar ve daha hızlı veri iletimi sağlar. Daha kısa dalga boyları, daha küçük ve daha verimli anten tasarımlarına olanak tanır ve onu kompakt sistemler için ideal hale getirir. Ayrıca, Ka-bandı, C-bandı veya Ku-bandı gibi daha düşük frekans bantlarına kıyasla daha az sıkışık olup, yeni uygulamalar için daha fazla kullanılabilir spektrum sağlar. Ka-bandının birçok yararlı konumu vardır, ancak aynı zamanda birkaç sorunu da vardır. Yağmur ve atmosfer koşulları nedeniyle sinyal zayıflamasına neden olan yağmur solmasına (rain fade) daha duyarlıdır. Bu, güvenilir iletişimi sürdürmek için sağlam hata düzeltme ve sinyal yükseltme teknikleri gerektirir. Ek olarak, alıcı-vericiler ve antenler gibi Ka-bandı sistemleri için ekipman, daha yüksek frekansları işlemek için gelişmiş teknolojiye ihtiyaç duyulması nedeniyle daha pahalıdır ( Choudhary ve ark., 2023).

#### 1.4. Bu Çalışmanın Amaçları

Bu çalışmanın temel amacı, modern elektromanyetik sistemlerin artan talepleri doğrultusunda, Ka-bant uygulamaları için özel olarak tasarlanmış bir metamalzeme soğurucu tasarlamak, simüle etmek ve analiz etmektir. Temel hedefler şunlardır:

- ✓ Optimum performans için geniş bir frekans aralığında yüksek soğurma verimliliğine (>%90) ulaşmak.
- ✓ Kompaktlık ve hafif entegrasyonu garantilemek için ultra ince, alt dalga boyunda bir yapı tasarlamak.
- ✓ Pratik senaryolarda çeşitli elektromanyetik dalga yönelimlerini idare etmek için polarizasyon duyarsızlığını garanti altına almak.

Bu bilimsel hedeflere ek olarak, çalışma önerilen soğurucunun pratik etkilerini de inceleyecektir. Ayrıca, 5G ağları ve uydu bağlantıları gibi iletişim sistemlerine ve savunma ve havacılık uygulamaları için radar sistemlerine potansiyel entegrasyonunun değerlendirilmesini de içermektedir. Bu çalışma, metamalzeme teknolojisinin genişlemesine yardımcı olmakta ve mevcut soğurucu tasarımlarının sınırlamalarını çözerek yeni nesil elektromanyetik uygulamalar için ulaşılabilir bir çözüm sunmaktadır.

#### 1.5. Tez Yapısı

Bu tez, araştırma hedeflerine sistematik olarak ulaşmak için beş bölümden oluşmaktadır.

- ✓ Bölüm 2: Kaynak Araştırması – Mevcut metamalzeme soğurucuların ve önceki araştırmaların incelenmesi.
- ✓ Bölüm 3: Materyal ve Yöntem.
- ✓ Bölüm 4: Araştırma Sonuçları ve Tartışma – Soğurucunun tasarımı, simülasyonu ve analizi.
- ✓ Bölüm 5: Sonuç ve Gelecekteki Çalışmalar – Bulguların özeti ve daha ileri araştırmalar için öneriler.

## 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Günümüzde, metamalzemelerin teorik ve deneysel etkinliği üzerine daha önceki araştırmalar dikkate alındığında biyoloji, enerji ve iletişim dahil olmak üzere çok çeşitli kullanım alanı bulmaktadır. Metamalzemeler, ayrıca antenler, lensler, sensörler ve filtreler gibi çok çeşitli cihazlarda da kullanım alanı bulmuşlardır. Bu tez kapsamında yapılan literatür taraması çalışmalarında, özellikle mükemmel metamalzeme soğurucu uygulamalarına odaklanılmıştır. Metamalzeme tasarımındaki ilerlemeler, geniş bant soğurucuların, polarizasyona duyarız yapıların ve gizlilik teknolojisi, algılama ve kablosuz iletişime uygulanabilir ultra ince topolojilerin yaratılmasıyla sonuçlanmıştır. Metamalzeme performansı, Sonlu Fark Zaman Alanı (FDTD) ve Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM) gibi çeşitli sayısal ve analitik teknikler kullanılarak simüle edilmiş ve optimize edilmiştir. Literatür taraması, konuyu daha detaylı anlamak, literatürdeki eksik kısımları belirlemek ve katkıda bulunmak için önemlidir.

Tipik olarak, metamalzeme tasarım çalışmasında, çalışma frekansı, bant genişliği, bant sayısı, yansıma ve iletim özellikleri ve polarizasyon özellikleri dahil olmak üzere tasarım parametreleri belirlenir, ardından bu özellikleri veren rezonatör şekli ve dielektrik katman özellikleri belirlenir. Daha sonra, simülasyonu çalışmaları yapmak ve boyutları optimize etmek için bir elektromanyetik simülasyon yazılımı kullanılır. Ardından, yapı üretilir, bu yapı kullanılarak elektromanyetik ölçümler gerçekleştirilir ve elde edilen sonuçlar simülasyon sonuçları ile ve varsa literatürdeki sonuçlarla karşılaştırılır. Bu süreç, istenen özellikler elde edilene kadar tasarımın şekli veya boyutları değiştirilerek tekrarlanır.

### 2.1. Metamalzeme Soğurucular (MA)

Soğurucu araştırmalarının temel amacı, yeni ve etkili bir rezonatör katman mimarisi sağlamaktır. Bölünmüş halkalar, halkalar, şeritler, omega şekilli ve Kudüs çapraz yapıları dahil olmak üzere çeşitli metamalzeme yapıları kullanılarak mükemmel soğurma elde edilebilir. Metamalzeme soğurucular, uygulama alanlarına bağlı olarak dar veya geniş bantlarıyla tek bantlı veya çok bantlı olabilir. Ek olarak, metamalzeme sinyal soğurucular ayarlanabilir olabilir. Başka bir deyişle, çeşitli frekans bantları arasında geçiş yapmak mümkündür. Tasarım özelliklerine bağlı olarak, metamalzeme soğurucular enerji

hasadı, güneş hücreleri, algılama, iletişim, radar, kalkanlama vb. dahil olmak üzere çok çeşitli alanlara uygulanabilir.

Son yıllarda, metamalzeme soğurucu çalışmaları çok çeşitli amaç ve tasarım özellikleriyle devam etmektedir. Bu çalışmalardan birisi Unal ve ark. (2015) tarafından yapılan çalışmadır. Bu çalışmada, enerji hasadı ve algılama uygulamalarında altın oranı kullanan ayarlanabilir mükemmel bir metamalzeme soğurucunun tasarımı ele alınmıştır. Enerji hasadı için tasarlanan soğurucu yapının sayısal analizlerine göre, yapının boşluğuna yerleştirilen direnç, gelen dalgadan soğurulan enerjiyi en üst düzeye çıkarırken aynı anda boşlukta depolanan enerjiyi toplamaktadır. Ayrıca, önerilen yapının sensör uygulamaları için uygunluğu incelenmiştir. Önerilen ayarlanabilir metamalzeme soğurucu yapısının dielektrik kalınlığı değiştirilerek, yapının yansıma özellikleri sayısal olarak incelenmiştir, ayrıca sayısal analizi desteklemek için deneysel araştırma da yürütülmüştür. Sonuç olarak, 6,78 GHz'de %99,9'luk maksimum soğurma oranına ulaşıldığı gösterilmiş olup, bu da MA yapısının bir elektromanyetik enerji toplayıcı olarak işlev görebileceğini göstermektedir.

Ayrıca, Bağmancı ve ark. (2017) tarafından güneş enerjisi hasadı uygulamaları için geniş bant polarizasyondan bağımsız bir metamalzeme soğurucunun geliştirilmesi üzerine bir araştırma yapılmıştır. Bu çalışmada, geniş bant polarizasyondan bağımsız güneş hasadı uygulamaları için bir metamalzeme soğurucu incelenmiştir. Önerilen metamalzeme yapısı üç katmandan oluşmaktadır: üstte bir nikel rezonatör, ortada dielektrik görevi gören silisyum dioksit ( $\text{SiO}_2$ ) ve arkada iletimi durdurmak için bir nikel tabakası. Sayısal çalışmalara göre, önerilen MA geniş açılı ve %88,28'in üzerindeki tüm görünür bölgeler için mükemmel bir soğurma karakteristiğine sahip olduğu görülmüştür. 621,76 THz rezonans frekansında, %98,4'lük neredeyse mükemmel bir soğurma gözlenmiştir. Ayrıca, neredeyse tüm görünür ışık spektrumuna eşit olan 445 THz ile 770 THz arasında %90 soğurma olduğu görülmüştür.

Benzer şekilde, Liu ve ark. (2021) tarafından ultra geniş bantlı seçici bir soğurucu kullanarak neredeyse mükemmel güneş enerjisi hasadı ile ilgili çalışma yaptılar. Bu çalışmada, fotonik kristallerdeki yavaş ışık etkisi ve MP'ler de dahil olmak üzere çok sayıda fiziksel modun kuplaj mekanizmasının incelenmesine dayanarak, Ni ve  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 'ü tamamen kullanan iki boyutlu piramit dizili çok katmanlı Ni/ $\text{Al}_2\text{O}_3$  güneş soğurucuları sınıfı tasarlandı. Bu çalışma, FDTD yöntemini kullanarak Maxwell denklemlerini sayısal olarak çözerek UV'den orta kızılötesine kadar geniş spektrum bölgesindeki geniş bant soğurucunun radyasyon özellikleri araştırıldı ve elde edilen verilere göre, fototermal

dönüşüm verimliliğinin %96,45'e ulaşabileceği görüldü. Fiziksel etki geleneksel tasarımına kıyasla, burada önerilen fotonik kristal yapısının dönüşüm verimliliğini yaklaşık %11 oranında artırmış olduğu görülmektedir. Ek olarak, soğurucu, teorik olarak güneş radyasyonunun verimli kullanımını destekleyen konsantrasyon faktörünü artırarak yüksek sıcaklıklarda bile yüksek verimliliğin korunabileceği gösterilmiştir.

Abdulkarim ve ark. tarafından 2020 yılında sıvı kimyasalların tespiti için metamalzeme tabanlı bir sensörün tasarımı ve araştırması önerilmiştir. Tespit prensibi incelenen numunelerin dielektrik parametrelerindeki farklılıklara dayandığından, bu çalışmada yakın dielektrik tepkisi olan kimyasal numuneleri tespit etmek zordur. Bu sorunu ele almak için, 8-12 GHz frekans aralığında sıvı kimyasalları tespit etmek üzere yeni bir metamalzeme tabanlı sensör tasarlanmış ve üretilmiştir. Genetik algoritma kullanılarak, rezonatörün amaçlanan boyutlarını en üst düzeye çıkarmak için bir dizi tasarım değerlendirilmiştir. Sayısal ve deneysel sonuçlar dikkate alındığında, önerilen sensörün (i) temiz ve kullanılmış trafo yağları, (ii) mısırözü, pamuk ve zeytinyağları, (iii) markerli ve markersiz dizel yakıtları ve (iv) katkılı alkol türevleri ve benzen katkılı karbon tetraklorür gibi pek çok sıvıları ve katkı oranlarını tespit etmek için etkili olduğunu göstermektedir. İlgili örnekler için, bu çalışmada, rezonans frekansında yaklaşık 250 MHz, 200 MHz, 250 MHz, 150 MHz ve 50 MHz'lik bir kayma elde edildiği belirtilmiştir.

Ayrıca, Zhou ve ark. (2020), Kızılötesi soğurmaya dayalı bir metamalzeme gaz algılama sistemi geliştirmişlerdir. Bu çalışmada, akıllı, gözenekli bir metal organik çerçeve (MOF) ile son teknoloji tamamlayıcı metal oksit yarı iletken (CMOS) uyumlu bir metamalzeme soğurucuyu birleştirerek, metan gazının hızlı ve son derece hassas optik tespiti için minyatür bir gaz algılama platformu incelenmiştir. Metamalzeme gaz algılama sistemiminin algılama özellikleri, FDTD tabanlı bir yazılım kullanılarak simüle edilmiştir. Sonuçlara göre, MOF metamalzeme soğurucunun metan moleküllerini algılama kapasitesinin önemli ölçüde artırılabilir olduğu anlaşılmıştır. Bu makalede, çok hassas, minyatür bir gaz algılama sistemi sunulmuştur.

Terahertz (THz) aralığında tek metal katmanlı ayarlanabilir bir metamalzeme soğurucunun tasarımını ve üretimini ile ilgili bir çalışma Zhong ve ark. (2020) tarafından tanıtıldı. Bu çalışmada, bir stronsiyum titanat (STO) katmanı ve THz aralığında bir metal katmandan oluşan ayarlanabilir bir metamalzeme soğurucu önerilmiş ve ölçülmüştür. Parlak-parlak modların (bright-bright modes) kuplaj etkisi nedeniyle 6,2 THz'lik rezonans frekansında %90 genliğe sahip bir soğurma zirvesi elde edildiği görülmüştür. Bu soğurma zirvesinin kökenini açıklığa kavuşturmak için, simüle edilen soğurma

spektrumu hesaplanmış ve ölçülen soğurma spektrumuyla uyumlu olduğu görülmüştür. Ölçüm sonuçları, burada elde edilen soğurma zirvesinde, sıcaklık 300 K'den 380 K'ye yükseltildiğinde, sadece %2'lik bir azalma meydana geldiğini ve aynı zamanda eş zamanlı olarak, rezonans frekansının 6,2 THz'den 7,1 THz'ye kaydığını göstermektedir. Böylece, STO katmanının sıcaklık duyarlılığına bağlı olarak, sıcaklığa göre ayarlanabilir bir metamateryale soğurucu deneysel olarak doğrulandığı belirtilmiştir.

### 2.1.1. Geniş bant soğurucular için ma tasarımları

Geniş bant metamateryale soğurucular (MA'lar), geniş bir frekans aralığında güçlü soğurma elde etme kabiliyetleri nedeniyle popülerlik kazanmıştır. Radar kesit alanı azaltma, elektromanyetik girişim (EMI) kalkanı ve gizleme teknolojisi gibi geniş bant soğurma gerektiren uygulamalar, geleneksel soğurucuların dar bant davranışıyla sınırlıdır. Gradyan indeksli yapıları, çoklu rezonanslı birim hücreler ve kayıplı malzemelerin kullanımı gibi çeşitli tasarım yaklaşımları, bant genişliğini artırmak için araştırılmıştır. Soğurma spektrumunu artırmak için, çoklu rezonanslı yapılar çeşitli rezonans frekanslarına sahip birkaç rezonatör kullanır. Gradyan indeksi tabanlı tasarımlar, geniş bir frekans aralığında empedans uyumu sağlamak için kırılma indeksi profilini ayarlayarak yansımaları azaltır ve soğurmayı artırır.

Geniş bant soğurucular için, Akgol ve ark. (2017), mikrodalga enerji hasadı için dirençli üç tip rezonatöre dayalı Geniş bant MA'ya dayalı bir çalışma gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada, üç tip dirençli rezonatöre dayalı yeni bir geniş bant metamateryale soğurucu analiz edilmiş ve tasarlanmıştır. TEM modu için, küçük, orta ve büyük bölünmüş jeton (coin) rezonatörlerinin bireysel soğurma tepkileri ve bunların birleşik tepkileri bağımsız olarak incelenmiştir. Bölünmüş jeton rezonatörlerinin bireysel soğurma tepkileri tatmin edici değildir, ancak Akgol ve arkadaşları tarafından 2017 yılında önerilen yapıyı oluşturan tüm bölünmüş jeton rezonatörlerinin birleşik soğurması tüm çalışma spektrumu boyunca neredeyse mükemmel olarak elde edilmiştir. FIT tabanlı bir simülasyon programını kullanarak tek tip SCR, iki tip SCR ve üç tip SCR içeren yapılar tasarlanmıştır. Deneysel gözlemler ve sayısal modelleme sonuçları, normal gelişte, enine elektromanyetik (TEM) polarizasyon dalgaları için %80'den büyük bir orana sahip geniş bant soğurmasının 3 ila 8 GHz arasında elde edilebileceği gösterilmiştir.

Ünal ve ark. (2017) tarafından çinko oksit ve tungstenden yapılmış piramitler kullanılarak güneş enerjisi hasadı için ultra geniş bantlı bir metamalzeme soğurucu gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada güneş hasadı uygulamaları için ultra geniş bantlı çinko oksit-tungsten piramit mimarileri araştırılmıştır. Önerilen piramit yapısı, TE ve TM polarizasyonları için frekanstan bağımsız olmasının yanı sıra, TEM modu için de frekanstan bağımsızdır. Bu nedenle, önerilen güneş soğurucu hem frekanstan hem de polarizasyondan bağımsızdır ve en yüksek güneş ışınımının 2,5 W/m<sup>2</sup> olduğu 300-1000 THz bölgesinde %98'den fazla bir soğurmaya sahiptir. Önerilen PMA'nın soğurma mekanizmasını araştırmak için sonlu entegrasyon tekniklerine dayalı bir EM simülatörü kullanılmıştır. Sonuç olarak, güneş hücresinin etki alanı boyunca polarizasyon ve açı bağımsızlığına sahip önerilen neredeyse ideal soğurucu, gelen güneş enerjisini yakalayan yeni güneş hücreleri oluşturmak için önemli düzeyde kullanılma potansiyeline sahip olduğu anlaşılmıştır.

Polarizasyondan bağımsız, mikrodalga uygulamaları için bir başka geniş bantlı metamalzeme soğurucu Bağmancı ve ark. (2019) tarafından önerilmiştir. Bu çalışma, toplu elemanlarla yüklenmiş, via bağlantılı bölünmüş halka rezonatörlerine dayanmaktadır. Yalnızca toplu eleman dirençleri ve via bağlantısı olmayan yapı, önerilen metamalzeme yapısında bu bileşenlerin önemli rolünü göstermek amacıyla deneysel olarak incelenmiştir. Dirençler kullanılmadığında 6,2 ile 13,5 GHz arasında soğurma yoktur ve 5,2 ve 14,0 GHz'de yaklaşık 150 MHz bant genişliğine sahip iki rezonans elde edilmiştir. %80'den fazla soğurma oranına ve yaklaşık 7,2 GHz bant genişliğine sahip 220 ohm'luk bir toplu devre elemanı kullanıldığında, soğurma 6,3 GHz ile 13,5 GHz arasında oldukça geniş bir aralıkta gerçekleşmiştir. Sayısal sonuçlar, önerilen soğurucu yapının farklı modlarda ve çeşitli geliş açılarında 4 ile 16 GHz arasında 7,3 GHz'lik bant genişliğine sahip olduğunu göstermektedir. Böyle bir sonuç soğurucu tasarımlarında kritik öneme sahiptir. Ayrıca, simüle edilmiş enerji hasadı performansının 6,8 ile 12,8 GHz bandında %83'ten daha fazla olduğu ifade edilmiştir.

Diğer taraftan, Guo ve ark. (2021) tarafından kolloidal litografi ile kesik nanokoniler kullanan neredeyse mükemmel geniş bantlı metamalzeme soğurucuları sunuldu. Metalik kesik nanokonilerin UV-görünür-yakın-IR spektral aralığındaki ultra geniş bant soğurması bu çalışmada belgelenmiştir. Önerilen metamalzeme soğurucuları, metalik ince filmler üzerinde içi boş kesik nanokonilerden oluşturulmuştur. Yakın aralıklı içi boş kesik titanyum nitrür (TiN) nanokonilerin altıgen dizileri kullanılmıştır.

Soğuruculuk, 160 ile 1470 nm arasında sürekli olarak %96 veya üzerinde tutuldu ve 100-2500 nm aralığında ortalama %96,11 oldu. Bu soğurucu malzeme, polarizasyon bağımsızlığı ve büyük geliş açalarına duyarsızlığı ile kanıtlandığı gibi, doğal ortamlarda güneş ışığını yakalama konusunda önemli bir yeteneğe sahip olduğu belirtilmiştir. Sonuç olarak, önerilen kesik nanokoni mükemmel soğurucu iyi bir geniş bantlı soğurma kapasitesine sahiptir ve yama üretim imalatı için koloidal litografi yaklaşımıyla uyumludur. Bu malzemenin güneş enerjisi uygulamaları, termal yayıcılar ve kızılötesi algılamada önemli bir potansiyele sahip olduğu belirtilmiştir.

Benzer şekilde, UHF bantlarında, özellikle GSM frekansları için ayarlanabilir enerji hasadı, Bakir ve ark. (2018) tarafından tasarlanmıştır. Bu çalışma, GSM 900 ve 1800 frekans bantlarında çalışan metamalzemelere dayalı enerji hasadı cihazları önermektedir. Ön ve arka rezonatörler 1808 bağlantısına sahiptir ve temel yapı, dielektrik alt katmanın ön ve arka taraflarında dört adet iç içe geçmiş U şeklinde parçadan oluşmuştur. Soğurma kalitesi doğrudan enerji hasadı yeteneklerini etkilediğinden, mükemmel soğurma amaçlanmıştır. Mükemmel soğurma başarmak, rezonans frekans ayarını mümkün kılmak için bir hava boşluğu mevcuttur ve bakır plakalar kusursuz elektromanyetik dalga soğurmasını mümkün kılmak için hava boşluğunu takip eder. Tasarım anahtarlar ve sensörler gibi düşük enerjili cihazlara güç sağlamak için kullanılabileceğini göstermektedir. Simülasyon ve deneysel çalışmanın sonuçları, bir dizi farklılığa rağmen önerilen yapının UHF bant uygulamalarında enerji hasadı için başarıyla kullanılabileceğini göstermektedir.

### **2.1.2. Ultra-ince ma tasarımları**

Ultra ince metamalzeme soğurucular (MA'lar), soğurma verimliliğinden ödün vermeden minimum kalınlık gerektiren uygulamalar için oldukça arzu edilir. Özellikle düşük frekanslarda, geleneksel soğurucular genellikle çeyrek dalga boyu rezonans prensiplerini kullandıkları için nispeten kalındır. Bu sınırlamanın üstesinden gelmek için araştırmacılar, güçlü soğurmayı korurken ultra ince MA'lar elde etmek için çeşitli stratejiler geliştirdiler. Tipik bir yöntem, alt dalga boyu kalınlıklarda elektromanyetik kaybı artıran plazmonik veya dirençli katman tabanlı yapılar kullanmaktır. Başka bir yol, maksimum enerji dağılımı ve minimum yansımanın hassas bir şekilde tasarlanmış rezonatör şekilleri tarafından sağlandığı empedans eşleştirmesidir. Ayrıca, dielektrik veya iletken filmler kullanan hibrit ve çok katmanlı tasarımlar, yapıyı kompakt tutarken

soğurmayı iyileştirmeye yardımcı olur. Son araştırmalara göre, ultra ince MA'lar, kalınlıkları çalışma dalga boyundan çok daha az olduğu için esnek elektronik uygulamalar, elektromanyetik koruma ve gizleme teknolojiler için kullanılabilir.

Ultra İnce Tasarımlar için Saadeldin ve ark. (2023) tarafından geniş bantlı, ultra ince, polarizasyona duyarsız bir metamalzeme soğurucuya dayalı bir çalışma sundular. Bu çalışma, Ku-bandı için geniş bantlı, ultra ince ve polarizasyona duyarsız ideal bir metamalzeme soğurucu önermekte ve araştırmaktadır. Hem elektrik hem de manyetik rezonansların eş zamanlı olarak desteklenmesi bunun sonucudur. Frekans alanı çözücüsü olan bilgisayar simülasyon yazılımı önerilen metamalzeme soğurucuyu sayısal olarak analiz etmek için kullanılacaktır. Sonuç olarak PMA, 12 ila 20,2 GHz'lik geniş frekans aralığında TE ve TM polarizasyonları için %90'ın üzerinde soğuruculuk sergiler. Önerilen tasarım ayrıca, alt dalga boyunda bir birim hücre sine (0,064 $\lambda$ ), eğik geliş açısına (0 ila 50°) ve geliş açısı değişimine (50°'ye kadar) sahip yüksek bir soğuruculuk tepkisine (%80'in üzerinde soğuruculuk) sahiptir. Sonuç olarak, soğurucu ile Ku-bant uygulamaları için iyi bir potansiyel bulunmaktadır.

Benzer şekilde, Ning ve ark. (2022) tarafından Manyetik Nanomalzemeye Dayalı, Ultra İnce Ayarlanabilir Metamalzeme Soğurucusunu sundular. Bu çalışmada kullanılan ultra ince ayarlanabilir metamalzeme soğurucu, manyetik nanomalzemeler, metalik yapı rezonansları ve aktif bileşenlerin (yani ayarlanabilir kapasitanslı varaktörler) ortak tasarımıyla oluşturulmuştur. Bu soğurucuların algılama sistemiyle birleştirildiğinde, akıllı veya kendi kendine ayarlanabilir soğurucu olarak akıllı yüksek hızlı ayarlanabilirlik ile geliştirilebilirler. Dalgaların iletimini tamamen durdurmak için önerilen soğurucu, ayarlanabilir rezonans yapılarını manyetik nanomalzemelerle birleştirir ve metalik bir plaka ile desteklenir. Birim hücre yapısı, FIT tabanlı bir simülasyon programı kullanılarak sayısal olarak simüle edilir. Sonuç olarak, 0,41 ile 1,02 GHz arasında %90 seviyelerinin üzerinde ve sürekli olarak ayarlanabilir bir soğurma elde edilebileceği belirtilmiştir. Tasarlanan soğurucunun üstün soğurma performansının doğrulanabilmesi amacıyla simüle edilen sayısal sonuçların yanında deneysel ölçümlerin de yapıldığı ifade edilmiştir. Deneysel sonuçlarla sayısal sonuçlar arasında güçlü korelasyonların elde edildiği belirtilmiştir. Bu bulguların EMC, saçılma azaltma ve diğer alanlarda kullanımı olabilir.

Ayrıca, Karaaslan ve ark. (2017) kablosuz iletişim amacıyla çok katmanlı kare bölünmüş halkalarla metamalzeme soğuruculara dayalı Mikrodalga enerji hasadını tanıttılar. Bu çalışmada, çok katmanlı kare ayırık halkaların kablosuz iletişim için enerji

hasadı potansiyeli incelenmektedir. Önerilen yapının birim hücresi üç rezonatör katmanından oluşmaktadır: küçük, orta ve büyük. Her katman, dielektrik bir alt katman üzerine yerleştirilmiş metal bir rezonatörden ibarettir. En büyük rezonatör olan üçüncü katmanın arka tarafında iletimi engelleyen bir metal kaplama vardır. Bu çalışmada, yarık genişliği, metal hattın genişliği ve eğik gelişte geliş açısı gibi önemli parametrelerin önerilen yapının soğurma özellikleri ve frekans tepkisi üzerindeki etkileri de ayrıca incelenmiştir. Deneylelerden elde edilen ölçümlere ve sayısal simülasyon sonuçlarına göre, en büyük rezonatöre sahip üçüncü katman sırasıyla 2,8 GHz, 5,4 GHz ve 10,5 GHz'de %80, %90 ve %85 soğurma değerlerine sahiptir. Bu frekanslar uydu, GSM ve WIMAX kablosuz haberleşme amacıyla kullanılan frekans bantlarında bulunmaktadır.

Ayrıca, Metamalzeme tabanlı enerji hasatlama sistemi Nowak, (2021) tarafından hazırlanmıştır. Bu çalışma, radyo frekansı ve mikrodalga bantlarındaki rezonanslı meta yapıların elektromanyetik özelliklerinin kapsamlı bir araştırmasına dayanmaktadır ve bu yapıların enerji hasadı sistemlerindeki potansiyel uygulamalarına odaklanılmıştır. Temsilî metamalzeme topolojilerine göre seçilen yapılar gerçekleştirilmiştir. Temel Bölünmüş Halka Rezonatör (SRR) hücrelerinin geometrik gösterimleri, sonlu elemanlar ağlarının oluşturulması eşliğinde FIT tabanlı bir simülasyon programı çerçevesi içerisinde geliştirildi. Sonuçlar, voltaj çarpanı ve yüksek frekanslı doğrultucu içeren düşük maliyetli bir enerji hasadı sisteminin parçası olarak belirli frekans bantlarındaki elektromanyetik alandan kullanılabilir DC enerjisi elde etmenin mümkün olduğunu göstermektedir. Önerilen yapının enerji verimliliği belirlenerek, enerji hasadı uygulamalarında olası kullanım potansiyeli araştırılmıştır. Askeri veya elektromanyetik uyumluluk uygulamaları için, son derece verimli ve seçici elektromanyetik koruma sistemleriyle mikrodalga kablosuz güç iletim tekniğinde yüksek verimli alıcılar ve kuşaklar olarak da kullanılabilir olduğu gösterilmiştir.

Ayrıca, Khanna ve Awasthi (2020) tarafından Ku ve K-bant uygulamaları için geniş bantlı ultra ince bir metamalzeme soğurucu tanıtıldı. Ku ve K-bant uygulamaları için %40 kesirli bant genişliğine ve tasarlanmış halka genişliği, bölünmüş genişlik ve bölünmüş açığa sahip basit halka geometrisine sahip ultra ince geniş bantlı soğurucu bu araştırmanın temelini oluşturmaktadır. Önerilen metamalzeme soğurucunun temel özellikleri, geniş bant genişliğine sahip tek alt tabaka ve basit, kompakt bir tasarımdır. Ayrıca, geniş bantlı soğurucunun etkinliğini doğrulamak için tasarım simülasyonlarını değerlendirmek ve analiz etmek için bir mikrodalga simülasyon programı kullanılmıştır.

Sayısal sonuçlara göre, bant genişliği 8,1 GHz olarak elde edilmiştir. Yarım halka kısmının bant genişliği ile karşılaştırıldığında sekiz kat daha büyüktür ve elde edilen soğuruculuk ise %90'dan büyüktür. Bu nedenle, önerilen metamalzeme soğurucunun kısmi olarak Ku (15,7-18 GHz) ve K (18-23,8 GHz) bant uygulamaları için uygun olduğu ifade edilmiştir.

### 2.1.3. Polarizasyona duyarsız ma soğurucu tasarımları

Polarizasyona duyarsız metamalzeme soğurucular (MA'lar), gelen elektromanyetik dalgaların polarizasyon durumundan bağımsız olarak tutarlı soğurma performansını korumak için tasarlanmıştır. Bu özellik, gelen dalgaların keyfi polarizasyon yönelimlerine sahip olabileceği radar kesit alanı azaltma, gizlilik teknolojisi ve elektromanyetik girişim (EMI) kalkını gibi pratik uygulamalar için özellikle önemlidir. Araştırmacılar, polarizasyon duyarsızlığını elde etmek için çeşitli polarizasyon açıları altında aynı elektromanyetik tepkileri gösteren kare, çapraz şekilli veya dairesel rezonatörler dahil olmak üzere simetrik birim hücre tasarımları kullanırlar.

Polarizasyona duyarsız soğurucular için, Thummaluru ve Chaudhary, (2018) tarafından polarizasyon kontrolüne sahip geniş açılı frekans ayarlanabilir metamalzeme soğurucuya dayalı bir çalışma sundular. Bu çalışma açılı duyarsızlığı, kapsamlı frekans ayarlanabilirliği ve polarizasyon kontrol edilebilirliği ile karakterize edilen bir metamalzeme soğurucunun (MA) tasarımını sunmaktadır. MA'ların temel sorunları sınırlı bant genişliği, açısal duyarlılık ve kontrolsüz polarizasyondur. Bu çalışma önerilen tasarımın stratejik yönetimi yoluyla MA'nın üç sorununa çözümler önerilmektedir. Dahası, alternatif polarizasyonun rezonans frekansını belirleyerek TM veya TE polarizasyonunun rezonans frekansını düzenlemek mümkündür ve hem TM hem de TE rezonans frekanslarının eş zamanlı kontrolü için basit ancak etkili bir ön gerilimleme tekniği sunulmaktadır. Tüm tasarımlar ANSYS HFSS yazılımı ile modellenmiştir. VD'nin ön gerilimleme voltajının manipülasyonu ile, tasarlanan MA'nın 4,2 GHz ile 7 GHz frekansları arasında ayarlanabilir olmasının sağlandığı ifade edilmiştir. Önerilen MA, 70°'ye kadar olan geliş açılarında %80'in üzerinde soğurma gösterdiği ifade edilmiştir. Tasarlanan MA üretilmiş edilmiş ve simülasyon sonuçları deneysel olarak doğrulanmıştır.

Benzer şekilde, hem geniş bantlı hem de polarizasyona duyarsız bir grafen tabanlı metamalzeme soğurucu Nickpay ve ark. (2021) tarafından sunuldu. Bu çalışmada, terahertz (THz) uygulamaları için grafen tabanlı geniş bantlı ve polarizasyona duyarsız bir soğurucu yapı önerilmiştir. Haç şeklinde şeritler kullanarak, soğurma bant genişliğini artırmak için iki eşmerkezli dikdörtgen halka birleştirilmiştir. Grafenin iletkenliğini harici bir DC-ön gerilimleme voltajıyla kontrol ederek, soğurucunun bant genişliği ve soğurma performansının değiştirilebilir olduğu belirtilmiştir. Simetrik yapısı nedeniyle polarizasyona duyarsız bir soğurucu olduğu ifade edilmiştir. Çeşitli radyant dalga açıları altında, önerilen soğurucunun soğurma verimliliği araştırılmıştır. Soğurucunun, geniş bir açı aralığında, hem TM hem de TE modları için etkili bir soğurma sergilediği ifade edilmiştir. Sonlu fark zaman domaini (FDTD) metodolojileri ve empedans eşleştirme teorisine dayanarak, önerilen bir soğurucu araştırılmaktadır. Nickpay ve arkadaşları 2021 yılında yaptıkları çalışmada, simülasyon sonuçları dikkate alındığında geniş bant soğurma özelliği gösteren bir soğurucu tasarladıklarını belirtmişlerdir. 0,9 ve 0,7'lik soğuruculuk katsayıları için elde edilen bant genişliklerinin sırasıyla, %16 ve %20,3 olduğu ve ayrıca çalışma frekans aralığının 2,47–2,9 THz ile 2,39–2,93 THz bantlarında olduğu belirtilmiştir.

Ek olarak, Dincer ve ark. (2014) tarafından görünür, kızılötesi ve mikrodalga aralıklarında güneş hücrelerinde kullanım için polarizasyon açısından bağımsız mükemmel metamalzeme soğurucuları önerilmiştir. Bu çalışmada, güneş spektrumu da dahil olmak üzere güneş hücresi uygulamaları için yeni bir tür metamalzeme soğurucu tasarlanmış ve analiz edilmiştir. Simülasyon ve deneysel sonuçlara dayanarak, dört boşluklu kare halkadan oluşan MA'nın soğurma özellikleri incelenmiş ve mikrodalga bölgesindeki performansı yakından incelenmiştir. Ayrıca, yüksek frekanslı MA'ların tasarımında ve simülasyonunda hem görünür hem de kızılötesi frekans alanları kullanılmıştır. Mikrodalga aralığı için, deneysel ve sayısal sonuçlar arasında iyi bir uyum olduğu görülmüştür. Tüm rezonansların, hem simülasyonda hem de ölçümde bire yakın (>> %99) soğurma seviyelerine sahip olduğu belirtilmiştir. Temel tasarımın performansı, çok çeşitli frekansları kapsayan elektromanyetik spektrumun çeşitli bölümlerinde optimumdur.

Ayrıca, Ji ve ark. (2019) tarafından neredeyse tam soğurma sağlayan, ultra ince çift bantlı geniş açılı polarizasyona duyarsız bir metamalzeme soğurucu gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, hem geniş açılı hem de polarizasyona duyarsız olan ultra ince, çift bantlı bir MA önerilmiştir. MA, bir FR-4 .sıyla ayrılmış iki bakır katmanına

sahiptir. Ek olarak, bir kare halka rezonatörü ve bir haç şeklindeki rezonatör üst katmanını oluşturur. Hem TE hem de TM polarizasyon dalgaları geniş bir geliş açısında güçlü soğurma sergilerken, çift bantlı MA normal geliş dalgaları için polarizasyon duyarsızlığı sergilediği belirtilmiştir. Çift bantlı MA, bu çalışmada Sonlu Entegrasyon Tekniği'ne (FIT) dayalı bir yazılım kullanılarak incelenmiştir. Sayısal sonuçlara göre; 3,8441 GHz'de %99,933 ve 9,1094 GHz'de %99,99'luk soğurma ile iki ayrı soğurma zirvesinin oluştuğu ifade edilmiştir. Üstelik, kalınlık en düşük soğurma frekansının dalga boyunun %1,34'üne karşılık gelmektedir. Önerilen ultra ince MA'nın basit yapısı ve güçlü soğurmaya sahip olması sayesinde termal radyometreler, algılama sensörleri ve gizleme teknolojileri dahil olmak üzere çok sayıda uygulama alanı olduğu ifade edilmiştir.

Görünür ve yakın kızılötesi spektrumdaki uygulamalar için, Hanif ve ark. (2023), polarizasyona duyarsız eğik geliş açısı kararlılığı ve ultra ince nano halkalara dayalı bir metamalzeme soğurucu sundular. Bu çalışmada, görünür ve yakın kızılötesi spektrum için polarizasyona duyarsız ve eğik geliş açılarında kararlı olan temel bir halka rezonatöre dayalı ultra ince kompakt bir metamalzeme soğurucu (MA) önerildi. Önerilen soğurucuda, nikel-alüminyum, nitrat-nikel üç katman halinde katmanlanmıştır. Soğurma performansı, bu yapının polarizasyona duyarsızlığını göstermek için farklı polarizasyon açılarında değerlendirilmiştir. Önerilen MA yapının soğurma kararlılığının açısal duyarlılığı hem enine elektrik (TE) hem de enine manyetik (TM) modları için 70 dereceye kadar eğik geliş açılarında araştırılmıştır. Önerilen MA soğurma özelliklerini anlamak için meta malzemelerin özellikleri, girişim teorisi, eşdeğer devre modeli ve elektrik, manyetik ve yüzey akımlarının dağılımı da incelenmiştir. Önerilen MA yapının tasarımı bir mikrodalga simülasyon programı kullanılarak gerçekleştirilmiş ve simüle edilmiştir. Sonuç olarak önerilen MA, 350 ile 2450 nm arasında %90'ın üzerinde soğurma, ortalama %97 soğurma ve 480 ile 700 nm arasında %99'un üzerinde soğurma sergilediği gösterilmiştir.

#### **2.1.4. Ku/Ka-bantları için ma tasarımları**

Ku/Ka-bant metamalzeme soğurucular (MA'lar), uydu iletişimlerinde, radar sistemlerinde ve yeni 5G ağlarında yaygın olarak kullanılan 12-18 GHz / 26,5-40GHz frekans spektrumunda işlev görecektir şekilde tasarlanmıştır. Bu yüksek frekans aralığında, verimli soğurma için polarizasyon duyarsızlığı, geniş bant genişliği ve kompakt tasarımlar gereklidir. Araştırmacılar, empedans uyumlu katmanlar, çok rezonanslı yapılar

ve soğurma performansını iyileştiren hibrit malzemeler gibi çeşitli teknikler geliştirerek Ku/Ka-bant MA'ları optimize etmiştir. Ek olarak, desenli iletken elemanlar ve alt dalga boyundaki rezonatörlerin kullanımıyla güçlü elektromanyetik kuplaj elde edilir ve bu da ultra ince bir profili korurken neredeyse mükemmel soğurmaya olanak tanır. Ku/Ka-bant MA'lardaki son gelişmeler, radar kesitlerini (RCS) azaltmada, paraziti azaltmada ve iletişim sistemlerinde sinyal bütünlüğünü iyileştirmede yararlı olduğunu göstermiştir. Bu gelişmeler, Ka-bant MA'ları yeni nesil kablosuz uygulamalar, yüksek frekanslı sensörler ve gelişmiş gizleme teknolojileri için ideal hale getirir.

Ku/Ka-Band uygulamaları için, Bilal ve ark. (2021), fraktal metamalzeme ile çevrili metalik bölünmüş halka rezonatörlerden oluşan geniş bantlı bir mikrodalga soğurucuya dayalı bir çalışma yürütmüştür. Bu çalışmada, mikrodalga alanlarının K ve Ka bantları, geniş bantlı soğuruculuğa sahip özel olarak tasarlanmış metalik E-şekilli fraktal tabanlı mükemmel bir metamalzeme soğurucu (PMA) incelenmiştir. Bu çalışmada, tasarlanan MA yapının soğurma özelliklerin bir simülasyon yazılımı kullanarak araştırılmıştır. Bu çalışmadaki TE ve TM polarize gelen EM dalgaya karşılık gelen soğurma spektrumları, metamalzeme soğurucunun artık polarizasyondan bağımsız olmadığını göstermektedir. Ortalama olarak, PMA, TE ve TM polarize uyarımlarla dalgaların normal gelişi için yaklaşık %80'lik en yüksek soğurmaya ulaşır. Belirli bir frekans bandında, önerilen yapı tam dalga soğurması özelliği göstermektedir. Burada elde edilen sayısal simülasyon sonuçlarının deneysel sonuçlarla iyi bir uyum içinde olduğu görülmüştür. Önerilen PMA tasarımının 5G haberleşme uygulamaları için kullanışlı olması beklenmektedir.

Ayrıca, Chung ve ark. (2022) tarafından MEMS konsol aktüatörlerini kullanarak milimetre dalga frekansı ayarlanabilir bir metamalzeme soğurucu tasarladı ve üretti. Bu çalışmada milimetre dalga frekansı (Ka-bandı) uygulamaları için frekans ayarlanabilir bir metamalzeme soğurucu oluşturmak için MEMS konsol aktüatörleri kullanıldı. Rezonans frekansını kontrol etmek için, elektrostatik olarak uyarılan metal MEMS konsolları, değişken kapasitörler olarak metamalzeme birim hücresinin bölünmüş halka rezonatörlerine (SRR'ler) eklenmiştir. Bükülmüş eğriliğe sahip MEMS konsolları, daha küçük bir sürüş voltajıyla büyük bir kapasitans değişimi elde etmek için konsolların oksijen-plazma-salım süreci tarafından oluşturulan gerilim gradyanları kullanılarak kapasitif bölgede oluşturuldu. Önerilen soğurucunun elektromanyetik (EM) tepkisini geliştirmek ve optimize etmek için ticari tam dalga EM modelleme yazılımı (Ansys HFSS, R16) kullanıldı. Sonuç olarak, tasarlanan numunenin başlangıçtaki kapalı

durumda %72,9 olan soğuruculuğunun, çekme durumunda %99,9'a yükseldiği ve soğurma frekansı 28,0'dan 25,5 GHz'e kaydığı görüldü. Önerilen MEMS tabanlı metamalzeme soğurucu, aktif olarak kontrol edilen elektromanyetik soğurucuların gerekli olduğu milimetre dalga uygulamalarında kullanılabilir olduğu gösterildi.

Benzer şekilde, Hakim ve ark. (2023) tarafından çok bantlı bir metamalzeme soğurucu, yapay manyetik iletken ve Ku/K/Ka/5G (mm-Dalga) bant uygulamaları için sensör olan polarizasyondan bağımsız fraktal kare bölünmüş halka rezonatörü (FSSRR) tanıtılmıştır. Bu çalışmada, çok bantlı soğurucu (MA) ve reflektör uygulamaları için fraktal kare bölünmüş halka rezonatörüne (FSSRR) dayalı bir metamalzeme yapısı oluşturulmuştur. Simetrik dönen yapı nedeniyle, enine elektrik (TE) ve enine manyetik (TM) polarizasyonunun kapsamlı bir araştırması özel soğurma özellikleri ortaya çıkarıldı. MA özelliklerini incelemek için elektrik alan ve manyetik alan dağılımı ve karşılaştırılabilir devre modeli kullanılmıştır. İki fraktal bölünmüş halka rezonatörü MA'nın parçasıdır: bir iç haç şekilli rezonatör ve bir kare bölünmüş halka rezonatör. Önerilen modelin tasarım ve simülasyonu, mikrodalga simülasyon programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sonuç, 16,75 GHz, 19,60 GHz, 24,26 GHz, 26,62 GHz ve 30,05 GHz frekanslarında %98, %98, %95, %99,9 ve %99,9 tepe soğuruculuğuna sahip beş soğurma zirvesi elde edilmiştir. Önerilen soğurucunun güçlü soğurma performansının, geçirgenlik tespitini mümkün kıldığı, 5G antenlerinin performansını iyileştirdiği belirtilmiştir.

Ayrıca, Uddin ve ark. (2025) tarafından Polarizasyona duyarlı U-eşlenmiş bölünmüş halka rezonatör tabanlı hekza-bant metamalzeme soğurucu, katı madde konsantrasyon algılama uygulamaları için tasarlanmıştır. Bu çalışmada, bölünmüş halka rezonatör tabanlı bir metamalzeme soğurucu (UCSRR-MA) tasarımı yapılmıştır. Önerilen UCSRR birim hücresi, MA'nın her bir çeyreğinde bulunan iki kare halka ile çevrili kübik bir rezonatöre sahip dördü döne simetrik bir yapıdan oluşmuştur. Ayrıca, soğurma özellikleri, yüzey akım dağılımı, elektrik ve manyetik alan dağılımları ve metamalzeme özelliklerini içeren eşdeğer bir devre modeli kullanılarak incelenmiştir. Önerilen MA, bir mikrodalga simülasyon programı kullanılarak tasarlanmış ve simüle edilmiştir. 80 dereceye kadar olan geliş açılarında, MA hem TE hem de TM polarizasyon modları için tutarlı soğurma özellikleri göstermektedir. Sonuç olarak, tasarım 8,8 GHz, 10,512 GHz, 13,87 GHz, 16,084 GHz, 22,048 GHz ve 28,348 GHz'de sırasıyla, %95,1, %95,1, %99,88, %93,88, %99,8 ve %92,4 ile neredeyse mükemmel soğurma oranları göstermiştir. Bu nedenle, önerilen elektriksel olarak kompakt ve polarizasyona duyarlı

çok bantlı MA, soğurma, algılama ve radar kesit alanının düşürülmesi gibi uygulamalar için arzu edilen bir seçenek olduğu ifade edilmiştir.

Ek olarak, Zhu ve ark. (2025) tarafından Ka-bant uygulamaları için ultra ince ve esnek bir geniş bant metamalzeme soğurucu gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, Ka-bant uygulamaları için esnek ve ultra ince bir metamalzeme soğurucu (MA) sunulmuştur. Beş katmanlı MA, üç bakır katman arasında iki FR4 dielektrik katmanından oluşturulmuştur. Soğurma mekanizmasını daha iyi açıklayabilmek için elektrik alan dağılımı kullanılmıştır. Dahası, MA'nın olağanüstü polarizasyona ve açısal kararlılığa sahip olduğu belirtilmiştir. FDTD yaklaşımı, bakır ve FR4'ün geometrik parametreleri ve EM parametrelerine dayalı EM simülasyonu yapmak için kullanılmıştır. Bu çalışmada, 30-36 GHz frekans aralığında, MA %95'ten fazla soğurma oranına ulaşabileceği gösterilmiştir. Genel olarak, önerilen MA, ultra ince kalınlığı, hafifliği ve konformal uygulama için esnekliği nedeniyle Ka-bant uygulamaları için güçlü bir aday olduğu belirtilmiştir.

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

#### 3.1. Elektromanyetik Teori

Metamalzemeler, doğada bulunan malzemelerin doğal olarak sahip olmadığı, olağanüstü elektromanyetik özelliklere sahip suni mühendislik yapılarıdır. Bu malzemeler, alt dalga boyundaki birim hücrelerini dikkatlice özelleştirecek, geleneksel malzemelerin yapamayacağı şekillerde elektromanyetik dalgaları manipüle edebilir. Bu, anormal dalga soğurulması, negatif elektrik geçirgenlik ve negatif manyetik geçirgenlik gibi özelliklere olanak tanır. Elektromanyetik dalga davranışını manipüle etme konusundaki olağanüstü özellikleri, metamalzemeleri ayarlanabilir, ultra ince ve oldukça verimli soğurucular elde etmenin iyi bir yolu haline getirmiştir. Enerji hasatlama için toplu malzemelere bağlı olan geleneksel soğurucuların aksine, metamalzemeler, kompakt bir formu korurken geniş frekans aralıklarında işlev görecektir şekilde tasarlanabilir ve bu da onları esnek tasarımlar ve hafiflik gerektiren yeni uygulamalar için uygun hale getirir.

Metamalzemelere dayalı soğurucuların benimsenmesi, kablosuz iletişim, gizleme ve algılama teknolojilerini büyük ölçüde iyileştirmiştir. Gizleme uygulamalarında kullanılan metamalzemeler, farklı açılarda ve polarizasyonlarda gelen radar dalgalarını verimli bir şekilde soğurarak radar kesitini azaltır. Uydu iletişimleri ve 5G gibi yüksek frekanslı uygulamalarda, sinyal iletimini iyileştirmeye ve kablosuz iletişimdeki paraziti azaltmaya yardımcı olurlar. Ayrıca, metamalzeme soğurucuları, hassas dalga manipülasyonunun gerekli olduğu sensör teknolojilerinde, tıbbi görüntüleme ve enerji hasadında yaygın olarak kullanılır. Ayarlanabilir ve geniş bantlı metamalzeme soğurucuları tasarlama yeteneği, bunları dar bantlı çalışma ve polarizasyon hassasiyetinin sınırlamalarını aşarak geleneksel süreçlere olası bir alternatif haline getirir (Padilla ve Fan., 2022).

Elektromanyetik (EM) teori, elektrik ve manyetik alanların nasıl davrandığını, yüklü parçacıklar ve malzemelerle nasıl etkileşime girdiğini tanımlayan temel bir fizik dalıdır. Maxwell denklemlerine göre, farklı ortamlarda EM dalgaların oluşumunu, yayılmasını ve etkileşimini açıklar. Bu dalgalar, hem birbirlerine, hem de dalga yayılım yönüne dik olarak yayılan salınımlı elektrik ve manyetik alanlardan oluşur. İletim, soğurulma, kırılma ve yansıma dahil olmak üzere EM dalga özellikleri, malzemenin elektrik geçirgenliği ( $\epsilon$ ) ve manyetik geçirgenliği ( $\mu$ ) tarafından belirlenir. Elektromanyetik teori, kablosuz iletişim, radar sistemleri, optik teknoloji ve malzeme

mühendisliği gibi çok sayıda uygulamanın temelini oluşturur. Ayrıca, doğal malzemelerin sınırlarının ötesinde dalga davranışını değiştirebilen yapılar tasarlamak için metamalzemeler gibi gelişmiş malzeme araştırmalarında önemlidir.

### 3.1.1. Maxwell denklemleri

Metamalzemelerin fiziğine girmeden önce elektromanyetik teoriyi kısaca gözden geçirmek yararlı olacaktır. Elektromanyetik dalga ile içinde bulunduğu ortam arasındaki etkileşim, Maxwell denklemlerinin izotropik bir ortamda incelenmesiyle kapsamlı bir şekilde anlaşılabilir. Maxwell denklemlerinin diferansiyel formu aşağıda görülen ve Maxwell denklemleri olarak adlandırılan dört adet denklem ile ifade edilir.

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad 3.1$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad 3.2$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad 3.3$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad 3.4$$

Burada,  $\mathbf{E}$  (V/m) elektrik alanı,  $\mathbf{H}$  (A/m) manyetik alan,  $\mathbf{D}$  (C/m<sup>2</sup>) elektrik akı yoğunluğu,  $\mathbf{B}$  (Wb/m<sup>2</sup>) manyetik akı yoğunluğunu ifade eder. Homojen, izotropik ortam için yapısal ilişkiler kullanıldığında,  $\mathbf{D}$  ve  $\mathbf{B}$  denklemler 3.5 ve 3.6 ile aşağıdaki şekilde elde edilir.

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E} \quad 3.5$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad 3.6$$

Denklem 3.5 ve 3.6 kullanılarak, Maxwell denklemleri, denklemler 3.7-3.10 de gösterildiği gibi yeniden yazılabilir.

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \quad 3.7$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \epsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad 3.8$$

$$\nabla \cdot \epsilon \mathbf{E} = 0 \quad 3.9$$

$$\nabla \cdot \mu \mathbf{H} = 0 \quad 3.10$$

Harmonik fonksiyonlar için zamana göre türev  $j\omega$  ile çarpma anlamına geldiği için,  $\mathbf{E}$  ve  $\mathbf{H}$  aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) \\ \mathbf{H}(\mathbf{r}, t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{E}_0 \\ \mathbf{H}_0 \end{bmatrix} e^{j(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r})} \quad 3.11$$

$$\mathbf{k} \times \mathbf{E} = \frac{\omega}{c} \mu \mathbf{H} \quad , \quad \mathbf{k} \times \mathbf{H} = -\frac{\omega}{c} \varepsilon \mathbf{E} \quad 3.12$$

EM dalgasının bu formu Maxwell denklemlerine yerleştirdiğinde,  $\mathbf{E}$  ve  $\mathbf{H}$  'in yalnızca karşılıklı olarak dik değil, aynı zamanda dalga vektörü  $\mathbf{k}$ 'ye de dik olduğu ilişki elde edilir; yani, dalga vektörü  $\mathbf{k}$ , açısal frekansı  $\omega$  ve serbest uzaydaki hızı  $c$  olan enine bir elektromanyetik dalga elde edilir.

### 3.1.2. Kırılma indisi

Elektromanyetik radyasyonun ortamdaki davranışı, ortamın optik özelliği tarafından belirlenir; bu özellik, bağıl dielektrik sabiti ve manyetik geçirgenlik tarafından aşağıdaki şekilde belirlenir ve bu özelliğe kırılma indisi denir.

$$n = \pm \sqrt{\varepsilon_r \mu_r} \quad 3.13$$

Burada  $\varepsilon_r$  ve  $\mu_r$ , bağıl dielektrik sabiti ve bağıl manyetik geçirgenlik olarak bilinir ve boşluk için değerleri yaklaşık olarak bire eşittir. Kırılma indisi, elektromanyetik dalga iki ortam arasında geçiş yaptığında kırılma açısını belirlemek için Snell Yasası'nda yaygın olarak kullanılır. Fresnel denkleminde açıklandığı gibi, kırılma indisi ayrıca iletim ( $\tau$ ) ve yansımaya ( $\rho$ ) katsayılarını hesaplamak için de kullanılır. Ayrıca, kırılma indisi, ışığın bir vakumdaki hızının belirli bir ortamdaki hızına oranı olarak tanımlanabilir.

$$n = \frac{c_0}{v} \quad 3.15$$

$$\rho = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \quad 3.16$$

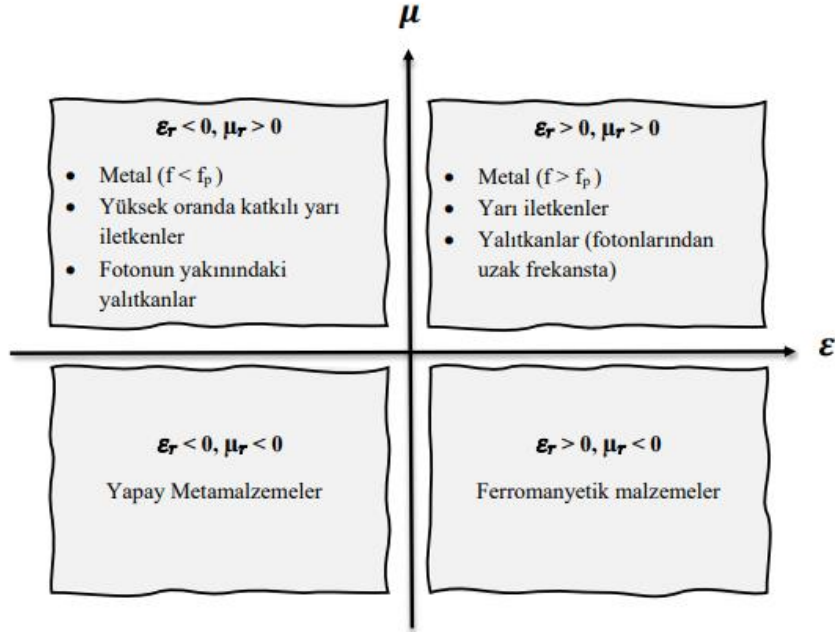
$$\tau = \frac{2n_1}{n_1 + n_2} \quad 3.17$$

Burada  $n_1$  ve  $n_2$  sırasıyla birinci ve ikinci ortamın kırılma indislerini ifade eder. Denklemler 3.16 ve 3.17 yalnızca  $\mu_r$ 'nin 1'e eşit olduğu manyetik olmayan malzemeler için geçerlidir. Ancak, manyetik malzemeler için Empedans ( $Z$ ) denklemlere entegre edilirse, yansıma ve iletim katsayıları aşağıdaki gibi yazılır.

$$\rho = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad 3.18$$

$$\tau = \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2} \quad 3.19$$

Bu denklemler, elektromanyetik dalga ile ortam arasındaki etkileşimi makroskobik ölçekte doğru bir şekilde tanımlar, ancak mikroskobik düzeyde, hipotez biraz farklı olur ve metamalzemelerin davranışı, özellikle boyutlar gelen dalganın dalga boyundan küçük olduğunda daha iyi açıklanabilir. Denklem (3.13)'te verilen dalga denklemine göre,  $\epsilon_r$  ve  $\mu_r$ 'nin işaretleri dalganın ortam içindeki yayılma ve zayıflama davranışını tanımlar. Böylece, malzemeler genel olarak Şekil 1'de şematik olarak görüldüğü gibi dört farklı grupta sınıflandırılabilir.



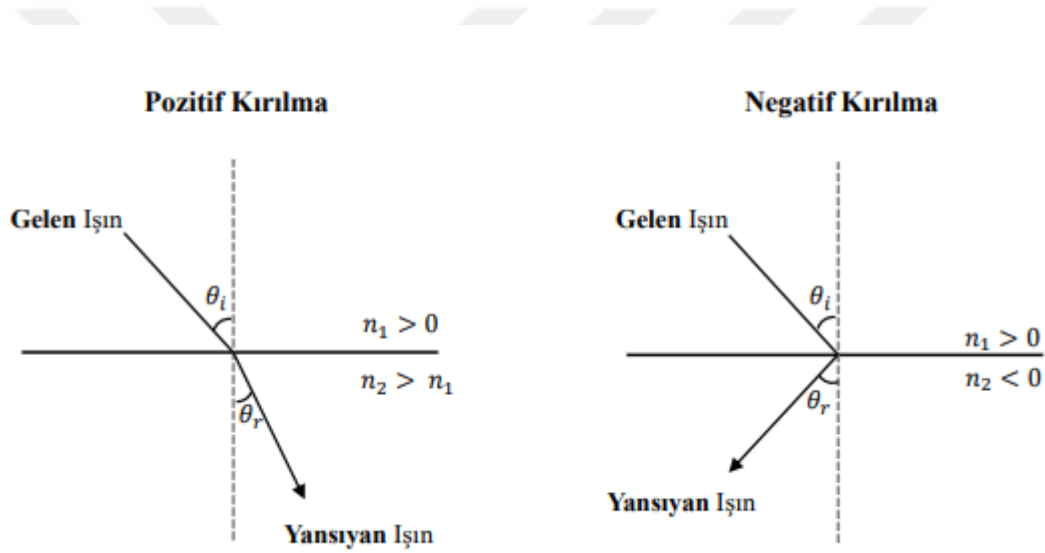
Şekil 3.1. Farklı malzemelerin dielektrik sabiti ( $\epsilon$ ) ve manyetik geçirgenlik ( $\mu$ ) işaretlerine göre sınıflandırılması.

### 3.1.3. Negatif kırılma

Elektromanyetik dalgaların yansıma kırılma özellikleri Snell yasaları tarafından belirlenir. Kırılma, dalganın geliş açısı ve ortamın kırılma indisleri tarafından belirlenir (Marqués ve ark., 2008).

$$n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_r \quad 3.20$$

Şekil 2'de negatif kırılma indisli (NRI) malzemelerle pozitif kırılma indisli malzemeler karşılaştırılmıştır. Buna göre, gelen dalga, pozitif indeksli malzemelerde yüzey normalinin diğer tarafına kırılırken, negatif indeksli malzemelerde aynı tarafa kırılır.



Şekil 3.2. Pozitif indisli ortamdan ve negatif indisli ortamdan dalganın yansıması

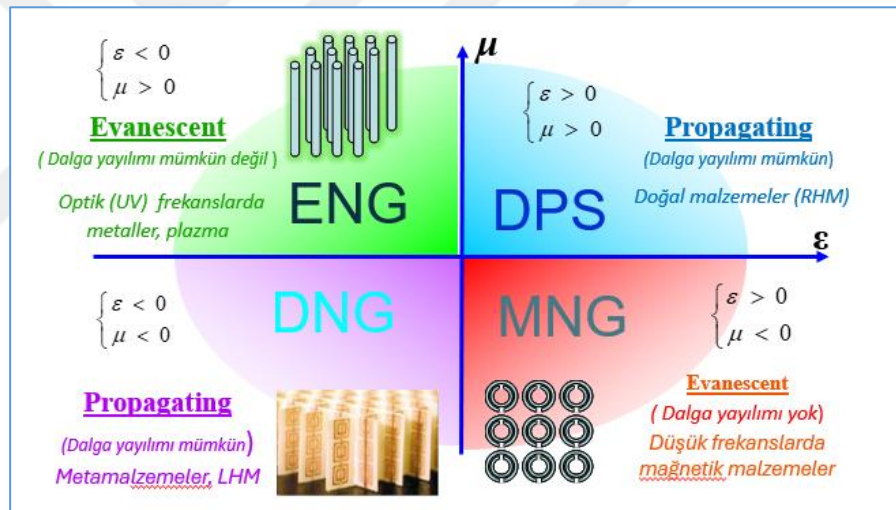
Malzeme özellikleri, sırasıyla denklem 3.21 ve denklem 3.22'de verilen kompleks dielektrik sabiti ( $\epsilon$ ) ve kompleks manyetik geçirgenlik ( $\mu$ ) değerlerine büyük ölçüde bağlıdır.

$$\epsilon(\omega) = \epsilon'(\omega) + i\epsilon''(\omega) \quad 3.21$$

$$\mu(\omega) = \mu'(\omega) + i\mu''(\omega) \quad 3.22$$

Denklemler, kompleks dielektrik sabiti ve kompleks manyetik geçirgenliğin frekansa bağlı olduğunu gösterir ve bu da değerlerinin gelen dalganın frekansına göre değiştiğini gösterir. Doğada bulunan çoğu malzeme hem pozitif dielektrik sabitine hem de pozitif manyetik geçirgenliğe aynı anda sahiptir, tüm dielektrikler tarafından örneklendirilen ve bu tür malzemelere Çift Pozitif Ortam (DPS) adı verilir.

Elektrik geçirgenliği reel kısmı negatif ve manyetik geçirgenliğin reel kısmı pozitif olan malzemeler Epsilon Negatif Ortam (ENG) malzemeleri olarak sınıflandırılır. Manyetik geçirgenliğin reel kısmı negatif, dielektrik sabitinin reel kısmı pozitif olan malzemelere Mu Negatif Ortam (MNG) adı verilir. Diğer taraftan, dielektrik sabitinin reel kısmı ve manyetik geçirgenliğin reel kısmı aynı anda negatif olan, doğada bulunmayan malzemeler Çift Negatif Ortam (DNG) veya sol elli malzemeler olarak adlandırılır. Şekil 3.3'te Malzemelerin elektromanyetik özelliklerine göre sınıflandırılması görülmektedir ( Mendhe ve Kosta., 2011).



Şekil 3.3. Malzemelerin dielektrik sabiti ve manyetik geçirgenliklerine göre sınıflandırılması

### 3.2. Metamalzeme Teorisi

Son yıllarda, yapay malzemeler (yani metamalzemeler) üzerindeki ilgi önemli ölçüde artış göstermiştir, çünkü bu malzemeler gelen elektromanyetik dalgayı önemli ölçüde manipüle edebilir. Metamalzemeler, bileşenlerinin geometrisi tarafından belirlenen etkili parametreleri, dielektrik sabiti  $\epsilon(\omega)$  ve manyetik geçirgenlik  $\mu(\omega)$  olan alt dalga boyu elemanlarından oluşan tasarımcı elektromanyetik malzemelerdir. Metamalzemeler, birim hücreler olarak adlandırılan yapay kapanımlar oluşturan geniş bir

kompozit yapı sınıfı oluşturur. Metamalzemeler, belirli EM tepkileri elde etmek için yapay elemanlar kullanılarak tasarlanan ilk etkili ortam değildir.

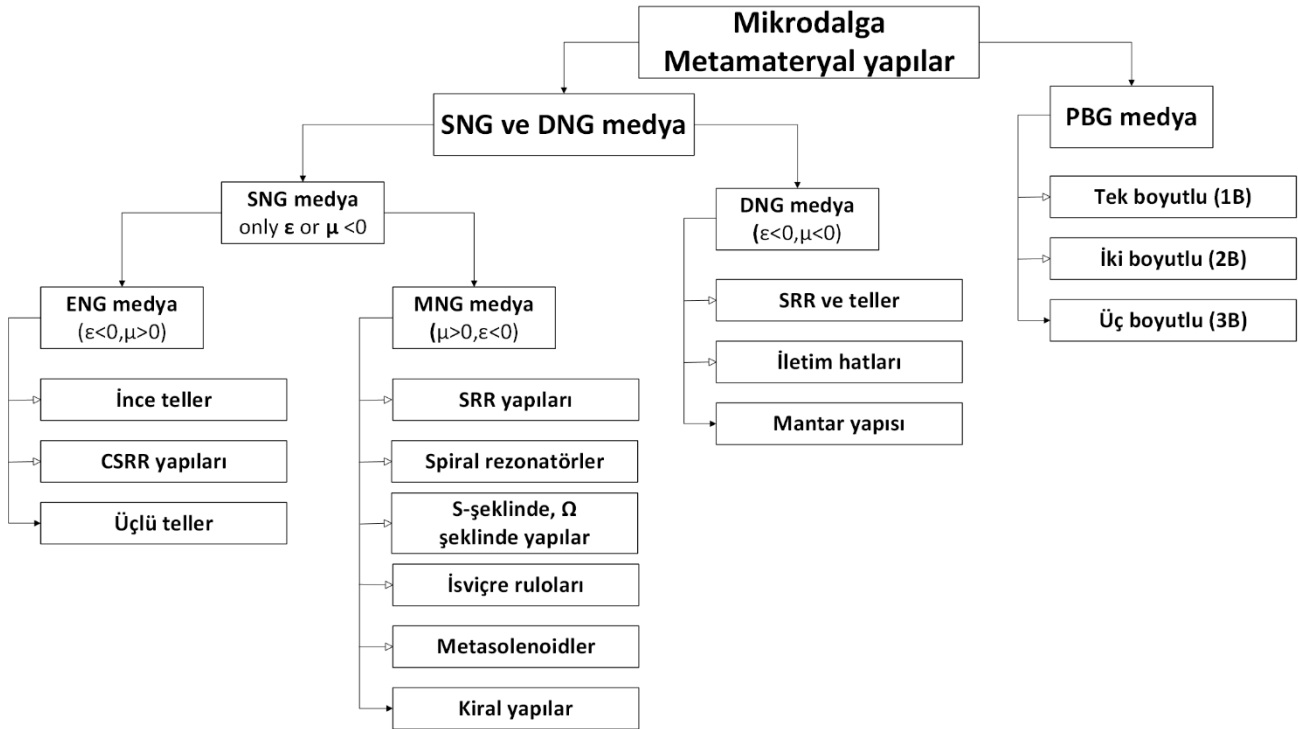
Jagadis Chunder Bose, 1898 tarihinde, polarizasyonu inceleyen bir mikrodalga deneyinde bükülmüş bakır teller kullandı. Yapay dielektrikler kavramı, özellikle Kock'un metalik gecikmeli lensi olmak üzere Bell Labs'ta yapılan çalışmalarla 1940'larda gerçekten başladı ve yüzyıl boyunca devam etti (Gangwar ve ark., 2014).

İlaveten, manyetik kaynak veya manyetik malzeme olmadan elde edilen manyetizma, benzer kökenlere sahiptir. Yapay plazmalar veya negatif  $\epsilon(\omega)$  ile yapay olarak tasarlanmış ortamlar, 1960'lardan beri bilinmektedir. Ancak, metamalzemelerin "ortaya çıkışının" John Pendry'nin yapay manyetizmasının 1999'da tanıtılmasına ve aynı anda negatif  $\epsilon(\omega)$  ve  $\mu(\omega)$  ile ilk yapının elde edilmesine bağlı olduğu bazı bilim çevreleri tarafından düşünülmektedir.

### 3.2.1. Metamalzemelerin sınıflandırılması

Metamalzemeler, matematiksel tanımlama yaklaşımlarına göre iki ana sınıfa ayrılabilir. İlk kategori DNG ve SNG yapılarını içerirken, ikincisi fotonik bant aralığı malzemeleri olarak da adlandırılan PBG yapıları veya fotonik kristallerden oluşur. Daha önce belirtildiği gibi, çalışma dalga boyu DNG ve SNG malzemelerinde birim hücre boyutundan önemli ölçüde daha büyüktür. Sonuç olarak, bu tür ortamlar tipik olarak homojenliğe neden olur ve etkili bir ortam kavramıyla tanımlanır. PBG yapılarında, birim hücreler arasındaki mesafe yaklaşık olarak dalga boyunun yarısı veya daha fazlasıdır.

Sonuç olarak, fotonik kristaller homojen ortamlar olarak kabul edilemez. PGB yapılar, tipik olarak DNG ve SNG yapılarında hiçbir rol oynamayan Bragg yansımalarıyla tanımlanırlar ve periyodik ortamlara çeşitli teknikler uygulanır. Mikrodalga uygulamaları için temel metamalzeme yöntemlerini vurgulayan monografiler ve analiz çalışmalarından sonra, Şekil 3'te gösterilen sınıflandırma şeması yapılmıştır (Buriak ve ark., 2016).



Şekil 3.4. Mikrodalga metamateryal yapılarının sınıflandırılması

### 3.2.2. Soğurucu olarak metamateryaller

Metamateryaller optik filtreler, tıbbi cihazlar, havacılık uygulamaları, sensör algılama, soğurucular, enerji hasadı, süper lensler, gizleme, radomeler, antenler vb. gibi geniş bir uygulama yelpazesine sahiptir. Bu yapıların kullanıldığı en önemli uygulamalarından bir tanesi mükemmel soğurma olarak bilinir. Mükemmel soğurma elde edebilmek için iletim ve yansıtıcılık aynı anda sıfıra düşürülmeli ve böylece tüm gelen elektromanyetik dalga malzeme tarafından soğurulmalıdır. Gelen dalgaya göre alt dalga boyunda yapıları oldukları için, farklı katmanlardan oluşmasına rağmen, metamateryal soğurucular efektif bir malzeme gibi davranırlar. Bu nedenle, metamateryal soğurucuların özellikleri elektrik geçirgenliği ve manyetik geçirgenlik olarak adlandırılan efektif parametreler tarafından belirlenir. Özellikle, bu parametreler yardımıyla, soğurucunun etkili empedansı serbest uzayın empedansı ile aynı olacak şekilde düzenlenebilir (Landy ve ark., 2008).

Metamalzeme sinyal soğurucu yapıların çalışma prensibini daha iyi anlamak ve doğrulamak için teorik çalışmaların sayısal ve deneysel çalışmalarla da doğrulanması gerekir ( Saadeldin ve ark., 2023). Bir malzemenin frekans bağımlı soğurması  $A(\omega)$ , iletim  $T(\omega)$  ve yansımaya  $R(\omega)$  ile ilişkili olarak şu şekilde tanımlanabilir:

$$\begin{aligned} A(\omega) &= 1 - R(\omega) - T(\omega) \\ &= 1 - S_{11}^2 - S_{21}^2 \end{aligned} \quad 3.23$$

Burada,  $S_{11}$  ve  $S_{21}$  sırasıyla yansımaya katsayısını ve iletim katsayısını temsil eder. Metamalzeme sinyal soğurucu çalışmalarında, metamalzemenin arka plakasının metal bir plaka ile kaplı olması nedeniyle, iletim olmadığını belirtmekte fayda vardır.

$$\begin{aligned} A(\omega) &= 1 - R(\omega) \\ &= 1 - S_{11}^2 \end{aligned} \quad 3.24$$

Rezonans frekansında empedans uyumu sağlamak için, genellikle  $A(\omega)$ 'nin maksimum ve  $R(\omega)$  değerinin minimum olması istenir. Yansımayı en aza indirmek için, metamalzemenin empedansının boş uzay empedansı ile uyum sağlaması gerekir, empedans şu şekilde verilir:

$$Z = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \quad 3.25$$

Burada  $\mu$  ve  $\varepsilon$  ortamın dielektrik sabiti ve manyetik ve  $\mu = \mu_0\mu_r$ ,  $\varepsilon = \varepsilon_0\varepsilon_r$  olarak tanımlanır. Normal gelişte yansımaya aşağıdaki denklemle gösterilebilir:

$$R(\omega) = \left| \frac{Z(\omega) - Z_0}{Z(\omega) + Z_0} \right|^2 \quad 3.26$$

### 3.2.3. Metamalzeme uygulamaları

DNG malzemeleri yenilikçi geri dalga yayılımı ve diğer özellikleri nedeniyle en umut verici malzemeler gibi görünse de, ENG veya MNG olsun SNG metamalzemelerin kullanımını bazı ek ilginç uygulamalar sağlayabilir. Metamalzemelerin bazı dikkate değer uygulamaları şunlardır:

- ✓ Negatif kırılma indisi (NRI). Kırılma indisi negatif olduğunda ( $\epsilon < 0$ ,  $\mu < 0$ ), ortam çift negatif olarak kabul edilir. Bu fenomen, bir düzlem dalga sağ eli bir ortamdan sol eli bir ortama geçtiğinde negatif bir kırılma açısı oluşturarak Snell yasasını etkiler.
- ✓ Mükemmel düz lens, NRI'nin doğrudan bir sonucudur. Radyasyon ışınlarını odaklamak veya şekillendirmek için lensler kullanılır; ancak, dalga boyu sınırı nedeniyle birçok kısıtlamayla karşı karşıya kalır. Standart lensler genellikle dışbükeydir ve optimum çözünürlüğe ulaşmak için geniş bir diyafram gerektirir; ayrıca, görüntü ayrıntıları yakın alanda bulunur ve bu da üstel olarak azalır (geçici dalgalar), böylece son görüntüye hiçbir şey katmaz. Negatif indisli lensler düz veya içbükey olabilir ve görüntüyü odaklamanın yanı sıra geçici dalgaları da artırabilir, bu da dalga boyu sınırlamasını aşarken son görüntüyü iyileştirir.
- ✓ Yüksek empedanslı yüzeyler (HIS'ler) ve yapay manyetik iletkenler (AMC'ler). Metamalzemeler, mükemmel manyetik iletkenler (PMC'ler) olarak işlev gören yenilikçi yüzeyler veya reflektörler oluşturmak için kullanılabilir. Bu, bir veya daha fazla antenden oluşan kompakt, düşük profilli ve izole anten sistemlerinin tasarımı için önemli olabilir.
- ✓ Elektromanyetik pelerin. Üç boyutlu metal nesnelere görünmez yapmak için elektromanyetik bir pelerin kullanmak mümkündür. Pelerinleme, bir metamalzeme içindeki elektromanyetik dalgaların yolları üzerinde, onun yapısal parametrelerinde gerekli mekansal değişimi üreterek kontrol sağlar. Bu, görünmezlik uygulamaları için önemli olabilir.

Doğal malzemelerde rastlanmayan elektromanyetik özellikleri nedeniyle metamalzemelerin teorik altyapısı ve geliştirilmesi, optik, iletişim, sensörler ve enerji hasadı gibi alanlarda büyük potansiyel uygulamalar getirdi. Bu bölümde metamalzemelerin kullanılabilceği potansiyel bazı önemli örnek uygulamalar tartışılacaktır.

Mükemmel görünmezlik pelerinin gerçekleştirilmesi, malzemelerin ilk uygulaması olarak düşünülebilir. Metamalzemeler kavramı elektromanyetik alanları manipüle edebilir ve "görünmezlik pelerini" olarak bilinen devrim niteliğinde bir yeniliğe yol açabilir. Pendry ve arkadaşları, ışık bükülmesine ve koordinat dönüşümüne bağlı ilk mükemmel görünmez pelerini önerdiler. Bu fikir, öncelikle askeri jetler, araçlar ve giysiler gibi örtülü cihazların elektromanyetik dalgaların (radar ve diğer uzaktan algılama teknolojileri dahil) yayılmasını engellemek için tasarlandığı askeri sektörde kullanılır, böylece nesne gizlenir ve tespit edilemez hale gelir ( Pendry ve ark., 2006).

Anten performansının iyileştirilmesi ve sensör uygulamaları MTM'ler için diğer önemli uygulama alanlarıdır. Yüzey plazmonik rezonansı kullanan metamalzemeler, kılavuz modlarının hassasiyetini artırmak için kullanılmaktadır. Yüzey plazmonu olgusu genellikle metal ve dielektrik malzemeler arasındaki arayüzde meydana gelir. Bu olgu, temas eden ortamın kırılma indisi ve geçici alanın nüfuz derinliği tarafından önemli ölçüde etkilenir. Yüzey plazmonunun yayılma sabiti, dielektriğin kırılma indisinde meydana gelen değişiklikten etkilenir. Bağlantı koşulunun uygulanması, yüzey plazmonuyla birleştirilen elektromanyetik dalgaının özelliklerinin değişmesine neden olur (Stefan, 2007).

Mükemmel mercekler veya süper mercekler metamalzemelerin bir diğer potansiyel uygulamasını temsil eder. Metamalzemelerin eş zamanlı negatif elektrik ve manyetik geçirgenliklere sahip olması, süper merceklerin geliştirilmesini kolaylaştırmıştır. 2000 yılında, Londra'daki Imperial College'dan Profesör Sir John Pendry, negatif kırılma indisi ve metamalzemeler teorisini kullanarak optik kırınım sınırını aşabilen ilk süper merceği gerçekleştirdi. ( Pendry, 2000).

### 3.3. Materyal ve Yöntem

Önceki bölümlerde metamalzemelerin üstün özellikleri ve bu özelliklerine katkıda bulunan önemli parametreler ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Tasarlanacak metamalzeme soğurucunun birim hücresinin boyutu, şekli ve geometrik yapısının belirlenmesi, mükemmel metamalzeme soğurucu yapıları tasarlama sürecindeki en önemli adımlardan birisidir. Bunun nedeni, metamalzeme soğurucunun soğurma özelliklerinin, malzemenin kimyasal bileşiminden ziyade büyük ölçüde geometrik yerleşimine bağlı olmasındandır. Drude modeli Cai ve Shalaev. (2010), metamalzeme soğurucu tasarımı için uygun malzemelerin seçiminde önemli bir rol oynar. MTM soğurucu birim hücresi tasarlamak için kullanılacak sayısal simülasyon yazılımının seçimi, metamalzeme soğurucu tasarlama sürecindeki bir diğer önemli husustur. Sayısal analizde kullanılacak çok sayıda bilgisayar yazılımı ticari olarak mevcuttur ve her yazılım, metamalzeme soğurucuları tasarlama sürecinde kendi avantajlarını ve sınırlamalarını sunarlar. Bu çalışmada, Sonlu Entegrasyon Tekniği (FIT) tabanlı bir simülasyon yazılım önerilen metamalzeme soğurucunun sayısal analizi, tasarımı ve karakterizasyonu için kullanılmıştır.

#### 3.3.1. Kullanılacak simülasyon yazılımının seçimi

Uygun bir sayısal simülasyon yazılımının seçimi, elektromanyetik alan problemlerinin çözümünde çok kritiktir. Bu nedenle, kullanılacak olan simülasyon yazılımının kararı, elektromanyetik dalga probleminin türüne ve çalışma frekans aralığına dikkat edilerek verilmelidir. Simülasyon yazılımı seçerken genellikle üç temel kriter dikkate alınır: bellek gereksinimleri, geometrik modelleme doğruluğu ve simülasyonu tamamlamak için gereken zaman dahil olmak üzere sayısal çözücünün verimliliği. Elektromanyetik dalga problemlerinin simülasyonu için kullanılacak birçok simülasyon yazılımı bulunmaktadır ve çözülecek problemin doğasına bağlı olarak, her birinin avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır.

Elektromanyetik dalga problemlerinin analizi için yaygın olarak kullanılan sayısal analizlerde Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM), Sonlu Fark Zaman Alanı (FDTD) tekniği, Modal yöntemler ve Sonlu Entegrasyon Tekniği (FIT) en yaygın kullanılan yöntemlerdir. Her yöntem benzersiz avantajlar sunar ve belirli elektromanyetik problem türlerine uygulanabilir (Rahimi, 2011).

### 3.3.2. Sonlu elemanlar yöntemi (FEM)

FEM, genel kısmi diferansiyel denklemler (PDE'ler) için sınır değer problemlerine yaklaşık çözümler bulmak için kullanılan sayısal bir yöntemdir. Bu teknik, sürekli etki alanının alt etki alanları (sonlu elemanlar) ile değiştirilmesi ve bilinmeyen fonksiyonu temsil etmek için enterpolasyon fonksiyonlarının kullanılması şeklinde çalışır (Rahimi, 2011). Dinamik olması ve değiştirilmesinin kolay olması, ayrıca malzeme parametreleri düzgün olmayan eğrisel geometrik yapıları modellemede yüksek geometrik esnekliğe sahip olması, FEM'in avantajları olarak sıralanabilir. Bu yöntemin dezavantajları ise şunlardır:

- ✓ Uygun bir çözücü bulmak kolay olmadığından, yüksek bellek gereksinimlerine ihtiyaç duyar.
- ✓ Zaman harmonik Maxwell denklemlerinin ayrıklaştırılmasında sorunludur.
- ✓ Maxwell denklemlerini daha yüksek frekans bantlarında hesaplamak için flop gibi hızlı yinelemeli çözücünün hesaplanmasında sınırlama.

### 3.3.3. Sonlu farklar zaman domaini (FDTD)

FDTD, elektromanyetik alan problemlerini çözmek için ilk defa Yee tarafından önerilen bir sayısal çözüm yöntemidir (Yee, 1966). FDTD yöntemi, zamana bağlı Maxwell denklemlerinin tüm mekansal ve zamana bağlı türevlerini, sonlu fark denklemleri kullanarak sayısal olarak hesaplayan ızgara diferansiyel sayısal modelleme tekniğinin bir parçasıdır. FDTD'nin üstün yönleri aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- ✓ FDTD, yinelemeli çözücüye bağlı değildir, bu da matris büyüklüğünden bağımsız olduğu anlamına gelir.
- ✓ FDTD, yüksek doğrulukta 3B yapıların simülasyonu için önemli bir araç olan paralel hesaplamaya izin veren, kullanımını kolay ve basit bir yöntemdir.

FDTD'nin dezavantajı, modeldeki hem en küçük geometrik yapının hem de en küçük elektromanyetik dalga boyunun çözünürlüğü için tüm hesaplama alanının ızgara ayrıştırma yeterliliği ile ızgaralanmasını gerektirmesidir. Bu, çok uzun bir hesaplama süresine yol açar. Sonuç olarak, bu teknik çok küçük yapıların hesaplanması için daha iyi bir seçim değildir.

### 3.3.4. Sonlu entegrasyon tekniği (FIT)

İntegral formundaki Maxwell denklemleri, FIT yöntemi kullanılarak lineer bir denklem sistemine dönüştürülür. FIT, Yee Kartezyen açı kullandığı için FDTD tekniğine daha yakındır ve homojen ortamın modellenmesi için uygun bir yöntemdir (Yee, 1966).

İntegral formundaki Maxwell denklemleri, FIT kullanılarak bir çift iç içe geçmiş ayrıklaştırma ızgarasına ayrılır. Analiz edildikten sonra, hesaplama alanını birkaç ızgara hücresine bölen karışık hücelere ayrıştırıldığı anlamına gelir. Bu ađ bilgisayar kullanıcısı tarafından belirlenir, ilk ađ kullanıcı tarafından oluşturulur ve ikinci bir ortogonal ađ simülasyon yazılımı tarafından oluşturulur ve sistemin genel tanımı bu iki ađ tarafından belirlenir. Daha sonra, sistemlerin saçılma parametresi ve uzak alan radyasyon deseni sonuçları elde edilebilir ve analiz edilebilir.

FIT tabanlı yöntemler doğruluk düzeyi en iyi olan modelleme tekniklerinden birisidir, ayrıca uygulanması kolaydır. Paralel hesaplama yöntemleri sağlar ve geometrik modellemeler için esnek olduğundan, karmaşık tasarımların hesaplanması için daha doğru sonuçlar verir. Ortogonal olmayan karmaşık tasarımların hesaplanmasında karmaşıklığa neden olabileceği için Yee Kartezyen açı kullanması bu yöntemin zayıflığı olarak düşünülebilir.

Bu tezde, basit ve esnek olan, ayrıca 3 boyutlu EM dalga problemlerinin benzetimi için daha doğru sonuçlar sunan FIT yöntemine dayalı simülasyon programı tüm sayısal benzetimler için kullanılmıştır. FIT yöntemi birçok araştırmacı tarafından mikrodalga spektrumunun farklı frekans aralıklarındaki elektromanyetik dalga problemlerinin analizinde kullanılmış ve daha iyi sonuçlar sunduğu kanıtlanmıştır (Marklein, 2002).

### 3.3.5. Simülasyon

Bu tez çalışmasında, metalmalzeme soğurucu yapıların sayısal analizi için ve tasarımı için FIT tabanlı simülasyon yazılımı kullanılmıştır. Yazılımı doğrulamak için Landy ve arkadaşları tarafından sayısal ve deneysel olarak önerilen bir metalmalzeme soğurucu, FIT tabanlı sayısal çözücü ile yeniden tasarlanmış ve karakterize edilmiştir (Landy ve ark., 2008). Landy ve meslektaşları, MPA birim hücrelerinin modellenmesinde ticari bir FDTD çözücüsü kullanmışlardır. Uygun sınır koşullarını uygulayarak;  $yz$  düzlemi boyunca mükemmel elektriksel iletken,  $xz$  düzlemi boyunca mükemmel manyetik iletken ve diğer sınırlar üzerinde dalga kılavuzu portları, sayısal simülasyondan

%99'lük soğurma oranı ile ve deneysel olarak 11,65 GHz'lik rezonans frekansında %88'lik soğurma oranı elde edilen neredeyse mükemmel yakın bir MA yapı gerçekleştirilmiştir.

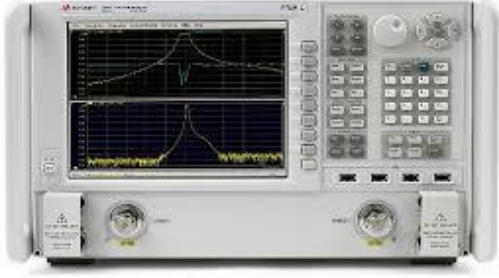
Bu tezde MPA yapıları (geometri ve malzeme kompozisyonu) FIT tabanlı simülasyon yazılımı ve aynı sınır koşulları kullanılarak simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Landy ve arkadaşları tarafından elde edilen sonuçlarla uyumlu bir şekilde, 11,7 GHz'lik rezonans frekansında yaklaşık % 4'lük frekans bant genişliği (FBW) ile yaklaşık % 99'lük soğurma oranı elde edilmiştir. Merkezi frekanstan gözlemlenen küçük bir kaymaya (sağa doğru 0,05 GHz kayma) rağmen, uyumlu simülasyon sonuçları (Landy ve arkadaşları tarafından kullanılan FDTD tabanlı çözücü ve bu tezde kullanılan FIT tabanlı çözücünün sonuçları) elde edilmiş ve böylece bu tezde kullanılan sayısal çözücünün sonuçları doğrulanmıştır.

### 3.4. Ölçüm Yöntemleri

PNA-L Mikrodalga Ağ Analizörü ve horn anten kullanan ölçüm yöntemi, metamalzeme soğurucuların tasarımını ve performansını değerlendirmek için etkili bir tekniktir. Yüksek hassasiyeti ve geniş frekans aralığına sahip PNA-L Ağ Analizörü, soğurma özelliklerini belirlemek için kritik olan metamalzeme soğurucunun yansıma katsayısını ( $S_{11}$ ) ve iletim katsayısını ( $S_{21}$ ) ölçmek için kullanılır. Yönlü radyasyon deseni ve yüksek kazancıyla bilinen horn anten, metamalzeme soğurucuyu istenen frekans spektrumunda elektromanyetik dalgalarla uyarmak için kullanılır (Balanis, 2016). Soğurucudan yansıyan sinyaller horn anten tarafından yakalanır ve soğurma verimliliğini ve bant genişliğini değerlendirmek için ağ analizörü tarafından analiz edilir.

Bu ölçüm düzeneği, metamalzemenin yansımayı en aza indirme ve enerji dağılımını en üst düzeye çıkarma yeteneğinin karakterizasyonuna olanak tanır; bunlar, performansını değerlendirmede temel ölçütlerdir. PNA-L'nin doğruluğu ve horn anteninin yön yeteneklerinin birleşimi, güvenilir ve ayrıntılı ölçümler sağlar ve bu yöntemi gelişmiş metamalzeme soğurucularının geliştirilmesi ve doğrulanması için vazgeçilmez hale getirir.

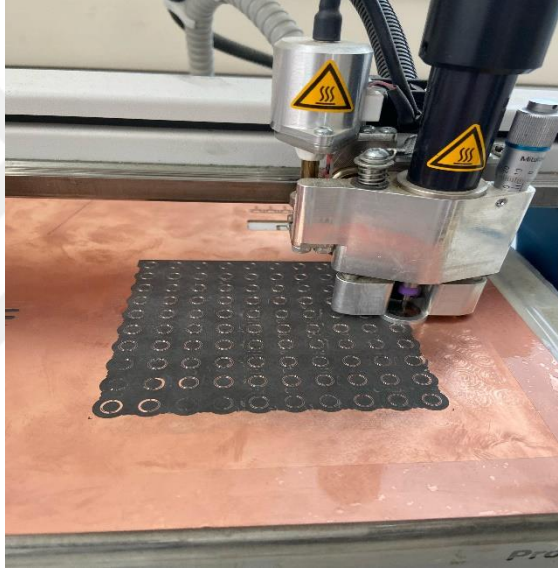
FIT tabanlı mikrodalga benzetim programında tasarlanan yapılar yine aynı programla analiz edilmiştir. Tasarlanan hücre yapılar periyodik olarak CNC tabanlı LPKF ProtoMat E33 cihazı ile üretilmiştir. Tüm yapılar tasarım ve üretimde, dielektrik katman üzerine yerleştirilmiş bakır plaka şeklindedir, rezonatör olarak bakır kullanılmıştır.



(a)



(b)



(c)

**Şekil 3.5.** (a) Ağ Analiz Cihazı , (b) korna anteni ve (c) LPKF-E33 üretim cihazı

## 4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Metamalzeme özelliklerini gösteren mükemmel bir soğurucu tasarlamak, boyutlar açısından bazı özellikler gerektirmektedir. Çalışma frekans aralığı ve tasarımda kullanılacak uygun malzemelerin seçilmesinde, tasarlanan soğurucunun kullanım alanı da göz önüne alınmalıdır. Bunlara ek olarak, elde edilen sonuçların doğruluğundan ve gerçekliğinden emin olmak için metamalzemelerin sayısal modellemesi ve analizi doğru bir şekilde yapılmalıdır. Bu nedenle, bu bölümde, bu tezde metamalzeme soğurucularını tasarlamak, analiz etmek ve karakterize etmek için kullanılan yaklaşımlar kısaca açıklanmıştır.

### 4.1. Simülasyon Çalışmaları

Bu tezde amaç, yeni Mükemmel Metamalzeme Soğurucu (MPA) yapıları tasarlamak ve analiz etmektir. İstenen hedefe ulaşabilmek için, önce simülasyon programı yardımıyla tasarım gerçekleştirilir ve sayısal analiz gerçekleştirilir. Simülasyon süresi, elde edilen sayısal sonuçların doğruluğu, verilerin depolanması ve programın tasarıma uygunluğu, simülasyon programını seçerken önemli olan hususlardır. Simülasyonlar, Sonlu entegrasyon tekniğine dayalı simülasyon yazılımı tarafından gerçekleştirildi ve tasarlanan yapıların frekans bağımlı soğurmasını analiz etmek için simülasyon programının frekans domain çözücüsü (frequency domain solver) kullanıldı.

Önerilen tasarımların mikrodalga bandında kullanılması amacı ile tüm simülasyonlar 1 mm ile 1 m arasındaki dalga boylarına karşılık gelen 300 MHz ile 300 GHz arasındaki frekans aralığında gerçekleştirildi. Sınır koşulları, enine elektromanyetik mod aracılığıyla dikey polarize elektrik alanı ( $E_y$ ) ve yatay polarize manyetik alan ( $H_x$ ) uygulamak üzere seçildi. Açık sınırlar z eksenini boyunca kullanıldı ve elektromanyetik dalgaların yayılma yönü tüm tez boyunca z yönü olarak seçildi.

Sonuçların doğruluğu büyük ölçüde simülasyonun ağ (mesh) özelliklerine bağlıdır. Simülasyonlardaki tasarımlar yazılım tarafından Ağ adı verilen daha küçük parçalara bölünür. Yazılım kullanıcının ağ tipini ve ağ yoğunluğunu seçmesine olanak tanır. Daha yüksek ağ yoğunluğunun sonuçların tutarlılığını ve doğruluğunu artıracakını bilmek önemlidir. Tüm tez boyunca uyarlanabilir ağ yenilemeli tetrahedral ağlar kullanılmıştır.

Optimum sonuçlar için gereken ağ yoğunluğu, uyarlanabilir ağ yenileme kullanılarak ayarlanabilir. Ağ hücrelerinin sayısı, sonuçlar arasındaki farkın tanımlanan doğruluk seviyesinden daha küçük olması için artırılır. Uyarlanabilir ağ yoğunluğu için doğruluk seviyesi  $1 \times 10^{-6}$  olarak ayarlanmıştır.

## 4.2. Tasarım Yöntemi

Çalışma frekansı belirlendikten sonra, tasarım için uygun malzeme seçilir. Sınır koşulları ise simülasyon yazılımı kullanılarak belirlenir. Mükemmel soğurma, rezonans şartları, empedans uyumu, yansıma ve iletim parametreleri büyük ölçüde malzemelerin özelliklerine bağlıdır. Malzemeleri seçerken dikkat edilen hususlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir:

- ✓ malzemenin kolay erişilir olup olmadığı,
- ✓ seçilen malzemenin varsa çevreye ve canlılara yan etkilerinin olup olmadığı,
- ✓ malzemenin maliyetleri üretim için gerçekçi olup olmadığıdır.

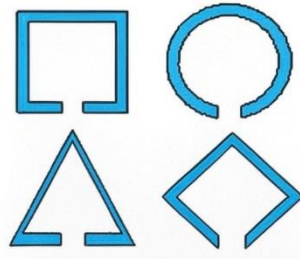
Yukarıda maddeler halinde belirtilen hususlar dikkate alınarak ve tüm parametreler hesaba katılarak bu tezde kullanılan malzemelere karar verilmiştir. Malzemeler belirlendikten sonra, malzeme parametrelerinin simülasyon yazılımına girilmesi gerekir. Malzemelerin optik ve elektromanyetik özellikleri frekansa bağlı olduklarından dolayı, frekans bağımlı sabitlerin frekans aralığına göre manuel olarak tanımlanması gerekmektedir (Sievenpiper ve ark., 1999). Bu tezde, belirli frekans bantları için, malzemelerin frekans bağımlı optik ve elektromanyetik parametreleri literatürden alınarak simülasyon programına manuel olarak tanıtılmıştır.

### 4.2.1. Geometrik parametrelerin seçimi

Doğru malzemenin seçilmesi ve simülasyon yazılımına tanıtılmasından sonra, modelin geometrik boyutlarının belirlenmesi gerekir. Metamalzeme tasarımı için geometrik parametrelerin (boyut, şekil ve yönelim) seçimi, metamalzeme soğurucularının incelenmesinde kullanılacak uygun yazılım türüne karar verildikten sonraki bir diğer önemli adımdır. Bunun nedeni, metamalzeme soğurucusunun elektromanyetik dalga ile etkileşiminin ve tepkisinin büyük ölçüde  $\epsilon(\omega)$  ve  $\mu(\omega)$  değerlerine dayanmasıdır ve bu

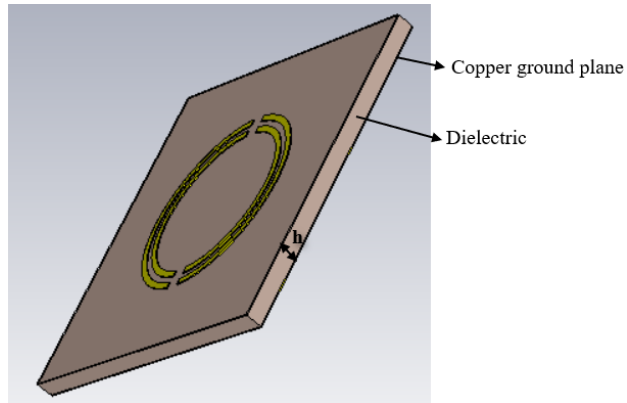
parametreler MPA yapısının boyutuna, yönelimine ve şekline ve üzerinde çalışılan dalga boyuna bağlıdır.

Sonuç olarak,  $\epsilon(\omega)$  ve  $\mu(\omega)$ , bir MPA tasarımında elektromanyetik alan rezonansından sorumludur. Bilim camiasının metamalzemeleri, özellikleri kimyasal yapılarından değil, geometrilerinden kaynaklanan, doğal olarak oluşmayan malzemeler olarak tanımlamasının bir nedenlerinden birisi budur. Bu nedenle, tasarlanacak metamalzeme yapısının amacına bağlı olarak, rezonatörlerin (elektrikli halka rezonatörleri “ERR” ve bölünmüş halka rezonatörleri “SRR”) boyutu veya ortalama yüzey pürüzlülüğü, gelen elektromanyetik dalganın dalga boyundan her zaman çok daha küçük olmalıdır.



Şekil 4.1. Örnek SSR şekilleri

Yaygın olarak kullanılan rezonatörler, altın, gümüş ve diğer metalik elementler (alüminyum, kurşun, bakır vb.) gibi çok ince, iletkenliği yüksek metal levhalardan yapılır. Kompozit bir yapı olan MPA, iki katmandan (metalik katmanların ve dielektrik ara katmanın birleşimi) oluşur, bu nedenle rezonatörler için geometrik parametrelerin ve uygun malzemenin seçilmesinden sonra; dielektrik katmanın ve toprak düzlemi alt tabakasının geometrisinin ve malzeme özelliklerinin belirlenmesi gerekir.

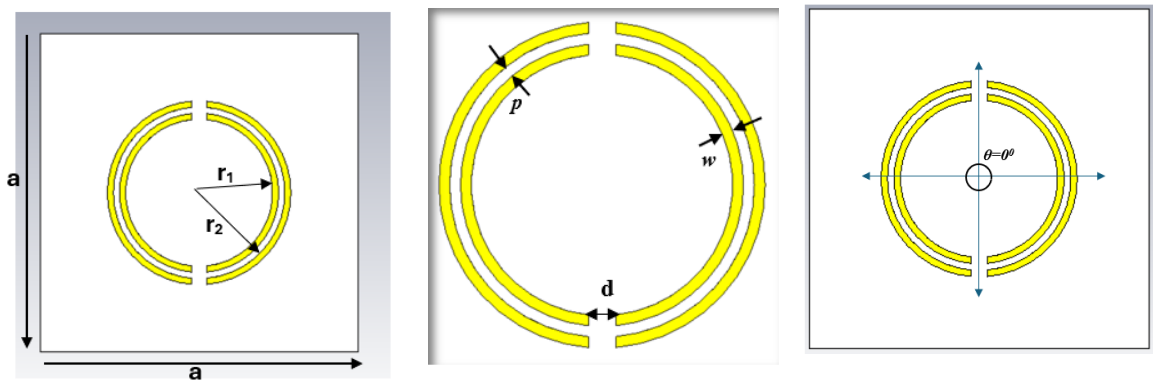


Şekil 4.2. Dielektrik plaka ve Toprak düzlemi

Birçok MPA tasarımında, toprak düzlemi, radyasyonları dielektrik katmana geri yansıtarak EM dalganın boşluğa kaçmasını (iletim kayıpları) önleme rolünü oynayan metalik esaslı malzemelerden yapılır. Tasarlanan soğurucu, Ku/Ka-bant Uygulaması için dielektrik ara katman ile ayrılmış çift bölünmüş halka şeklindeki bakır rezonatörlerden ve sürekli bakır toprak düzleminden oluşur. Metalik katmanlar, 0,035 mm kalınlığında ve frekanstan bağımsız iletkenliği  $\sigma = 5,96 \times 10^7$  S/m olan bakırdır. Bununla birlikte, her iki bant için de, dielektrik alt katman,  $h = 0,51$  mm kalınlığında düşük maliyetli Rogers RT5870 olarak seçilmiştir. Rogers RT5870 malzemesinin dielektrik sabiti  $\epsilon_r = 2,33$  ve kayıp tanjantı  $\tan \delta = 0,0012$ 'dir.

Ku bandı için, çift bölünmüş halka rezonatörlerin (DSRR) birim hücre geometrisinin optimize edilmiş boyutları şunlardır: Dış bölünmüş halkanın dış yarıçapı  $r_2 \approx 5,82$  mm. İç bölünmüş halkanın iç yarıçapı  $r_1 \approx 5,02$  mm, Bölünmüş boşluk  $d = 0,5$  mm (Her bir halkadaki yarık kapasitansı kontrol eder ve rezonans frekansını büyük ölçüde etkiler). DSRR'nin birim hücre içindeki açısal yönelimi, özellikle polarizasyon hassasiyetini incelemek için kritik olan  $\theta = 0$  dereceyi referans alır. Birim hücre boyutu 10,44 mm (kare alt tabakanın uzunluğu ve genişliği), iç ve dış halka arasındaki ayırım  $p = 0,4$  mm (halkalar arasındaki boşluk veya aralık olarak da adlandırılır) ve Halka genişliği  $w = 0,4$  mm (metalik halkaların kalınlığı).

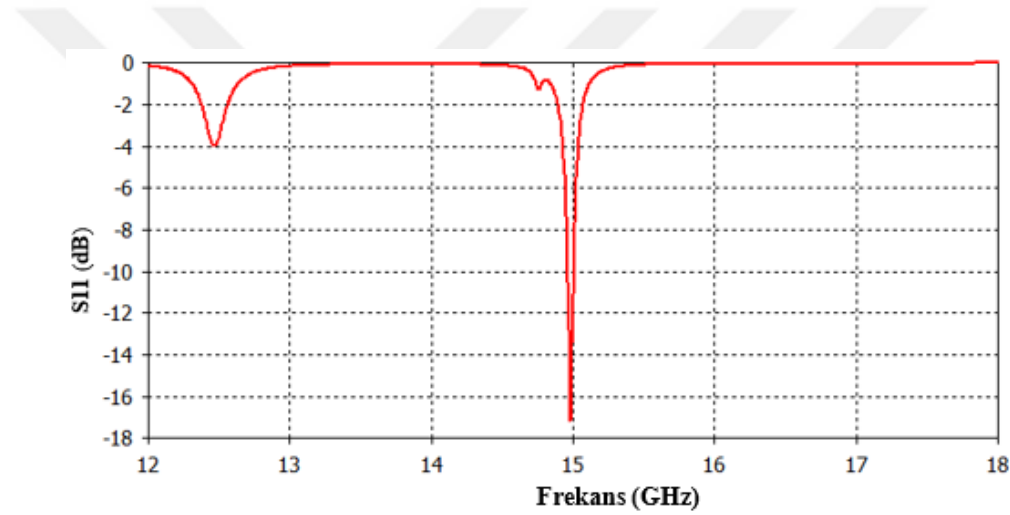
Ka-bandı için, DSRR'nin birim hücrelerinin optimize edilmiş boyutları şu şekildedir: dış yarıçap  $r_2 \approx 2,86$  mm, iç yarıçap  $r_1 \approx 2,56$  mm, bölünme aralığı  $d = 0,5$  mm, ayırım  $p = 0,1$  mm, halka genişliği  $w = 0,1$  mm ve birim hücre boyutu 5,22 mm, açısal yönelim  $\theta = 0$  derece. Alt katman, kalınlığı  $h = 0,51$  mm, dielektrik sabiti  $\epsilon_r = 2,33$  ve kayıp tanjantı  $\tan \delta = 0,0012$  olan Rogers RT5870'dir.



Şekil 4.3. Ku/Ka-bandı için çift bölünmüş halka rezonatörlerin (DSRR) optimize edilmiş geometrisi

### 4.3. Araştırma Sonuçları

Simülasyon yazılımı kullanılarak, saçılma parametreleri (S-parametreleri) elde edilir. Elde edilen S-parametreleri kullanılarak yansıtma ve iletim katsayıları bulunur. Genel olarak, bir sistemin soğurması,  $A = 1 - R - T$  formülü kullanılarak bulunabilir. Burada  $R$  etkin yansıtıcılık (reflectance) ve  $T$  yapı için hesaplanan etkin geçirgenlik (transmittance) katsayısıdır. Metalik arka tabaka kullanılarak soğurucu metamalzeme için, geçirgenlik ortadan kaldırılır ( $T = 0$ ), bu nedenle denklemden iletim göz ardı edilebilir. Bu nedenle, soğurma spektrumları,  $A = 1 - R$  formülü kullanılarak doğrudan yansıtma spektrumlarından hesaplanabilir.  $S_{11}$ 'in simülasyon sonuçları aşağıdaki şekilde gösterilmektedir.

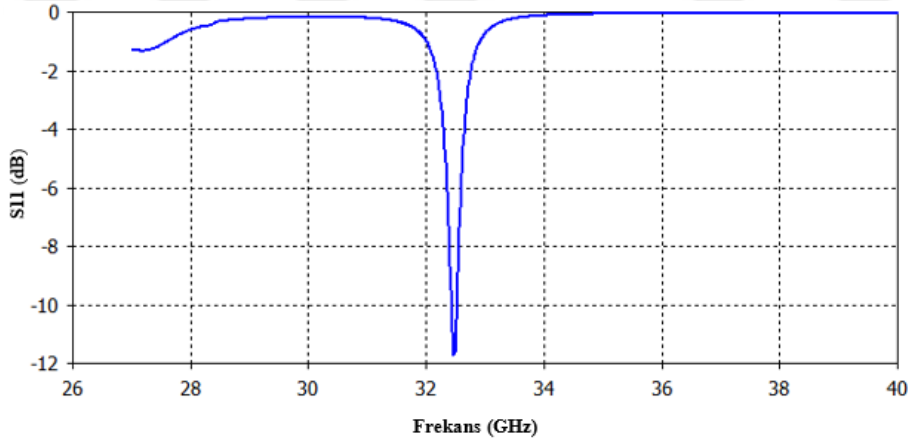


Şekil 4.4. Ku bandı için S<sub>11</sub> grafiği

Ku bandı için, 12 ila 18 GHz frekans aralığında, tasarlanan yapının mikrodalga sinyali iletim ve yansıtma verimliliğini belirten S<sub>11</sub> grafiği Şekil 4.4'de verilmiştir. Yansıtma katsayısı, dikey eksende 0 dB (tam yansıtma) ile -18 dB (minimum yansıtma) arasında değişim göstermektedir. Cihaz, S<sub>11</sub>'nin -18 dB (-17,42 dB) minimumuna ulaştığı 15 GHz'de önemli bir rezonans düşüşü sergiler ve bu da güçlü empedans eşleşmesini ve güç soğurulmasını, yani yansıtmanın çok az olduğunu gösterir. 12,5 GHz civarında, yaklaşık -4 dB'de daha sığ bir düşüş ikincil bir rezonansı düşündürmektedir. Bu, tasarlanan yapının 12,5 GHz'de rezonansa girmeye başladığını ve gelen enerjinin bir kısmının yansıtılmak yerine soğurulmasına izin verdiğini gösterir.

12,5 GHz ve 15 GHz civarındaki dar bir bantta yer alan rezonans bölgelerinin dışında, zayıf empedans eşleşmesinin etkisi ile  $S_{11}$  değerleri 0 dB'ye yaklaşır ve gelen gücün tamamına yakın bir kısmı geri yansıtılır.

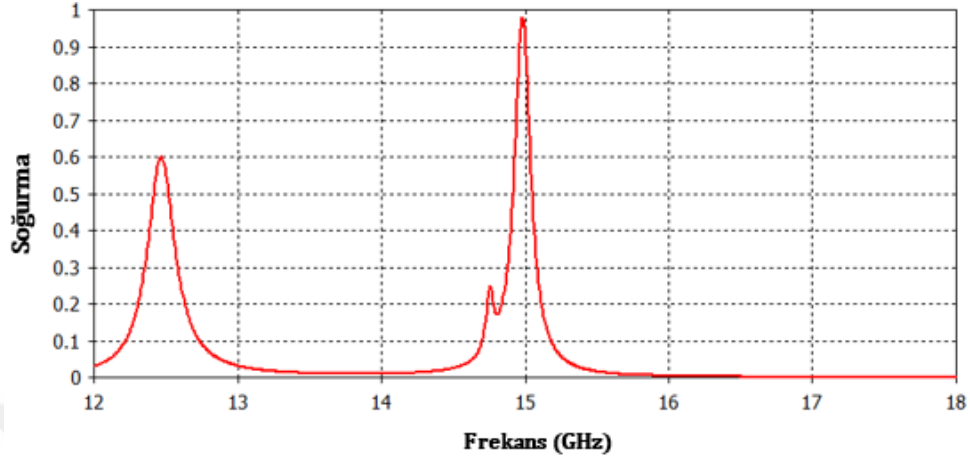
15 GHz'de oluşan rezonans bölgesinde yansıma en aza inmiştir, yansımanın -10 dB'nin altına düştüğü frekans bandı bant genişliği olarak tanımlanabilir. Şekil 4.4 dikkate alındığında,  $S_{11}$  için bant genişliğinin yaklaşık olarak 200 MHz olduğu anlaşılmaktadır. Şekil 4.4 de verilen grafikte  $S_{11}$ 'in -17,42 dB'ye düşmesi, soğurucunun empedansının serbest uzayın empedansı ile eşleştirilmesiyle elde edilen neredeyse mükemmel soğurmaya gösterir ( $Z_0 \approx 377 \Omega$ ). Ayrıca, çizilen  $S_{11}$  eğrisi, bant genişliğinin 200 MHz (-10 dB'de 14,9 ile 15,1 GHz) olarak tahmin edildiği 15 GHz'de dar bantlı bir rezonansı doğrular; bu da sağlanan  $S_{11}$  grafiğiyle tutarlıdır. Bu bant genişliği oldukça dardır ve rezonans davranışlarından dolayı metamalzeme soğurucularının tipik bir özelliğidir. Uydu iletişimde, Ku-bant kanallarına genellikle transponder başına 36 MHz ila 72 MHz bant genişlikleri tahsis edilir. Bu 200 MHz bant genişliği, birden fazla kanalı kapsayabilir ve bu da soğurucuyu, 15 GHz merkezli küçük bir kanal aralığındaki girişimi azaltmak ve daha geniş bir aralıktaki sinyalleri soğurma konusunda etkili hale getirir.



Şekil 4.5. Ka-bandı için  $S_{11}$  grafiği

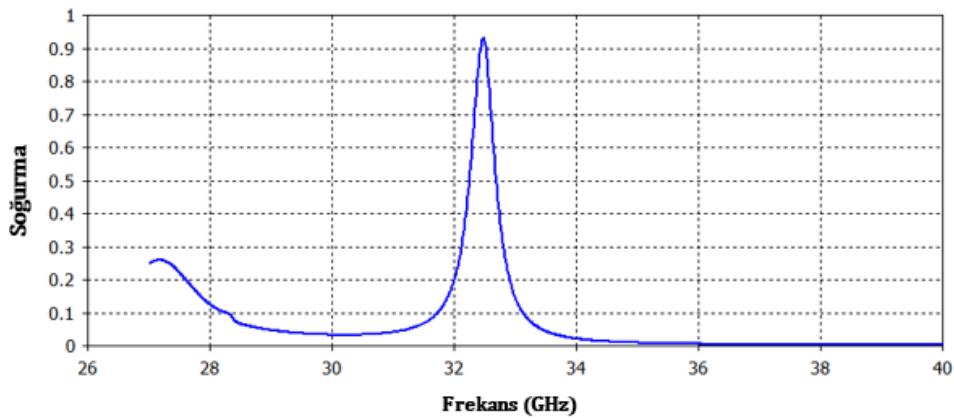
Ka-bandı için  $S_{11}$  grafiği, 26,5 ila 40 GHz arasında giriş yansıma katsayısını gösterir ve bu, cihazın mikrodalga sinyal işleme verimliliğini gösterir; dikey eksen 0 dB (tam yansıma) ile -12 dB (düşük yansıma) arasında değişir. 32,47 GHz'de önemli bir rezonans düşüşü gözlemlenir; burada  $S_{11}$ , -12 dB'ye yaklaşır ve bu da güçlü empedans eşleşmesi ve güç soğurulmasını, yani çok az yansımayı gösterir.  $S_{11}$ 'nin -10 dB'nin altında olduğu aralık olarak tanımlanan bant genişliği, yaklaşık 32,43,5 GHz'den 32,52 GHz'e

kadar uzanır ve 90 MHz'lik bir değerle sonuçlanır. Bu dar bant genişliği, cihazın Ka bandında belirli bir frekans için optimize edildiğini, muhtemelen 32,47 GHz'de hassas empedans eşleşmesine ihtiyaç duyan bir uygulama için optimize edildiğini gösteriyor.



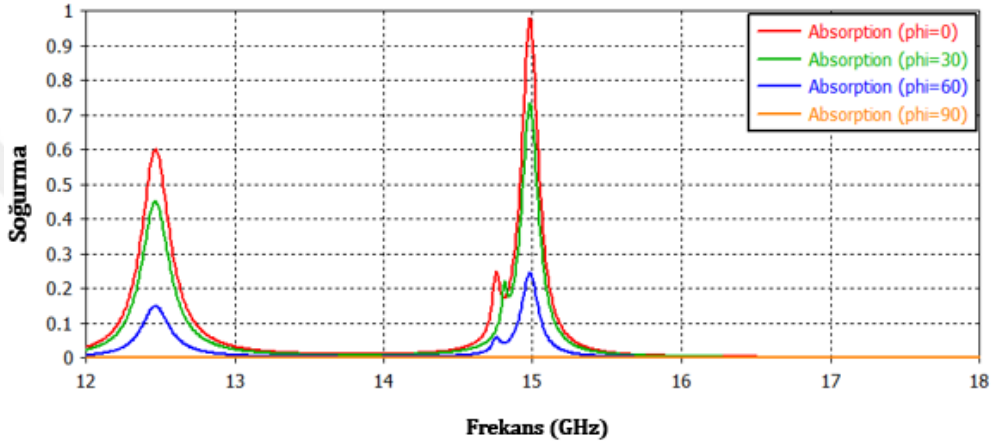
Şekil 4.6. Ku bandı için soğurma grafiği

Şekil 4.6 de görüldüğü gibi, soğurmanın tepe değerinin yaklaşık 1 olduğu 15 GHz'de elde edilen soğurma, Şekil 4.4'te verilen grafikte görüldüğü gibi 15 GHz'deki  $S_{11}$  grafiğinde gözlemlenen -17,42 dB değeriyle tutarlı olduğu görülmektedir. Burada elde edilen %98,4'lük soğurma, neredeyse mükemmel empedans eşleşmesinden kaynaklanmaktadır; yani, rezonans frekansında gelen elektromanyetik enerjinin neredeyse tamamının soğurulduğu anlamına geliyor. Bu çalışmada tasarlanan, Rogers RT5870 alt yapısı üzerindeki DSRR yapısının, Ku-bandında uydu haberleşmesi için belirlenmiş rezonansına göre 15 GHz'de gelen gücün neredeyse tamamını soğuracak şekilde tasarlandığını göstermektedir.



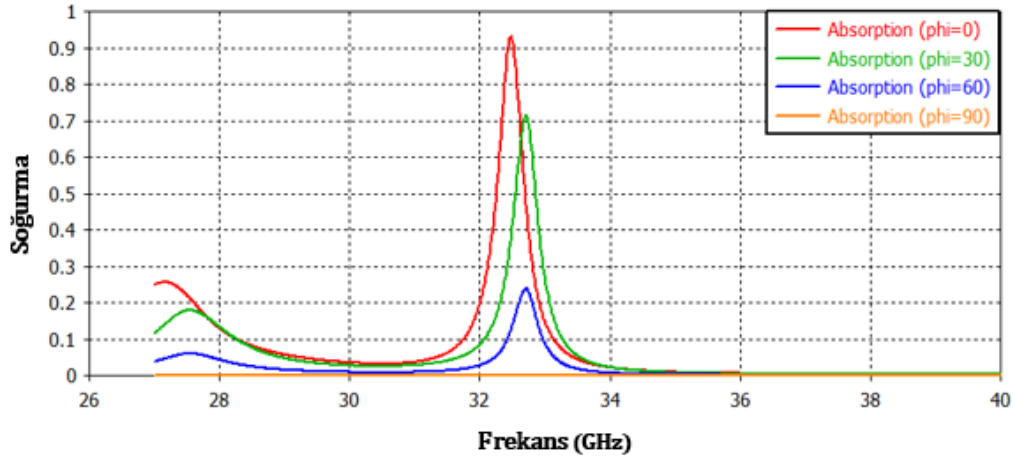
Şekil 4.7. Ka-bandı için soğurma grafiği

Şekil 4.7'de görüldüğü gibi, soğurmanın tepe değerinin 1 civarında olduğu 32.47 GHz'de elde edilen soğurma, Şekil 4.5'te verilen grafikte görüldüğü gibi 32.47 GHz'deki  $S_{11}$  grafiğinde gözlenen -11.71 dB değeriyle tutarlıdır. Burada elde edilen %93'lük soğurma neredeyse mükemmel bir empedans eşleşmesiyle sonuçlanmakta, yani rezonans frekansındaki gelen elektromanyetik enerjinin neredeyse tamamı soğurulmaktadır. Bu çalışma, Rogers RT5870 alt yapısındaki DSRR yapısının, Ka-bandında uydu haberleşmesi için belirlenen rezonansına göre 32.47 GHz'de gelen gücün neredeyse tamamını soğuracak edecek şekilde tasarlandığını göstermektedir.



Şekil 4.8. Ku bandında normal gelişte (incidence) farklı polarizasyon açıları ( $\phi$ ) için soğurma sonuçları.

Soğurmanın azimut düzlemde farklı geliş açıları ( $\phi = \text{phi}$ ) altında operasyonel kararlılığını araştırmak için, soğurma sonuçları simüle edilmiş ve Şekil 4.8'da gösterilmiştir. Grafikte 12,8 GHz ve 15 GHz frekans bantları civarında iki belirgin soğurma zirvesi görülmektedir.  $\Phi$  açısı  $0^\circ$  'den  $90^\circ$  'ye çıktıkça, soğurma büyüklüğü önemli ölçüde azalır.  $\phi=0^\circ$  'de, maksimum soğurma 15GHz frekans zirvesinde neredeyse 1,0 'a ulaşırken,  $\phi = 90^\circ$  'de soğurma tüm frekanslarda neredeyse tamamen bastırılır. Bu sonuçlar, soğurmanın performansının  $\phi$  açısı değişimine karşı oldukça hassas olduğunu göstermektedir.

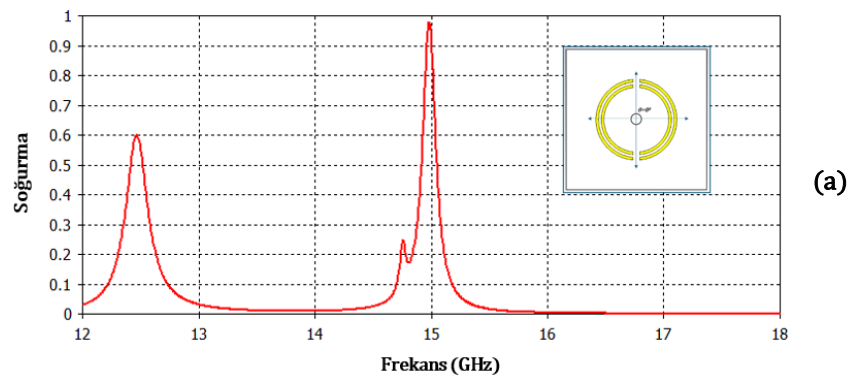


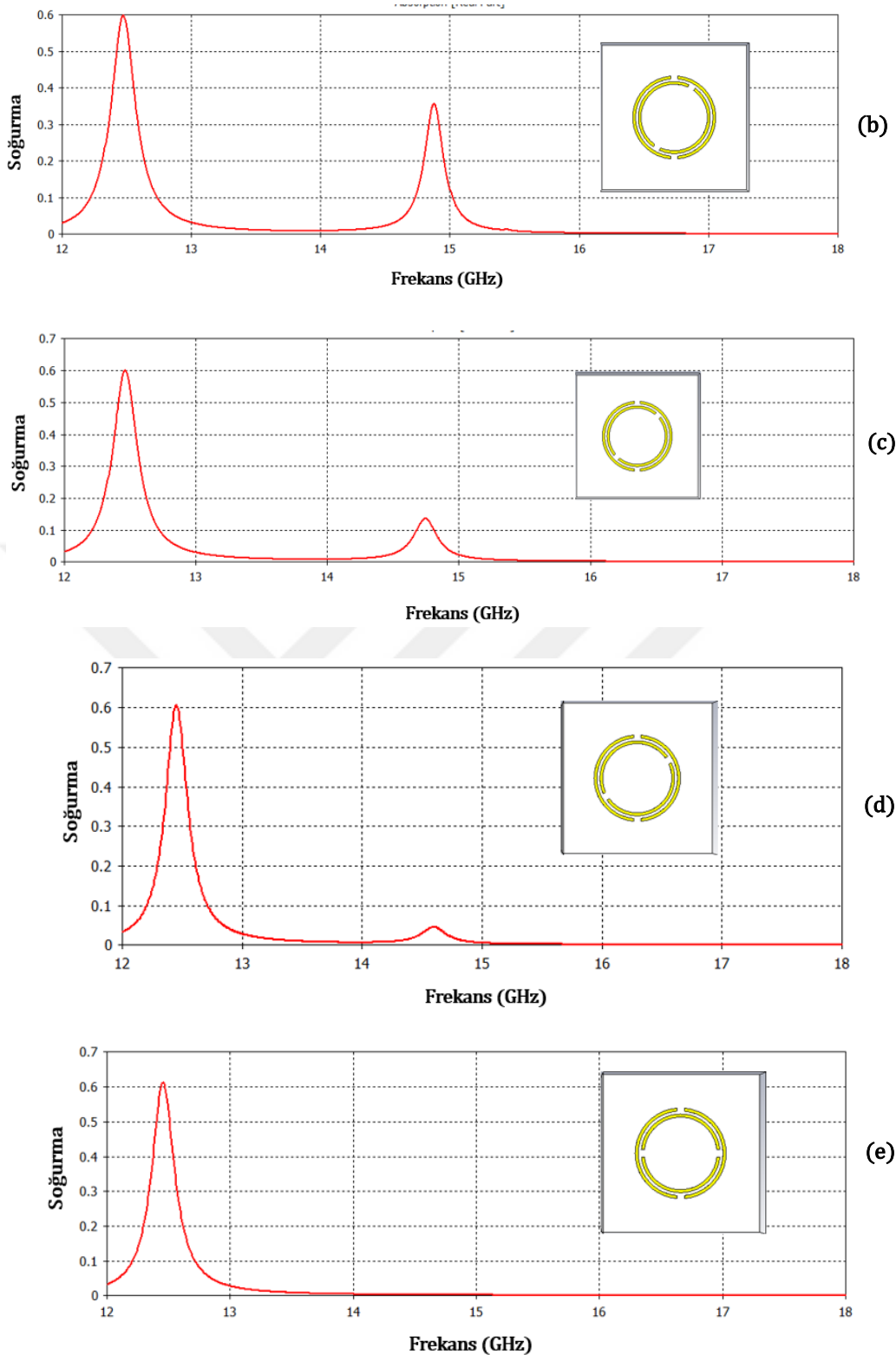
Şekil 4.9. Ka-bandında normal gelişte farklı polarizasyon açıları ( $\phi$ ) için soğurma sonuçları.

Soğurma için tasarlanan yapının farklı azimut geliş açıları ( $\phi = \text{phi}$ ) altında operasyonel kararlılığını araştırmak için, soğurma sonuçları simüle edilmiş ve Şekil 4.9'da gösterilmiştir. Grafik, 32,47 GHz frekans bantları civarında belirgin soğurma tepeleri göstermektedir.  $\Phi$  açısı  $0^\circ$ 'den  $90^\circ$ 'ye arttıkça, soğurma büyüklüğü önemli ölçüde azalır.  $\phi = 0^\circ$ 'de, maksimum soğurma 32,47GHz frekans tepe noktasında neredeyse 1,0'a ulaşırken,  $\phi = 90^\circ$ 'de, soğurma tüm frekanslarda neredeyse tamamen bastırılır. Bu sonuç, tasarlanan yapının performansının  $\phi$  açısı değişimine karşı oldukça hassas olduğunu göstermektedir.

#### 4.3.1. Açısal rotasyonun soğurmaya etkisi

Bir birim hücrenin soğurma spektrumlarının dönüş açılarına nasıl tepki verdiğinin incelenmesi, geniş kapsamlı uygulamalara sahip kritik bir araştırma alanıdır. Soğurmadaki çeşitlilik, anten tasarımı, gizleme teknolojileri, metalmalzemeler ve enerji hasadı gibi alanları etkileyen elektromanyetik dalga etkileşimlerine dair değerli öngörüler sağlar.



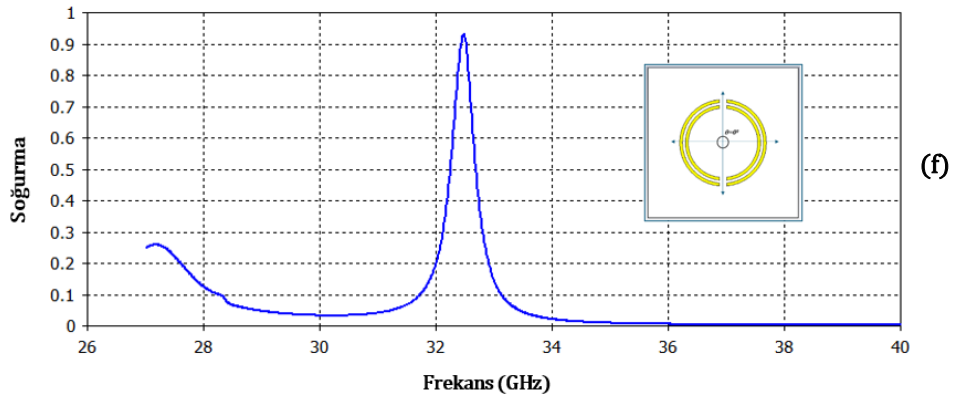


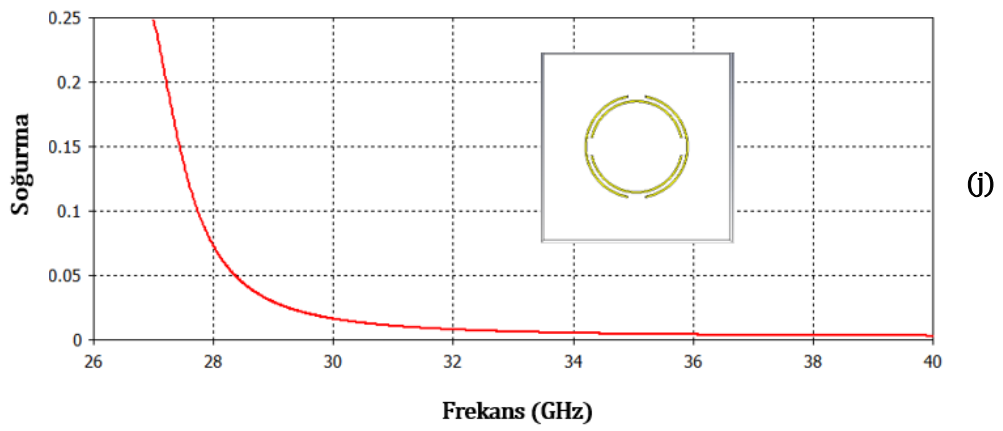
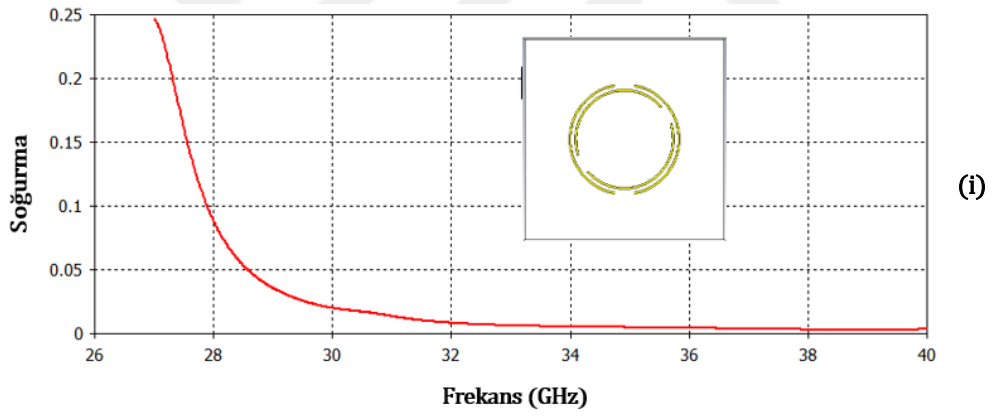
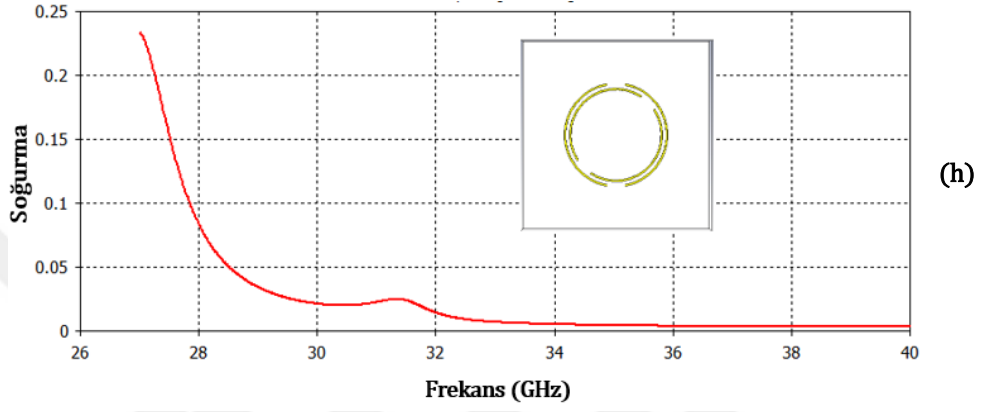
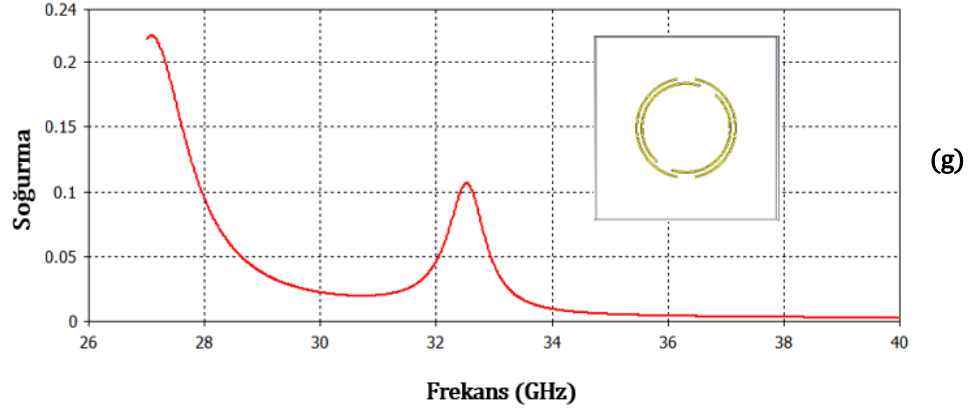
Şekil 4.10. Ku-bandı için açılal rotasyon (a)  $\theta = 0^\circ$  (b)  $\theta = 30^\circ$  (c)  $\theta = 45^\circ$  (d)  $\theta = 60^\circ$  (e)  $\theta = 90^\circ$

Ku-bandı için, dıştaki çember sabit tutularak, içteki çemberin  $\theta = 0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$  ve  $90^\circ$  dönüş açılarıyla döndürülmesi sonucunda elde edilen soğurma spektrumları Şekil 4.10'da görülmektedir. Birim hücre,  $\theta = 0^\circ$ 'da güçlü rezonans gösterir, 12,5 ve 15 GHz civarında belirgin tepe noktalarıyla, yaklaşık 0,6 ve 0,98'lik maksimum soğurma değerlerine ulaşır. Açı  $30^\circ$  ve yukarısına çıktıkça, ilk rezonans frekansı hafifçe sola kayar (küçülür) ve genliği nispeten sabit kalır. Ancak, 15 GHz'de olan ikinci rezonans daha fazla etkilenir; rezonans frekansı küçülürken genlik de açığa bağlı olarak hızlı bir şekilde küçülür,  $90^\circ$ 'ye yakın sıfır seviyelerine düşer. Bu durum azalan kuplaj verimliliğini ve soğurmayı yansıtır, minimum etkili alan (elektrik, manyetik) ve değişen polarizasyon etkilerinden kaynaklanır.

Açısal değişime karşı bağımlılık, birim hücre geometrisinin dalganın elektrik ve manyetik bileşenleriyle etkileşimindeki değişikliklerden kaynaklanır. Bu davranışın önemi, açılar arasında tutarlı performansın esas olduğu anten tasarımı ve yüksek soğurmanın radar tespitini en aza indirdiği gizleme teknolojisi gibi pratik uygulamalara kadar uzanır. Ayrıca, gelişmiş mercekler veya gizleme teknolojisinde kullanılan cihazlar için metalmazeme geliştirmede ve dinamik ortamlarda verimliliği hedefleyen enerji toplama sistemlerinde ana rol oynar.

Ka-bandı için dıştaki çember sabit tutularak, içteki çemberin  $\theta = 0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$  ve  $90^\circ$  dönüş açılarıyla döndürülmesi sonucunda elde edilen soğurma spektrumları elde edilmiş ve sonuçlar Şekil 4.11'de verilmiştir. Ku bandında elde edilen sonuçlara benzer şekilde, 32,5 GHz'de olan rezonans frekansı açı arttıkça küçülürken genlik de açığa bağlı olarak hızlı bir şekilde küçülür,  $90^\circ$ 'ye yakın sıfır seviyelerine düşer.

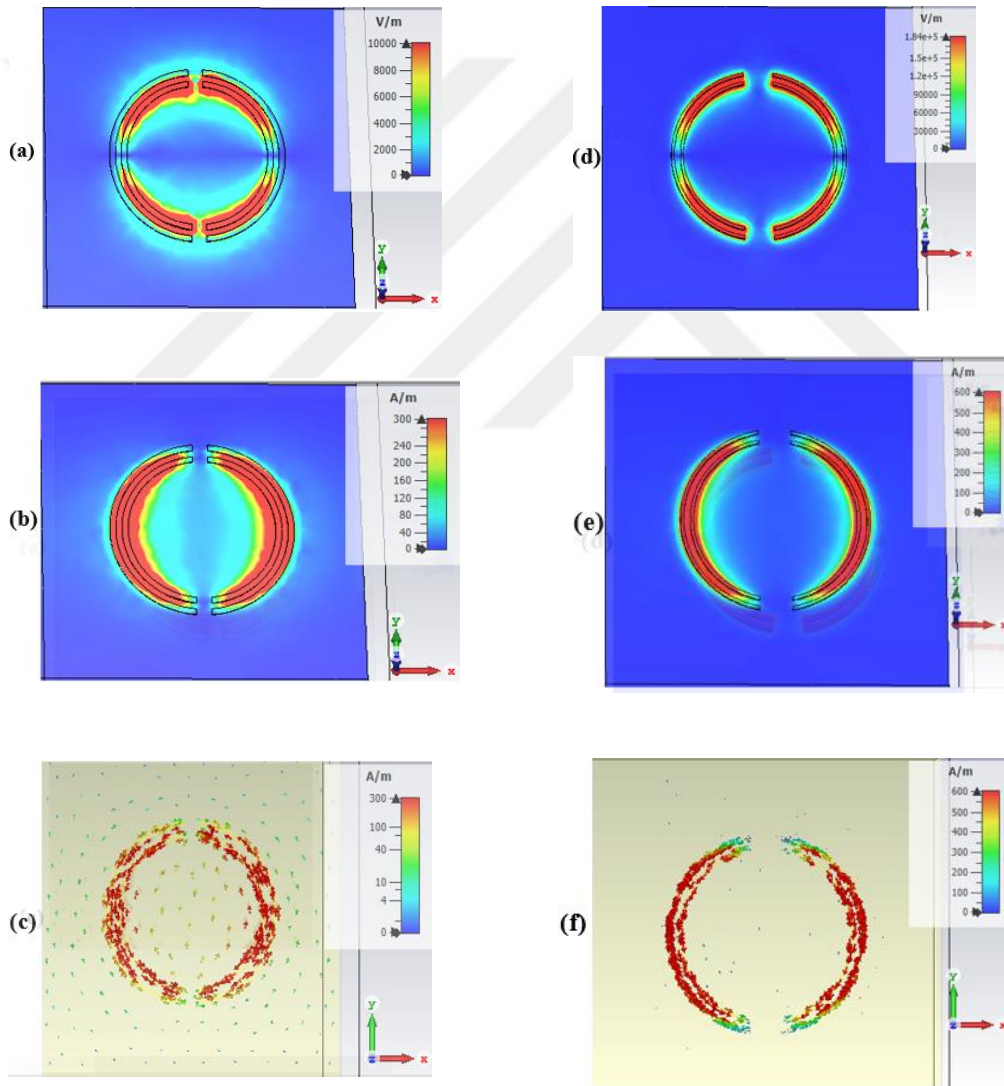




Şekil 4.11. Ka-bandı için açıl rotasyon (f)  $\theta = 0^{\circ}$  (g)  $\theta = 30^{\circ}$  (h)  $\theta = 45^{\circ}$  (i)  $\theta = 60^{\circ}$  (j)  $\theta = 90^{\circ}$

### 4.3.2. Soğurma mekanizmasının incelenmesi

Bu çalışmada ayrıca, özellikle elektromanyetik alan dağılımları ile yüzey akımı davranışı arasındaki ilişkiye vurgu yapılarak, enine elektrik (TE) mod yayılımından kaynaklanan soğurma mekanizması da araştırılmıştır. Çalışmada, TE modlarında, yani elektrik alanının boyuna bileşeninin olmadığına, elektrik (E) ve manyetik (H) alan dağılımlarının özel desenleriyle birleşerek genel soğurma özelliklerini nasıl etkilediği analiz edilmektedir. Diğer taraftan, TE modu altında 15 GHz ve 32.47GHz rezonans frekanslarında DSRR yapısının yüzey akımı dağılımları da araştırılmıştır.



**Şekil 4.12.** Ku-bantlı TE modu için 15 GHz'de simülasyon sonucu. (a) E-alan dağılımları. (b) H-alan dağılımları. (c) yüzey akımı dağılımları, Ka-bantlı TE modu için 32,47 GHz'de simülasyon sonucu. (d) E-alan dağılımları. (e) H-alan dağılımları. (f) yüzey akımı dağılımları.

Şekil 4.12 (a)'da, mikrodalgaya maruz bırakılan bir DSRR yapısının elektrik alan dağılımı, 15 GHz'de %98,4'lük maksimum soğurma gösteren TE modu için gösterilirken, şekil 4.12(d)'de 32,47 GHz'de %93'lük maksimum soğurma gösterilmektedir. E-alan dağılımı, elektrik alanının rezonansa birim hücrenin belirli bölgelerinde nasıl yoğunlaştığını göstermektedir. Simüle edilmiş grafikte, elektrik alanı, elektrik potansiyel farkının maksimum olduğu DSRR boşlukları boyunca oldukça yoğunlaşmıştır. Bu yoğunlaşma, elektrik dipol rezonansı ile sonuçlanan güçlü kapasitif etkilerin göstergesidir. Arttırılmış elektrik tepkisi, metamalzemenin etkin elektrik geçirgenliği ( $\epsilon$ ) artırır. Manyetik rezonansla birlikte, elektrik alanı, kayıplı dielektrik alt katman içinde etkili empedans uyumu ve enerji dağılımı sağlayarak soğurmayı en üst düzeye çıkarmada hayati bir rol oynamaktadır.

Benzer şekilde, Şekil 4.12 (b)'deki H-alan dağılımı, TE'de mikrodalga maruziyeti altında DSRR yapısının birim hücresi boyunca manyetik alan yoğunluğunu gösterir ve 15 GHz'de %98,4'lük bir tepe soğurma değerine ulaşırken, Şekil 4.12 (e) 32,47 GHz'de %93'lük bir tepe soğurma değerine ulaşmaktadır. Simüle edilmiş grafikte, manyetik alan, özellikle iç kenarlara yakın ve halkanın etrafında olmak üzere, çift bölünmüş halka rezonatörlerin (DSRR'ler) dairesel halkalarının içinde güçlü bir şekilde lokalizedir. Bu güçlü lokalizasyon, gelen dalga manyetik alanının dolaşan akımları indüklediği ve rezonatörler içinde manyetik enerji depolanmasına yol açtığı manyetik rezonansı gösterir. Bu rezonans, yapının etkin manyetik geçirgenliğini ( $\mu$ ) artırır ve serbest uzayla empedans eşleşmesi elde etmek için gereklidir. Dizi boyunca alan simetrisi, tüm birim hücreler boyunca tutarlı rezonans davranışını doğrular.

Ultra ince metamalzeme soğurucunun soğurma mekanizmasını daha ayrıntılı bir şekilde açıklamak için, 15 GHz'deki yüzey akımlarının dağılımı Şekil 4.12(c)'de ve 32,47GHz'deki dağılım Şekil 4.12(f)'de gösterilmektedir. Gelen elektromanyetik dalga elektrik alanı bileşeni yapı ile etkileşime girdiğinde, serbest elektronların hareketini indükleyerek yüzey akımları oluşturur. Bu hareket, elektrik alanı boyunca yüzey yükü salınımlarına neden olarak manyetik bir dipol momenti oluşturur. Bu dipol moment daha sonra rezonans frekansında sinyal soğurulmasına yol açar. Benzer şekilde, en güçlü yüzey akımları, bölünmüş halka rezonatörlerin (DSRR'ler) kenarları boyunca gözlenir ve bu da gelen dalga manyetik bileşeni tarafından uyarılan endüktif döngüleri gösterir. Bu döngüler, soğurucunun etkili manyetik tepkisini artıran manyetik rezonanslar oluşturur. Rezonans frekanslarındaki (15 GHz) yüzey akımı dağılımı Şekil 4.12(c)'de ve 32,47 GHz ise Şekil 4.12(f)'de gösterilmektedir.

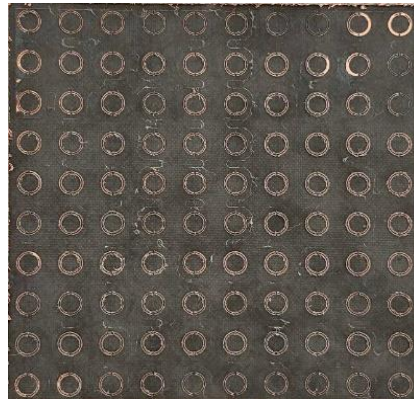
Üst tabaka üzerine tasarlanmış çift bölünmüş halka rezonatör yamaların soğurucu bantlara katkıda bulunduğu anlaşılmaktadır. Yapı üzerindeki yüzey akım yoğunluğu, belirli bir frekansta, yapının o bölümünün soğurmaya ne kadar duyarlı olduğunu gösterir (Smith ve ark., 2000). Bu akım dağılımı dikkate alındığında, MA yapının üst tabakasının frekans seçici yüzey gibi davrandığı düşünülebilir.

Dincer ve ark. (2013)'e göre, elektriksel tepki paralel yönde dönen yüzey akımlarına neden olurken, manyetik tepki anti-paralel yöndeki dönen yüzey akımlarına sebep olur. Yüzeyde indüklenen akımlar, gelen elektromanyetik dalganın elektrik alanı ve manyetik alan tepkileriyle birleşmesine neden olur ve bu da yerelleştirilmiş EM alanının artışı için rezonans frekanslarını belirler. Empedans eşleşme koşulları sağlandığında, elektriksel ve manyetik rezonans eş zamanlı olarak meydana gelerek, gelen EM dalganın tamamen soğurulmasına yol açar.

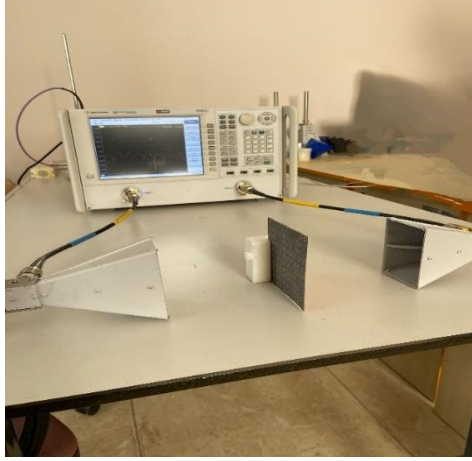
#### 4.4. Ölçüm Düzeneği ve Elde Edilen Sonuçlar

Önerilen soğurucu üretilmiş ve üzerinde ölçümler gerçekleştirilmiştir. Prototip, optimize edilmiş geometrik parametrelere dayalı bir LPKF ProtoMat E33 cihazı kullanılarak üretilmiştir ve üretilen yapı Şekil 4.13(a)'da gösterilmiştir. Ka-bandının kompakt boyutları nedeniyle önemli imalat zorlukları yaşanmıştır. LPKF ProtoMat E33 cihazı kullanılarak yapılan üretimde rezonatör katmanında bulunan ince iletkenlerde kırılmalar yaşanmıştır. Bu nedenle, üretimde, daha uygun boyutları nedeniyle Ku-bandı seçilmiştir; bu sayede daha sorunsuz ve hassas imalat imkanı sağlanmıştır. Üretilen prototipin boyutları 104,4 mm × 104,4 mm × 0,51 mm'dir (10 × 10 birim hücre) ve her iki tarafında 0,035 mm bakır kalınlığına sahip bakır kaplı RT5870 alt tabaka kullanılmıştır. Yansıma katsayısı ölçümleri, şekil 4.13(b)'de gösterildiği gibi horn anten ve bir mikrodalga vektör ağ analizörü kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

(a)

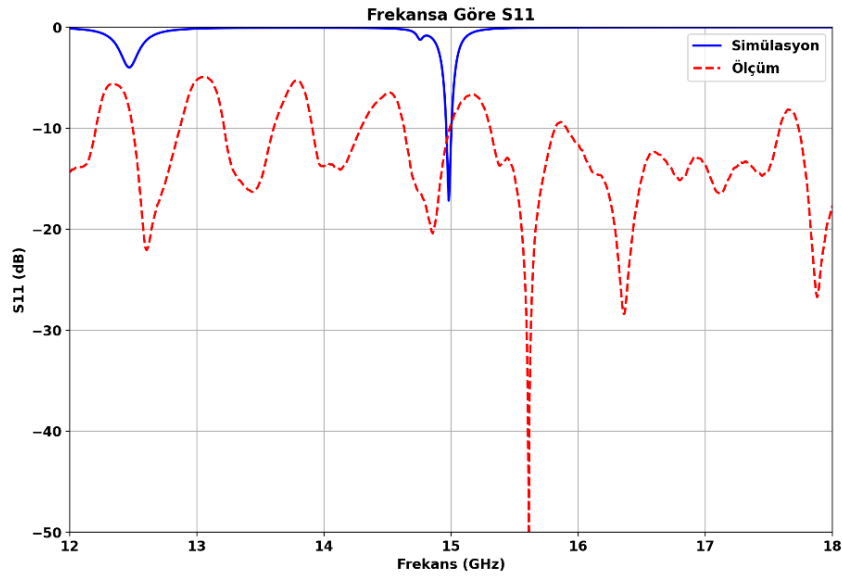


(b)



Şekil 4.13. (a) Üretilen 10x10 yapı ve b) ölçüm cihazı

Horn anten, Ku-bandında 12-18 GHz arasındaki mikrodalga frekanslarında radyasyon yayma kapasitesine sahiptir. Ölçülen yansımaya katsayısı ( $S_{11}$ ) 15.61GHz'de minimumuna ulaşırken, simüle edilen yansımaya katsayısı 14.98 veya 15 GHz rezonansında tanımlanmıştır, Şekil 4.14'de gösterilmiştir. Şekil 4.14'den simüle edilmiş yapının, üretilen tasarıma (99,9%) kıyasla daha küçük bir soğurmaya (98,4%) sahip olduğu görülebilir. Burada görülen küçük farkın ağırlıklı olarak üretim ve ölçüm hatalarından kaynaklandığı, ayrıca ölçümde kullanılan yapıda bulunan sınırlı sayıda birim hücrenin etkisiyle meydana gelen kırılma saçılmanın da etkili olduğu söylenebilir.



Şekil 4.14. Gelen sinyalin yansımaya değerleri

## 5. SONUÇLAR

Bu tez, Ku-bant frekans aralığında uydu iletişimi için bir metamateryal mükemmel soğurucu (MPA) olarak tasarlanmış çift bölünmüş halka rezonatör (DSRR) birim hücrelerinin tasarımı, simülasyonu ve deneysel araştırması üzerine kurgulanmıştır. Simülasyon çalışmaları, FIT tabanlı bir simülasyon programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. İki tarafı bakır kaplanmış, maliyet etkin bir Rogers RT5870 alt tabakasının seçilmesi, simüle edilen  $S_{11}$  (Ku/Ka bantlar) yansıma katsayısının -17,42 dB ve -12dB'ye düşmesiyle gösterildiği gibi, serbest alanla iyi bir empedans uyumuna yol açtı; bu da 98,4% ve 93%'lük bir soğurma verimliliğine karşılık geliyor. -10 dB'de 14,9 GHz ile 15,1 GHz arasında not edilen tasarımın 200 MHz ve 90 MHz'lik dar bant genişliği, standart 36–72 MHz Ku-bant kanal tahsisleriyle etkili bir şekilde örtüşmekte ve elektromanyetik girişim azaltma ve gizleme teknoloji uygulamaları için uygulanabilirliğini doğrulamaktadır.

İlave olarak, soğurucunun polarizasyon bağımlılığı araştırılmış ve çeşitli geliş açıları ve polarizasyon durumlarında yüksek kararlılık gösterdiği görülmüştür  $0^\circ$  ile  $90^\circ$  arasındaki polarizasyon duyarlılığının araştırılması amacıyla yapılan çalışmalar, yön duyarlılığını kanıtlamış olup,  $0^\circ$  de en yüksek soğurma ve  $90^\circ$  de önemli bir azalma ortaya koymuştur. Ayrıca, yüzey akımı ve elektromanyetik alan dağılımlarının analizi, yüksek soğuruculuk seviyelerine ulaşmada manyetik akı kuplajı ve elektrik dipol rezonansının rollerini vurgulayarak, altta yatan fiziksel mekanizmalar hakkında perspektifler sunmaktadır. Sonuçlar, DSRR' nin 15 GHz ve 32.47 GHz'de güçlü rezonans göstererek TE modu altındaki soğuruculuk mekanizmasını doğrulamıştır.

LPKF ProtoMat E33 kullanılarak üretilen  $10 \times 10$  DSRR prototipi üzerinde horn anten ve vektör network analizörü ile gerçekleştirilen deneysel doğrulama ölçümlerinin simülasyon sonuçları ile uyum içerisinde olduğu, böylece simülasyon sonuçlarını doğruladığı görülmüştür. 15.61 GHz'de ölçülen  $S_{11}$  minimumu, yaklaşık 15 GHz'lik simüle edilmiş aralıktan biraz sapmasına rağmen, simüle edilmiş %98.4'lük oranı biraz aşarak %99.9'lük bir soğurma oranına ulaştı. Bu sonuçlara göre, önerilen MA'nın yüksek soğurma verimliliği, dar bant genişliği ve polarizasyon duyarsızlığı, onu elektromanyetik parazitleri azaltmak ve sinyal güvenliğini iyileştirmek için uygun bir aday haline getiriyor. Bu çalışma, gelişmiş elektromanyetik kalkanlama, gizleme teknolojileri ve anten sistemi entegrasyonunun geliştirilmesi açısından önem taşımaktadır.

## 5.1 Gelecekteki Çalışmalar

Gelecekteki çalışmalar uydu ve mikrodalga uygulamaları için çift bölünmüş halka rezonatörü (DSRR) metamateryale soğurucusunda çeşitli iyileştirmeler önerilmektedir. Önerilen planlar, dar bant genişliği, polarizasyon hassasiyeti, sabit frekans ve üretimde ölçeklenebilirlik gibi sınırlamaları ele alırken, 200 MHz/90 MHz bant genişliğiyle 15 GHz ve 32.47 GHz 'de neredeyse mükemmel soğurma dahil olmak üzere mevcut güçleri iyileştirmeyi amaçlamaktadır. Bu sınırlamaları iyileştirmek için:

- ✓ **Geniş Bant Soğurma:** Mevcut 200 MHz/90 MHz bant genişliğini genişletmek için çoklu rezonatör tasarımlarını veya gradyan indeksli malzemeleri keşfederek geniş bant soğurma elde etmek, daha fazla Ku-bant kanalının kapsanmasını sağlamak.
- ✓ **Polarizasyon Bağımsızlığı:** Dairesel halkalar gibi simetrik birim hücreler aracılığıyla polarizasyon bağımsızlığını sağlamak, 90°'de düşen mevcut 0° tepe soğurma değerinin ötesinde çok yönlü performansı iyileştirmek.
- ✓ **Ayarlanabilirlik:** Grafen veya VO<sub>2</sub> gibi aktif malzemeleri entegre ederek ayarlanabilirliği sağlamak, ayarlanabilir uydu iletişim ihtiyaçları için dinamik frekans ayarlamalarına izin vermek.
- ✓ **Ölçeklenebilir Üretim:** Mürekkep püskürtmeli baskı gibi maliyet etkin yöntemleri araştırarak ölçeklenebilir üretimi iyileştirmek, mevcut 10 × 10 prototip sınırlamalarının ötesinde büyük ölçekli üretimi kolaylaştırmak.

## 6. KAYNAKLAR

- Abdulkarim, Y. I., Deng, L., Luo, H., Huang, S., Karaaslan, M., Altintas, O., Bakir, M., Muhammadsharif, F. F., Awl, H. N., Sabah, C., & Al-Badri, K. S. L. (2020). Design and study of a metamaterial based sensor for the application of liquid chemicals detection. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(5), 10291–10304. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.07.034>
- Akgol, O., Bağmancı, M., Karaaslan, M., & Ünal, E. (2017). Broad band MA-based on three-type resonator having resistor for microwave energy harvesting. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, 51(2), 134–149. <https://doi.org/10.1080/08327823.2017.1321928>
- Bağmancı, M., Akgöl, O., Özaktürk, M., Karaaslan, M., Ünal, E., & Bakır, M. (2019). Polarization independent broadband metamaterial absorber for microwave applications. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 29(1), 1–10. <https://doi.org/10.1002/mmce.21630>
- Bağmancı, M., Karaaslan, M., Ünal, E., Akgol, O., Karadağ, F., & Sabah, C. (2017). Broad-band polarization-independent metamaterial absorber for solar energy harvesting applications. *Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures*, 90(January), 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.physe.2017.03.001>
- Bakir, M., Karaaslan, M., Altıntaş, O., Bağmancı, M., Akdoğan, V., & Temurtaş, F. (2018). Tunable energy harvesting on UHF bands especially for GSM frequencies. *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, 10(1), 67–76. <https://doi.org/10.1017/S1759078717001325>
- Balanis, C. A. (2016). Antenna Theory Analysis and Design. In *John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, Canada*.
- Bilal, R. M. H., Baqir, M. A., Choudhury, P. K., Karaaslan, M., Ali, M. M., Altıntaş, O., & Rahim, A. A. (2021). Wideband Microwave Absorber Comprising Metallic Split-Ring Resonators Surrounded With E-Shaped Fractal Metamaterial. *IEEE Access*, 9, 121302–121304. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3108421>
- Buriak, I. A., Zhurba, V. O., Vorobjov, G. S., Kulizhko, V. R., Kononov, O. K., & Rybalko, O. (2016). Metamaterials: Theory, classification and application strategies (review). *Journal of Nano- and Electronic Physics*, 8(4). [https://doi.org/10.21272/jnep.8\(4\(2\)\).04088](https://doi.org/10.21272/jnep.8(4(2)).04088)
- Cai, W., & ShalaeV, V. (2010). Optical metamaterials: Fundamentals and applications. In *Springer, New York*. Springer New York. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1151-3>
- Choudhary, A., Pal, S., & Sarkhel, G. (2023). Broadband millimeter-wave absorbers: a review. In *International Journal of Microwave and Wireless Technologies* (Vol. 15, Issue 2, pp. 347–363). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/S1759078722000162>

- Chung, M., Jeong, H., Kim, Y. K., Lim, S., & Baek, C. W. (2022). Design and Fabrication of Millimeter-Wave Frequency-Tunable Metamaterial Absorber Using MEMS Cantilever Actuators. *Micromachines*, 13(8). <https://doi.org/10.3390/mi13081354>
- Dincer, F., Akgol, O., Karaaslan, M., Unal, E., & Sabah, C. (2014). Polarization angle independent perfect metamaterial absorbers for solar cell applications in the microwave, infrared, and visible regime. *Progress in Electromagnetics Research*, 144(November 2013), 93–101. <https://doi.org/10.2528/PIER13111404>
- Dincer, F., Karaaslan, M., Unal, E., & Sabah, C. (2013). Dual-Band Polarization Independent Meta- Material Absorber Based On Omega Resonator and Octa-Starstrip Configuration. In *Progress In Electromagnetics Research* (Vol. 141).
- Engheta, N. (2002). *Thin Absorbing Screens Using Metamaterial Surfaces*.
- Gangwar, K., Paras, Dr., & Gangwar, Dr. R. (2014). *Metamaterials: Characteristics, Process and Applications* (Vol. 4, Issue 1). <http://www.ripublication.com/aece.htm>
- Guo, Z., Liu, X., Li, C., Li, J., Cai, H., Fu, M., He, D., & Wang, Y. (2021). Near-perfect broadband metamaterial absorbers of truncated nanocones using colloidal lithography. *Optical Materials*, 119(June), 111352. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2021.111352>
- Hakim, M. L., Alam, T., Islam, M. T., Alsaif, H., & Soliman, M. S. (2023). Polarization-independent fractal square splits ring resonator (FSSRR) multiband metamaterial absorber/artificial magnetic conductor/sensor for Ku/K/Ka/5G (mm-Wave) band applications. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 210(January), 112545. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.112545>
- Hanif, A., Hakim, M. L., Alam, T., Islam, M. T., Alsaif, H., & Soliman, M. S. (2023). Polarization insensitive oblique incident angle stable ultra-thin nano ring resonator-based metamaterial absorber for visible and near-infrared region applications. *Optics and Laser Technology*, 164(March), 109494. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2023.109494>
- Ji, S., Jiang, C., Zhao, J., Yang, J., Wang, J., & Dai, H. (2019). An ultra-thin dual-band wide-angle polarization-insensitive metamaterial absorber with near-unity absorbance. *Current Applied Physics*, 19(11), 1164–1171. <https://doi.org/10.1016/j.cap.2019.07.004>
- 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(January), 31–38. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2017.01.043>
- Khanna, Y., & Awasthi, Y. K. (2020). Wideband ultra-thin metamaterial absorber for Ku K-band applications. *2020 7th International Conference on Signal Processing and Integrated Networks, SPIN 2020*, 1, 367–371. <https://doi.org/10.1109/SPIN48934.2020.9070938>

- Landy, N. I., Sajuyigbe, S., Mock, J. J., Smith, D. R., & Padilla, W. J. (2008b). Perfect metamaterial absorber. *Physical Review Letters*, *100*(20). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.100.207402>
- Liu, H., Xie, M., Ai, Q., & Yu, Z. (2021). Ultra-broadband selective absorber for near-perfect harvesting of solar energy. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, *266*, 107575. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2021.107575>
- Marklein, R. (2002). The Finite Integration Technique as a General Tool to Compute Acoustic, Electromagnetic, Elastodynamic, and Coupled Wave Fields. *IEEE Ant. Wireless. Prop. Lett.*
- Marqués, Ricardo., Martín, Ferran., & Sorolla, Mario. (2008). *Metamaterials with negative parameters: theory, design, and microwave applications*. Wiley-Interscience.
- Mendhe, S. E., & Kosta, Y. P. (2011). Metamaterial properties and Applications. *International Journal of Information Technology*, *4*(1), 85–89.
- Nickpay, M. R., Danaie, M., & Shahzadi, A. (2021). A wideband and polarization-insensitive graphene-based metamaterial absorber. *Superlattices and Microstructures*, *150*(December 2020), 106786. <https://doi.org/10.1016/j.spmi.2020.106786>
- Ning, J., Chen, K., Zhao, W., Zhao, J., Jiang, T., & Feng, Y. (2022). An Ultrathin Tunable Metamaterial Absorber for Lower Microwave Band Based on Magnetic Nanomaterial. *Nanomaterials*, *12*(13). <https://doi.org/10.3390/nano1213213>
- Nowak, M. (2021). Metamaterial-based sub-microwave electromagnetic field energy harvesting system. *Energies*, *14*(12). <https://doi.org/10.3390/en14123370>
- Padilla, W. J., & Fan, K. (2022). Metamaterial Electromagnetic Wave Absorbers. *Synthesis Lectures on Electromagnetics*, *3*(1), 1–199. <https://doi.org/10.2200/s01133ed1v01y202109ema004>
- Pendry, J. B. (2000). Negative Refraction Makes a Perfect Lens. *Physical Review Letters*.
- Pendry, J. B., Schurig, D., & Smith, D. R. (2006a). Controlling Electromagnetic Fields. *Science*, *312*(5781), 1777–1780. <https://doi.org/10.1126/science.1126493>
- Rahimi, Z. (2011). *The Finite Integration Technique (FIT) and the Application in Lithography Simulations*. Als Dissertation genehmigt von der Technischen Fakultät der Universität Erlangen-Nürnberg.
- Saadeldin, A. S., Sayed, A. M., Amr, A. M., Sayed, M. O., Hameed, M. F. O., & Obayya, S. S. A. (2023a). Broadband polarization insensitive metamaterial absorber. *Optical and Quantum Electronics*, *55*(7). <https://doi.org/10.1007/s11082-023-04881-y>

- Saadeldin, A. S., Sayed, A. M., Amr, A. M., Sayed, M. O., Hameed, M. F. O., & Obayya, S. S. A. (2023b). Wideband ultrathin and polarization insensitive metamaterial absorber for Ku-band applications. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 34(26), 1–11. <https://doi.org/10.1007/s10854-023-11157-4>
- Sievenpiper, D., Zhang, L., Jimenez Broas, R. F., Alexöpolous, N. G., & Yablonovitch, E. (1999). High-impedance electromagnetic surfaces with a forbidden frequency band. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 47(11), 2059–2074. <https://doi.org/10.1109/22.798001>
- Singh, H., Mittal, N., Gupta, A., Kumar, Y., Woźniak, M., & Waheed, A. (2021). Metamaterial integrated folded dipole antenna with low sar for 4g, 5g and nb-iot applications. *Electronics (Switzerland)*, 10(21). <https://doi.org/10.3390/electronics10212612>
- Smith, D. R., Padilla, W. J., Vier, D. C., Nemat-Nasser, S. C., & Schultz, S. (2000). *Composite Medium with Simultaneously Negative Permeability and Permittivity*.
- Smith, D. R., Pendry, J. B., & Wiltshire, M. C. K. (2004). Metamaterials and negative refractive index. In *Science* (Vol. 305, Issue 5685, pp. 788–792). <https://doi.org/10.1126/science.1096796>
- Stefan, A. M. (2007). *Plasmonics: Fundamentals and Applications*.
- Thummaluru, S. R., & Chaudhary, R. K. (2018). Polarization controllable and wide-angle frequency tunable metamaterial absorber. *Journal of Applied Physics*, 124(20). <https://doi.org/10.1063/1.5054093>
- Uddin, M. K., Islam, M. T., Alam, T., Sahar, N. M., Alsaif, H., Hakim, M. L., & Islam, M. R. (2025). Polarization insensitive U-coupled splits ring resonator-based hexa-band metamaterial absorber for concentration of solid material sensing applications. *Optics and Laser Technology*, 181(PC), 111975. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2024.111975>
- Ünal, E., Bağmanci, M., Karaaslan, M., Akgöl, O., Arat, H. T., & Sabah, C. (2017). Zinc oxide-tungsten-based pyramids in construction of ultra-broadband metamaterial absorber for solar energy harvesting. *IET Optoelectronics*, 11(3), 114–120. <https://doi.org/10.1049/iet-opt.2016.0138>
- Unal, E., Dincer, F., Tetik, E., Karaaslan, M., Bakir, M., & Sabah, C. (2015). Tunable perfect metamaterial absorber design using the golden ratio and energy harvesting and sensor applications. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 26(12), 9735–9740. <https://doi.org/10.1007/s10854-015-3642-7>
- Watts, C. M., Liu, X., & Padilla, W. J. (2012). Metamaterial electromagnetic wave absorbers. *Advanced Materials*, 24(23). <https://doi.org/10.1002/adma.201200674>
- Yee, K. S. (1966). Numerical Solution of Initial Boundary Value Problems Involving Maxwell's Equations in Isotropic Media. *IEEE Transaction Antennas and Propagation*.

- Zhong, M., Jiang, X., Zhu, X., Zhang, J., & Zhong, J. (2020). Design and fabrication of a single metal layer tunable metamaterial absorber in THz range. *Optics and Laser Technology*, 125(November 2019), 106023. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2019.106023>
- Zhou, H., Li, D., Hui, X., Hu, D., Chen, X., He, X., & Mu, X. (2020). Metamaterial Gas Sensing Platform Based on Surface-Enhanced Infrared Absorption. *Proceedings of the IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), 2020-Janua*, 717–720. <https://doi.org/10.1109/MEMS46641.2020.9056404>
- Zhu, J.-F., Sheng, Y.-W., Gao, G.-L., Shi, M.-C., Ruan, J.-F., Deng, G.-S., & Yin, Z.-P. (2025). *Ultrathin and flexible broadband metamaterial absorber for Ka-band applications*. 15(2), 152–163.

