

**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**ALTIN NANOPARÇACIK TEMELLİ TERAHERTZ (THz)
METAMALZEMELER**

**Hazırlayan
Kadir Tuğrul BOZKURT**

**Danışman
Prof. Dr. Celal YILDIZ**

Yüksek Lisans Tezi

**Ocak 2021
KAYSERİ**

**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**ALTIN NANOPARÇACIK TEMELLİ TERAHERTZ (THz)
METAMALZEMELER
(Yüksek Lisans Tezi)**

**Hazırlayan
Kadir Tuğrul BOZKURT**

**Danışman
Prof. Dr. Celal YILDIZ**

Bu çalışma; Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından Yurt İçi Öncelikli Alanlar Yüksek Lisans Burs Programı (2210-C) (Başvuru No: 1649B021900113) ile desteklenmiştir.

**Ocak 2021
KAYSERİ**

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir şekilde elde edildiğini beyan ederim. Aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi belirtirim.

Adı-Soyadı: Kadir Tuğrul BOZKURT

İmza:

“Altın Nanoparçacık Temelli Terahertz (THz) Metamalzemeler” adlı Yüksek Lisans tezi, Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi 'ne uygun olarak hazırlanmıştır.

Tezi Hazırlayan

Kadir Tuğrul BOZKURT

Danışman

Prof. Dr. Celal YILDIZ

Elektrik Elektronik Mühendisliği ABD Başkanı

Prof. Dr. Ömer Galip SARAÇOĞLU

Prof. Dr. Celal YILDIZ danışmanlığında **Kadir Tuğrul BOZKURT** tarafından hazırlanan “**Altın Nanoparçacık Temelli Terahertz (THz) Metamalzemeler**” adlı bu çalışma, jürimiz tarafından Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında **Yüksek Lisans** tezi olarak kabul edilmiştir.

25/01/2021

JÜRİ:

Danışman : Prof. Dr. Celal YILDIZ

Üye : Doç. Dr. Mustafa TÜRKMEN

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Ekin Aslan

ONAY:

Bu tezin kabulü Enstitü Yönetim Kurulunun tarih ve sayılı kararı ile onaylanmıştır.

...../...../.....

Prof. Dr. Mehmet AKKURT

Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ / TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca farklı bakış açıları ve bilimsel katkılarıyla beni aydınlatan, yakın ilgi ve yardımlarını esirgemeyen ve bu günlere gelmemde en büyük katkı sahibi sayın hocam Prof. Dr. Celal YILDIZ'a teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca; çalışmalarım süresince engin bilgi ve tecrübesiyle bana yol gösteren ve isabetli öngörülerini ile her zaman yolumu aydınlatan saygıdeğer hocam Doç. Dr. Mustafa TÜRKMEN'e teşekkür ederim.

Yüksek Lisans eğitim-öğretim boyunca hem ders döneminde hem tez dönemimde bana yardımcı olan ve çalışmalarımın katkı sağlayan tüm hocalarıma teşekkür ederim.

Özellikle de eğitim-öğretim hayatım boyunca gösterdikleri sabır ve desteklerinden dolayı aileme en içten teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışmasına Yurt İçi Öncelikli Alanlar Yüksek Lisans Burs Programı (2210-C) (Başvuru No: 1649B021900113) kapsamında destek veren Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na (TÜBİTAK) teşekkür ederim.

Kadir Tuğrul BOZKURT

Kayseri, Ocak 2021

ALTIN NANOPARÇACIK TEMELLİ TERAHERTZ (THz)

METAMALZEMELER

Kadir Tuğrul BOZKURT

Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü

Yüksek Lisans Tezi, Ocak 2021

Danışman: Prof. Dr. Celal YILDIZ

ÖZET

Elektromanyetik metamalzemeler, alt dalga boyu yapıları kullanarak elektromanyetik malzeme özelliklerini uyarlamak ve dalga yayılımını kontrol etmek için güçlü bir yapay araç olarak ortaya çıkmıştır. Elektromanyetik spektrumun 0.1 THz ile 10 THz arasındaki frekans bölgesi, metamalzemeler ile kimyasal ve biyolojik algılama, görüntüleme ve güvenlik uygulamalarına yönelik umut verici bir teknolojik potansiyele sahiptir.

Bu tez çalışmasında, elektromanyetik spektrumun THz ve alt THz bölgesi uygulamaları için çift bant frekans cevabına sahip alt taban üzerine kurulu çok katmanlı özgün geometrik tasarıma sahip altın parçacık tabanlı THz metamalzeme emiciler modellenmiştir. Terahertz metamalzeme emicilerin tasarımını optimize etmek için Lumerical FDTD (Finite Difference Time Domain) Solutions adlı yazılım paketi kullanılmıştır. Yazılım paketi kullanılarak dört farklı metamalzeme emicilerinin iletim, emilim ve yansıma özellikleri incelenmiştir. Metamalzeme emiciler için optimum tasarım olarak metal-dielektrik-metal şeklindeki yapılar seçilmiştir.

Çalışma sonucunda, metamalzeme ile kaynak arasındaki elektromanyetik etkileşimin yönlendirilmesi ile ayarlanabilir, kontrol edilebilir terahertz ve alt terahertz frekans bölgesinde çalışan çift bant mükemmel emilime sahip dört farklı emici yapısı geliştirilmiştir. Gelecekte, mükemmel emicilerin algılama uygulamalarında kullanım potansiyeline sahip olacağı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Metamalzemeler; alt dalga boyu yapıları; çift bant mükemmel emiciler; terahertz bölgesi; zaman domeninde sonlu farklar.

GOLD NANOPARTICLE BASED TERAHERTZ (THz) METAMATERIALS

Kadir Tuğrul BOZKURT

Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences

M.Sc. Thesis, January 2021

Supervisor: Prof. Dr. Celal YILDIZ

ABSTRACT

Electromagnetic metamaterials emerge as a powerful artificial tool to adapt electromagnetic material properties and control wave propagation using sub-wavelength structures. The frequency region of the electromagnetic spectrum between 0.1 THz and 10 THz has a promising technological potential for chemical and biological sensing, imaging and security applications with metamaterials.

In this thesis, gold particle-based THz metamaterial absorbers with a unique multilayer geometric design based on a substrate with dual band frequency response for THz and sub-THz region applications of the electromagnetic spectrum are modeled. The software package called Lumerical FDTD Solutions use to optimize the design of terahertz metamaterial absorbers. The transmission, absorption and reflection properties of four different metamaterial absorbers examine to use the software package. Metal-dielectric-metal structures are chosen as the optimum design for metamaterial absorbers.

In the result of this study, four different absorber structures with double band perfect absorption operating in the terahertz and sub terahertz frequency region that can be adjustable, controllable by directing the electromagnetic interactions between the metamaterial and the source are developed. In the future, it has been observed that excellent absorbents have potential for use in sensing applications.

Keywords: Metamaterials; subwavelength structures; double band excellent absorber; terahertz region; finite difference time domain.

İÇİNDEKİLER

ALTIN NANOPARÇACIK TEMELLİ TERAHERTZ (THZ) METAMALZEMELER

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK SAYFASI	i
YÖNERGEYE UYGUNLUK SAYFASI	ii
KABUL VE ONAY SAYFASI	iii
ÖNSÖZ / TEŞEKKÜR	iv
ÖZET	v
ABSTRACT	vi
İÇİNDEKİLER	vii
KISALTMALAR	ix
ŞEKİLLER LİSTESİ	xii

GİRİŞ

G.1. Giriş	1
G.2. Tez Organizasyonu ve Yapısı	2

1. BÖLÜM

TEMEL KAVRAMLAR VE TEORİK ALTYAPI

1.1. Terahertz Bölgesi	4
1.2. Terahertz Dalgalarının Özellikleri	6
1.2.1. İyonlaştırıcı Olmayan Radyasyon	7
1.2.2. Terahertz Penetrasyonu ve İletimi	7
1.2.3. Diğer Bazı Terahertz Dalga Özellikleri	7
1.3. Terahertz Radyasyonunun Uygulamaları	8
1.3.1. Güvenlik	8
1.3.2. Terahertz Spektroskopi ile Tanımlama	9
1.3.3. Terahertz Tıbbi Görüntüleme	10
1.3.4. Diğer Bazı Terahertz Uygulamaları	11
1.4. Metamalzemeler - Işık Madde Etkileşimi	12
1.4.1. Metamalzemelerin Tanımı	14

1.4.2. Metamalzemelerin Uygulamaları	17
1.5. THz Metamalzemelerinin Sentezi.....	19
1.5.1. Ayrık Halka Rezonatörler	19
1.5.2. Elektrik Ayrık Halka Rezonatörü	21
1.6. Mükemmel Metamalzeme Emiciler.....	22
1.6.1. Polarizasyondan Bağımsız THz Metamalzeme Emiciler.....	25
1.6.2 Çok bantlı THz Metamalzeme Emiciler	26
1.6.3 Genişbant THz Metamalzeme Emiciler	27

2. BÖLÜM

NÜMERİK ANALİZ YÖNTEMİ

2.1. Giriş	29
2.2. Zaman Domeninde Sonlu Farklar (FDTD) Metodu	29
2.3. Lumerical FDTD Solutions Programının Özellikleri	30

3. BÖLÜM

ALTIN PARÇACIK TEMELLİ TERAHERTZ (THz) METAMALZEME EMİCİ TASARIMLARI

3.1. Giriş	34
3.2. Teze Özgü Tasarlanan Altın Parçacık Temelli Terahertz (THz) Metamalzeme Emiciler	35
3.2.1. T#1	35
3.2.2. T#2	44
3.2.3. T#3	53
3.2.4. T#4	60

4. BÖLÜM

TARTIŞMA-SONUÇ VE ÖNERİLER

4.1. Tartışma-Sonuç ve Öneriler	69
KAYNAKÇA	74
ÖZGEÇMİŞ.....	86

KISALTMALAR VE SİMGELER

<u>Kısaltma</u>	<u>Anlamı</u>
2D	2 Boyutlu
3D	3 Boyutlu
A	Absorption, Emilim
Au	Altın
Al ₂ O ₃	Alüminyum Oksit
CaF ₂	Kalsiyum Florür
DNA	Deoksiribo Nükleik Asit
ESRR	Electric Split Ring Resonator; Elektrik Ayrık Halka Rezonatörü
eV	Elektron Volt
FDTD	Finite Difference Time Domain; Zaman Domeninde Sonlu Farklar
LHM	Left Handed Material, Sol-el Malzeme
MgF ₂	Magnezyum Florür
MM	Metamaterial, Metamalzeme
MPA	Metamaterial Perfect Absorber; Metamalzeme Mükemmel Soğurucu
NIM	Negative Index Material, Negatif İndis Malzeme
PEC	Perfect Electrical Conductor, Mükemmel Elektriksel İletken
PML	Perfect Matched Layer, Mükemmel Uyumlu Katman
PMDS	Polidimetilsiloksan (Polydimethylsiloxane)
R	Reflection, Yansıma
RNA	Ribo Nükleik Asit
Si	Silisyum
SiO ₂	Silisyumdioksit

Sub-THz	Alt THz Bölgesi
SRR	Split Ring Resonator; Ayrık Halka Rezonatörü
T	Transmission, Geçiş
TE	Transverse Electric; Enine Elektrik
THz	Terahertz
THz-TDS	Terahertz Time-Domain Spectroscopy, Terahertz Zaman Alan Spektroskopisi
TM	Transverse Magnetic; Enine Manyetik
T-ray	T-ışını
\vec{B}	Manyetik Akı Yoğunluğu
c	Işığın Boşluktaki Hızı
\vec{D}	Elektrik Akı Yoğunluğu
δ	Deri Kalınlığı
\vec{E}	Elektrik Alan
ϵ	Dielektrik Geçirgenlik
ϵ_0	Serbest Uzayın Dielektrik Geçirgenliği
Φ	Düzlem Dalga Kaynağın Kutuplama Açısı
\vec{H}	Manyetik Alan
\vec{J}	Akım Yoğunluğu
k	Dalga Sayısı
λ	Dalga Boyu
μ	Manyetik Geçirgenlik
μ_0	Serbest Uzayın Manyetik Geçirgenliği
$\mu_{eff}(w)$	Frekansa Bağlı Efektif Manyetik Geçirgenlik

n	Kompleks Kırılma İndisi
η	Dalga Empedansı
ρ	Yük Yoğunluğu
σ	İletkenlik
θ	Düzlem Elektromanyetik Dalganın Geliş Açısı
ω	Açısal Frekans
ω_c	Saçılma Frekası
ω_p	Plazma Frekansı
ω_{mo}	Ayrık Halka Rezonatörün Manyetik Rezonans Frekansı

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1.	Elektromanyetik spektrumda terahertz bölgesi.....	5
Şekil 1.2.	Elektriksel ve manyetik geçirgenlik kombinasyonlarının diyagramı	15
Şekil 1.3.	Ayrık halka rezonatörün şematik görünümü.....	20
Şekil 1.4.	Elektrik ayrık halka rezonatörün döngü akımlarının şematik görünümü.....	22
Şekil 1.5.	Ortak bir yana sahip iki ayrık halka rezonatörün şematik görünümü.	24
Şekil 2.1.	FDTD yönteminde standart bir Kartezyen Yee hücresinin görünümü	30
Şekil 2.2.	FDTD Solutions yazılım programının grafiksel kullanıcı arayüzü.....	31
Şekil 2.3.	İndeks verileri harici olarak girilen SiO ₂ 'in uyumluluğunun Lumerical programı üzerinden görülmesi	32
Şekil 3.1.	(a) C Pi şeklindeki emicinin üstten görünümü. (b) C Pi şeklindeki emicinin spektral cevabı. (c) C Pi şeklindeki emicinin perspektif görünümü	36
Şekil 3.2.	Yapının altın parçacıklar alt ara yüzündeki (a) 0.53 THz için yakın elektrik alan dağılımı. (b) 1.08 THz için yakın elektrik alan dağılımı. (c) 0.53 THz için yakın manyetik alan dağılımı. (d) 1.08 THz için yakın manyetik alan dağılımı.....	37
Şekil 3.3.	(a) Emicinin dalga boyuna göre spektrum eğrisi. (b) Emicinin dalga sayısına göre spektrum eğrisi.....	38
Şekil 3.4.	TM modunda geometrik parametre değişimlerinin rezonans frekansına etkisi. (a) w değişimine göre emilim eğrisi. (b) g ₂ değişimine göre emilim eğrisi. (c) g ₃ ve g ₄ değişimine göre emilim eğrisi. (d) g ₄ değişimine göre emilim eğrisi.....	39
Şekil 3.5.	(a) Kutuplama açısındaki değişime göre emilim eğrileri. (b) Emilim spektrumunun kaplama ortamının kırılma indis değişime göre emilim eğrileri.....	40
Şekil 3.6.	(a) 0.53 THz'de (yz kesiti x=-26 µm'de) kesitsel yakın elektrik alan dağılımı. (b) 1.08 THz'de (xz kesiti y=-26 µm'de) kesitsel yakın elektrik alan dağılımı. (c) 0.53 THz'de (yz kesiti x=-26 µm'de) kesitsel yakın manyetik alan dağılımı. (f) 1.08 THz'de (xz kesiti y=-26 µm'de) kesitsel yakın manyetik alan dağılımı.	41
Şekil 3.7.	(a) 0.53 THz için yüzey akımının vektör grafiği. (b) 1.08 THz için yüzey akımının vektör grafiği. (c) Dielektrik ara katmanın kalınlık değişimine göre	

- emilim eğrisi. (d) Yapıyı oluşturan C Pi'nin ayrı ayrı ve birlikte emilim eğrileri.42
- Şekil 3.8. (a) Üst kısım iletkenin kalınlık değişimine göre spektrum cevabı. (b) Geliş açısındaki değişimine göre emilim eğrileri. (c) Dielektrik ara katmandaki polyimide'nin bağıl dielektrik ve kayıp tanjant değişimine göre frekans cevabı.....43
- Şekil 3.9. (a) Yapıda farklı dielektrik malzemelerin kullanılması durumunda frekans cevabı. (b) Üst iletken tabakanın Au (3d), PEC (3d) ve PEC (2d) değişimine göre emilim eğrileri.....44
- Şekil 3.10. (a) TM modundan açıklık halka ve kare rezonatörün üstten görünümü. (b) Belirlenmiş parametreler için elde edilen yansıma, geçiş ve emilim spektrumu. (c) Yapının perspektif görüntüsü.....45
- Şekil 3.11. TM modunda geometrik parametre değişimlerinin rezonans frekansına etkisi. (a) w değişimine göre emilim eğrisi. (b) g1 değişimine göre emilim eğrisi. (c) g2 değişimine göre emilim eğrisi.(d) g3 değişimine göre emilim eğrisi.47
- Şekil 3.12. (a) Emicinin dalga boyuna göre spektrum eğrisi. (b) Emicinin dalga sayısına göre spektrum eğrisi Yapının altın parçacıklar alt ara yüzündeki (c) 0.54 THz için yakın elektrik alan dağılımı. (d) 0.72 THz için yakın elektrik alan dağılımı. (e) 0.54 THz için yakın manyetik alan dağılımı. (f) 0.72 THz için yakın manyetik alan dağılımı.48
- Şekil 3.13. (a) 0.54 THz için yüzey akımının vektör grafiği. (b) 0.72 THz için yüzey akımının vektör grafiği. (c) Yapıyı oluşturan açıklık halka ve kare rezonatörlerin ayrı ayrı ve birlikte emilim eğrileri. (d) Kutuplama açısındaki değişime göre spektrum cevabı.....50
- Şekil 3.14. (a) Dielektrik tabakanın kalınlık değişimine göre spektrum cevabı. (b) Üst iletken kısmın kalınlığının değişimine göre frekans cevabı. (c) Geliş açısındaki değişime göre rezonans cevabı. (d) Üst iletken tabakanın Au (3d) ve PEC (3d) değişimine göre emilim eğrileri.51
- Şekil 3.15. (a) Kırılma indisine bağlı olarak rezonans frekanslarının değişimi. (b) Bağıl dielektrik sabiti ve kayıp tanjant değişimine göre yapının spektral cevabı. (c) Farklı dielektrik ayırıcılar için emilim eğrileri.....52

- Şekil 3.16. (a) Emicinin üstten görübnümü. (b) Belirlenmiş parametreler için nümerik olarak elde edilen emilim, yansıma ve geçiş spektrumu. (c) Emicinin perspektif görünümü.54
- Şekil 3.17. Yapının altın parçacıklar alt ara yüzündeki (a) 0.50 THz için yakın elektrik alan dağılımı. (b) 1.45 THz için yakın elektrik alan dağılımı. (c) 0.50 THz için yakın manyetik alan dağılımı. (d) 1.45 THz için yakın manyetik alan dağılımı.....55
- Şekil 3.18. (a) Yapıya ait spektral cevabın dalga sayısı şeklinde gösterimi.(b) Yapıya ait spektral cevabın dalga boyu şeklinde gösterimi.....56
- Şekil 3.19. (a) 0.50 THz için yüzey akımının vektör grafiği. (b) 1.45 THz için yüzey akımının vektör grafiği. (c) Üst iletken kısmın kalınlığının değişimine göre frekans cevabı. (d) Dielektrik tabakasının kalınlık değişimine göre spektrum cevabı.57
- Şekil 3.20. Geometrik parametre değişimlerinin rezonans frekansına etkisi. (a) w değişimine göre emilim grafiği. (b) g değişimine göre emilim grafiği. (c) Kutuplama açısı değişime göre emilim grafiği. (d) Geliş açısı değişimine göre emilim grafiği.....58
- Şekil 3.21. (a) Dielektrik malzemedeki bağıl dielektrik sabiti ve kayıp tanjant değişimine göre frekans cevabı. (b) Farklı dielektrik malzeme kullanılması sonucu oluşan emilim spektrumu. (c) Üst iletken tabakanın Au (3d), PEC (3d) ve PEC (2d) değişimine göre emilim eğrileri. (d) Kırılma indis değişimine göre emilim spektrumu.....59
- Şekil 3.22. (a) Yapının üstten görünümü. (b) Nümerik olarak hesaplanan emilim, geçiş ve yansıma spektrumu. (c) Emicinin perspektif görünümü.61
- Şekil 3.23. (a) Yapıya ait spektral cevabın dalga sayısı şeklinde gösterimi. (b) Yapıya ait spektral cevabın dalga boyu şeklinde gösterimi.....62
- Şekil 3.24. (a) 0.45 THz için yüzey akımının vektör grafiği. (b) 0.98 THz için yüzey akımının vektör grafiği.....62
- Şekil 3.25. Yapının altın parçacıklar alt ara yüzündeki (a) 0.45 THz için yakın elektrik alan dağılımı. (b) 0.98 THz için yakın elektrik alan dağılımı. (c) 0.45 THz için yakın manyetik alan dağılımı. (d) 0.98 THz için yakın manyetik alan dağılımı.63

- Şekil 3.26. (a) H ve U şekillerinin ayrı ayrı ve beraber emilim grafiği. (b) Üst iletken kısmın kalınlık değişimine göre spektrum cevabı. (c) Dielektrik katmanın kalınlığının değişimine göre rezonans cevabı.....64
- Şekil 3.27. Geometrik parametre değişimlerinin rezonans frekansına etkisi. (a) w değişimine göre emilim eğrisi. (b) g değişimine göre emilim eğrisi. (c) Kutuplanma açısının değişimine göre emilim eğrisi. (d) Geliş açısının değişimine göre emilim eğrisi.....66
- Şekil 3.28. (a) Dielektriğin farklı bağıl dielektrik sabiti ve kayıp tanjant değerleri için rezonans cevabı. (b) Farklı dielektrik tabakalar için emilim spektrumları. (c) Üst iletken tabakanın Au (3d), PEC (3d) ve PEC (2d) değişimine göre emilim eğrileri. (d) Kırılma indisine bağlı olarak emilim eğrisi.....67

GİRİŞ

G.1. Giriş

Terahertz bilimi gelecek vaat eden ve hızla gelişen bir araştırma alanıdır. Elektromanyetik spektrumun terahertz bölgesi malzemelerin bu frekanslarda benzersiz etkileşim göstermesi sebebiyle farklı ve çeşitli uygulamalar için önem arz etmektedir. Bununla birlikte terahertz frekans radyasyonunu manipüle etmek, yönlendirmek ve işlemek hala zorlu süreçlerdir. Terahertz (THz) frekansları elektromanyetik spektrumun mikrodalga bölgesine göre daha fazla enerjiye sahip ancak kızılötesi bölgeden daha az enerjiye sahip olan bölümünü oluşturur. Mühendislik açısından bakıldığında THz frekansları yeni cihazların geliştirilmesi için olgunlaşmış ve az kullanılan bir spektral bölgedir.

Egzotik elektromanyetik özelliklere sahip olan, alt dalga boyu rezonant yapı dizilerinden oluşan ve kompozit malzemeler olan metamalzemeler hem temel araştırma hem de pratik uygulamalar için artan ilginin odak noktası haline gelmiştir ve terahertz frekans dalgalarını ve diğer elektromanyetik dalgaların manipülasyonunu sağlayabilmede önemli rol oynamaktadır. Metamalzemelerin ortaya çıkışı, verimli elektromanyetik manipülasyon biçimlerinin arandığı terahertz dalgalarına (T-ışınları) yönelik yoğun ilgi ile çakışmaktadır. Terahertz dalgaları kontrol edebilen doğal olarak var olan malzemelerin kıtlığı düşünüldüğünde, metamalzemeler terahertz araştırmalarında ilerleme vaat eden ideal ikameler haline gelmektedir. Nihayetinde terahertz metamalzemeleri bir dizi alanda bilimsel ve teknolojik avantajlara yol açmıştır.

Tipik olarak üç katmanla oluşturulan metamalzeme "mükemmel emiciler" tasarlanmış bir frekans aralığında gelen elektromanyetik radyasyonun neredeyse bire yakın soğurulmasından dolayı büyük ilgi çekmişlerdir. Mükemmel emilimin fiziğini anlamak için birkaç teori geliştirilmiştir. Bununla birlikte parametrelerin emilimi nasıl belirlediğini daha iyi anlamak için bileşen malzemelerin elektromanyetik ve dielektrik özellikleri önemlidir. Metamalzemeler, terahertz kaynaklarının ve dedektörlerinin gelişimini

desteklemekte, dinamik ve ayarlanabilir cihazların gerçekleştirilmesi yoluyla terahertz teknolojisinin potansiyel uygulamalarını genişletmektedir. Bu potansiyel uygulamalara örnek olarak algılama uygulamaları verilebilir, algılama uygulamasında ilk olarak metamalzeme emicileri tasarlayarak modelleyip analiz etmek ve bunların altında yatan soğurma mekanizmalarını yorumlamak gereklidir.

G.2. Tez Organizasyonu ve Yapısı

Bu tez çalışması giriş bölümden sonra terahertz teknolojilerine ve metamalzemelere genel bir bakışı içeren, Bölüm 1 ile devam etmektedir. Bölüm 1 üç alt bölüme ayrılmıştır. Bunlardan ilki terahertz frekans radyasyonunun bazı benzersiz özelliklerini ve elektromanyetik spektrumun bu frekans aralığındaki radyasyon için gerçekleştirilen uygulamalardan bazı önemli olanlarını kapsamaktadır. İkinci alt bölüm ise ışık ve madde etkileşiminin kısa bir açıklamasını, metamalzemeler ile ilgili temel teorik altyapıyı ve metamalzemelerin uygulamalarını kapsamaktadır. Bölüm 1, THz metamalzemelerinin sentezi ve literatürde yer alan metamalzeme tabanlı mükemmel metamalzeme emicilerin tartışılmasıyla sona ermektedir.

Bölüm 2’de altın nanoparçacık temelli terahertz metamalzemelerin tasarımında ve simülasyonunda kullanılan nümerik analiz yöntemi açıklanmıştır. Burada zaman domeninde sonlu farklar metodu ve Lumerical FDTD (Finite Difference Time Domain) Solutions programının özellikleri verilmiştir.

Bu tez çalışmasındaki 3. Bölüm, elektromanyetik spektrumun terahertz bölgesinde teze özgü geometrilere sahip altın metamalzeme tabanlı emici tasarımlarını içerir ve bu frekans bölgesinde elde edilen simülasyon verilerinin uygulamalar üzerindeki işlevselliğini kapsar. Bu bölümde yer alan dört farklı emicide bir metal zemin, bir poliimid (PI) dielektrik ara katmanı ve en üst kısımda frekans seçici yüzey katmanından oluşan bir birim hücre yapısından oluşur. Bu bölümde elde edilen bulgular metamalzeme soğurucuların ve sensörlerin tasarımına ve optimizasyonuna rehberlik etmesi açısından önemlidir. Bu bölümde simülasyonlar sonucunda ölçülen yanıtların değerlendirilmesiyle algılama uygulamaları için önemli kıstaslardan olan yapıların polarizasyon duyarsızlığına ve THz bölgede esnek bir frekans aralığına sahip olup olmadığına bakılmıştır.

Son olarak bu çalışmanın sonuçları 4. bölümde ayrıntılı olarak tartışılmıştır. Tasarlanıp simülasyonları gerçekleştirilen dört yapının da gelecekteki algılama uygulamaları için uygun olduğu düşünülmektedir ve esnek frekans aralığına sahip THz emiciler gelecekteki uygulamalara öncülük edebilecektir.



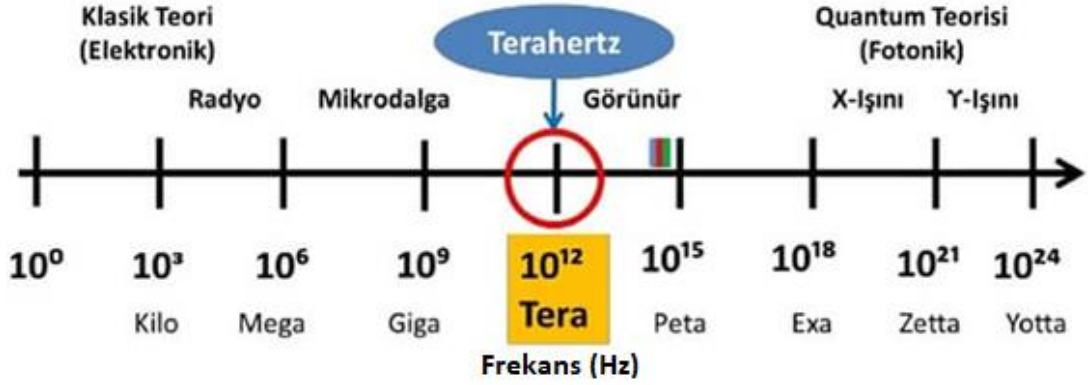
1. BÖLÜM

TEMEL KAVRAMLAR VE TEORİK ALTYAPI

1.1. Terahertz Bölgesi

Geniş bir dalga boyunu veya geniş bir frekans uzanımını kapsayan esasen salınan bir elektrik ve manyetik alan olan elektromanyetik dalgaların; dalga boyu veya frekans değerlerine göre sınıflandırılıp sıralandığı gösterim elektromanyetik spektrum (tayf) şeklinde isimlendirilir. Elektromanyetik spektrum gama ışınlarından radyo dalgalarına kadar değişen ve görünür ışık dâhil olmak üzere binlerce metreden onlarca pikometreye kadar dalga boyu ölçeğini kapsamaktadır. Frekansları veya dalga boyları değişikçe meydana gelen çeşitli ışık-madde etkileşimleri nedeniyle elektromanyetik spektrumun her farklı bölgesinden yaşamın birçok alanında yararlanılmaktadır. Farklı frekans ve dalga boyuna sahip elektromanyetik dalgalar aracılığıyla günümüzde radyo-TV, ultrasonik ses dalgaları, medikal görüntüleme yöntemleri, biyolojik ve kimyasal algılama, fotovoltaiik görünür ışık teknikleri gibi birçok uygulama gerçekleştirildi [1, 2].

Terahertz radyasyonu (THz) veya T-ışını (T-ray), genellikle 0,1 ile 10 THz (dalga boyu: 0.03 mm ile 3000 μm , enerji: 0,4 ile 40 meV) arasındaki geniş frekans aralığına sahip elektromanyetik dalgaları ifade eder. Terahertz radyasyonu dalga boyu aralığı 0,3 ile 3 mm arasında olduğunda terahertz bölgesi özellikle alt THz bölgesi (Sub-THz) olarak bilinir. Terahertz dalgaları, elektromanyetik spektrumdaki geleneksel elektronik ve optik (fotonik) araştırma rejimleri (mikrodalga ve kızılötesi bölgeler) arasında yer alır [3, 4]. Şekil 1.1'de elektromanyetik spektrumda THz bölgesi gösterilmektedir [5]. Terahertz aralığı elektromanyetik spektrumda nispeten keşfedilmemiş bir aralık olarak ve malzemelerin bu frekanslar ile benzersiz etkileşimi nedeniyle çeşitli heyecan verici uygulamalar için kullanılabilir. Bununla birlikte, terahertz radyasyonunu manipüle etmek, yönlendirmek karşılaşılan zorluklardır. Tez çalışması kapsamında tasarlanan yapıların spektral aralığı THz ve alt THz frekans bölgesinde yer almaktadır.



Şekil 1.1. Elektromanyetik spektrumda terahertz bölgesi.

Elektromanyetik spektrumdaki komşu bölgelerle karşılaştırıldığında, terahertz bölgesi teorik olarak yapılan çalışmaları üretme ve işleme teknolojisi konusunda henüz başlangıç aşamasındadır. Kızılötesinden morötesi bölgeye kadar uzanan bölgede ana kaynak iki enerji bandı arasındaki elektron geçişinin ürettiği fotonlardır. THz bölgesine köklü klasik kızılötesi teknolojisinin uygulanamamasının sebebi optik açıdan bakıldığında dalga boyunun çok büyük olmasıdır. Mikrodalga rejiminde ve altında olan bölgelerde elektromanyetik radyasyonu oluşturan ana kaynak elektron salınımıdır. Benzer şekilde daha düşük frekanslardaki bölgelerde uzmanlaşmak yararsızdır çünkü bu bölgeler için dalga boyu küçüktür. Bu nedenle iki temel mekanizma arasındaki "Terahertz Boşluğu" (Terahertz Gap) için yeni cihazların ve tekniklerin geliştirilmesi gereklidir. Neyse ki, son yirmi yılda bu rejimle ilgili yoğun araştırma çalışmaları yapılmıştır ve literatüre sunulmuştur.

THz radyasyonunu laboratuvar ortamında üretmenin ve işlemenin fotoiletken emisyon, optik düzeltme ve elektro-optik örnekleme yöntemleri geliştirilene kadar son derece zorlu bir süreç olması ve elektriksel gücün elektromanyetik terahertz radyasyona dönüşümü yarı iletken cihazların kullanılmasıyla verimli bir şekilde gerçekleştirilememesi bu bölgenin bazı dezavantajlarıdır. Burada daha az gelişmiş terahertz bölgeyi keşfetmenin nedeni yapılan çalışmaların cüzi olmasında ziyade terahertz dalgalarının bazı benzersiz çekici özelliklerinden kaynaklanmaktadır [6-11].

1.2. Terahertz Dalgalarının Özellikleri

Terahertz dalgaların diğer frekansların radyasyonuna göre çeşitli alanlarda ve üstün uygulamalarda kullanılabilecek bazı dikkat çekici özellikleri vardır. Bu bölümde terahertz dalgaların özellikleri ayrıntılı olarak ele alınarak sonraki terahertz uygulamaları için farklı perspektiften bakma imkânı sunulacaktır. Biyomedikal görüntüleme açısından terahertz radyasyonu iyonlaştırıcı değildir, bu da THz radyasyonunun canlı dokulara X ışınlarına göre daha az zarar verdiği anlamına gelir. THz dalgaları radyo ve mikrodalga frekanslarından daha yüksek frekans değerlerindedirler bu nedenle çok daha yüksek veri hızları sağlama potansiyeline sahiptirler. Pek çok malzeme terahertz frekans aralığında onları tam olarak algılama (kimyasallarla duyarlılık) veya algılama yeteneği sağlayabilen benzersiz bir soğurma spektrumuna sahiptir. Ayrıca birçok malzeme terahertz frekanslarında şeffaf olması terahertz dalgasının diğer en önemli özelliğidir [12, 13].

Terahertz dalgaların kayda değer önemli özellikleri olmasına karşın bazı ciddi dezavantajları da vardır. Çevresindeki denge sıcaklığından daha sıcak olan her madde rastgele bir terahertz radyasyonu da dâhil olmak üzere termal enerji yayarlar. Çoğu uygulama için uyumlu kaynaklar gerektiğinden THz dalgaları bazı uygulamalarda kullanılamazlar. Bir diğer olumsuz özellik ise THz dalgaları için güç kaynaklarıdır. Çok yakın zamana kadar bu dalgaları üretecek yüksek güç kaynakları yoktu fakat şu anda THz üretimi ve tespitinde orta düzeyde ilerleme sağlanmıştır ama maliyetlidir. THz kuantum kademeli lazerler ve femtosaniye lazer kaynağı kullanan terahertz zaman alan spektroskopisi (THz-TDS) geniş bant uyumlu terahertz radyasyonunun üretimi ve saptanması için potansiyel bir aday olarak verilebilir [14, 15]. Bu gelişmeler ışığında THz dalgalarını kontrol etme ve manipüle etme teknikleri zor işlemler olmaktan çıkıyor.

T-ışınları atmosferdeki su buharı tarafından hızlıca emilir bu da kullanımının kısa mesafelerle sınırlı olması anlamına gelir. Bu sebepten dolayı terahertz frekans iletişimi kısa menzil ile sınırlıdır. Bununla birlikte güçlü atmosferik zayıflama terahertz frekanslarında uydular arası iletişimi daha güvenli hale getirmeye hizmet edebildiğinden aslında belirli iletişim uygulama türleri için bir fayda olarak görülebilir. Son olarak terahertz dalgaları verimli bir şekilde manipüle etmek için kullanılabilecek çok az doğal malzeme vardır çünkü birçok malzeme doğal olarak THz radyasyonuna yanıt vermez ve bu aralıkta çalışan cihazları oluşturmak için gerekli olan araçlarda kaynaklar, lensler,

anahtarlar, modülatörler ve dedektörler büyük ölçüde mevcut değildir. Bu nedenle araştırma ortamları dışında çalışmanın hala zor olduğu kanıtlanmıştır, ancak metamalzemeler olarak bilinen nispeten yeni bir malzeme sınıfı bu frekanslarda radyasyonu manipüle etme yeteneğimizi geliştirmeyi vaat etmektedir. Metamalzemelerin yararlı potansiyel uygulamaları ışığında THz bölgesindeki boşluğu doldurmak için önemli çalışmalar devam etmektedir [16-20].

1.2.1. İyonlaştırıcı Olmayan Radyasyon

Terahertz dalgası iyonlaştırıcı olmayan radyasyon olup, kuantumunun bir doku veya malzeme ile etkileşim sırasında elektronları bir atom veya molekülden serbest bırakmak için yeterli enerjiye sahip olmadığını gösterir. Daha yüksek frekanslı dalgaların daha fazla güç seviyesine sahip olması ve bu nedenle iyonlaştırıcı ve yıkıcı olabileceği bilinilmektedir. İyonlaştırıcı radyasyonun iyi bilinen bir örneği X-ışınıdır. Sık sık röntgene maruz kalmanın mutasyona, kansere ve hatta ölüme neden olabileceği aşikârdır. Elektromanyetik spektrum incelendiğinde THz radyasyonu daha uzun dalga boyuna sahip olduğu ve bu nedenle diğer frekans bölgelerinden daha güvenli olduğu anlaşılmaktadır. THz dalgalar yüksek yoğunlukta bile canlı vücudunda hiçbir tahribat bırakmamaktadır. Bu özellik, terahertz bölgesini tıbbi teşhis ve tedavi ve güvenlik taraması için x-ışını taramasının yerini alacak potansiyel bir alternatif haline getirir.

1.2.2. Terahertz Penetrasyonu ve İletimi

Terahertz dalgasının diğer bir birincil avantajı, birçok yaygın materyalin ve canlı dokunun bu aralıkta ışığa karşı saydam veya yarı şeffaf olmasıdır [21]. Terahertz radyasyonu diğer frekans bölgelerinin nüfuz edemediği kumaş, kâğıt, ahşap, plastik ve seramik gibi kuru, polar ve iletken olmayan bazı malzemelere nüfuz edebilir, metaller tarafında yansıtılabilir. Dahası birçok malzeme moleküler dönme ve titreşim modlarına göre karakteristik soğurum çizgilerine sahiptir bu nedenle terahertz frekans bölgesi bu çizgileri gözlemleyerek madde tanımlama yapmayı mümkün kılmaktadır [22].

1.2.3. Diğer Bazı Terahertz Dalga Özellikleri

Bir görüntüleme sistemi için, Rayleigh kriterine göre, dairesel bir açıklığın minimum çözülebilir açısı dalga boyuyla orantılıdır ve açıklığın çapı ile ters orantılıdır. Bu nedenle,

mevcut popüler milimetre dalga tarayıcı cihazıyla karşılaştırıldığında, terahertz dalgasını kullanan bir sistem çok daha iyi çözünürlüğe sahip olabilir ve çok kompakt olacak şekilde üretilebilir. Öte yandan, X-ışını cihazı gibi geleneksel optik görüntüleme sistemleri daha iyi çözünürlüğe sahip olmasına rağmen, penetrasyon özelliklerinin yanı sıra foton enerjisi gibi dezavantajları da dikkate alınmalıdır [23]. Ayrıca, Rayleigh saçılma yoğunluğunun dalga boyunun dörtte bir gücü ile orantılı olduğu düşünüldüğünde, THz dalgası optik radyasyonunkinden daha az saçılır (daha kısa dalga boyuna sahiptir). Bu durumda daha iyi görüntü kalitesine sahip bir görüntü elde etmek için uygundur.

1.3. Terahertz Radyasyonunun Uygulamaları

Son bölümde terahertz aralığı radyasyonunun özelliklerini inceledikten sonra, burada bazı pratik uygulamalara bakacağız.

1.3.1. Güvenlik

Terahertz dalgasının penetrasyon özelliklerinde bahsedildiği gibi terahertz radyasyonu kumaş, plastik, bez vb. gibi kuru, polar ve iletken olmayan malzemelere nüfuz edebilir. Bu özellik örneğin giysilerin altına gizlenmiş silahlar veya paketlerde bulunan ürünlerin görüntülenmesi için havalimanları veya hükümet binalarında ki güvenlik kontrolü gibi gözetim uygulamalarında idealdir. Terahertz görüntüleme sistemi, yasak ve gizli nesnelere uzaktan görebilir.

Bu görüntüleme görüntülenecek maddelerin benzersiz soğurum spektrumları nedeniyle mümkündür. Çeşitli malzemelerin benzersiz soğurma spektrumları, diğer malzemelerin terahertz frekanslarında şeffaf olması gerçeğiyle birleştiğinde güvenlik tipi ticari görüntüleme gerçekleştirilir. Burada görüntülenmek istenen şeyler hareket etse veya devamlılık arz etse bile THz dalgalarının daha iyi bir çözünürlüğü olduğu için sorun yaşanmadan güvenlik kontrolü gibi gözetim uygulamaları devam edebilir. Tıbbi X-ışını görüntülemesine benzer şekilde, T-ışını görüntüleme bıçak ve ateşli silahlar gibi gizli nesnelere görme yeteneği sağlayabilir. X-ışını görüntüleme yalnızca geri saçılmaya dayalı olarak gizlenmiş nesnelere görme yeteneği sağlarken, T-ışını görüntüleme toplanan geri saçılma yalnızca gizli malzemeleri görmek için değil, aynı zamanda onları tanımlamak için de kullanılabilir. Bu özellik T-ışını görüntülemeye otomatik görüntüleme ve tarama

sistemlerinde büyük avantaj sağlayacak bu da insanların havalimanları gibi yerlerde bekleme sürelerini azaltacak ve insan gücü maliyetlerinde tasarruf sağlayacaktır.

Ayrıca, terahertz radyasyonunun yüksek bir kimyasal duyarlılığa sahip olduğu veya birçok kimyasal ve biyolojik konunun belirli terahertz soğurum izlerine sahip olduğu düşünüldüğünde, bir kapta gizlenmiş belirli bir maddenin kompozitini tespit etmek için terahertz spektroskopi tekniğini kullanamak mümkündür. Bu daha iyi penetrasyon, daha iyi çözünürlük insan dokusuna zarar vermemesi ve incelenen deneğe temas etmesine gerek olmaması nedeniyle mevcut mm dalga ve x-ışını tarayıcı sistemlerinin yerini alacak çok umut verici bir uygulamadır [24-29].

Günümüzde THz dalgaları kullanarak algılama yapan gelişmiş ticari uygulamalar 15 m'ye kadar olan uzak mesafelerde büyük nesnelerin ve 10 metreye kadar olan mesafelerde daha küçük nesnelerin etkili bir şekilde algılanmasını sağlamaktadırlar [30]. Dedektörler ile güvenlik taraması ve görüntülemesi için geliştirilen THz teknolojinin ilerlemesi hızlıdır ancak cihazlar hala yeterli düzeyde ve tatmin edici özellikte değildir [31].

1.3.2 Terahertz Spektroskopi ile Tanımlama

Dar bantlı ayarlanabilir sistemler veya geniş bant zaman etki alanı sistemlerini bilimsel araştırma amaçlı kullanan spektroskopi, terahertz frekans radyasyonu için en yaygın uygulamadır. Frekansa bağlı iletim veya yansımanın elde edilebildiği kısa geniş bantlı terahertz darbelerinin zaman alanı ölçümünü kullanan terahertz zaman alanı spektroskopisi (THz time domain spectrometer), spektroskopi uygulamaları için yaygın olarak kullanılmaktadır. Birçok biyomolekül, terahertz frekanslarında karakteristik titreşim modları sergiler. Özellikle deoksiribonükleik asit (DNA) [32], ribonükleik asit (RNA) [33] ve çeşitli proteinlerin [34-39] terahertz frekanslarında tepkileri terahertz zaman alanı spektroskopisi kullanılarak incelenmiştir. Hem kırılma indisi hem de soğurma spektrumu benzersiz bir değişim sergilediğinden ve hatta tek noktalı mutasyonları [40] tespit edebildiğinden, terahertz frekanslarının DNA'nın biyomoleküller işleyişine duyarlı olduğu gösterilmiştir. Proteinler için, terahertz frekanslarının sığır serum albümininin termal denatüre edilmesine duyarlı olduğu gösterilmiştir [41].

Terahertz spektroskopisinin ayrıca polimerler, kristal dielektrikler ve yarı iletkenler dâhil olmak üzere çeşitli malzemelerdeki malzeme özelliklerinin belirlenmesinde önemli rol

oynadığı kanıtlanmıştır. İletim ve yansıma katsayıları, geçirgenlik, iletkenlik ve kırılma indisi gibi malzeme özellikleri terahertz spektroskopisi ile elde edilebilir [42].

Terahertz radyasyonunun spektroskopi sonuçları kimya ve biyokimyada yeni bilgiler sağlayabilir. Pek çok malzemenin terahertz aralığında soğurma çizgileri vardır, bu da spektral tepkilerle tanımlamayı veya farklılaşmayı kolaylaştırır. Bu aynı zamanda posta veya paket taraması açısından da yararlıdır çünkü insanlar bu paket ve postalarda alıcının sağlığını tehdit edebilecek bazı tehlikeli maddeler olabileceğini düşünmektedirler. Ayrıca terahertz zaman alanı spektrometresi iletim ve yansımada spektroskopik ve tahribatsız muayene uygulamaları için uygun bir araçtır [43].

1.3.3. Terahertz Tıbbi Görüntüleme

İlk olarak 1995 yılında başlayan spektroskopik yöntemlere dayalı görüntüleme için T-ışınlarının kullanımına ilişkin geniş kapsamlı araştırmalar devam etmektedir [44]. Biyomedikal görüntüleme son zamanlarda hızlı büyüme gösteren bir araştırma alanıdır. Terahertz dalgaların tıbbi görüntüleme uygulamaları için bazı iyi özellikleri vardır. Terahertz tekniği güvenli olması, doğasında yer alan iyonlaştırıcı olamama özelliği ve moleküller arası titreşimlere ve su gibi polar maddelere karşı çok hassas olması yönlerinden röntgen ve bilgisayarlı tomografi taramalarına göre üstünlükleri vardır ve gelecekte bu teknolojilerin yerini alması beklenilmektedir.

Terahertz dalgaların spektral parmak izlerini tanıma yeteneği göz önüne alındığında farklı yumuşak doku türleri ile algılama (moleküler yapı tanımlama) açısından iyi bir kontak sağlayabilir. Ayrıca, sıvı içeriğini ve diğer kanser belirteçlerini tespit etmek için hassas bir yöntemdir. Bazı kanserli doku türlerinin çevreleyen normal dokulardan daha yüksek su içeriğine sahip olduğu tespit edildiğinden, T-ışını görüntüleme bir tespit aracı olarak hizmet edebilir [45, 46]. Güçlü sıvı emilimi nedeniyle, yalnızca küçük bir alana nüfuz edebilir ve dokunun yüksek çözünürlüklü yüzey altı görüntülenmesine sağlayabilir. Terahertz görüntüleme tekniği ile dokuların 3 boyutlu görüntüleri elde edilebilir. Dokuların sağlıklı veya sağlıklı olmadığını ayırt etmek için spektral bilgilerine özellikle de emilim belirteçlerine bakılır. İletim yerine yansıyan radyasyona dayalı olarak gerçekleştirilen bazı T-ışını uygulamaları bazal hücreli karsinom gibi deri kanserlerini

tespit edebilir [47]. Terahertz görüntüleme tekniği diğer metodolojilere göre daha erken bir tıbbi tanı yapma imkânı sağlar [48].

1.3.4. Diğer Bazı Terahertz Uygulamaları

Yüksek frekanslı iletişimin yoğun bir araştırma alanı vardır. Uzun mesafeli iletişimin maliyet, yararlılık, bakım vb. gibi bazı dezavantajları vardır ve günümüzde de kablosuz iletişime ilgi giderek artmaktadır. Mevcut kablosuz iletişimler onlarca gigahertz'lik taşıyıcı frekansları ile mikrodalga aralığındadırlar. Kablosuz iletişim teknolojisi düşük frekanslı radyo dalgası taşıyıcı dalgalarından mikrodalga bölgesine ilerledikçe hem akış hızı hem de iletilebilen ve alınabilen toplam bilgi miktarı sürekli olarak artmıştır. Kablosuz iletişim teknolojisinin terahertz aralığında daha da ilerleme yeteneği mevcuttur ve bu ilerleme performansı binlerce kat artırılabilir. Bu nedenle geniş bant kablosuz ağ sistemleri uygulamaları için terahertz radyasyonu büyük bir potansiyeline sahiptir [49, 50].

Terahertz frekansları büyük bant genişliklerine sahip iletişim için uygundur. İletişimde frekans açılması (atlaması) olarak adlandırılan bant genişliği aralığı üzerinde farklı frekanslarda kısa açılmalar (atlamalar) halinde iletimi modüle etmek iletişimi şifreleme açısından daha güvenli hale getirilebilir. Bu sadece gizli dinlemeyi zorlaştırmakla kalmaz frekansın böylesine büyük bir bant genişliği üzerinden kurulması iletişimin tespit edilmesini imkânsız hale getirebilir. Bununla birlikte modülasyon yöntemleri nihayetinde gerçek veri hızlarını da sınırlayabilen elektronik araçlar olduğundan terahertz frekanslarında kablosuz iletişimin gerçekleştirilmesindeki zorluklar vardır ve bunlardan en önemlisi bir taşıyıcı sinyalin uygun modülasyonu ve sistem bant genişliğinin genellikle vericinin veya detektörün bant genişliğiyle doğal olarak sınırlı olması gerçeğidir [41].

Ayrıca imalat endüstrisinde ambalaj malzemelerinin terahertz dalgalarına karşı transparan olması özelliğinden dolayı THz sistemleri kalite kontrol ve proses izleme gibi işlemleri yerine getirebilir. Bu nedenle terahertz teknolojisi diğer bazı frekans kaynaklarının tespit edemediği kusurları imalat endüstrisinde ambalajlı malzemelerde kalite kontrol uygulamalarında tespit edebilmektedir [51]. Dahası T-ışını görüntüleme ilaçların salım mekanizmalarının belirlenmesi gibi farmasötik amaçlar için bile kullanılmaktadır [52].

Son olarak, terahertz frekans radyasyonu astronomide önemli bir yer tutmaktadır. Bu üç nedenden kaynaklanmaktadır. Birincisi, kızılötesi radyasyon evrendeki en bol radyasyon türüdür çünkü uzaydaki sıcaklıklar aşırı derecede soğuktur. Uzaydaki nesnelere yaydığı az miktardaki ısı tipik olarak uzak kızılötesi ve terahertz bölgelerindedir. İkincisi, uzaydaki birçok nesne gözlemlemek istediğimiz nesnelere yansıyan görünür ışığı dağıtan toz ve enkaz bulutları tarafından engellenir. T-ışınları toz parçacıklarından çok daha büyük dalga boylarına sahip olduğundan bu toz bulutlarına nüfuz edebilir ve içinden geçerek radyasyonun toplanmasını sağlamaktadırlar. Üçüncüsü ve son olarak, evrenin genişlemesi nedeniyle dünyadan hızla uzaklaşan nesnelere yayılan veya yansıyan görünür radyasyon Doppler kırmızısı genellikle terahertz bölgesine kaymıştır. 1980'lerden beri uzak kızılötesi ve T-ışını astronomi araştırmaları Hawaii, Antarktika ve Şili'de yeni teleskoplar ve gözlemevleri kurulmasıyla beraber artmıştır. Terahertz spektroskopisi tabanlı teleskoplar özellikle yıldızların doğum sürecini incelemek veya güneş sistemimiz dışındaki su içeren gezegenleri içerebilecek sistemleri bulmak için yararlı olan materyallerin ve materyal durumlarının tanımlanmasına izin verebilecek spektroskopik bilgiler sağlamaktadır [53-56].

Burada bahsettiğimiz çeşitli terahertz uygulamalarından üretim, kontrol ve tespit alanlarında gelişmiş performans beklemekteyiz lakin bu uygulamalar büyük ölçüde laboratuvar ortamlarında kalmaktadır, ticari olarak ürün haline gelmeleri zaman almaktadır.

1.4. Metamalzemeler - Işık Madde Etkileşimi

İnsan algısının çoğu ışık ve maddenin etkileşiminden kaynaklanmaktadır. Bu algının en önemlisi ise görünür ışığın gözle etkileşiminden kaynaklanan ve beyne gönderilen sinyallerin yorumlanmasıdır. Elektrik ve manyetizma yüzyıllardır yoğun bir şekilde gözlemlenmiş ve çalışılmıştır, ancak 1800'lerin başından ortasına kadar yani Orsted, Gauss, Ampere ve Faraday'ın keşiflerine kadar elektrik ve manyetizmayı gerçek anlamda anlamayı başaramamıştık. Sonra 1864'te Maxwell elektrik ve manyetizmayı hakkında yaptığı araştırmalarla matematiksel olarak dört denklem keşfetmiştir bunlar;

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (1.1a)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (1.1b)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (1.1c)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (1.1d)$$

Burada \vec{E} elektrik alanı, \vec{H} manyetik alanı, \vec{B} manyetik akı yoğunluğunu ve \vec{D} ise elektrik akı yoğunluğunu ifade etmektedir. Yük yoğunluğu ρ ve akım yoğunluğu \vec{J} malzemedeki serbest yükler ile ilgili büyüklüklerdir.

Maxwell denklemleri zamanla değişen elektrik ve manyetik alanların uzayda yayılan radyasyon ürettiğini ve dolayısıyla ışığın elektromanyetik doğasını modern elektromanyetizmayı kurarak keşfetmesini sağladı. Belirli bir sistem için bu denklemlerin çözümü uygun sınır koşullarının bilinmesi koşuluyla, sistemdeki uzayın her noktasındaki elektrik ve manyetik alanları tam olarak tanımlar ve ayrıca herhangi bir ortamla dalga etkileşimini açıklar.

Bir malzemenin elektromanyetik tepkisi elektriksel iletkenlik, elektriksel geçirgenlik ve manyetik geçirgenlik gibi kendine özgü özellikleri ile karakterize edilebilir. Elektriksel iletkenlik, bir malzemenin uygulanan bir elektrik alanı varlığında bir elektrik akımı geliştirme yeteneğinin bir ölçüsüdür. Bir malzemenin elektriksel geçirgenliği bir elektrik alanı oluşumuna direnme yeteneğidir. Aynı şekilde bir malzemenin manyetik geçirgenliği manyetik alan oluşumuna direnme kabiliyetidir. Bir malzemenin sırasıyla efektif veya net elektrik ve manyetik tepkilerini tanımlayan ancak daha küçük ölçekte olan elektriksel geçirgenlik ve manyetik geçirgenlik malzeme içindeki elektrik ve manyetik dipollerin toplam tepkisinden kaynaklanır. Sıradan malzemedeki elektrik dipolleri taşıyıcılar (elektron deliği), atomik (elektron çekirdeği) ve moleküler ayarlama (iyonlar) nedeniyle olabilir. Çoğu malzeme iç manyetik dipollere sahip değildir bu nedenle sıradan malzemeler neredeyse bire yakın manyetik geçirgenliğe sahiptir.

Bir malzemenin elektromanyetik yanıtını açıklamak için diğer yararlı malzeme parametreleri de Maxwell denklemlerinden türetilebilir. Bir malzemenin kırılma indisi, ışık hızına göre radyasyonun malzeme içinde hareket edeceği bağlı hızı veren ve doğal

olarak birimsiz bir niceliktir. Bir malzemenin kırılma indisi aşağıdaki denklemlerle belirlenir:

$$n = \pm\sqrt{\epsilon\mu} \quad (1.2)$$

burada n malzemenin karmaşık kırılma indisidir. Benzer şekilde, dalga empedansı denklemi:

$$\eta = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad (1.3)$$

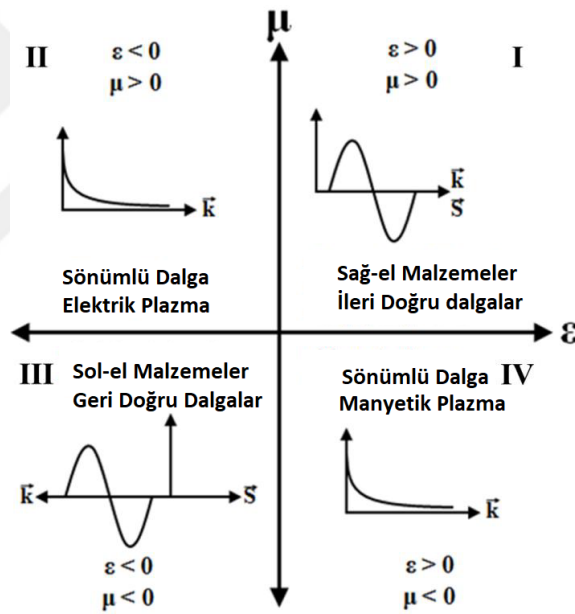
η dalga empedansıdır. Tüm bu malzeme parametrelerinin frekansa bağlı olduğu unutulması gereken bir gerçektir [57].

1.4.1. Metamalzemelerin Tanımı

1968'de Rus fizikçi Prof. Victor G. Veselago aynı anda negatif elektriksel geçirgenlik ve manyetik geçirgenliğe sahip bir malzemenin elektromanyetik tepkisini teorik olarak hesapladı. V. Veselago'nun hesaplamalarına göre sol-el adını verdiği bu tür malzemedeki elektromanyetik dalgalar grup hızlarına zıt paralel faz hızlarına sahip geriye doğru dalga yayılması olacaktır. Makalesinde ters Doppler kayması ve geriye doğru Cerenkov dâhil olmak üzere sol-el malzeme özelliklerini öngördü ve hatta negatif manyetik geçirgenliğe sahip olabilecek malzemeler doğada olmasa bile süper algılama uygulamalarına atıfta bulundu [58]. 1999'da Pendry negatif geçirgenlik ortamı sağlayabilecek teorik bir tasarım - ayırık halkalı rezonatör (SRR) [59] - ve ardından Smith tarafından 2000 yılında üretilmiş bir sol el malzemesinin ilk raporunu bildirene kadar daha fazla ilerleme sağlanamadı [60].

Sol-el malzeme (LHM) veya negatif kırılma indisi malzemesi (NIM) olarak bilinen elektromanyetik metamalzemeler (MM'ler) aynı anda negatif elektriksel geçirgenlik ve manyetik geçirgenliğe sahip olan malzemeler oluşturmak için geliştirildi. Bu çığır açan çalışmalardan esinlenerek kare ayırık halka rezonatörlerinden ve tel şerit elektrik dipollerinden oluşan bir negatif kırılma indisi metamalzemesi San Diego'daki Prof. Schultz'un grubunda deneysel olarak gösterilmiş ve doğrulanmıştır [61]. Walser 2001 yılında metamalzeme terimini ortaya attı. Bir metamalzeme olağandışı bir elektromanyetik tepki sergileyen homojen efektif bir ortam olarak tanımlanabilir. Metamalzemeler tipik olarak bir dizi alt dalga boyunda elektromanyetik olarak rezonant

yapılardan oluşur. Özellikleri doğrudan bileşenlerinden gelen sıradan malzemenin aksine, bir metamalzemenin olağandışı elektromanyetik özellikleri oluşan rezonant yapıların boyutu, geometrisi ve yönelimi nedeniyle ortaya çıkar. Bu benzersiz özellik metamalzemelerde tasarlanabilir bir elektromanyetik tepkiye izin verebilir. Sol-el materyallerin metamalzemelerin bir alt sınıfı olduğu unutulmaması gereken bir gerçektir [62]. Bununla birlikte egzotik elektromanyetik tepkilere sahip metamalzemeler Maxwell denklemlerinde herhangi bir fiziksel yasayı ihlal etmeden negatif elektriksel geçirgenlik ve manyetik geçirgenlik kullanılarak açıklanabilir [63]. Maxwell denklemlerinin değişmez doğası nedeniyle negatif kırılma indisli metamalzemeler tüm elektromanyetik spektrum üzerinde geçerlidir.



Şekil 1.2. Elektriksel ve manyetik geçirgenlik kombinasyonlarının diyagramı.

Bir malzeme elektromanyetik tepkisine göre, elektriksel geçirgenliği ve manyetik geçirgenliğinin işaretine göre dört kategoride sınıflandırılabilir. Bu sınıflandırma şekil 1.2'de görülmektedir. Çoğu doğal malzeme şekil 1.2'de görülen yalnızca birinci, ikinci veya dördüncü bölümde yer almaktadır. İlk kategori, aynı anda pozitif elektriksel geçirgenliğe ve manyetik geçirgenliğe sahip malzemelerden oluşur. Bu malzemeler dalganın mikrodalgadan görünür bölgeye kadar yayılmasına izin verir ve doğal dielektrik malzemeler bu bölgede yer alır.

İkinci kategori negatif elektriksel geçirgenliğe (frekans plazma frekansında düşük olduğunda) ve pozitif manyetik geçirgenliğe sahip malzemelerden oluşur. İkinci çeyrekte kalınlık deri derinliğinden büyükse dalga sönümlenerek kaybolur ve buradaki malzemeler genellikle metaller, ağır katkılı yarı iletkenler ve plazmalardır. Bir metalin elektriksel geçirgenliği bir malzemedeki taşıyıcı davranışını elektromanyetik özellikleriyle ilişkilendiren Drude modeli denklemiyle açıklanabilir:

$$\varepsilon(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + i\omega_c)} \quad (1.4)$$

burada ω_p metal plazma frekansıdır, ω yayılan dalganın açısal frekansıdır, ω_c kayıp terimi olan metal saçılma frekansıdır. Malzemenin saçılma frekansının, kaybın ihmal edilebilir olduğu durumlarda plazma frekansından çok daha düşük olduğunu varsayılarak açısal frekans plazma frekansına ($\omega \rightarrow \omega_p$) yaklaştıkça ortaya çıkan elektriksel geçirgenliğin sıfıra yaklaştığı görülebilir. Açısal frekans plazma frekansının altındaysa elde edilen elektriksel geçirgenlik negatif olacaktır. Bu durum hayali bir kırılma indisine ve büyük miktarda yansıma ile sonuçlanan dalga empedansına yol açar. Benzer şekilde, dördüncü kategori dalganın yayılmasına izin vermeyen pozitif elektriksel geçirgenliğe ve negatif manyetik geçirgenliğe sahip ferromanyetik (ferrit) malzemeler içerir.

Üçüncü kategoriye ait olabilecek herhangi bir malzeme eşi benzeri olmayan malzemedir çünkü aynı anda negatif elektriksel geçirgenlik ve manyetik geçirgenlik sergileyecektir. Bu kombinasyon gerçek bir negatif kırılma indisine, reel dalga empedansına ve malzeme içinde geriye doğru dalga yayılmasına yol açar. Bu matematiksel olarak aşağıdaki denklemle verilen dalga sayısı şeklinde ifade edilebilir:

$$k = \omega \sqrt{\varepsilon\mu} \quad (1.5)$$

Bir dalganın yayılması için dalga sayısının gerçek (reel) olması gerekir. Aynı anda pozitif ve aynı anda negatif elektriksel geçirgenlik ve manyetik geçirgenlik durumları için bu koşul Şekil 1.2'de görüldüğü gibi karşılanmaktadır.

Negatif bir kırılma indisinin etkisini göstermenin belki de en basit yolu, iki farklı malzemenin ara yüzündeki kırılma açılarını her malzemenin kırılma indisine ile

ilişkilendiren Snell kırılma yasasıdır. Snell kırılma yasası aşağıdaki denklem ile ifade edilir:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (1.6)$$

burada n_1 ve n_2 farklı malzemelerin kırılma indisi ve θ_1 ve θ_2 sırasıyla gelen ve iletilen dalganın arayüzeyinin normali ile yaptığı açı değeridir.

Elektriksel geçirgenlik ve manyetik geçirgenlik parametreleri frekansa bağlı olduğundan bir metamalzeme için kullanılabilen (operasyonel) frekans aralığı da vardır. Bir metamalzemenin çalışma frekansını belirlemede en önemli faktör ortamı oluşturan alt dalga boyu yapılarının boyutudur. Bu operasyonel frekansın çoğunlukla yüksek iletkenliğe sahip metallerden yapılan bu yapıların boyutlarına göre ölçeklenebileceği (ayarlanabileceği) anlamına gelir. Boyutun küçültülmesi operasyonel frekansta buna karşılık gelen bir artışa yol açar. Ne yazık ki, metalik yapıların boyut ölçeklendirmesi sınırlıdır çünkü boyut yeterince azaldığında metalin iletkenliği yığın değerinden dolayı azalacaktır [64].

2000 yılından bu yana yeni gelişmeler metamalzeme çalışma frekanslarını yükseltmeye başladı; nihayet 2007 yılında görünür frekanslarda metamalzemeler ile operasyonel frekans gerçekleştiriyor. Soukoulis'in inceleme makalesinde yayınlanan ve yalnızca negatif manyetik geçirgenlik metamalzemelerini gösteren açık üçgenler ve sol-el metamalzemeleri gösteren katı üçgenler ile metamalzemelerin operasyonel frekanslarının nasıl arttığını gösteriyor. Daha yüksek frekanslı operasyonel frekans elde etmedeki zorlukların yanı sıra alt dalga boyu yapılarının rezonans doğası metamalzemelerin operasyonel frekanslarının bant genişliğini genellikle çok dar hale getirir. Bu, birçok uygulama için sonunda üstesinden gelinmesi gereken başka bir zorluktur [65].

1.4.2. Metamalzemelerin Uygulamaları

Metamalzemelerin içinde yer aldığı önemli uygulamalar geçtiğimiz son 20 yılda büyük ilgi gördü. Metamalzemeler kullanılarak üretimi gerçekleştirilen ilk uygulamalar sıkı sıkıya radyo ve mikrodalga frekans aralıklarında kullanılan yöntemlere bağlıydı. Bu durum yapıların boyutlarının milimetre veya santimetre düzeyinde olmasından kaynaklanıyordu. Buna rağmen yeni uygulamalar için birçok fikir tüm elektromanyetik

spektrum için hızlı bir şekilde ortaya çıktı. Negatif indeks metamalzemeler üzerine yapılan öncü çalışmalar kırınım sınırlamasının üstesinden gelebilecek süperlens uygulanmasının her ne kadar dalga optiğinin temel ilkelerine aykırı gözükse de geliştirilmişime yol açtı [66]. Dikkate değer bir uygulama dalga yayılımını öngörülen bir şekilde yönlendirmek için gradyan indeksi metamalzemelerini kullanan dönüşüm optiğidir [67]. Silindir simetrikliği ile uzaysal olarak değişen elektriksel geçirgenlik ve manyetik geçirgenlik elektromanyetik dalgaları bükerek mikrodalga frekanslarında görünmezlik gizlemesini göstermek tasarlandı [68]. Daha sonra, gigahertz radyasyonu ve yakın kızılötesi ışık için halı benzeri metamalzeme görünmezlik pelerini gösterildi [69, 70].

Metamalzemelerin bir başka çekici uygulaması gelen tüm elektromanyetik dalgayı tasarlanmış bir frekansta soğurabilen optik olarak ince mükemmel soğurucular oluşturmaktır [71-74]. Çoğu metamalzeme mükemmel soğurucuda (MPA) iyi tasarlanmış elektromanyetik tepkiye sahip metamalzemeler, bir dielektrik katman üzerinde üretilir ve arka taraf metalik bir zemin düzlemi ile kaplanır; bu çok katmanlı yapıdan gelen iletimi ve yansımayı geçersiz kılmak için bir empedans eşleştirme katmanı olarak hizmet eder ve gelen gücü yakalar ve emer [75, 76]. Dahası sıra dışı elektromanyetik tepkileri nedeniyle metamalzemelerle ilgili çok sayıda çalışmalar ve uygulamalar vardır; filtreler [77, 78], yakın alan geliştirme [79, 80], modülatörler [81-83], antenler [84, 85], sıfıra yakın indeks [86, 87], mikrodalga kuplörleri [88, 89], gelişmiş dalga kılavuzları [90, 91], kablosuz iletişim [92, 93], radar sistemleri [94], optik görüntüleme [95] ve biyo-algılamaya [96] kadar geniş bir uygulama yelpazesi vardır.

Doğanın nadiren sunduğu bir şey olan malzemelerin optik özelliklerini ayarlama ve yeniden yapılandırma yeteneği kompozit malzemelerin özelliklerini hücrelerin şeklini veya birim hücreler arasındaki yakın alan etkileşimini değiştirerek metamalzemeler tarafından elde edilebilir. Örneğin metamalzeme tepkisi metamalzeme birim hücrelerindeki dielektrik veya metalik yamalarıyla veya yapısal yer değiştirme ile yakın alan etkileşimini ayarlayarak etkili bir şekilde ayarlanabilir. Rezonans tepkisini ayarlamının ötesinde dalga yayılımı metamalzeme dizisindeki yerel birim hücrelerin özelliklerini kontrol ederek ayarlanabilmektedir. Ek olarak metamalzemeler güçlü yerel alan geliştirmesine bağlı doğrusal olmaması sebebiyle doğrusal olmayan optik bileşenleri

uygulama konusunda katkı sağlayabilir. Bu nedenle metamalzemeler yeni işlevsel fotonik cihazlar oluşturmak için kullanılabilir [97].

1.5. THz Metamalzemelerinin Sentezi

Metamalzemeler efektif parametrelere sahip homojen ortamlar olarak kabul edilebilir. Metamalzemelerin en önemli özelliği dalga boyu altı birim hücrelerin geometrisini ve düzenini tasarlayarak olağanüstü elektromanyetik özellikler elde edebilmemizdir. Burada THz metamalzemesinin nasıl sentezleneceğini ve tez çalışmasında kullanılacak bazı temel unsurları tartışmak istiyoruz.

THz metamalzemelerinin birim hücreleri dielektrik malzemelere gömülü metal yapılarıdır çünkü metalik elemanlar kullanarak yük ve akım dağılımını kontrol etmek kolaydır. Farklı belirlenmiş karakteristiklere ulaşmak için geliştirilmiş çeşitli tipte birim hücreler vardır. Metamalzemeleri oluşturmak için ince teller, ayırık halka rezonatörü ve türevleri, elektrik ayırık halka rezonatörü (ESRR), kiral yapılar, çubuk çiftleri, balık ağları, haç çiftleri ve diğer yapı blokları kullanılmıştır. Burada bahsi geçen yapı bloklarından bazıları ya elektrik ya da manyetik tepki için tasarlanmıştır, diğerleri ise negatif kırılma indisi elde etmek amacıyla tasarlanmıştır. Bu bölümde ayrıntılı olarak ayırık halka rezonatörü ve elektrik ayırık halka rezonatörü anlatılacaktır. Kızılötesi frekansların altındaki frekanslarda özellikle de THz bölgede ince tellerin ve ayırık halka rezonatörlerin temel yapıları istenen elektromanyetik özellikleri elde etmek için yeterlidir. Özelliklerini ince tellerden ve ayırık halka rezonatörlerden alan diğer gelişmiş yapı blokları metalik bileşenlerin ideal iletkenliklerini yitirdikleri ve temel yapılar için fabrikasyonun çok zorlaştığı yüksek frekanslarda istenen özellikleri sürdürmek için tasarlanmıştır.

1.5.1. Ayırık Halka Rezonatörler

Manyetizma manyetik bir dipol moment oluşturan akım döngülerini destekleyebilmesi koşuluyla manyetik olmayan malzemelerden elde edilebilir. Bu prensibi benimseyerek dalga boyu altında iletken döngüler içeren ayırık halka rezonatörler (SRR) elektromanyetik dalgaların uygun hizalanması altında manyetik bir tepkiye sahip olabilir. Ayırık halka rezonatörler elektron spin rezonans spektroskopisi için manyetik rezonatörler olarak incelenmiştir. Muadili olan solenoid halka ile karşılaştırıldığında ayırık halka

rezonatörler kompakttır. 1999'da Pendry ve ark. manyetik olmayan iletkenlerle etkili bir manyetik geçirgenlik elde etmek için ayrıık halka rezonatörleri kullandı; bu, bir metamalzemenin ilk teorik gösterimi olarak kabul edildi. Şekil 1.3'de gösterildiği gibi orijinal çift ayrıık halka rezonatörlerin bir birim hücresi temelde zıt yarıklara veya boşluklara sahip iki eş merkezli metal halkadan oluşur. Ayrıık halka rezonatörler eksenel yönde salınan bir manyetik alan bileşenine bağlandığında halka bir akım akışı oluşturur, bu ayrıca manyetik alana paralel veya antiparalel bir manyetik dipol oluşturur. Rezonatörde aralarında temel modun LC rezonansı olduğu bir dizi özmod bulunur. LC modunda ayrıık halka rezonatörler seri bağlanmış RLC devresi olarak kabul edilebilir burada indüktör halka yapısına karşılık geldiği ve kapasitansın boşluğa denk geldiği düşünülebilir. LC modunun rezonans frekansı:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1.7)$$

ile verilir. Ayrıık halka rezonatörler farklı şekillerde uyarılabilir. Bir uyarma halka yapısında salınan akımı indükler ve tıpkı doğal malzemelerdeki atomlar gibi bir elektrik dipolü ve manyetik dipol ile sonuçlanır. Bu nedenle, sıralı ayrıık halka rezonatörleri efektif bir elektriksel geçirgenlik ve manyetik geçirgenlik sergileyebilir. Ayrıık halka rezonatörlerin efektif özellikleri sayısal simülasyonlar kullanarak farklı uyarma koşulları altında bulunabilmektedir. İç içe halka çift ayrıık halka rezonatörler net kapasitansı katkıda bulunur ve rezonans frekansı düşürür [98].



Şekil 1.3. Ayrıık halka rezonatörün şematik görünümü.

Manyetik bir uyarma altında periyodik olarak hizalanmış Ayrık halka rezonatörlerden oluşan bir metamalzeme yapısı Lorentzian modeli ile efektif bir manyetik geçirgenlik ile tanımlanabilir.

$$\mu_{eff}(\omega) = 1 - \frac{F\omega^2}{\omega^2 - \omega_{m0}^2 + j\Gamma\omega} \quad (1.8)$$

burada ω_{m0} manyetik rezonans frekansıdır, Γ enerji dağılımını temsil eder ve F ise ayrık halka rezonatörün doldurma (dolgu) faktörüdür. Manyetik rezonans frekansı ayrık halka rezonatörün geometrisi ile ilgilidir.

$$\omega_{m0}^2 = \frac{3Ic_0^2}{\pi \ln \frac{2c}{d} r^3} \quad (1.9)$$

Manyetik plazma frekansı manyetik geçirgenliğin sıfırı geçtiği yerdir ve şu şekilde verilir:

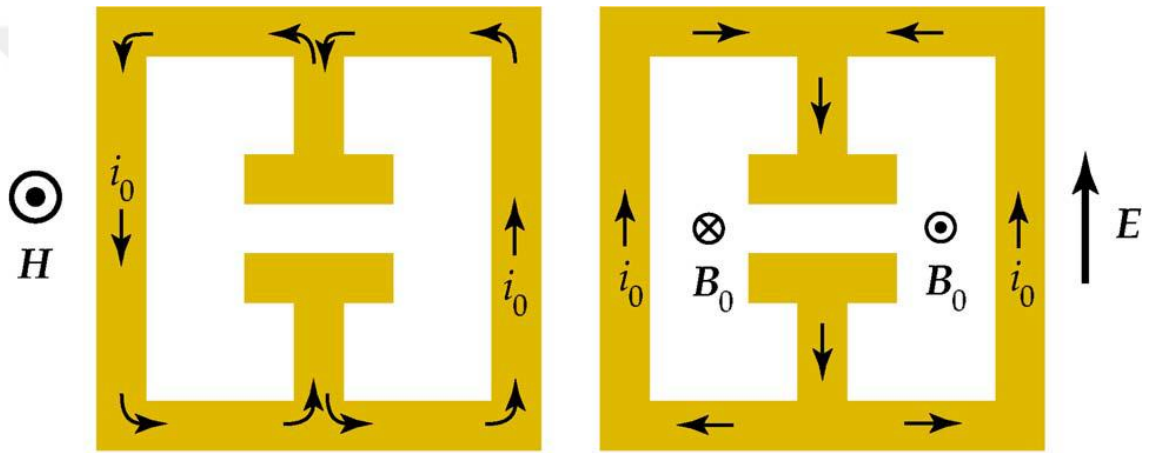
$$\omega_{mp}^2 = \frac{\omega_{m0}^2}{1 - F} \quad (1.10)$$

Rezonanstan daha düşük frekanslarda, ayrık halka rezonatörler manyetik alana pozitif bir yanıt verir ve rezonans ve plazma frekansları arasında yanıt negatif olur. Bu nedenle yapı negatif bir geçirgenlik dahil olmak üzere paramanyetizma $\mu_{eff} > 1$ ve diamanyetizma $\mu_{eff} < 1$ şeklinde olur.

1.5.2. Elektrik Ayrık Halka Rezonatörü

Bir elektrik ayrık halka rezonatörü (ESRR) ortak bir yarık ile iki ayrık halka rezonatörden oluşan simetrik ayrık halka rezonatörleri (elektrikli LC rezonatörleri olarak da bilinir) ne manyetik ne de manyetoelektrik kuplajlara sahip bir yapıdır. Tek yarık ayrık halka rezonatörü gibi temel rezonans modu ortak bir kapasitöre paralel bağlanmış iki indüktörlü eşdeğer bir devre modeline karşılık gelen LC rezonansıdır. Sonuç olarak bir elektrik ayrık halka rezonatörü ve bir ayrık halka rezonatörü aynı boyutlara yani yan genişlik ve boşluk boyutuna sahipse ilki ikincisinden daha düşük bir rezonans frekansı sergileyebilmektedir. Başka bir deyişle elektrik ayrık halka rezonatörüler aynı frekansta çalışan ayrık halka rezonatör metamalzemelerden daha kompakt kapsama alanına sahiptir.

Bir elektrik ayırık halka rezonatör bir elektrik alanı tarafından uyarıldığında temel LC rezonans modunda uyarılabilir. Simetrik yapısı nedeniyle iki halkada salınan akımlar zıt yöndedir. Akımların ürettiği manyetik dipoller birbirini götürerek zayıf bir manyetik tepkiye yol açar yani manyetoelektrik bağlantı yoktur. Elektrik ayırık halka rezonatör elektrik alanına bağlandığında efektif elektriksel geçirgenlikte güçlü bir tepki gösterir. Efektif manyetik geçirgenlik ve bianizotropik parametre ihmal edilebilir bir değere sahiptir ve elektrik tepkisi ile manyetik tepki arasındaki zayıf bağlantıyı gösterir. Elektrik ayırık halka rezonatörün şematik görünümü şekil 1.4’de verilmiştir.



Şekil 1.4. Elektrik ayırık halka rezonatörün döngü akımlarının şematik görünümü.

Elektrik ayırık halka rezonatör elektromanyetik uyarım altındayken halka yapılarında ters yönde dolaşan akımlar indüklenir ve manyetik dipol de iptal olur. Elektriğin uyarımında olduğu durum gibi önemsiz efektif elektriksel geçirgenlik ve bianizotropik parametre ile yalnızca efektif manyetik geçirgenlik ortaya çıkar. Bu özellik elektrik ayırık halka rezonatörü bazı metamatizeme mükemmel emiciler gibi elektrik ve manyetik yanıtı ayırmak istediğimiz uygulamalar için uygun hale getirir. Ayırık halka rezonatörü ve elektrik ayırık halka rezonatörü arasında karşılaştırma yapıldığında ikincisinin bianizotropiyi ortadan kaldırdığı anlaşılmaktadır. Bu ifade dipolar veya daha yüksek rezonans modları için değil yalnızca LC modu için geçerlidir [99].

1.6. Mükemmel Metamatizeme Emiciler

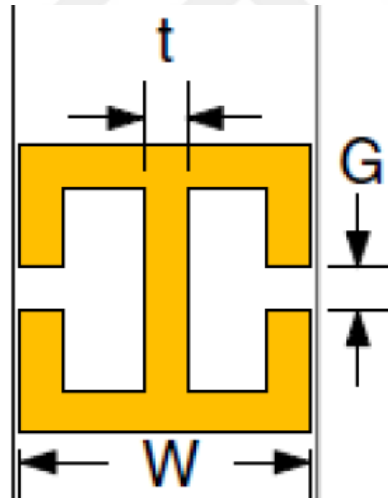
Elektromanyetik dalga emiciler farklı alanlarda çeşitli uygulamaları nedeniyle büyük önem arz etmektedirler. Mikrodalga aralığında elektromanyetik dalga emiciler hedef

dalgaının tespitini bozabilecek çevredeki ortamdan istenmeyen yansımaları azaltmak için kullanılır. Güneş gözlüklerinde kullanılan ultraviyole emiciler gözleri güneş ışığının zararlı radyasyonundan korur. Görünür spektrumda optik dalga emiciler güneş enerjisini soğurma, depolama ve elektrik enerjisine dönüştürme etkinliğini artırır. Özellikle kontrol edilebilir ve frekans seçici emilim yanıtına sahip mükemmel bir THz emici, yüksek verimli, yüksek duyarlı ve ayarlanabilir bir THz detektörünün tasarlanmasında oldukça talep görmektedir. Optik ve mikrodalga bölgelerinde frekans seçici soğurucular bulunmasına rağmen ilişkili malzemeler ve yaklaşımlar THz spektrumunda uygulanamaz. Optik soğurucuların işlevi çoğunlukla enerji seviyeleri veya optik malzemelerdeki bağlar arasındaki enerji bant aralığına dayanır. THz spektrumunda THz radyasyonunun enerjisine eşit bir enerji bant aralığı olan bu tür bir malzeme yoktur. Öte yandan THz dalgalarının enerjisi yaklaşık olarak oda sıcaklığında nesnelere siyah cisim radyasyonuna eşit olduğundan dolayısıyla mevcut olan doğal malzemeler oda sıcaklığında uygun bir işlevsellik göstermeyecektir [100].

Diğer emici türlerinden farklı olarak THz alanında işlev gören metamalzeme yapısına dayalı bir emici, işlevsel THz dedektörleri tasarlamada gelecek vaat eder. Mükemmel metamalzeme emiciler genellikle elektromanyetik radyasyonunun dar bir frekans spektrumunda görev yapar. İlk kez 2008 yılında Landy ve arkadaşları tarafından GHz spektrumunda emici rapor edildi, ancak kısa süre sonra THz aralığında geliştirildi. THz mükemmel metamalzeme soğurucu üç katmandan oluşur. Frekans seçici yüzey (FSS) olarak adlandırılan ilk katman, aslında periyodik bir meta-atom dizisinden oluşur ve bir hedef rezonans frekansı seçmek için ince teller, ayırık halka rezonatörü ve türevleri, elektrik ayırık halka rezonatörü, kiral yapılar, çubuk çiftleri, balık ağları, haç çiftleri vb. gibi diğer yapı blokları kullanılır. Frekans seçici yüzeyi, frekans seçici yüzey ile üçüncü katman arasındaki boşluğu dolduran ve dielektrik ayırıcı adı verilen bir alt dalga boyu dielektrik katmanı izler. Üçüncü katman, frekans seçici yüzey aracılığıyla iletilen radyasyonu tamamen geri yansıtmak için metal arka plan adı verilen ince, sürekli bir metal katmandır.

İlk mükemmel metamalzeme soğurucuda, birim hücrede metal arka düzlem yerine metal bir şerit kullanıldı. Daha sonra emilimi % 100'e çıkarmak için metal şerit yerini metal düzlemle değiştirdi. Şekil 1.5'de bir elektrik alanı tarafından uyarıldığında ortak bir yana sahip iki ayırık halka rezonatörlerin aralığı boyunca polarize olan mükemmel

metamalzeme emicinin birim hücrelerinin şematik gösterimini görülmektedir [101]. Elektrik alanı ayırık halka rezonatörlerin boşluğuna paralel olduğunda, THz elektrik alanı ayırık halka rezonatörlere bağlanır ve dar bir bant genişliğiyle istenen frekansta bir rezonans yaratılır. Bu rezonans frekansında frekans seçici yüzey, elektromanyetik dalgayı kısmen iletir ve kısmen yansıtır. Frekans seçici yüzey aracılığıyla iletilen elektromanyetik dalga metal arka düzlem tarafından geri yansıtılacak ve frekans seçici yüzey ile arka düzlem arasında çoklu yansımaya girecektir. Ara dielektrik parçanın kalınlığı doğru seçilirse, ara parça içindeki yansıyan dalgaların toplamı, frekans seçici yüzey tarafından başlangıçta yansıtılan dalga ile eşit genliğe sahip olacak ancak zıt fazda olacaktır bu nedenle rezonans frekansında toplam yansıma sıfır olacak ve tam emilim gerçekleşecektir. Frekans seçici yüzeyin konfigürasyonu ve boyutu, hedef emilim frekansını belirler ve ara parçanın kalınlığı ve kırılma indisi, rezonans frekansındaki emilim miktarını belirler [102].



Şekil 1.5. Ortak bir yana sahip iki ayırık halka rezonatörün şematik görünümü.

Metamalzeme emicilerin işlevselliğini arttırmak veya mükemmel bir metamalzeme emicinin arzu edilen bir özelliğini elde etmek için çeşitli yapılar tasarlanmış ve imal edilmiştir. Bu yapılar polarizasyona bağlı veya bağımsız, çift bantlı, üçlü bantlı, çok bantlı ve geniş bantlı mükemmel soğuruculardır. Burada şimdiye kadar kapsamlı bir şekilde çalışılmış olan metamalzeme soğurucuları kısaca gözden geçirilecektir.

1.6.1. Polarizasyondan Bağımsız THz Metamalzeme Emiciler

Gelen dalganın polarizasyon yönünden bağımsız çalışan bir emici güneş pilleri, görüntüleme ve güvenlik taraması gibi çeşitli uygulamalar için avantajlıdır. Polarizasyondan bağımsız bir soğurucu yapmak için tüm yapının polarizasyon yönüne göre dönme simetrisine sahip olması gerekir. Bu nedenle dönme simetrisine sahip malzemelerin kullanılmasına ek olarak emicinin geometrisinin rotasyonel olarak simetrik olması gerekir. Bu nedenle terahertz emicilerin frekans seçici yüzeyi polarizasyondan bağımsız veya bağımlı bir soğurucu tasarlamak için anahtar unsurdur. Polarizasyona duyarsız bir soğurucu tasarımında kullanılabilir basit bir frekans seçici yüzey yapısı dairesel veya kare formdaki metalik bir halkadır.

Yong Ma ve arkadaşları [103] iki kare halkayı frekans seçici yüzeyin tek bir birim hücrelerinde birleştirerek bu tür bir polarizasyondan bağımsız THz mükemmel metamalzeme soğurucu olduğunu bildirmişlerdir. Ayrıca Y. Ma ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada polarizasyona duyarsız emilimin yanı sıra, çift emilim bandı da elde etmişlerdir. Bu soğurucuyu tasarlamak için önce iki ayrı tek bantlı soğurucuyu tasarladılar ve bunları birleştirerek terahertz alanında çift bantlı polarizasyondan bağımsız bir soğurucu elde ettiler. Küçük halka, büyük halkanınkinden daha yüksek frekansta bir rezonans frekansına sahiptir. Emilim frekansı halkalar üzerinde salınan elektrik dipol momentinden gelir; bu nedenle gelen dalganın polarizasyonunu değiştirmek dipol momentini halka üzerinde yeniden konumlandırır ancak frekans seçici yüzeyin dönme simetrisinden kaynaklanan rezonans frekansı ve soğurma miktarı üzerinde etkisi yoktur. Simüle edilmiş yapının emilim spektrumu ile fabrikasyon yapı arasında mükemmel uyum elde edilmiştir. Fabrikasyon polarizasyondan bağımsız emici sırasıyla 2,7 THz ve 5,2 THz'de gelen radyasyonun % 68 ve % 74'ünü emer. Yazarlar simülasyon ve ölçüm sonuçları arasındaki küçük tutarsızlıkları aralayıcı olarak kullanılan poliimid dielektrik kalınlığındaki olası varyasyona ve fabrikasyon numunenin boyutlarının simüle edilenlerden sapmasına bağlamaktadırlar.

Çapraz frekans seçici yüzeyin üzerindeki elektrik dipollerinin uyarılmasına dayanan ve Y. Q. Ye ve arkadaşları [104] tarafından rapor edilen polarizasyon duyarsız emicinin başka bir örneğidir. Bu çalışmada metal çapraz haç şekli soğurucunun frekans seçici yüzeyi olarak kullanılmıştır. Rezonans frekansı, genişlik, kalınlık ve çapraz uzunluk için

uygun boyutlar seçilerek ayarlanır. Elektrik alan çapraz şeklin ortogonal çubuklarından birine paralel olduğunda, diğer ortogonal çubukta dipol bulunmazken ilgili çubuk üzerinde bir elektrik dipolü oluşacaktır. Elektrik alan polarizasyon çubuklardan herhangi birine paralel değilse, polarizasyon açısına bağlı olarak her iki çubukta farklı güçlerde elektrik dipolleri olacaktır. Bununla birlikte iki çubuk aynı boyutta olduğundan rezonans frekansı korunacaktır. Ek olarak her iki çubuğa dağıtılan tüm dipol kuvveti, emici sadece bir çubuğa paralel polarizasyona sahip bir THz dalgası tarafından uyarılırsa, bir çubuk üzerindeki dipol kuvvetine eşit olacaktır. Bu nedenle, herhangi bir polarizasyon açısında hem frekansı hem de soğurma gücü korunacaktır. Y. Q. Ye ve ark. soğurucunun polarizasyon duyarsızlığına ek olarak, tasarladıkları soğurucularının, TE ve TM polarizasyonları için geliş açısını 50° ve 80° 'ye yükselterek neredeyse değişmeden kalacağını ve daha geniş bir geliş açıları aralığına dayanıklı olduğunu göstermişlerdir.

1.6.2 Çok bantlı THz Metamalzeme Emiciler

Polarizasyona duyarsız emicilere ek olarak son zamanlarda THz çok bantlı soğurucular büyük ilgi görmüştür. Elektrik dipol, LC veya duran dalga soğurma mekanizmasına dayalı işlemlerle çift bant, üçlü bant ve çok bantlı soğurucular dâhil olmak üzere çeşitli metamalzeme soğurucu yapıları son yıllarda literatüre sunulmuştur. H. Tao ve arkadaşları [105] tarafından iki farklı tipte çift bantlı emici tasarlanmıştır. Bunlardan biri frekans seçici yüzeyde oluşturulan bir LC rezonansına dayalı olarak çalışır, ancak diğeri frekans seçici yüzeyde hem dipol hem de LC rezonanslarının varlığına göre çalışır. LC rezonatörüne dayalı olarak çalışan bir çift bantlı emici elde etmek için, başlangıçta S1 ve S2 olarak adlandırılan iki ayrı tek bantlı emici, istenen iki rezonans frekansı için tasarlandı. Daha sonra bu iki emicinin bir araya getirilmesiyle amaçlanan çift bantlı emici, yani D2 oluşturuldu.

Bir RLC devresindeki kapasitansa benzeyen S1 ve S2'nin frekans seçici yüzeydeki ayrık halka rezonatörlerin boşlukları aynı şekil ve boyutlara sahiptir. Bununla birlikte, S1 ve S2 yapıları için ayrık halka rezonatörlerin uzunluğu farklıdır. Dolayısıyla, S2 yapısının rezonans frekansı S1 yapısınınkinden daha büyüktür, rezonans frekansı elde etmek için: $f = 1 / \sqrt{2\pi LC}$ kabul edilirse, burada f rezonans frekansı, L endüktans ve C bir RLC devresinin kapasitansıdır.

Aynı yazarlar D2'ye ek olarak daha düşük rezonans frekansının kaynağının frekans seçici yüzeyde tasarlanmış LC rezonatörü olduğu, ancak daha yüksek rezonans frekansının frekans seçici yüzeyin kare halkasında oluşturulan bir elektrik dipolden kaynaklandığı D1 adlı başka bir çift bantlı emici bildirdi. Polarizasyona bağlı olan LC rezonansının aksine, D1 soğurucudaki dipol rezonans frekansı polarizasyondan bağımsızdır. Y. Ma ve arkadaşları tarafından bildirilen ve daha önce tartışılan polarizasyondan bağımsız soğurucu aynı zamanda bir çift bant emicidir. H. Tao ve arkadaşları tarafından bildirilen çift bantlı kare halka emici ile çift bantlı emici (D1) arasındaki temel fark, ilkinde her iki rezonansın polarizasyondan bağımsız olması, ikinci durumda ise sadece ikinci rezonansın polarizasyondan bağımsız olmasıdır.

Shen ve arkadaşları [106] tarafından çift bantlı emicinin kare halka sayısını artırarak bir üçlü bant emici bildirildi. Ek olarak yazarlar emilim sürecini yorumlamak ve oluşturulan emilim spektrumunu hesaplamak için çoklu yansıma girişim teorisini kullanmışlardır. Hesaplanan emilim, simülasyon sonuçları ve deneysel sonuçlarla iyi bir uyum içindedir.

1.6.3 Genişbant THz Metamalzeme Emiciler

Geniş bantlı THz emiciler iki ana kategoriye ayrılabilir; seçici ve seçici olmayan emiciler. Her birinin kendi avantajları ve dezavantajları vardır. Seçici olmayan geniş bant emiciler elde etmek için farklı mekanizmalar ve alt dalga boylu yapılar kullanılmıştır. Bunlar; simetrik uyumlu aydınlatma, yüzeyin kendiliğinden birleşen çok katmanlı cam küreler, yüzey kabartma yapıları ve yoğun şekilde katkılı silikonlardır. Bu yapıların hemen hemen tamamı mükemmel bir emilim gücüne ve çok büyük bir bant genişliğine sahiptir. Bu özellik yapıları gelecekteki THz spektroskopisi ve görüntüleme sistemlerinde yansıma önleyici kaplama olarak kullanılmasına olanak sağlar. Ancak bu tür soğurucuların soğurma mekanizmaları seçici olmadığından ve ince olduklarından dolayı frekans seçici bir THz dedektörü olarak kullanılmaları güçtür. Bunun aksine seçici geniş bant soğurucular, rezonans frekanslarının geniş bir frekans bandını kapsayacak şekilde birbirine çok daha yakın olacak şekilde farklı tek frekans soğuruculardan oluşur. Başka bir deyişle seçici THz geniş bant emiciler emme bantları birbirine çok yakın olan çok bantlı emicilerdir. Bu tür soğurucuların rezonans doğasından ötürü, seçici olmayanlara benzer bir ultra yüksek geniş bant soğurucu tepkisi oluşturması zordur.

Grant ve arkadaşları [107] sadece çok katmanlı bir çapraz metamateryale soğurucu tasarlamakla kalmamış, aynı zamanda onu imal etmiş ve deneysel olarak karakterize etmiştir. Dahası, süperpiksel emici adı verilen başka bir geniş bant emici sundular ve bu emicinin sonuçlarını çok katmanlı olanla karşılaştırdılar. Süper piksel emicinin birim hücresi, dielektrik aralayıcı olarak tek katmanlı bir poliimid üzerine bırakılan dört tek frekanslı metalik çapraz şeklindeki yapıdan oluşur. En iyi poliimid kalınlığını ve istenen çapraz boyutları bulmak için FDTD yöntemi ile simülasyon yoluyla geniş bantlı bir emici yapmak için optimizasyon yapılmıştır. Bununla birlikte simüle edilmiş emilim spektrumları deneysel emilim spektrumuna tam olarak uymuyor. Simülasyon ve ölçüm arasındaki bu tutarsızlığı üç poliimid tabakasının potansiyel kalınlığının homojen olmamasına ve poliimid kalınlığının simüle edilmiş ve deneysel değerinin eşitsizliğine bağladılar.

2. BÖLÜM

NÜMERİK ANALİZ YÖNTEMİ

2.1. Giriş

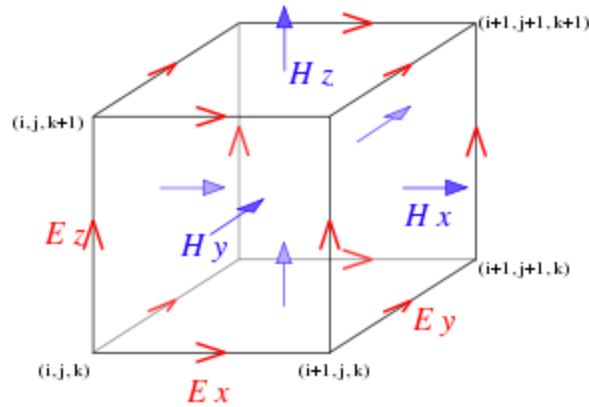
Bu tezin konusu altın metalmalzemelerle terahertz bölgede çalışan emicilerin simülasyonu yapmak ve modelleme sonuçlarına göre yapıların tasarımını optimize etmektir. Bu bölümde simülasyon yapmak için kullanılan sayısal yöntemden, simülasyonu gerçekleştirmek için ilgili yazılımdan ve modelin detaylarından bahsedilecektir.

2.2. Zaman Domeninde Sonlu Farklar (FDTD) Metodu

Bu tez çalışmasında sayısal simülasyonlar FDTD yöntemine dayanmaktadır. Bu nedenle, burada önce FDTD yönteminin ne olduğu hakkında kısa bir inceleme yapılacaktır. Zaman domeninde sonlu farklar, Maxwell denklemlerine dayanan sayısal bir hesaplama aracıdır ve hesaplamalı elektrodinamiği modellemek için kullanılır. Bu yöntemin en önemli özelliği bir zaman domeni metodu olmasıdır bu nedenle simülasyon cevap sonuçları tek bir çalışma ile geniş bir frekans aralığını kaplayabilir.

FDTD yöntemi grid tabanlı hesaplama tekniklerinden biridir. Maxwell denklemleri merkezi fark yaklaşımlarını kullanılarak uzaysal ve zamansal bileşenlerini kısmi türevlerine ayırıştırılabilir. Elektrik ve manyetik alanlar FDTD ile çözülür: uzayın elektrik alan vektör bileşenleri ve manyetik alan vektör bileşenleri alternatif olarak türetilir. Bu çözümler adım adım olur ve her adımda, yeni değerleri elde etmek için son birkaç adımın elektrik ve manyetik alan değerleri kullanılır. Bu işlem, kararlı bir duruma gelene kadar tekrar edilir. FDTD yönteminin temel ve en önemli fikri bu işlemlerdir.

Şekil 2.1'de FDTD yönteminde standart bir Kartezyen Yee hücresinin çizimi görülmektedir. Bu Yee hücresi elektrik ve manyetik vektörlerin uzayda ayrıştığı ve ayrıca zaman içinde alternatif olarak türetilbilir olduğunu belirtmektedir [108].



Şekil 2.1. FDTD yönteminde standart bir Kartezyen Yee hücresinin görünümü.

FDTD yöntemi, Maxwell denklemlerinin başlangıç noktasından birkaç yaklaşım veya basitleştirme önerdiğinden malzemelerin indeks parametreleri bilindiği sürece belirli yapıların elektromanyetik davranışını tahmin etmek için doğru ve güçlü bir yöntemdir. Bu teknik nano bilim dünyasında çok popülerdir ve bazı terahertz enstrümantasyonlarını analiz etmek için iyi kullanılabilir.

Kabul edilebilir doğruluk elde etmek için FDTD grid modeldeki en küçük dalga boyunu ve geometrik özelliği çözecek kadar ince ayarlanmalıdır, bu da hesaplama yükünü önemli ölçüde etkiler. FDTD tüm simülasyon bölgesinin grid olmasını gerektirdiğinden ağ boyutunun kurulumu hesaplama verimliliğini etkileyen önemli bir faktördür. Aslında kullandığımız yazılım olan Lumerical programı bir sonraki bölümde bahsedilecek olan bu konuya değinecektir.

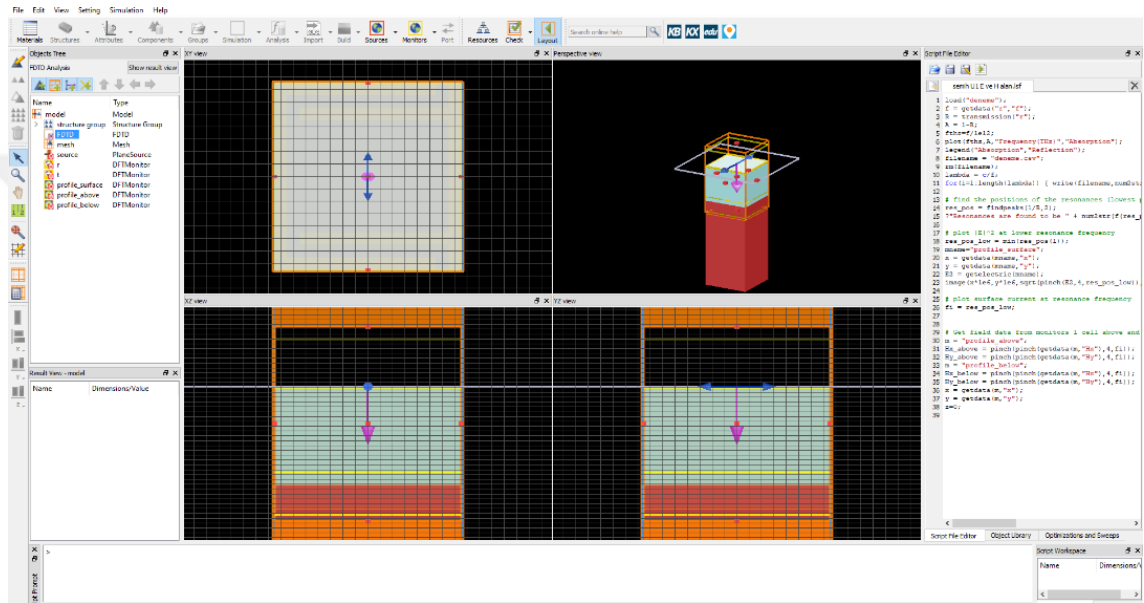
2.3. Lumerical FDTD Solutions Programının Özellikleri

FDTD Solutions programı nanofotonik cihazların, süreçlerin ve malzemelerin tasarımı, analizi ve optimizasyonu için bir FDTD yöntemi Maxwell denklemleri çözücü yazılım paketidir. Merkezi Vancouver'da Kanada'da bulunan Lumerical şirketi tarafından geliştirilmiştir [109].

Bu yazılım paketi hızlı prototip oluşturmaya ve son derece hassas simülasyonlara yardımcı olur böylece maliyetli deneysel prototiplere olan bağımlılığı azaltır ve tasarım konseptlerinin ve belirli yapıların daha hızlı değerlendirilmesine yol açar. Bu yazılım temel fotonik araştırmaları ve görüntüleme, aydınlatma, biyofotonik, fotovoltaiik gibi

endüstriyel uygulamalar dahil olmak üzere çeşitli uygulama alanlarında kullanılmaktadır [110].

Bu yazılımın en son sürümü FDTD Solutions 2020 R2 dir. Şu anda Windows, Mac, Linux ve diğer işletim sistemlerini desteklemektedir. Aşağıda şekil 2.2’da gösterilen arayüz oldukça kullanıcı dostudur ve çoğu işlem açık ve anlaşılırdır.

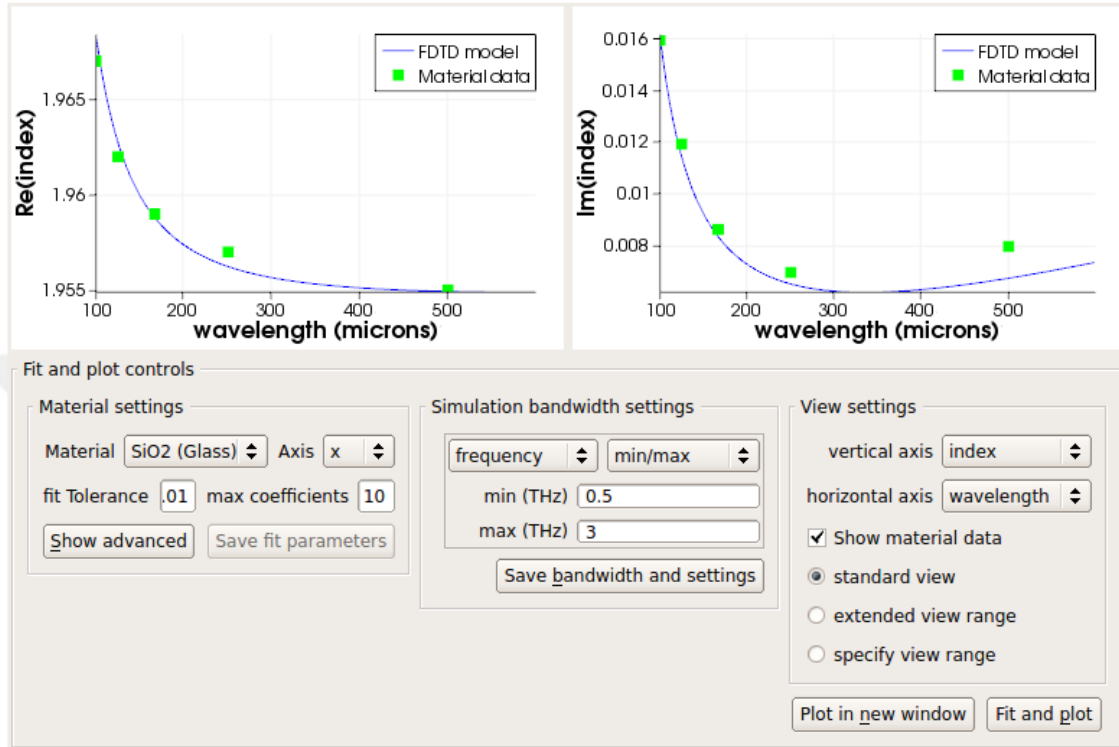


Şekil 2.2. FDTD Solutions yazılım programının grafiksel kullanıcı arayüzü.

Kurulum modülleri dört gruba ayrılabilir: yapılar, simülasyon bölgesi, kaynaklar ve monitörler.

Yapılar araştırma nesnesinin fiziksel yapısını tanımlamaktır. Yapı oluşturma işlemi dahili modellerden veya içe aktarılan harici dosyalardan yapılabilir. Bu adımda, simülasyona dâhil olan tüm materyallerin indeks verileri tanımlanmalıdır. Çeşitli malzeme modelleri ve birçok deneysel veritabanı programın kendi kütüphanesinde kullanıcıların ihtiyacına göre yazılımı geliştiren grup tarafından sağlanmıştır. Ancak bunlar bazı durumlarda yazılım içerisinde yer alan veriler yeterli olmayabiliyor, örneğin THz frekanslarında, ve dolayısıyla kullanıcı istediği indeks tanımlamalarını tasarlamak istediği yapıya göre düzenleyebiliyor. 3. Bölümdeki simülasyonlarda THz frekans bölgesi için kütüphanede yeterli veri bulunmadığı için altına ait iletkenlik ve dielektrik malzemeye ait parametreler tarafımda yazılım programına kaydedilmiştir ve uyumlulukları denetlenmiştir. Şekil

2.3’de simülasyon programı tarafından harici olarak kullanıcıların tarafında kaydedilen indeks verilerinin uyumluluğu denetlenmiş ve gösterilmiştir.



Şekil 2.3. İndeks verileri harici olarak girilen SiO₂'in uyumluluğunun Lumerical programı üzerinden görülmesi.

Yapı tasarlandıktan ve gerekli indeks değerleri verildikten sonra simülasyon bölgeleri tanımlanır. Ağ (mesh) bölgeleri tasarlanan yapıya ve kullanıcının isteğe bağlıyken, bir genel alan ağı zorunludur. Eğer kullanıcı tasarladığı yapıya uygun sayıda ağ seçerse (sistem gereksinimleri doğrultusunda) simülasyonun doğruluğu artacaktır. Yazılım programında tasarımda bölgenin boyutu, sınır koşulları, ağ boyutu temel parametrelerdir. Genellikle simülasyon sonuçlarındaki belirli doğrulukları artırmak amaçlı birkaç alt bölge daha ince ağlara sahip olacak şekilde ayarlanabilir. FDTD Solutions’da en yaygın sınır koşulları mükemmel uyumlu katman (Perfect Matched Layer – PML), metal, periyodik, blok, simetrik ve anti-simetriktir. 3. Bölümdeki simülasyonlarda x, y ve z eksenlerinde sınır koşulları sırasıyla periyodik, periyodik ve mükemmel uyumlu katman durumları seçilmiştir.

Kaynaklar bölümü gelen radyasyonun türünü ve ilgili parametreleri düzenleyip yapıya uygulamamızı sağlar. Yazılım paketinde farklı türde kaynaklar vardır bunlar; dipol

kaynak, Gaussyen kaynak, düzlem dalga kaynağı, toplam alan saçılmış alan (total field scattered field) kaynağı ve diğerleri olarak sıralabiliriz. 3. Bölümdeki simülasyonlarda kaynak olarak z ekseni boyunca düzgün düzlem dalga kaynağı kullanılmıştır. Belli bir bant genişliğini kapsayan bir düzlem dalga için yazılım ilgilenen tüm frekansları içerecek zaman etki alanında bir darbe optimize eder.

Yazılım paketindeki monitörler veri toplamak ve analiz etmek içindir. İki önemli ve basit, anlaşılır olan monitör vardır bunlar; frekans domeninde alan izleme ve frekans domeninde alan ve güç izleme (frequency-domain field profile monitor / frequency-domain field and power monitor.) monitörüdür. İlki, alan dağılımını kaydetmek için kullanılırken, ikincisi belirli bir düzlem üzerinden iletim ve yansıma gibi bilgileri toplayabilir.

3. BÖLÜM

ALTIN PARÇACIK TEMELLİ TERAHERTZ (THz) METAMALZEME EMİCİ TASARIMLARI

3.1. Giriş

Bu bölümde, literatürde dalga boyuna göre oldukça ince ve düzlemsel yapıya sahip temel terahertz metamalzeme emici tasarım çalışmaları irdelenerek; tez kapsamında tamamen teze özgü geometrilere sahip çift bantta çalışan dört adet altın parçacık temelli terahertz metamalzeme emici tasarlanmış ve nümerik sonuçları elde edilmiştir. Tasarlanan terahertz metamalzeme emicilerin rezonans frekanslarında oluşan geçiş, yansıma ve emilim değerleri elde edilerek elektrik ve manyetik alan dağılımlarına bakılmıştır. Ayrıca tasarlanan yapıların geometrik boyutları ve elektriksel özellikleri değiştirilerek en iyi emilim değerlerini veren emici belirlenmiştir. Çalışmada yansıma spektrumu reflektans (R), geçiş spektrumu transmitans (T) ve emilim spektrumu absorptans (A) ile gösterilmiştir. Yansıma ve geçiş değerleri elde edildikten sonra emilim değeri $A = 1 - R - T$ formülü ile hesaplanmıştır [111]. Teze özgü olarak tasarlanan terahertz metamalzemelerin nümerik analizleri FDTD yöntemi kullanılarak yapılmıştır.

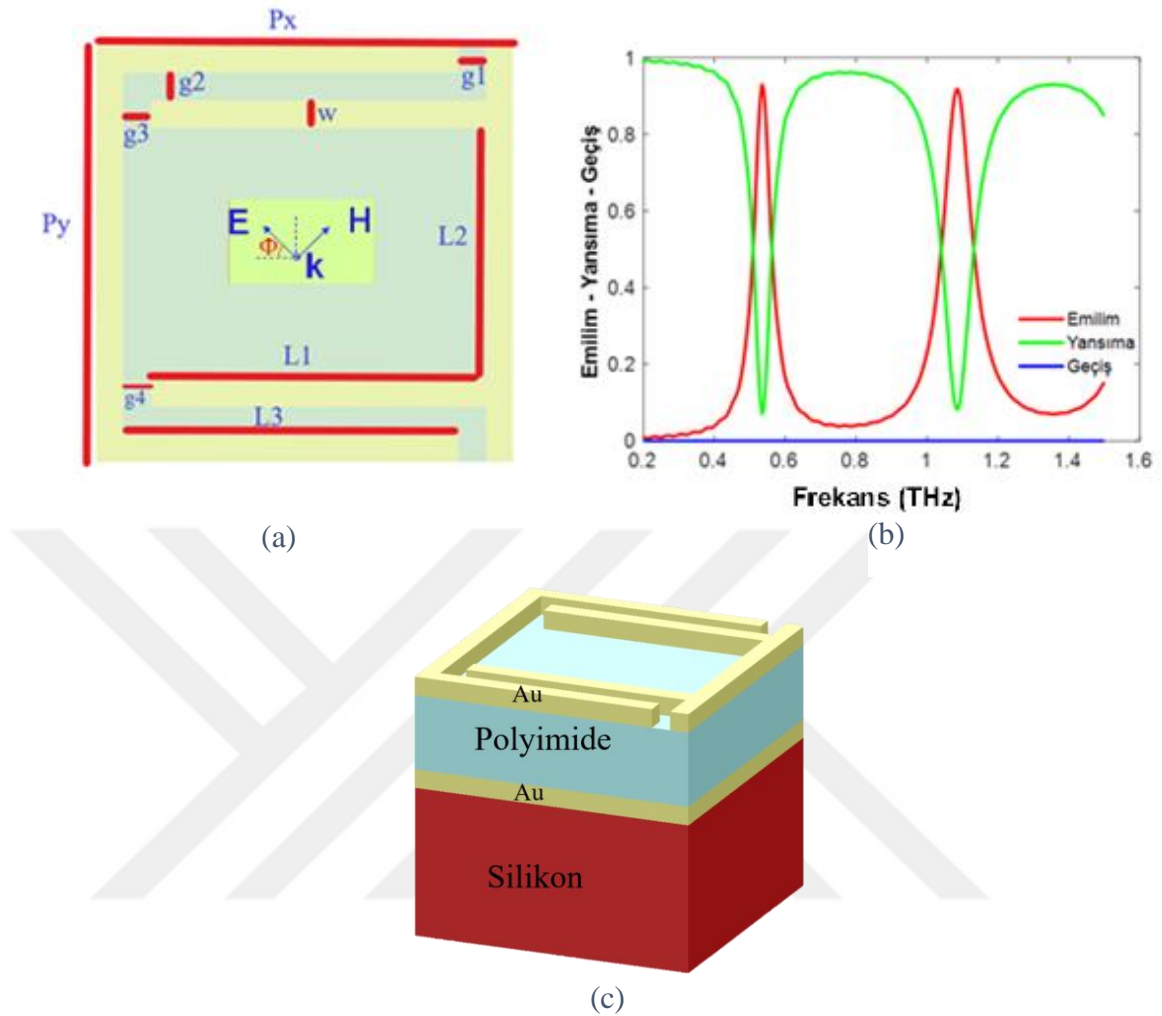
Terahertz metamalzeme emici tasarımları taban malzemesinin üzerine kurulu metal dielektrik metal şeklinde üç katmandan oluşmaktadır. Dalga boyundan daha küçük ayrıtlara sahip üst katman elektrik rezonatörü gibi işlev görür. Alt metal tabaka ise iletilen enerjinin minimum düzeyde tutulması sağlar. Yapıya ait rezonansların ortaya çıkmasında iki iletken tabaka arasında yer alan dielektrik tabakanın kalınlığı, bağıl dielektrik sabiti ve kayıp tanjantı önemli derecede etkilidir. Ayrıca yapıya ait rezonans frekansları kullanılan iletken metalin türüne, metamalzemelerin şekil ve boyutlarına bağlı olarak THz bölgede akort edilebilmektedir. Nümerik sonuçları verilen altın parçacık terahertz metamalzeme emiciler sırasıyla T#1, T#2, T#3 ve T#4 kodları ile isimlendirilmiştir.

3.2. Teze Özgü Tasarlanan Altın Parçacık Temelli Terahertz (THz) Metamalzeme Emiciler

3.2.1. T#1

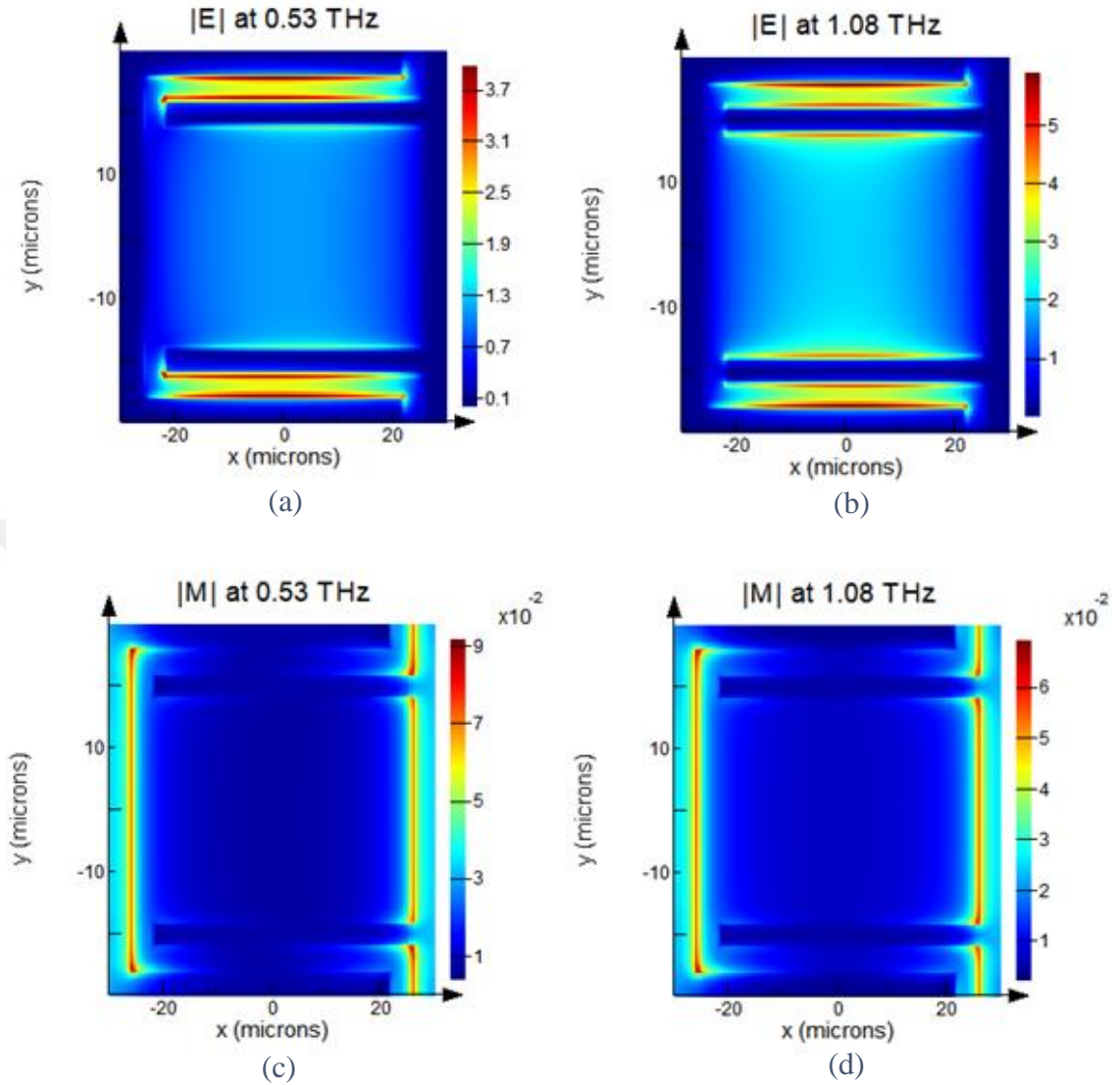
Bu çalışmada, terahertz bölgede çalışan C Pi şeklinde altın parçacık temelli metamalzeme emicinin FDTD metodu kullanılarak çeşitli analizleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.1 (a)'da tasarlanan terahertz metamalzemenin birim hücrenin üstten görünümü verilmiştir. Yapı silikon (Si) alt taban üzerindeki altın (Au) film ile yapının özgün karakterini ortaya çıkaran C Pi şeklindeki altın parçacıklar arasında yer alan dielektrik ara katmandan (Poliimid) oluşmaktadır. Olağanüstü termal stabiliteye ve mükemmel mekanik dayanıma sahip yüksek performanslı bir mühendislik ürünü olan Poliimid (PI), üretim kolaylığı sağlaması ve mükemmel dielektrik özelliklere sahip olmasından dolayı bu tez çalışmasında ara katman olarak sıkça karşımıza çıkmaktadır. Silikon tabaka kalınlığı 200 μm , altın film kalınlığı 0.4 μm , Poliimid dielektrik tabaka kalınlığı 80 μm ve altın (Au) parçacık kalınlığı 0.4 μm 'dir. Silikona ait optik sabitler Palik [112]'ten alınmıştır. Altına ait frekanstan bağımsız yaklaşık iletkenlik $4.06 * 10^7 \text{ S/m}$ 'dir. Poliimid dielektrik katmana ait bağıl dielektrik sabiti ve kayıp tanjantı sırasıyla 3 ve 0.06 olarak alınmıştır. Yapının x ve y eksenindeki periyodikliği $P_x = P_y = 60 \mu\text{m}$ 'dir. L1, L2 ve L3 çubukların uzunluğu olup sırasıyla 48 μm , 36 μm ve 48 μm 'dir. g1, g2, g3 ve g4 çubukların arasındaki açıklık olup 4 μm değerindedir. w, çubukların taban genişliği olup 4 μm değerine sahiptir. Simülasyonlar boyunca analizler y kutuplu düzlem dalga kaynağı altında gerçekleştirilmiştir. Periyodik sınır koşulları x ve y eksenleri doğrultusunda seçilmiş ve mükemmel uyumlu katmanlarz ekseni boyunca kullanılmıştır. Yapılan simülasyonlar sonucunda, C Pi şeklinde altın parçacık temelli metamalzeme emicisine ait bulgular [113] aşağıdaki paragraflarda özetlenmiştir.

Şekil 3.1 (b)'de yukarıda belirtilen parametre değerleri için y polarizeli aydınlatma altında elde edilen emilim, yansıma ve geçiş spektrumu görülmektedir. Emilim ve yansıma eğrileri çift bant rezonans özelliği göstermektedir. Rezonans frekansları ve emilim oranları sırasıyla $f_1: 0.53 \text{ THz} - A: \% 93$ ve $f_2: 1.08 \text{ THz} - A: \% 91$ teorik olarak elde edilmiştir. Geçiş spektrumu, yapıya gelen enerjinin altın film tarafından tamamen bloke edilmesi sebebiyle sıfır olup sabittir. Dolayısıyla emilim = 1 – yansıma şeklinde elde edilir. Bu durumda yansıma emilimin tersi olmaktadır. Şekil 3.1 (c)'de C Pi şeklindeki yapıya ait perspektif görüntü verilmiştir.



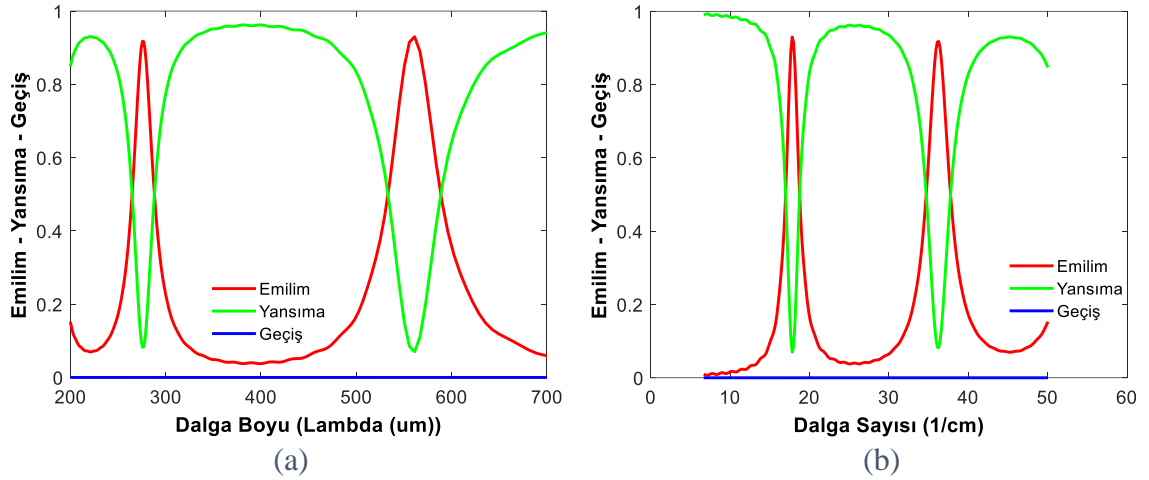
Şekil 3.1. (a) C Pi şeklindeki emicinin üstten görünümü. (b) C Pi şeklindeki emicinin spektral cevabı. (c) C Pi şeklindeki emicinin perspektif görünümü.

Şekil 3.2 (a-d) 'de C Pi şeklindeki yapıya ait her iki rezonans modunda elde edilen elektrik ve manyetik alan dağılımları görülmektedir. Yakın alan güçlendirme dağılımlarının araştırılması emilim rezonanslarının fiziksel kaynağına dair bilgi sağlayabilmektedir. Alan dağılımları C ve Pi çubuklarının arasında yoğunlaşmıştır ve yüzeye gelen enerji buralarda hapsedilmiştir. Yakın alan dağılım değerleri ışık madde etkileşimi için oldukça önemli değerlerdedir. C Pi şeklindeki yapıda rezonans modlarına ait emilim değerlerinin literatürde geçen mükemmel emicilerden daha düşük olmasının sebebi yapıda yer alan C Pi şeklindeki çubuklar arasında elektromanyetik kuplajın (bağlaşımın) yeteri kadar güçlü olamamasıdır. Alan dağılımlarının belirlenmesinde yatay alan monitörleri kullanılmıştır.



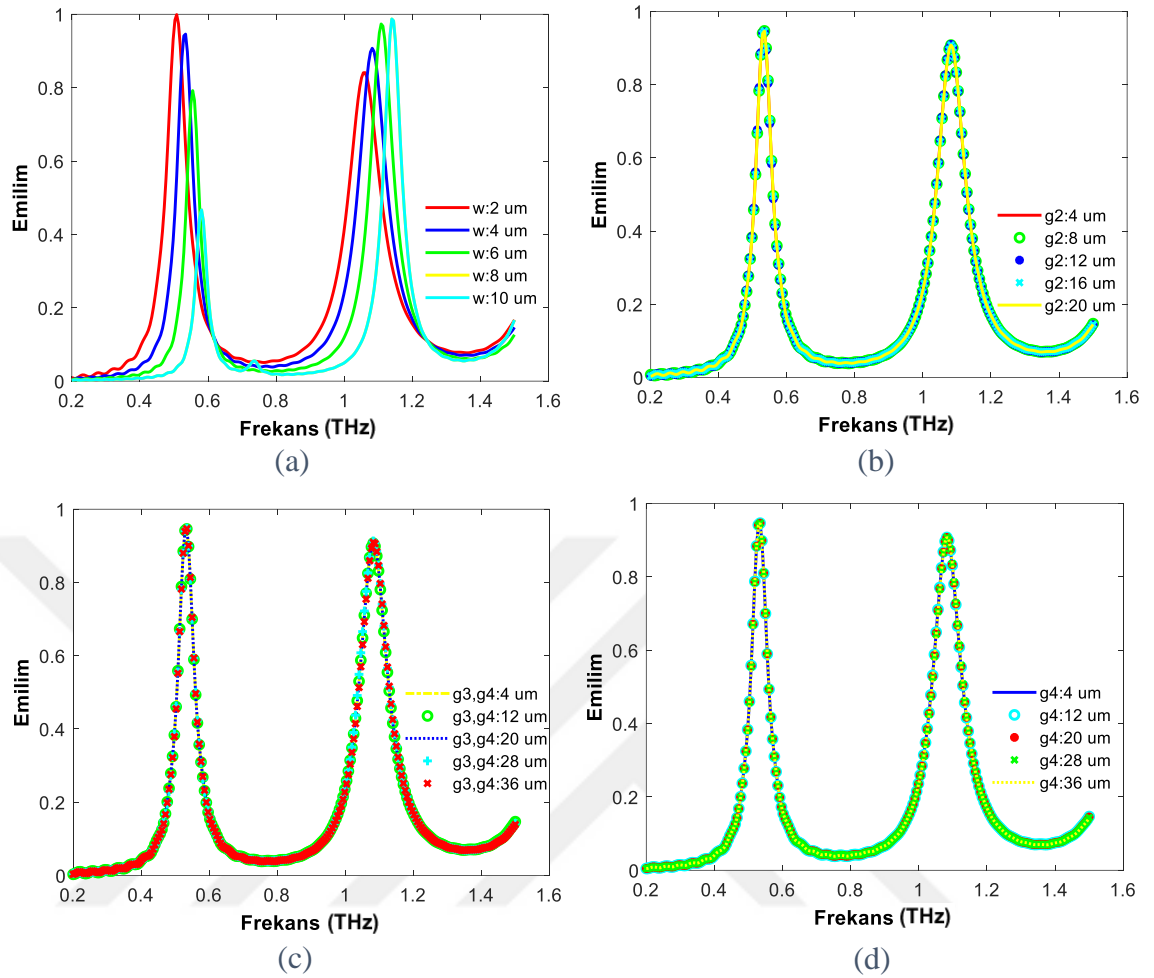
Şekil 3.2. Yapının altın parçacıklar alt ara yüzündeki (a) 0.53 THz için yakın elektrik alan dağılımı. (b) 1.08 THz için yakın elektrik alan dağılımı. (c) 0.53 THz için yakın manyetik alan dağılımı. (d) 1.08 THz için yakın manyetik alan dağılımı.

Şekil 3.3 (a) ve (b)'de emicinin dalga boyu ve dalga sayısına göre emilim, yansımaya ve geçiş spektrumlarına ait grafikler gösterilmiştir. Emicinin rezonans dalga boyları ve dalga sayıları sırası ile $\lambda_1 = 275.56 \mu\text{m}$, $\lambda_2 = 561.26 \mu\text{m}$, $k_1 = 17.81 \text{ cm}^{-1}$ ve $k_2 = 36.27 \text{ cm}^{-1}$ olarak belirlenmiştir.



Şekil 3.3. (a) Emicinin dalga boyuna göre spektrum eğrisi. (b) Emicinin dalga sayısına göre spektrum eğrisi.

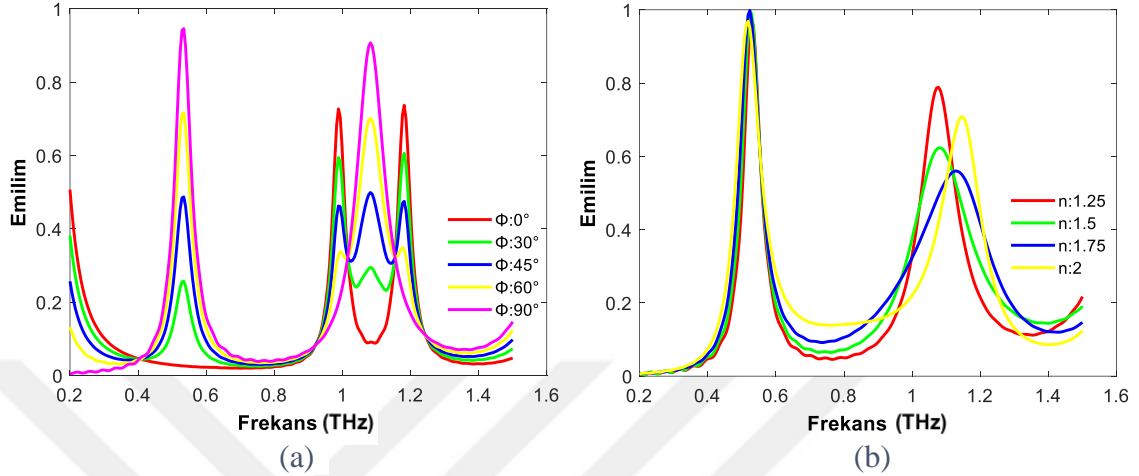
Şekil 3.4'de yapının y yönündeki kutuplama altında parametre hassasiyeti nümerik olarak hesaplanmıştır. w , g_2 , g_3 ve g_4 değerleri değiştirilerek emilim eğrileri çıkarılmıştır. Şekil 3.4 (a)'da sabit $g_1=g_2=g_3=g_4=4 \mu\text{m}$, $\Phi = 90^\circ$ ve $\theta = 0^\circ$ değerleri için w değerinin değişimine bağlı olarak elde edilen emilim eğrisi görülmektedir. w çubukların taban genişliği olup, değeri arttıkça 1. rezonansa ait genlik değeri azalarak frekans 0.6 THz'e doğru kaymaktadır, 2. rezonansa ait genlik değeri artarak frekans 1.2 THz'e doğru kaymaktadır. Yapı bütünleşik tasarıma sahip olduğu için rezonanslar birlikte değişmektedir. Şekil 3.4 (b)'de sabit $g_1=g_3=g_4=w=4 \mu\text{m}$, $L_1=L_3=48 \mu\text{m}$, $\Phi = 90^\circ$ ve $\theta = 0^\circ$ değerleri için g_2 değerinin değişimine bağlı olarak elde edilen emilim eğrisi görülmektedir. g_2 değeri arttıkça rezonans frekanslarında herhangi bir kayma veya genlikte azalma olmamaktadır. Şekil 3.4 (c)'de sabit $g_1=g_2=w=4 \mu\text{m}$, $L_3=48 \mu\text{m}$, $L_2=36 \mu\text{m}$, $\Phi = 90^\circ$ ve $\theta = 0^\circ$ değerleri için g_3 ve g_4 'ün değerlerinin değişimine bağlı olarak elde edilen emilim eğrisi görülmektedir. g_3 ve g_4 değerleri aynı anda arttıkça yani P_i 'nin her iki bacağıda kısaldıkça rezonans frekanslarında herhangi bir değişimin olmadığı görülmektedir. Şekil 3.4 (d)'de sabit $g_1=g_2=g_3=w=4 \mu\text{m}$, $L_3=48 \mu\text{m}$, $L_2=36 \mu\text{m}$, $\Phi = 90^\circ$ ve $\theta = 0^\circ$ değerleri için g_4 'ün değerlerinin değişimine bağlı olarak elde edilen emilim eğrisi görülmektedir. g_4 değeri arttıkça yani P_i 'nin bir bacağı kısaldıkça rezonans frekanslarında herhangi bir değişimin olmadığı görülmektedir. Yapılan analizler sonucunda sunulan C Pi şeklindeki emicinin optik özelliklerinin g_2 , g_3 ve g_4 geometrik parametrelerine bağlı olmadığı görülmüştür. Önerilen emici için rezonans frekansları yapının sadece w geometrik parametresi değiştirilerek ayarlanabilmektedir.



Şekil 3.4. TM modunda geometrik parametre değişimlerinin rezonans frekansına etkisi. (a) w değişimine göre emilim eğrisi. (b) g_2 değişimine göre emilim eğrisi. (c) g_3 ve g_4 değişimine göre emilim eğrisi. (d) g_4 değişimine göre emilim eğrisi.

Şekil 3.5 (a)'da sabit $g_1=g_2=g_3=g_4=4 \mu\text{m}$, $L_1=L_3=48 \mu\text{m}$ ve $L_2=36 \mu\text{m}$ değerleri için yapı üzerine gönderilen düzlem dalga kaynağın kutuplama açısının (Φ) değişimine bağlı olarak (dik geliş için geliş açısı $\theta=0^\circ$ 'de sabit tutularak) elde edilen emilim eğrisi görülmektedir. Kutuplama açısı arttıkça 1. rezonans frekansında genlik artışı olurken, 2. rezonans frekansında ise rezonansın tek pike evirildiği görülmektedir. Metamalzeme emicilerde rezonans frekansların bulunduğu ortamdaki kırılma indisi değişimine karşı göstermiş olduğu hassasiyeti belirlemek için yapı $39.6 \mu\text{m}$ kalınlığında farklı ortamlara nümerik olarak gömülmüştür. Bu ortamların kırılma indisi değerleri $n=1.25$, $n=1.5$, $n=1.75$, $n=2$ olarak alınmıştır. Şekil 3.5 (b)'de $g_1=g_2=g_3=g_4=4 \mu\text{m}$, $L_1=L_3=48 \mu\text{m}$, $L_2=36 \mu\text{m}$, $\Phi = 90^\circ$ ve $\theta = 0^\circ$ sabit değerleri için yapının bulunduğu ortamın değişimine bağlı olarak kırılma indisi hassasiyetinin algılama performansına dair elde edilen emilim spektrumu görülmektedir. Kırılma indisi değeri arttıkça 1. rezonansa

yapının kırılma indisi değişimine karşı çok hassas olduğu ve yüksek emilim yeteneğini koruyabildiği, 2. rezonansa ise genlikte azalmalar gözlenmektedir.

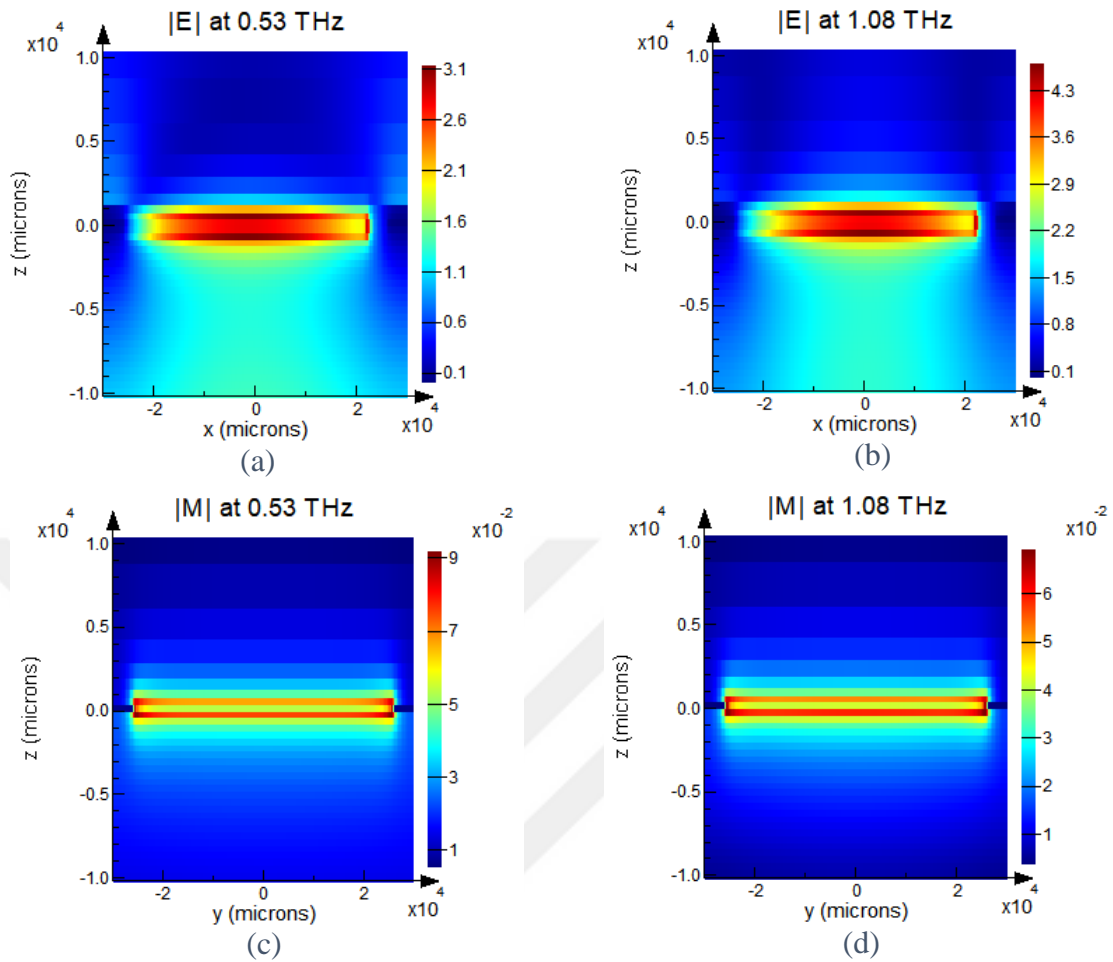


Şekil 3.5. (a) Kutuplama açısındaki değişime göre emilim eğrileri. (b) Emilim spektrumunun kaplama ortamının kırılma indisi değişimine göre emilim eğrileri.

Şekil 3.6 (a) ve (b)'de sırasıyla ilk ve ikinci rezonans değerlerindeki dikey monitör kullanılarak elde edilen kesitsel yakın elektrik alan dağılımı ve değerleri görülmektedir.

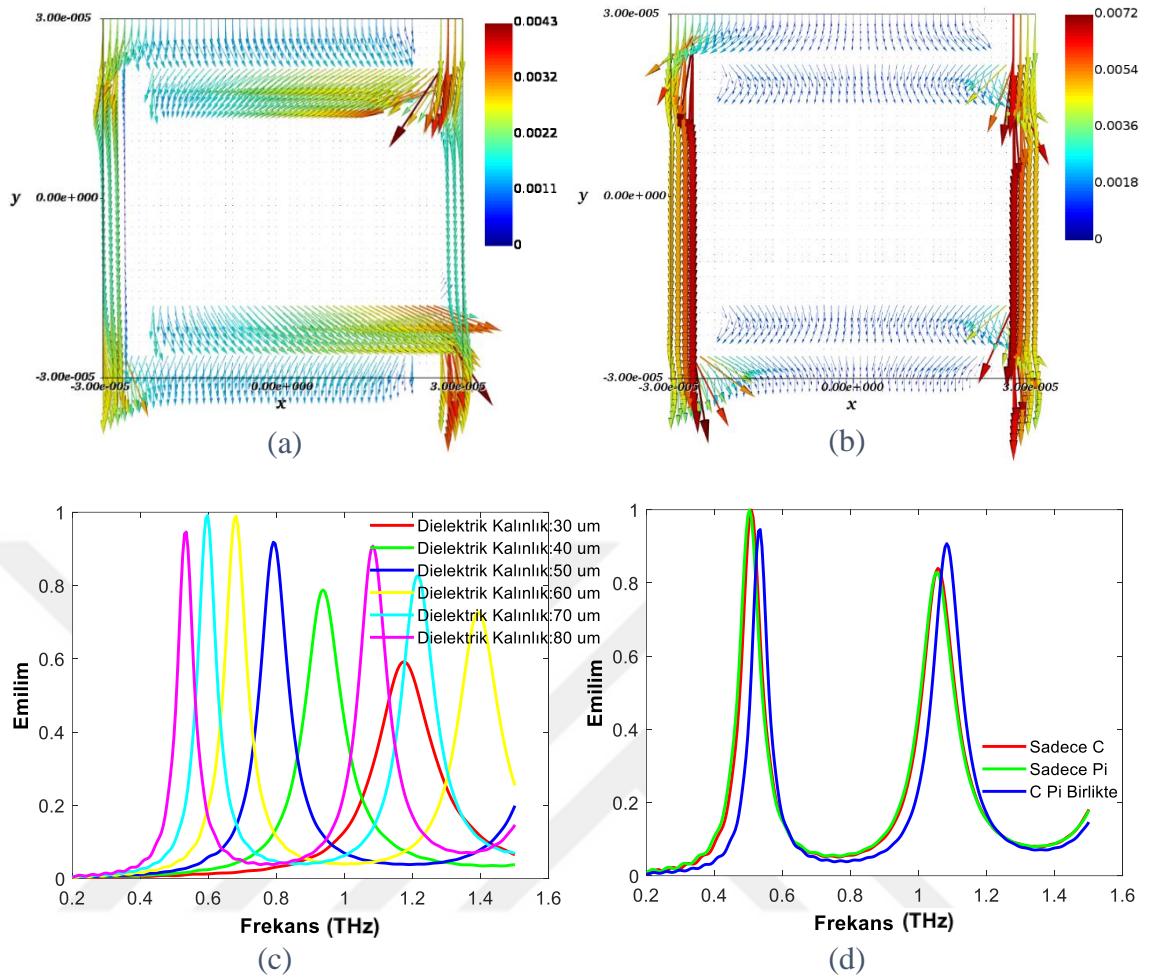
Şekil 3.6 (c) ve (d)'de sırasıyla ilk ve ikinci rezonans değerlerindeki dikey monitör kullanılarak elde edilen kesitsel yakın manyetik alan dağılımı ve değerleri görülmektedir. Çok tabakalı yapıların doğası gereği enerji metal parçacık ile dielektrik tabaka arasında tutulmaktadır. Elde edilen yakın elektrik alan yükseltme değerleri oldukça yüksek olup ışık madde etkileşimi uygulamaları için verimin artırılmasında önemli yer tutmaktadır. Burada ne kadar yüksek miktarda enerji hapsedilirse biyo algılamada o kadar verim artacaktır.

Emicinin yüzeyinde oluşan yüzey akımlarına ait vektör grafiği her iki rezonans modu için Şekil 3.7 (a) ve (b)'de gösterilmiştir. Yüzey akımlarının yapının keskin ve sivri uçlarında çoğunlukla dışarı doğru yöneldiği görülmektedir.



Şekil 3.6. (a) 0.53 THz’de (yz kesiti $x=-26 \mu\text{m}$ ’de) kesitsel yakın elektrik alan dağılımı. (b) 1.08 THz’de (xz kesiti $y=-26 \mu\text{m}$ ’de) kesitsel yakın elektrik alan dağılımı. (c) 0.53 THz’de (yz kesiti $x=-26 \mu\text{m}$ ’de) kesitsel yakın manyetik alan dağılımı. (f) 1.08 THz’de (xz kesiti $y=-26 \mu\text{m}$ ’de) kesitsel yakın manyetik alan dağılımı.

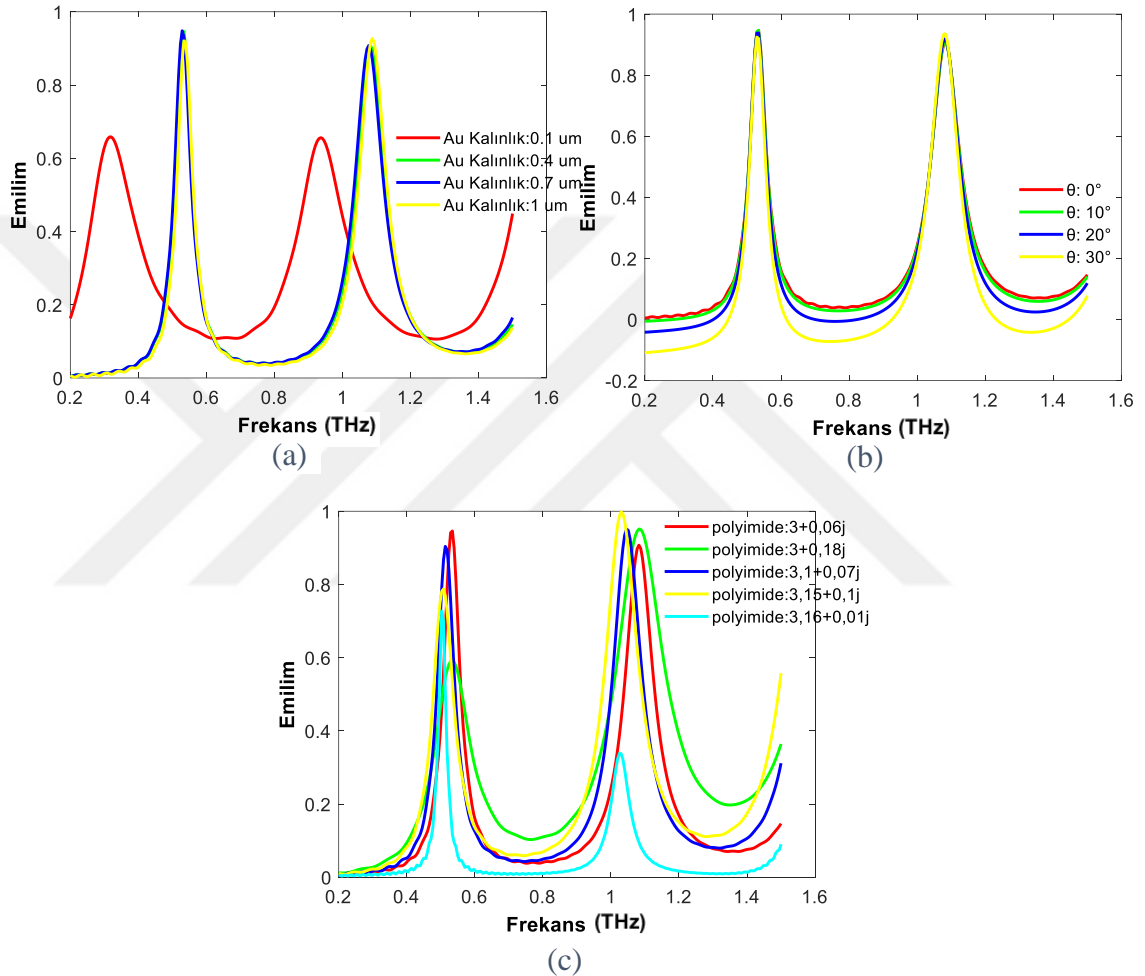
Şekil 3.7 (c)’de sabit $g_1=g_3=g_4=w=4 \mu\text{m}$, $L_1=L_3=48 \mu\text{m}$, $L_2=36 \mu\text{m}$, $\Phi = 90^\circ$ ve $\theta = 0^\circ$ değerleri için dielektrik ara yüzeyin kalınlığının değişimine göre yapının emilim spektrumunun vermiş olduğu değişim görülmektedir. Dielektrik kalınlık $30 \mu\text{m}$ ’den $80 \mu\text{m}$ ’ye kadar $10 \mu\text{m}$ aralıklarla artırılarak $80 \mu\text{m}$ ’de en iyi emilim değeri elde edilmektedir. Yapının emilim yeteneğinin dielektrik tabakanın kalınlığının artışından, dolayısıyla metal dielektrik etkileşiminden dolayı arttığı görülmektedir. Şekil 3.7 (d)’de C ve Pi şeklindeki yapının ayrı ayrı simüle edilerek hangi parçanın hangi rezonansa etki ettiği saptanmaya çalışıldı ve sonuçta spektrum cevabı elde edilmiş oldu. Burada C ve Pi yapıları ayrı ayrı simüle edildiğinde rezonanslarının hemen hemen birbirlerine yaklaşık olduğu ve 1. rezonansların genliğinin C Pi’nin birlikteyken elde edilen genliğinden büyük 2. rezonansların genliğinin ise tüm yapının genliğinden küçük olduğu görülmektedir.



Şekil 3.7. (a) 0.53 THz için yüzey akımının vektör grafiği. (b) 1.08 THz için yüzey akımının vektör grafiği. (c) Dielektrik ara katmanın kalınlık değişimine göre emilim eğrisi. (d) Yapıyı oluşturan C Pi'nin ayrı ayrı ve birlikte emilim eğrileri.

Yapıya ait parçacık boyutlarının değiştirilerek rezonans frekanslarının akort edilebilmesi biyo algılama uygulamaları için istenilen bir durumdur. Bu bağlamda yapıda yer alan tabakaların yanı sıra rezonatör görevi gören üst metalik parçacığında geometrik parametre varyasyonları da irdelenmiştir. Sabit $g_1=g_3=g_4=w=4 \mu\text{m}$, $L_1=L_3=48 \mu\text{m}$, $L_2=36 \mu\text{m}$, $\Phi = 90^\circ$ ve $\theta = 0^\circ$ değerleri için yapının üst kısmında yer alan C Pi şeklini oluşturan iletken kısmın kalınlığının frekans cevabına etkisi şekil 3.8 (a)'da görülmektedir. Altın kalınlığı $0.4 \mu\text{m}$, $0.7 \mu\text{m}$ ve $1 \mu\text{m}$ olduğu zaman her iki rezonans modunda da hafif değişimler gözlenmektedir. $0.1 \mu\text{m}$ olduğu zaman ise rezonans modaları kaymakta ve genlikte azalmaktadır. Şekil 3.8 (b)'de sabit $g_1=g_3=g_4=w=4 \mu\text{m}$, $L_1=L_3=48 \mu\text{m}$ ve $L_2=36 \mu\text{m}$ değerleri için yapıdaki kaynağın geliş açısındaki (θ) değişime göre (kutuplama açısı $\Phi=90^\circ$ 'de sabit tutularak) frekans cevabı değişimi görülmektedir. Burada $\theta 0^\circ$ den 30° 'ye kadar artırılmıştır ve her iki rezonans modunda da hafif değişimler gözlenmiştir.

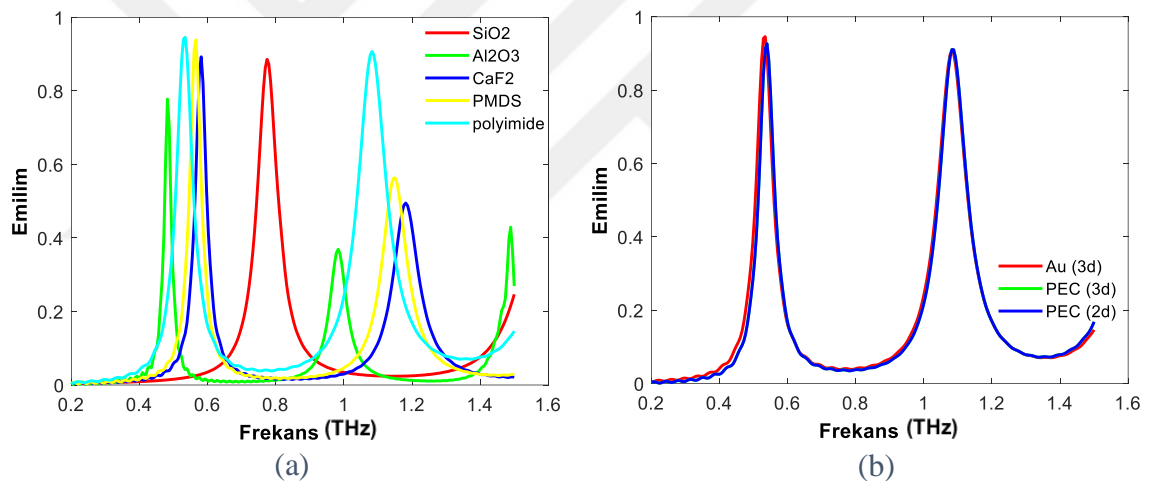
Şekil 3.8 (c)'de sabit $g_1=g_3=g_4=w=4 \mu\text{m}$, $L_1=L_3=48 \mu\text{m}$, $L_2=36 \mu\text{m}$, $\Phi = 90^\circ$ ve $\theta = 0^\circ$ değerleri için yapıda kullanılan dielektrik ara katman Poliimid'nin bağıl dielektrik sabit ve kayıp tanjantı değişiminin frekans cevabına etkisi görülmektedir. Bağıl dielektrik sabiti arttığında her rezonans modunda genlikte azalmalar meydana geliyor ve kayıp tanjant arttığında ise de 1. rezonans modunda genlikte azalma oluşmaktadır.



Şekil 3.8. (a) Üst kısım iletkenin kalınlık değişimine göre spektrum cevabı. (b) Geliş açısındaki değişimine göre emilim eğrileri. (c) Dielektrik ara katmandaki poliimid'nin bağıl dielektrik ve kayıp tanjantı değişimine göre frekans cevabı.

Şekil 3.9 (a)'da sabit $g_1=g_3=g_4=w=4 \mu\text{m}$, $L_1=L_3=48 \mu\text{m}$, $L_2=36 \mu\text{m}$, $\Phi = 90^\circ$ ve $\theta = 0^\circ$ değerleri için ara tabaka Poliimid yerine farklı dielektrik malzemeler kullanılarak yapının frekans cevabı değişimine bakılmıştır. Burada kullanılan dielektrik malzemelerin bağıl dielektrik sabitleri ve kayıp tanjantları Poli dimetil siloksan (PMDS) [114]'den, Al_2O_3 [115]'den, CaF_2 [116]'den ve SiO_2 [117]'den alınmıştır. Kullanılan tüm dielektrik tabakaların vermiş olduğu frekans cevaplarında en az bir bant yüksek emilim

göstermektedir. Lumerical programı FDTD modülünde THz bölgesinde metaller ideal kabul edilir, basit malzeme modelleri kullanılabilir ve yapıya ait alt metal tabaka, deri derinliğinden çok daha büyük bir kalınlığa sahip bir metalik tabaka olduğundan deri derinliği (kalınlığı) göz ardı edilebilir dolayısıyla mükemmel elektriksel iletken (Perfect Electrical Conductors (PEC)) yaklaşımı kullanılabiliriz. Şekil 3.9 (b)'de sabit $g_1=g_3=g_4=w=4 \mu\text{m}$, $L_1=L_3=48 \mu\text{m}$, $L_2=36 \mu\text{m}$, $\Phi = 90^\circ$ ve $\theta = 0^\circ$ değerleri için yapıda kullanılan iletkenler mükemmel elektriksel iletken (PEC) seçildiği zaman ve yapının üst kısım iletkenin z eksenindeki yüksekliği 0 alınıp yapının üst iletken kısmı 2 boyutlu (2D) şekilde oluşturulduğu zamanki frekans tepkisi verilmektedir. Şekil 3.8 (b)'den görüldüğü üzere PEC (3D) ve PEC (2D) ile elde edilen frekans cevapları her iki rezonans modu için de örtüşmektedir.

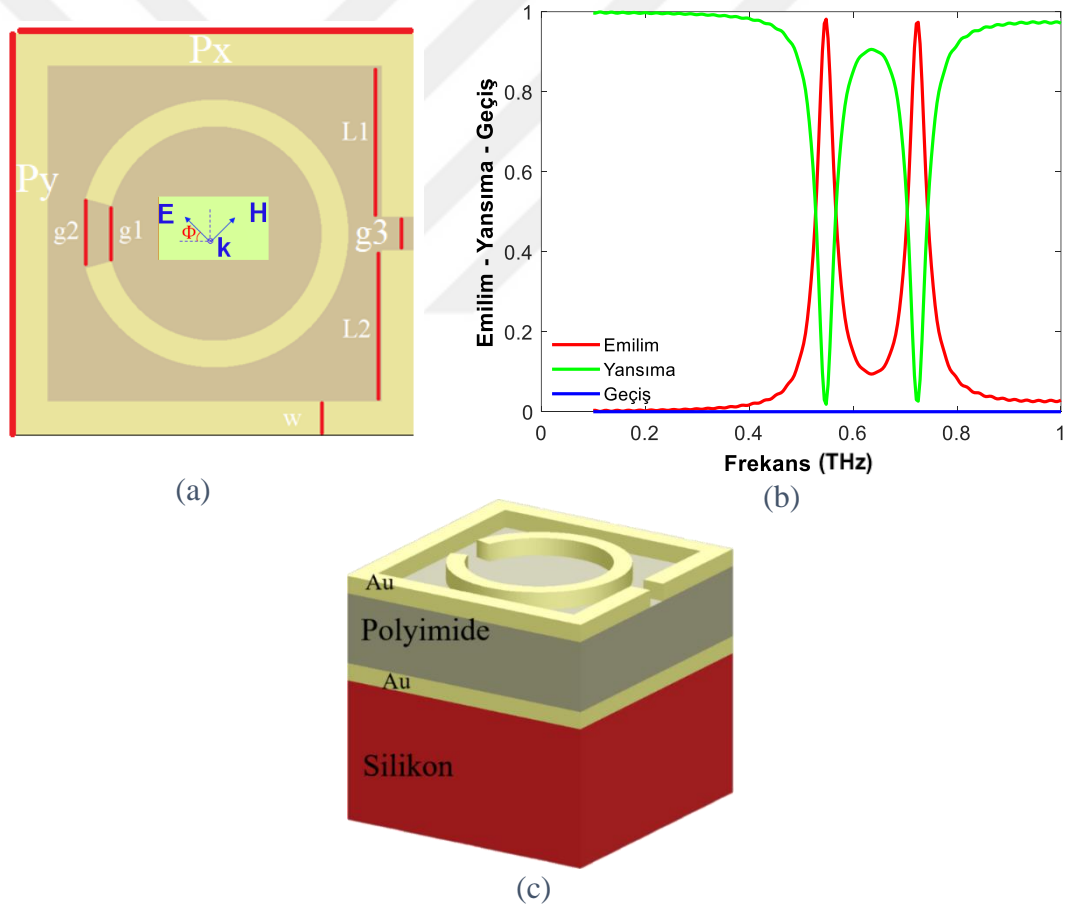


Şekil 3.9. (a) Yapıda farklı dielektrik malzemelerin kullanılması durumunda frekans cevabı. (b) Üst iletken tabakanın Au (3d), PEC (3d) ve PEC (2d) değişimine göre emilim eğrileri.

3.2.2. T#2

Bu çalışmada, altın parçacık temelli açıklık halka ve kare şeklindeki rezonatör THz bölgesi için incelenmiştir. Şekil 3.10 (a)'da açıklık halka ve kare rezonatörün üstten birim şematik görüntüsü verilmiştir. Tüm yapı 200 μm kalınlığındaki silikon (Si) alt taban üzerine kurulmuştur. Silikon alt taban üzerine ise sırasıyla 1 μm kalınlığında Au ayna katmanı ve 60 μm kalınlığında Poliimid dielektrik malzemesi yer almaktadır. En üstte ise yapının özgün karakterini ortaya çıkaran açıklık halka ve kare şeklindeki rezonatör, 1 μm kalınlığında altın parçacıklardan oluşmaktadır. Silikona ait optik sabitler Palik [112]'ten alınmıştır. Altına ait frekanstan bağımsız yaklaşık iletkenlik $4.9 \times 10^7 \text{ S/m}$ olarak

alınmıştır. Dielektrik Poliimid ait bağıl dielektrik sabiti ve kayıp tanjant sırasıyla 3 ve 0.06 olarak alınmıştır. Yapının x ve y eksenindeki periyodikliği $P_x = P_y = 60 \mu\text{m}$ 'dir. L1 ve L2 değerleri birbirine eşit olup $22.5 \mu\text{m}$ değerindedir. Açıklık halka rezonatörün iç yarıçapı $16 \mu\text{m}$, dış yarıçapı ise $20 \mu\text{m}$ dir. g1, g2 ve g3 halka ve kare şeklindeki rezonatörlerin açıklık uzunlukları olup sırasıyla $8,37 \mu\text{m}$, $10,47 \mu\text{m}$ ve $5 \mu\text{m}$ dir. w, kare şeklindeki rezonatörlerin taban genişliği olup $5 \mu\text{m}$ dir. Yapının simülasyonları sırasında periyodik sınır koşulları x ve y eksenleri olarak seçilmiş ve mükemmel uyumlu katmanlar z eksenini doğrultusunda kullanılmıştır. Yapılan simülasyonlar sonucunda, açıklık halka ve kare rezonatör şeklindeki altın parçacık temelli metamalzeme emicisine ait bulgular aşağıdaki paragraflarda özetlenmiştir.



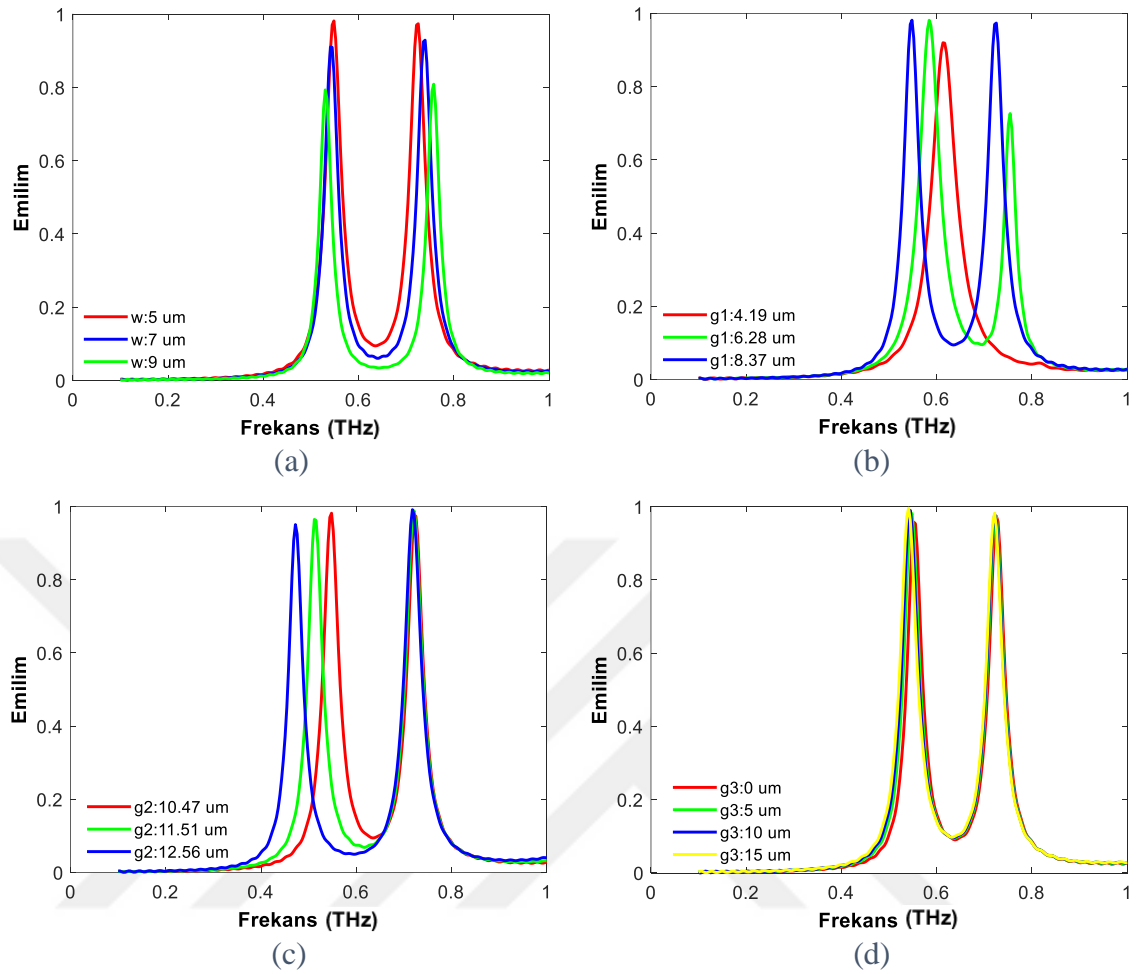
Şekil 3.10. (a) TM modundan açıklık halka ve kare rezonatörün üstten görünümü. (b) Belirlenmiş parametreler için elde edilen yansıma, geçiş ve emilim spektrumu. (c) Yapının perspektif görüntüsü.

Şekil 3.10 (b)'de yukarıda belirtilen parametre değerleri y yönünde düzlem dalga kaynağı altında elde edilen yansıma, geçiş ve emilim spektrumu görülmektedir. FDTD yazılım paketi kullanılarak gerçekleştirilen simülasyonlar sonucunda yapı alt THz bölgesinde çift

bant rezonans özelliği göstermektedir. İlk rezonans frekansı 0.54 THz iken ikinci rezonans frekansı ise 0.72 THz dir. İlk rezonans değerinde %98 olan emilim değeri, ikinci rezonansa ise %97 olarak elde edilmiştir. Yapının alt kısmında bulunan altının kalınlığından dolayı gelen tüm ışınlar yansır ve geçiş sıfır olur. Emilim = 1 – Yansıma formülü ile elde edilir. Şekil 3.10 (c)'de yapıya ait perspektif görünüm verilmiştir.

Şekil 3.11'da yapının y yönündeki kutuplama altında parametre hassasiyeti nümerik olarak hesaplanmıştır. w, g1, g2 ve g3 değiştirilerek emilim eğrisi oluşturulmuştur. Şekil 3.11 (a)'da sabit g1= 8.37 μm , g2= 10.47 μm , g3=5 μm , L1=L2=22.5 μm , $\Phi = 90^0$ ve $\theta = 0^0$ sabit değerleri için w açıklık kare şeklindeki rezonatörlerin taban genişliği değerinin değişimine bağlı olarak elde edilen emilim eğrisi görülmektedir. w değeri arttıkça her iki rezonans modunda kaymalar ve genlikte azalma meydana gelmektedir. Şekil 3.11 (b)'de sabit g2= 10.47 μm , g3=w=5 μm , L1=L2=22.5 μm , $\Phi = 90^0$ ve $\theta = 0^0$ değerleri için g1 açıklığı azaltılarak veya diğer bir deyişle açıklık halka rezonatörünün iç yarıçapı azaltılarak frekans eğrisinde meydana gelen değişim görülmektedir. g1 değeri azaldıkça ilk rezonans modunda kaymalar meydana gelirken ikinci rezonans modunda ise genlikte azalmalar meydana gelmektedir. Yapılan analizler neticesinde açıklık halka ve kare rezonatörün optik özelliklerinin g ve w geometrik parametrelerine bağlı olduğu, rezonans frekanslarının yapının g ve w geometrik parametrelerinin değiştirilerek ayarlanabildiği görülmüştür.

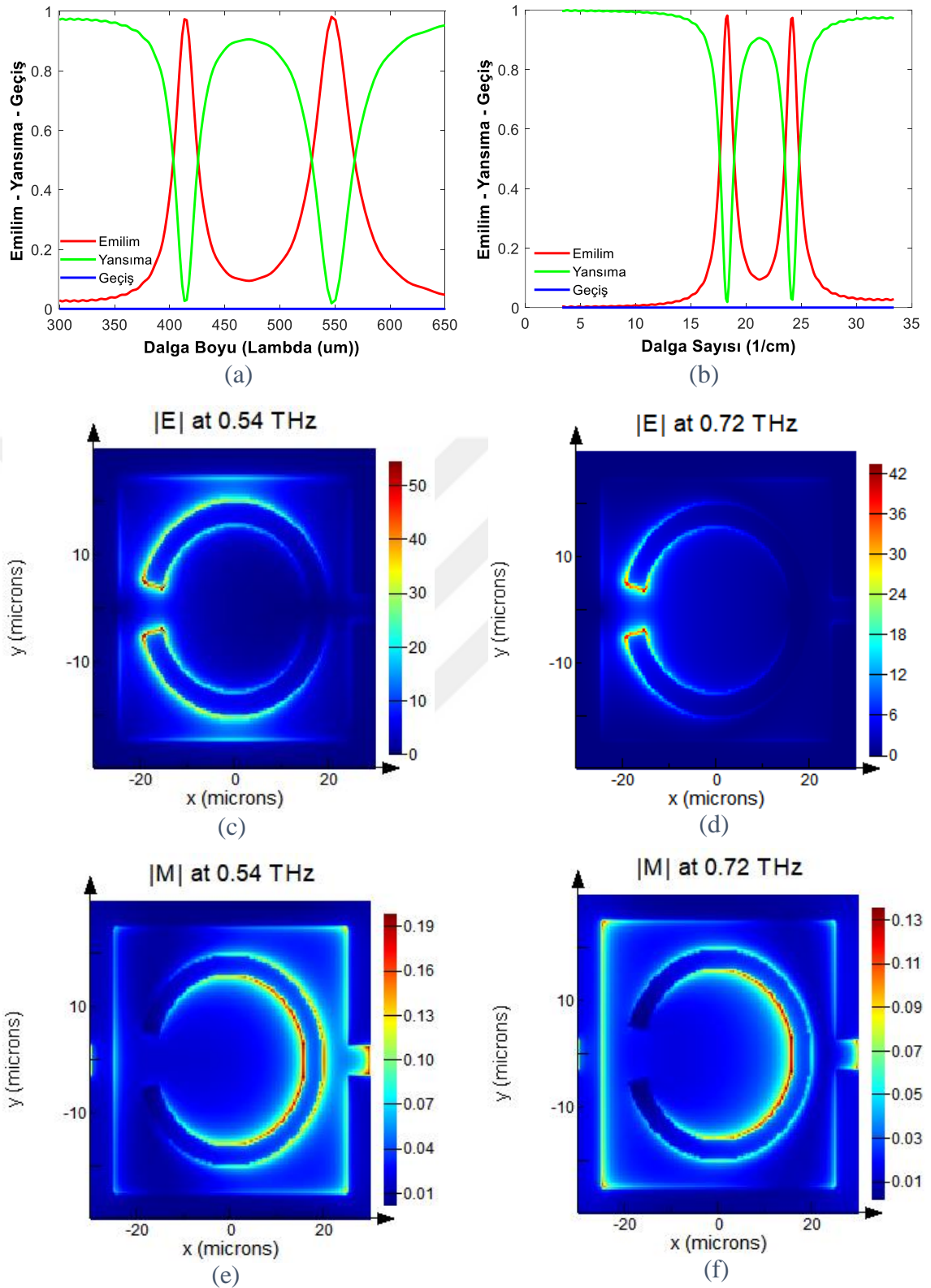
Şekil 3.11 (c)'de sabit g1= 8.37 μm , g3=w=5 μm , L1=L2=22.5 μm , $\Phi = 90^0$ ve $\theta = 0^0$ değerleri için g2 açıklığı artırılarak veya diğer bir deyişle açıklık halka rezonatörünün dış yarıçapı artırılarak frekans eğrisinde meydana gelen değişim görülmektedir. g2 değeri azaldıkça ilk rezonans modunda kaymalar oluşurken ikinci rezonans modunda ise hafif bir değişim gözlenmektedir. Şekil 3.11 (d)'de sabit g1= 8.37 μm , g2= 10.47 μm , w=5 μm , L1=L2=22.5 μm , $\Phi = 90^0$ ve $\theta = 0^0$ değerleri için g3 açıklığı değiştirilerek bir başka deyişle açıklık kare rezonatörün açıklığı değiştirilerek yapının vermiş olduğu spektrum cevapları görülmektedir. g3 değişimi her iki rezonans modunda hafif bir değişime yol açmıştır.



Şekil 3.11. TM modunda geometrik parametre değişimlerinin rezonans frekansına etkisi. (a) w değişimine göre emilim eğrisi. (b) g_1 değişimine göre emilim eğrisi. (c) g_2 değişimine göre emilim eğrisi. (d) g_3 değişimine göre emilim eğrisi.

Emicinin dalga boyu ve dalga sayısına göre emilim, yansımaya ve geçiş spektrumuna ait grafikler Şekil 3.12 (a) ve (b)'de gösterilmiştir. Emicinin rezonans dalga boyları ve dalga sayıları sırasıyla $\lambda_1 = 413.33 \mu\text{m}$, $\lambda_2 = 546.87 \mu\text{m}$, $k_1 = 18.28 \text{ cm}^{-1}$ ve $k_2 = 24.19 \text{ cm}^{-1}$ olarak belirlenmiştir. Rezonansların çift bantta olması, üst metalik yapıdaki şekillerin (çubukların) kendilerine has öz aksiyomlarının ve şekiller arasındaki eş güdüm kuplaj durumlarının olmasından dolayı ortaya çıkmıştır.

Şekil 3.12 (c, d, e ve f)'de çift bant rezonansın fiziksel kaynağını belirlemek için y yönünde kutuplama altında yakın elektrik ve manyetik alan yükseltme değerleri ve dağılımları nümerik olarak elde edilmiştir.

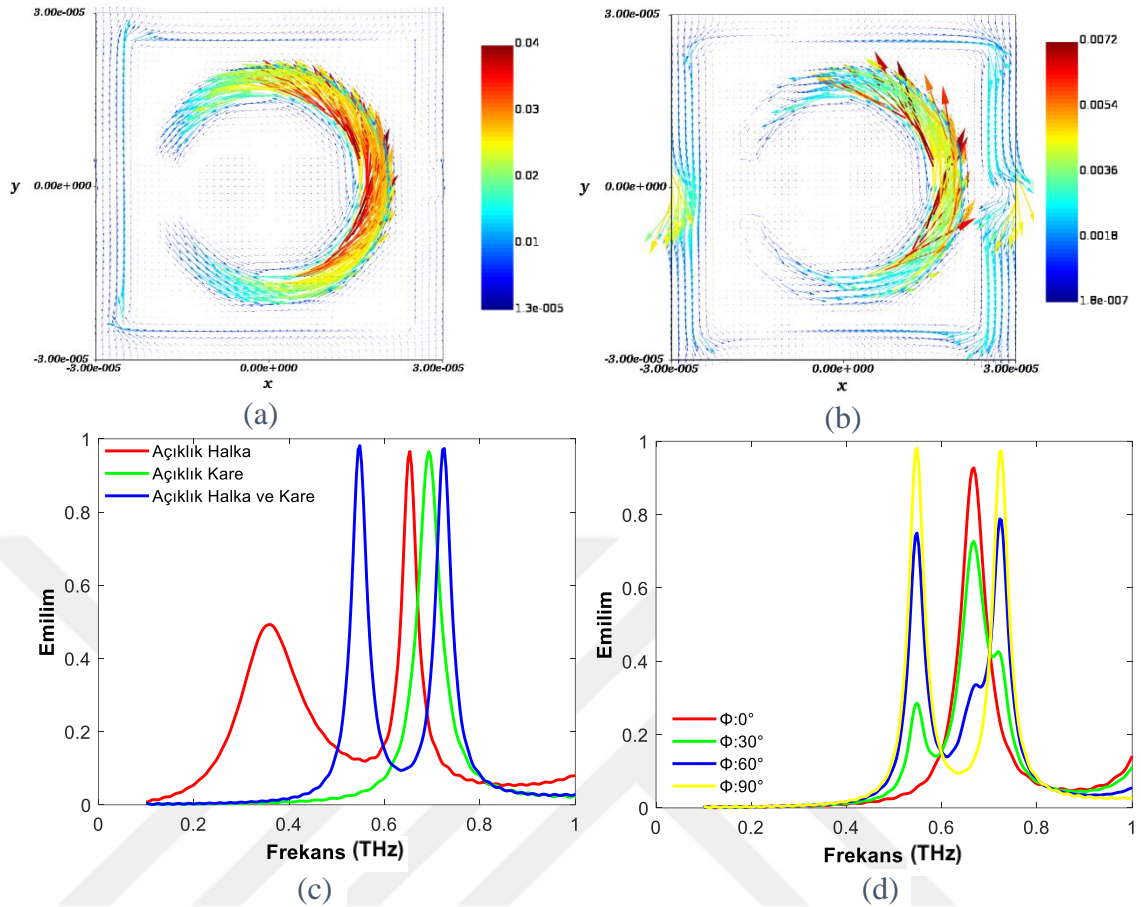


Şekil 3.12. (a) Emicinin dalga boyuna göre spektrum eğrisi. (b) Emicinin dalga sayısına göre spektrum eğrisi. Yapının altın parçacıklar alt ara yüzündeki (c) 0.54 THz için yakın elektrik alan dağılımı. (d) 0.72 THz için yakın elektrik alan dağılımı. (e) 0.54 THz için yakın manyetik alan dağılımı. (f) 0.72 THz için yakın manyetik alan dağılımı.

Yoğun alan noktalarının tespit edilmesi, bu noktaların sayısının bol olması ve alan arttırımının miktarı bu bölgelerde yapı yüzeyine erişecek olan analitin belirlenme hassasiyetini artıracığından önemlilik arz etmektedir. Yüzeğe gelen enerji halka ve kare şeklindeki rezonatörlerin iç kısımlarında ve açıklık kısımlarının uçlarında depolanmıştır. Yüksek elektrik ve manyetik alan değerleri biyosensör uygulamalarında metal ile hedef analitin etkileşimini artırması sebebiyle tercih edilmektedir.

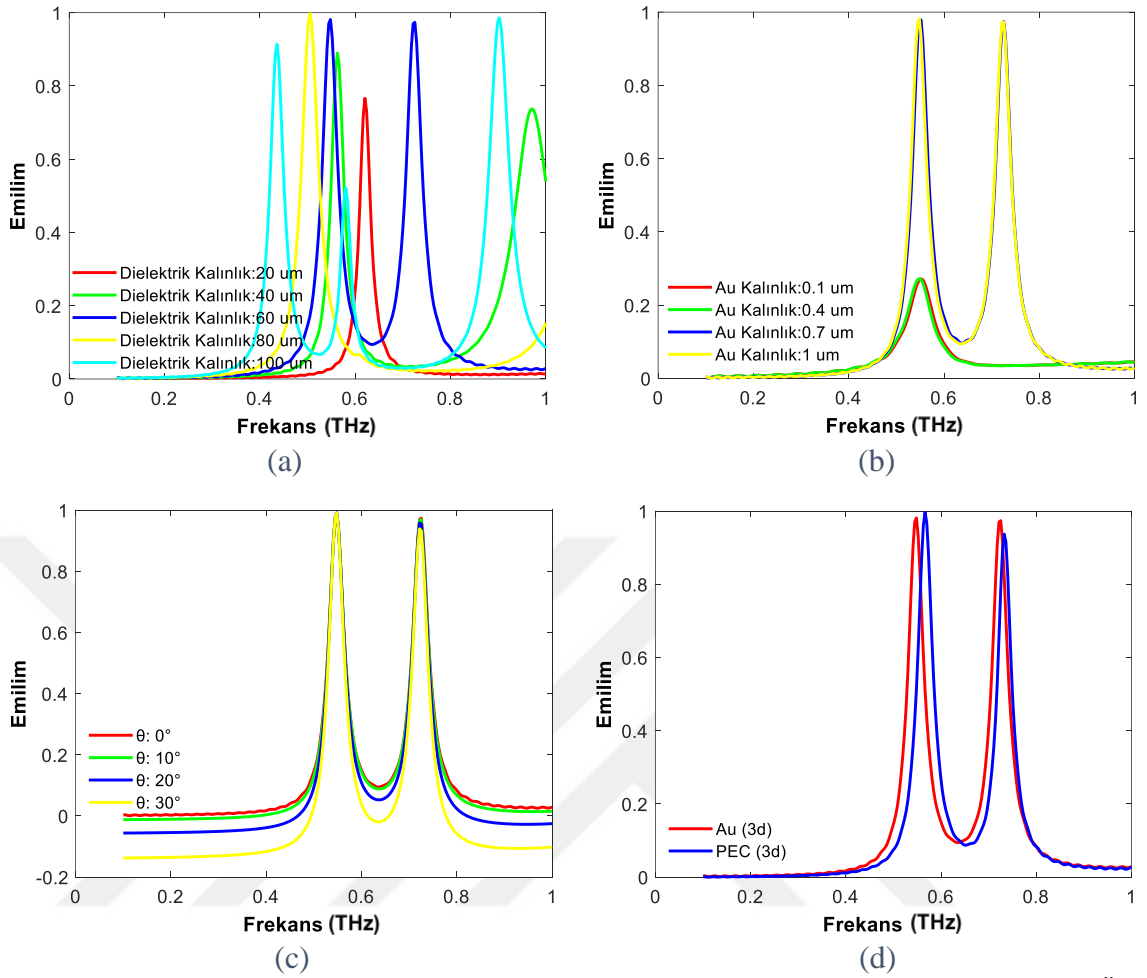
Emicinin yüzeyinde oluşan yüzey akımlarına ait vektör grafiği her iki rezonans modu için şekil 3.13 (a) ve (b)'de gösterilmiştir. Yüzey akımlarının açıklık halka şeklindeki yapının iç kısımlarında yoğunlaştığı görülmektedir. Şekil 3.13 (c)'de sabit $\Phi = 90^\circ$ ve $\theta = 0^\circ$ değerleri için yapıyı oluşturan iki ayrı açıklık şeklindeki halka ve kare yapının ayrı ayrı simüle edilmesiyle hangi parçanın hangi rezonansa etki ettiği tespit edilmeye çalışılmış ve böylece emilim grafiği elde edilmiştir. Sadece açıklık kare yapısının tek rezonans modunda ışığa yaptığı buna karşın açıklık halka rezonatörün ise iki moda ışığa yaptığı görülmüştür. Açıklık halka rezonatörün ilk rezonans modunun genliğinin düşük olduğu fakat ikinci rezonans modun genliğinin açıklık kare rezonatörün tek modunun genliğine yakın olduğu ve saptanmıştır. Şekil 3.13 (d)'de sabit $g_1 = 8.37 \mu\text{m}$, $g_2 = 10.47 \mu\text{m}$, $g_3 = w = 5 \mu\text{m}$ ve $L_1 = L_2 = 22.5 \mu\text{m}$ değerleri için yapı üzerine gönderilen ışığın kutuplama açısına bağımlılığını belirlemek için yapılan analize ait grafik görülmektedir. Kutuplama açısının (Φ) 30° 'ar derece aralıkla 0° 'den 90° 'ye kadar değiştirilmesiyle (dik geliş için geliş açısı $\theta = 0^\circ$ 'de sabit tutularak) elde edilen emilim spektrumu Şekil 3.13 (d)'de görülmektedir. Φ açısının 0° (x polarizasyon)'den 90° (y polarizasyon)'ye değiştirilmesiyle, rezonans modlarında lineer olmayan değişiklikler ortaya çıkmıştır.

Şekil 3.14 (a)'da sabit $g_1 = 8.37 \mu\text{m}$, $g_2 = 10.47 \mu\text{m}$, $g_3 = w = 5 \mu\text{m}$, $L_1 = L_2 = 22.5 \mu\text{m}$, $\Phi = 90^\circ$ ve $\theta = 0^\circ$ değerleri için yapıdaki ara katman olan dielektrik bölgenin kalınlığının değişimine göre frekans cevabındaki değişim görülmektedir. Poliimid'nin kalınlığı sistematik şekilde $20 \mu\text{m}$ 'den $100 \mu\text{m}$ 'ye kadar $20 \mu\text{m}$ aralıkla artırılmış olup $80 \mu\text{m}$ 'de çift mod frekans cevabına ulaşılmıştır. Şekil 3.14 (b)'de sabit $g_1 = 8.37 \mu\text{m}$, $g_2 = 10.47 \mu\text{m}$, $g_3 = w = 5 \mu\text{m}$, $L_1 = L_2 = 22.5 \mu\text{m}$, $\Phi = 90^\circ$ ve $\theta = 0^\circ$ değerleri için yapıda en üst katmanda yer alan altının kalınlığının değişimine göre rezonans frekanslarının değişimi görülmektedir. Altın kalınlığı $0.1 \mu\text{m}$ ve $0.4 \mu\text{m}$ olduğunda yapı düşük genlikte ve tek mod frekans cevabına sahiptir. Altın kalınlığı $0.7 \mu\text{m}$ ve $1 \mu\text{m}$ olduğunda ise en yüksek genlik değerine ve çift mod rezonans cevabına sahip olmaktadır.



Şekil 3.13. (a) 0.54 THz için yüzey akımının vektör grafiği. (b) 0.72 THz için yüzey akımının vektör grafiği. (c) Yapıyı oluşturan açıklık halka ve kare rezonatörlerin ayrı ayrı ve birlikte emilim eğrileri. (d) Kutuplama açısındaki değişime göre spektrum cevabı.

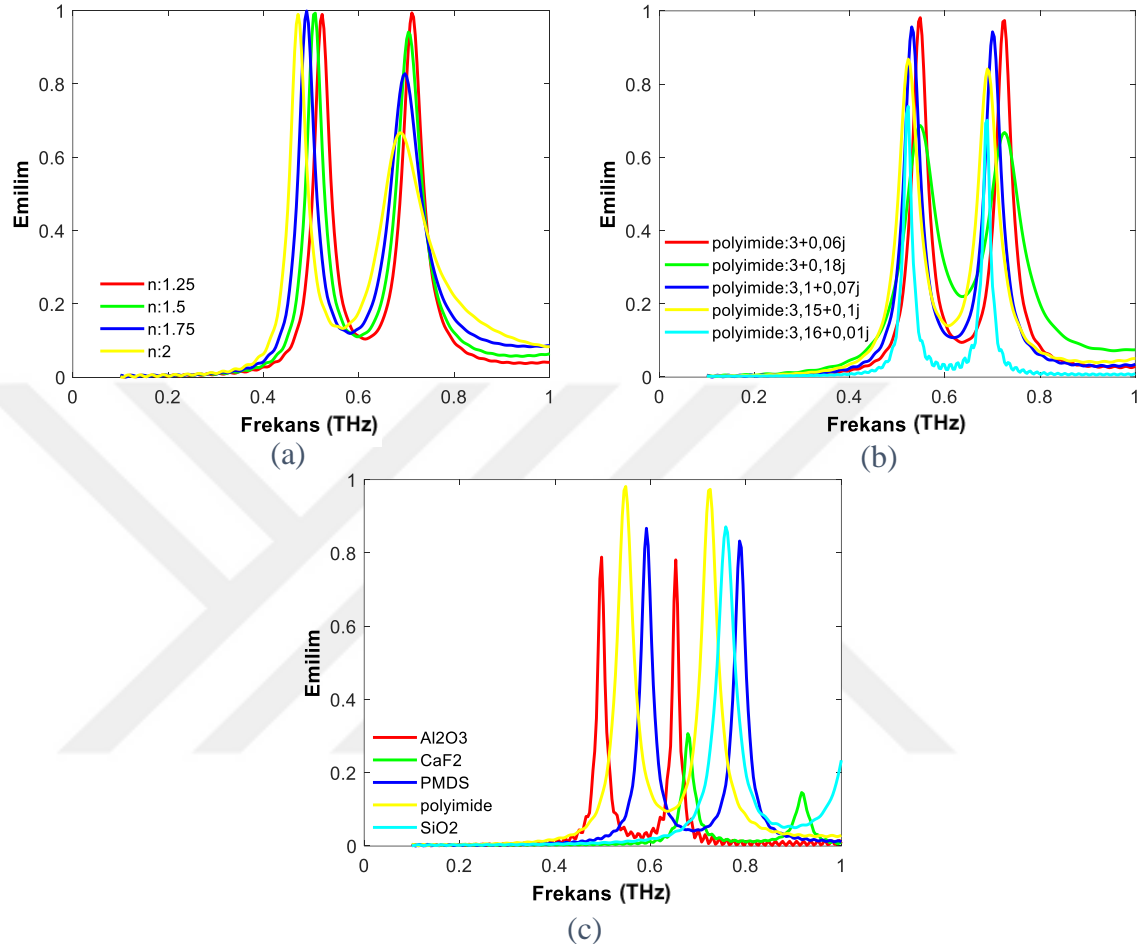
Şekil 3.14 (c)'de sabit $g_1 = 8.37 \mu\text{m}$, $g_2 = 10.47 \mu\text{m}$, $g_3 = w = 5 \mu\text{m}$ ve $L_1 = L_2 = 22.5 \mu\text{m}$ değerleri için y yönündeki kutuplama altında (geliş açısı $\Phi = 90^\circ$ 'de sabit tutularak) belirlenmiş parametrelerle beraber yapıya gelen düzlem dalga kaynağın geliş açısının (θ) değişimine göre yapının vermiş olduğu değişim görülmektedir. θ değeri 0° den 30° ye kadar artırıldı ve frekans cevabında kayda değer değişimler gözlenmemiştir. Şekil 3.14 (d)'de sabit $g_1 = 8.37 \mu\text{m}$, $g_2 = 10.47 \mu\text{m}$, $g_3 = w = 5 \mu\text{m}$, $L_1 = L_2 = 22.5 \mu\text{m}$, $\Phi = 90^\circ$ ve $\theta = 0^\circ$ değerleri için yapının iletken kısımları mükemmel elektriksel iletken yapıldığında rezonans cevabındaki değişimler gösterilmektedir. Burada mükemmel elektriksel iletken kullanılarak elde edilen ilk rezonans frekansı, belirlenmiş parametreler kullanılarak elde edilen ilk rezonans genliğinden fazla olduğu ve frekansta kaymaların olduğu görülmektedir. Fakat mükemmel elektriksel iletken kullanılarak elde edilen ikinci rezonans frekansı, belirlenmiş parametreler kullanılarak elde edilen ikinci rezonans genliğinden düşük olduğu ve frekansın kaymış olduğu görülmektedir.



Şekil 3.14. (a) Dielektrik tabakanın kalınlık değişimine göre spektrum cevabı. (b) Üst iletken kısmının kalınlığının değişimine göre frekans cevabı. (c) Geliş açısındaki değişime göre rezonans cevabı. (d) Üst iletken tabakanın Au (3d) ve PEC (3d) değişimine göre emilim eğrileri.

Şekil 3.15 (a)'da sabit $g_1 = 8.37 \mu\text{m}$, $g_2 = 10.47 \mu\text{m}$, $g_3 = w = 5 \mu\text{m}$, $L_1 = L_2 = 22.5 \mu\text{m}$, $\Phi = 90^\circ$ ve $\theta = 0^\circ$ değerleri için ve altın parçacık temelli metamalzemenin kırılma indisi hassasiyetini elde edebilmek için yapının üzerine $39 \mu\text{m}$ kalınlığında farklı kırılma indis değerlerine sahip dielektrik malzemeler kaplanarak simüle edilmiştir. Yapının yüksek yakın alan güçlendirmesi sayesinde, kaplama ortamının, altın parçacıkların yakın alanlarıyla etkileşime girerek açıklık halka ve kare rezonatörün rezonant özelliklerini kuvvetli bir şekilde etkilediği görülmüştür. Böylelikle kaplama ortamının artan indis değeri Şekil 3.15 (a)'da görüldüğü gibi kırılma indis değeri arttıkça ilk rezonansta yapının kırılma indisi değişimine karşı çok hassas olduğu yüksek emilim yeteneğini koruyabildiği, ikinci rezonans modunun genliğinde azalar görülmektedir. Yapının kırılma

indisi değişimine karşı hassas olduğu ve böylelikle önerilen yapının kırılma indisi algılama uygulamalarında kullanılabileceği düşünülmektedir.



şekil 3.15. (a) Kırılma indisine bağlı olarak rezonans frekanslarının değişimi. (b) Bağlı dielektrik sabiti ve kayıp tanjant değişimine göre yapının spektral cevabı. (c) Farklı dielektrik ayırıcılar için emilim eğrileri.

şekil 3.15 (b)'de sabit $g_1 = 8.37 \mu\text{m}$, $g_2 = 10.47 \mu\text{m}$, $g_3 = w = 5 \mu\text{m}$, $L_1 = L_2 = 22.5 \mu\text{m}$, $\Phi = 90^\circ$ ve $\theta = 0^\circ$ değerleri için açıklık halka ve kare rezonatörün kullanılan poliimid'in farklı bağlı dielektrik sabiti ve kayıp tanjant değerleri için frekansa bağlı olarak elde edilen emilim cevabı verilmiştir. Poliimid dielektrik tabakanın bağlı dielektrik sabiti arttığında her iki rezonans modunun genliğinde azalmalar ve frekansta kaymalar meydana gelmektedir. Kayıp tanjantın değeri arttığında ise de her iki rezonans modunun genlik değerlerinde azalmalar oluşmaktadır. şekil 3.15 (c)'de sabit $g_1 = 8.37 \mu\text{m}$, $g_2 = 10.47 \mu\text{m}$, $g_3 = w = 5 \mu\text{m}$, $L_1 = L_2 = 22.5 \mu\text{m}$, $\Phi = 90^\circ$ ve $\theta = 0^\circ$ değerleri için açıklık halka ve kare rezonatörü yapısının farklı dielektrik ayırıcılar için sahip olduğu emilim spektrumu görülmektedir. Burada kullanılan dielektrik malzemelerin bağlı dielektrik sabitleri ve

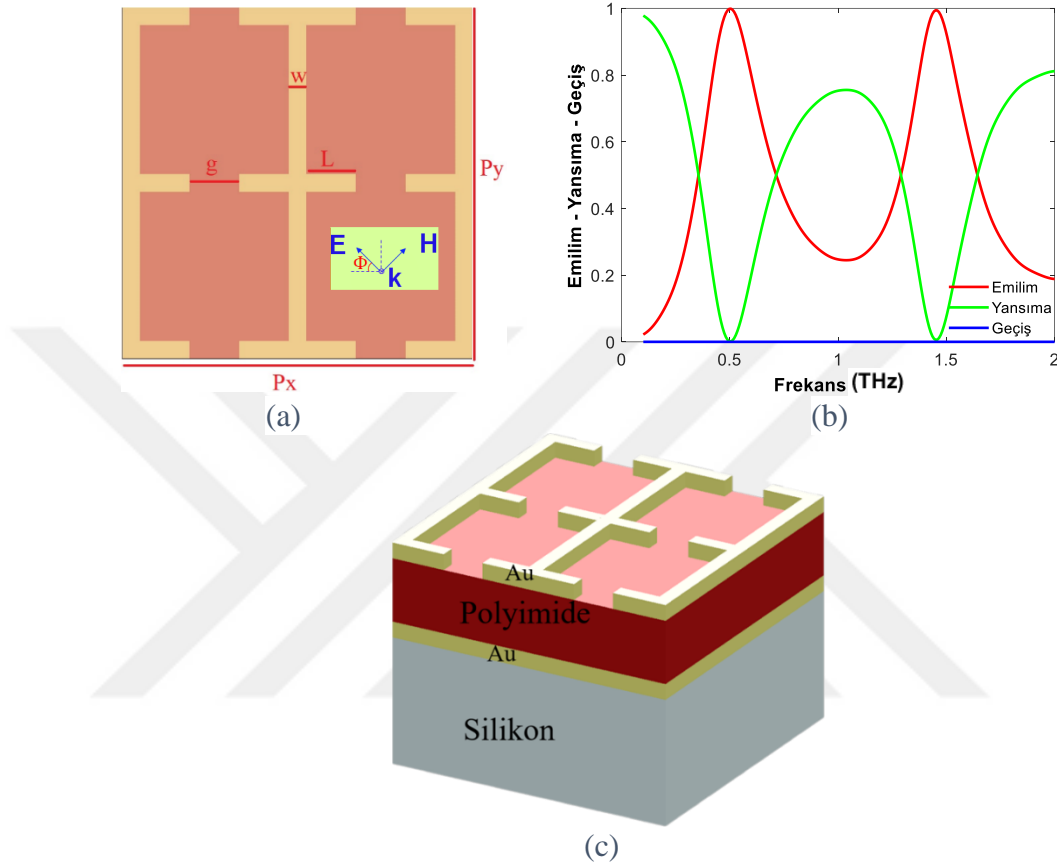
kayıp tanjantları Poli dimetil siloksan (PMDS) [114]'den, Al_2O_3 [115]'den, CaF_2 [116]'den ve SiO_2 [117]'den alınmıştır. Şekil 3.15 (c)'de görüldüğü üzere dielektrik ayırıcısı farklı olan yapılar alt THz bölgede rezonans cevabına sahiptirler. Yapıda bu şekilde dielektrik ara katman değiştirilerek arzu edilen rezonans frekansına göre spektral tepkisi akort edilebilen bir metamalzeme emici elde edilmiştir.

3.2.3. T#3

Bu çalışmada, terahertz bölgede çift rezonans moduna sahip karşılıklı E şeklinde altın parçacık temelli metamalzemenin FDTD metodu kullanılarak çeşitli analizleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.16 (a)'da görülen karşılıklı E şeklindeki yapının taban malzemesi olarak 200 μm silikon kullanılmıştır. Taban malzemesi üzeri 0.7 μm altın film ile kaplanmış, altın film üzerine ise 40 μm kalınlığında dielektrik bir ara katman yerleştirilmiştir. Yapının son katmanı olarak 0.7 μm kalınlığında altın kullanılmıştır. Taban malzemesi üzerinde olan altın ayna katmanının görevi emicinin geçirgenliğini sıfır yapmaktır ve Poliimid dielektrik ara tabakanın işlevi ise en üstte rezonatör görevi görev altın parçacıklar ile altın ayna katmanı arasında yakın alan kuplajını destekleyerek gelen enerjinin, ışığın muhafaza edilmesini sağlamaktır. Silikon malzemeye ait optik sabitler Palik [40]'ten alınmıştır. Sunulan yapının dielektrik ara katmanında Poliimid kullanılmış ve poliimid ait bağıl dielektrik sabiti ve kayıp tanjant sırasıyla 3.5 ve 0.28 alınmıştır. Yapıda kullanılan metal (Au) tabakalara ait frekanstan bağımsız yaklaşık iletkenlik $4.06 * 10^7 S/m$ olarak alınmıştır. Yapının periyotları $P_x = P_y = 60 \mu m$ 'dir. Emicinin simülasyonları sırasında periyodik sınır koşulları x ve y eksenleri olarak seçilmiş ve mükemmel uyumlu katmanlar z eksenini boyunca kullanılmıştır. Simülasyonlar boyunca analizler dalga vektörü yapıya dik olan x polarizasyonlu düzlem dalga kaynağı altında gerçekleşmiş ve geometrik boyutlar $g=L=8.5 \mu m$ ve $w=3 \mu m$ olarak alınmıştır. Periyodik sınır koşulları x ve y eksenleri olarak seçilmiş ve z eksenini boyunca mükemmel uyumlu katmanlar kullanılmıştır. Yapılan simülasyonlar sonucunda, karşılıklı E şeklindeki altın parçacık temelli metamalzeme emicisine ait bulgular aşağıdaki paragraflarda özetlenmiştir.

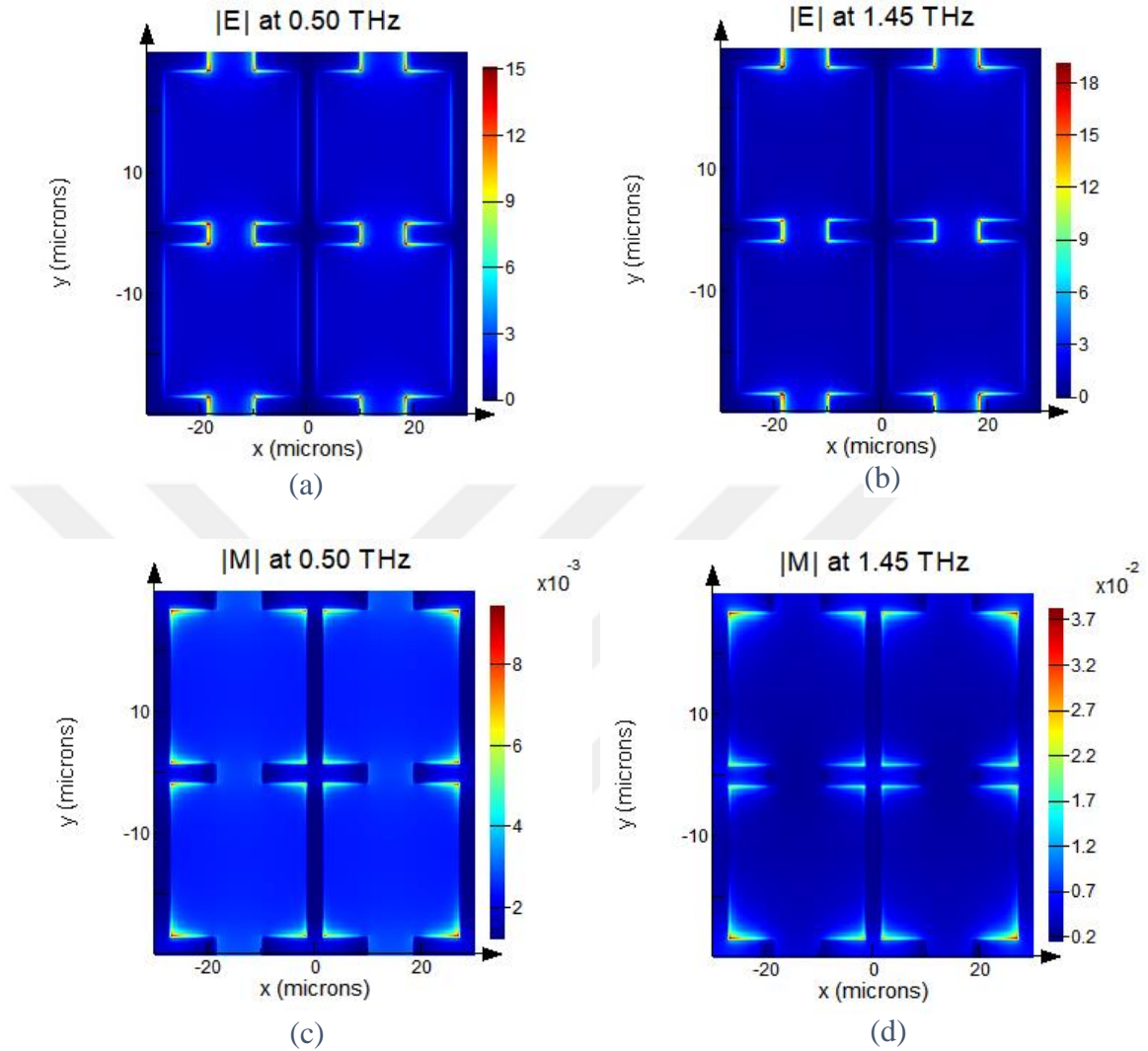
Şekil 3.16 (b)'de yapının spektrum cevabı görülmektedir. Yapı çift bant rezonans cevabına sahiptir ve bu rezonans modları ve emilim yüzdeleri sırasıyla $f_1: 0.50 THz$ A: % 99 ve $f_2: 1.45 THz$ A: % 99 şeklindedir. Çift bant rezonans cevabı yapının üst kısmında

yer alan altın parçacıklar arasındaki yakın alan kuplajından ve parçacıkların bireysel işlevselliğinden oluştuğu anlaşılmıştır. Şekil 3.16 (c)'de yapının perspektif görünümü gösterilmiştir.



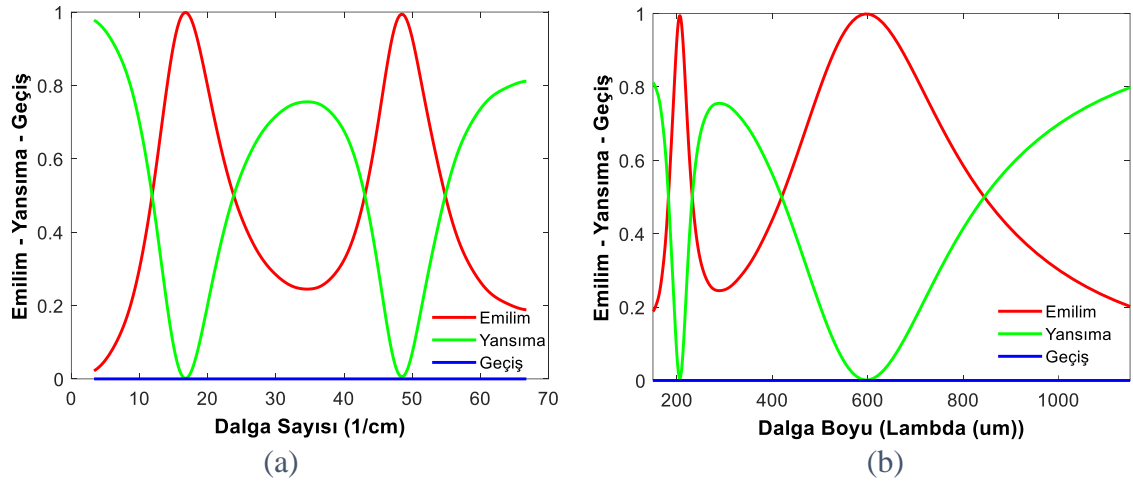
Şekil 3.16. (a) Emicinin üstten görünümü. (b) Belirlenmiş parametreler için nümerik olarak elde edilen emilim, yansımaya ve geçiş spektrumu. (c) Emicinin perspektif görünümü.

Şekil 3.17 (a, b, c ve d)'de yapının her iki rezonans modu için altın parçacıklar alt ara yüzündeki yakın elektrik ve manyetik alan dağılımı ve değerleri gösterilmektedir. Yakın elektrik alan arttırım değerleri rezonans modların fiziksel olarak hangi parçalardan meydana geldiğini görmek için hesaplanmıştır. Yakın elektrik alan dağılımları yapının E çubuklarının birbirlerine bakan kısımlarında yoğunlaşmaktadır. Bu durum önerilen mükemmel emici diziliminin yüzeye yakın bölgedeki dielektrik ortamının rezonans frekanslarını güçlü olarak etkileyebileceği anlamına gelir. Bu olgu, önerilen mükemmel emici diziliminin THz algılama yeteneklerinin temelidir ve ilgili yapının bir sensör olarak kullanılabileceğini gösteren en seçkin unsurdur.



Şekil 3.17. Yapının altın parçacıklar alt ara yüzündeki (a) 0.50 THz için yakın elektrik alan dağılımı. (b) 1.45 THz için yakın elektrik alan dağılımı. (c) 0.50 THz için yakın manyetik alan dağılımı. (d) 1.45 THz için yakın manyetik alan dağılımı.

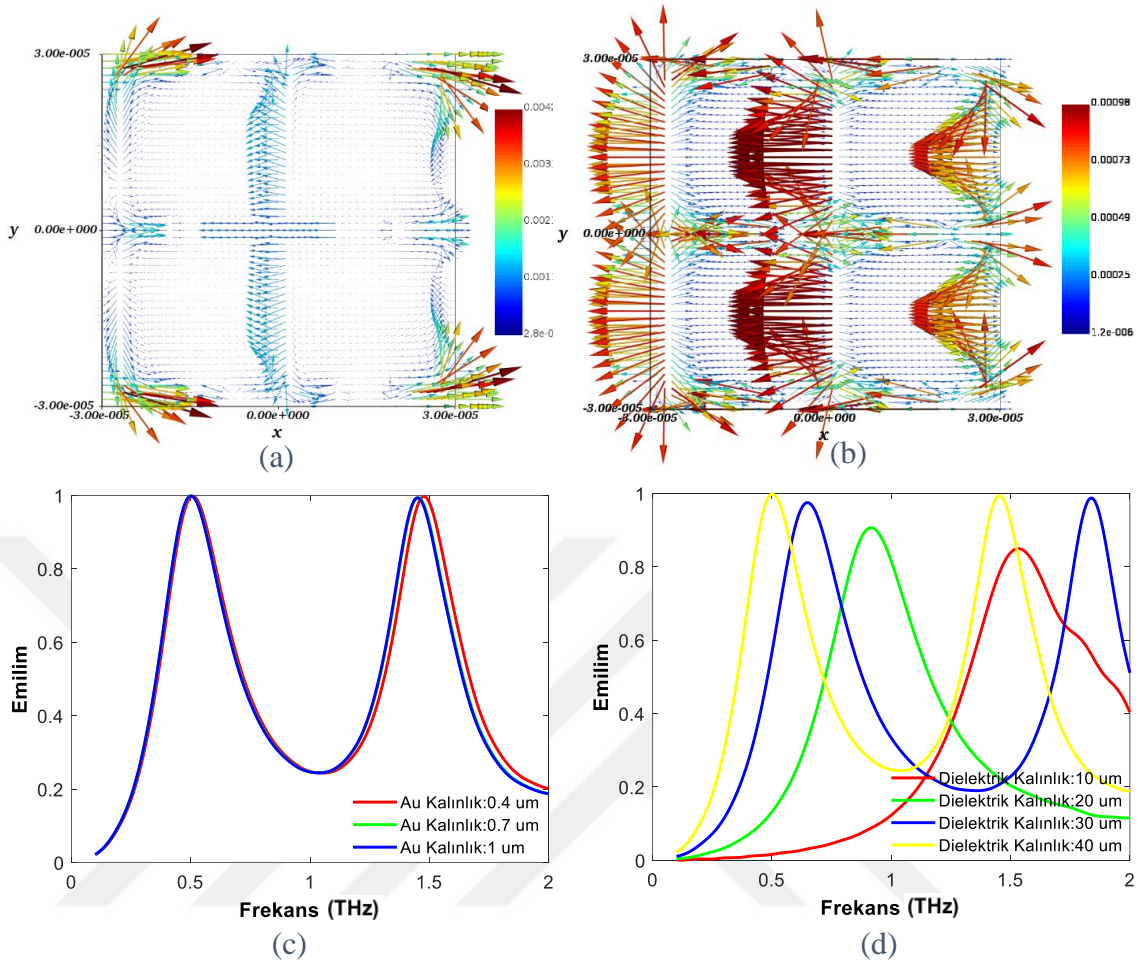
Emicinin dalga boyu ve dalga sayısına göre emilim, yansıma ve geçiş spektrumlarına ait grafikler şekil 3.18 (a) ve (b)'de gösterilmiştir. Emicinin rezonans dalga boyları ve dalga sayıları sırası ile $\lambda_1 = 206.67 \mu\text{m}$, $\lambda_2 = 594.33 \mu\text{m}$, $k_1 = 16.83 \text{ cm}^{-1}$ ve $k_2 = 48.39 \text{ cm}^{-1}$ olarak belirlenmiştir.



Şekil 3.18. (a) Yapıya ait spektral cevabın dalga sayısı şeklinde gösterimi. (b) Yapıya ait spektral cevabın dalga boyu şeklinde gösterimi.

Emicinin yüzeyinde oluşan yüzey akımlarına ait vektör grafiği her iki rezonans modu için Şekil 3.19 (a) ve (b)'de gösterilmiştir. Yüzey akımlarının yapının E çubukların birbirlerine bakan kısımlarında dışa doğru yoğunlaştığı görülmektedir. Şekil 3.19 (c)'de sabit $g=L=8.5 \mu\text{m}$, $w=3 \mu\text{m}$, $\Phi = 0^\circ$ ve $\theta = 0^\circ$ değerleri için yapıdaki Au iletken kısmın kalınlığının değişimine göre yapının spektrum cevabındaki değişim gösterilmektedir. Kalınlık $0.4 \mu\text{m}$, $0.7 \mu\text{m}$ ve $1 \mu\text{m}$ olduğunda yapıya ait rezonans modları hemen hemen aynı olmaktadır. Şekil 3.19 (d)'de sabit $g=L=8.5 \mu\text{m}$, $w=3 \mu\text{m}$, $\Phi = 0^\circ$ ve $\theta = 0^\circ$ değerleri için yapıdaki dielektrik katman olan Poliimid'nin kanlığının değişimine göre spektrum cevabı değişimi görülmektedir. Kalınlık $10 \mu\text{m}$ 'den $40 \mu\text{m}$ 'ye kadar $10 \mu\text{m}$ 'lik adımlarla değiştirildiğinde en iyi spektrum cevabı $40 \mu\text{m}$ 'de alındığı görülmektedir.

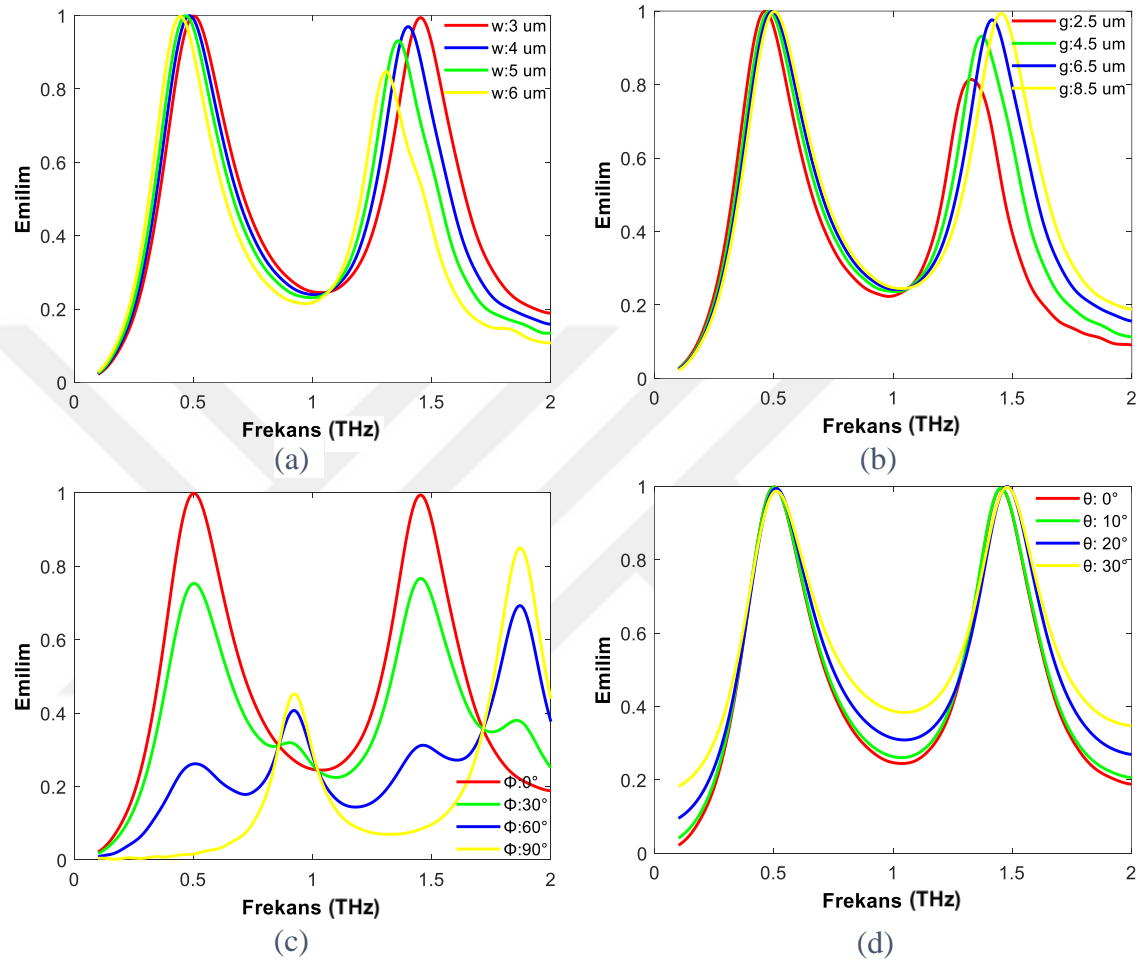
Şekil 3.20 (a)'da altın parçacık temelli metamalzemenin üst kısmında yer alan E şeklinin taban genişliğinin (w) değişimine göre spektrum cevabı değişimi görülmektedir. Sabit $g=L=8.5 \mu\text{m}$, $\Phi = 0^\circ$ ve $\theta = 0^\circ$ değerleri için w değeri azaldığında ilk rezonans pikinde hafif değişimler meydana gelirken, ikinci rezonans pikinde ise frekansta kaymalar ve genlikte azalmalar oluşmaktadır. Şekil 3.20 (b)'de sabit $L=8.5 \mu\text{m}$, $w=3 \mu\text{m}$, $\Phi = 0^\circ$ ve $\theta = 0^\circ$ değerleri için E şeklinde çubukların birbirine bakan kısımları arasındaki açıklık olan g değişimine göre rezonans cevabı değişimi görülmektedir. İncelenen parametre dışındaki parametreler sabit kalmak şartı ile g değeri azaldıkça yani çubukların birbirine bakan kısımları arasında ki açıklık kapandıkça ilk rezonans pikinde hafif bir değişim olurken ikinci rezonans pikinde ise frekansta kaymalar ve genlikte azalmalar oluştuğu görülmektedir.



Şekil 3.19. (a) 0.50 THz için yüzey akımının vektör grafiği. (b) 1.45 THz için yüzey akımının vektör grafiği. (c) Üst iletken kısmın kalınlığının değişimine göre frekans cevabı. (d) Dielektrik tabakasının kalınlık değişimine göre spektrum cevabı.

Yapılan simülasyonlar neticesinde karşılıklı E şeklindeki yapıya ait frekansların g ve w geometrik parametrelerine bağlı olduğu, rezonans frekanslarının yapının g ve w geometrik parametrelerinin değiştirilerek ayarlanabildiği görülmüştür. Bu geometrik parametreler, sensör yapısının rezonans frekansının hassas bir şekilde ayarlanmasını sağlayan basit ayarlama mekanizmaları olarak kullanılabilir. Bu sayede tasarımcı, algılanması istenen analitin rezonans frekansına göre ayar yaparak arzu edilen yapıyı elde edebilir. Şekil 3.20 (c)'de sabit $g=L=8.5 \mu\text{m}$ ve $w=3 \mu\text{m}$ değerleri için yapının kutuplanma bağımlılığını belirlemek amacıyla, dik geliş için ($\theta = 0^\circ$) farklı kutuplanma açıları Φ için emilim spektrumları analiz edilmiştir. $\Phi = 0^\circ$ 'dan (x-kutuplanma) $\Phi = 90^\circ$ (y-kutuplanma)'e kadar olan kutuplanma açısı değişimi, yapının her iki modunda da frekans kaymasına sebep olmaktadır. Yüzey normaline eğik geliş durumunda ($\theta \neq 0^\circ$), metamalzemenin sergilediği spektral değişimler, rezonans davranış analizleri için önemli

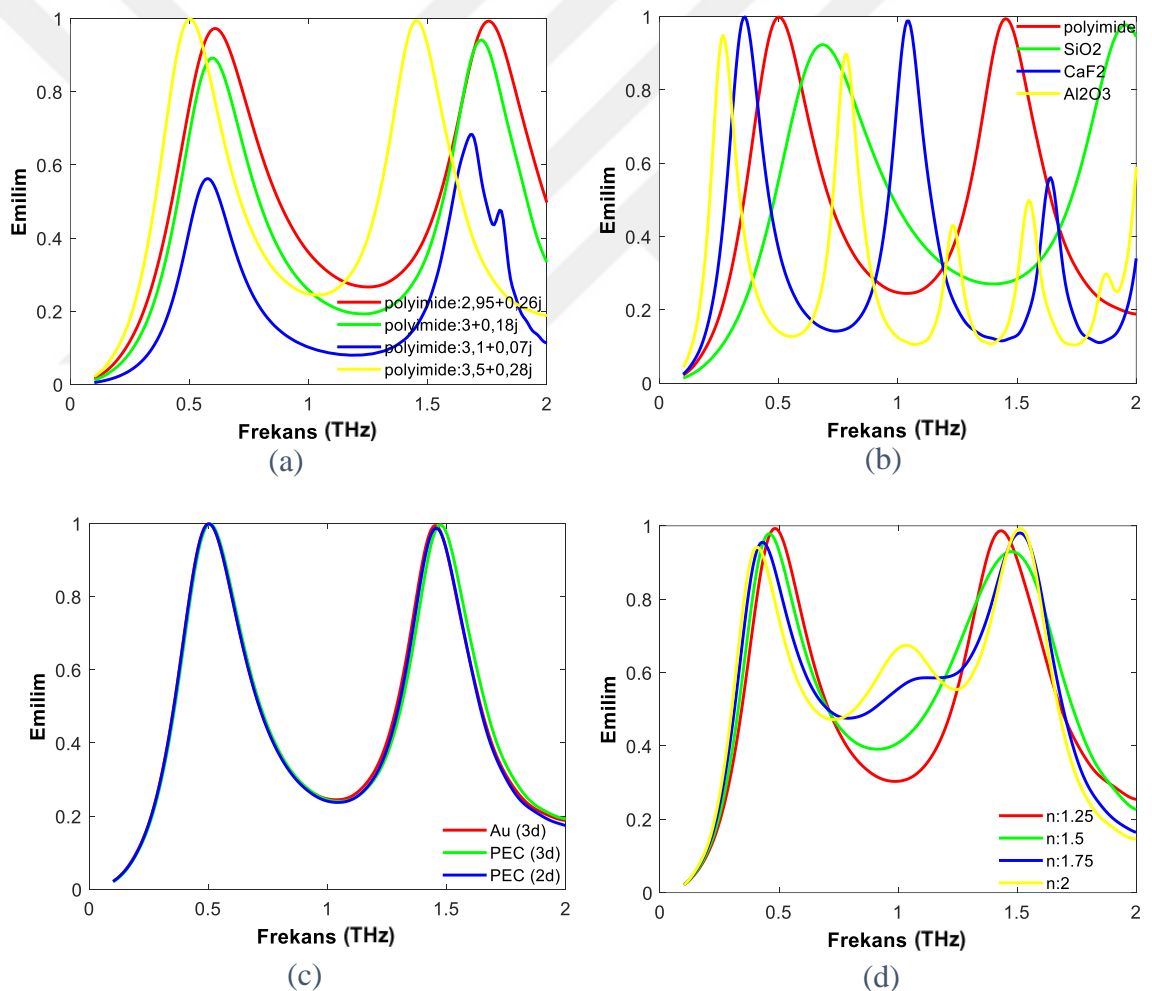
olabilir. Yapının sabit $g=L=8.5 \mu\text{m}$ ve $w=3 \mu\text{m}$ değerleri için farklı θ geliş açıları için ($\Phi = 0^\circ$ 'de sabit tutularak) yansıma spektrumları şekil 3.20 (d)'de verilmektedir. θ arttıkça rezonanslar önemli bir değişim olmadığı gözlenmektedir.



Şekil 3.20. Geometrik parametre değişimlerinin rezonans frekansına etkisi. (a) w değişimine göre emilim grafiği. (b) g değişimine göre emilim grafiği. (c) Kutuplama açısı değişimine göre emilim grafiği. (d) Geliş açısı değişimine göre emilim grafiği.

Şekil 3.21 (a)'da sabit $g=L=8.5 \mu\text{m}$, $w=3 \mu\text{m}$, $\Phi = 0^\circ$ ve $\theta = 0^\circ$ değerleri için E şeklindeki altın parçacık temelli yapıda ara katman olarak kullanılan Poliimid dielektrik malzemesine ait bağıl dielektrik sabiti ve kayıp tanjant değişimine göre rezonans cevabındaki değişimler görülmektedir. bağıl dielektrik sabiti azaldığında her iki rezonans modunda genlikte azalmalar ve frekans ekseninde kaymalar meydana gelmektedir. Kayıp tanjant azaldığında ise de her iki rezonans pikinde de genlikte azalmalar ve frekans ekseninde kaymalar meydana gelmektedir. Yapının dielektrik tabakası olan Poliimid'nin bağıl dielektrik sabiti ve kayıp tanjantı değiştirildiğinde emilim değeri yaklaşık %99 olan

her iki rezonansa da azalmalar oluşmuştur. Şekil 3.21 (b)'de sabit $g=L=8.5 \mu\text{m}$, $w=3 \mu\text{m}$, $\Phi = 0^\circ$ ve $\theta = 0^\circ$ değerleri için yapıda kullanılan ara tabaka dielektrik malzemenin farklı dielektrik malzemeler ile yer değiştirilmesi sonucu simüle edilen ve frekans cevabı alınan grafik görülmektedir. Burada kullanılan dielektrik malzemelerin bağlı dielektrik sabitleri ve kayıp tanjantları Al_2O_3 [115]'den, CaF_2 [116]'den ve SiO_2 [117]'den miştir. Kullanılan tüm dielektrik tabakaların vermiş olduğu frekans cevaplarında en az bir bant yüksek emilim değeri göstermektedir. Metamalzeme literatürde iki boyutlu (2D) [118-128] ve üç boyutlu (3D) [129-135] olarak dizayn edilen açıklık, parçacık ve emici tabanlı yapılar olarak karşımıza çıkmaktadır.



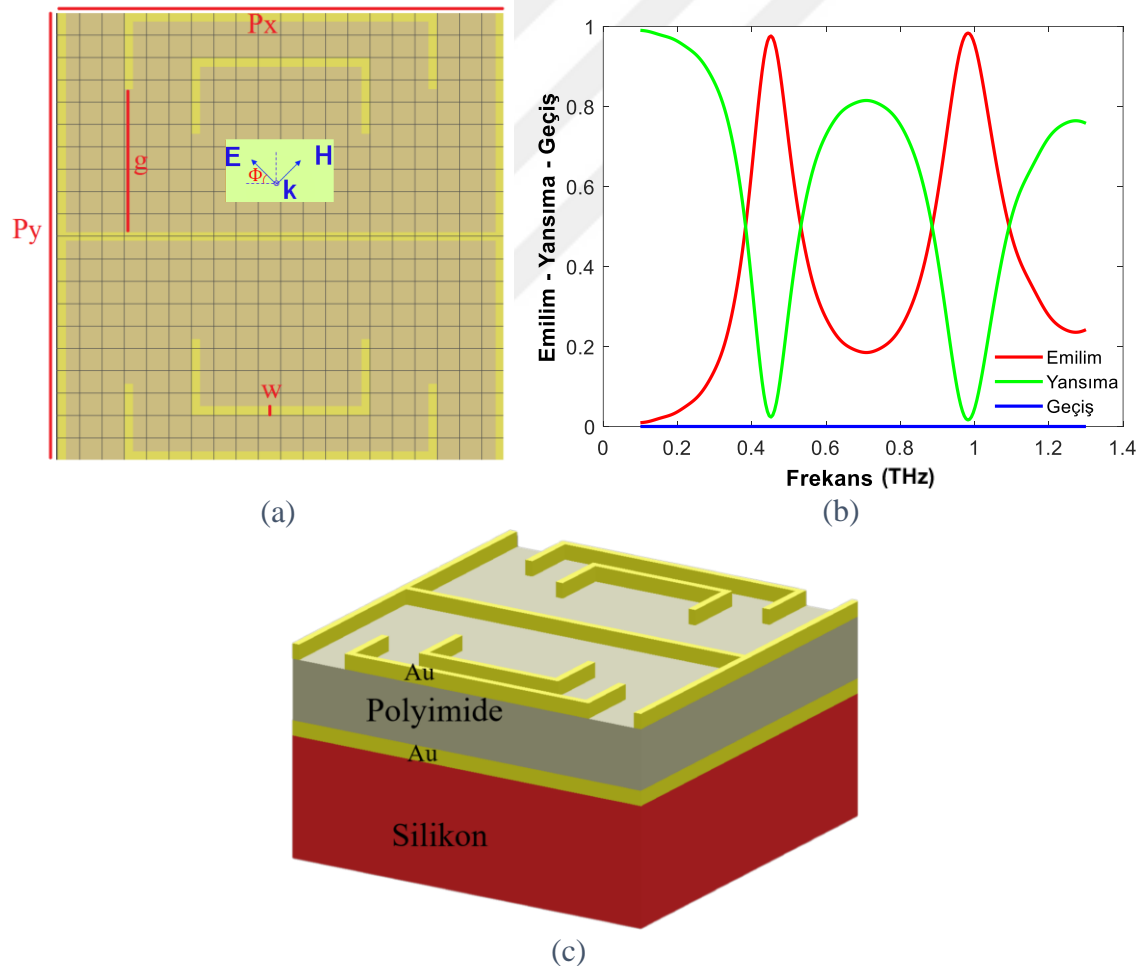
Şekil 3.21. (a) Dielektrik malzemedeki bağlı dielektrik sabiti ve kayıp tanjant değişimine göre frekans cevabı. (b) Farklı dielektrik malzeme kullanılması sonucu oluşan emilim spektrumu. (c) Üst iletken tabakanın Au (3d), PEC (3d) ve PEC (2d) değişimine göre emilim eğrileri. (d) Kırılma indis değişimine göre emilim spektrumu.

Şekil 3.21 (c)'de sabit $g=L=8.5 \mu\text{m}$, $w=3 \mu\text{m}$, $\Phi = 0^0$ ve $\theta = 0^0$ değerleri için yapının üst metalik kısmında hem üç boyutta hem de iki boyutta mükemmel elektriksel iletken malzemenin kullanılması sonucunda vermiş olduğu spektrum cevabı gözlenmektedir. Her iki rezonans modunda da kayda değer bir değişim meydana gelmemiştir. Şekil 3.21 (d)'de sabit $g=L=8.5 \mu\text{m}$, $w=3 \mu\text{m}$, $\Phi = 0^0$ ve $\theta = 0^0$ değerleri için yapının algılama kapasitesini göstermek için farklı kırılma indisli dielektrik malzemeler içinde analiz edilerek hassasiyet karakteristiği analiz edilmiştir. Bu modellemede çevresel ortam metal katmandan yukarıda kalacak şekilde ortam içine gömülüp farklı kırılma indisleri için ilgili yapının emilim spektrumları belirlemiştir. Dielektrik malzemenin kırılma indis değeri arttıkça her iki rezonans modunda genlik değerlerinde azalma ve frekanslarında kayma meydana gelmektedir.

3.2.4. T#4

Tasarlanan H ve U şeklindeki altın parçacık temelli metamalzeme emiciye ait birim hücrenin şematik görünümü şekil 3.22 (a)'da verilmiştir. Alt taban olarak silikon, dielektrik tabaka için Poliimid ve iletken kısımlar içinde Au kullanılmıştır. Yapıya ait malzemelerin kalınlıkları sırasıyla silikon $200 \mu\text{m}$, Au $0.7 \mu\text{m}$, Poliimid $80 \mu\text{m}$ ve Au $0.7 \mu\text{m}$ olarak alınmıştır. Altın iletken kısmın kalınlığının büyük değerlerde olması gelen dalgadaki enerjinin soğurulması yerine saçılmasına sebep olmaktadır. Bu nedenle burada yakın alan bağlaşım kayıplarını en aza indirmek için altın rezonatörün kalınlığı ile Poliimid dielektrik tabakanın kalınlığı arasında ters orantı vardır. Silikon taban malzemesine ait sabitler Palik [112]'ten alınmıştır. Kullanılan dielektrik malzemenin bağıl dielektrik sabiti ve kayıp tanjantı sırasıyla 3 ve 0.18 olarak alınmıştır. Yansıtıcı tabaka olarak ve üst katman olarak kullanılan altına ait frekanstan bağımsız yaklaşık iletkenlik $4.42 * 10^7 S/m$ olarak alınmıştır. Şekil 3.22 (a)'da w taban genişliğini ve g ise U ile H şeklinin arasındaki açıklığı temsil etmektedir. Yapının geometrik parametreleri $w=2 \mu\text{m}$, $g=32 \mu\text{m}$, $P_x=100 \mu\text{m}$ ve $P_y=100 \mu\text{m}$ olarak alınmıştır. Yapının simülasyon aşamalarında periyodik sınır koşulları x ve y eksenleri olarak seçilmiş ve mükemmel uyumlu katmanlar z eksenini boyunca kullanılmıştır. Emicinin spektral sonuçları zaman domeninde sonlu farklar yöntemi kullanılarak elde edilmiştir. Yapılan simülasyonlar sonucunda, H ve U şeklindeki altın parçacık temelli metamalzeme emicisine ait bulgular aşağıdaki paragraflarda özetlenmiştir.

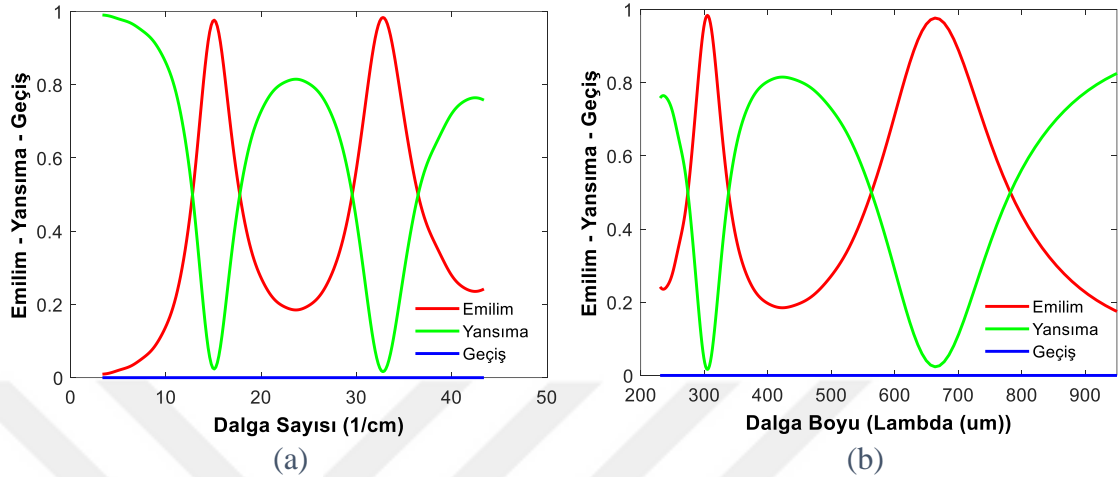
Önerilen metamalzeme için emilim spektrumu şekil 3.22 (b)'de görülmektedir. Emilim spektrumu, geçiş spektrumunun sıfır olması hasebiyle yansıma spektrumuna bağlı olarak $\text{Emilim} = 1 - \text{Yansıma}$ şeklinde hesaplanmıştır. Simülasyonlarda dalga vektörü yapıya dik olan, y yönündeki düzlem dalga kaynağı altında ve yukarıda belirlenmiş parametreler için alt THz bölgesinde yer alan çift bant frekans cevabına sahiptir. Bu rezonant modların FDTD metodu ile nümerik olarak analiz gerçekleştirildi ve düşük frekanstan yüksek frekansa doğru emilim oranları ile beraber $f_1: 0.45 \text{ THz}$ A: % 97 ve $f_2: 0.98 \text{ THz}$ A: % 98 olarak saptandı. Teorik olarak simülasyonları yapılan bu yapı, uygun rezonans noktalarına haiz kimyasal veya biyolojik örneklerin algılanmasında kullanılabilir. Şekil 3.22 (c)'de emicinin perspektif görünümü verilmiştir.



Şekil 3.22. (a) Yapının üstten görünümü. (b) Nümerik olarak hesaplanan emilim, geçiş ve yansıma spektrumu. (c) Emicinin perspektif görünümü.

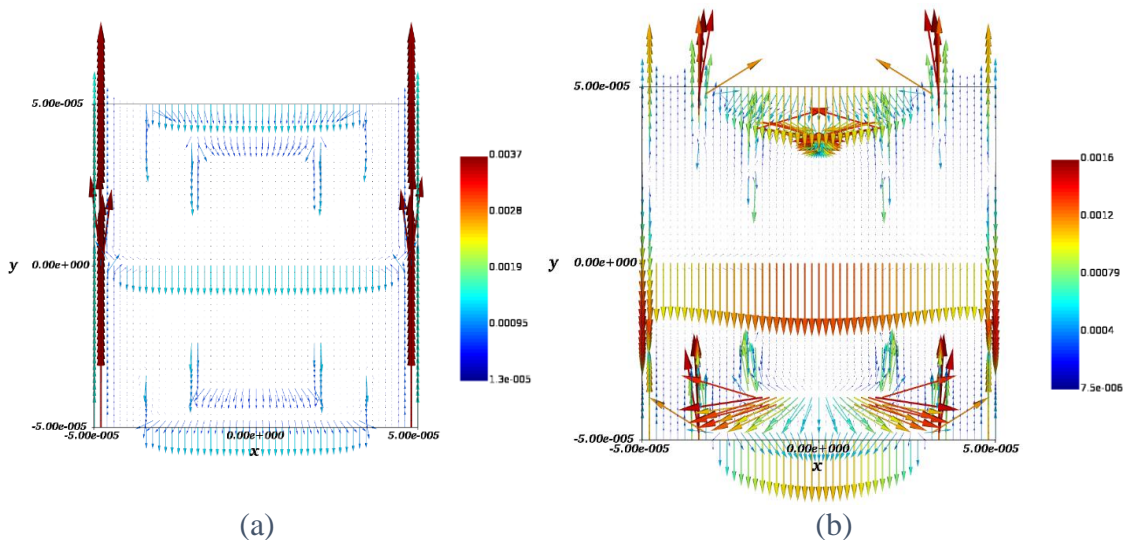
Emicinin dalga boyu ve dalga sayısına göre emilim, yansıma ve geçiş spektrumuna ait grafikler şekil 3.23 (a) ve (b)'de gösterilmiştir. Emicinin rezonans dalga boyları ve dalga

sayıları sırası ile $\lambda_1 = 305.31 \mu\text{m}$, $\lambda_2 = 663.54 \mu\text{m}$, $k_1 = 15.07 \text{ cm}^{-1}$ ve $k_2 = 32.75 \text{ cm}^{-1}$ olarak belirlenmiştir.



Şekil 3.23. (a) Yapıya ait spektral cevabın dalga sayısı şeklinde gösterimi. (b) Yapıya ait spektral cevabın dalga boyu şeklinde gösterimi.

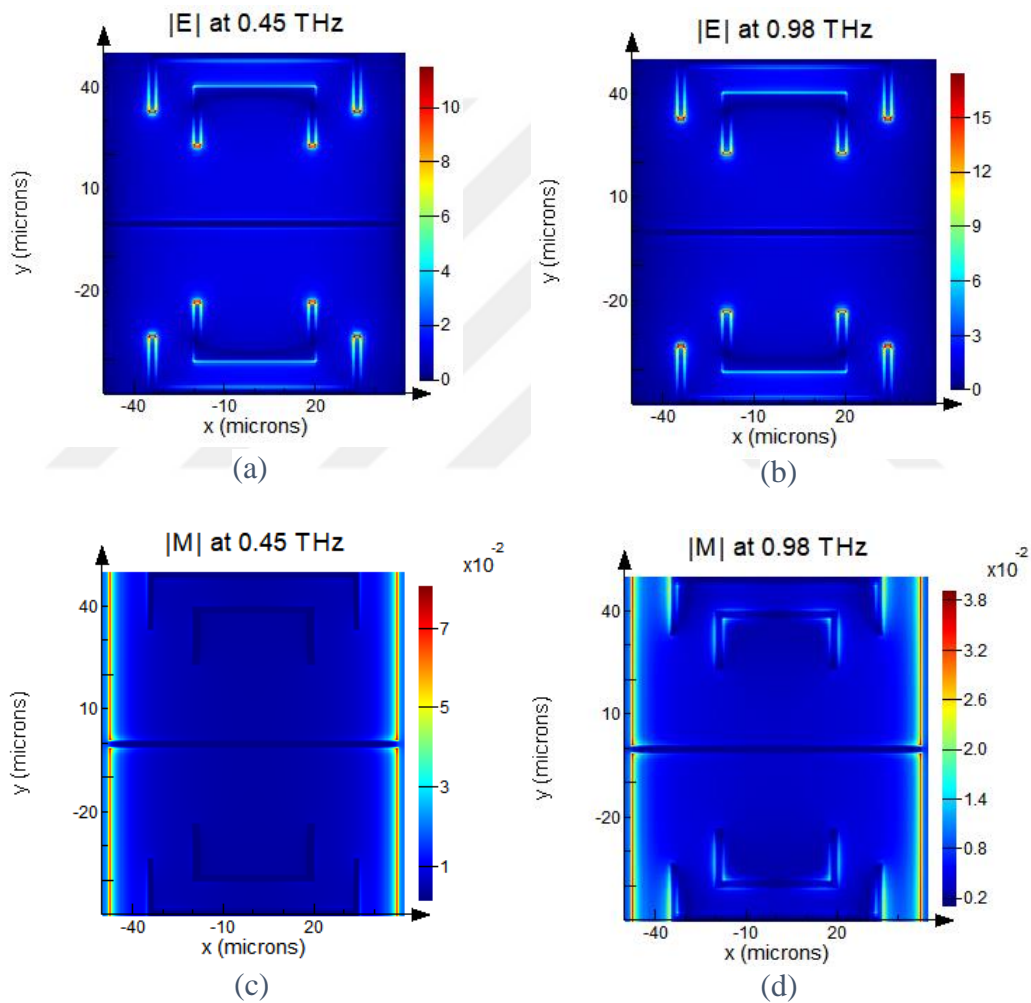
Emicinin yüzeyinde oluşan yüzey akımlarına ait vektör grafiği her iki rezonans modu için şekil 3.24 (a) ve (b)'de gösterilmiştir. Yüzey akımları yapının H ve U çubuklarında dışa doğru yoğunlaştığı görülmektedir.



Şekil 3.24. (a) 0.45 THz için yüzey akımının vektör grafiği. (b) 0.98 THz için yüzey akımının vektör grafiği.

Tasarlanan H ve U şeklindeki altın parçacık temelli metamalzeme emicide hedeflenen belirli temel parametreler vardır, onlardan biri de yapının yakın alan dağılımlarının yüksek olmasıdır. Simülasyonlar sonucunda elde edilen rezonansların fiziksel orijinini hangi parçalardan geldiğini anlamak yakın alan dağılımlarına bakılarak anlaşılır. Şekil

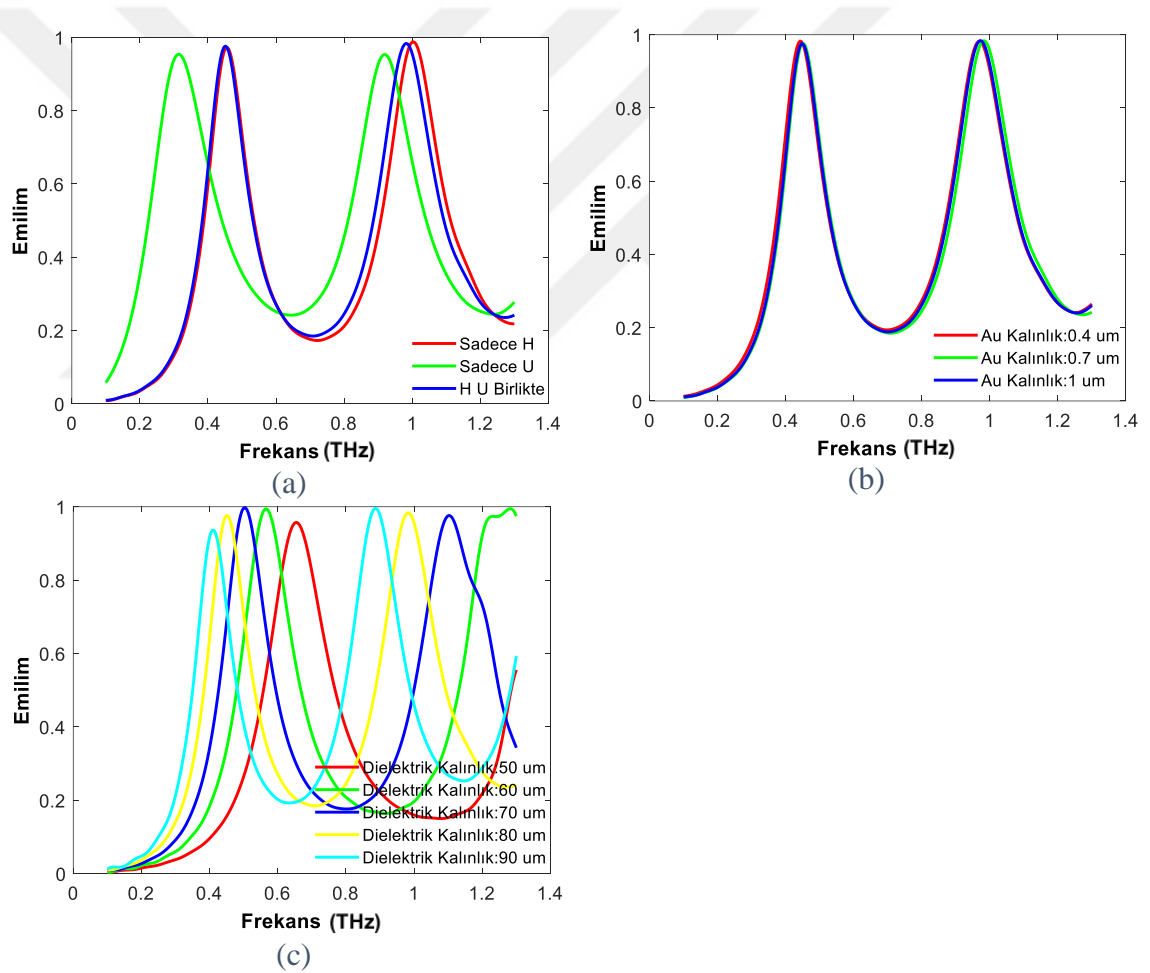
3.25 (a, b, c ve d)'de yapının her iki rezonans modu için altın parçacıklar alt ara yüzündeki yakın elektrik ve manyetik alan dağılımı ve değerleri görülmektedir. Elektrik alan dağılımlarının çubukların dipol karakteristiği sebebiyle U yapısının uçlarında yoğunlaştığı ve bu yoğunlaşma değerlerinin ışık madde etkileşimi uygulamaları için önemli değerlerde olduğu görülmektedir. U yapısının uçlarındaki moleküller metalik parçacıklardan uzakta olanlara göre elektromanyetik alanla çok daha kuvvetli bir etkileşime girebilirler.



Şekil 3.24. Yapının altın parçacıklar alt ara yüzündeki (a) 0.45 THz için yakın elektrik alan dağılımı. (b) 0.98 THz için yakın elektrik alan dağılımı. (c) 0.45 THz için yakın manyetik alan dağılımı. (d) 0.98 THz için yakın manyetik alan dağılımı.

Yapıda yer alan her bileşenin hangi rezonansa etki etkiğini görmek için H ve U şeklindeki yapı ayrı ayrı simüle edilmiştir. Şekil 3.26 (a)'da sabit $\Phi = 90^\circ$ ve $\theta = 0^\circ$ değerleri için yapının sadece H, sadece U ve her ikisi birlikte iken ki emilim spektrumları

görülmektedir. H ve U yapısının birlikte iken ki rezonans cevabı ile sadece H yapısının rezonans cevabı birbirleriyle hemen hemen örtüşmektedir fakat sadece U yapısının rezonans cevabında ise genlikte azalmalar ve frekansta kaymalar oluşmaktadır. Yapıda yer alan her bileşenin hangi rezonansa etki etkiğini görmek için H ve U şeklindeki yapı ayrı ayrı simüle edilmiştir. Şekil 3.26 (a)'da yapının sadece H, sadece U ve her ikisi birlikte iken ki emilim spektrumları görülmektedir. H ve U yapısının birlikte iken ki rezonans cevabı ile sadece H yapısının rezonans cevabı birbirleriyle hemen hemen örtüşmektedir fakat sadece U yapısının rezonans cevabında ise genlikte azalmalar ve frekansta kaymalar oluşmaktadır.



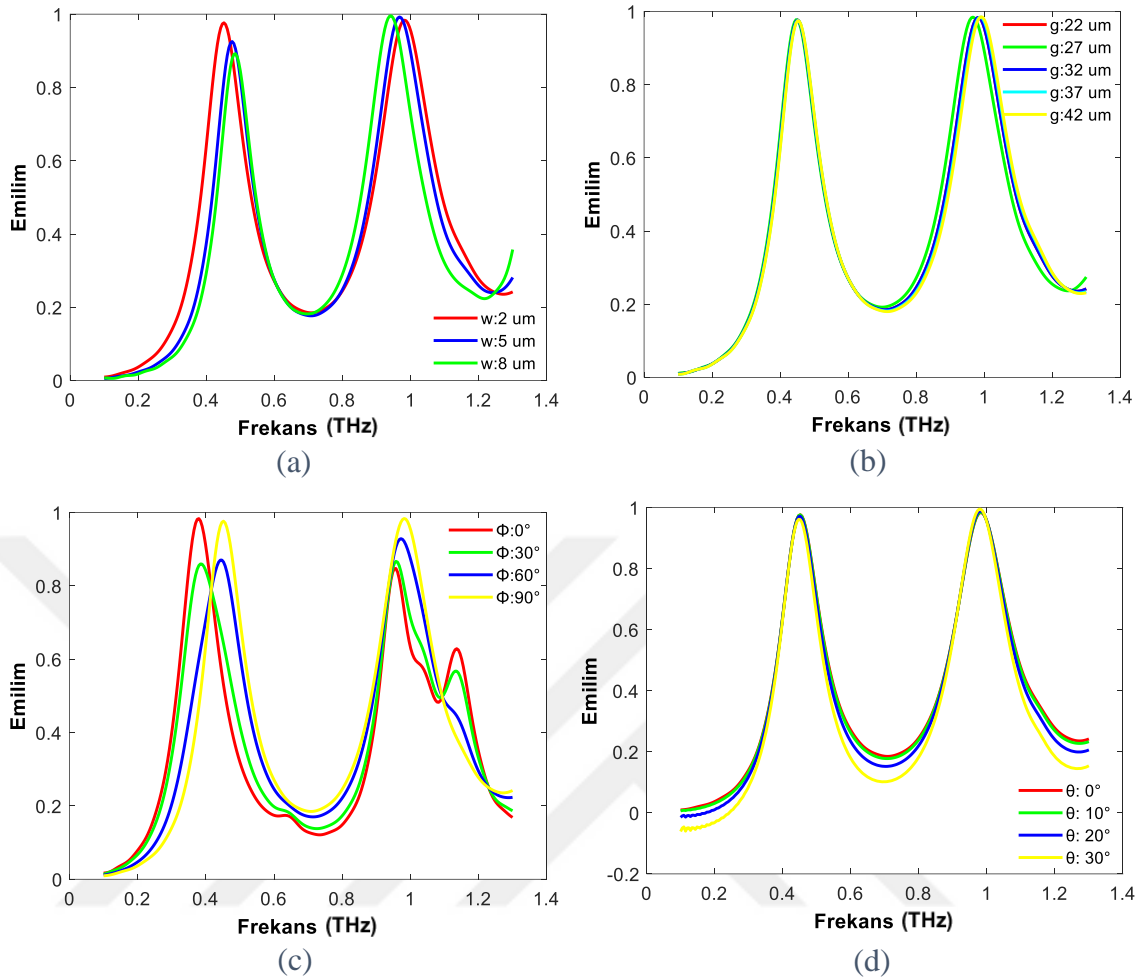
Şekil 3.26. (a) H ve U şekillerinin ayrı ayrı ve beraber emilim grafiği. (b) Üst iletken kısmın kalınlık değişimine göre spektrum cevabı. (c) Dielektrik katmanın kalınlığının değişimine göre rezonans cevabı.

Şekil 3.26 (b)'de sabit $w=2 \mu\text{m}$, $g=32 \mu\text{m}$, $\Phi = 90^\circ$ ve $\theta = 0^\circ$ değerleri için ise yapıda kullanılan metalik kısım olan altının kalınlığının değişimine göre frekans cevabındaki

değişim görülmektedir. Kalınlık değişimine göre frekans cevabı değişimi her iki rezonans modunda da hafif şekilde gözlenmiştir. Sabit $w=2 \mu\text{m}$, $g=32 \mu\text{m}$, $\Phi = 90^\circ$ ve $\theta = 0^\circ$ değerleri için tasarlanan altın parçacık temelli yapıdaki ara dielektrik katman olan Poliimid'nin kalınlığının değişimine göre yapının vermiş olduğu emilim cevabı şekil 3.26 (c)'de görülmektedir. Kalınlık arttıkça her iki rezonans modunda genlikte azalmalar ve frekansta kaymalar meydana gelmektedir. Bu şekilde dielektrik tabaka kalınlığı değişimi yapılarak farklı rezonans frekanslarına sahip yapılar dizayn edilebilecektir.

Biyoalgılama uygulamaları için parçacık boyutlarının değiştirilerek rezonans frekanslarının ayarlanabilmesi istenilen bir durumdur. Bu amaçla H ve U şeklindeki yapının g açıklığı ve w tabaka kalınlığını değiştirilerek yapının geometrik parametre analizi şekil 3.27 (a) ve (b)'de incelenmiştir. Sabit $w=2 \mu\text{m}$, $g=32 \mu\text{m}$, $\Phi = 90^\circ$ ve $\theta = 0^\circ$ değerleri için w üst iletken kısımda yer alan H ve U şekillerinin tabaka genişliği olup, artırıldığında her iki rezonans modunda da genlikte azalmalar ve frekansta kaymalar görülmektedir. Sabit $w=2 \mu\text{m}$, $g=32 \mu\text{m}$, $\Phi = 90^\circ$ ve $\theta = 0^\circ$ değerleri için g ise U ve H arası açıklık olup, artırıldığında ilk rezonans modunda kayda değer bir değişim gözlenmezken ikinci rezonans modunda hafif bir değişim gözlenmiştir. Yapılan simülasyonlar sonucunda sunulan H ve U şeklindeki emicinin frekanslarının g geometrik parametrelerine bağlı olmadığı görülmüştür. Önerilen emici için rezonans frekansları yapının sadece w geometrik parametresi değiştirilerek ayarlanabilmektedir.

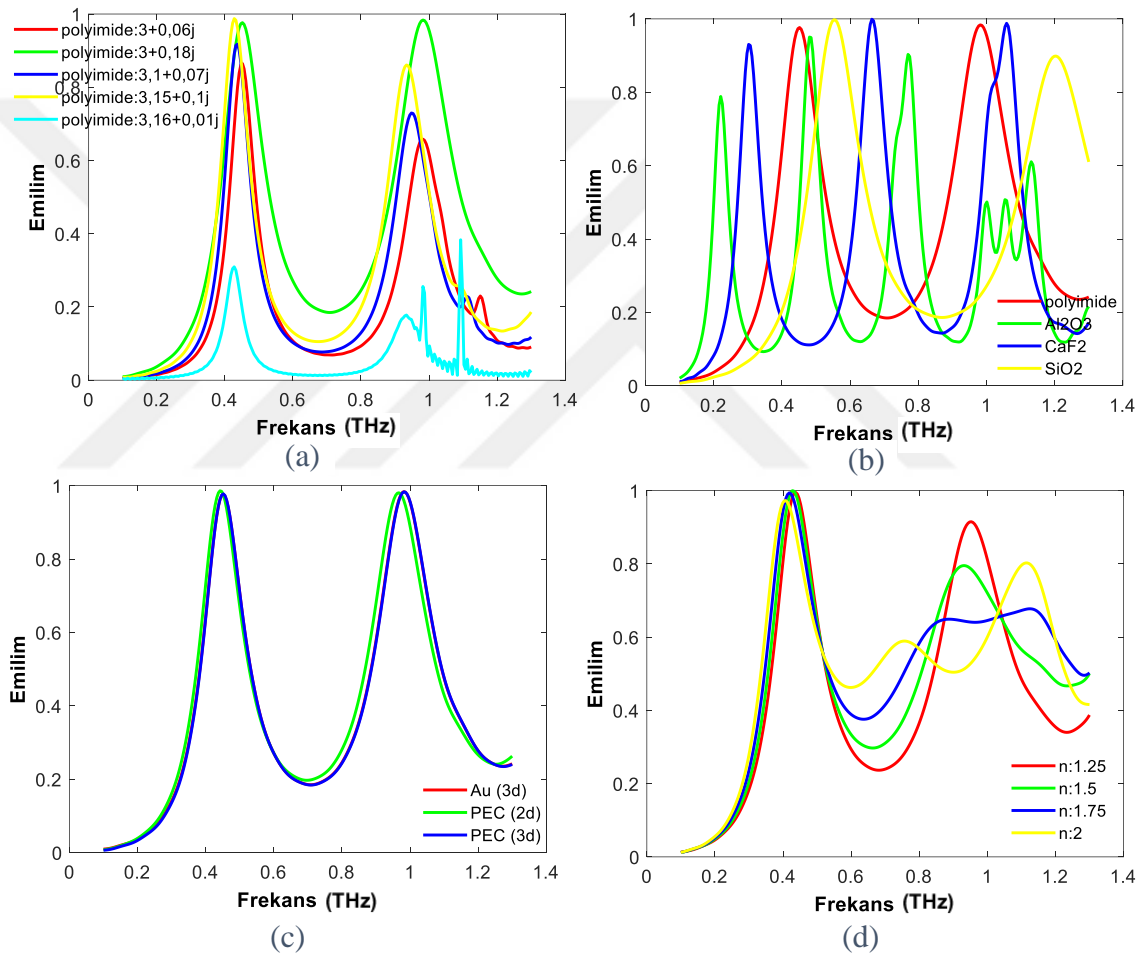
Şekil 3.27 (c)'de sabit $w=2 \mu\text{m}$ ve $g=32 \mu\text{m}$ değerleri için yapının kutuplanmaya duyarlı olup olmadığını belirlemek için kutuplama açısı (Φ) (dik geliş için geliş açısı $\theta = 0^\circ$ da sabit tutularak) 0° 'den 90° 'ye kadar değiştirilmiş ve frekans cevabı elde edilmiştir. Kutuplama açısı 0° ve 30° olduğunda yapı üzerinde kayda değer kuplajlar meydana geldiği için ikinci rezonans modunda küçük modlar oluşmuştur. Burada yapının kutuplanmaya duyarlı olduğu görülmüştür. Şekil 3.27 (d)'de sabit $w=2 \mu\text{m}$ ve $g=32 \mu\text{m}$ değerleri için geliş açısının (θ) değişiminin y kutuplamalı düzlem dalga kaynağı altında ($\Phi=90^\circ$ 'de sabit tutularak) emilim spektrumunun üzerindeki etkisini göstermektedir. Geliş açısı arttıkça her iki rezonans modunda da küçük değişimler oluşmaktadır.



Şekil 3.27. Geometrik parametre değişimlerinin rezonans frekansına etkisi. (a) w değişimine göre emilim eğrisi. (b) g değişimine göre emilim eğrisi. (c) Kutuplanma açısının değişimine göre emilim eğrisi. (d) Geliş açısının değişimine göre emilim eğrisi.

Yapının ara tabakası olan Poliimid dielektrik malzemesinin bağıl dielektrik sabiti ve kayıp tanjantı rezonans piklerinin ortaya çıkmasında doğrudan etkilidir. Bu nedenle farklı bağıl dielektrik sabiti ve kayıp tanjantı değerlerine sahip Poliimid sabit $w=2 \mu\text{m}$, $g=32 \mu\text{m}$, $\phi = 90^\circ$ ve $\theta = 0^\circ$ değerleri için tekrardan simüle edilerek yapıya ait emilim spektrum cevapları şekil 3.28 (a)'da elde edilmiştir. Poliimid ait bağıl dielektrik sabiti arttığında her iki rezonansa genlikte azalmalar meydana gelmektedir. Kayıp tanjant azaldığında ise de her iki rezonansa hem frekanslarda kaymalar hem de genlikte azalmalar görülmektedir. H ve U şeklindeki altın parçacık temelli metamalzeme emici için farklı dielektrik ara katmanların sabit $w=2 \mu\text{m}$, $g=32 \mu\text{m}$, $\phi = 90^\circ$ ve $\theta = 0^\circ$ değerleri için frekansa bağlı olarak emilim spektrumu incelenmiş ve emilim spektrumu şekil 3.28 (b)'de gösterilmiştir. Burada kullanılan dielektrik malzemelerin bağıl dielektrik sabitleri ve kayıp tanjantları Al_2O_3 [115]'den, CaF_2 [116]'den ve SiO_2 [117]'den

alınmıştır. H ve U şeklinde tasarlanan yapıda alt THz frekans bölgesinde yüksek emilim yeteneğine sahip emici olarak Al_2O_3 , CaF_2 ve SiO_2 gibi farklı dielektrik tabakalar kullanılabilme özelliği elde edilmiştir. Kullanılan tüm dielektrik tabakaların vermiş olduğu frekans cevaplarında en az bir bant yüksek emilim değeri göstermektedir. Üç boyutlu metamalzeme tabanlı emicilerin imalindeki güçlükler sebebiyle THz emiciler konusundaki araştırmalar iki boyutlu metamalzeme tabanlı emicilere göre daha yavaş gelişmektedir.



Şekil 3.23. (a) Dielektriğin farklı bağıl dielektrik sabiti ve kayıp tanjant değerleri için rezonans cevabı. (b) Farklı dielektrik tabakalar için emilim spektrumları. (c) Üst iletken tabakanın Au (3d), PEC (3d) ve PEC (2d) değişimine göre emilim eğrileri. (d) Kırılma indisine bağlı olarak emilim eğrisi.

Sabit $w=2 \mu\text{m}$, $g=32 \mu\text{m}$, $\Phi = 90^\circ$ ve $\theta = 0^\circ$ değerleri için yapıda H ve U şekillerinin verildiği üst iletken kısım için mükemmel elektriksel iletken kullanıldığında frekans cevabı şekil 3.28 (c)'de görülmektedir. Burada H ve U yapısının hem üç boyutlu bir şekilde mükemmel elektriksel iletken kullanılarak hem de iki boyutlu bir şekilde

mükemmel elektriksel iletken kullanılarak simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Mükemmel elektriksel iletken kullanılarak elde edilen spektrum cevapları göz önüne alındığında her iki rezonans modunda da yüksek emilim hassasiyetinin korunduğu görülmüştür. Sunulan H ve U şeklindeki altın parçacık temelli çift bant rezonans cevabına sahip metamalzeme emicinin kırılma indisi değişimine göre hassasiyetini analiz etmek ve bir biyo algılayıcı sensör olarak kullanılma potansiyelini değerlendirmek amacıyla hedef analitin bir solüsyon olabileceği düşünülerek yada yapı farklı kırılma indisine sahip dielektrik malzemeler içerisine konumlandırılarak, simülasyonları gerçekleştirilmiş ve Şekil 3.28 (d)'de Sabit $w=2 \mu\text{m}$, $g=32 \mu\text{m}$, $\Phi = 90^0$ ve $\theta = 0^0$ değerleri için frekans cevapları verilmiştir. Kırılma indis değeri arttıkça ilk rezonansta yapının kırılma indisi değişimine karşı çok hassas olduğu yüksek emilim yeteneğini koruyabildiği ikinci rezonansta ise lineer olmayan değişiklikler, genlikte azalmalar ve frekansta kaymalar görülmektedir. Parçacık tabanlı emici yapısı bir sensör olarak kullanılması halinde farklı çözeltiler içerisinde bağların ya da moleküllerin algılanmasında yüksek emilim yeteneği sayesinde kullanılabilme kapasitesine sahiptir. Kırılma indisi hassasiyeti biyo algılama uygulamalarında kullanılacak sensörler için oldukça önem arz eden bir ölçüttür.

4. BÖLÜM

TARTIŞMA-SONUÇ VE ÖNERİLER

4.1. Tartışma-Sonuç ve Öneriler

Bu tez çalışmasında, elektromanyetik spektrumun THz ve alt THz bölgesi uygulamaları için çift bant frekans cevabına sahip alt taban üzerine kurulu çok katmanlı (metal-dielektrik-metal) özgün geometrik tasarıma sahip altın parçacık tabanlı THz metamalzeme emiciler modellenmiştir. Tez çalışmasında teorik olarak incelenen emiciler, T#1, T#2, T#3 ve T#4 olarak adlandırılmıştır. T#1, T#2, T#3 ve T#4 çalışmalarında, emilim, geçiş ve yansıma spektrumu, yapıyı oluşturan tabaka kalınlıkları ve elektrik, manyetik alan dağılımı analizleri Lumerical FDTD Solutions modülü ile yapılmıştır. Rezonans frekanslarında oluşan yakın alan dağılımları metamalzeme emicilerin algılanacak hedef moleküller ile etkileşimini artırdığı için çalışmalarda önemli bir yer tutmaktadır. Bu dört çalışmada, bu analizlere ek olarak geometrik parametre analizi, dielektrik ayırıcı analizi, kutuplama ve geliş açısı analizi ve kırılma indis değişimi analizleri rezonans modların spektral tepkisi ve ayarlanabilirliği açısından yapılmıştır. Yapılarda kullanılan dielektrik katmanlar değiştirilerek yapının yüksek soğurum kapasitelerini koruyup koruyamadıkları incelenmiştir. Önerilen metamalzeme emicinin farklı rezonans frekanslarında da kullanılabileceklerini göstermek için yapıların geometrik parametreleri değiştirilerek yapıların THz spektrumdaki değişimleri incelenmiştir. Tasarlanan metamalzeme emicilerin bulunacağı ortamın kırılma indisi ya da yapının üzerine yapılacak bir kaplama ortamının kırılma indisinin THz spektruma etkisi incelenmiştir. Arzu edilen karakteristik özellikleri verebilecek olan emicinin belirlenmesi sırasında; ilk olarak yapıya ait ilgili malzemelerin iletkenlik, bağıl dielektrik sabiti ve kayıp tanjantı gibi temel karakteristik öğelerin emilim spektrumuna olan etkileri incelenmiştir. Daha sonra geometrik parametreler değiştirilerek hangi parçanın

hangi rezonansa etki ettiği tespit edilmeye çalışılmıştır. Sunulan emici yapıları 0.1 THz ile 2 THz (dalga boyu: 3000 μm – 150 μm ve dalga sayısı: 70 cm^{-1} – 3 cm^{-1}) aralığında THz bölgede çift-bant özellik gösteren karakteristiğe sahiptir.

Tez çalışmasında önerilen metamalzeme emiciler ile ilgili:

- T#1 çalışmasında “C Pi” şeklindeki parçacık tabanlı yapı ile çift bant spektral cevap ve yüksek elektrik alan dağılımları elde edilmiş ve yapının geometrik parametreleri değiştirilerek spektral cevapta meydana gelen değişimler irdelenmiştir. Yapının g2, g3 ve g4 açıklıklarının değişimine göre sabit rezonans frekans cevabına ve emilim oranlarına sahip olduğu görülmüştür. C Pi şeklindeki parçacık tabanlı metamalzeme emicinin çift bant rezonansının C Pi şekillerindeki yatay altın parçacıklar arasındaki yakın alan bağlaşımından ve parçacıkların bireysel tepkilerinden kaynaklandığı gözlemlenmiştir. Ayrıca yapıda farklı dielektrik ara tabakalar kullanılması durumundaki değişimlerin etkileri, kırılma indisi hassasiyeti analizi ve katman kalınlıkları değişimlerinin etkileri gerçekleştirilmiştir. Yapının ilk rezonansa kırılma indisi değişimine karşı çok hassas olduğu, yüksek emilim yeteneğini koruyabildiği ve böylelikle önerilen yapının kırılma indisi algılama uygulamalarında kullanılabileceği gözlenmiştir. Yapıdaki kaynağın geliş açısındaki (θ) değişime göre (kutuplama açısı $\Phi=90^\circ$ ‘de sabit tutularak) frekans cevabı değişimi simüle edilmiş ve yapının sabit rezonans frekans cevabına ve emilim oranlarına haiz olduğu anlaşılmıştır. Yapıda dielektrik katmanda kullanılan farklı dielektrik tabakaların vermiş olduğu frekans cevaplarında yapının THz bölgesinde en az bir bantta yüksek emilim gösterdiği gözlenmiştir. Yapıda yer alan metalik kısımlar yerine mükemmel elektriksel iletken kullanıldığında (2D ve 3D) yapının rezonans frekansları ve emilim oranlarının değişmediği gözlenmiştir.
- T#2 çalışmasında, alt THz bölgede rezonansları olan, açıklık kare ve halka rezonatör şeklinde metamalzeme emicinin simülasyonu ve karakterizasyonu sunulmuştur. Önerilen parçacık tabanlı metamalzeme emicinin çift bantlı rezonant emilim sergilediği gözlenmiştir. Metamalzeme emicinin dielektrik ve iletken tabakalarının kalınlıklarının rezonant modların emilim genlikleri üzerindeki etkisi nümerik olarak incelenmiştir. Emilim modlarının ayarlanabilirliği FDTD yöntemi kullanılarak geometrik değişimler ile nümerik olarak ortaya konulmuştur. Rezonans frekansların emilim oranlarının; üst metalik tabakaların genişliğine ve halka açıklığına bağlı olduğu

fakat kare açıklığa ise bağlı olmadığı görülmüştür. Yapının rezonans frekansların emilim oranlarının kaynağın kutuplama açısına bağlı olduğu fakat kaynağın geliş açısından bağımsız olduğu yapılan simülasyonlar sonucunda elde edilen nümerik sonuçlar ile gösterilmiştir. Emilim modlarının fiziksel orijini yüksek yakın elektrik alan dağılımı elde edilerek ortaya konmuştur. Yüzeyle gelen enerji halka ve kare şeklindeki rezonatörlerin iç kısımlarında ve açıklık kısımlarının uçlarında depolanmış, buradaki kuplajlardan ve parçacıkların bireysel tepkilerinden dolayı yapının çift bantta emilim sergilediği gözlenmiştir. Önerilen metamalzeme emicinin kırılma indisi algılama hassasiyeti nümerik olarak elde edilmiştir ve ilk rezonans yapının kırılma indisi değişimine karşı çok hassas olduğu yüksek emilim yeteneğini koruyabildiği görülmektedir. Yapıya ait ara katmanda kullanılan dielektrik malzemenin bağıl dielektrik sabiti ve kayıp tanjantı değişikliğine göre alt THz bölgede en az bir rezonans moduna yüksek denilebilecek seviyede emilim oranına sahip olduğu ilgili spektral sonuçların nümerik olarak elde edilmesi ile gösterilmiştir.

- T#3 çalışmasında karşılıklı E şeklindeki parçacık tabanlı yapının THz bölgede çift bantta mükemmel emilim değerlerine sahip olduğu FDTD yöntemi kullanılarak yapılan nümerik analizde anlaşılmış ve literatüre sunulmuştur. Rezonansların fiziksel olarak meydana geldiği bölgelere erişebilmek için yakın elektrik ve manyetik alan analizi yapılmış ve yapının alan arttırım değerlerinin oldukça yüksek olduğu anlaşılmıştır. Yakın elektrik alan dağılımları yapının E çubukların yatay olarak birbirlerine bakan kısımlarında yoğunlaştığı ve çift bant rezonans cevabın buralardaki yakın alan bağlaşımdan ve parçacıkların bireysel tepkilerinden kaynaklandığı gözlemlenmiştir. Yapının boyutları değiştirilerek rezonans frekansları rahatlıkla ayarlanabilmektedir. Tasarımın kırılma indisi değişimine karşı göstermiş olduğu hassasiyeti belirlemek için yapıyı birbirinden farklı ortamlarla kaplayarak nümerik olarak analizi gerçekleştirilmiştir. Yapıda ara katman olarak kullanılan dielektrik malzemeye ait bağıl dielektrik sabiti ve kayıp tanjantın değişimine göre rezonans cevabındaki değişimler elde edilmiştir. Yapıda kullanılan ara tabaka dielektrik malzemenin farklı dielektrik malzemeler ile yer değiştirilmesi sonucu frekans cevabındaki değişimler gösterilmiştir. Kullanılan tüm dielektrik tabakaların vermiş olduğu frekans cevaplarında yapının THz bölgede en az bir bantta rezonansa sahip olduğu ve yüksek emilim değeri gösterdiği gözlenmiştir. Yapının üst metalik kısmında

hem üç boyutta hem de iki boyutta mükemmel elektriksel iletken malzemenin kullanılması sonucunda yapının vermiş olduğu spektrum cevabı elde edilmiş ve rezonans frekanslarının ve emilim oranlarının değişmediği gözlenmiştir. Yapıdaki kaynağın geliş açısındaki (θ) değişime göre (kutuplama açısı $\Phi=0^\circ$ 'de sabit tutularak) frekans cevabı değişimi simüle edilmiş ve yapının sabit rezonans frekans cevabına ve emilim oranlarına haiz olduğu anlaşılmıştır. Yapıdaki Au iletken kısmının kalınlığının değişimine göre yapının spektrum cevabındaki değişim araştırılmış olup yapının rezonans frekanslarının ve emilim oranlarının değişmediği görülmüştür.

- T#4 çalışmasında parçacık tabanlı H ve U şeklindeki metamalzemenin alt THz bölgede çift bant rezonans cevaba ve mükemmel emilim değerlerine sahip olduğu yapılan simülasyon çalışmaları ile anlaşılmış ve literatüre sunulmuştur. Emilim modlarının akort edilebilirliği, dielektrik ve üst rezonatör tabakaların kalınlıklarının rezonant modların emilim genlikleri üzerindeki etkisi FDTD yöntemi ile nümerik olarak araştırılmıştır. Yapılan simülasyonlar sonucunda sunulan H ve U şeklindeki emicinin rezonans frekanslarının g geometrik parametrelerine bağlı olmadığı sadece üst taban genişliğine bağlı olduğu görülmüştür. Yapıda metalik kısım olan ve rezonatör görevi gören altının kalınlığının değişimine göre frekans cevabındaki değişim irdelenmiş olup rezonans frekanslarının ve emilim oranlarının değişmediği görülmüştür. Emilim modlarının kökeni yakın elektrik alan dağılımı analizi ile ortaya konmuştur. Elektrik alan dağılımlarının çubukların dipol karakteristiği sebebiyle U yapısının uçlarında yoğunlaştığı ve çift bant rezonans cevabın buralardaki yakın alan kuplajından ve parçacıkların bireysel tepkilerinden kaynaklandığı gözlemlenmiştir. Geliş açısının (θ) değişiminin y kutuplamalı düzlem dalga kaynağı altında ($\Phi=90^\circ$ 'de sabit tutularak) emilim spektrumunun üzerindeki etkisini gözlenmiş olup rezonans frekanslarında ve emilim oranlarında değişimin olmadığı anlaşılmıştır. Çift bant spektral cevabın incelenmesinin ardından yapıda farklı dielektrik ara tabakalar kullanılmıştır. Tüm dielektrik ara tabakalar için yapı yüksek emilim değerlerini koruduğu ve alt THz bölgede en az iki bantta rezonans cevabına sahip olduğu görülmüştür. Yüksek emilim değerine sahip çift bant rezonans frekansı ile tasarlanan yapı aynı anda iki ayrı molekülün algılanmasında kullanılabilir. Tasarımın kırılma indisi değişimine karşı göstermiş olduğu duyarlılığı belirlemek için yapı birbirinden farklı ortamlara yerleştirilip nümerik olarak analiz edilmiştir Yapının ilk rezonans modunda kırılma

indisi değişimine karşı çok hassas olduğu, yüksek emilim yeteneğini koruyabildiği ve böylelikle önerilen yapının kırılma indisi algılama uygulamalarında kullanılabileceği gözlenmiştir. H ve U şeklindeki yapının üst iletken kısmı için iki ve üç boyutlu mükemmel elektriksel iletken kullanılarak simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Mükemmel elektriksel iletken kullanılarak elde edilen spektrum cevapları göz önüne alındığında her iki rezonans modunda da yüksek emilim hassasiyetinin korunduğu görülmüştür.

Sonuç olarak tez çalışması kapsamında dört adet özgün geometriye sahip parçacık tabanlı metamalzeme emicilerin simülasyonları nümerik olarak gerçekleştirilmiştir. Sunulan emici yapıları, yüksek emilim değerleri ve yüksek yakın elektrik ve manyetik alan dağılımları sayesinde THz ve alt THz bölgede biyolojik ve kimyasal algılama uygulamalarında çift bant özellik gösteren karakteristiğe sahiptirler. Bu nitelik sunulan yapıların aynı anda birden fazla molekülün ya da hedef analitin biyo-algılanmasına ya da daha duyarlı algılama yapabilmesine imkân sağlayacak bir üstünlüktür. Akort edilebilir spektral yanıtları ile yapılar farklı rezonans frekanslarında da kullanılabilme imkanına sahiptirler. Tez çalışması kapsamında önerilen parçacık tabanlı metamalzeme mükemmel emicilerin, laboratuvar şartlarında karmaşık düzeneklerle algılanan biyomoleküllerin hızlı, doğru ve karmaşık olmayan sistemlerle algılanabileceği çalışmalara katkı sağlayacağı ve biyolojik, kimyasal algılamalar için tasarlanacak cihazlarda kullanılabileceği görülmüştür.

Tez çalışması kapsamında elde edilen sonuçların literatüre sunumu aşığıda verilmiştir.

- T#1 çalışması “*5th International Gap Mathematics Engineering Science and Health Sciences Congress*” uluslararası kongre kapsamında “*Design and Numerical Analysis of C Pı Shaped Goldnanoparticle Based Terahertz (THz) Metamaterial*” başlıklı özet metin olarak yayınlanmıştır.

Tez çalışmasında sunulan yapılardan T#2, T#3 ve T#4 çalışmaları Science Citation Index (SCI)’da taranan dergilerde sunulmak üzere hazırlanmaktadır. İleride ise bu tez kapsamında tasarlanan ve nümerik analizleri gerçekleştirilen mükemmel emicilerin eşdeğer devre ve matematiksel modellerinin oluşturulup ve deneysel çalışmalarının gerçekleştirilip üretilmesi ve literatüre sunulması amaçlanmaktadır.

KAYNAKÇA

1. B. Ferguson, X. –C. Zhang, 2002. Materials for terahertz science and technology. **Nature Mater.** **1**, 26-33.
2. Genç, B., 2006. Elektromanyetik Spektrumun X-Işını ve Görünür Bölgesinde Ortamlardan Yayılan Fotonları Kaydetmek için Spektrometre ve Görüntüleme Sistemlerinin Tasarımı. Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli, 94 s.
3. Sengupta, D. L., Sarka, T. K., 2003. Maxwell, hertz, the maxwellians, and the early history of electromagnetic waves. **IEEE Antennas and Propagation Magazine**, **45** (2): 13-19.
4. Stedwell, C. N., Polfer, N. C., 2013. Laser Photodissociation and Spectroscopy of Mass-separated Biomolecular Ions. **Springer Science & Business Media**, 119 pp.
5. <http://www.millisavunma.com/tubitak-terahertz-goruntuleme-sistemi/> (Erişim Tarihi Ocak 2021)
6. Gharavi, Sam; Heydari, Babak (2011-09-25). Ultra High-Speed CMOS Circuits: Beyond 100 GHz (1st ed.). **New York: Springer Science+Business Media**. pp. 1–5 (Introduction) and 100.
7. Sirtori, C., 2002. Applied physics: Bridge for the terahertz gap. **Nature** **417** (6885): 132-3
8. Borak, A., 2005. Applied physics: Toward Bridging the Terahertz Gap with Silicon-Based Lasers. **Science** **308** (5722): 638–9.
9. Karpowicz, Nicholas; Dai, Jianming; Lu, Xiaofei; Chen, Yunqing; Yamaguchi, Masashi; Zhao, Hongwei; Zhang, X.-C.; Zhang, Liangliang; Zhang, Cunlin; Price-Gallagher, Matthew; Fletcher, Clark; Mamer, Orval; Lesimple, Alain; Johnson, Keith, 2008. Coherent heterodyne time-domain spectrometry covering the entire "terahertz gap. **Applied Physics Letters (Abstract)** **92**: 011131
10. Kleiner, R., 2007. Filling the Terahertz Gap. **Science (Abstract)** **318** (5854): 1254–5
11. Sirtori, C., 2002. Bridge for the Terahertz Gap. **Nature**, **417**: 132.
12. S. Linden, C. Enkrich, M. Wegener, J. Zhou, T. Koschny, and C. M. Soukolis, 2004. Magnetic response of metamaterials at 100 THz. **Science** **306**, 1351.

13. T. J. Yen, W. J. Padilla, N. Fang, D. C. Vier, D. R. Smith, J. B. Pendry, D. N. Basov, and X. Zhang, 2004. THz magnetic response from artificial materials. **Science** **303**, 1494.
14. B. Ferguson and X.-C. Zhang, 2002. Materials for terahertz science and technology. **Nat. Mater.**, vol. **1**, no. 1, pp. 26–33.
15. M. van Exter, C. Fattinger, and D. Grischkowsky, 1989. High-brightness terahertz beams characterized with an ultrafast detector. **Appl. Phys. Lett.**, vol. **55**, no. 4, pp. 337–339,
16. H. T. Chen, W. J. Padilla, J. M. O. Zide, A. C. Gossard, A. J. Taylor, and R. D. Averitt, 2006. Active THz metamaterials. **Nature** **444**, 597.
17. H. T. Chen, J. F. O’Hara, A.K. Azad, A. J. Taylor, R.D. Averitt, D.B. Shrekenhamer and W. J. Padilla, 2008. Experimental demonstration of frequencyagile THz metamaterials. **Nature Photonics** **2**, 295.
18. R. Singh, E. Smirnova, A. J. Taylor, J. F. O’Hara, and W.Zhang, 2008. Optically thin THz metamaterials. **Optics Express** **16**, 6537.
19. A. K. Azad, J. M. Dai, and W. Zhang, 2006. Transmission properties of THz pulses through subwavelength double split ting resonators. **Opt. Lett.** **31**, 634.
20. W. J. Padilla, A. J. Taylor, C. Highstrete, M. Lee, and R. D. Averitt, 2006. Dynamical electric and magnetic metamaterial response at THz frequencies. **Phys. Rev. Lett.** **96**, 107401.
21. R. Singh, E. Smirnova, A. J. Taylor, J. F. O’Hara, and W.Zhang,. 2008. Optically thin THz metamaterials. **Optics Express** **16**, 6537.
22. Zhao, Jiayu, et al. 2014. Terahertz imaging with sub-wavelength resolution by femtosecond laser filament in air. **Scientific reports** **4**.
23. K. Kawase, Y. Ogawa, Y. Watanabe, and H. Inoue, 2003. Non-destructive terahertz imaging of illicit drugs using spectral fingerprints. **Opt. Express** **11** (20), 2549-2554.
24. M. B. Campbell, and E. J. Heilweil, 2003. Noninvasive detection of weapons of mass destruction using THz radiation. **Proc. of SPIE** **5070**, 38.
25. W. R. Tribe, D. A. Newnham, P. F. Taday, and M. C. Kemp, 2004. Hidden object detection: security applications of terahertz technology. **Proc. of SPIE** **5354**, 168-176.

26. D. J. Cook, B. K. Decker, G. Maislin, and M. G. Allen, 2004. Through container THz sensing: applications for explosive screening. **Proc. of SPIE 5354**, 55.
27. R. Osiander, J. A. Miragliotta, Z. Jiang, J. Xu, and X. C. Zhang, 2003. Mine field detection and identification using THz spectroscopic imaging. **Proc. of SPIE 5070**, 1-6.
28. M. C. Kemp, P. F. Taday, B. E. Cole, J. A. Cluff, A. J. Fitzgerald, W. R. Tribe, 2003. Security applications of terahertz technology. **Proc. of SPIE 5070**, 44-52.
29. W. R. Tribe, D. A. Newnham, P. F. Taday, and M. C. Kemp,. 2004. Hidden object detection: security applications of terahertz technology. **Proc. of SPIE 5354**, 168-176.
30. Sengupta, Kaushik, and Ali Hajimiri. 2012. A 0.28 THz power-generation and beam-steering array in CMOS based on distributed active radiators. **Solid-State Circuits**, IEEE Journal of 47.12: 3013-3031.
31. C. Kistner, A. Andre, T. Fischer, A. Thoma, C. Janke, A. Bartels, T. Gisler, G. Maret, and T. Dekorsy, 2007. Hydration dynamics of oriented DNA films investigated by timedomain terahertz spectroscopy,” **Appl. Phys. Lett.** **90**, 233902, 1-3.
32. B. M. Fischer, M. Hoffmann, H. Helm, R. Wilk, R. Rutz, T. Kleine-Ostmann, M. Kock, and P. U. Jepsen, 2005. Terahertz time-domain spectroscopy and imaging of artificial RNA. **Opt. Exp.** **13**, 5206-5215.
33. J.-Y. Chen, J. R. Knab, J. Cerne, and A. G. Markelz, 2005. Large oxidation dependence observed in terahertz dielectric response for cytochrome C. **Phys. Rev. E. Rapid** **72**, 04090, 1-4.
34. J. Knab, J. -Y. Chen, and A. Markelz, 2006. Hydration dependence of conformational dielectric relaxation of lysozyme. **Biophys. J.** **90**, 2576-2581.
35. A. Markelz, S. Whitmire, J. Hillebrecht, and R. Birge, 2002. Terahertz time domain spectroscopy of biomolecular conformational modes. **Phys. Med. Biol.** **47**, 3797-3805.
36. S. E. Whitmire, D. Wolpert, A. G. Markelz, J. R. Hillebrecht, J. Galan, and R. R. Birge, 2003. Protein flexibility and conformational state: A comparison of collective vibrational modes of wild-type and D96N bacteriorhodopsin. **Biophys. J.** **85**, 1269–1277.

37. A. G. Markelz, J. R. Knab, J. Y. Chen, and Y. He, 2007. Protein dynamical transition in terahertz dielectric response. **Chem. Phys. Lett.** **442**, 413-417.
38. J. -Y. Chen, J. R. Knab, S. Ye, Y. He, and A. G. Markelz, 2007. Terahertz dielectric assay of solution phase protein binding. **Appl. Phys. Lett.** **90**, 243901, 1-3.
39. P. H. Bolívar, M. Nagel, F. Richter, M. Brucherseifer, H. Kurz, A. Bosserhoff, and R. Büttner, 2004. Label-free THz sensing of genetic sequences: Towards 'THz biochips'. **Phil. Trans. R. Soc. Lond. A** **362**, 323-335.
40. A. G. Markelz, A. Roitberg, and E. J. Heilweil, 2000. Pulsed terahertz spectroscopy of DNA, bovine serum albumin and collagen between 0.06 to 2.00 THz. **Chem. Phys. Lett.** **320**, 42-48.
41. Wilbert D. S., 2014, Terahertz Metamaterials For Sensing And Detection, Department of Electrical and Computer Engineering in the Graduate School, Doctor of Philosophy, Alabama, 159 pp.
42. Pawar, A. Y., Sonawane, D. D., Erande, K. B., and Derle, D. V., 2013. Terahertz Technology and Its Applications. **Drug Invention Today**, **5(2)**: 157–163.
43. B. B. Hu and M. C. Nuss, 1995. Imaging with terahertz waves. **Opt. Lett.** **20** (16), 1716-1718.
44. K. F. Ross, R. E. Gordon, 1982. Water in malignant tissue, measured by cell refractometry and nuclear magnetic resonance. **J. Microsc.** **128** (1), 7-21.
45. J. H. Chen, H. E. Avram, L. E. Crooks, M. Arakawa, L. Kaufman, and A. C. Brito, 1992. In vivo relaxation times and hydrogen density at 0.063-4.85 T in rats with implanted mammary adenocarcinomas. **Radiology** **184** (2) 427-434.
46. C. S. Joseph, R. Patel, V. A. Neel, R. H. Giles, and A. N. Yaroslavsky, 2012. Imaging of ex vivo nonmelanoma skin cancers in the optical and terahertz spectral regions. **J. Biophotonics** **10.1002**, 1-10.
47. Federici, J. F., Schulkin, B., Huang, F., Gary, D., Barat, R., Oliveira, F., and Zimdars, D. (2005). THz Imaging and Sensing for Security Applications—Explosives, Weapons and Drugs. **Semiconductor Science and Technology**, **20(7)**: S266.
48. Nagatsuma, Tadao, et al. 2013. Terahertz wireless communications based on photonics technologies. **Optics express** **21.20**: 23736-23747.

49. Akyildiz, Ian F., Josep Miquel Jornet, and Chong Han. 2014. Terahertz band: Next frontier for wireless communications. **Physical Communication** **12**: 16-32.
50. Jördens, Christian, Frank Rutz, and Martin Koch. 2006. Quality assurance of chocolate products with terahertz imaging. **European Conference on NDT**.
51. J. A. Zeitler, and L. F. Gladden, 2009. In-vitro tomography and non-destructive imaging at depth of pharmaceutical solid dosage forms. **Eur. J. Pharm. Biopharm.** **71**, 2-22.
52. Zeitler, J. A., Kogermann, K., Rantanen, J., Rades, T., Taday, P. F., Pepper, M., Aaltonen, J., and Strachan, C. J. 2007. Drug Hydrate Systems and Dehydration Processes Studied by Terahertz Pulsed Spectroscopy. **International Journal of Pharmaceutics**, **334(1)**: 78–84.
53. W. S. Holland, E. I. Robson, W. K. Gear, C. R. Cunningham, J. F. Lightfoot, T. Jenness, R. J. Ivison, J. A. Stevens, P. A. R. Ade, M. J. Griffin, W. D. Duncan, J. A. Murphy, and D. A. Naylor,. 1999. SCUBA: a common-user submillimetre camera operating on the James Clerk Maxwell Telescope. **Mon. Not. R. Astron. Soc.** **303**, 659-672.
54. J. E. Ruhl, P. A. R. Ade, J. E. Carlstrom, H. M. Cho, T. Crawford, M. Dobbs, C. H. Greer, N. W. Halverson, W. L. Holzapfel, T. M. Lanting, A. T. Lee, J. Leong, E. M. Leitch, W. Lu, M. Lueker, J. Mehl, S. S. Meyer, J. J. Mohr, S. Padin, T. Plagge, C. Pryke, D. Schwan, M. K. Sharp, M. C. Runyan, H. Spieler, Z. Staniszewski, and A. A. Stark,. 2004. The south pole telescope. **Proc. of SPIE** **5498**, 11-30.
55. R. S. Booth., 2000. ALMA, the Atacama large millimeter array. **European Space Agency**, (Special Publication) SP-451, 107-114.
56. T. G. Phillips and J. Keene, 1992. Submillimeter Astronomy. **Proc. of IEEE** **80**, 1662-1678.
57. D. Griffiths, 1999. Introduction to Electrodynamics., New Jersey, Prentice-Hall, Inc. Third Edition.
58. V. G. Veselago, 1968. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ . **Sov. Phys. Usp.** **10 (4)**, 509-514.
59. J. B. Pendry, A. J. Holden, D. J. Robbins, and W. J. Stewart, 1999. Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena. **IEEE Trans. Microwave Theory Tech.** **47 (11)**, 2075-2084 .

60. D. R. Smith, W. J. Padilla, D. Vier, S. Nemat-Nasser, and S. Schultz, 2000. Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity. **Phys. Rev. Lett.** **84 (18)** 4184-4187.
61. Shelby, R. A., Smith, D. R., and Schultz, S., 2001. Experimental Verification of a Negative Index of Refraction. **Science**, **292(5514)**: 77–79.
62. R. M. Walser, 2001. Electromagnetic metamaterials. **Proc. of SPIE** **4467**, 1-15.
63. Pendry, J. B., 2000. Negative Refraction Makes a Perfect Lens. **Physical Review Letters**, **85(18)**: 3966–3969.
64. N. I. Zheludev, 2011. A roadmap for metamaterials. **Opt. Photonics News** **22**, 30–35.
65. C. M. Soukoulis and M. Wegener, 2011. Past achievements and future challenges in 3D photonic metamaterials. **Nature Photon.** **5**, 523-530.
66. Wiltshire, M. C. K., Hajnal, J. V., Pendry, J. B., Edwards, D. J., and Stevens, C. J., 2003. Metamaterial Endoscope for Magnetic Field Transfer: Near Field Imaging with Magnetic Wires. **Optics Express**, **11(7)**: 709–715.
67. Chen, H., Chan, C. T., and Sheng, P., 2010. Transformation Optics and Metamaterials. **Nature Materials**, **9(5)**: 387–396.
68. Schurig, D., Mock, J. J., Justice, B. J., Cummer, S. A., Pendry, J. B., Starr, A. F., and Smith, D. R., 2006a. Metamaterial Electromagnetic Cloak at Microwave Frequencies. **Science**, **314(5801)**: 977–980.
69. Liu, R., Ji, C., Mock, J. J., Chin, J. Y., Cui, T. J., and Smith, D. R., 2009. Broadband Ground-Plane Cloak. **Science**, **323(5912)**: 366–369.
70. Valentine, J., Li, J., Zentgraf, T., Bartal, G., and Zhang, X., 2009. An Optical Cloak Made of Dielectrics. **Nature Materials**, **8(7)**: 568–571.
71. Landy, N. I., Sajuyigbe, S., Mock, J. J., Smith, D. R., and Padilla, W. J., 2008. Perfect Metamaterial Absorber. **Physical Review Letters**, **100(20)**: 207402.
72. Tao, H., Landy, N. I., Bingham, C. M., Zhang, X., Averitt, R. D., and Padilla, W. J., 2008. A Metamaterial Absorber for the Terahertz Regime: Design, Fabrication and Characterization. **Optics Express**, **16(10)**: 7181–7188
73. Liu, N., Mesch, M., Weiss, T., Hentschel, M., and Giessen, H., 2010a. Infrared Perfect Absorber and Its Application as Plasmonic Sensor. **Nano Letters**, **10(7)**: 2342–2348.

74. Liu, X., Starr, T., Starr, A. F., and Padilla, W. J., 2010b. Infrared Spatial and Frequency Selective Metamaterial with near-Unity Absorbance. **Physical Review Letters**, **104(20)**: 207403.
75. Chen, H.-T., 2012. Interference Theory of Metamaterial Perfect Absorbers. **Optics Express**, **20(7)**: 7165–7172.
76. Watts, C. M., Liu, X., and Padilla, W. J., 2012. Metamaterial Electromagnetic Wave Absorbers. **Advanced Materials**, **24(23)**: OP98–OP120.
77. F. Martín, F. Falcone, J. Bonache, R. Marqués, and M. Sorolla, 2003. Miniaturized coplanar waveguide stop band filters based on multiple tuned split ring resonators. *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.* **13** (12) 511-513.
78. J. García-García, F. Martín, F. Falcone, J. Bonache, I. Gil, T. Lopetegi, M. A. G. Laso, M. Sorolla, and R. Marqués, 2004. Spurious passband suppression in microstrip coupled line band pass filters by means of split ring resonators. *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.* **14** (9) 416-418.
79. Pendry, J. B., Holden, A. J., Robbins, D. J., and Stewart, W. J., 1999. Magnetism from Conductors and Enhanced Nonlinear Phenomena. **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**, **47(11)**: 2075–2084.
80. Seo, M. A., Park, H. R., Koo, S. M., Park, D. J., Kang, J. H., Suwal, O. K., Choi, S. S., Planken, P. C. M., Park, G. S., Park, N. K., Park, Q. H., and Kim, D. S. 2009. Terahertz Field Enhancement by a Metallic Nano Slit Operating Beyond the Skin-Depth Limit. **Nature Photonics**, **3(3)**: 152–156.
81. H. –T. Chen, S. Palit, T. Tyler, C. M. Bingham, J. M. O. Zide, J. F. O’Hara, D. R. Smith, A. C. Gossard, R. D. Averitt, W. J. Padilla, N. M. Jokerst, and A. J. Taylor, 2008. Hybrid metamaterials enable fast electrical modulation of freely propagation terahertz waves. **Appl. Phys. Lett.** **93**, 091117 (1-3).
82. H. –T. Chen, W. J. Padilla, M. J. Cich, A. K. Azad, R. R. Averitt, and A. J. Taylor, 2009. A metamaterial solid-state terahertz phase modulator. **Nature Photonics** **3**, 148-151.
83. H. Zhou, F. Ding, Y. Jin, and S. L. He, 2011. Terahertz metamaterial modulators based on absorption. **Progr. Electromagn. Res.** **119**, 449-460.
84. H. Chen, B. –I. Wu, L. Ran, T. M. Grzegorzcyk, and J. A. Kong, 2006. Controllable lefthanded metamaterial and its application to a steerable antenna. **Appl. Phys. Lett.** **89**, 053509 (1-3).

85. H. –N. Liu, H. –L. Su, K. –H. Lin, C. –Y. Wu, C. –L. Tang, and S. –H. Yeh, 2006. Design of antenna radome composed of metamaterials for high gain. **Antennas and Propagation Society International Symposium**, 19-22.
86. Silveirinha, M., and Engheta, N. 2006. Tunneling of Electromagnetic Energy through Subwavelength Channels and Bends Using ϵ -near-Zero Materials. **Physical Review Letters**, **97(15)**: 157403.
87. Moitra, P., Yang, Y., Anderson, Z., Kravchenko, I. I., Briggs, D. P., and Valentine, J. 2013. Realization of an All-Dielectric Zero-Index Optical Metamaterial. **Nature Photonics**, **7(10)**: 791–795.
88. R. Islam and G. V. Eleftheriades, 2003. A planar metamaterial co-directional coupler that couples power backwards. **Proc. IEEE MTT-S Int. Microwave Symp.** 321–324.
89. R. Islam, F. Elek, and G. V. Eleftheriades, 2004. Coupled-line metamaterial coupler having co-directional phase but contra-directional power flow. **Electron Lett.** **40**, 315–317.
90. R. Marqués, J. Martel, F. Mesa, and F. Medina, 2002. Left-handed simulation and transmission of EM waves in subwavelength split-ring-resonator-loaded metallic waveguides. **Phys. Rev. Lett.** **89** (18), 1-4.
91. B. Edwards, A. Alu, M. E. Young, M. Silveirinha, and N. Engheta, 2008. Experimental verification of epsilon-near-zero metamaterial coupling and energy squeezing using a microwave waveguide. **Phys. Rev. Lett.** **100**, 033903 (1-4).
92. Urzhumov, Y., and Smith, D. R., 2011. Metamaterial-Enhanced Coupling between Magnetic Dipoles for Efficient Wireless Power Transfer. **Physical Review B**, **83(20)**: 205114.
93. Lipworth, G., Ensworth, J., Seetharam, K., Da, H., Lee, J. S., Schmalenberg, P., Nomura, T., Reynolds, M. S., Smith, D. R., and Urzhumov, Y., 2014. Magnetic Metamaterial Superlens for Increased Range Wireless Power Transfer. **Scientific Reports**, **4**: 3642.
94. Kudyshev, Z. A., Richardson, M. C., and Litchinitser, N. M., 2013. Virtual Hyperbolic Metamaterials for Manipulating Radar Signals in Air. **Nature Communications**, **4**.

95. Khorasaninejad, M., Chen, W. T., Devlin, R. C., Oh, J., Zhu, A. Y., and Capasso, F., 2016. Metalenses at Visible Wavelengths: Diffraction-Limited Focusing and Subwavelength Resolution Imaging. **Science**, **352(6290)**: 1190–1194.
96. Kabashin, A. V., Evans, P., Pastkovsky, S., Hendren, W., Wurtz, G. A., Atkinson, R., Pollard, R., Podolskiy, V. A., and Zayats, A. V., 2009. Plasmonic Nanorod Metamaterials for Biosensing. **Nature Materials**, **8(11)**: 867–871.
97. Zheludev, N. I., and Kivshar, Y. S., 2012. From Metamaterials to Metadevices. **Nature Materials**, **11(11)**: 917–924.
98. Zhao X., 2016, Active Metamaterial Devices at Terahertz Frequencies, Boston University College Of Engineering, Doctor of Philosophy, 162 pp.
99. Withawat & Abbott, Derek., 2009. Metamaterials in the Terahertz Regime. *Photonics Journal*, **IEEE**. **1. 99 - 118**. 10.1109/JPHOT.2009.2026288.
100. Hokmabadi M. P., 2016. Terahertz Metamaterials: Towards Sensing And Communications, Electrical and Computer Engineering in the Graduate School of The University of Alabama, Doctor of Philosophy, 217 pp.
101. Al-Naib, Ibraheem, et al. 2015. Ultra-high Q even eigenmode resonance in terahertz metamaterials. **Applied Physics Letters** **106.1**: 011102.
102. Hokmabadi M. P., et al. 2013. Terahertz metamaterial absorbers. **Terahertz Science and Technology** **6.1**: 40-58.
103. Ma, Yong, et al. 2011. A terahertz polarization insensitive dual band metamaterial absorber. **Optics letters** **36.6**: 945-947.
104. Ye, Yu Qian, Yi Jin, and Sailing He. 2010. Omnidirectional, polarization-insensitive and broadband thin absorber in the terahertz regime. **JOSA B** **27.3**: 498-504.
105. Tao, Hu, et al. 2010. A dual band terahertz metamaterial absorber. **Journal of physics D: Applied physics** **43.22**: 225102.
106. Shen, Xiaopeng, et al. 2012. Triple-band terahertz metamaterial absorber: Design, experiment, and physical interpretation. **Applied Physics Letters** **101.15**: 154102.
107. Grant, James, et al. 2011. Polarization insensitive, broadband terahertz metamaterial absorber. **Optics letters** **36.17**: 3476-3478.

108. Zhang C., 2014. Optical simulation of terahertz antenna using finite difference time domain method. Imaging Science College of Science Rochester Institute of Technology, Master of Science, 128 s.
109. The numerical simulations are carried out using a finite-difference-time-domain package, Lumerical FDTD™, www.lumerical.com (Erişim tarihi Ocak 2021)
110. The numerical simulations are carried out using a finite-difference-time-domain package, Lumerical FDTD™, <https://www.lumerical.com/tcad-products/fdtd/> (Erişim tarihi Ocak 2021)
111. Chen, K., Adato, R., Altug, H., 2012. Dual-band perfect absorber for multispectral plasmon-enhanced infrared spectroscopy. **ACS Nano**, **6** (9): 7998- 8006.
112. Palik, E., 1985. Handbook of Optical Constants of Solids. Academic Press, London, 535 pp.
113. Bozkurt K.T., Türkmen M., Yıldız C., 2020. Design and Numerical Analysis of C Pı Shaped Goldnanoparticle Based Terahertz (THz) Metamaterial. ss 40-43. **5th International Gap Mathematics Engineering Science and Health Sciences Congress**. Aralık 04-06, 2020. Şanlıurfa, Türkiye. 153 ss.
114. Xin Su, Chuhuan Feng, Yangjian Zeng, Hongbin Yu., 2020. A dual-band tunable metamaterial absorber based on pneumatic actuation mechanism, **Optics Communications**, Volume 459, 124885, ISSN 0030-4018.
115. M. R. Query. Optical constants, 1985. **Contractor Report** CRDC-CR-85034
116. W. Kaiser, W. G. Spitzer, R. H. Kaiser, and L. E. Howarth. 1962 Infrared Properties of CaF₂, SrF₂, and BaF₂, **Phys. Rev.** **127**.
117. J. Kischkat, S. Peters, B. Gruska, M. Semtsiv, M. Chashnikova, M. Klinkmüller, O. Fedosenko, S. Machulik, A. Aleksandrova, G. Monastyrskiy, Y. Flores, and W. T. Masselink. 2012. Mid-infrared optical properties of thin films of aluminum oxide, titanium dioxide, silicon dioxide, aluminum nitride, and silicon nitride, **Appl. Opt.** **51**, 6789-6798
118. Pryce, I. M., Kelaita, Y. A., Aydın, K., Atwater, H. A., 2011. Compliant Metamaterials for Resonantly Enhanced Infrared Absorption Spectroscopy and Refractive Index Sensing. **ACS Nano**, **5** (10): 8167-8174.
119. Brown, L. V., Zhao, K., King, N., Sobhani, H., Nordlander, P., Halas, N. J., 2013. Surface-Enhanced Infrared Absorption Using Individual Cross Antennas Tailored

- to Chemical Moieties. **Journal of the American Chemical Society**, **135** (9): 3688-3695.
120. D'Andrea, C., Bochterle, J., Toma, A., Huck, C., Neubrech, F., Messina, E., Fazio, B., Marago, O. M., Di Fabrizio, E., de La Chapelle, M. L., Gucciardi, P. G., Pucci, A., 2013. Optical Nanoantennas for Multiband Surface-Enhanced Infrared and Raman Spectroscopy. **ACS Nano**, **7** (4): 3522-3531.
 121. Adato, R., Altug, H., 2013. In-Situ Ultra-Sensitive Infrared Absorption Spectroscopy of Biomolecule Interactions in Real Time with Plasmonic Nanoantennas. **Nature Communications**, **4**: 2154.
 122. Cetin, A. E., Turkmen, M., Aksu, S., Etezadi, D., Altuğ, H., 2015. Multi-Resonant Compact Nanoaperture with Accessible Large Nearfields. **Applied Physics B**, **118** (1): 29-38.
 123. Zhao, Z., Pu, M., Gao, H., Jin, J., Li, X., Ma, X., Wang, Y., Gao, P., Luo, X., 2015. Multispectral Optical Metasurfaces Enabled by Achromatic Phase Transition. **Scientific Reports**, **5**: 15781.
 124. Aslan, E., Aslan, E., Wang, R., Hong, M. K., Erramilli, S., Turkmen, M., Saracoglu, Ö. G., Dal Negro, L., 2016. Multispectral Cesaro-Type Fractal Plasmonic Nanoantennas. **ACS Photonics**, **3** (11): 2102-2111.
 125. Xiao, S., Wang, T., Liu, Y., Han, X., Yan, X., 2016. An Ultrasensitive and Multispectral Refractive Index Sensor Design Based on Quad-Supercell Metamaterials. **Plasmonics**, **12** (1): 185-191.
 126. Aslan, E., Turkmen, M., 2017. Square Fractal-Like Nanoapertures for SEIRA Spectroscopy: An Analytical, Numerical and Experimental Study. **Sensors and Actuators A: Physical**, **259**: 127-136.
 127. Aslan, E., Turkmen, M., 2013. Novel Dual-Band Resonator Nanoantenna Array for Infrared Detection Applications. **Sensors and Materials**, **25** (9): 689-696.
 128. Aslan, E., Korkmaz, S., Saracoglu, O. G., Turkmen, M., 2014. Characterization of Plasmonic Absorber Structure for Infrared Detection Applications. **OSA Advanced Photonic Congress**, SeM2C.4.
 129. Liu, N., Guo, H., Fu, L., Kaiser, S., Schweizer, H., Giessen, H., 2008. Three-Dimensional Photonic Metamaterials at Optical Frequencies. **Nature Materials**, **7**: 31-37.

130. Liu, Z., Du, S., Cui, A., Li, Z., Fan, Y., Chen, S., Li, W., Li, J., Gu, C., 2017. High-Quality-Factor Mid-Infrared Toroidal Excitation in Folded 3D Metamaterials. **Advanced Materials**, **29** (17): 1606298.
131. Soukoulis, C. M., Wegener, M., 2011. Past Achievements and Future Challenges in the Development of Three-Dimensional Photonic Metamaterials. **Nature Photonics**, **5**: 523–530.
132. Pfeiffer, C., Emani, N. K., Shaltout, A. M., Boltasseva, A., Shalaev, V. M., Grbic, A., 2014. Efficient Light Bending with Isotropic Metamaterial Huygens' Surfaces. **Nano Letters**, **14** (5): 2491–2497.
133. Tanikawa, K., Okamoto, T., Kamada, S., Matsumoto, R., Tamura, N., Haraguchi, M., 2017. Fabrication of Peelable Thin Films Containing Crescent-Shaped Split-Ring Resonators for Three-Dimensional Optical Metamaterials. **Optical Materials Express**, **7** (1): 1-7.
134. Kenanakis, G., Xomalis, A., Selimis, A., Vamvakaki, M., Farsari, M., Kafesaki, M., Soukoulis, C. M., Economou, E. N., 2015. Three-Dimensional Infrared Metamaterial with Asymmetric Transmission. **ACS Photonics**, **2** (2): 287-294.
135. Zhao, Y., Shi, J., Sun, L., Li, X., Alu, A., 2014. Alignment-Free Three-Dimensional Optical Metamaterials. **Advanced Materials**, **26** (9): 1439-1445.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı, Soyadı: Kadir Tuğrul BOZKURT

Uyruğu: Türkiye (TC)

Doğum Tarihi ve Yeri: 5 Ocak 1995, Kayseri

Medeni Durumu: Bekâr

Tel: +90 352 207 66 66 Dâhili: 32280

email: tugrulbozkurt@erciyes.edu.tr

Yazışma Adresi: Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik Elektronik Mühendisliği 38039 Talas / KAYSERİ

EĞİTİM

Derece	Kurum	Mezuniyet Tarihi
Lisans	Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü	2017
Lise	Selçuklu Anadolu Lisesi, Kayseri	2012

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görev
2018- Halen	Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü	Araştırma Görevlisi

YABANCI DİL

İngilizce

YAYINLAR

1. Bozkurt K.T., Türkmen M., Yıldız C., 2020. Design and Numerical Analysis of C Pi Shaped Goldnanoparticle Based Terahertz (THz) Metamaterial. ss 40-43. 5th International Gap Mathematics Engineering Science and Health Sciences Congress. Aralık 04-06, 2020. Şanlıurfa, Türkiye. 153 ss.