T.C.
ERCİYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK – ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BİYOSENSÖR UYGULAMALARI İÇİN FRAKTAL GEOMETRİLİ PLAZMONİK NANOANTEN DİZİLERİ TASARIM VE ÜRETİMİ

Hazırlayan
Ekin ASLAN

Danışman
Doç. Dr. Mustafa TÜRKMEN

Doktora Tezi

Şubat 2017
KAYSERİ

T.C.
ERCİYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BİYOSENSÖR UYGULAMALARI İÇİN FRAKTAL GEOMETRİLİ PLAZMONİK NANOANTEN DİZİLERİ TASARIM VE ÜRETİMİ

(Doktora Tezi)

Hazırlayan
Ekin ASLAN

Danışman
Doç. Dr. Mustafa TÜRKMEN

Bu çalışma Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu tarafından 113E277 nolu proje, Yurt Dışı Doktora Sırası Araştırma Burs Programı (2214-A) ve Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından FDK-2015-5649 nolu tez projesi ile desteklenmiştir.

Şubat 2017
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 : Ekin ASLAN

İmza : 

YÖNERGEYE UYGUNLUK

Biyosensör Uygulamaları için Fraktal Geometrili Plazmonik Nanoanten Dizileri Tasarım ve Üretimi adlı Doktora tezi, Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi'ne uygun olarak hazırlanmıştır.

Tezi Hazırlayan
Ekin ASLAN

Danışman
Doç. Dr. Mustafa TÜRKMEN

Elektrik – Elektronik Mühendisliği ABD Başkanı
Prof. Dr. Necmi TAŞPINAR

Doç. Dr. Mustafa TÜRKMEN danışmanlığında **Ekin ASLAN** tarafından hazırlanan **"Biyosensör Uygulamaları için Fraktal Geometrili Plazmonik Nanoanten Dizileri Tasarım ve Üretimi"** adlı bu çalışma, jürimiz tarafından Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Elektrik - Elektronik Mühendisliği** Anabilim Dalında **Doktora** tezi olarak kabul edilmiştir.

10.02.2017

JÜRİ:

Başkan: Prof. Dr. Sedat ÖZSOY

Üye : Doç. Dr. Ömer Galip SARAÇOĞLU

Üye : Doç. Dr. Mustafa TÜRKMEN

Üye : Doç. Dr. Yakup HAMEŞ

Üye : Yrd. Doç. Dr. Selçuk YERCİ

ONAY:

Bu tezin kabulü, Enstitü Yönetim Kurulunun 14/03/2017 tarih ve 2017/13-20 sayılı kararı ile onaylanmıştır.

15/03/2017

Enstitü Müdürü
Prof. Dr. Mehmet AKKURT

ÖNSÖZ / TEŞEKKÜR

Başta tez çalışmam boyunca bana yol gösteren, bilgi, tecrübe ve mesaisini benim için harcayan, dünyaya daha geniş bir pencereden bakma becerisi kazandıran ve isabetli öngörüleri ile her zaman yolumu aydınlatan danışman hocam Doç. Dr. Mustafa Türkmen'e teşekkür ederim.

Ayrıca; çalışmalarım süresince tasarlanan yapıların gerçekleştirilmesi ve ölçümlerin yapılmasında yardımcı olan Arş. Gör. Erdem Aslan'a ve Boston Üniversitesi Fotonik Merkezi laboratuar imkânlarından faydalanmamı sağlayan ve bilgi ile tecrübelerini paylaşan Prof. Dr. Luca Dal Negro ve değerli katkılarından dolayı Prof. Dr. Shyamsunder Erramilli'ye; biyosensör uygulamalarında kullanılan proteinin temininde yardımcı olan Prof. Dr. Kenneth J. Rothschild'e teşekkür ederim.

Özellikle de eğitim-öğretim hayatım boyunca maddi ve manevi yanımda olan aileme teşekkürü bir borç bilirim.

Bu tez çalışmasına 113E277 nolu proje ile ve Yurt Dışı Doktora Sırası Araştırma Burs Programı (2214-A) kapsamında destek veren Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu'na (TÜBİTAK) ve FDK-2015-5649 nolu tez projesi kapsamında destek veren Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne teşekkür ederim.

Ekin ASLAN

Kayseri, Şubat 2017

BİYOSENSÖR UYGULAMALARI İÇİN FRAKTAL GEOMETRİLİ PLAZMONİK NANOANTEN DİZİLERİ TASARIM VE ÜRETİMİ

Ekin ASLAN

Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü

Doktora Tezi, Şubat 2017

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Mustafa TÜRKMEN

ÖZET

Fraktal şekilli plazmonik nanoantenler; ölçekli olarak tekrarlanan geometrilerinden dolayı, tüm optik spektrumda; çoklu-spektral ve çoklu-ölçekli konumsal dağılımlara sahip, yüksek yerel elektromanyetik alanlara neden olabilirler. Bu nedenle de, yüzey güçlendirilmiş spektroskopi uygulamalarında, biyolojik ve kimyasal algılama için çok-bantlı sensör geliştirmede büyük bir potansiyele sahiptirler. Bu bağlamda, literatürde bilinen Cesaro tip fraktal geometriye ve literatüre sunulan ters-Cesaro tip fraktal geometriye sahip üç yeni rezonant nanoparçacık ortaya konulmuştur. Bu nanoyapıların, optik frekanslardaki plazmonik saçılma karakteristikleri ve hiyerarşik fraktal dağılımlara sahip rezonant yakın alan özellikleri; zaman domeninde sonlu farklar (FDTD) simülasyonlarıyla çalışılmıştır. Elektron demet litografisi (EBL) yoluyla üretilen nanoanten dizilerinin optik karakterizasyonu, Fourier dönüşümlü kızılötesi (FTIR) mikrospektroskopisi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Cesaro tabanlı fraktal nanoantenlerin kızılötesi algılama potansiyelini göstermek için nano kalınlıktaki bir polimerin üç farklı moleküler bandının ve bakteriyodopsin zarının on farklı moleküler bandının algılama sonuçları sunulmuştur. Düşük hassasiyetleri nedeniyle, geleneksel kızılötesi algılama platformları az miktarlardaki moleküllerin algılanmasında bazı dezavantajlara sahiptir. Fraktal nanoaçıklıklardan elde edilen yüksek iletim, bu problemlerin giderilmesinde çözüm olabilmektedir. Bu amaçla kare ve dikdörtgen fraktal benzeri nanoaçıklık dizileri de incelenmiştir. Kare fraktal benzeri nanoanten dizileri, EBL yoluyla üretilmiştir ve FTIR mikrospektroskopisi ile karakterize edilmiştir. Bu tez çalışmasında sunulan fraktal tabanlı nanoantenlerin mühendisliği; gelecekte plazmonik-fotonik platformlara verimli şekilde entegre edilebilen, çoklu-spektral optik biyosensörler için yeni bir strateji sağlayacaktır.

Anahtar Kelimeler: Fraktal geometrili nanoantenler; çoklu-spektral plazmonikler; kızılötesi algılama; nanofotonik; zaman domeninde sonlu farklar metodu; biyosensör.

DESIGN AND FABRICATION OF FRACTAL SHAPED PLASMONIC NANOANTENNA ARRAYS FOR BIOSENSING APPLICATIONS

Ekin ASLAN

Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences

PhD. Thesis, February 2017

Thesis Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Mustafa TÜRKMEN

ABSTRACT

Fractal shaped plasmonic nanoantennas can give rise to strongly enhanced local electromagnetic fields with multi-spectral and multi-scale spatial distribution in the whole optical spectrum, owing to their scale-invariant geometry. Thus, they have a large potential to enable multiband sensors in surface-enhanced spectroscopic applications for biological and chemical detection. In this context, three novel resonant nanoparticles based on fractal geometries which are known as Cesaro type and presented to literature as inverse-Cesaro type are introduced. Plasmonic scattering characteristics in the optical frequencies and resonant near-field properties with hierarchical fractal distributions of these nanostructures are studied by resorting to finite difference time domain (FDTD) simulations. Optical characterization of nanoantenna arrays fabricated by electron-beam lithography (EBL) is experimentally realized by Fourier transform infrared (FTIR) microspectroscopy. In order to demonstrate the infrared sensing potential of Cesaro based fractal nanoantennas, triple-band-detection results of a polymer with nanoscale thickness and decuple-band-detection results of a bacteriorhodopsin membrane are presented. Due to their lower sensitivity, conventional infrared sensing platforms have some disadvantages with detecting the small quantities of molecules. Enhanced transmission from fractal nanoapertures can be a solution for this problem. For this purpose in this study, nanoaperture arrays based on square and rectangular fractal-like geometries are studied. Square fractal-like nanoantenna arrays are fabricated by EBL and characterized by FTIR microspectroscopy. The engineering of fractal based nanoantennas in this thesis study can provide a novel strategy for multispectral optical biosensors that can be conveniently integrated in future plasmonic-photonic platforms.

Keywords: Fractal shaped nanoantennas; multispectral plasmonics; infrared detection; nanophotonics; finite difference time domain method; biosensor.

İÇİNDEKİLER

BİYOSENSÖR UYGULAMALARI İÇİN FRAKTAL GEOMETRİLİ PLAZMONİK NANOANTEN DİZİLERİ TASARIM VE ÜRETİMİ

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK ..... **ii**
YÖNERGEYE UYGUNLUK ..... **iii**
ONAY ..... **iv**
ÖNSÖZ / TEŞEKKÜR ..... **v**
ÖZET ..... **vi**
ABSTRACT ..... **vii**
İÇİNDEKİLER ..... **viii**
KISALTMALAR VE SİMGELER ..... **xi**
TABLOLAR LİSTESİ ..... **xx**
ŞEKİLLER LİSTESİ ..... **xxii**

GİRİŞ

TEMEL TANIMLAMALAR

G.1. Metallerin Elektromanyetiği ve Plazmonikler **1**
G.1.1. Metallerin Optiksel Davranışı ve Drude Model, Maxwell Eşitlikleri ve Süreklilik Denklemleri **2**
G.1.2. Bir Arayüzeyde Yüzey Plazmon Polaritonları **10**
G.1.3. Plazma Frekansı **16**
G.1.4. Yerelleşmiş Yüzey Plazmon (LSP) Polaritonları **18**
G.2. Optik Teorem **22**
G.2.1. Görünür ve Kızılötesi Işınım için Nanoanten Dizileri **22**
G.2.1.1. Sönümlenme Kesit Alanı **23**
G.2.1.2. Optik Nanoantenler **26**
G.2.2. Optik Sensörler **28**
G.3. Spektroskopi Teknikleri **31**
G.3.1. SEIRA Spektroskopisi **34**
G.4. Fraktal Geometrili Plazmonik Nanoantenlerin Literatürdeki Yeri ve Önemi **36**

G.5. Tezin Amacı 43

1. BÖLÜM

NÜMERİK ANALİZ YÖNTEMİ

1.1. Giriş 45

1.2. FDTD Metodu 45

1.3. Lumerical FDTD Solutions Programının Özellikleri 50

1.4. Fraktal Geometrilerin Matematiksel Modelleri ve Lindenmayer Sistemi 51

1.5. Çok-Kutuplu Açılım Ayrıştırma Analizi 59

2. BÖLÜM

NANOÜRETİM, GÖRÜNTÜLEME VE OPTİK KARAKTERİZASYON TEKNİKLERİ

2.1. Giriş 63

2.2. Nanoüretim Teknikleri 64

2.2.1. Elektron Demet Litografisi (EBL) 65

2.2.2. Elektron Demet Buharlaştırma 66

2.3. Görüntüleme Teknikleri 68

2.3.1. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) 68

2.4. Optik Karakterizasyon 69

2.4.1. Fourier Transform Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR) 69

2.5. Tez Çalışmasında Kullanılan Nanoüretim ve Görüntüleme Teknikleri 72

3. BÖLÜM

FRAKTAL GEOMETRİLİ PLAZMONİK NANOANTEN DİZİLERİ

3.1. Giriş 75

3.2. Literatürdeki Çoklu-Spektral veya Fraktal Geometrili Nanoanten Dizileri ... 75

3.2.1. L#1 Çoklu-spektral, Log-Periyodik Trapez Şekilli Anten Tasarımı 75

3.2.2. L#2 Cayley Ağacı Şeklindeki Fraktal Nanoanten Tasarımı 77

3.2.3. L#3 Sierpiński Tip Fraktal Nanoanten Tasarımı 78

3.3. Teze Özgü Olarak Tasarlanan Fraktal Geometrili Plazmonik Nanoanten Dizileri 79

3.3.1. Üretilen Fraktal Geometrili Plazmonik Nanoanten Dizilerine Ait Sonuçlar 79

3.3.1.1. U#1 Ters-Cesaro Tip Fraktal Nanoanten Dizileri 81

3.3.1.2. U#2 Cesaro-1 Tip Fraktal Nanoanten Dizileri 99
3.3.1.3. U#3 Cesaro-2 Tip Fraktal Nanoanten Dizileri 127
3.3.1.4. U#4 Kare Fraktal Benzeri Nanoanten Dizileri 136
3.3.1.5. U#5 Dikdörtgen Fraktal Nanoanten Dizileri 146

4. BÖLÜM
ÜRETİLEN NANOANTEN DİZİLERİ İLE YAPILAN BİYOLAGILAMA UYGULAMALARI

4.1. Giriş 156
4.2. Biyosensör Uygulamaları 157
4.2.1. U#1'e Ait Algılama Sonuçları 157
4.2.1.1. PMMA İçerisindeki Moleküler Bağların Algılanması 157
4.2.1.2. Bakteriyorodopsin Proteinin Algılanması 162
4.2.2. U#2'e Ait Algılama Sonuçları 165
4.2.3. U#3'e Ait Algılama Sonuçları 167

5. BÖLÜM
TARTIŞMA-SONUÇ VE ÖNERİLER

5.1. Tartışma-Sonuç ve Öneriler 169

KAYNAKÇA 173
ÖZGEÇMİŞ 188

KISALTMALAR VE SİMGELER

AC	Alternating Current; Alternatif Akım
Al_2O_3	Alümina
APCVD	Atmospheric Pressure Chemical Vapor Deposition; Atmosfer Basıncı Kimyasal Buhar Biriktirme
Au	Altın
BaF_2	Baryum Florür
BN	Bor Nitrür
BR	Bacteriorhodopsin; Bakteriyorodopsin
BSE	Back Scattering Electrons; Geri Saçılım Elektronları
C	Karbon
CaF_2	Kalsiyum Florür
CL	Cathodoluminescence; Katodışıması
Cr	Krom
CVD	Chemical Vapor Deposition; Kimyasal Buhar Biriktirme
DC	Direct Current; Doğru Akım
DIW	Deionized Water; Deiyonize Su
dk	Dakika
EBL	Electron-Beam Lithography; Elektron Demet Litografisi
EDAX	Energy-Dispersed Analysis Of X-Rays; X-Işınlarının Enerji Dağılım Analizi
EM	EM
eV	Elektronvolt
FDTD	Finite Difference Time Domain; Zaman Domeninde Sonlu Farklar
3D-FDTD	Three Dimensional Finite Difference Time Domain; Zaman Domeninde Üç Boyutlu Sonlu Farklar
FIR	Far-Infrared; Uzak Kızılötesi
FTIR	Fourier Transform Infrared Spectroscopy; Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi
H	Hidrojen
He	Helyum
IR	Infrared; Kızılötesi

IPA	Isopropanol; İzopropanol
KOH	Potasyum Hidroksit
LPCVD	Low Pressure Chemical Vapor Deposition; Düşük Basınç Kimyasal Buhar Biriktirme
LRSP	Long-Range Surface Plasmon; Uzun Menzilli Yüzey Plazmonu Rezonansı
LSP	Localized Surface Plasmon; Yerelleşmiş Yüzey Plazmonu
LSPP	Localized Surface Plasmon Polariton; Yerelleşmiş Yüzey Plazmon Polaritonları
LSPR	Localized Surface Plasmon Resonance; Yerelleşmiş Yüzey Plazmon Rezonansı
MgF_2	Magnezyum Florid
MCM	Multi-Coefficient Model; Çok-Katsayılı Model
MIR	Mid-Infrared; Orta Kızılötesi
Mo	Molibden
MOCVD	Metal-Organic Chemical Vapor Deposition; Metal-Organik Kimyasal Buhar Biriktirme
MIBK	Methyl Isobutyl Ketone; Metil Izobütil Keton
NIR	Near-Infrared; Yakın Kızılötesi
O	Oksijen
PE	Primary Electrons; Birincil Elektronlar
PECVD	Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition; Plazma Yükseltilmiş Kimyasal Buhar Biriktirme
PMMA	Poly(Methyl Methacrylate); Poli(Metil Metakrilat)
PVD	Physical Vapor Deposition; Fiziksel Buhar Biriktirme
R	Reflectance; Yansıma Katsıyısı
RF	Radio Frequency; Radyo Frekansı
RFID	Radio Frequency Identification Tags; Radyo Frekansı ile Tanımlama Etiketleri
RIU	Refractive Index Unit; Birim Kırılma İndisi
r.b.	Rastgele Birimler
sn	Saniye
SE	Secondary Electrons; İkincil Elektronlar

SEFS	Surface Enhanced Fluorescence Spectroscopy; Yüzey Güçlendirilmiş Floresans Spektroskopisi
SEIRA	Surface Enhanced Infrared Absorption; Yüzey Güçlendirilmiş Kızılötesi Soğurma
SEM	Scanning Electron Microscope; Taramalı Elektron Mikroskobu
SERS	Surface Enhanced Raman Spectroscopy; Yüzey Güçlendirilmiş Raman Spektroskopisi
SF_6	Sülfür Hekzaflorür
Si	Silisyum
SiN_x	Silisyum Nitrat
SiO_2	Silisyum Dioksit
SP	Surface Plasmon; Yüzey Plazmonu
SPP	Surface Plasmon Polariton; Yüzey Plazmon Polaritonu
SPR	Surface Plasmon Resonance; Yüzey Plazmon Rezonansı
SPW	Surface Plasmon Wave; Yüzey Plazmon Dalgası
SRSP	Short-Range Surface Plasmon; Kısa Menzilli Yüzey Plazmonu
T	Transmittance; Geçiş Katsayısı
Ta	Tantal
TE	Transverse Electric; Enine Elektrik
TEM	Transmission Electron Microscope; Geçirimli Elektron Mikroskobu
Ti	Titanyum
TM	Transverse Magnetic; Enine Manyetik
UV	Ultraviolet; Morötesi
VIS	Visible - Görünür
W	Tungsten
WDAX	Wavelength-Dispersed Analysis Of X-Rays; X-Işınlarının Dalga Boyu Dağılım Analizi
A_0	Aksiyom Alanı
A_m	m. İterasyon Fraktalın Alanı
a	Ayrık Zaman Adımı
$\tilde{a}$	a 'ya Göre Yarım Adım Fark Olan Ayrık Zaman Adımı
α	Zayıflama Katsayısı
β	Faz Sabiti

β_{hava}	Hava için SPP Faz Sabiti
β_{Si}	Silisyum Ortam için SPP Faz Sabiti
β_r	Gerçel SPP Faz Sabiti
β_i	Sanal SPP Faz Sabiti
$\boldsymbol{B}$	Vektörel Manyetik Akı Yoğunluğu
c	Işığın Boşluktaki Hızı
C	Kare Fraktal Benzeri Açıklık Merkezi Kare Genişliği
C_1	Dikdörtgen Fraktal Merkezi Açıklığın Genişliği
C_2	Dikdörtgen Fraktal Merkezi Açıklığın Uzunluğu
C_{ext}	Sönümlenme Faktörü
χ_e	Dielektrik Alınganlık
d	İnterferometre Sıfır Yol Farkı
d_m	İnterferometre Hareketli Aynasına Gelen Işığın Aldığı Yol Farkı
$\boldsymbol{D}$	Vektörel Elektrik Akı Yoğunluğu
D_{F}	Fraktal Boyutu
D_{C}	Fraktal Kapasite Boyutu
Δt	Ayrık Hesaplama Zaman Aralığı
δ	Deri Kalınlığı
δ_{SPP}	SPP Deri Kalınlığı
δ_1	1. Ortam Deri Kalınlığı
δ_2	2. Ortam Deri Kalınlığı
δ_m	Metal Ortam Deri Kalınlığı
δ_d	Dielektrik Ortam Deri Kalınlığı
e	Elektron Yükü
e^-	Elektron
$\hat{\boldsymbol{e}}_{\boldsymbol{0}}$	Kutuplanma Doğrultusundaki Birim Vektör
$\boldsymbol{E}$	Vektörel Elektrik Alan
E_x	Elektrik Alanın x Doğrultusundaki Bileşeni
E_y	Elektrik Alanın y Doğrultusundaki Bileşeni
E_z	Elektrik Alanın z Doğrultusundaki Bileşeni
E_{x_1}	1. Ortamda Elektrik Alanın x Doğrultusundaki Bileşeni
E_{y_1}	1. Ortamda Elektrik Alanın y Doğrultusundaki Bileşeni

E_{z_1}	1. Ortamda Elektrik Alanın z Doğrultusundaki Bileşeni
E_{x_2}	2. Ortamda Elektrik Alanın x Doğrultusundaki Bileşeni
E_{y_2}	2. Ortamda Elektrik Alanın y Doğrultusundaki Bileşeni
E_{z_2}	2. Ortamda Elektrik Alanın z Doğrultusundaki Bileşeni
$\boldsymbol{E}_{in}$	Saçıcıya Gelen Elektrik Alan
$\boldsymbol{E}_{sc}$	Saçıcıdan Saçılan Elektrik Alan
$\boldsymbol{E}_{tot}$	Toplam Elektrik Alan
ε	Bağıl Dielektrik Geçirgenliği
ε_d	Dielektriğin Bağıl Dielektrik Geçirgenliği
ε_{d_r}	Dielektriğin Gerçel Bağıl Dielektrik Geçirgenliği
ε_{d_i}	Dielektriğin Sanal Bağıl Dielektrik Geçirgenliği
ε_m	Metalin Bağıl Dielektrik Geçirgenliği
ε_{m_r}	Metalin Gerçel Bağıl Dielektrik Geçirgenliği
ε_{m_i}	Metalin Sanal Bağıl Dielektrik Geçirgenliği
ε_p	Prizma Bağıl Dielektrik Geçirgenliği
ε_0	Boşluğun Dielektrik Geçirgenliği (8.854 187 817... × 10^{-12} F·m^{-1})
f	Frekans
F	L-Sistem İleri Hareket Komutu
γ	Karakteristik Çarpışma Frekansı
$\boldsymbol{J}$	Vektörel İç Akım Yoğunluğu
$\boldsymbol{J}_{ext}$	Vektörel Harici Akım Yoğunluğu
h_1	Ester ν_a(C–O–C) Antisimetrik Germe Modu Civarında ΔR_{norm} Maksimum ve Minimum Değerleri Arasındaki Fark
h_2	Karbonil ν(C=O) Germe Modu Civarında ΔR_{norm} Maksimum ve Minimum Değerleri Arasındaki Fark
h_3	ν(C–H) Germe Kombinasyon Modun Civarında ΔR_{norm} Maksimum ve Minimum Değerleri Arasındaki Fark
$\boldsymbol{H}$	Vektörel Manyetik Alan
H_1	1. iterasyon Dikdörtgen Açıklık Uzunluğu
H_2	2. iterasyon Dikdörtgen Açıklık Uzunluğu
H_x	Manyetik Alanın x Doğrultusundaki Bileşeni
H_y	Manyetik Alanın y Doğrultusundaki Bileşeni

H_z	Manyetik Alanın z Doğrultusundaki Bileşeni
H_{x_1}	1. Ortamda Manyetik Alanın x Doğrultusundaki Bileşeni
H_{y_1}	1. Ortamda Manyetik Alanın y Doğrultusundaki Bileşeni
H_{z_1}	1. Ortamda Manyetik Alanın z Doğrultusundaki Bileşeni
H_{x_2}	2. Ortamda Manyetik Alanın x Doğrultusundaki Bileşeni
H_{y_2}	2. Ortamda Manyetik Alanın y Doğrultusundaki Bileşeni
H_{z_2}	2. Ortamda Manyetik Alanın z Doğrultusundaki Bileşeni
$\boldsymbol{H}_{in}$	Saçıcıya Gelen Manyetik Alan
$\boldsymbol{H}_{in}^{*}$	Saçıcıya Gelen Manyetik Alanın Kompleks Eşleniği
$\boldsymbol{H}_{sc}$	Saçıcıdan Saçılan Manyetik Alan
$\boldsymbol{H}_{sc}^{*}$	Saçıcıdan Saçılan Manyetik Alanın Kompleks Eşleniği
$\boldsymbol{H}_{tot}$	Toplam Manyetik Alan
$\boldsymbol{H}_{tot}^{*}$	Toplam Manyetik Alanın Kompleks Eşleniği
$\mathrm{I}(d_m)$	İnterferogramın Şiddeti
I(f)	İnterferogramın Fourier Dönüşümü
I_p	Çift-Kutuplu Elektrik Momentin Saçılan Uzak Alan Gücü
I_m	Çift-Kutuplu Manyetik Momentin Saçılan Uzak Alan Gücü
I_t	Çift-Kutuplu Troidal Momentin Saçılan Uzak Alan Gücü
I_{Qe}	Dört-Kutuplu Elektrik Momentin Saçılan Uzak Alan Gücü
I_{Qm}	Dört-Kutuplu Manyetik Momentin Saçılan Uzak Alan Gücü
i	Ayrık x Konumundaki Hücre Numarası
j	Ayrık y Konumundaki Hücre Numarası
$\theta(f)$	İnterferogramın faz kayması
k	Ayrık z Konumundaki Hücre Numarası
k_{f}	Fraktal Ölçek Faktörü
l	Elektronların Ortalama Serbest Yolu
$\boldsymbol{K}$	Dalga Vektörü
k_0	Boşluğun Dalga Sayısı
k_{SPP}	SPP Dalga Sayısı
k_{m_z}	Metal Ortam Dalga Sayısı z Bileşeni
k_{d_z}	Dielektrik Ortam Dalga Sayısı z Bileşeni

κ	Sanal Kırılma İndisi
L	Nanoparçacık Boyu (Boyuna Uzunluk)
L_0	Aksiyom Minimum Ayrıt Uzunluğu
L_{m}	m. İterasyon Fraktalın Minimum Ayrıt Uzunluğu
λ	Dalga Boyu
λ_{min}	Minimum Dalga Boyu
m	Fraktal İterasyon Sayısı
$\boldsymbol{m}$	Çift-Kutuplu Manyetik Moment
$\tilde{m}$	Elektron Kütlesi
$\boldsymbol{M}$	Vektörel Manyetik Kutuplanma
μ	Bağıl Manyetik Geçirgenlik
μm	Mikrometre
μ_0	Boşluğun Manyetik Geçirgenliği ($4\pi\times10^{-7}$ H / m)
$\tilde{n}$	Kompleks Kırılma İndisi
n	Gerçel Kırılma İndisi
nm	Nanometre
$\boldsymbol{n}$	Keyfi Bir Vektörel Doğrultu
$\hat{\boldsymbol{n}}_{\boldsymbol{0}}$	Yayılma Doğrultusundaki Birim Vektör
η_{abs}	Nanoantenin Normalize Emilim Kesit Alanı
η_{sc}	Nanoantenin Normalize Saçılma Kesit Alanı
N	Elektron yük yoğunluğu
$\tilde{N}$	Birim Hacim Başına Nanoküre Sayısı
N_{m}	m. İterasyon Fraktalın Element Sayısı
$\boldsymbol{p}$	Çift-Kutuplu Elektrik Moment
$\boldsymbol{P}$	Vektörel Elektrik Kutuplanma
P	Anten Periyodu
P_{x}	*x*-Doğrultusunda Anten Periyodu
P_{y}	*y*-Doğrultusunda Anten Periyodu
$\boldsymbol{p_e}$	Serbest Elektronların Momentumu
$\dot{\boldsymbol{p}}_{\boldsymbol{e}}$	$\boldsymbol{p_e}$'nin Konuma Göre 1.Türevi
$\boldsymbol{Qe}$	Dört-Kutuplu Elektrik Moment
$\boldsymbol{Qe}_{\alpha\beta}$	αβ Koordinat Düzlemindeki Dört-Kutuplu Elektrik Moment

$\boldsymbol{Qm}$	Dört-Kutuplu Manyetik Moment
$\boldsymbol{Qm}_{\alpha\beta}$	αβ Koordinat Düzlemindeki Dört-Kutuplu Manyetik Moment
R'	Yarıçap
R_{nb}	CaF_2 Alt Taban Üzerindeki Boş Fraktal Antenin Yansıma Spektrumu
R_{nf}	Fraktal Anten Yüzeyindeki PMMA Filmin Normalize Yansıma Spektrumu
R_{sf}	CaF_2 Alt Taban Üzerine Kaplı Farklı Nanoölçekli Kalınlıktaki PMMA Katmanların Yansıma Spektrumu
R_{CaF_2}	CaF_2 Alt Taban Yansıma Spektrumu
ΔR	CaF_2 Alt Taban Üzerine Kaplı 1.4 µm Kalınlıklı PMMA'den Ölçülen Yansıma Spektrumu Maksimum ve Minimum Değerleri Arasındaki Fark
ΔR_{norm}	Fraktal Anten Yüzeyindeki PMMA Filmin Normalize Yansıma Spektrumu ile CaF_2 Alt Taban Üzerindeki Boş Fraktal Antenin Yansıma Spektrumu Arasındaki Fark Spektrumu
$\boldsymbol{r}$	Konum Vektörü, Küresel koordinat Sisteminin Radyal Bileşeni
r_{m}	Fraktal Ölçek Oranı
ρ	İç Yük Yoğunluğu
σ	İletkenlik
σ_0	DC İletkenlik
σ_r	Gerçel İletkenlik
σ_i	Sanal İletkenlik
σ_{abs}	Soğurma Kesit Alanı
σ_{ext}	Sönümlenme Kesit Alanı
σ_{sc}	Saçılma Kesit Alanı
$\boldsymbol{s}$	Vektörel Kapalı İntegrasyon Yüzeyi
S	Fraktal Açıklıklar İçin Kareler Arası Geometrik Girişim Miktarı
$\boldsymbol{S}_{in}$	Zamanda Ortalama Gelen Poynting Vektörü
$\boldsymbol{S}_{sc}$	Zamanda Ortalama Saçılan Poynting Vektörü
$\boldsymbol{S}_{tot}$	Yayılan Toplam Enerji
$\boldsymbol{S}_{ext}$	Gelen ile Saçılan Alanların Girişiminden Kaynaklanan EM Güç
t	Zaman Değişkeni
$\boldsymbol{t}$	Toroidal Moment

t_{Au}	Au katman kalınlığı
t_c	Kaplanan katman kalınlığı
t_d	SiN_x zar kalınlığı
t_{Ti}	Ti katman kalınlığı
τ	Rahatlama Süresi
x	x Doğrultusundaki Konum
$\hat{\boldsymbol{x}}$	x Doğrultusundaki Birim Vektör
$\boldsymbol{x}$	Plazma Bulutundaki Bir Elektron Hareketi
$\dot{\boldsymbol{x}}$	$\boldsymbol{x}$'nin Konuma Göre 1.Türevi
$\ddot{\boldsymbol{x}}$	$\boldsymbol{x}$'nin Konuma Göre 2.Türevi
y	y Doğrultusundaki Konum
$\hat{\boldsymbol{y}}$	y Doğrultusundaki Birim Vektör
T_{FDTD}	FDTD Hesap Süresi
ν	Optik Dalga Sayısı
υ_f	Fermi Hızı
W	Kare Fraktal Benzeri Açıklık Genişliği
W_1	1. İterasyon Dikdörtgen Fraktal Açıklığın Genişliği
W_2	2. İterasyon Dikdörtgen Fraktal Açıklığın Genişliği
W_0	Fraktal Aksiyom Genişliği
W_m	m. İterasyon Fraktal Genişliği
W_{sc}	Parçacık Tarafından Saçılan Enerji
W_{abs}	Parçacık Tarafından Soğurulan Enerji
ω	Açısal Frekans
ω_p	Plazma Frekansı
ω_{SP}	SP Frekansı
$\omega_{hava,SP}$	Hava için SP Frekansı
$\omega_{Si,SP}$	Silisyum Ortam için SP Frekansı
z	z Doğrultusundaki Konum
$\hat{\boldsymbol{z}}$	z Doğrultusundaki Birim Vektör
θ	Fraktal Girinti veya Üçgen Açısı
θ_u	Fraktal Birim Dönüş Açısı

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 1.1. *Cesaro tip fraktal*ın farklı iterasyonları ve farklı girinti açı değerleri için aksiyom ve kurallar. 53

Tablo 1.2. 12.5°'lik girinti açısına sahip *Cesaro-1 tip fraktal*ın ilk beş iterasyonu için fraktal genişliği, minimum ayrıt uzunluğu ve yüzey alanı. 53

Tablo 1.3. Tablo 1.2'deki geometrik parametrelere bağlı olarak *Cesaro-1 tip fraktal*ın ilk beş iterasyonu için ölçek faktörü, ölçek oranı, element sayısı ve fraktal boyutu. 55

Tablo 1.4. 20°'lik girinti açısına sahip *Cesaro-2 tip fraktal*ın ilk beş iterasyonu için fraktal genişliği, minimum ayrıt uzunluğu ve yüzey alanı (L_0 = W_0 = 939 nm ve A_0 = 0.88157 μm^2'dir). 55

Tablo 1.5. Tablo 1.4'deki geometrik parametrelere bağlı olarak *Cesaro-2 tip fraktal*ın ilk beş iterasyonu için ölçek faktörü, ölçek oranı, element sayısı ve fraktal boyutu. 56

Tablo 1.6. *Ters-Cesaro tip fraktal*ın farklı iterasyonları ve farklı sivrilik açı değerleri için aksiyom ve kurallar. 56

Tablo 1.7. 10°'lik girinti açısına sahip *ters-Cesaro tip fraktal*ın ilk beş iterasyonu için fraktal genişliği, minimum ayrıt uzunluğu ve yüzey alanı. 57

Tablo 1.8. Tablo 1.7'deki geometrik parametrelere bağlı olarak *ters-Cesaro tip fraktal*ın ilk beş iterasyonu için ölçek faktörü, ölçek oranı, element sayısı ve fraktal boyutu. 58

Tablo 2.1. Vakum içinde kaplama metodlarında pota olarak kullanılabilecek malzemeler. 67

Tablo 3.1. Şekil 3.5 ile verilen fraktal nanoantenler için rezonant dalga boyları. 82

Tablo 3.2. *Ters-Cesaro tip nanoanten*lerin farklı minimum ayrıt uzunlukları için *FOM* değerleri. 83

Tablo 3.3. Şekil 3.19 ile verilen fraktal nanoantenler için rezonant dalga boyları. 101

Tablo 3.4. Şekil 3.19'daki *Cesaro-1 tip nanoanten*lerin farklı iterasyonları için *FOM* değerleri. 101

Tablo 3.5. Şekil 3.36a'dan belirlenen rezonant dalga boyları..... 124
Tablo 3.6. Şekil 3.39 ile verilen fraktal nanoantenlerin saçılma kesit alanı spektrumu için rezonant dalga boyları..... 129
Tablo 3.7. Şekil 3.39'deki *Cesaro-2 tip nanoanten*lerin farklı iterasyonları için *FOM* değerleri..... 129
Tablo 4.1. BR fonksiyonel gruplarına ait IR titreşim soğurma bantları ve sodyum azidin, azid (N_3) fonksiyonel grubuna ait IR titreşim soğurma bandı [129,130,171]..... 162

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil G.1. Bir metal-dielektrik arayüzdeki, TM modu durumunda serbest yük salınımlarından oluşan yüzey plazmonları için şematik gösterim. 10

Şekil G.2. Bir metal-dielektrik arayüzdeki TE modu durumu. 14

Şekil G.3. Farklı iki dielektrik ortam (hava ve amorf silisyum) için SP modların dağınım bağıntısı..... 17

Şekil G.4. **(a)** Altı farklı renk veren kolloidal altın nanoçubuk çözeltisi. **(b)** farklı boy oranlarındaki bu nanoçubukların UV-VIS sönümlenme spektrumları ve **(c-h)** TEM görüntüleri. [21]..... 19

Şekil G.5. **(a)** R' yarıçaplı metalik bir nanokürenin yük dağılımı [19] ve **(b)** 70 nm çapındaki altın nanoküre için LSPR soğurma bandı [24]. 20

Şekil G.6. Elips şeklindeki metal nanoparçacıklar için **(a)** boyuna LSPR uyartımı ile **(b)** enine LSPR uyartımı şematik gösterimi ve **(c)** LSPR soğurma bantları [20]. 21

Şekil G.7. **(a)** Saçıcı bir metal parçacık sistemindeki toplam EM alanların şematik gösterimi. **(b)** Parçacığa gelen manyetik alan, **(c)** parçacıktan saçılan manyetik alan ve **(d)** sistemdeki toplam manyetik alan dağılımları [31]..... 23

Şekil G.8. Literatürdeki bazı optik nanoanten uygulamaları. 27

Şekil G.9. Temel optik sensör konsepti [48]..... 29

Şekil G.10. Çeşitli düz metal film için SPR (surface plasmon resonance; yüzey plazmon rezonansı) sensör düzenlemeleri [48-50]. 29

Şekil G.11. Etiketsiz (label-free) optik biyoalgılama konsepti. 31

Şekil G.12. SEIRA spektroskopisi için temel optik konfigürasyon..... 35

Şekil G.13. Literatürdeki fraktal geometrili plazmonik yapı çalışmaları. 37

Şekil 1.1. **(a)** FDTD hücresi ve **(b)**Yee hücresi [136]. 46

Şekil 1.2. *Cesaro tip fraktal*ın ilk beş iterasyondaki geometrileri: **(a)** Aksiyom kodu ile çizilen başlangıç geometrisi, **(b)** Aksiyom kodunda yazılan kural ile çizilen 1. iterasyon geometrisi, **(c)** 1. iterasyon karakter-dizisi kodunda yazılan kural ile çizilen 2. iterasyon geometrisi, **(d)** 2. iterasyon karakter-dizisi kodunda yazılan kural ile çizilen 3. iterasyon geometrisi, **(e)** 3. iterasyon karakter-dizisi kodunda yazılan

kural ile çizilen 4. iterasyon geometrisi ve **(f)** 4. iterasyon karakter-dizisi kodunda yazılan kural ile çizilen 5. iterasyon geometrisi. 52

Şekil 1.3. *Ters-Cesaro tip fraktal*ın ilk beş iterasyondaki geometrileri: **(a)** Aksiyom kodu ile çizilen başlangıç geometrisi, **(b)** Aksiyom kodunda yazılan 1.kural ile çizilen 1. iterasyon geometrisi, **(c)** 1. iterasyon karakter-dizisi kodunda yazılan 2.kural ile çizilen 2. iterasyon geometrisi, **(d)** 2. iterasyon karakter-dizisi kodunda yazılan 2.kural ile çizilen 3. iterasyon geometrisi, **(e)** 3. iterasyon karakter-dizisi kodunda yazılan 2.kural ile çizilen 4. iterasyon geometrisi ve **(f)** 4. iterasyon karakter-dizisi kodunda yazılan 2.kural ile çizilen 5. iterasyon geometrisi. 57

Şekil 1.4. *Cesaro tip* ve *ters-Cesaro tip* fraktal geometrilerinin EM modellemesi için izlenen algoritma. 59

Şekil 1.5. Çift-kutuplu elektrik moment ile dört-kutuplu elektrik moment için yük düzenlemeleri, çift-kutuplu manyetik moment ile dört-kutuplu manyetik moment için akım düzenlemeleri ve çift-kutuplu toroidal moment için manyetik moment düzenlemesi gösterimi [146]..... 62

Şekil 2.1. Poli metil metakrilat (PMMA monomeri) kimyasal yapısı [150]..... 65

Şekil 2.2. İnce film biriktirme teknikleri [151-153]..... 66

Şekil 2.3. Elektron demet buharlaştırma için temel çalışma prensibi: (a) Elektron demet ısıtıcısı ve (b) vakum bölmesi. 67

Şekil 2.4. **(a)** TEM'in çalışma prensibi ve **(b)** SEM'in çalışma prensibi [154,155]. 69

Şekil 2.5. **(a)** FTIR temel bileşenleri ve **(b)** Michelson interferometresi şematiği [66]. 71

Şekil 2.6. Parçacık tabanlı nanoüretim tekniği; **(a)** geçirgen alt taban üzerine dönel kaplama ile fotorezist kaplama, **(b)** EBL ile fotorezist pozlama, **(c)** fotorezistin ışınlanmış kısımlarının tab edilmesi, **(d)** metal biriktirme ve **(e)** fotorezist kaldırma (litf-off) işlemi. 72

Şekil 2.7. Asılı SiN_x zar üzerine açıklık tabanlı nanoüretim tekniği; **(a)** fotolitografi, **(b)** SF_6 + He ile kuru oyma, e **(c)** KOH ile ıslak oyma, **(d)** alt SiN_x tabaka üzerine PMMA üzerine EBL, **(e)** Kuru oyma ile açıklık oluşturma ve **(f)** metal biriktirme. 74

Şekil 3.1. **(a)** Çoklu-spektral, log-periyodik trapez şekilli altın optik antenin şematik görüntüsü ve **(b)** üretilen antenin SEM görüntüsü. **(c)** Hesaplanan ve ölçülen sönümleme kesit alanı [38]. 76

Şekil 3.2. **(a)** Çoklu-spektral, üç kollu log-periyodik trapez şekilli altın optik antenin şematik görüntüsü ve **(b)** üretilen antenin SEM görüntüsü. **(c)** Hesaplanan ve ölçülen sönümleme kesit alanı [44]. 77

Şekil 3.3. **(a)** 1, **(b)** 2. ve **(c)** 3. iterasyon nanoanten dizilerinin SEM görüntüleri. [93]. **(d)** 1, **(e)** 2. ve **(f)** 3. iterasyon nanoanten dizilerinin deneysel FTIR geçiş spektrumları. 78

Şekil 3.4. **(a)** 3. mertebe Sierpiński tip nanoantenin SEM görüntüsü. **(b)** Hesaplanan sönümleme ve soğurma kesit alanları [95]..... 79

Şekil 3.5. Saçılma ve soğurma kesit alanlarının fraktal gelişimine bağlılığı. **(a)** 1., **(b)** 2., **(c)** 3., **(d)** 4. ve **(e)** 5. iterasyondaki *ters-Cesaro tip fraktal*ların üstten görünümü. Her bir iterasyon için spektral normalize **(f)** saçılma ve **(g)** soğurma kesit alanları. 82

Şekil 3.6. **(a)** Şekil 3.5'de verilen nanoantenlerin, *m.* iterasyondaki rezonant dalga boyu değişimi ve **(b)** beş iterasyonlu anten sistemi için hesaplanmış, Tablo 3.2'deki *FOM* değerleri. 83

Şekil 3.7. *x*-kutuplu ışık altında, 5. iterasyon Au nanoantenin, üst yüzeyindeki konumsal **(a,c,e,g,i)** logaritmik $|E|/|E_{in}|$ ve **(b,d,f,h,j)** $\mathrm{Re}\{\rho/\rho_0\}$ dağılımları. 87

Şekil 3.8. *x*-kutuplu ışık altında, 5. iterasyon Au nanoantenin, üst yüzeyindeki konumsal **(a,c,e,g,i)** logaritmik $|H|/|H_{in}|$ ve **(b,d,f,h,j)** $|J|/|J_0|$ dağılımları. 88

Şekil 3.9. 1. mod için; ilk dört iterasyondaki nanoantenlerin, *x*-kutuplu ışık altında, üst yüzeyindeki **(a,c,e,g)** logaritmik $|E|/|E_{in}|$ ve **(b,d,f,h)** $\mathrm{Re}\{\rho/\rho_0\}$ dağılımları. 89

Şekil 3.10. 1. mod için; ilk dört iterasyondaki nanoantenlerin, *x*-kutuplu ışık altında, üst yüzeyindeki **(a,c,e,g)** logaritmik $|H|/|H_{in}|$ ve **(b,d,f,h)** $|J|/|J_0|$ dağılımları. 90

Şekil 3.11. 2. moddaki (λ_2) **(a,b)** 2., **(c,d)** 3. ve **(e,f)** 4. iterasyon nanoantenlerin, *x*-kutuplu ışık altında, üst yüzeyindeki **(a,c,e)** logaritmik $|E|/|E_{in}|$ ve **(b,d,f)** $\mathrm{Re}\{\rho/\rho_0\}$ dağılımları. 91

Şekil 3.12. 2. moddaki (λ_2) **(a,b)** 2., **(c,d)** 3. ve **(e,f)** 4. iterasyon nanoantenlerin, *x*-kutuplu ışık altında, üst yüzeyindeki **(a,c,e)** logaritmik $|H|/|H_{in}|$ ve **(b,d,f)** $|J|/|J_0|$ dağılımları. 92

Şekil 3.13. 3. moddaki (λ_3) **(a,b)** 3. ve **(c,d)** 4. iterasyon nanoantenlerin, *x*-kutuplu ışık altında, üst yüzeyindeki **(a,c)** logaritmik $|E|/|E_{in}|$ ve **(b,d)** $\mathrm{Re}\{\rho/\rho_0\}$ dağılımları. 93

Şekil 3.14. 3. moddaki (λ_3) **(a,b)** 3. ve **(c,d)** 4. iterasyon nanoantenlerin, *x*-kutuplu ışık altında, üst yüzeyindeki **(a,c)** logaritmik $|H|/|H_{in}|$ ve **(b,d)** $|J|/|J_0|$ dağılımları. 93

Şekil 3.15. 4. iterasyon nanoantenin, *x*-kutuplu ışık altında, 4. mod (λ_4) için üst yüzeyindeki **(a)** logaritmik $|E|/|E_{in}|$ ile **(b)** $\mathrm{Re}\{\rho/\rho_0\}$ ve **(c)** logaritmik $|H|/|H_{in}|$ ile **(d)** $|J|/|J_0|$ dağılımları. 94

Şekil 3.16. **(a)** 9 μm periyotlardaki 5. iterasyon *ters-Cesaro nanoanten* dizisinin *R* ve *T* spektrumları. **(b)** Rezonant mod bölgelerinde her bir momentin saçılan güce katkısı. 95

Şekil 3.17. CaF_2 alt taban üzerine üretilmiş olan *ters-Cesaro tip fraktal nanoantenler*: **(a)** 1. iterasyon, **(b)** 2. iterasyon, **(c)** 3. iterasyon, **(d)** 4. iterasyon ve **(e)** 5. iterasyon anten dizilerinin 3 × 3'lük kısmının (sol paneller) ve birim hücresinin (sağ paneller) SEM görüntüleri. 97

Şekil 3.18. Üretilen *ters-Cesaro tip nanoanten* dizilerinin (Şekil 3.17) **(a)** 5. iterasyonu için yansıma modundaki, **(b)** 5. iterasyonu için geçiş modundaki ve **(c)** 1., 2., 3. ile 4. iterasyonları için yansıma modundaki FTIR spektrumları ile FDTD simülasyon sonuçları arasındaki karşılaştırma. 98

Şekil 3.19. Saçılma ve soğurma kesit alanlarının fraktal gelişimine bağlılığı: **(a)** 1., **(b)** 2., **(c)** 3., **(d)** 4. ve **(e)** 5. iterasyonlardaki *Cesaro-1 tip fraktal*ların üstten görünümü. Her bir iterasyon için spektral normalize **(f)** saçılma ve **(g)** soğurma kesit alanları. 99

Şekil 3.20. **(a)** Şekil 3.19'da verilen nanoantenlerin, *m.* iterasyondaki ana rezonant dalga boyu değişimleri ve **(b)** *m.* iterasyondaki hibrit mod değişimleri. 102

Şekil 3.21. Ana modlar için, x-kutuplu ışık altında, 5. iterasyon Au nanoantenin üst yüzeyindeki konumsal **(a-c,g-i)** logaritmik $|E|/|E_{in}|$ ve **(d-f,j-l)** $\mathrm{Re}\{\rho/\rho_0\}$ dağılımları. 103

Şekil 3.23. Ana modlar için, x-kutuplu ışık altında, 5. iterasyon Au nanoantenin üst yüzeyindeki konumsal **(a-c,g-i)** logaritmik $|H|/|H_{in}|$ ve **(d-f,j-l)** $|J|/|J_0|$ dağılımları. 105

Şekil 3.24. Hibrit modlar için, x-kutuplu ışık altında, 5. iterasyon Au nanoantenin üst yüzeyindeki **(a,c,e,g,i)** logaritmik $|H|/|H_{in}|$ ve **(b,d,f,h,j)** $|J|/|J_0|$ dağılımları. 106

Şekil 3.26. Hibrit modlar için, x-kutuplu ışık altında, 4. iterasyon Au nanoantenin üst yüzeyindeki **(a,c,e,g)** logaritmik $|E|/|E_{in}|$ ve **(b,d,f,h)** $\mathrm{Re}\{\rho/\rho_0\}$ dağılımları. 112

Şekil 3.27. Ana modlar için, x-kutuplu ışık altında, 4. iterasyon Au nanoantenin üst yüzeyindeki **(a,c,e,g,i)** logaritmik $|H|/|H_{in}|$ ve **(b,d,f,h,j)** $|J|/|J_0|$ dağılımları. 113

Şekil 3.28. Hibrit modlar için, x-kutuplu ışık altında, 4. iterasyon Au nanoantenin üst yüzeyindeki **(a,c,e,g)** logaritmik $|H|/|H_{in}|$ ve **(b,d,f,h)** $|J|/|J_0|$ dağılımları. 114

Şekil 3.29. Ana modlar için, x-kutuplu ışık altında, 3. iterasyon Au nanoantenin üst yüzeyindeki **(a,c,e,g)** logaritmik $|E|/|E_{in}|$ ve **(b,d,f,h)** $\mathrm{Re}\{\rho/\rho_0\}$ dağılımları. 116

Şekil 3.30. Hibrit modlar için, x-kutuplu ışık altında, 3. iterasyon Au nanoantenin üst yüzeyindeki **(a,c,e)** logaritmik $|E|/|E_{in}|$ ve **(b,d,f)** $\mathrm{Re}\{\rho/\rho_0\}$ dağılımları. 117

Şekil 3.31. Ana modlar için, x-kutuplu ışık altında, 3. iterasyon Au nanoantenin üst yüzeyindeki **(a,c,e,g)** logaritmik $|H|/|H_{in}|$ ve **(b,d,f,h)** $|J|/|J_0|$ dağılımları. 118

Şekil 3.32. Hibrit modlar için, *x*-kutuplu ışık altında, 3. iterasyon Au nanoantenin üst yüzeyindeki **(a,c,e)** logaritmik $|H|/|H_{in}|$ ve **(b,d,f)** $|J|/|J_0|$ dağılımları. 119

Şekil 3.33. Ana ve hibrit modlar için, *x*-kutuplu ışık altında, 2. iterasyon Au nanoantenin üst yüzeyindeki **(a,c,e,g,i)** logaritmik $|E|/|E_{in}|$ ve **(b,d,f,h,j)** $\mathrm{Re}\{\rho/\rho_0\}$ dağılımları. 120

Şekil 3.34. Ana ve hibrit modlar için, *x*-kutuplu ışık altında, 2. iterasyon Au nanoantenin üst yüzeyindeki **(a,c,e,g,i)** logaritmik $|H|/|H_{in}|$ ve **(b,d,f,h,j)** $|J|/|J_0|$ dağılımları. 121

Şekil 3.35. Ana ve hibrit modlar için, *x*-kutuplu ışık altında, 1. iterasyon Au nanoantenin üst yüzeyindeki **(a,b,c)** logaritmik $|E|/|E_{in}|$, **(d,e,f)** $\mathrm{Re}\{\rho/\rho_0\}$, **(g,h,i)** logaritmik $|H|/|H_{in}|$ ve **(j,k,l)** $|J|/|J_0|$ dağılımları. 122

Şekil 3.36. **(a)** 9 μm periyotladdaki 5. iterasyon Cesaro-1 dizisinin yansıma (R) ve geçiş (T) spektrumları. **(b)** Rezonant mod bölgelerinde her bir momentin saçılan güce katkısı. 123

Şekil 3.37. CaF_2 alt taban üzerine üretilmiş *Cesaro-1 tip fraktal* nanoantenler; **(a)** 1. iterasyon, **(b)** 2. iterasyon, **(c)** 3. iterasyon ve **(d)** 4. iterasyon anten dizilerinin 3×3'lük kısmının (sol paneller) ve birim hücresinin (sağ paneller) SEM görüntüleri. 125

Şekil 3.38. Üretilen *Cesaro-1 tip nanoanten* dizilerinin (Şekil 3.37) 1., 2., 3. ile 4. iterasyon için **(a)** deneysel ve **(b)** teorik yansıma spektrumları. 126

Şekil 3.39. Saçılma ve soğurma kesit alanlarının fraktal gelişimine bağlılığı. **(a)** 1., **(b)** 2., **(c)** 3., **(d)** 4. ve **(e)** 5. iterasyondaki *Cesaro-2 tip fraktal*ların (*U#3*) üstten görünümü. Her bir iterasyon için spektral normalize **(f)** saçılma kesit alanı η_{sc} ve **(g)** soğurma kesit alanı η_{abs}; çizgiler her bir iterasyonun minimum ayrıt uzunluğuna göre etiketlenmiştir. 128

Şekil 3.40. **(a)** Şekil 3.39'da verilen nanoantenlerin, *m.* iterasyondaki ana rezonant dalga boyu değişimleri ve **(b)** *m.* iterasyondaki hibrit mod değişimleri. 130

Şekil 3.41. CaF_2 alt taban üzerine üretilmiş *Cesaro-2 tip fraktal* nanoantenler; sırasıyla **(a)** 1. iterasyon, **(b)** 2. iterasyon, **(c)** 3. iterasyon, **(d)** 4.

iterasyon ve **(e)** 5. iterasyon için üretilmiş anten dizilerinin 3 × 3'lük kısmının (sol paneller) ve birim hücresinin (sağ paneller) SEM görüntüleri. 132

Şekil 3.42. Üretilen *Cesaro-2 tip nanoanten* dizilerinin (Şekil 3.39) 1., 2., 3., 4. ve 5. iterasyonlar için deneysel **(a,b)** yansıma ve **(c,d)** geçiş **(a,c)** spektrumları ile **(b,d)** FDTD simülasyon sonuçları arasındaki karşılaştırma. 133

Şekil 3.43. 1. ana mod ve 1. hibrit modlar için, *x*-kutuplu ışık altında, 1. iterasyon Au nanoantenin üst yüzeyindeki **(a,c)** logaritmik $|E|/|E_{in}|$ ve **(b,d)** $\mathrm{Re}\{\rho/\rho_0\}$ dağılımları. 135

Şekil 3.44. **(a)** *Kare fraktal benzeri nanoaçıklık* dizilerinin birim hücre ve aydınlatma kaynağı perspektif görünümü. **(b)** Üretilen dizilerin 8 × 8'lük kısmının SEM görüntüsü. *y*-kutuplu kaynak altında; C = 450 nm, W = 370 nm, S = 165 nm, $P_x = P_y$ = 2000 nm parametreleri için **(c)** yansıma ve **(d)** geçiş spektrumları ile C = 530 nm, W= 385 nm, S = 165 nm, $P_x = P_y$ = 2000 nm parametreleri için **(e)** yansıma ve **(f)** geçiş spektrumları. 137

Şekil 3.45. Kare fraktal benzeri nanoaçıklık dizilerinin **(a)** C değişimi, **(b)** W değişimi, **(c)** S değişimi ve **(d)** P değişimi için yansıma spektrumları. ... 140

Şekil 3.46. Kare fraktal benzeri nanoaçıklık dizilerinin **(a)** C değişimi, **(b)** W değişimi, **(c)** S değişimi ve **(d)** P değişimi için geçiş spektrumları. 140

Şekil 3.47. **(a)** Yansıma modu EM modelleme güç monitörü konumu ve rezonant dalga sayıları; **(b)** sabit S için $\nu_R(C,W)$, **(c)** sabit W için $\nu_R(S,C)$ ile **(d)** sabit C için $\nu_R(S,W)$. 142

Şekil 3.48. Geçiş modu için EM modelleme güç monitörü konumu ve rezonant dalga sayıları; **(b)** sabit S için $\nu_T(C,W)$, **(c)** sabit W için $\nu_T(S,C)$ ile **(d)** sabit C için $\nu_T(S,W)$. 143

Şekil 3.49. **(a)** Yatay ve dikey alan monitörleri (hava-metal arayüzünde M_1, x = -60 nm'de M_2 ve y = 225 nm'de M_3). **(b)** M_1 üzerindeki, **(c)** M_2 üzerindeki ve **(d)** M_3 üzeindeki rezonant SEIRA yükseltmesi. 144

Şekil 3.50. **(a)** Kaplanmış yapının şematik görünümü. Yapının üzerinde hava, DIW, IPA veya gliserol olduğu durumlar için **(b)** yansıma

spektrumları ve **(c)** geçiş spektrumları. **(d)** Yapının kırılma indisi hassasiyeti. 145

Şekil 3.51. **(a)** Önerilen nanoaçıklık dizilerinin birim hücre ve aydınlatma kaynağı perspektif görünümü. (b) *y*-kutuplu ve (c) *x*-kutuplu aydınlatma altındaki yansıma ve geçiş spektrumları. 146

Şekil 3.52. Önerilen nanoaçıklık dizilerinin **(a)** W_1 değişimi, **(b)** W_2 değişimi, **(c)** H_1 değişimi, **(d)** H_2 değişimi, **(e)** P değişimi ve **(e)** S değişimi için yansıma spektrumları. 149

Şekil 3.53. Önerilen nanoanten dizisinin farklı malzeme kalınlıkları için yansıma spektrumları; **(a)** t_{Au} değişimi, **(b)** t_d değişimi ve **(c)** t_{Ti} değişimi. 150

Şekil 3.54. Önerilen nanoanten dizisinin farklı **(a)** polarizayon ve **(b)** geliş açıları için yansıma spektrumları. 150

Şekil 3.55. *y*-kutuplu aydınlatma altındaki **(a)** 1. mod ile **(b)**2. mod için ve *x*-kutuplu aydınlatma altındaki **(c)** 1. mod ile **(d)** 2. mod için logaritmik SEIRA güçlendirmeleri. 152

Şekil 3.56. **(a)** Alan monitorü gruplarının yerleşkeleri. **(b)** y = 30 nm, **(b)** y = 40 nm ile **(d)** y = 50 nm'deki monitörlerden 1. mod için alınan **(e)** y = 610 nm, **(f)** y = 620 nm ile **(g)** y = 630 nm'deki monitörlerden 2. mod için alınan konumsal SEIRA güçlendirmeleri. 153

Şekil 3.57. **(a)** Farklı dielektrik malzemeler ile kaplanmış nanoaçıklık dizisinin şematik görünümü. Yapının **(b)** hava, DIW, MgF_2 ile SiO_2 için yansıma spektrumları ve **(c)** kırılma indisi hassasiyeti. Farklı **(d)** SiO_2 ve **(e)** DIW kalınlıkları için yansıma spektrumları. **(f)** SiO_2 ve DIW için t_c hassasiyeti. 155

Şekil 4.1. *Ters-Cesaro tip nanoantenler*in PMMA'li çok-bantlı algılama konsepti. **(a)** 10 nm PMMA kaplı 5. iterasyon fraktal nanoantenlerin FTIR yansıma ve geçiş ölçümleri. Ayrıca 10 nm PMMA kaplı boş CaF_2 alt tabanın yansıma ile geçiş spektrumları ve 600 nm PMMA kaplı Au filmden ölçülen yansıma spektrumu. **(b)** 1150-1250 cm^{-1}, **(c)** 1732 cm^{-1} ve **(d)** 2952-2992 cm^{-1} bantları için yüzeyi farklı kalınlıktaki PMMA katmanlarla kaplı anten dizisinin ve boş anten

dizisinin FTIR ile ölçülmüş ve büyütülmüş yansıma fark spektrumları. 158

Şekil 4.2. Değişen PMMA kalınlıkları ile kaplı 5. iterasyon fraktal nanoantenlerin ve boş antenlerin FTIR yansıma spektrumları ve grafik içinde, söz konusu PMMA titreşim bantları için büyütülmüş frekans bölgeleri. 159

Şekil 4. 3. Karbonil ν(C=O) germe modu civarındaki yansıma spektrumu değerlendirmeleri. **(a)** CaF_2 alt taban üzerine kaplı 1.4 μm kalınlıklı PMMA'den ölçülen FTIR yansıma spektrumu. **(b)** CaF_2 alt taban üzerine kaplı, farklı nano-ölçekli kalınlıktaki PMMA katmanların yansıma spektrumları için; nanoanten üzerinde kaplı farklı nano-ölçekli kalınlıktaki PMMA katmanların yansıma spektrumları için ve yarı-sonsuz PMMA ortamdan hesaplanan yansıma spektrumu için mak. ve min. yansıma değerleri arasındaki farklar. **(c)** CaF_2 alt taban üzerine kaplı farklı nano-ölçekli kalınlıktaki PMMA katmanların fark spektrumu için mak. ve min. değerler arasındaki fark ile nanoanten üzerinde kaplı farklı nano-ölçekli kalınlıktaki PMMA katmanların fark spektrumlarındaki H_2 değerleri karşılaştırması. 160

Şekil 4.4. 5. iterasyon *ters-Cesaro tip nanoantenler* ile BR'nin algılanması. 164

Şekil 4.5. 4. iterasyon *ters-Cesaro tip nanoantenler* ile BR'nin algılanması. 164

Şekil 4.6. 4. iterasyon *Cesaro-1 tip nanoantenler* ile BR'nin algılanması. 166

Şekil 4.7. 3. iterasyon *Cesaro-1 tip nanoantenler* ile BR'nin algılanması. 166

Şekil 4.8. 4. iterasyon *Cesaro-2 tip nanoantenler* ile BR'nin algılanması. 168

Şekil 4.9. 5. iterasyon *Cesaro-2 tip nanoantenler* ile BR'nin algılanması. 168

GİRİŞ
TEMEL TANIMLAMALAR

G.1. Metallerin Elektromanyetiği ve Plazmonikler

Plazmonlar metallerdeki serbest elektron salınımları olarak tanımlanır [1]. Bir diğer tanımı da plazma salınımlarının kuantası olarak yapılır [2]. Plazmonik yapılar ise, elektromanyetik (EM) alanların, çalışılan dalga boyundan daha küçük malzemeler içinde nasıl tutulup hapsedildiğini tanımlar ve nanofotoniğin büyük bir bölümünü teşkil etmektedir. Plazmonik formlar dielektrik-metal arayüzündeki iletim elektronları ile EM ışınım arasındaki etkileşime dayanır ve bu etkileşim yüzey dalgalarını oluşturur.

Birçok metinde metallerin optik özellikleri tartışılmıştır [3,4] ve nanoyapılardaki metallerin fiziksel ve kimyasal özellikleri yığın (külçe) hallerinden farklıdır. Günümüzde de, ince metal filmler üzerindeki çalışmalardan [5] sonra, özellikle de plazmonik formların anlaşılabilmesi için metal-dielektrik arayüzeylerin EM özellikleri artan bir ilgiyle incelenmektedir. Metallerle optik dalgaların etkileşimi, plazmon denilen, metallerdeki toplu serbest elektron salınımlarına sebep olur. Çalışılan dalga boyundan daha küçük boyutlardaki metalik nanoyapılar ışık madde etkileşimini arttırarak ışığı tuzaklayabilir ve kırınım sınırlarının altında ışığı hapsedebilmektedirler [1,6,7].

Bu bölümde, yüzey plazmon polaritonları için temel teşkil eden Maxwell eşitliklerinin kısa bir incelemesi ile başlayarak geniş bir frekans aralığında ideal ve gerçek metallerin EM cevaplar tanımlanmakta ve metalik bir hacimdeki serbest iletim elektron bulutunun temel uyarılması (hacim plazmonları) sunulmaktadır. Ardından da yerelleşmiş yüzey plazmonlarının (LSPs; localize surface plasmons) tanımlanmaktadır.

G.1.1. Metallerin Optiksel Davranışı ve Drude Model, Maxwell Eşitlikleri ve Süreklilik Denklemleri

EM alanlarla metallerin içerisindeki serbest iletim elektronlarının etkileşimi Maxwell eşitliklerine bağlı klasik bir çerçeveyle tam olarak anlaşılabilmektedir. Böylece bu bölümde tanımlanan metal optiği klasik teori alanı içinde kalır. Ancak bu çerçevede, optik özelliklerin kuvvetli frekans bağımlılığından kaynaklanan optik olayın oluşması da anlaşılabilir.

EM spektrumun görünür (VIS; visible) bölgeye doğru olan frekansları için metaller oldukça yansıtıcıdır ve EM dalgaların geçmesine izin vermezler. Bu nedenle metaller dalga kılavuzu ve rezonatör yapılarında mikrodalgada ve uzak kızılötesi (FIR; far infrared) frekanslarda EM ışınım için geleneksel kaplama katmanları olarak kullanılırlar. Çoğu amaç için, düşük frekans bölgesinde, EM dalgaların ihmal edilebilir bir bölümü metal içine nüfuz ettiğinden, sonsuz veya belli sınırda iletkenlik için mükemmel veya iyi iletken yaklaşımı geçerli olabilmektedir. Spektrumun yakın kızılötesi (NIR; yakın kızılötesi) ve VIS bölgesindeki yüksek frekanslarda alan nüfuzu kayda değer biçimde yükselmektedir. Bunun sonucunda, metaller morötesi (UV; ultraviolet) frekanslarda dielektrik karakter kazanır ve elektronik bant yapısının ayrıntılarıyla birlikte de olsa, zayıflamanın değişen derecesine bağlı olarak, EM dalgaların geçişine izin vermektedir. Sodyum gibi alkali metaller neredeyse serbest elektron gibi davranışa sahiptir ve böylece morötesi geçirgenlik sergilerler. Diğer taraftan altın ve gümüş gibi soy metaller için elektronik bantlar arasındaki geçişler bu bölgede şiddetli soğurumlara neden olur. Bu dispersif özellikler kompleks dielektrik fonksiyonu $\varepsilon(\omega)$ yoluyla açıklanır. Optik cevapların yüksek frekans bağımlılığının altında yatan fizik, metalin karakteristik *elektronun gevşeme süresi* τ'nun tersine yaklaşan frekanslar için, sürücü (driver) alana bağlı olarak indüklenen akımların fazındaki değişimlerdir.

Metallerin optik özelliklerinin temel bir tanımını yapmadan önce, EM cevabı ifade eden temel denklemleri, aşağıdaki *makroskobik Maxwell eşitlikleri* belirtilmelidir:

$$\nabla \times \boldsymbol{E} = -\frac{\partial \boldsymbol{B}}{\partial t} \tag{G.1a}$$

$$\nabla \times \boldsymbol{H} = \boldsymbol{J}_{ext} + \frac{\partial \boldsymbol{D}}{\partial t} \tag{G.1b}$$

Bu eşitlikler dört makroskobik alan niceliği olan $\boldsymbol{D}$ (dielektrik deplasman), $\boldsymbol{E}$ (elektrik alan), $\boldsymbol{H}$ (manyetik alan) ve $\boldsymbol{B}$ (manyetik indüksiyon ya da manyetik akı yoğunluğu) ile harici akım yoğunluğu ($\boldsymbol{J}_{ext}$) arasında bağlantı kurar. $\boldsymbol{E}$ alanı ayrıca $\boldsymbol{P}$ kutuplanması ile, ε_0 boşluğun elektrik geçirgenliği olmak üzere

$$\boldsymbol{D} = \varepsilon_0 \boldsymbol{E} + \boldsymbol{P} \tag{G.2}$$

şeklinde bağıntılıdır. Bu bölümde manyetik olmayan ortam üzerinde durulacağından $\boldsymbol{M}$ mıknatıslanması tarafından verilen manyetik cevaba ihtiyaç yoktur fakat elektrik kutuplanma etkileri tanımı sınırlanabilir. $\boldsymbol{P}$, elektrik alan etkisiyle hizalanmış mikroskobik çift kutupların (dipollerin) neden olduğu malzeme içindeki birim hacim başına çift-kutuplu elektrik momentini belirtir. Yükün korunumu, iç yük ve akım yoğunluklarının

$$\nabla . \boldsymbol{J} = -\frac{\partial \rho}{\partial t} \tag{G.3}$$

eşitliği ile bağıntılı olmalarını gerektirir. Söz konusu ortam lineer, izotropik ve manyetik olmayan ortamla sınırlandırılırsa, ε bağıl dielektrik geçirgenliktir ve manyetik olmayan ortamların bağıl manyetik geçirgenliği $\mu = 1$ alınır. Böylece $\boldsymbol{P}$ ve $\boldsymbol{E}$ arasındaki lineer bağıntı (χ_e dielektrik alınganlık olmak üzere)

$$\boldsymbol{P} = \varepsilon_0 \chi_e \boldsymbol{E} \tag{G.4}$$

ile ifade edilir. (G.2) ve (G.4)'nın ve

$$\boldsymbol{D} = \varepsilon_0 \varepsilon \boldsymbol{E} \tag{G.5}$$

eşitliğinin yazılması $\varepsilon = 1 + \chi_e$ eşitliğini verir. Burada metallerin bağıl dielektrik katsayısı ε_m simgesi ile belirtilerek; alanlar, $\boldsymbol{K}$ dalga vektörü ve ω açısal frekansının düzlem dalga bileşenlerine ayrılıp Fourier domeninde yapısal bağıntılar olarak ifade edilir [1]:

$$\boldsymbol{D}(\boldsymbol{K}, \omega) = \varepsilon_0 \varepsilon_m(\boldsymbol{K}, \omega) \boldsymbol{E}(\boldsymbol{K}, \omega), \tag{G.6a}$$

$$\boldsymbol{J}(\boldsymbol{K},\omega) = \sigma(\boldsymbol{K},\omega)\boldsymbol{E}(\boldsymbol{K},\omega). \quad \text{(G.6b)}$$

(G.2), (G.3) ve (G.6a,b) eşitliklerini kullanarak ve Fourier domeninde ($^{\partial}/_{\partial t} \rightarrow i\omega$) bağıl dielektrik geçirgenlik (dielektrik fonksiyonu) ve iletkenlik arasındaki temel bir bağıntıya ulaşılır:

$$\varepsilon(\boldsymbol{K},\omega) = 1 + \frac{i\sigma(\boldsymbol{K},\omega)}{\varepsilon_0\omega} \quad \text{(G.7)}$$

Metallerdeki serbest elektronlarla ışığın etkileşiminde, dielektrik cevabı $\varepsilon_m(\boldsymbol{K},\omega)$'nın temel formu, $\varepsilon_m(\boldsymbol{K}=\boldsymbol{0},\omega) = \varepsilon_m(\omega)$ yoluyla uzaysal cevaba sadeleştirilir. Bu sadeleştirme malzeme içindeki λ dalga boyu, elektronun ortalama serbest yolu veya birim hücre boyutu gibi tüm karakteristik boyutlardan büyük olduğu sürece geçerlidir. Bununla genelde UV frekanslarda karşılaşılır.

G.7 eşitliği, bağlı ve serbest yükler arasındaki ayrımda kesin bir keyfilik sergilemektedir. Düşük frekanslarda, σ serbest yüklerin elektrik akımına katkısını tanımlarken ε_m genellikle uygulanan alana karşı bağlı yüklerin cevabını tanımlamada kullanılmakta ve bu durum elektrik kutuplanmadan kaynaklanmaktadır. Ancak optik frekanslarda, bağlı ve serbest yükler arasındaki ayrım bulanıktır. Örneğin yüksek oranda katkılanmış yarıiletkenler için bağlı valans bandı elektronları, dielektrik fonksiyonundaki statik dielektrik sabiti δε terimine ve iletim elektronları σ terimine neden olabilir. $\delta\varepsilon_m \rightarrow 1$ ve $\sigma' \rightarrow \sigma' + (\varepsilon_0\omega/\mathrm{i})\delta\varepsilon_m$ durumunda (G.7) eşitliği genel formunu alacaktır [8].

Genellikle (G.7)'da belirtilen $\varepsilon_m(\omega) = \varepsilon_{m_r}(\omega) + i\varepsilon_{m_i}(\omega)$ ve $\sigma(\omega) = \sigma_r(\omega) + i\sigma_i(\omega)$, ω açısal frekansının fonksiyonlarıdır ve kompleks değerlidir. Optik frekanslarda, gerçel ve sanal dielektrik katsayısı deneysel olarak, ortamın kompleks kırılma indisi $\tilde{n}(\omega) = n(\omega) + i\kappa(\omega)$'nin belirlenmesi ile ve $\tilde{n} = \sqrt{\tilde{\varepsilon}}$ tanımından belirlenebilir. Bu

$$\varepsilon_{m_r} = n^2 - \kappa^2 \quad \text{(G.8a)}$$

$$\varepsilon_{m_i} = 2n\kappa \quad \text{(G.8b)}$$

$$n^2 = \frac{\varepsilon_{m_r}}{2} - \frac{1}{2}\sqrt{{\varepsilon_{m_r}}^2 + {\varepsilon_{m_i}}^2} \quad \text{(G.8c)}$$

$$\kappa = \frac{\varepsilon_{m_i}}{2n} \tag{G.8d}$$

eşitliklerini verir. κ sönümlenme katsayısı olarak adlandırılır ve ortam içindeki EM dalga yayılımının optik soğurumunu belirler. Beer yasasındaki ($I(\mathrm{x}) = I_0 e^{-\alpha x}$ yoluyla ortam içinde yayılan ışının şiddetindeki exponansiyel zayıflamayı tanımlayan) α soğurma katsayısı ise

$$\alpha(\omega) = \frac{2\kappa(\omega)\omega}{c} \tag{G.9}$$

eşitliği yoluyla bağıntılıdır [1].

Dielektrik fonksiyonunun sanal kısmı ε_{m_i} ortam içindeki soğurma miktarını belirler. $|\varepsilon_{m_r}| \gg |\varepsilon_{m_i}|$ için, malzemenin kutuplanmasına bağlı olarak, yayılan dalgaların faz hızı düşürücülüğünü belirleyen kırılma indisinin gerçel kısmı *n,* temel olarak ε_{m_r}'den belirlenir. Böylece (G.7)'un incelenmesi ile σ'nın sanal kısmı ε_{m_r}'ye, dolayısıyla kutuplanma miktarına katkıda bulunurken gerçel kısmının soğurma miktarını belirlediği ortaya çıkmaktadır.

μ_0 boşluğun manyetik geçirgenliği olmak üzere, dış uyarımlar yokken Maxwell eşitliklerinin yayılan dalga çözümleri için (G.1a) ve (G.1b) rotasyon eşitliklerinin birleştirilmesi, sırasıyla zaman ve Fourier domeninde dalga eşitliğini verir;

$$\nabla \times \nabla \times \boldsymbol{E} = -\mu_0 \frac{\partial^2 \boldsymbol{D}}{\partial t^2} \tag{G.10a}$$

$$\boldsymbol{K}(\boldsymbol{K} \cdot \boldsymbol{E}) - K^2 \boldsymbol{E} = -\varepsilon_m(\boldsymbol{K}, \omega) \frac{\omega^2}{c^2} \boldsymbol{E}. \tag{G.10b}$$

Burada $c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}}$ ışığın boşluktaki hızıdır. Elektrik alan vektörünün kutuplanma yönüne bağlı olarak iki durumun ayırt edilmesi gerekir. Enine dalgalar için ($\boldsymbol{K} \cdot \boldsymbol{E} = 0$) genel dağınım bağıntısını veren ifade:

$$K^2 = \varepsilon_m(\boldsymbol{K}, \omega) \frac{\omega^2}{c^2} \tag{G.11}$$

Boyuna dalgalar için (G.10b) ifadesi,

$$\varepsilon_m(\boldsymbol{K}, \omega) = 0 \qquad \text{(G.12)}$$

olduğunu gösterir, bu da boyuna kolektif salınımların $\varepsilon_m(\omega)$'nın sıfırlarına dayanan frekanslarda oluşabildiğini ifade eder.

Geniş bir frekans bölgesinde metallerin optik özellikleri, *N* yoğunluğunda bir serbest elektron gazının plazma modeli ile açıklanabilir. Soy metaller için VIS frekanslarda bantlar arası geçiş meydana gelirken, alkali metaller için bu frekans bölgesi mor ötesine kadar genişler. Plazma modelinde kafes potansiyelinin ve elektron-elektron etkileşiminin ayrıntıları dikkate alınmaz. Bunun yerine daha basit olarak bant yapısının bazı yönlerinin her elektronun etkin optik kütlesine dahil edildiği varsayılır. Elektronlar uygulanan EM alanlara karşı cevap olarak salınım yaparlar ve karakteristik çarpışma frekansı $\gamma=1/\tau$ ile meydana gelen çarpışmalarla hareketleri sönümlenir. τ elektron bulutunun gevşeme süresi olarak bilinir, oda sıcaklığında tipik olarak γ=100 THz iken 10^{-14} sn mertebesindedir.

Metallerin optik özellikleri geniş bir frekans aralığında *plazma modelini* kullanarak tanımlanabilir [1]. $\tilde{m}$ elektron kütlesi olmak üzere dışarıdan bir elektrik alana maruz kalan plazma bulutundaki bir elektron hareketi için basit bir eşitlik yazılabilir:

$$\tilde{m}\ddot{\boldsymbol{x}} + \tilde{m}\gamma\dot{\boldsymbol{x}} = -e\boldsymbol{E} \qquad \text{(G.13)}$$

Uygulanan alanın zaman bağımlılığını $\boldsymbol{E}(t)=\boldsymbol{E_0}e^{-i\omega t}$ olarak alırsak, elektronun salınımını ifade eden bu eşitliğin bir özel çözümü $\boldsymbol{x}(t)=\boldsymbol{x_0}e^{-i\omega t}$ olur. Kompleks genlik x_0 cevabı, bunun (G.13) eşitliğinde kullanılması ile bulunur ve

$$\boldsymbol{x}(t) = \frac{e}{\tilde{m}\left(\omega^2+i\gamma\omega\right)}\boldsymbol{E}(t) \qquad \text{(G.14)}$$

eşitliği elde edilir.

Elektronun yer değiştirmesi, $\boldsymbol{P}=-N\boldsymbol{e}\boldsymbol{x}$ makroskobik kutuplanmasına neden olur ve

$$\boldsymbol{P} = \frac{-Ne^2}{\tilde{m}\left(\omega^2+i\gamma\omega\right)}\boldsymbol{E}(t) \qquad \text{(G.15)}$$

olarak yazılır. ***P*** için yazılan bu ifadenin (G.2) eşitliği içinde yazılması da,

$$\boldsymbol{D} = \varepsilon_0(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2+i\gamma\omega})\boldsymbol{E}(t) \tag{G.16a}$$

ifadesini verir ve burada

$$\omega_p^2 = \frac{Ne^2}{\varepsilon_0 \widetilde{m}} \tag{G.16b}$$

serbest elektron gazının plazma frekansıdır. Böylece serbest elektron bulutunun dielektrik fonksiyonuna ulaşılır:

$$\varepsilon_m(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2+i\gamma\omega} \tag{G.17}$$

Bu kompleks dielektrik fonksiyonu $\varepsilon_m(\omega) = \varepsilon_{m_r}(\omega) + i\varepsilon_{m_i}(\omega)$'nın gerçel ve sanal bileşenleri de, $\gamma = 1/\tau$ alınarak,

$$\varepsilon_{m_r}(\omega) = Re\{\varepsilon_m(\omega)\} = 1 - \frac{\omega_p^2\tau^2}{1+\omega^2\tau^2} \tag{G.18a}$$

$$\varepsilon_{m_i}(\omega) = Im\{\varepsilon_m(\omega)\} = \frac{\omega_p^2\tau}{(1+\omega^2\tau^2)\omega} \tag{G.18b}$$

şeklinde belirlenir. (G.17) eşitliği, γ çarpışma frekansına göre farklı frekans rejimlerinin değişimi için kavraması kolay bir eşitliktir. Burada frekansları $\omega<\omega_p$ şeklinde sınırlayacağız ki bu durumda metaller metalik özelliklerini korumaktadırlar. ω_p'e yakın geniş frekanslar için $\omega\tau>>1$ çarpımı, ihmal edilebilir bir sönümlenmeye yol açar. Bu durumda $\varepsilon_m(\omega)$ ağırlıklı olarak gerçeldir ve sönümsüz serbest elektron bulutunun dielektrik fonksiyonu,

$$\varepsilon_m(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \tag{G.19}$$

olarak alınabilir. Bu frekans bölgelerindeki soy metallerin davranışının tamamen bantlararası geçişlerle değiştiği not edilmelidir ki bu durum ε_{m_i}'de artışa neden olur.

Şimdi, $\omega << \tau^{-1}$ olan çok küçük frekans bölgeleri düşünülürse $\varepsilon_{m_i} \gg \varepsilon_{m_r}$'dir ve kompleks kırılma indisinin gerçel ile sanal kısımları karşılaştırılabilir genliklerde olurlar:

$$n \approx \kappa = \sqrt{\frac{\varepsilon_{m_i}}{2}} = \sqrt{\frac{\tau\omega_p^2}{2\omega}} \tag{G.20}$$

Bu bölgede metaller genellikle emicidir ve soğurma katsayısı

$$\alpha = (\frac{2\omega_p^2\tau\omega}{c^2})^{1/2} \tag{G.21}$$

DC-iletkenlik σ_0 'ı tanımlayarak ve $\sigma_0 = \frac{ne^2\tau}{\widetilde{m}} = \omega_p^2\tau\varepsilon_0$ eşitliği ile bu ifade

$$\alpha = \sqrt{2\sigma_0\omega\mu_0} \tag{G.22}$$

olarak yeniden düzenlenir. Düşük frekanslarda metal içindeki alanlar, δ deri kalınlığı olmak, üzere $e^{-z/\delta}$ ile azalır ve deri kalınlığı

$$\delta = \frac{2}{\alpha} = \frac{c}{\kappa\omega} = \sqrt{\frac{2}{\sigma_0\omega\mu_0}} \tag{G.23}$$

Boltzmann dönüşüm eşitliği'ne [9] dayanan düşük frekans davranışı, elektronların ortalama serbest yolu (υ_f Fermi hızı olmak üzere) $l = \upsilon_f\tau \ll \delta$ olduğu sürece bu tanımın geçerli olduğunu gösterir. Oda sıcaklığında tipik metaller için $l \approx 10nm$ ve $\delta \approx 100nm$'dir böylece serbest elektron modeli doğrulanmış olur. Ancak düşük frekanslarda, nüfuz derinliğinde değişimlere yol açan ortalama serbest yol, birkaç kat büyüklükte artar. Bu olgu *anormal deri etkisi* olarak bilinir [1].

Metallerin dielektrik cevabının tanımı için ε_m yerine σ kullanırsak, (G.14)'i de dahil ederek, soğurma rejiminde daha çok gerçel olduğunu ve serbest yük hızının uygulanan alan ile aynı fazda cevap verdiğini kabul ederiz. DC'de serbest yüklerin gevşeme etkileri gerçel DC-iletkenlik σ_0 yoluyla uygun olarak tanımlanır, halbuki bağlı yüklerin cevabı dielektrik sabiti $\delta\varepsilon_m$'e katılır. ε_m ile σ arasındaki bağıntının incelenmesi yukarıda yapılmıştır.

Yüksek frekanslarda ($1 \leq \omega\tau \leq \omega_p\tau$), kompleks kırılma indisi daha çok sanaldır (yansıma katsayısının $R \approx 1$ olmasına neden olur [10]) ve σ daha çok kompleks karakter kazanır bu da serbest ve bağlı yükler arasındaki sınırı bulanıklaştırır. Yukarıda bahsedilen serbest ve bağlı setler arasındaki bölünmenin keyfiliğine bağlı olarak optik cevap bakımından $\sigma(\omega)$ sadece (G.7) kombinasyonundaki ifadelere girer [8].

Buraya kadar olan açıklamalar ideal serbest elektron metali varsaysa da, plazmonikler alanında önemli olan gerçek metal modeli ile kısaca kıyaslanmalıdır. Çünkü bantlararası geçişler bu modelin VIS ve yüksek frekanslardaki geçerliliğini sınırlamaktadır. Serbest elektron modelinde $\omega >> \omega_p$ için $\varepsilon_m \rightarrow 1$'dir. Fermi yüzeyine yakın olan dolu *d*-bandı güçlü kutuplu bir çevre oluşturduğundan altın (Au), gümüş (Ag), bakır (Cu) gibi soy metaller için bu modelin (serbest *s*-bandı elektronların cevabının baskın olduğu) $\omega > \omega_p$ bölgesinde bir uzantısına ihtiyaç vardır. İyon çekirdeklerin pozitif altyapısına bağlı olan bu artık kutuplanma, (G.2) eşitliğine $\boldsymbol{P}_\infty = \varepsilon_0(\varepsilon_\infty - 1)\boldsymbol{E}$ terimi eklenerek tanımlanır, burada $\boldsymbol{P}$ serbest elektronlara bağlı olarak sadece (G.15) eşitliği kutuplanmasını temsil etmektedir. Böylece bu etki bir dielektrik sabiti ε_∞ ile tanımlanır (genellikle $1 \leq \varepsilon_\infty \leq 10$) ve

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_\infty - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\gamma\omega} \tag{G.24}$$

yazılabilir ve bu eşitlik metallerin, plazma frekasından küçük optik frekanslarda, negatif ε_{m_r} değerine sahip olduklarını göstermektedir [1].

Metallerin AC (alternating current; alternatif akım) iletkenliği $\sigma(\omega)$ için klasik Drude modele [1] serbest elektron plazmasının dielektrik fonksiyonunu (G.17) eklemek gereklidir. Bu, (G.13) eşitliğini

$$\dot{\boldsymbol{p}}_e = -\frac{\boldsymbol{p_e}}{\tau} - e\boldsymbol{E} \tag{G.25}$$

şeklinde yazarak sağlanabilir. Burada $\boldsymbol{p_e} = \tilde{m}\dot{\boldsymbol{x}}$ bağımsız bir serbest elektronun momentumudur. Yukarıda sunulan benzer argümanlar yoluyla AC iletkenlik $\sigma = \frac{nep_e}{\tilde{m}}$ için aşağıdaki eşitliğe ulaşılır:

$$\sigma(\omega) = \frac{\sigma_0}{1-i\omega\tau} \tag{G.26}$$

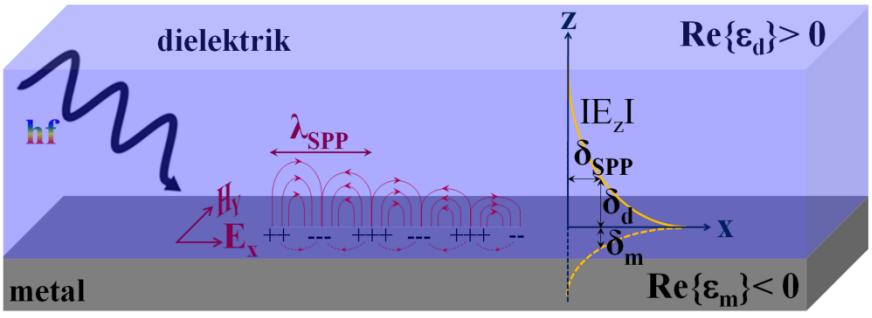
(G.17) ve (G.26) eşitlikleri karşılaştırılarak da (G.7) eşitliğinin genel sonucunu yeniden elde edilir:

$$\varepsilon_m(\omega) = 1 + \frac{i\sigma(\omega)}{\varepsilon_0\omega}. \tag{G.27}$$

Dolayısıyla serbest elektron gazının dielektrik fonksiyonu olan (G.17) metallerin optik cevabının Drude modeli olarak da bilinir.

G.1.2. Bir Arayüzeyde Yüzey Plazmon Polaritonları

Plazmon polaritonları foton ile elektron salınımları olan plazmonların bağlaşım (kuplaj) durumudur. Yüzey plazmonları (surface plasmons; SPs) metallerdeki serbest elektron salınımlarıdır [11] ve yüzey plazmon polaritonları (surface plasmon polaritons; SPPs) da, metal-dielektrik arayüzündeki serbest elektronların ışıkla etkileşimi sayesinde oluşan yüzey boyunca hareket eden, genellikle kızılötesi (IR; infrared) ve VIS frekanslı enine manyetik kutuplu optik dalgalardır [11,12]. SPP'ler, kırınım limitini aşarak mikroskopi ve litografide dalga boyu-altı optiğini mümkün kılmakta ve spektroskopi [13,14], görüntüleme [15] ve biyo-algılama [14,16] gibi uygulamalar için potansiyel teşkil etmektedir. Metalik nanoyapılarda SPP'erin varlığı, olağanüstü ışık iletimi, şiddetli alan kuvvetlendirmeleri ve negatif kırılma gibi çeşitli ayırt edici optik işlemlerle sonuçlanmaktadır [13]. Bu nedenle (metal-hava arayüzü de dahil olmak üzere) metal-dielektrik arayüzünde hangi koşullarda SPP indüklendiği önemlidir.



Şekil G.1. Bir metal-dielektrik arayüzdeki, TM modu durumunda serbest yük salınımlarından oluşan yüzey plazmonları için şematik gösterim.

1. ortam $\varepsilon_m(\omega)$ bağıl dielektrik geçirgenliğine sahip metal ve 2. ortam $\varepsilon_d(\omega)$ pozitif gerçel bağıl dielektrik geçirgenliğine sahip, soğurma yapmayan bir dielektrik ortam olmak üzere, Şekil G.1'deki gibi iki yarı-sonsuz dielektrik-metal ortam arasındaki düz bir arayüz düşünülecek olursa, şu iki durumu belirgin olarak analiz etmek mümkün olacaktır: Enine manyetik (TM: transverse magnetic) durum ve enine elektrik (TE: transverse electric) durum [1].

- TM modu (paralel-kutuplu mod) durumunda, EM dalganın geliş düzlemine dik sadece H_y manyetik alanı mevcuttur ve

$$\frac{\partial^2 H_y}{\partial z^2} + (k_0^2\varepsilon - \beta^2)H_y = 0 \tag{G.28a}$$

eşitliği yazılabilir. Burada alan

$$H_y = H_y(z)e^{i\beta x} = Ae^{\pm k_z z}e^{i\beta x} \tag{G.28b}$$

formundadır ve ± koordinat sistemine göre konumu ifade etmektedir. Harmonik zaman bağımlılığı $\frac{\partial}{dt} \rightarrow i\omega$, x yönündeki yayılma için $\frac{\partial}{dx} \rightarrow i\beta$ ve y doğrultusu için $\frac{\partial}{dy} \rightarrow 0$ biçimindedir. (G.1a) Maxwell eşitliğinden hareketle 2. ortam için

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial E_{z_2}}{dy} - \frac{\partial E_{y_2}}{dz} \\ \frac{\partial E_{x_2}}{dz} - \frac{\partial E_{z_2}}{dx} \\ \frac{\partial E_{y_2}}{dx} - \frac{\partial E_{x_2}}{dy} \end{pmatrix} = -i\omega\mu_0 \begin{pmatrix} H_{x_2} \\ H_{y_2} \\ H_{z_2} \end{pmatrix} \tag{G.29a}$$

ve (G.1b) Maxwell eşitliğinden hareketle

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial H_{z_2}}{dy} - \frac{\partial H_{y_2}}{dz} \\ \frac{\partial H_{x_2}}{dz} - \frac{\partial H_{z_2}}{dx} \\ \frac{\partial H_{y_2}}{dx} - \frac{\partial H_{x_2}}{dy} \end{pmatrix} = -i\omega\varepsilon_0\varepsilon_d \begin{pmatrix} E_{x_2} \\ E_{y_2} \\ E_{z_2} \end{pmatrix} \tag{G.29b}$$

bağıntıları elde edilir. İkinci ortamda (z > 0) manyetik alan ifadesi

$$\begin{pmatrix} H_{x_2} \\ H_{y_2} \\ H_{z_2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ A_2 e^{-k_{d_z} z} e^{i\beta x} \\ 0 \end{pmatrix} \tag{G.30a}$$

ve elektrik alan da $\frac{\partial}{dt} \rightarrow i\omega$, $\frac{\partial}{dx} \rightarrow i\beta$ ve $\frac{\partial}{dy} \rightarrow 0$ koşullarını dikkate alarak ve (G.29b) eşitliğinden

$$\begin{pmatrix} E_{x_2} \\ E_{y_2} \\ E_{z_2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} iA_2 \frac{1}{\omega \varepsilon_0 \varepsilon_d} k_{d_z} e^{-k_{d_z} z} e^{i\beta x} \\ 0 \\ -A_2 \frac{\beta}{\omega \varepsilon_0 \varepsilon_d} e^{-k_{d_z} z} e^{i\beta x} \end{pmatrix} \tag{G.30b}$$

şeklinde yazılabilir. Burada β arayüzeye (z = 0) paralel dalga vektörü iken, k_z arayüzeye dik dalga vektörü bileşenidir. 1. ortamda (z < 0) ise manyetik alan ifadesi;

$$\begin{pmatrix} H_{x_1} \\ H_{y_1} \\ H_{z_1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ A_1 e^{k_{m_z} z} e^{i\beta x} \\ 0 \end{pmatrix} \tag{G.31a}$$

ve elektrik alan ifadesi yine $\frac{\partial}{dt} \rightarrow i\omega$, $\frac{\partial}{dx} \rightarrow i\beta$ ve $\frac{\partial}{dy} \rightarrow 0$ koşullarını dikkate alarak ve (G.29b) eşitliğinden,

$$\begin{pmatrix} E_{x_1} \\ E_{y_1} \\ E_{z_1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -iA_1 \frac{1}{\omega \varepsilon_0 \varepsilon_m} k_{m_z} e^{k_{m_z} z} e^{i\beta x} \\ 0 \\ -A_1 \frac{\beta}{\omega \varepsilon_0 \varepsilon_m} e^{k_{m_z} z} e^{i\beta x} \end{pmatrix} \tag{G.31b}$$

olacaktır. Her iki ortamdaki bu alanlara süreklilik koşulları uygulanacak olursa,

$$H_{y_1}(z = 0) = H_{y_2}(z = 0) \Rightarrow A_1 = A_2 \tag{G.32a}$$

$$E_{x_1}(z = 0) = E_{x_2}(z = 0) \Rightarrow \frac{k_{m_z}}{\varepsilon_m} = -\frac{k_{d_z}}{\varepsilon_d} \tag{G.32b}$$

$$\varepsilon_m E_{z_1}(z = 0) = \varepsilon_d E_{z_2}(z = 0) \Rightarrow A_1 = A_2 \tag{G.32c}$$

eşitlikleri elde edilir. 1. ortam metal ve 2. ortam bir yalıtkan olacak şekilde $Re\left[k_{m_z}\right] > 0$, $Re\left[k_{d_z}\right] > 0$, $Re[\varepsilon_m] < 0$ ve $Re[\varepsilon_d] > 0$ olacağından ve dalga denklemini sağlaması bakımından ortamlardaki ortogonal dalga vektörleri

$$k_{m_z}^2 = \beta^2 - k_0^2 \varepsilon_m \tag{G.33a}$$

$$k_{d_z}^2 = \beta^2 - k_0^2 \varepsilon_d \tag{G.33b}$$

olarak ifade edilir. (G.31b, G.32a, G.32b) eşitlikleri birlikte değerlendirilerek

$$\beta = k_0 \sqrt{\frac{\varepsilon_m \varepsilon_d}{\varepsilon_m + \varepsilon_d}} = k_{SPP} \tag{G.34}$$

bağıntısı elde edilir [17]. Bu bağıntı *SPP yayılımının dağınım bağıntısı* olarak bilinir. Burada $\beta = \beta_r + i\beta_i$ komplekstir ve metal ortam için $\varepsilon_m = \varepsilon_{m_r} + i\varepsilon_{m_i}$ iken dielektrik ortam için $\varepsilon_d = \varepsilon_{d_r}$ mevcuttur. Böylece (G.34) eşitliği

$$\beta = k_0 \sqrt{\frac{\varepsilon_{m_r} \varepsilon_d + i\varepsilon_{m_i} \varepsilon_d}{\varepsilon_{m_r} + \varepsilon_d + i\varepsilon_{m_i}}} \tag{G.35a}$$

halini alır. $\varepsilon_{m_r} \gg \varepsilon_{m_i}$ iken yüzey plazmonunun kompleks yayılma sabiti;

$$\beta = \beta_r + i\beta_i = k_0 \sqrt{\frac{\varepsilon_{m_r} \varepsilon_d}{\varepsilon_{m_r} + \varepsilon_d}} + j k_0 \frac{\varepsilon_{m_i}}{2{\varepsilon_{m_r}}^2} \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_{m_r} \varepsilon_d}{\varepsilon_{m_r} + \varepsilon_d}\right)^3} \tag{G.35b}$$

olarak ifade edilebilir. (G.35b) eşitliğinden anlaşılacağı üzere, metal ortamın sanal dielektrik geçirgenliği ε_{m_i}, yüzey plazmonu yayılma sabitinin sıfırdan farklı olmasına ($\beta_i \neq 0$) neden olur ve bu da yüzey plazmonunun genliğindeki zayıflamanın göstergesidir. Bu zayıflama bazen yüzey plazmon enerjisinin e^{-1}'ine (yani 0.368'sına) düştüğü yayılma mesafesi δ_{SPP} ile tanımlanır:

$$\delta_{SPP} = \frac{1}{2\beta_i}. \tag{G.36}$$

Her iki ortamdaki elektrik ve manyetik alanlardan hareketle (G.30a,b ve G.31a,b eşitlikleri), yüzey plazmonunun alan genliği, arayüzeyin normali boyunca, 1. ortam

(metal) içinde $e^{-|k_{m_z}||z|}$ şeklinde ve 2. ortam (dielektrik) içinde $e^{-|k_{d_z}||z|}$ şeklinde üstel olarak düşmektedir. Böylece bu ortamlardaki alan şiddetinin e^{-1}'ine düştüğü nüfuz derinlikleri;

$$\delta_1 = \delta_m = \frac{1}{|k_{m_z}|}, \tag{G.37a}$$

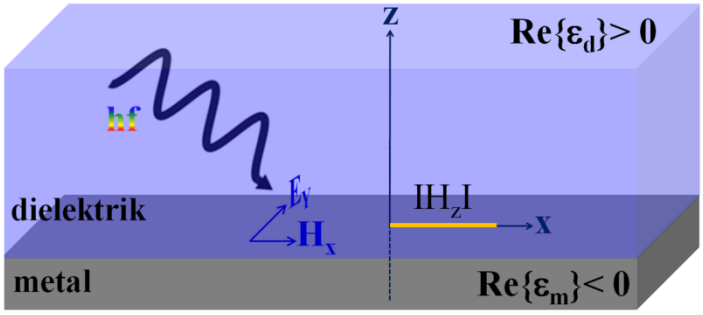
$$\delta_2 = \delta_d = \frac{1}{|k_{d_z}|} \tag{G.37d}$$

şeklinde ifade edilir ve burada k_{m_z} ile k_{d_z} yerine (G.33a,b) eşitlikleri yazılarak

$$\delta_m = \frac{1}{k_0}\sqrt{\frac{\varepsilon_{m_r} + \varepsilon_d}{{\varepsilon_{m_i}}^2}} \tag{G.38a}$$

$$\delta_d = \frac{1}{k_0}\sqrt{\frac{\varepsilon_{m_i} + \varepsilon_d}{{\varepsilon_d}^2}} \tag{G.38b}$$

elde edilir.



Şekil G.2. Bir metal-dielektrik arayüzdeki TE modu durumu.

- TE modu (dik-kutuplu mod) durumunda, EM dalganın geliş düzlemine dik sadece E_y elektrik alanı mevcuttur ve

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial z^2} + (k_0^2\varepsilon - \beta^2)E_y = 0 \tag{G.39a}$$

dalga denkleminin çözümü, ± koordinat sistemine göre konumu ifade etmek üzere,

$$E_y = E_y(z)e^{i\beta x} = Ae^{\pm k_z z}e^{i\beta x} \tag{G.39b}$$

olacaktır. İkinci ortamda (z > 0) elektrik alan ifadesi

$$\begin{pmatrix} E_{x_2} \\ E_{y_2} \\ E_{z_2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ A_2 e^{-k_{d_z} z} e^{i\beta x} \\ 0 \end{pmatrix} \tag{G.40a}$$

ve manyetik alan ifadesi, $\frac{\partial}{dt} \rightarrow i\omega, \frac{\partial}{dx} \rightarrow i\beta$ ve $\frac{\partial}{dy} \rightarrow 0$ koşullarını dikkate alarak ve (G.29a) eşitliğinden yararlanarak;

$$\begin{pmatrix} H_{x_2} \\ H_{y_2} \\ H_{z_2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -iA_2 \frac{1}{\omega\mu_0} k_{d_z} e^{-k_{d_z} z} e^{i\beta x} \\ 0 \\ A_2 \frac{\beta}{\omega\mu_0} e^{-k_{d_z} z} e^{i\beta x} \end{pmatrix} \tag{G.40b}$$

şeklinde yazılabilir. Burada TM geliş durumuna benzer olarak, β arayüzeye (z = 0) paralel dalga vektörü iken k_z arayüzeye dik dalga vektörü bileşenidir. 1. ortamda (z < 0) ise elektrik alan ifadesi

$$\begin{pmatrix} E_{x_1} \\ E_{y_1} \\ E_{z_1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ A_1 e^{k_{m_z} z} e^{i\beta x} \\ 0 \end{pmatrix} \tag{G.41a}$$

ve manyetik alan ifadesi yine $\frac{\partial}{dt} = i\omega$, $\frac{\partial}{dx} = i\beta$ ve $\frac{\partial}{dy} = 0$ koşullarını dikkate alarak ve (G.29a) eşitliğinden yararlanarak

$$\begin{pmatrix} H_{x_1} \\ H_{y_1} \\ H_{z_1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} iA_1 \frac{1}{\omega\mu_0} k_{m_z} e^{k_{m_z} z} e^{i\beta x} \\ 0 \\ A_1 \frac{\beta}{\omega\mu_0} e^{k_{m_z} z} e^{i\beta x} \end{pmatrix} \tag{G.41b}$$

olacaktır. Her iki ortamdaki bu alanlara süreklilik koşulları uygulanacak olursa

$$E_{y_1}(z = 0) = E_{y_2}(z = 0) \Rightarrow A_1 = A_2 \tag{G.42a}$$

$$H_{x_1}(z = 0) = H_{x_2}(z = 0) \Rightarrow -k_{m_z} = -k_{d_z} \tag{G.42b}$$

$$H_{z_1}(z = 0) = H_{z_2}(z = 0) \Rightarrow A_1 = A_2 \tag{G.42c}$$

olur ve 1. ortamın metal ile 2. ortamın bir yalıtkan olması durumunda $Re[k_{m_z}] > 0$, $Re[k_{d_z}] > 0$, $Re[\varepsilon_m] < 0$ ve $Re[\varepsilon_d] > 0$ olacağından, $Re[k_{m_z}] > 0$, $Re[k_{d_z}] > 0$ sınırlamaları ancak bu süreklilik koşulları $A_1 = A_2 = 0$ durumunda sağlanır. Bu da TE modu için yüzey plazmonlarının uyarılamadığını ifade eder. Dolayısıyla sadece TM modu için SP modları uyarılabildiği sonucu ortaya çıkmaktadır.

G.1.3. Plazma Frekansı

SP'lerin yüzey boyunca yayılması için SP yayılma sabiti gerçel olmalıdır ve (G.34) ile verilen $\beta = k_0\sqrt{\frac{\varepsilon_m\varepsilon_d}{\varepsilon_m+\varepsilon_d}} = k_{SPP}$ eşitliğini ω'nın ω_p'e yakın olduğu değerler için ve ε_m'in gerçel olduğunu kabul ederek ve 1. ortamın metal 2. ortamın dielektrik olduğunu daha açık ifade etmek için $k_0 = \frac{\omega}{c}$ yazarak elde ettiğimiz

$$k_{SPP} = \beta = \frac{\omega}{c}\sqrt{\frac{\varepsilon_m\varepsilon_d}{\varepsilon_m+\varepsilon_d}} \tag{G.43a}$$

ışınımsız (non-radiative) SP modu bağıntısı içinde (G.19) eşitliğinden faydalanılarak,

$$\varepsilon_m(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \tag{G.43b}$$

yazılırsa

$$\beta = \frac{\omega}{c}\sqrt{\frac{\varepsilon_d(1-\frac{\omega_p^2}{\omega^2})}{\varepsilon_d+1-\frac{\omega_p^2}{\omega^2}}} \tag{G.43c}$$

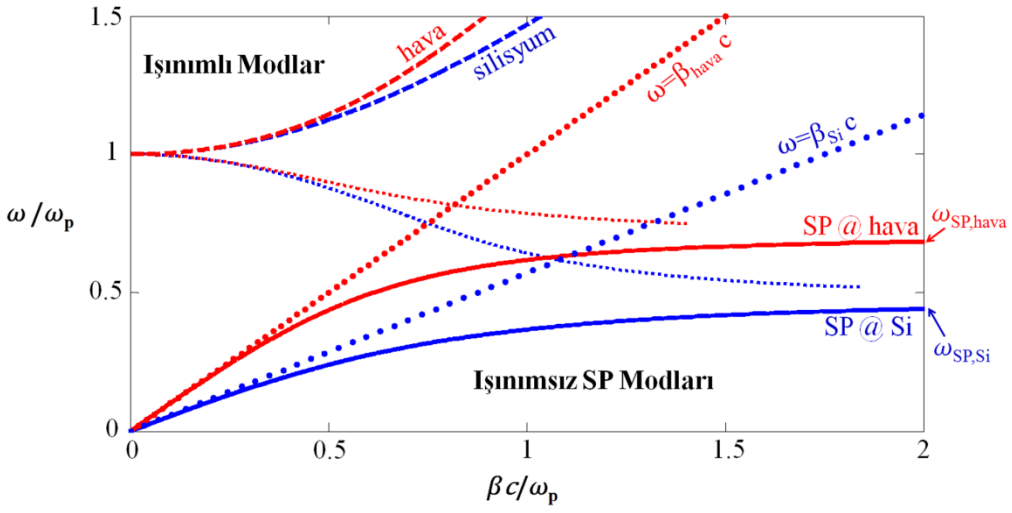
eşitliğine ulaşılır. Ardından, daha anlaşılır bir analiz için, eşitlik ω_p'ye normalize edilerek,

$$\frac{\beta c}{\omega_p} = \frac{\omega}{\omega_p}\sqrt{\frac{\varepsilon_d(1-\frac{\omega_p^2}{\omega^2})}{\varepsilon_d+1-\frac{\omega_p^2}{\omega^2}}} \tag{G.43d}$$

eşitliği elde edilir. Burada, ω/ω_p değişkeni $\beta c/\omega_p$ değişkenine göre değerlendirilecektir. Bu değerlendirmede, karşılaştırma yapmak açısından 2. ortam için hava ($\varepsilon_d = 1$) ile amorf silisyum ($\varepsilon_d = 3.44$) ayrı ayrı ele alınarak elde edilen

$$\frac{\beta_{hava}c}{\omega_p} = \frac{\omega}{\omega_p}\sqrt{\frac{1-\frac{\omega_p^2}{\omega^2}}{2-\frac{\omega_p^2}{\omega^2}}} \text{ ve } \frac{\beta_{Si}c}{\omega_p} = \frac{\omega}{\omega_p}\sqrt{3.44\,\frac{1-\frac{\omega_p^2}{\omega^2}}{4.44-\frac{\omega_p^2}{\omega^2}}} \qquad \text{(G.43e)}$$

eğrileri, analizi ve hava ile amorf silisyum için bir metal-dielektrik arayüzündeki ışınımlı modlar ve ışınımsız SP modların dağınım bağıntısı Şekil G.3 ile verilmektedir.



Şekil G.3. Farklı iki dielektrik ortam (hava ve amorf silisyum) için SP modların dağınım bağıntısı.

$\omega > \omega_p$ metal için geçirgenlik bölgesidir ve metal içine doğru ışınım oluşur. Yani tüm metal-dielektrik sistemi boyunca ışınım oluşur. $\omega < \omega_p$ için, küçük $\beta c/\omega_p$ değerlerinde, belli bir frekansın (SP frekansı) altındaki ω değerlerinde ışınımsız SP modları oluşur. SP frekansı,

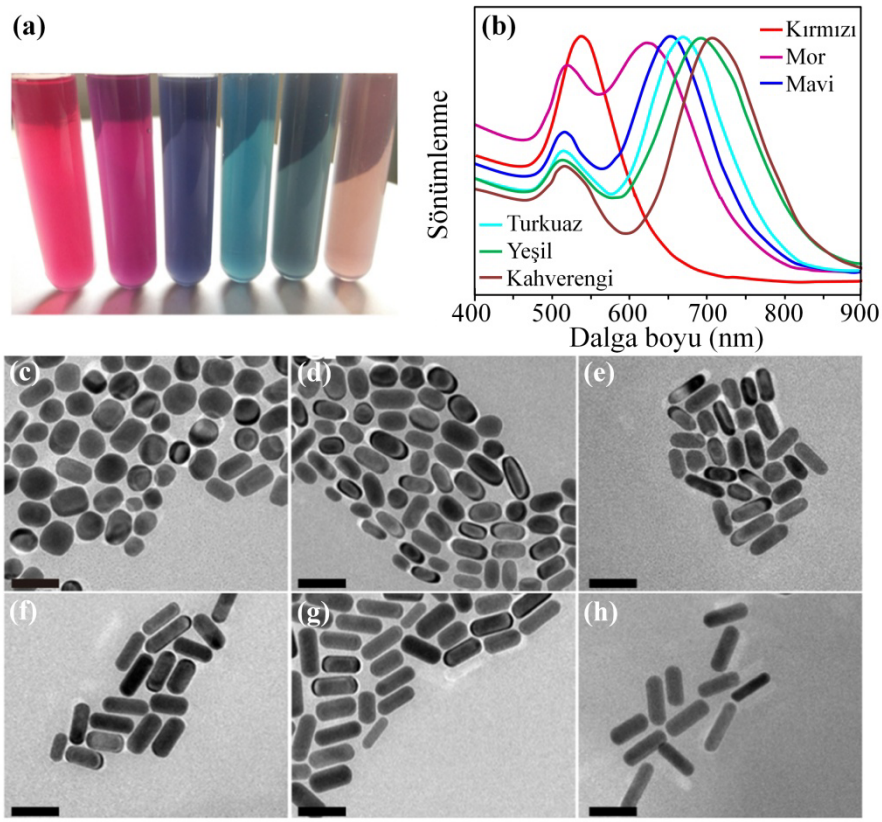
$$\omega_{SP} = \frac{\omega_p}{\sqrt{1-\varepsilon_d}} \qquad \text{(G.44)}$$

ile verilir ve hava için $\omega_{SP,hava} = {\omega_p}/{\sqrt{2}}$, amorf Si için de $\omega_{SP,Si} = {\omega_p}/{\sqrt{4.44}}$'dır.

Küçük ${\beta c}/{\omega_p}$ değerleri için de IR ve daha düşük frekanslarda ise, β, k_0'a yakındır ve davranış $\omega = \beta c$ doğrusu ile verilen ışık çizgisine yakındır. Yani dalgalar dielektrik ortam içine uzanırlar. β sonsuza gittikçe ise frekans ω_{SP} değerine yaklaşır ve mod elektrostatik karakter kazanır. Grafik, aynı zamanda hava ve amorf silisyumu karşılaştırarak, daha büyük ε_d için SP mod davranışının daha düşük frekanslara (kırmızıya) kaydığını göstermektedir. Çünkü gelen dalga ile etkileşen serbest yüzey yük miktarı azalmakta, dolayısıyla SP enerjisi azalmaktadır.

G.1.4. Yerelleşmiş Yüzey Plazmon (LSP) Polaritonları

Yüzey plazmonları, optik frekanslarda boyutları çalışılan dalga boyundan daha küçük boyutlardaki metal parçacıklar içinde (metalik nanoparçacıklarda) sınırlandıklarında parçacığın serbest elektronları toplu salınımlara katılır ve yayılmayan LSP'ler oluşur. Bu LSP'ler yakın alan bölgesinde kuvvetlendirilmiş EM alan indükleyebilirler ve yerelleşmiş yüzey plasmon resonansı (localized surface plasmon resonance; LSPR), külçe metal yerine metalik nanoparçacıklarda oluşan bir tür yüzey plazmon rezonans (Surface plasmon resonance; SPR) olgusudur. Metal parçacıkların boyutlarının, ışığın dalga boyuna oranla daha küçük ve nano boyutlarda olması; soy metallerin fiziksel özelliklerini büyük ölçüde değiştirir [18-20]. Özellikle bir örnek bu olguyu daha iyi açıklar: Şekil G.4'de gösterildiği gibi, nano dünyadaki altın rengi, "altın rengi" olarak bilinen renk değildir [20]. Burada altın, her biri farklı boy oranlarına (uzunluğun genişliğe oranı) sahip nanoçubuklar içeren sulu çözeltiler; farklı renkler sergilemektedir [20,21]. 50 nm ölçek ile Geçirimli Elektron Mikroskobu (TEM; Transmission Electron Microscope) görüntüleri verilen ve uzunluklarının enlerine oranı (boy oranı) 1.1 (Şekil G.4c), 1.5 (Şekil G.4d), 2.0 (Şekil G.4e), 2.3 (Şekil G.4f), 2.6 (Şekil G.4g) ve 2.8 (Şekil G.4h) olan bu nanoçubukların plazmon bantları 533 nm, 620 nm, 653 nm, 675 nm, 690 nm ve 720 nm'dedir (Şekil G.4b). Yani aynı sıvı içerisine farklı boyutlardaki metalik nanoparçacıklar eklendiğinde farklı renklerin yansıtıldığı görülmektedir.



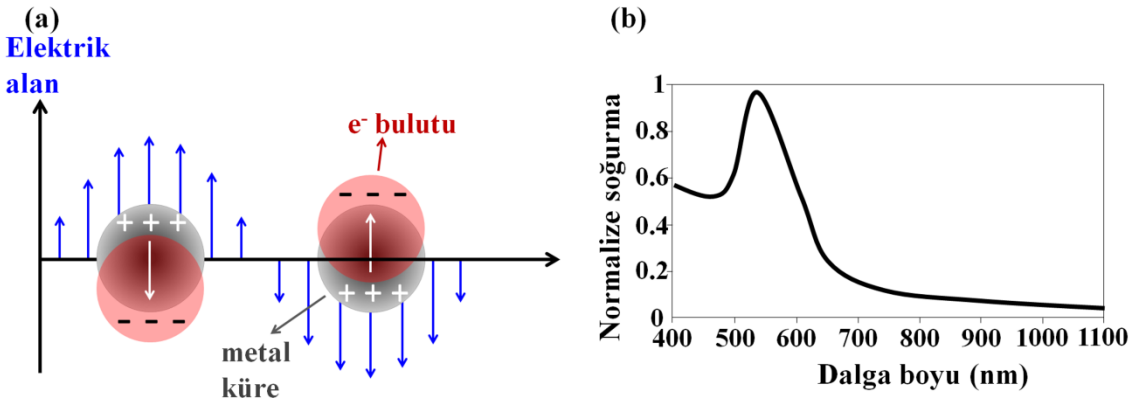
Şekil G.4. **(a)** Altı farklı renk veren kolloidal altın nanoçubuk çözeltisi. **(b)** farklı boy oranlarındaki bu nanoçubukların UV-VIS sönümlenme spektrumları ve **(c-h)** TEM görüntüleri. [21].

Külçe metal filmin yerini metalik nanoparçacıklar aldığında, SPR olgusunun yerini LSPR olgusu alır [20]. Bu da LSPR'nin metalik nanoparçacıkların şekil ve boyutlarına bağımlılığını getirmiştir [19,20]. Böylece, bu parametreler değiştirilerek, LSPR dalga boyunun uygun VIS veya IR bölgeye ayarlanabilmesi sağlanmaktadır. Ayrıca LSPR olgusunda, metal nanoparçacıkların optik özellikleri külçe metal filmlere göre farklılaşır. Gelen ışık metal nanoaparçacıklarla etkileştiğinde, ışığın EM alanı, yüzey iletim elektronlarının toplu ve uyumlu salınımlarını indükler [16]. Işığın elektrik alanı nanoparçacıkların serbest elektronlarıyla etkileşerek, iyonik metal çekirdek ve serbest elektronlar arasında yük ayrımına neden olarak, serbest elektronlar arasında Coulomb itmesine dönüşür. Bu kuvvet elektronları ters yönde hareket etmeye zorlar ve metalik bölgenin sınırlanmış olması ile de yayılmayan toplu elektron salınımı oluşur. LSPR oluşumu ayrıca kuvvetli bir ışık soğurumuna neden olur ve farklı şekil ile boyutlarda olan ya da faklı malzemeden yapılmış nanoparçacıklar, farklı soğurma özellikleri gösterir ve böylece Şekil G.4'de olduğu gibi farklı renkler sergileyebilirler. Temel

olarak küresel bir metalik nanoparçacık için ışığın LSPR tarafından soğurumu Maxwell eşitliklerine Mie yaklaşımıyla tanımlanabilir [22,23]. Mie teorisine göre, iyice ayrılmış R' yarıçaplı küresel nanoparçacıklar, yarıçap R' ışığın dalga boyu λ'dan küçük olmak üzere ($\frac{R'}{\lambda} < 1$), sönümleme (extinction) kesit alanı; ε_{m_r} ile ε_{m_i} metalik nanoparçacığın dielektrik fonksiyonunun gerçel ve sanal kısımları; ε_d çevreleyici ortamın dielektrik sabiti ve $\widetilde{N}$ birim hacim içindeki küre sayısı olmak üzere,

$$\sigma_{ext} = \frac{24\pi^2 (R')^3 \widetilde{N} \sqrt{\varepsilon_d^3}}{\lambda} \frac{\varepsilon_{m_i}}{(\varepsilon_{m_r} + 2\varepsilon_d)^2 + \varepsilon_{m_i}^2} \qquad \text{(G.45)}$$

eşitliği ile verilir [20]. Bu eşitliğe göre $\varepsilon_{m_r} = -2\varepsilon_d$ iken bir soğurma bandı belirir. Altın ve gümüş küresel nanoparçacıklar için plazmon soğurma bantları VIS ışık bölgesindedir. Uygulanan elektrik alan yönüne göre R' yarıçaplı metalik bir nanokürenin yük dağılımı [19] Şekil G.5a'da ve 70 nm çapındaki altın nanoküre için tipik LSPR soğurma bandı [24,25] da Şekil G.5b'de verilmektedir.

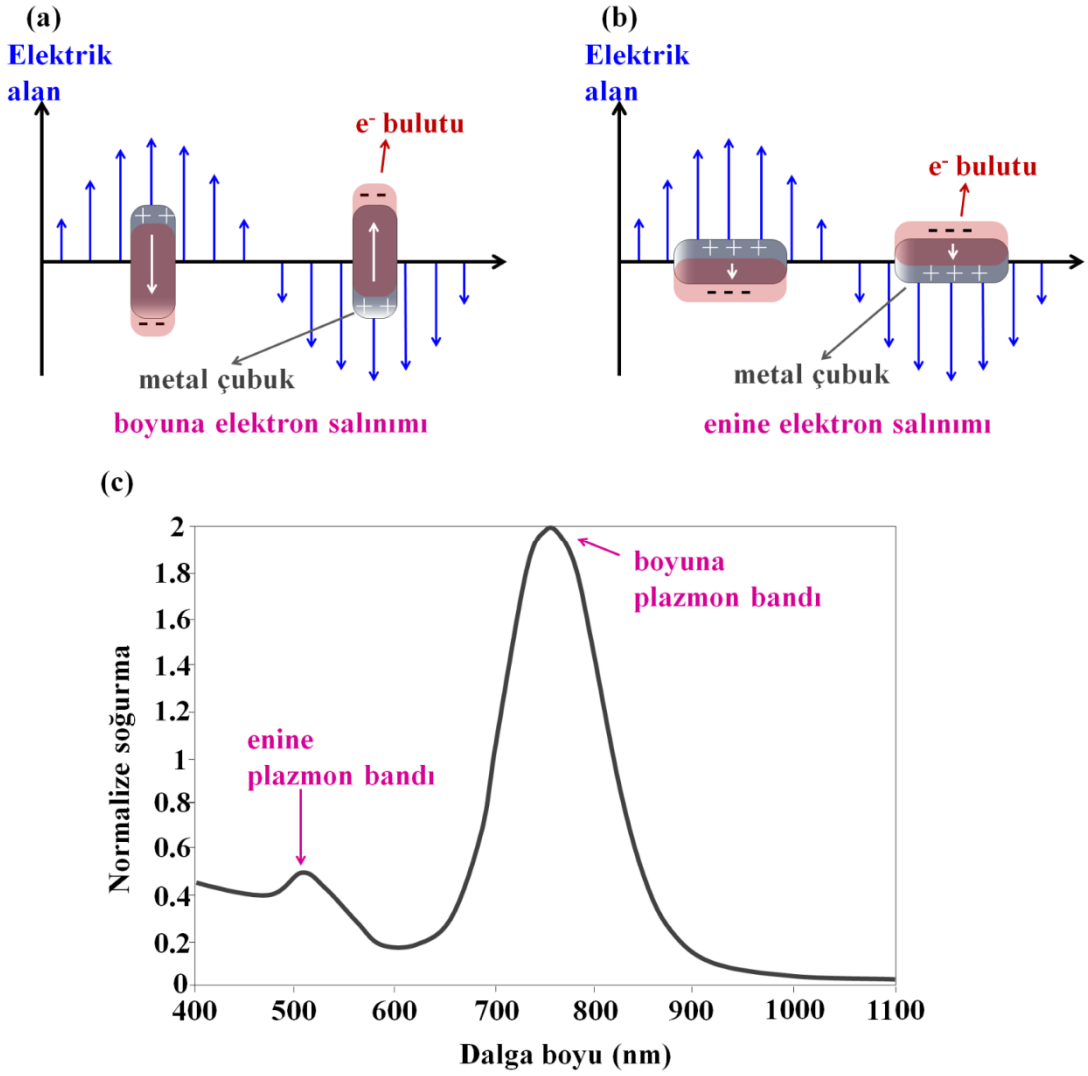


Şekil G.5. (a) R' yarıçaplı metalik bir nanokürenin yük dağılımı [19] ve **(b)** 70 nm çapındaki altın nanoküre için LSPR soğurma bandı [24].

Şekil G.5a'da görüldüğü gibi, küre üzerindeki serbest yükler uygulanan elektrik alana göre salınım yapmaktadır. Nanoküre boyutundaki sınırlama ve kürenin dielektrik sabiti gereğince, yerelleşmiş yüzey plazmon polaritonları LSPP oluşmaktadır ve özel bir dalga boyunda nanoküre rezonant bir soğurma göstermektedir. Şekil G.5b'deki bir çalışmada

da, 70 nm çapındaki altın bir küre için simüle edilmiş normalize soğurma spektrumu verilmektedir.

Metalik nanoparçacıkların elipsoid nanoçubuklar olması durumunda, yüzey eğriliği ve elips geometrisi nedeniyle, yüzey plazmon modu iki moda ayrılır: Boyuna LSPR uyartımı (Şekil G.6a) ile enine LSPR uyartımı (Şekil G.6b). Bu durumda elipsoid nanoçubukların LSPR soğurma bantları (Şekil G.6c); elektronların parçacığın uzun ekseni boyunca salınımı sonucu oluşan boyuna plazmon bandı ve kısa ekseni boyunca salınımları nedeniyle oluşan enine plazmon bandı [20] olarak sonuçlanır.



Şekil G.6. Elips şeklindeki metal nanoparçacıklar için **(a)** boyuna LSPR uyartımı ile **(b)** enine LSPR uyartımı şematik gösterimi ve **(c)** LSPR soğurma bantları [20].

G.2. Optik Teorem

G.2.1. Görünür ve Kızılötesi Işınım için Nanoanten Dizileri

VIS ve IR ışınım için nanoantenler, ışık ile nano-ölçekli maddelerin etkileşimini belirgin olarak arttıran ve dolayısıyla bu nanoyapıların yayılan optik alanların konumsal olarak yerelleştirilmesini sağlama yeteneğini etkin biçimde etkileyen anten tasarımlarıdır. Bu yetkinlik, nano-ölçekli optik mikroskopi, spektroskopi, güneş enerjisi dönüşümü, entegre optik nanodevreler, opto-elektronik ve optik biyo-algıma gibi uygulamalar için büyük potansiyele sahiptir [26].

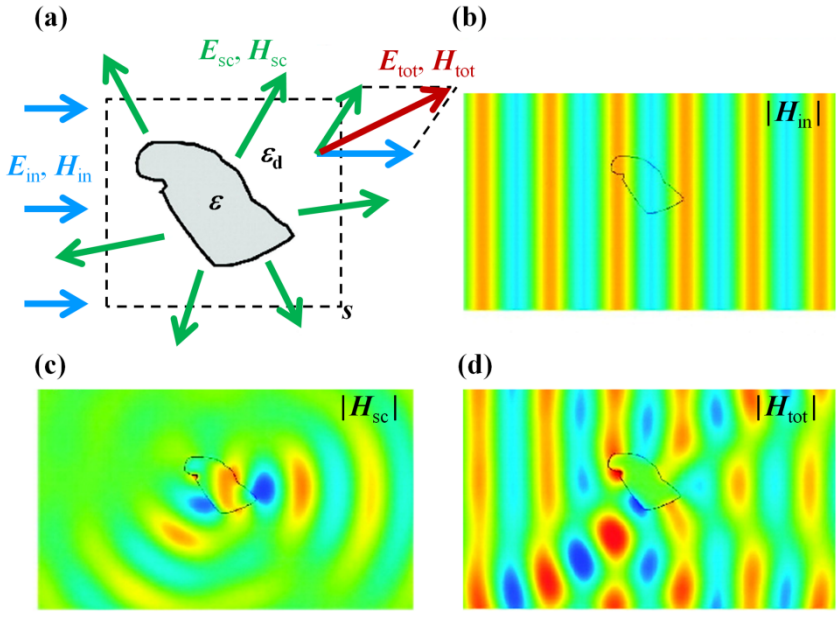
Bir antenin çalışması, serbest yük taşıyıcılarına bağlıdır ve bu yükler alternatif akım uygulandığında veya bir bölgeye EM dalga ulaştığında salınım yapmaya başlar. Bu tür sistemlere en iyi örnek metallerdeki iletim elektronlarıdır [27]. Bir antenin rezonanslarını ayarlamak için de antenin indüktans (L) ve kapasitansını (C) ayarlamak gerekir ve optik dalga boylarında rezonans sağlamak için de L ve C değerleri çok küçük olmalıdır [28]. Bu da anten boyutlarını optik dalga boylarına daraltmakla mümkün olabilir [26]. IR ve VIS frekanslara çıkıldıkça metaller iyi iletken olarak davranmazlar. Yüksek frekanslı ve düşük frekanslı EM dalgalar arasındaki fark, metallerdeki iletim elektronlarının sınırlı bir etkin kütleye sahip olmasıdır. Bu tür bir etkin kütle; elektronların, frekans arttıkça, salınan EM dalgalara artan faz gecikmesi ile tepki vermesine neden olur. Düşük frekanslarda elektronlar faz gecikmesi olmadan uyartımları takip ederken, frekans arttıkça artan faz gecikmesinin yanısıra artan salınım genliği sergilerler. Faz gecikmesi 90°'ye ulaştığında yük salınımının genliği de maksimum değerini alır ve sadece omik olarak ya da ışınımla sınırlanabilir. Altın, gümüş, alüminyum ve bakır gibi maddelerden oluşan metalik nanoparçacıklarda, VIS veya daha yakın frekans sahasında beliren bu rezonans, yerelleşmiş plazmon rezonansına karşılık gelir. Plazmon rezonansları mükemmel iletkenlerde (ya da düşük frekanslarda çalışan metallerde) oluşmazlar. Çünkü uyartım ile yük cevabı arasında hiç bir faz gecikmesi olmaz. Yerelleşmiş plazmon frekansının varlığı da optik frekanslar için karakteristiktir ve bu frekanslarda anten sistemlerinin (radyo frekanslardakine nazaran fazla olan omik kayıplar gibi) dezavantajlarını dengelemek için kullanılabilir [26].

G.2.1.1. Sönümlenme Kesit Alanı

Işıkla etkileşen metalik nanoparçacıkların her biri saçıcı cisimdir. Farklı geometrili ve farklı dielektrik özellikli bir parçacığın kesit alanı, ışıkla parçacığın etkileşimi hakkında bilgi verir [29]. Verilen bir elektrik alan ve saçıcı cismin şekli, boyutu, ε bağıl dielektrik fonksiyonu (veya bağıl dielektrik geçirgenliği) için amaç, uzayın her noktasında elektrik $\boldsymbol{E}$ ve manyetik $\boldsymbol{H}$ alanlarını belirlemektir. Bunun için saçıcı cisim ve içinde gömülü olduğu kayıpsız, ε_d geçirgenlikli dielektrik ortam düşünülürse, EM alanlar makroskobik Maxwell eşitliklerini ve tüm alan bileşenleri parçacık sınırında süreklilik koşullarını sağlamalıdır. Basit geometriler için analitik çözümler elde edilebilir [30] ancak genelde bu nümerik olarak çözülmesi gereken kompleks bir problemdir. Parçacığın boyutunun çalışılan dalga boyundan daha küçük olduğu varsayılarak, kayıpsız dielektrik ortamda gömülü metal parçacıktan oluşan sistemdeki toplam alanlar, $\boldsymbol{E}_{in}$ ile $\boldsymbol{H}_{in}$ gelen alanlar ve $\boldsymbol{E}_{sc}$ile $\boldsymbol{H}_{sc}$ de saçılan alanlar olmak üzere, aşağıdaki gibi yazılır:

$$\boldsymbol{E}_{tot} = \boldsymbol{E}_{in} + \boldsymbol{E}_{sc}, \tag{G.46a}$$

$$\boldsymbol{H}_{tot} = \boldsymbol{H}_{in} + \boldsymbol{H}_{sc}. \tag{G.46b}$$



Şekil G.7. **(a)** Saçıcı bir metal parçacık sistemindeki toplam EM alanların şematik gösterimi. **(b)** Parçacığa gelen manyetik alan, **(c)** parçacıktan saçılan manyetik alan ve **(d)** sistemdeki toplam manyetik alan dağılımları [31].

Şekil G.7'de olduğu gibi, gelen alanlar parçacığı aydınlatan ışığın EM alanlarıdır ve saçılan alanlar da parçacıktan ışınan EM alanlardır. Burada alan dağılımları için renk ölçeği aynıdır ve maviden ($|\boldsymbol{H}|$ = -1) kırmızıya ($|\boldsymbol{H}|$ = 1) değişmektedir. Bu sistem için enerjinin korunumu eşitliği de

$$\boldsymbol{S}_{tot} = \boldsymbol{S}_{in} + \boldsymbol{S}_{sc} + \boldsymbol{S}_{ext} \tag{G.47}$$

olarak ifade edilebilir. Burada

$$\boldsymbol{S}_{in} = \frac{1}{2} Re\{\boldsymbol{E}_{in} \times \boldsymbol{H}_{in}{}^{*}\}, \tag{G.48a}$$

$$\boldsymbol{S}_{sc} = \frac{1}{2} Re\{\boldsymbol{E}_{sc} \times \boldsymbol{H}_{sc}{}^{*}\}, \tag{G.48b}$$

$$\boldsymbol{S}_{tot} = \frac{1}{2} Re\{\boldsymbol{E}_{tot} \times \boldsymbol{H}_{tot}{}^{*}\} \tag{G.48c}$$

eşitlikleri sırasıyla zamanda ortalama gelen Poynting vektörü (EM güç akışı), saçılan Poynting vektörü ve yayılan toplam güç akış yoğunluğudur.

$$\boldsymbol{S}_{ext} = \frac{1}{2} Re\{\boldsymbol{E}_{in} \times \boldsymbol{H}_{sc}{}^{*} + \boldsymbol{E}_{sc} \times \boldsymbol{H}_{in}{}^{*}\} \tag{G.48d}$$

eşitliği gelen ile saçılan alanların girişiminden kaynaklanan EM yoğunluktur. (G.47) eşitliğinin kapalı $\boldsymbol{s}$ yüzeyi boyunca integrali alınarak sistemin farklı enerji kanalları için basit bir bağıntı bulunabilir. Gelen dalganın kayıpsız düzlem dalga olduğu ve $\oint_{\boldsymbol{s}} \boldsymbol{S}_{in} \cdot d\boldsymbol{s} = 0$ kabul edilerek parçacık tarafından saçılan ve soğurulan güç sırasıyla

$$W_{sc} = \oint_{\boldsymbol{s}} \boldsymbol{S}_{sc} \cdot d\boldsymbol{s}, \tag{G.49a}$$

$$W_{abs} = -\oint_{\boldsymbol{s}} \boldsymbol{S}_{tot} \cdot d\boldsymbol{s} \tag{G.49b}$$

eşitlikleri ile belirlenir. Burada $Im\{\varepsilon_m\} > 0$ olduğu ve metal parçacığı saran çevresel ortam kayıpsız olduğu için, soğurulan enerji ile toplam alan ilişkilendirilmektedir. "–" işareti, kapalı yüzeyin iç yönelimini gösterir ve $W_{abs} > 0$ olmasına sebep olur. Fiziksel anlamı,

$$W_{ext} = W_{abs} + W_{sc} \tag{G.50a}$$

enerji ilişkisi yoluyla W_{ext} terimi, gelen enerji dışında, saçılan ve soğuruma uğrayan enerjinin toplamına karşılık gelir ve

$$W_{ext} = -\oint_{\boldsymbol{s}} \boldsymbol{S}_{ext} \cdot d\boldsymbol{s} \tag{G.50b}$$

eşitliği ile belirlenir. Gelen dalga ile uyarılan nanoanten için hesaplanan saçılma ve soğurma tesir kesitleri, sırasıyla,

$$\sigma_{sc} = W_{sc}/|\boldsymbol{S}_{in}|, \tag{G.51a}$$

$$\sigma_{abs} = W_{abs}/|\boldsymbol{S}_{in}| \tag{G.51b}$$

olarak tanımlanır. Saçılma kesit alanı, parçacığın belirli bir dalga boyu ve kutuplanmaya sahip fotonu saçma yetisini ifade eder. Benzer olarak soğurma kesit alanı, fotonu soğurma yetisini ifade eder. Burada ($\hat{\boldsymbol{n}}_{\boldsymbol{0}}$ ve $\hat{\boldsymbol{e}}_{\boldsymbol{0}}$ yayılma ve kutuplanma doğrultusundaki birim vektörler olmak üzere),

$$\boldsymbol{E}_{in} = \hat{\boldsymbol{e}}_{\boldsymbol{0}} E_0 e^{i\sqrt{\varepsilon_d}\hat{\boldsymbol{n}}_{\boldsymbol{0}} k_0 \boldsymbol{r}} \tag{G.52a}$$

biçimindeki lineer kutuplu gelen dalganın taşıdığı birim alan başına güç akışı,

$$|\boldsymbol{S}_{in}| = {}^{1}\!/_{2}\, c\varepsilon_0\sqrt{\varepsilon_d}|E_0|^2 \tag{G.52b}$$

ile belirlenir. Buradan da sönümleme kesit alanı tanımlanır:

$$\sigma_{ext} = \frac{W_{ext}}{|\boldsymbol{S}_{in}|} = \sigma_{sc} + \sigma_{abs} \tag{G.53}$$

Bu parametre ışık madde etkileşiminde, EM alanlardan etkilenen toplam etkin kesit alanının bir ölçüsüdür. Her iki kesit alanıyla da ilgili olan sönümlenme faktörü (C_{ext}) de, literatürde, etkin kesit alanın (sönümlenme kesit alanının) parçacığın aydınlatma doğrultusuna dik kesit alanına normalize edilmesi olarak tanımlanır. Bu tez çalışmasında tasarlanan nanoanten yapılarının normalize saçılma ve soğurma tesir kesitleri, η_{sc} ve η_{abs} gösterimleri ile gösterilmiştir. Bir metal parçacığın normalize kesit alanının, fiziksel kesit alanından büyük olması; parçacığın gelen EM alana karşı gösterdiği etkileşme kesit alanının parçacığın gerçek boyutundan çok daha fazla olduğunu ifade eder.

Nanoparçacıktan saçılan alanın uzak alan (r>>λ) ifadesi dikkate alındığında, herhangi bir geometrideki ve dielektrik özellikteki parçacığın saçılan uzak elektrik alanı, $f(\hat{\boldsymbol{n}}, \hat{\boldsymbol{n}}_0)$ fonksiyonu keyfi bir $\boldsymbol{n}$ doğrultusunda saçılan elektrik alanın genlik ve fazını vermek üzere,

$$\boldsymbol{E}_{sc} = E_0 \frac{e^{i\sqrt{\varepsilon_d} k_0 r}}{\sqrt{\varepsilon_d} k_0 r} f(\boldsymbol{n}, \hat{\boldsymbol{n}}_0) \tag{G.54a}$$

formundadır [31]. Buradan saçılan uzak manyetik alan

$$\boldsymbol{H}_{sc} = \frac{\nabla \times \boldsymbol{E}_{sc}}{i\omega\mu_0} \tag{G.54b}$$

yoluyla hesaplanabilir ve W_{ext}, (G.50b) eşitliği kullanılarak belirlenebilir. (G.53) eşitliği yoluyla da sönümleme kesit alanı

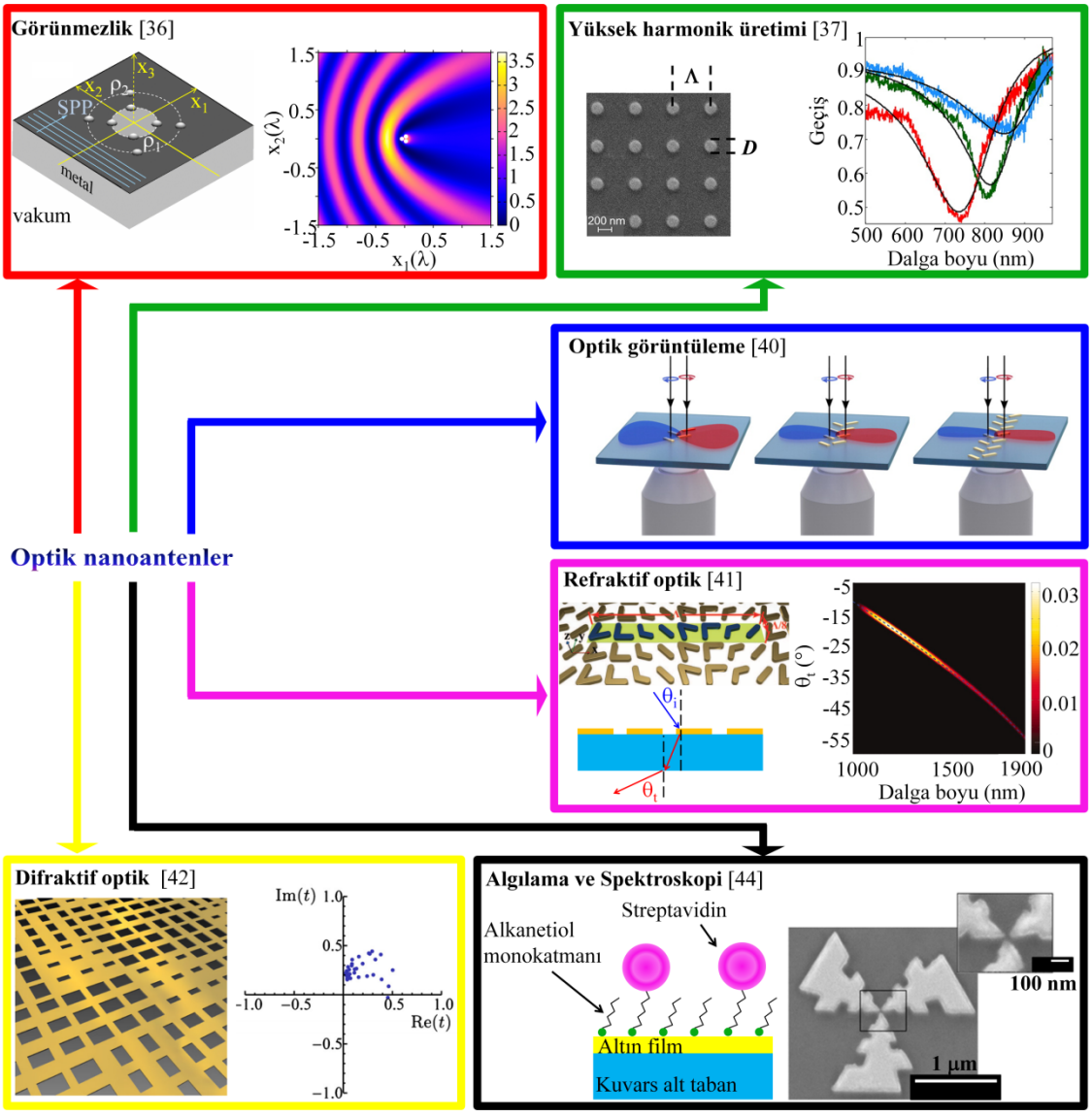
$$\sigma_{ext} = \frac{4\pi}{\varepsilon_d k_0^2} \mathrm{Im}\{\hat{\boldsymbol{e}}_0 \cdot f(\boldsymbol{n}, \hat{\boldsymbol{n}}_0)\} \tag{G.54c}$$

olarak yazılabilir. Bu eşitlik *optik teorem* olarak bilinir [32].

G.2.1.2. Optik Nanoantenler

Optik nanoantenler, mikrodalga ve radyo frekansı (RF) antenlerin optik spektrumda çalışacak şekilde boyutlandırılmış karşılığıdır [33]. Fakat iki önemli açıdan RF antenlerden farklıdır [34]. Bunlar, optik frekanslardaki yüksek kayba bağlı olarak mükemmel elektrik iletken varsayımının artık geçerli olmaması ve nano-ölçeklerdeki SPP gibi olgulara bağlı olarak yapıların spektral cevaplarının farklı olmasıdır [35]. Bu nano-ölçekli olguların en önemli sonuçlarından biri de dalga boyundan daha küçük yapılarda alan hapsedilmesi ve yakın alan yükseltmesidir. Nanometreler mertebesinde ve çalışılan dalga boyundan daha küçük boyutlara sahip optik nanoantenler, özellikle alan yoğun noktalarda (hot spot), yüksek alan depolayabilmeleriyle birçok alanda uygulama bulmaktadırlar (Şekil G.8). Optik nanoantenler; görünmezlik [36], yüksek harmonik üretimi [37], biyolojik ve kimyasal algılama [38,39], optik görüntüleme [40], refraktif optik [41], difraktif optik [42] ile akromatik metayüzeyler [43], yüzey yükseltmeli spektroskopiler [38,44], çeşitli VIS ve NIR uygulamaları [39,43,45] da

dahil olmak üzere çeşitli özel uygulamalarda kullanılmaktadırlar. Küçük boyutlarından dolayı optik nanoantenler için, üretim ve karakterizasyon yeteneği de dahil olmak üzere, çeşitli zorluklar söz konusudur. Bu zorluklar nanoantenlerin tasarım, üretim ve karakterizasyonu bakımından da yeni çözümlerin yani yeni uygulamaların yolunu açmaktadır.



Şekil G.8. Literatürdeki bazı optik nanoanten uygulamaları.

Verimli bir optik anten, sadece büyük ve spektral olarak ayarlanabilen kesit alanına değil, büyük alan yükseltmesine de neden olmalıdır [46]. LSPR'ler EM alanlarla etkileşen metalik nanoparçacıkların etkin kesit alanlarını etkin bir şekilde artırmaktadır

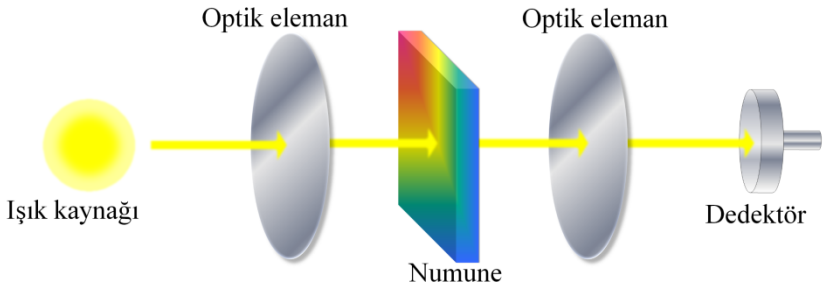
ve optik antenlerin (nanoantenlerin) gelen ışık ile kuvvetli olarak etkileşimini sağlamaktadır. Böylece çalışılan dalga boyundan daha küçük boyutlardaki metalik nanoparçacıklar için parçacık kesit alanını bastıran bir saçılma katkısı sağlanmaktadır. Şekil G.5 ve Şekil G.6'dan anlaşılacağı gibi, nanoparçacık geometrisi metal yapının optik özelliklerini ve LSPR oluşumunu etkileyecektir. Çünkü farklı simetriler boyunca indüklenen yük salınımları, farklı geometrilerdeki nanoparçacıkların farklı spektral konumlarda plazmonik modları desteklemesine neden olacaktır. Ayrıca plazmonik nanoantenlerin periodik dizilerinin optik özellikleri, düzlem üzerindeki dizilerde oluşan etkileşim nedeniyle çoklu, eş evreli (coherent) saçılmalar gösterirler. Bu da; dalga boyu, antenlerin dizi içerisindeki dizilim periyodu ile orantılı olduğunda, geçiş (*T*; transmittance) ve yansıma (*R*; reflectance) cevaplarında keskin spektral rezonanslara neden olur [47].

G.2.2. Optik Anten Sensörler

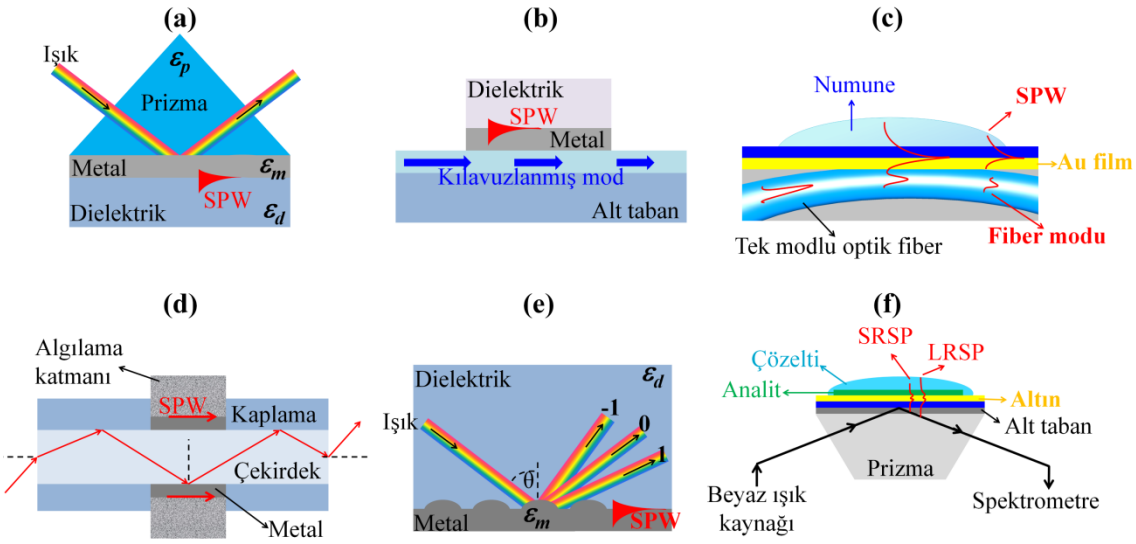
EM girişime bağışık olmaları, uzaktan algılama yapabilmeleri ve tek bir cihazla çoklu algılama yapabilmeleri ile optik biyosensörler; biyoalgılama uygulamalarında kullanılmaya başlamıştır [48,49]. Şekil G.9 ile verilen genel optik sensör konseptinde ışık kaynağından gönderilen optik frekanslardaki EM dalga optik elemanlar yoluyla algılanmak istenen numuneye gönderilir. Bu ışık kaynağı, uygulamaya göre tek-renkli (tek frekanslı/monokromatik) veya çok-renkli (çok frekanslı/polikromatik) bir ışık kaynağı olabilir. Numuneden yansıyan veya geçen ışık yine optik elemanlar yoluyla ışık dedektörlerine ulaştırılır ve detektörden alınan elektrik sinyali işlenerek gerekli değerlendirme yapılabilir. Bu değerlendirme; ışığın şiddeti, dalga boyu, fazı, kutuplanması, spektral dağılımı, faz yüzeyi, vb. parametrelerindeki değişimler dikkate alınarak yapılır. Dikkate alınan bu parametreler optik sensör tasarımındaki tüm optik element ve dedektörlerin tasarımını belirler.

Biyomedikal araştırmalar, sağlık, ilaç, çevresel izleme, ülke güvenliği ve savunma alanında geniş uygulamalara sahip olan optik biyosensörler güçlü algılama ve analiz araçlarıdır. Optik antenler ise optik ışımaları elektriksel işaretlere veya elektriksel işaretleri optik ışımalara verimli bir şekilde dönüştürebilen aygıtlardır. Bu antenler EM enerjiyi çok küçük boyutlarda tutabilirler ve yerel kaynaklardan uzak alanlara çok verimli bir şekilde iletebilirler. Bu özellikleri, ışık ile nano-madde arasında etkileşim

sonucu ortaya çıkmaktadır. Dalga boyundan daha küçük boyutlara sahip ve plazmon enerjisinden faydalanan; düz metal film, parçacık tabanlı ve açıklık tabanlı yapılar olarak sınıflandırılan [50,51] plazmonik nanoanten biyosensörler ise ışık madde etkileşimini arttırarak daha verimli bir algılama sağlamaktadırlar [48-51]. Şekil G.10'da düz yapılardaki plazmonik sensör düzenlemeleri verilmektedir. Bunlar prizma bağlaşımlı (Şekil G.10a), dalga kılavuzu bağlaşımlı (Şekil G.10b), yan fiber bağlaşımlı (Şekil G.10c), optik fiber bağlaşımlı (Şekil G.10d), ızgara bağlaşımlı (Şekil G.10e) ve LRSP (long-range surface plasmon-uzun menzilli yüzey plazmonu) ile SRSP (short-range surface plasmon-kısa menzilli yüzey plazmonu) (Şekil G.10f) düzenlemeleridir.



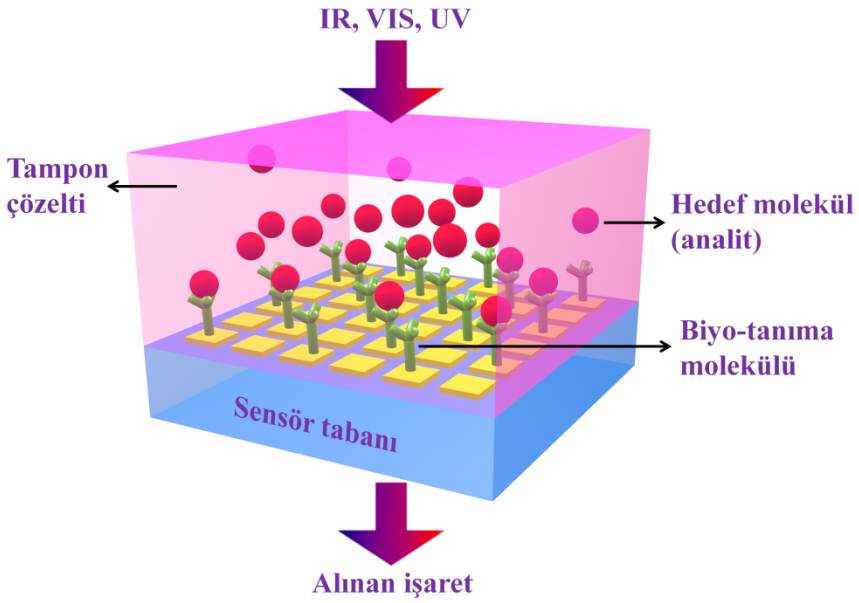
Şekil G.9. Temel optik sensör konsepti [48].



Şekil G.10. Çeşitli düz metal film için SPR (surface plasmon resonance; yüzey plazmon rezonansı) sensör düzenlemeleri [48-50].

Genel olarak, optik biyoalgılamada kullanılabilen iki algılama protokolü vardır: floresans-tabanlı algılama ve etiketsiz algılama [49]. Floresans-tabanlı algılamada hedef molekül ya da biyo-özellikli molekül (örneğin boyalar) floresans özelliklerine göre etiketlenirler. Floresans şiddeti hedef molekülün varlığını ve hedef ile biyo-özellikli moleküller arasındaki etkileşim gücünü gösterir. Floresans-tabanlı algılama oldukça hassas olmasına rağmen, algılama sınırı tek bir moleküle düştüğünde bir molekül işlemine engel olan zahmetli etiketleme işlemleri söz konusu olur. Her bir molekülün florofor sayısı hassas bir şekilde kontrol edilemediğinden, kantitatif analiz floresans sinyal eğilimi nedeniyle zordur. Buna karşılık, etiketsiz algılamada, hedef moleküller etiketlenmez ya da değiştirilmezler, kendi doğal formlarında algılanırlar. Bu tür bir algılama, gerçekleştirmek için nispeten kolay ve ucuzdur. Ayrıca moleküler etkileşimin kinetik ve kantitatif ölçümüne olanak sağlar. Kırılma indisi değişimi toplam numune kütlesi yerine yüzey yoğunluğu ya da numune konsantrasyonuna bağlıdır. Ek olarak, bazı etiketsiz algılama mekanizmaları moleküler etkileşim sonucu gerçekleşen kırılma indisi değişimini ölçer. Sonuç olarak algılama sinyali, numune hacmi ile azalmaz. Genellikle algılama yüzeyi üzerinde ya da algılama hacmindeki toplam analit (biyolojik veya olmayan numunelerde analizi yapılacak olan madde) sayısına bağlı olan floresans tabanlı algılama sinyalinden daha avantajlıdır. Floresans tabanlı ve etiketsiz algılama arasındaki tüm bu farklılıklara rağmen her iki protokol de optik sensörlerde yaygın olarak kullanılır ve biyomoleküllerin arasındaki etkileşimler ile ilgili önemli ve tamamlayıcı bilgi verir. Bu kategori altında kırılma indisi algılama, optik soğurma algılama ve Raman spektroskopi algılama dahil olmak üzere bir dizi tespit yöntemi vardır. Yansıma ve soğurma genelde kompleks olan kırılma indisinin gerçel ile sanal kısımları ile ilgilidir ve Kramers-Kronig ilişkileri ile birbirine bağıntılıdır [49]. Biyosensör gelişimi için, sinyal üretimi (sinyal artışı, gürültü azalması, vb.), akışkansal tasarımı (numune enjeksiyonu ve drenaj, numune tüketiminin azaltılması, algılama süresi azalma, vb.), yüzey immobilizasyon kimyası (analit yakalama verimliliği, belirgin olmayan bağlanma bölgesinin ortadan kaldırılması, vb.), algılama biçimi (doğrudan bağlama, sandviç tipi bağlama, rekabetçi bağlama, vb.) ve veri analizi (analit konsantrasyonu, bağlayıcı kinetik ile ilgili bilgi çıkarılması, vb.) gibi birçok konu dikkate alınmalıdır. Burada analit ile optik yapıları ve etkileşimleri üzerine durulacaktır. Plazmonik tabanlı biyosensörler çevresel ortamın kırılma indisi değişimine hassasiyet gösteren etkin etiketsiz (label-free) optik algılama araçlarıdır [49]. Temel etiketsiz optik

biyoalgılama konsepti de Şekil G.11'de gösterilmektedir. Bu konsepte göre nanoantenlerin kaplı olduğu sensör tabanı üzerine, analit biyomoleküllerin tutturulabilmesi için öncelikle uygun bir çözelti içindeki biyo-tanıma molekülü sensör yüzeyine tutturulur. Ardından aynı çözelti içinde bulunan analit biyomoleküller de sisteme eklenerek analitin biyo-tanıma molekülüne tutturulması sağlanır. Ancak, bu tez çalışmasında yapılan biyoalgılama uygulamasında, analit olarak polimer ve protein zarı kullanıldığından, polimer için dönel kaplama (spin-coating) yoluyla ve protein için damlatma usulü ile çalışılıp biyo-tanıma molekülleri kullanılmamıştır ve analit biyomolekül olarak kullanılan proteinin algılanması için üretilen anten dizileri üzerine damlatılan çözelti içindeki protein kurutularak Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR; Fourier Transform Infrared Spectroscopy) yoluyla nanoanten dizisinden yansıyan ve geçen IR ışık şiddeti ölçülmüştür ve anten spektrumlarındaki değişimleri belirlenerek algılama uygulamaları gerçekleştirilmiştir.



Şekil G.11. Etiketsiz (label-free) optik biyoalgılama konsepti.

G.3. Spektroskopi Teknikleri

Optik antenler, düşük konsantrasyonlardaki hedef moleküllerin moleküler titreşim sinyallerini arttırarak, bu molekülleri tanımlamada ve numunenin kimyasal bileşimini araştırmada elverişli bir teknoloji sunmaktadır [38,44]. Plazmonik nanoantenler de

SP'ler yoluyla sensör yüzeyindeki yakın EM alanları güçlendirerek, biyomolekülleri algılama, analiz etme ve görüntülemede etkin bir rol oynamaktadır. Çünkü nanofotoniğin önemli bir kısmını teşkil eden ve metaldeki elektron salınımı olan plazmonlar yoluyla ışığı oda sıcaklığında hapsedebilen plazmonik nanoanten dizileri ışık ile protein veya virüslerin etkileşimini sağlayarak; optik ile IR spektroskopi teknikleri olan ve biyoloji, kimya ile tıp alanlarındaki önemli uygulamalarda [52-56] biyomolekülleri algılamak, analiz etmek ve görüntülemek için güçlü yöntemler olan [44] yüzey güçlendirilmiş IR soğurma (SEIRA; Surface Enhanced Infrared Absorption) spektroskopisi, yüzey güçlendirilmiş Raman spektroskopisi (SERS; Surface Enhanced Raman Spectroscopy) ve yüzey güçlendirilmiş floresans spektroskopisi (SEFS; Surface Enhanced Fluorescence Spectroscopy) teknikleriyle algılama yapılabilmektedir. Bu nedenle plazmoniklerin optik biyo-sensör olarak kullanımı son yıllarda oldukça ilgi çeken bir konu olmuştur [16,57,58] ve kendilerine has Raman saçılmaları gösteren, kendilerine has IR soğurma piklerine sahip olan veya kendilerine has floresans özellikleri gösteren moleküllerin plazmoniklerle algılanmasında bu spektroskopik ölçümler önemli rol oynamaktadır.

Raman saçılması ve IR soğurma bir molekülün titreşim seviyeleri ile ışığın etkileşimlerinden kaynaklanmaktadır. Geleneksel Raman spektroskopisinde, moleküller karakteristik lazer saçılımı ile tespit edilir fakat standart yöntemin hassasiyeti daha düşüktür. Metal yüzeylere tutunmuş molekülü aynı Raman saçılımı ile tespit ederek, yükseltilmiş yakın alan yoluyla, algılama hassasiyeti önemli ölçüde arttırılabilir. SERS spektroskopisi temel konfigürasyonuna göre SPR sensör yüzeyine tutunmuş moleküllere yönlendirilen lazer ışık belirli bir Raman saçılımına neden olur. Dedektör yoluyla toplanan Raman sinyalleri işlenerek spektroskopik grafikler görüntülenir [59]. Raman spektrometresinin gelişiminin ardından, aynı yüzey güçlendirme etkisinin düşük frekanslarda gözlenmesi SEIRA spektroskopisini geliştirmiştir. Oda sıcaklığında metal parçacıklar arasında hapsedilen EM alan, SEIRA etkisi ile IR frekanslarda kat kat yükseltilebilmektedir. Hedef molekülün sensörün metal katmanına, katmanın işlevini bozmadan tutunması ve küçük miktarlardaki tek katman halindeki moleküllerin algılanmasına dayanan bu teknik, moleküllerin özgül IR titreşimsel grup frekansları algılamanın etkin bir yoludur [60,61]. SERS ve SEIRA spektroskopileri arasındaki temel farklardan biri ışık kaynağı olarak SERS için çoğunlukla VIS bölgede tek-renkli

ışık kaynağı kullanılması, SEIRA için ise çok-renkli IR ışık kaynağı kullanılmasıdır [61]. Çünkü moleküllerin titreşim modları hem Raman saçılması hem de IR soğurma ile aktifleşse de bu iki ayrı olgu, farklı kurallara dayanmaktadır. Saçılma sırasında, saçılan ışığın büyük bir kısmının enerjisi madde ile etkileşen ışığın enerjisine eşit olur ve bu tür elastik saçılma olayına Rayleigh saçılması denir. Elastik saçılma olayının yanı sıra, saçılan ışığın çok az bir kısmı elastik olmayan saçılma olayı olarak meydana gelir ise Raman saçılması adını alır. Dolayısıyla kendiliğinden Raman saçılması yüksek frekanstaki ışığın uyarmasının ardından oluşan, elastik olmayan saçılmaya dayanır ve moleküllerin polar olmayan gruplarının simetrik olmayan titreşimlerini incelemek için uygundur [62,63]. IR soğurma spektroskopisi ise titreşim modlarının doğrudan uyarılmasına dayanır ve moleküllerin polar gruplarının asimetrik titreşim özelliklerine erişim sağlar [62]. Bu da Raman ve IR soğurma spektroskopisi deneylerinde kullanılan kaynakların tabiatını ve çalışma frekansı farkını açıklamaktadır.

Lüminesans olgusunun bir türü olan floresans da, tek fotonun emilmesinden sonra meydana gelen iki ayrı elektronik seviye arasındaki ışımalı geçiş olarak tanımlanır [44,64]. Soğurulan ve yayılan fotonlar arasındaki enerji farkı moleküler titreşimler ya da ısı olarak ortaya çıkar. Dolayısıyla floresans, bir malzemenin belirli bir dalga boyunda ışığı soğurup daha uzun dalga boyunda ışık yaymasıdır. Bazı moleküllerin floresans vasıfları daha etkindir, belli bir dalga boyunda uyarıldığında kararlı olarak başka bir dalga boyuyla orantılı bir ışıma yaparlar, bunlara da floresan madde veya florofor denir. SEFS de SP'lerin yüksek değerde güçlendirilmiş EM alanı, plazmonik yapı yüzeyinde tutulan floroforları uyarmak için kullanmaktadır. Bu tür spektroskopilerde, florofor analit moleküllerin birikimi, arayüzü optik özelliklerini değiştirir ve SP rezonansta oluşan açısal kayma ile algılama yapılmaktadır. Bu nedenle eş zamanlı olarak kırılma indisi değişimini izleme yeteneği ve gerçek zamanlı floresans sinyalleri yüzey immünreaksiyon algılamada SEFS uygulamaları için büyük potansiyele sahip olabilmektedir [65].

Bu tez çalışmasında yapılan algılama ölçümlerinde Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR; Fourier Transform Infrared Spectroscopy) kullanılarak SEIRA spektroskopisi gerçekleştirildiğinden, aşağıda SEIRA spektroskopisi tekniği üzerinde ayrıntılı olarak açıklamalar yapılmıştır**.**

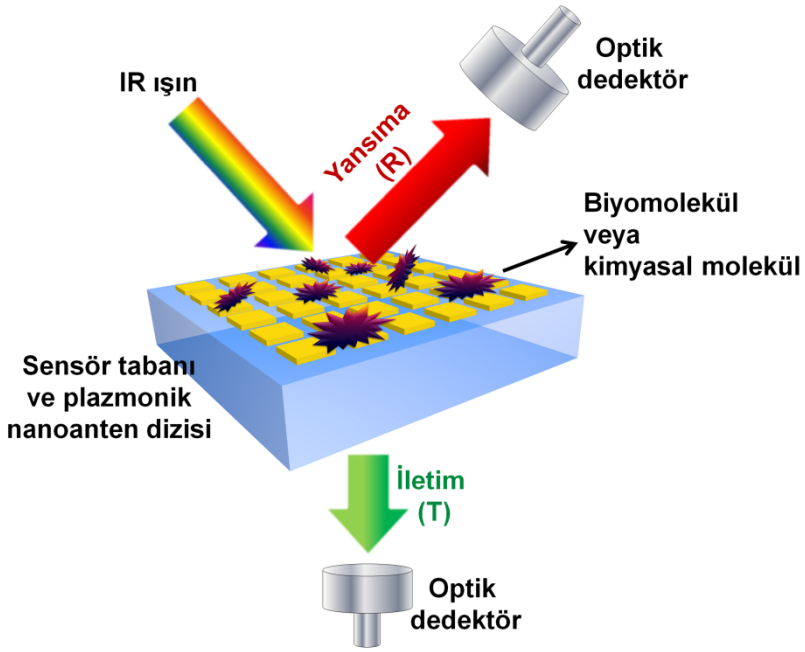
G.3.1. SEIRA Spektroskopisi

IR spektroskopi, bir molekülün atomlarının titreşimlerine dayalı bir tekniktir. Genellikle IR spektrum, numune ile etkileşen EM ışınım ile ve belirli bir enerjide gelen ışığın ne oranda soğurulduğunun belirlenmesi ile elde edilmektedir [66]. Böylece ilgili numunenin soğurma spektrumundaki bir pik, numunedeki bir molekülün bir titreşim frekansına karşılık gelir. Biyomoleküllerin soğurma spektrumlarında, özellikle MIR bölgede, gözlenen belirli frekanslardaki pikler organik fonksiyonel grupların karakteristik IR soğurma frekansları olarak adlandırılmaktadır [62,67]. Böylece numune bir biyomolekül olduğunda IR spektroskopi yoluyla kolaylıkla karakteristik soğurma pikleri belirlenebilir. Ayrıca IR spektroskopi ile çözelti içindeki analitlerin ya da katı, sıvı veya gaz halindeki numunelerin karakteristik soğurma spektrumları elde edilebilir.

Nanoantenlerin optik özellikleri; kimyasal ve biyolojik analitler pürüzlü metal yüzeylere, metal film adalarına veya farklı geometrilerdeki metal parçacıklara tutunduklarında belirgin olarak değişmektedir. Çünkü metal parçacıklar arasındaki yakın EM alan LSP'ler yoluyla kat kat yükseltilebilir ve biyomoleküllerin sahip oldukları organik fonksiyonel gruplara bağlı olarak, özellikle MIR bölgede sergiledikleri özgül IR soğurma titreşimlerinin, metal parçacıklar ile etkileşimi SEIRA etkisini ortaya çıkarmaktadır [68,69]. Bu etki sayesinde plazmonik nanoanten yüzeyine tutunmuş moleküller, kendi IR soğurmalarından kat kat fazla IR soğurma göstermektedir. Artan bu soğurmanın belirlenmesi de ilgili fonksiyonel grubun algılanmasını sağlar. 1990'larda keşfedilen SEIRA etkisi şu şekilde karakterize edilmektedir [69]:

- Güçlendirilmiş spektrumlar; iletim (transmission) [70], zayıflatılmış toplam yansıma (ATR; attenuated-total-reflection) [70], harici-yansıma [71] ve dağınık yansıma [72] modlarında elde edilebilmektedir. İletim modu tekniği, MIR'daki güçlü su soğurması nedeniyle sadece birkaç μm'lik protein katmanı ile sınırlıdır. Bu protein filmler IR'de geçirgen olan iki pencere arasında tutulmaktadır. ATR ve harici-yansıma modlarında ise ölçülen band şiddetleri IR ışığın geliş açısı ve kutuplanmasına bağlıdır [69].
- SEIRA etkisi metal yüzeye tutunan ilk tek katman biyomolekül için çok belirgindir [69].

- Yüzeye dik çift-kutuplu moment bileşenleri olan titreşim modları daha çok güçlendirilir. Moleküler yönelim bu bakımdan önemlidir [69].
- Nanoanten dizisi yüzeyindeki yakın EM alanların en çok yerelleştirildiği noktalardaki kaynağa göre normalize *E*-alan şiddeti ($|E|^2/|E_{in}|^2$), SEIRA güçlendirmesi [73] veya SEIRA kazancı [38,44] olarak, ($|E|/|E_{in}|$) ifadesi de yakın alan güçlendirmesi olarak adlandırılmaktadır.



Şekil G.12. SEIRA spektroskopisi için temel optik konfigürasyon.

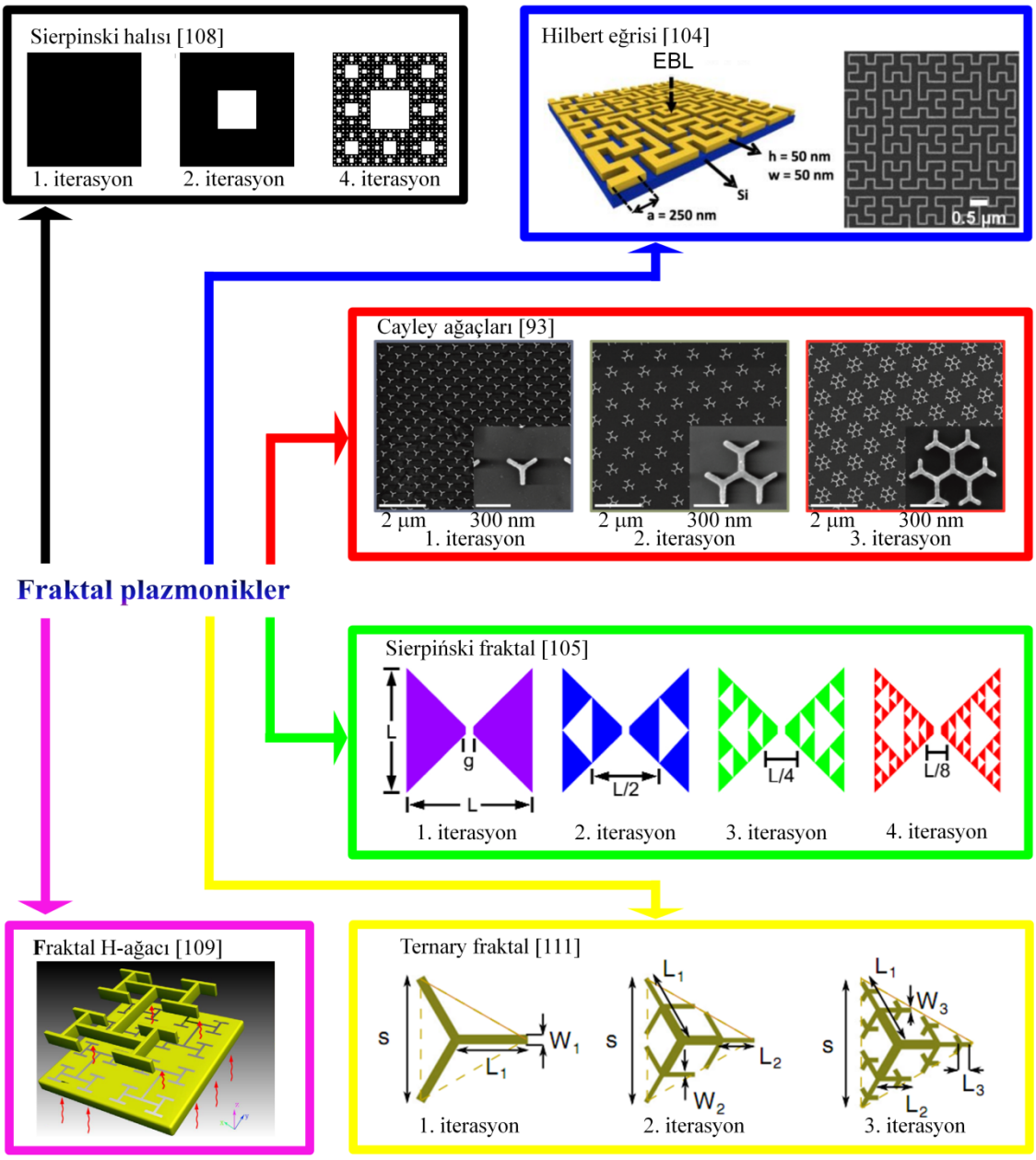
SPR sensörler genellikle bir dielektriğin kırılma indisi değişikliklerini ölçmek için kullanılır. Kırılma indisi değişimine karşı yüzey plazmon polaritonlarının (SPPs; surface plasmon polaritons) uyarılma koşulları; dalga boyu, kutuplanma, frekans gibi parametrelere bağlı olarak değişim gösterir. Sensör yüzeyindeki metalle bağ kurabilecek kimyasal özellikte olan biyomoleküllerin dielektrik karakteristiği sensör davranışını etkiler ve böylece bu davranışın belirlenmesi ve değerlendirilmesi ile algılama mümkün olur. Proteinler, deoksiribonükleik asit (DNA; deoxyribonucleic acid), peptitler, vb. biyomoleküllerin bir numune içindeki varlığını algılayabilen bu sensörlerin bunu yapabilmesi için hedef moleküllerin metal yüzeyi üzerine sabitlenmesi önemlidir. Bu tutturma işlemine immobilizasyon işlemi denir. Hedef molekülü metal yüzeye tutturmak

için en iyi yollardan biri özel bir antikor (biyotanıma molekülü; Şekil G.11) kullanmaktır. Antikorları yüzeye bağlama işlemi de fonksiyonlandırma prosedürü olarak adlandırılır. Ancak bu tez çalışmasında algılanacak moleküller sulu çözeltileri sensör yüzeyine damlatılarak veya dönel kaplama yoluyla nanoanten dizilerinin bulunduğu yonga yüzeyine kaplanmaktadır. Dolayısıyla immobilizasyon tekniği uygulanmamaktadır. İnce katmanlı molekülleri SPR sensör yoluyla algılamada temel optik SEIRA konfigürasyonu Şekil G.12'deki gibidir. İletimin ölçüldüğü konfigürasyon taban malzemesi geçirgen olan SPR sensörler için uygun konfigürasyondur [60]. Yansımanın ölçüldüğü konfigürasyonlar da taban malzemesi yansıtıcı olan SPR sensörler için uygundur [60]. SPR sensör yongasının yüzey tabakası ile temas halinde olduğu bir çözeltinin kırılma indisi değişikliklerine hassas bir SPR algılama sisteminin optik karakterizasyonunun sağlanması için (Şekil G.12) temel olarak IR ışın numune üzerine gönderilir. Ardından optik dedektör ile yansıma ve iletim sinyalleri algılanır. Sensör yongasının yansıma ve iletim spektrumlarında oluşan eğilmeler veya çökmeler ile bu değişimlerin bulunduğu frekanslar belirlenip değerlendirilerek söz konusu analitin ilgili moleküler titreşim modu tespit edilir. Böylece sensör yüzeyine kaplanan molekülün algılanması sağlanır.

Tez çalışması kapsamında üretilen plazmonik nanoanten dizilerinin biyoalgılama uygulamalarında, antenlerin optik karakterizasyonu için FTIR kullanılarak SEIRA spektroskopisi gerçekleştirilmiş ve bu sistem 2. bölümde ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

G.4. Fraktal Geometrili Plazmonik Nanoantenlerin Literatürdeki Yeri ve Önemi

Plazmonik nanoyapılar, çalışılan dalga boyundan daha küçük boyutlara sahip malzemeler içine EM dalgaları hapsederek elektron salınımları oluşturma yeteneğine sahiptir [74,75]. Yapının metal-dielektrik arayüzünde bulunan plazmon enerjisini kullanırlar [76]. Metal yüzeylerde tutulan bu enerji ışık madde etkileşimini arttırır ve küçük kimyasal ve biyolojik örneklerin algılamak için kullanılabilir. Son zamanlarda ışığı istenen dalga boylarında tutmak kontrol etmek ve manipüle etmek için, parçacık [77,78] ve açıklık [79-82] tabanlı, farklı geometrilerde plazmonik nanoantenler çalışılmaktadır. Yapının şekil ve boyutlarındaki değişikliklerden oluşan ayarlanabilir rezonans frekansları ve çoklu-rezonant davranışlar, bu nedenle de farklı geometrilerde nanoanten tasarımları yapmak, algılama uygulamaları için çok önemlidir [49,51,83-86].



Şekil G.13. Literatürdeki fraktal geometrili plazmonik yapı çalışmaları.

Metal nanoyapıların tasarım ve üretimindeki son gelişmeler; gelişmiş lineer ve lineer olmayan plazmonik ışık kaynakları [87], fotodedektörler [88], ultrahızlı modülatörler [89] ve biyosensörler [38,44] gibi nanocihazların mühendisliği için temel gereksinimler olan yerelleştirilmiş EM alanlar ile ayarlanabilir spektral rezonans oluşturma ve ışık manipülasyonu için yeni fırsatlar oluşturmaktadır. Son zamanlarda bu nanocihazların mühendisliğinde özellikle çoklu-spektral plazmonik nanoantenler önem kazanmıştır [38,44,90-92] ve yeni çalışmalar spektroskopik uygulamalar için geniş bir potansiyel sunmuştur. Bu çoklu-spektral uygulamaları, VIS ve IR bölgenin her ikisinde de

çoklanmş floresans ve Raman algılama uygulamalarının [38] yanı sıra çoklu-analitlerin yonga üstünde (on-chip) plazmonik algılanmalarını da içermektedir. Birçok uygulama bakımından, çok-bantlı plazmonik algılamayı verimli olarak sağlamak için, sabit ölçekli geometrili nanoantenlere göre fraktal nanoantenler benzersiz avantajlar sunmaktadır. Çünkü fraktal yapılar, çoklu uzunluk ölçülerindeki aynı şekilli rezonant elemanlar yoluyla çok-bantlı plazmon cevapları verebilmektedir ve rezonant piklerde birbirine benzeyen yüksek değerde güçlendirilmiş yerel EM alan dağılımları sergilemektedir [93-95].

Çok-frekanslı fraktal anten tasarımları elektrodinamikte; bir dizi fraktal anten yapısını inceleyen ve radyo frekanslarda (RF; Radio Frequency) çok-bantlı ve frekans bağımlı çalışmalarını gösteren Jaggard vd. (1990) [96], Puente vd. (1996) [97] ile Cohen vd. (1996) [98] gibi öncü eserlere kadar uzanan uzun bir hikayeye sahiptir. Süre gelen çalışmalarda fraktal paradigma, çok-bantlı yama anten [98], Hilbert [99] ile Peano antenler [100] ve RF ile tanımlama etiketleri (RFID; Radio Frequency Identification tags) [101], RF'de çalışan bir dizi cihazın tasarımına yol açmıştır. Bunları takiben ise mikrodalga ve terahertz (THz) frekanslarda çalışan çoklu-spektral elemanlar [83,102,103] ve optik spektrumda çalışan plazmonik nanoantenler [104-107] ortaya çıkmıştır. Farklı fraktal geometrili diğer çalışmalarda da, Sierpinski halısı [108], fraktal H-ağacı [109], Minkowski fraktalları [110], Purina fraktal anten [84], Tennary ağacı [111] ve Sierpinski eğrisi [112] gibi fraktal tabanlı yapılar çalışılmıştır. Ayrıca Cayley ağacı geometrisindeki fraktal plazmonik yapılar da incelenmiş ve NIR'dan MIR'a kadar olan geniş bir frekans sahasında çoklu-rezonant davranış elde edilmiştir [93].

Literatürde sunulan birçok fraktal anten tasarımı çok sayıda rezonant bandı karşılayabilmek için fraktal iterasyonu artışı ve genişleyen numune boyutu sergilemektedir. Bu da tasarımların kompakt yongalar ile integrasyonunu sınırlamaktadır. Çoklu-spektral plazmonik algılama uygulamaları da birim alan başına uyarılan rezonant bant sayısı olarak tanımlanan spektral yoğunluk [93] değerini arttıran nanoanten yapıları gerektirmektedir. Bu nedenle çalışılan dalga boyundan daha küçük alanlarda artan sayılarda rezonant modları destekleyen, çoklu-spektral rezonant nanoantenlerin geliştirilmesi zorlayıcı bir ihtiyaç olmaktadır. Bu amaçla bu tez çalışmasında, çoklu-analit veya çoklu titreşim modu algılama uygulamaları için IR ve VIS bölgede çalışan, Cesaro tabanlı [113] çoklu-spektral plazmonik nanoanten yapıları

tasarlanıp üretilmiştir ve yeni bir ters-Cesaro tip çoklu-spektral plazmonik nanoanten yapısı geliştirilerek üretilmiştir.

SEIRA tekniği özellikle MIR'da parmak izi (fingerprint region) bölgesinde umut verici bir yöntem olarak ortaya çıkmıştır [69,114]. Birden çok karakteristik spektral bandın varlığı da algılama işleminde çok-bantlı soğurmanın tasarımını gerektirmektedir. Optik frekanslarda çok-bantlı çalışma gösteren optik antenler konusunda fraktal olmayan birçok çalışma yapılmıştır [38,44] ve bu geleneksel tasarımlarla alan güçlendirmesi farklı lineer kutuplanmalar için sağlanmıştır. Bu da birçok polimer ve biyomoleküler sistemde, bağların geçiş çift-kutuplu momentleri iyi hizalanmış veya uyumlu olmadığı için bu tasarımların kullanımını sınırlamaktadır. Bu nedenle kutuplanma bağımsız, kompakt ve çok-bantlı algılama yapabilen nanoyapılara ihtiyaç doğmaktadır. Bu tez çalışmasında optik karakterizasyonları gerçekleştirilen nanoanten tasarımları kutuplanma bağımsız bir davranış sunmaktadır. Böylece bu nanoanten yapıları, kullanılan ışık kaynağının kutuplanmasından bağımsız olarak algılama gerçekleştirmede kullanılabilecek davranışa sahiptirler.

Daha önce sunulan, NIR'dan MIR'a kadar olan geniş bir frekans sahasında çoklu-rezonant davranışı sergileyen Cayley ağacı geometrisindeki fraktal plazmonik nanoantenler [93] iterasyonla artan cihaz birim hücre boyutuna sahip olmasıyla bu tez çalışmasında sunulan *ters-Cesaro tip* nanoanten dizilerinden (*U#1*) farklıdır. Ayrıca sabit birim hücre boyutunda tasarlanan *Cesaro-1 tip* nanoantenler (*U#2*) bu çalışmada üretilerek metal yüzeyin fazla olmasından kaynaklanan zorluklar dolayısıyla, Cayley ağacı çalışmasındaki gibi büyüyen birim hücre prensibinde de tasarlanarak daha yüksek alan güçlendirmelerine ve daha belirgin rezonant modlara sahip bir tasarım gerçekleştirilmektedir. Artan hücre boyutunda tasarlanan *Cesaro-2 tip* nanoantenler (*U#3*) ile de iterasyon sayısı arttıkça daha yüksek dalga boylarında eklenen yeni rezonant modlar sağlanmaktadır. Böylece Cesaro fraktal geometriye sahip bu nanoantenler, çoklu-spektral bölgede gelişmiş ışık-madde bağlaşımı ve çok kompakt optik sensörler ve aktif nanoplazmonik aygıtlar için yeni fırsatlar taşımaktadır.

Bu çalışmada, plazmonik Cesaro yapılardan ışığın yansıması ve kırılması fraktal geometrilerin farklı iterasyonlarına bağlı olarak sistematik bir biçimde belirlenmiştir. Bunun için CaF_2 geçirgen alt taban üzerine Cesaro yapıların farklı iterasyonları

şeklindeki Au antenler, Elektron Demet Litografisi (EBL; Electron-Beam Lithography) yöntemiyle üretilmiş ve ardından deneysel FTIR mikrospektroskopi ve FDTD metodu tabanlı sistematik EM modelleme ile NIR'dan MIR'a uzanan bölgede, az yer kaplayan cihaz alanında, kutuplanma bağımsız ve akort edilebilir çoklu-spektral bir nanodevre sunulmuştur. *Cesaro tip* (*U#2* ve *U#3*) ve *ters-Cesaro tip* (*U#1*) nanoantenlerin çoklu-spektral potansiyelinin ve fiziksel kaynağının anlaşılabilmesi için ilgili rezonant modlardaki yük dağılımı ile birlikte *E*-alan ve akım yoğunluğu dağılımı ile birlikte *H*-alan konumsal dağılımının incelenmesi de önemlidir. Ayrıca fraktal yapılar rezonant modlarda yüksek manyetik alan depolayabilir ve manyetik geçişlerin lokal kontrolünü gerektiren manyetik malzeme tasarımlarında bu özellikleri ile kullanılabilirler. Bu nedenle tasarlanan nanoyapıların belirlenen modlarda numune yüzeylerindeki yüksek değerde güçlendirilmiş yakın alan sergilediği de gösterilmiştir. Çok-kutuplu açılım yöntemi [115-123] ile de Cesaro yapılar tarafından desteklenen çoklu-spektral modlardaki plazmonik uyarılmaların kaynağı açıklanmaktadır. Son olarak da, bu yeni nanoanten devrelerinin titreşim spektroskopisi için potansiyelini belirlemek amacıyla, farklı nano-ölçekli kalınlıklardaki poli(metil metakrilat) (PMMA; (poly(methyl methacrylate)) katmanlarının üç ayrı titreşim bandının ve mor bakteriyorodopsin zarı proteinin güvenilir bir algılaması sağlanmıştır.

IR titreşim spektroskopisi polimerlerin veya biyomoleküllerin, IR'de titreşimsel olarak aktif olan karakteristik modlara sahip moleküler bağlarının özgül bilgisini sağlar. Bu yüzden IR titreşim spektroskopisi, "parmak izi bölgesi" (fingerprint region) olarak adlandırılan IR bölgede kimyasal algılama ve biyoalgılama için ilgi çekici bir yöntem olmaktadır. Yüzeylerden ve ince homojen filmlerden, yansıma ve geçiş için IR lineer titreşim spektrumunun yorumu ve analizi problemi literatürdeki bazı çalışmalarda açıklanmaktadır [124,125]. Klasik ince-film geçerliliği yaklaşımı için spektral simülasyonlar ve deneyler arasında karşılaştırmalar yapılmıştır. MIR spektrum aralığındaki yansıma ve geçiş modlarındaki FTIR verisi klasik Lorentz modeli yoluyla etkin ortam yaklaşımında tanımlanmaktadır. Ayrıca ν(C=O) karbonil germe modunun yükseltilmesi, yansıma genliğindeki değişimler kullanılarak literatürde çalışılmıştır [39,126]. PMMA'deki 1732 cm^{-1} civarındaki karbonil germe bandı, yansıma ve geçiş modlarında yoğun olarak [39,126], konvansiyonel yüzeyler ve altın filmler üzerinde ATR ile çalışılmıştır [114,127]. İnce filmlerde soğurma ve girişim etkilerini birlikte

hesaplayan Kramers-Kronig analizi [128] ile ölçümlerin kombinasyonu kompleks kırılma indisini elde etmek için kullanılmaktadır. Bu çalışmada tasarlanıp üretilen fraktal geometrili plazmonik nanoanten dizilerinin çoklu-spektral optik algılama potansiyellerini açıklamak için farklı nano-ölçekli kalınlıklardaki PMMA katmanlarının *üç farklı titreşim bandının*; boş anten ve analit kaplı anten spektrumlarının farkı yoluyla güvenilir bir algılaması sağlanmaktadır. Ayrıca bu tez çalışmasında üretilen fraktal plazmonik nanoanten dizilerinin çoklu-spektral biyoalgılama karakterinin belirlenmesi için zar protein olan bakteriyorodopsin (BR; bacteriorhodopsin) algılanmaktadır. Bakteriyorodopsin ışıkla aktive olan proton pompası Halobakteriyum bakterisinin hücre zarından elde edilen mor renkli zar proteinidir [129,130] ve bu çalışmada nanoantenlerin, geniş bir frekans bölgesinde tek bir molekülü çoklu-spektral olarak algılama kapasitesini belirlemek amacıyla numune olarak kullanılmaktadır. Mor bakteriyorodopsin proteini zarının literatürde plazmonik anten ile algılama uygulamasına rastlanmamıştır. Bu amaçla üretilen nanoantenler üzerine damlatılarak ve kurumaya bırakılarak oluşturulan tek kat BR zarının MIR bölgedeki *on farklı titreşim bandının* algılaması yapılmıştır. Bildiğimiz kadarıyla bu dünyada bir ilk olmuştur. Algılama deneylerine ait ayrıntılar tezin biyoalgılama kısmında sunulmuştur.

Hassasiyet sınırlamalarına bağlı olarak IR algılama sistemleri küçük miktarlardaki moleküllerin algılanmasında bazı problemlere sahiptir. Bu dezavantajı aşabilmek için araştırmacılar dalgaboyundan küçük açıklıklar çalışmaktadırlar [49]. Açıklık tabanlı yapılarından gelen avantajlarla, nanoaçıklık dizileri, kimyasal ve biyolojik numunelerin küçük moleküler yapılarının optik sondalamasında kullanılabilir [51,81-82]. Geleneksel açıklık dizilerinden farklı olarak, dalga boyundan daha küçük fraktal nanoaçıklıklar ise ayarlanabilir frekans yeteneği ve sınırlı bir hacim içinde ıraksayan yüzey alanı gibi eşsiz fraktal karakteristikleri [83] nedeniyle büyük bir potansiyele sahiptir. IR dalgaboyları için fraktal açıklıklardan elde edilen yüksek iletim ile fraktal açıklıklar yoluyla moleküler titreşim modu algılama sistemleri ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır [84,105,131].

Fraktal nanoaçıklık tasarımları bağlamında bu çalışmada *kare fraktal benzeri* (*U#4*) ve *diktörtgen fraktal* (*U#5*) *nanoaçıklık* anten dizileri de çalışılmıştır. *Kare fraktal benzeri nanoaçıklık* dizilerinin analitik, nümerik ve deneysel olarak optik karakteristikleri

belirlenmiştir. Önerilen nanoaçıklık dizilerinin spektral cevaplar ve yakın alan dağılımları FDTD metodu ile elde edilmiştir. Yapının kırılma indisi algılama karakteristikleri; yapının EM modellemesi deiyonize su (DIW; de-ionized water), izopropil alkol (IPA; isopropyl alcohol) ve gliserol gibi farklı indislere sahip çevresel ortamlar içinde yapılarak analiz edilmiştir. Frekans cevabının fiziksel kaynağı da bir dizi parametre değişimi simülasyonu ile belirlenmiştir. Nümerik çalışmalar sayesinde kare fraktal benzeri sistemin yüksek yakın alan kuvvetlendirme kapasitesi gösterilmektedir ve algılanmak istenilen molekülün titreşim frakansına ayarlama imkanı sunmaktadır. Ayrıca SEIRA uygulamaları için oldukça avantajlı olan yükseltilmiş bu yakın alanların sistemin yüzey koşullarına hassasiyetini arttırdığı da gösterilmektedir. MIR bölgede rezonanslardaki yüksek SEIRA güçlendirmesi ($|E|^2/|E_{in}|^2$) [73] gözlenmiş ve spektral cevabın geometrik parametrelere bağımlılığı belirlenmiştir. Analitik çalışmalarda ise yapının rezonant dalga sayıları için bağıntılar sunulmuştur. Bu bağıntılarla belirli geometrik parametre değerleri için kare fraktal benzeri nanoaçıklık dizisinin rezonans frekansları hesaplanabilir. Yüksek iletim ile yansıma karakteristiklerine ve yüksek alan yerelleştirmesi davranışına bağlı olarak önerilen algılama platformu yüksek hassasiyette spektroskopi uygulamaları için iyi bir aday olduklarını göstermektedir.

Çift-bant rezonanslara sahip *dikdörtgen fraktal geometrili nanoaçıklıkların* (*U#5*) nümerik olarak analiz edildiği bu çalışmada önerilen anten yapısının kırılma indisi hassasiyet karakteristikleri incelenmektedir. Spektral cevap ve yakın alan dağılımları *x*- ve *y*-kutuplu aydınlatma kaynaklarının her ikisi için de FDTD metodu kullanılarak elde edilmektedir. Önerilen nanoaçıklık dizilerinin optik karakterizasyonu çalışılmaktadır ve ikili rezonant davranışın fiziksel kaynağı parametre değişimi analizi ve yakın alan dağılımları ile ortaya çıkarılmaktadır. MIR bölgedeki ikili rezonanslarda yüksek yakın alan güçlendirmesi ($|E|^2/|E_{in}|^2$) elde edilmiş olup ikili spektral davranışın fraktal geometrinin geometrik parametrelere bağımlılığı belirlenmektedir. Bu nanoplazmonik anten dizisinin IR algılama uygulamalarındaki algılama kapasitesini göstermek için bir dizi kırılma indisi hassasiyeti testi yapılmaktadır [78]. Bu testlerde kırılma indisi hassasiyeti ve yonga üzerine DIW, silisyum dioksit (SiO_2) ile magnezyum florid (MgF_2) gibi farklı dielektrik malzemeler kaplanarak çevresel ortam kalınlığına bağımlılık hesaplanmaktadır. Çevresel kırılma indisi-rezonant dalga boyu ve çevresel

ortam kalınlığı-rezonant dalga boyu değişimleri doğrusal bağıntılar göstermektedir. Bu doğrusallık algılama uygulamaları için çok önemli olan sabit çevresel ortam kırılma indisi hassasiyeti ve çevresel kalınlık bağımlılığını [132] sağlamaktadır.

G.5. Tezin Amacı

Tezin amacı; biyolojik ve kimyasal algılama uygulamalarında kullanılabilecek, IR bölgede çalışan fakat geometrik boyutları değiştirilerek istenilen frekans bölgesinde çalışacak şekilde ayarlanabilen, özgün ve fraktal geometriye sahip, çoklu-spektral plazmonik nanoanten dizileri tasarlamak ve üretmek ve bu antenlerle uygun biyomoleküllerin ve kimyasalların algılanmasını sağlamaktır.

Bu amaçla Cesaro boşluk doldurma fraktal eğrisi [113] tabanlı iki sabit devre boyutunda iteratif değişen ve biri artan devre boyutunda iteratif değişen üç yeni, parçacık tabanlı, çoklu-spektral plazmonik fraktal nanoanten yapısı üretilmiş ve IR algılama uygulamaları için potansiyelleri deneysel olarak gösterilmiştir. Ayrıca fraktal tabanlı iki nanoaçıklık anten dizisi tasarlanarak, bu antenlerin IR algılama uygulamaları için potansiyelleri analiz edilmiştir.

Öncelikle fraktal gelişimine bağlı olarak tasarlanan Cesaro yapıların farklı iterasyonları şeklindeki Au nanoantenlerin nümerik ve deneysel spektral davranışları sistematik olarak belirlenmektedir. Bunun için nümerik analizlerde 0.375 μm ila 30 μm veya 0.375 μm ila 37.5 μm dalga boyu sahasında, çoklu-rezonant davranışa sahip normalize saçılma ve soğurma kesit alanları elde edilmiştir. Yine vakum içindeki her bir iteratif anten için nümerik olarak her bir rezonant dalga boyundaki normalize yükseltilmiş yakın alan ($|E|/|E_{in}|$) ve ($|H|/|H_{in}|$) konumsal dağılımları incelenmiştir. Bu dağılımların fiziksel kaynağını incelemek için de normalize edilmiş yük yoğunluğu $\mathrm{Re}\{\rho/\rho_0\}$ ile normalize edilmiş akım yoğunluğu $|J/J_0|$'nun konumsal dağılımları sistematik olarak belirlenmektedir. Çoklu-spektral modların fiziksel kaynağını açıklamak amacıyla ayrıca, çok-kutuplu açılım yöntemi [115-120,122,123] kullanılmıştır..

Açıklık tabanlı nanoantenlerin MIR bölgede, FDTD metodu [133] yoluyla, yansıma ile geçiş spektrumları analiz edilip rezonant dalga boylarında logaritmik SEIRA güçlendirmeleri, $\log_{10}(|E|^2/|E_{in}|^2)$, sunulmuştur. Spektral akort mekanısmasını belirlemek

için de geometrik parametre değişimlerine karşılık spektral değişimler analiz edilmiştir. Ayrıca kare fraktal benzeri nanoaçıklık anten dizilerinin akort mekanizması için regresyon metodu yoluyla formülasyonların sunulmuştur.

Elektron Demet Litografisi (EBL; Electron-Beam Lithography) kullanılarak CaF_2 alt taban üzerine Au kaplanarak üretilen nanoantenlerin, zaman domeninde sonlu farklar (Finite Difference Time Domain; FDTD) metodu [133] kullanılarak sistematik biçimde EM modellenmesi ile hesaplanan yansıma ve iletim spektrumları ve FTIR mikrospektroskopisi yoluyla ölçülen yansıma ve iletim spektrumları arasında çok iyi bir uyum gözlemlenmiştir. Böylece kutuplanma bağımsız, rezonant piklerde yüksek yakın alan güçlendirmelerine sahip, NIR'dan MIR'a kadar kontrol edilebilir, çoklu-spektral davranışa sahip ve iterasyonları az yer kaplayan sabit bir cihaz alanında değiştirilebilen fraktal geometrili plazmonik nanoanten yapıları tasarlanıp üretilerek optik karakterizasyonları gerçekleştirilmiştir. Ayrıca Cesaro tip nanoantenlerin iterasyonla artan devre boyutlarına sahip olan versiyonu da üretilerek ilgili nümerik ve deneysel analizleri sunulmaktadır. Fotolitoğrafi yöntemi ile oluşturulmuş havada asılı silisyum nitrat (SiN_x) zar üzerine kaplanmış Au katmanda EBL yöntemi ile üretilen açıklık tabanlı fraktal nanoanten dizilerinin optik karakterizasyonları FTIR yoluyla gerçekleştirilmiştir.

Üretilen fraktal geometrili plazmonik nanoanten yapılarının çoklu-spektral optik algılama potansiyellerini göstermek amacıyla, farklı nano-ölçekli kalınlıklardaki PMMA katmanlarının *üç ayrı titreşim bandının* fark spektrumu yoluyla güvenilir bir algılaması sağlanmıştır. Ayrıca çoklu-spektral biyoalgılama potansiyellerini belirlemek amacıyla da tek kat BR zarının MIR bölgedeki *on ayrı titreşim bandının* algılanması yapılmıştır.

1. BÖLÜM
NÜMERİK ANALİZ YÖNTEMİ

1.1. Giriş

Dielektrik malzemeler üzerine oluşturulan, belirli geometrilere sahip metal nanoparçacık ya da dielektrik-metal birleşimi üzerinde bütün katmanlar boyunca oluşturulan nanoaçıklık tabanlı plazmonik nanoanten yapıları [26,34,37,38,40-42,44,45,73,77,79,90-95,104-109,134]; spektral ölçümler için ayarlanabilir rezonans frekansları [77,79,134], çoklu algılamayı mümkün kılabilecek çoklu-rezonant davranışlar [38,44,79,90-93], SEIRA spektroskopisi gibi ölçüm teknikleri için yüksek çözünürlük sağlama, analit-sensör etkileşimini ve algılama hassasiyetini arttırma ve yükseltilmiş yerel yakın alan özellikleri [49] bakımından; dielektrik üzerine düz metal kaplama yapıdaki SPR sensörlere göre daha avantajlıdırlar. Bu bağlamda parçacık ya da açıklık tabanlı nanoanten dizilerinin üretilmeden önce IR ve VIS bölgedeki optik özelliklerinin öngörülebilmesi için FDTD yöntemi ile ilgili nanoanten geometrilerinin EM modellemeleri yapılarak istenen optik özellikleri nümerik olarak araştırılmaktadır. Bu kısımda FDTD yöntemi ve iteratif fraktal nanoanten geometrilerinin EM modelleme yöntemi kısaca açıklanmaktadır.

1.2. FDTD Metodu

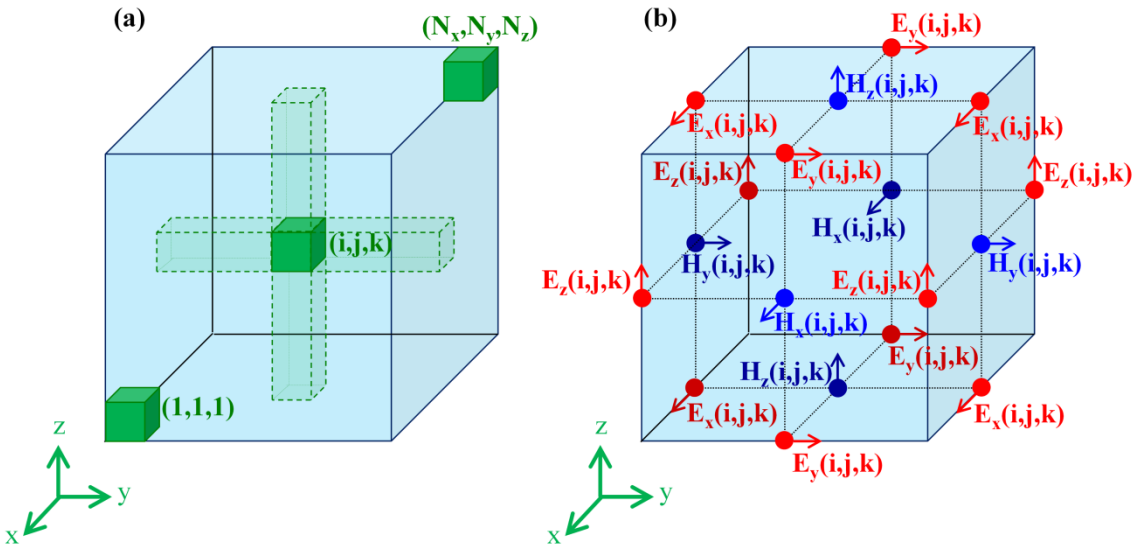
1980'lerin sonunda ve 1990'lardaki birçok gelişmeye bağlı olarak kısmi diferansiyel denklem tabanlı metodlar (özellikle de FDTD metodu), uygulanabilirliği geniş olan metodlar olarak ortaya çıkmıştır [135]. Kompleks ve dağıtıcı ortamlar, fotonik uygulamaları ve yüksek hız devreleri ile cihazların modellenmesi gibi uygulamaları içeren EM problemler de bu geniş alan içerisindedir. EM problemlerde, moment metodu, sonlu elemanlar yöntemi, sonlu hacimler yöntemi ve spektral yöntemler gibi

birçok faydalı nümerik metot kullanılmaktadır [135]. Basit bir yöntem oluşuyla her zaman avantaj sağlayan ve bilgisayar kaynakları kullanılarak yürütülebilen FDTD yöntemi pratik problemlerin çözümünde, kullanıcılar için hazır FDTD arayüzleri ile karşımıza çıkmaktadır [133]. Ayrıca FDTD yöntemi, Maxwell eşitliklerinin fiziksel anlamından hareket eden ve EM problemlerin çözümünde nispeten doğru sayısal bir çözüm yöntemidir.

FDTD yöntemi, diferansiyel formdaki Maxwell denklemlerinin zaman domeninde ayrıklaştırılarak çözülmesi esasına dayanır. İlk defa 1966 yılında Yee tarafından ortaya atılan bu yöntem, uzayın seçilen ayrık noktalarında üç elektrik alan ve üç manyetik alan bileşeninin hesaplanabilmesini sağlar [136]. Bu yönteme göre, Maxwell denklemlerinin anlaşılmasını sağlamak ve bilgisayarda işlemleri yürütmek için, izole edilmiş yüklerin ve akımların olmadığı bir ortam ele alınırsa Maxwell denklemleri şöyle yazılabilir:

$$\frac{\partial \boldsymbol{H}}{\partial t} = -\frac{1}{\mu} \cdot \nabla \times \boldsymbol{E}, \tag{1.1a}$$

$$\frac{\partial \boldsymbol{E}}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \cdot (\nabla \times \boldsymbol{H} - \sigma \boldsymbol{E}) . \tag{1.1b}$$



Şekil 1.1. (a) FDTD hücresi ve **(b)**Yee hücresi [136].

Buradaki EM alanları uzayda sürekli olarak ele almaktansa Şekil 1.1'deki gibi ayrık olarak dikkate alarak ayrık EM alanlar belirlenir. Malzeme; μ malzemenin birim hücredeki manyetik geçirgenliği, ε malzemenin birim hücredeki dielektrik geçirgenliği

ve σ malzemenin birim hücredeki iletkenliği olmak üzere; her biri bir μ, ε ile σ değerlerine sahip olan ve uygun bir şekilde boyutlandırılmış Yee hücrelerine bölünerek kolayca analiz edilebilir. Bunun için bilgisayar ortamında çözülmek üzere (1.1a,b) eşitlikleri merkezi sonlu farklara göre [137] ayrıklaştırılarak analiz edilmektedir.

Eşitlik (1.1a) ve (1.1b)'de verilen Maxwell denklemlerindeki *E*- ve *H*- alanlarına ait kısmi diferansiyel denklemlerdeki gerekli vektörel çarpımlar yapıldığında, manyetik alan;

$$\frac{\partial \boldsymbol{H}}{\partial t} = -\frac{1}{\mu} \cdot \begin{vmatrix} \hat{\boldsymbol{x}} & \hat{\boldsymbol{y}} & \hat{\boldsymbol{z}} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ E_x & E_y & E_z \end{vmatrix} \tag{1.2}$$

olarak elde edilir. Buradan da manyetik alanın bileşenleri;

$$\frac{\partial H_x}{\partial t} = \frac{1}{\mu}\left(\frac{\partial E_y}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial y}\right), \tag{1.3a}$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial t} = \frac{1}{\mu}\left(\frac{\partial E_z}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial z}\right), \tag{1.3b}$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial t} = \frac{1}{\mu}\left(\frac{\partial E_x}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial x}\right) \tag{1.3c}$$

olarak ifade edilir. Eşitlik (1.1b) kullanılarak,

$$\frac{\partial \boldsymbol{E}}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \cdot \begin{vmatrix} \hat{\boldsymbol{x}} & \hat{\boldsymbol{y}} & \hat{\boldsymbol{z}} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ H_x & H_y & H_z \end{vmatrix} - \sigma\left(\hat{\boldsymbol{x}}.E_x + \hat{\boldsymbol{y}}.E_y + \hat{\boldsymbol{z}}.E_z\right) \tag{1.4}$$

yazılır. Buradan elektrik alanın bileşenleri;

$$\frac{\partial E_x}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon}\left(\frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z}\right) - \sigma E_x, \tag{1.5a}$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon}\left(\frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x}\right) - \sigma E_y, \tag{1.5b}$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon}\left(\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y}\right) - \sigma E_z \tag{1.5c}$$

şeklinde yazılabilir. Böylece *E*- ve *H*-alanlarına ait üçer bileşen de elde edilmiş olur. Elde edilen bu altı eşitlik zaman bağımlı EM alan bileşenlerini vermektedir ve fazörel alan bileşenleri bilgisayar ortamında çözülmek üzere ayrıklaştırılarak analiz edilmektedir. Bu amaçla Taylor serisi kullanılarak merkezi sonlu farklar açılımı yapılır [135]. Burada ayrık alan ifadesi $u(i.\Delta x, j.\Delta y, k.\Delta z) = u_{i,j,k}^{n}$ olmak üzere konuma göre türevlerin ayrıklaştırılması;

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{u^a(i,j,k) - u^a(i-1,j,k)}{\Delta x}, \tag{1.6a}$$

$$\frac{\partial u}{\partial y} = \frac{u^a(i,j,k) - u^a(i,j-1,k)}{\Delta y}, \tag{1.6b}$$

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{u^a(i,j,k) - u^a(i,j,k-1)}{\Delta z} \tag{1.6c}$$

ve zamana göre türevlerin ayrıklaştırılması da

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{u^a(i,j,k) - u^{a-1}(i,j,k)}{\Delta t} \tag{1.7}$$

eşitlikleri yoluyla yapılır [137]. İlgili EM problemde; üç boyutlu uzayın eş özellikli $N_x \times N_y \times N_z$ dikdörtgen prizmadan oluştuğu varsayılarak (Şekil 1.1a), eşdeğer olan bu prizmaların boyutları $\Delta x \times \Delta y \times \Delta z$'dir ve her bir prizma FDTD hücresi olarak adlandırılmaktadır. Hücre numarasını veren (i, j, k) ise sırasıyla *x*'de, *y*'de ve *z*'deki hücre numarası olmak üzere tam sayılar ile belirlenmektedir. Üç *E*-alan ve üç *H*-alan bileşeni her hücrede farklı yerde konuşlandırılarak (Şekil 1.1b), aralarında zaman farkı olacak şekilde, istenen zaman değeri için iteratif olarak hesaplanabilmektedir. a tam sayı olan zaman adımı ve Δt hesaplama zaman aralığı olmak üzere $T_{FDTD} = a \times \Delta t$ hesaplama süresidir ve konumda ayrıklaşma yapıldıktan sonra zaman aralığı keyfi seçilemez. Ayrıca simüle edilen en yüksek frekanslı (en küçük dalga boylu, λ_{min}) bileşen için konum örneklemesi de dağınıma neden olmamalıdır [137]. Pratikte sayısal dağınım sınırı probleme göre değişmekle birlikte Δx, Δy ya da Δz'nin en büyüğü veya $\lambda_{\min}/100$ ila $\lambda_{\min}/4$ arasında seçilebilmektedir [137]. Dolayısıyla (1.3a-c) ve (1.5a-c) eşitliklerindeki alan bileşenlerinin (1.6a-c) ve (1.7) eşitlikleri kullanılarak ayrıklaştırılmış biçimleri aşağıdaki gibi belirlenir:

$$\frac{{H_x}^{\tilde{a}}(i,j,k)-{H_x}^{\tilde{a}-1}(i,j,k)}{\Delta t}=\frac{1}{\mu}\left(\frac{{E_y}^{a}(i,j,k)-{E_y}^{a}(i,j,k-1)}{\Delta z}-\frac{{E_z}^{a}(i,j,k)-{E_z}^{a}(i,j-1,k)}{\Delta y}\right), \tag{1.8a}$$

$$\frac{{H_y}^{\tilde{a}}(i,j,k)-{H_y}^{\tilde{a}-1}(i,j,k)}{\Delta t}=\frac{1}{\mu}\left(\frac{{E_z}^{a}(i,j,k)-{E_z}^{a}(i-1,j,k)}{\Delta x}-\frac{{E_x}^{a}(i,j,k)-{E_x}^{a}(i,j,k-1)}{\Delta z}\right), \tag{1.8b}$$

$$\frac{{H_z}^{\tilde{a}}(i,j,k)-{H_z}^{\tilde{a}-1}(i,j,k)}{\Delta t}=\frac{1}{\mu}\left(\frac{{E_x}^{a}(i,j,k)-{E_x}^{a}(i,j-1,k)}{\Delta y}-\frac{{E_y}^{a}(i,j,k)-{E_y}^{a}(i-1,j,k)}{\Delta x}\right), \tag{1.8c}$$

$$\frac{{E_x}^{a}(i,j,k)-{E_x}^{a-1}(i,j,k)}{\Delta t}+\sigma {E_x}^{a}(i,j,k)=\frac{1}{\varepsilon}\left(\frac{{H_z}^{\tilde{a}}(i,j,k)-{H_z}^{\tilde{a}}(i,j-1,k)}{\Delta y}-\frac{{H_y}^{\tilde{a}}(i,j,k)-{H_y}^{\tilde{a}}(i,j,k-1)}{\Delta z}\right), \tag{1.9a}$$

$$\frac{{E_y}^{a}(i,j,k)-{E_y}^{a-1}(i,j,k)}{\Delta t}+\sigma {E_y}^{a}(i,j,k)=\frac{1}{\varepsilon}\left(\frac{{H_x}^{\tilde{a}}(i,j,k)-{H_x}^{\tilde{a}}(i,j,k-1)}{\Delta z}-\frac{{H_z}^{\tilde{a}}(i,j,k)-{H_z}^{\tilde{a}}(i-1,j,k)}{\Delta x}\right), \tag{1.9b}$$

$$\frac{{E_z}^{a}(i,j,k)-{E_z}^{a-1}(i,j,k)}{\Delta t}+\sigma {E_z}^{a}(i,j,k)=\frac{1}{\varepsilon}\left(\frac{{H_y}^{\tilde{a}}(i,j,k)-{H_y}^{\tilde{a}}(i-1,j,k)}{\Delta x}-\frac{{H_x}^{\tilde{a}}(i,j,k)-{H_x}^{\tilde{a}}(i,j-1,k)}{\Delta y}\right). \tag{1.9a}$$

Burada *E*-alan değerleri $T_{\mathrm{FDTD}}=a\times\Delta t$'de ve *H*-alan değerleri $T_{\mathrm{FDTD}}=\left(a+\frac{1}{2}\right)\cdot\Delta t$'de olmak üzere farklı zamanlarda hesaplanır ve $\tilde{a}=a+\frac{1}{2}$'dir. Bu durum alan bileşenlerinin Yee hücresindeki konuşlanmasından kaynaklanmaktadır ve alanların (i,j,k) etiketi de $(i,j,k)=(i\times\Delta x, j\times\Delta y,\ k\times\Delta z)$ ile ayrıklaştırılır. Ayrıklaştırılmış alanları hesaplamada:

- Alan bileşenlerini hücre merkezine ötelemek için;

$$H_x(i,j,k)=\frac{1}{2}[H_x(i,j,k)+H_x(i+1,j,k)], \tag{1.10a}$$

$$H_y(i,j,k)=\frac{1}{2}\left[H_y(i,j,k)+H_y(i,j+1,k)\right], \tag{1.10b}$$

$$H_z(i,j,k)=\frac{1}{2}[H_z(i,j,k)+H_z(i,j,k+1)] \tag{1.10c}$$

eşitlikleri ile manyetik alan bileşenlerinin ortalaması alınırken,

$$E_x(i,j,k) = \frac{1}{4}[E_x(i,j,k) + E_x(i,j+1,k) + E_x(i,j,k+1) + E_x(i,j+1,k+1)], \quad (1.11a)$$

$$E_y(i,j,k) = \frac{1}{4}\left[E_y(i,j,k) + E_y(i+1,j,k) + E_y(i,j,k+1) + E_y(i+1,j,k+1)\right], \quad (1.11a)$$

$$E_z(i,j,k) = \frac{1}{4}[E_z(i,j,k) + E_z(i+1,j,k) + E_z(i,j+1,k) + E_z(i+1,j+1,k)] \quad (1.11c)$$

eşitlikleri ile de elektrik alanların ortalaması alınır.

- Zaman döngüsü ana döngüdür ve seçilen maksimum zaman adımı tamamlanıncaya kadar ana zaman döngüsü çalıştırılır.

- Sinuzoidal bir kaynak

$$V(a \times \Delta t) = V_0 \times \sin(2\pi f a \Delta t) \quad (1.12)$$

ile modellenebilir.

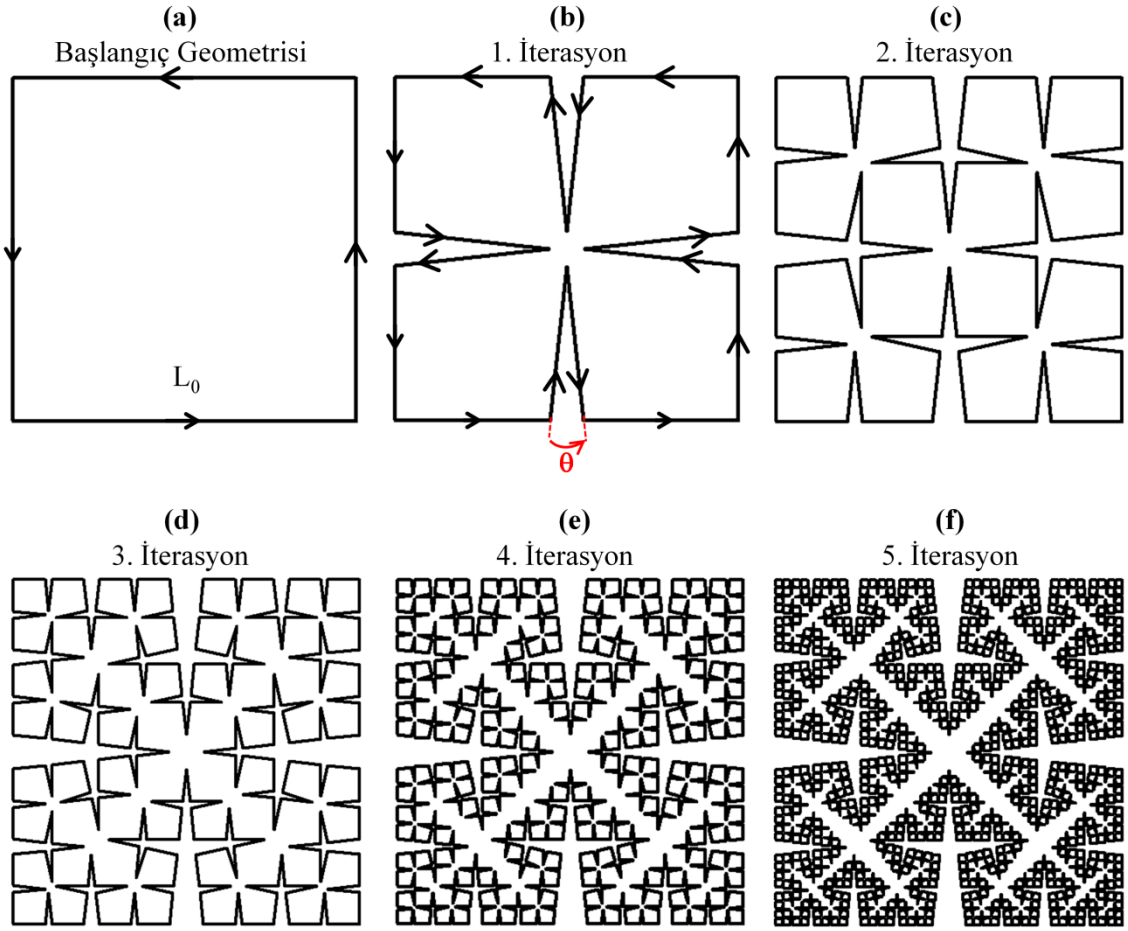
1.3. Lumerical FDTD Solutions Programının Özellikleri

Lumerical FDTD Solutions programı [133] literatürde sunulan birçok çalışmada kullanılan bir simülasyon programıdır. Bu tez çalışmasında da seçilen fraktal geometrili nanoantenlerin EM modellemesi bu programla yapılmıştır. Üç boyutlu plazmonik tabanlı nanoanten dizilerini tasarlamaya olanak sağlayan bu program ile; aynı anda pek çok analiz gerçekleştirilebilir ve tasarlanan nano-ölçekteki metalik yapıların UV, VIS veya IR bölgede spektral saçılma karakteristikleri ve bu karakteristiklere bağlı olarak uyarılan EM alan dağılımları ile akım ve yük dağılımlarının analiz edilip görsel olarak elde edilmesi mümkündür. Bu özelliğiyle Lumerical FDTD Solutions programı nanofotoniğin; plazmonikler, metamalzemeler, fotonik kristaller ve kırınım optiği, parçaçık ve yüzey saçılımı, mikroskopi ve litografi, sıvı kristaller, fotonik entegreli devreler, manyeto-optik ve güneş pilleri gibi pek çok alanında EM modelleme için kullanılmaktadır.

1.4. Fraktal Geometrilerin EM Simülasyon Programına Aktarılması ve Lindenmayer Sistemi

Koordinatlar kullanılmadan mantıksal olarak aksiyomlardan önermelere ilerlemeyi temel alan Öklit geometrisi uygulamaları [138] kesirli nesneleri hesaplamak için genişletilebilir. Öklit geometrisi örneği olan ve her bir alt ölçekte kendine benzeyen yapılara sahip olan fraktallar, tabiattaki çeşitli formları yakalamak için çok yakın geometrilerdir. Deterministik fraktallarda söz konusu ölçek ile bir alt ölçek arasında her zaman sabit bir ölçek faktörü vardır ve bu da deterministik fraktalların iteratif yapısını ortaya çıkarır. Doğadaki birçok geometrik oluşum fraktal geometrileriyle modellenebilmektedir ve bu bağlamda bilgisayar bilimlerinde grafik oluşturmak için kullanılmaktadırlar. Fraktal geometrilerin nanoanten tasarımlarında kullanılmaları ise; geniş bir frekans sahasında çoklu-rezonant davranış, iterasyon artışıyla aynı devre boyutunda genişleyen yüzey alanı ve geniş bir frekans sahasında logaritmik ölçekte oluşarak tayin edilebilen rezonant dalga boyları gibi avantajlar sağlamaktadır [83,84,93,102-112].

Cesaro fraktallar, topolojik boyutu $d = 1$ ve fraktal boyutu $D_F < 2$ olan boşluk doldurma eğrilerinin ilk örneklerinden olan Peano-Cesaro üçgen takımları olarak da bilinir. Fraktal boyutu Öklit boyutuna eşit olan Peano boşluk doldurma eğrisinden [113,138] farklı olarak Cesaro eğrileri; daha düzensiz, kendine benzeyen ve sabit bir ölçekleme faktörü ile Öklid düzlemini dolduran [139], aynı geometrik motifte olan sivri rezonant elemanların hiyerarşik bir yapılanmasına sahiptir. Bu tez çalışmasında nanoanten geometrisi olarak; literatürde belirlenen *Cesaro tip* ve bu tez çalışmasında geliştirilen *ters-Cesaro tip* geometrilerinin analizi sunulmaktadır. Bu fraktal yapıları, istenilen geometrik özelliklerin özelleştirilmesi ve optimize edilmesini sağlayan *Lindenmayer sistem* (*L-system; L-sistem*) uygulamasını kullanan özyinelemeli geometrik bir algoritma ile üretilebilir [140]. Bu çalışmada, L-sistemin karakter-dizisi (Turtle) dili uygulaması kullanılarak oluşturulan *Cesaro tip* ve *ters-Cesaro tip fraktal nanoantenlerin* farklı iterasyonları (jenerasyonları) araştırılmıştır. Karmaşık fraktal nesnelerin iteratif olarak üretilmesi için deterministik bir yaklaşım olan L-sistem, bir sembol alfabesi ve kurallar dizisidir.



Şekil 1.2. *Cesaro tip fraktal*ın ilk beş iterasyondaki geometrileri: **(a)** Aksiyom kodu ile çizilen başlangıç geometrisi, **(b)** Aksiyom kodunda yazılan kural ile çizilen 1. iterasyon geometrisi, **(c)** 1. iterasyon karakter-dizisi kodunda yazılan kural ile çizilen 2. iterasyon geometrisi, **(d)** 2. iterasyon karakter-dizisi kodunda yazılan kural ile çizilen 3. iterasyon geometrisi, **(e)** 3. iterasyon karakter-dizisi kodunda yazılan kural ile çizilen 4. iterasyon geometrisi ve **(f)** 4. iterasyon karakter-dizisi kodunda yazılan kural ile çizilen 5. iterasyon geometrisi.

Önyinelemeli yapının (fraktalın) çekirdeği olarak kabul edilen *aksiyom*dan başlayarak her bir sembolü daha uzun sembol dizilerine genişleten bu kurallar olan L-sistemler; Cesaro fraktallar da dahil olmak üzere birçok fraktal geometriyi üretmek için hesaplama bakımından verimli ve genel bir yöntem sağlar. Özellikle bu çalışmada L-sistem karakter-dizisi grafikleri kullanılarak farklı iterasyonlardaki *Cesaro tip* ve *ters-Cesaro tip nanoanten* yapıları oluşturulmuştur (Şekil 1.2 ve 1.3). Şekil 1.2 ve 1.3'de kullanılan bu algoritmalara göre karakter-dizisi grafikleri, karakter-dizisi kodu olarak adlandırılan, grafik ekranı üzerinde bir imleç tarafından yürütülen komut listesinin yönlendirdiği basit hareketlerdir. Örneğin bu çalışmada kullanılan semboller;

- **F**: ileri hareket et
- +: θ açısı kadar sağa dön
- -: θ açısı kadar sola dön

şeklindedir ve karakter-dizisinin ilk harfi F ise başlangıç açısı θ = 90° ve hareket ileri doğrudur. Aksiyom ve kurallardan hareketle geometrinin her bir iterasyonu için yeni bir karakter-dizisi kodu oluşur.

Tablo 1.1. *Cesaro tip fraktal*ın farklı iterasyonları ve farklı girinti açı değerleri için aksiyom ve kurallar.

	Aksiyom	**Kural**	
θ	**Başlangıç Geometrisi**	**1.İterasyon**	**Diğer İterasyonlar**
12.5° (θ_u=1.25°)	**F**72-**F**72-**F**72-**F**	**F** = **F**67-**F**134+**F**67-**F**	**F** = **F**67-**F**134+**F**67-**F**
20° (θ_u=5°)	**F**18-**F**18-**F**18-**F**	**F** = **F**16-**F**32+**F**16-**F**	**F** = **F**16-**F**32+**F**16-**F**
25° (θ_u=2.5°)	**F**36-**F**36-**F**36-**F**	**F** = **F**31-**F**62+**F**31-**F**	**F** = **F**31-**F**62+**F**31-**F**
30° (θ_u=5°)	**F**18-**F**18-**F**18-**F**	**F** = **F**15-**F**30+**F**15-**F**	**F** = **F**15-**F**30+**F**15-**F**

Şekil 1.2'deki *Cesaro tip fraktal* nanoanten geometrileri θ = 12.5° girinti açısı için tasarlanmış olup farklı girinti açısı için Cesaro tip fraktala ait aksiyom, kurallar ve birim dönüş açıları (θ_u) Tablo 1.1'de verilmektedir.

Tablo 1.2. 12.5°'lik girinti açısına sahip *Cesaro-1 tip fraktal*ın ilk beş iterasyonu için fraktal genişliği, minimum ayrıt uzunluğu ve yüzey alanı.

Girinti açısı θ=12.5°	Fraktalın genişliği (W_m) (nm)	Minimum ayrıt uzunluğu (L_m) (nm)	Yüzey Alanı (A_m) (μm^2)
1. iterasyon	W_1=6849	L_1= 3089	A_1= 42.803
2. iterasyon	W_2=6849	L_2= 1393	A_2= 39.443
3. iterasyon	W_3=6849	L_3= 628	A_3=36.7137
4. iterasyon	W_4=6849	L_4= 283	A_4=34.4873
5. iterasyon	W_5=6849	L_5= 128	A_5=32.6813

Fraktal geometriler literatürde fraktal boyutu (D_F) ve ölçek faktörü (k_f) adı verilen iki parametre ile tanımlanmaktadır. *m* fraktal iterasyon sayısı olmak üzere, fraktalın ölçek faktörü;

$$k_f = \frac{L_m}{L_{m-1}} \tag{1.13}$$

eşitliği ile belirlenmektedir. Burada L_m söz konusu iterasyonun minimum ayrıt uzunluğu iken L_{m-1} de bir önceki iterasyonun minimum ayrıt uzunluğudur. D_F literatürde birçok tanımlama ile karşımıza çıkmaktadır. Hausdorff boyutu olarak yapılan tanımlamada D_F

$$D_F = -\frac{\ln N_m}{\ln r_m} \tag{1.14}$$

formülü ile hesaplanmaktadır; burada N_m *m.* iterasyonda oluşan element sayısı iken, r_m de söz konusu iterasyonun minimum ayrıt uzunluğunun aksiyom minimum ayrıt uzunluğuna oranı olan ve

$$r_m = \frac{L_m}{L_0} \tag{1.15}$$

eşitliği ile belirlenen ölçek oranıdır. D_F, *kapasite boyutu* olarak tanımlanan D_C ile $D_F \leq D_C$ şartını sağlamalıdır ve D_C

$$D_C = \lim_{n\to\infty} \frac{\ln N_m(m)}{\ln r_m} \tag{1.16}$$

formülü ile ifade edilir [113,138,140-143]. Bu tanımlamalar doğrultusunda nanoantenlerin tasarımında kullanılan, *Cesaro tip fraktal* iterasyonları için belirlenen geometrik parametreleri içeren geometrik iterasyon tablosu Tablo 1.2 ve 1.4 olarak verilmektedir. Fraktal parametrelerini içeren parametrik iterasyon tablosu da Tablo 1.3 ve 1.5 olarak verilmektedir. Tablo 1.2 ve 1.3, 12.5°'lik girinti açısına ve artan *m* ile sabit kalan fraktal genişliğine, yani iterasyonla küçülen minimum ayrıt uzunluğuna sahip, *Cesaro-1 tip fraktal* geometrisi için; Tablo 1.4 ve 1.5 de 20°'lik girinti açısına ve artan *m* ile sabit kalan minimum ayrıt uzunluğuna yani iterasyonla büyüyen fraktal genişliğine sahip *Cesaro-2 tip fraktal* geometrisi için sunulmaktadır.

Tablo 1.3. Tablo 1.2'deki geometrik parametrelere bağlı olarak *Cesaro-1 tip fraktal*ın ilk beş iterasyonu için ölçek faktörü, ölçek oranı, element sayısı ve fraktal boyutu.

Girinti açısı θ=12.5°	Ölçek faktörü (k_f)	Ölçek oranı (r_m)	Element sayısı (N_m)	Fraktal boyutu ($D_F = D_C$)
1. iterasyon	0.45	0.45	4	1.736
2. iterasyon	0.45	$(0.45)^2$	16	1.736
3. iterasyon	0.45	$(0.45)^3$	64	1.736
4. iterasyon	0.45	$(0.45)^4$	256	1.736
5. iterasyon	0.45	$(0.45)^5$	1024	1.736

Tablo 1.5, Tablo 1.3'ten farklıdır. Çünkü *Cesaro-2 tip fraktal* için artan fraktal genişliği söz konusu olduğundan aksiyom minimum ayrıt uzunluğu $L_{0,}$ aksiyom genişliği W_0 ve aksiyon yüzey alanı A_0 olmak üzere ölçek faktörü ve ölçek oranı, sırasıyla,

$$k_{\mathrm{f}} = \frac{W_{\mathrm{m}-1}}{W_{\mathrm{m}}}, \tag{1.17}$$

$$r_{\mathrm{m}} = \frac{W_0}{W_{\mathrm{m}}} \tag{1.18}$$

olacaktır [113].

Tablo 1.4. 20°'lik girinti açısına sahip *Cesaro-2 tip fraktal*ın ilk beş iterasyonu için fraktal genişliği, minimum ayrıt uzunluğu ve yüzey alanı ($L_0 = W_0 = 939$ nm ve $A_0 = 0.88157$ μm^2'dir).

Girinti açısı θ=20°	Fraktalın genişliği (W_m) (nm)	Minimum ayrıt uzunluğu (L_m) (nm)	Yüzey Alanı (A_m) (μm^2)
1. iterasyon	$W_1 = 939$	$L_1 = 400$	$A_1 = 0.81231$
2. iterasyon	$W_2 = 2204$	$L_2 = 400$	$A_2 = 4.1986$
3. iterasyon	$W_3 = 5173$	$L_3 = 400$	$A_3 = 22.025$
4. iterasyon	$W_4 = 12143$	$L_4 = 400$	$A_4 = 116.92$
5. iterasyon	$W_5 = 28504$	$L_5 = 400$	$A_5 = 5185.9$

Tablo 1.5. Tablo 1.4'deki geometrik parametrelere bağlı olarak *Cesaro-2 tip fraktal*ın ilk beş iterasyonu için ölçek faktörü, ölçek oranı, element sayısı ve fraktal boyutu.

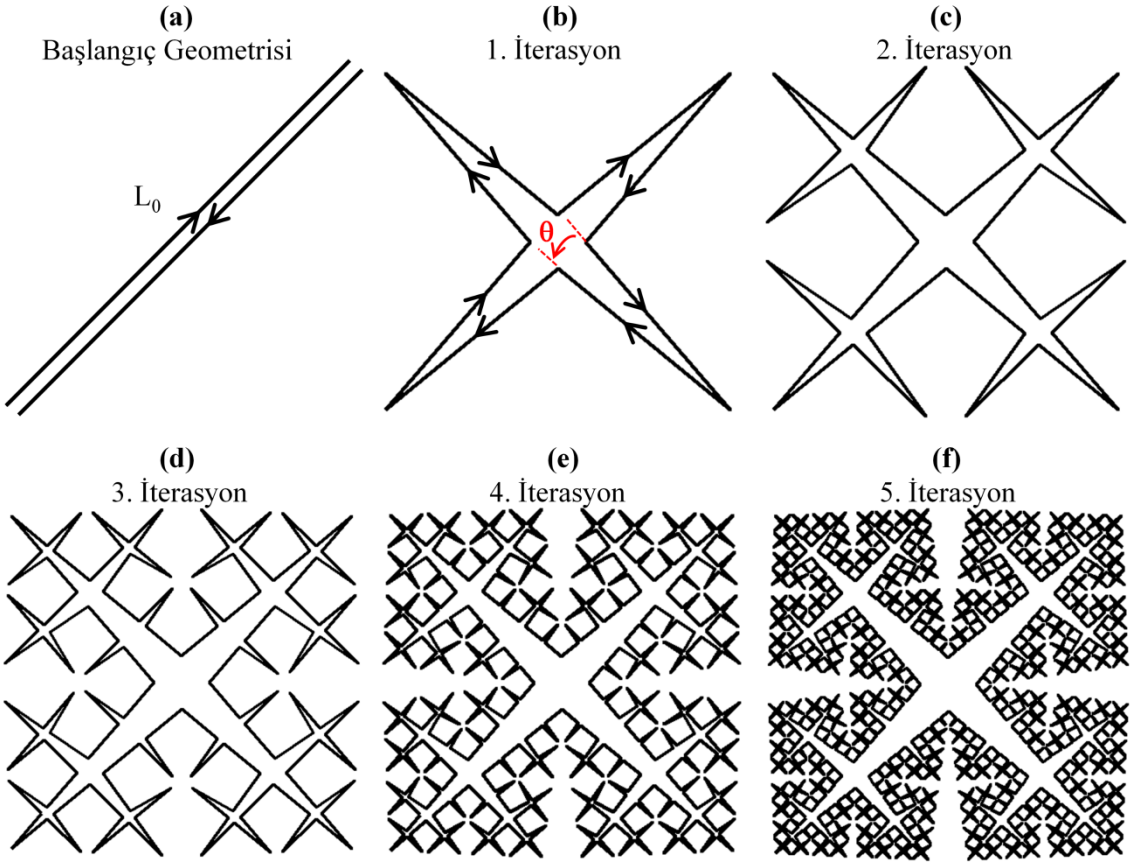
Girinti açısı θ=20°	Ölçek faktörü (k_f)	Ölçek oranı (r_m)	Element sayısı (N_m)	Fraktal boyutu ($D_F = D_C$)
1. iterasyon	0.426	0.426	4	1.6246
2. iterasyon	0.426	$(0.426)^2$	16	1.6246
3. iterasyon	0.426	$(0.426)^3$	64	1.6246
4. iterasyon	0.426	$(0.426)^4$	256	1.6246
5. iterasyon	0.426	$(0.426)^5$	1024	1.6246

Benzer olarak Şekil 1.3'deki *ters-Cesaro tip fraktal* nanoanten geometrileri θ = 10° sivrilik açısı için tasarlanmış olup farklı sivrilik açısı için *ters-Cesaro tip fraktal*a ait aksiyom, kurallar ve birim dönüş açıları (θ_u) Tablo 1.6'da verilmektedir.

Tablo 1.6. *Ters-Cesaro tip fraktal*ın farklı iterasyonları ve farklı sivrilik açı değerleri için aksiyom ve kurallar.

	Aksiyom	**1. Kural**	**2. Kural**
θ	**Başlangıç Geometrisi**	**1.İterasyon**	**Diğer İterasyonlar**
10° (θ_u=5°)	9-**F**36-**F**	**F** = +**F**16+**F**34-**F**16+**F**+	**F** = **F**17+**F**34-**F**17+**F**
20° (θ_u=5°)	9-**F**36-**F**	**F** = 2+**F**14-**F**36+**F**14-**F**2+	**F** = **F**16+**F**32-**F**16+**F**
25° (θ_u=2.5°)	18-**F**72-**F**	**F** = 5+**F**26-**F**62+**F**26-**F**5+	**F** = **F**31+**F**62-**F**31+**F**
30° (θ_u=5°)	9-**F**36-**F**	F = 3+**F**12-**F**30+**F**12-**F**3+	**F** = **F**15+**F**30-**F**15+**F**

Üretilecek nanoantenler için sabit devre boyutunu yani sabit anten periyodunu sağlamak üzere belirlenen boyutlara ve sivrilik açı değerine sahip olan *ters-Cesaro tip fraktal* geometrisi için geometrik parametreleri içeren geometrik iterasyon tablosu Tablo 1.7 olarak ve fraktal parametrelerini içeren parametrik iterasyon tablosu da Tablo 1.8 olarak verilmektedir.



Şekil 1.3. *Ters-Cesaro tip fraktal*ın ilk beş iterasyondaki geometrileri: **(a)** Aksiyom kodu ile çizilen başlangıç geometrisi, **(b)** Aksiyom kodunda yazılan 1.kural ile çizilen 1. iterasyon geometrisi, **(c)** 1. iterasyon karakter-dizisi kodunda yazılan 2.kural ile çizilen 2. iterasyon geometrisi, **(d)** 2. iterasyon karakter-dizisi kodunda yazılan 2.kural ile çizilen 3. iterasyon geometrisi, **(e)** 3. iterasyon karakter-dizisi kodunda yazılan 2.kural ile çizilen 4. iterasyon geometrisi ve **(f)** 4. iterasyon karakter-dizisi kodunda yazılan 2.kural ile çizilen 5. iterasyon geometrisi.

Tablo 1.7. 10°'lik girinti açısına sahip *ters-Cesaro tip fraktal*ın ilk beş iterasyonu için fraktal genişliği, minimum ayrıt uzunluğu ve yüzey alanı.

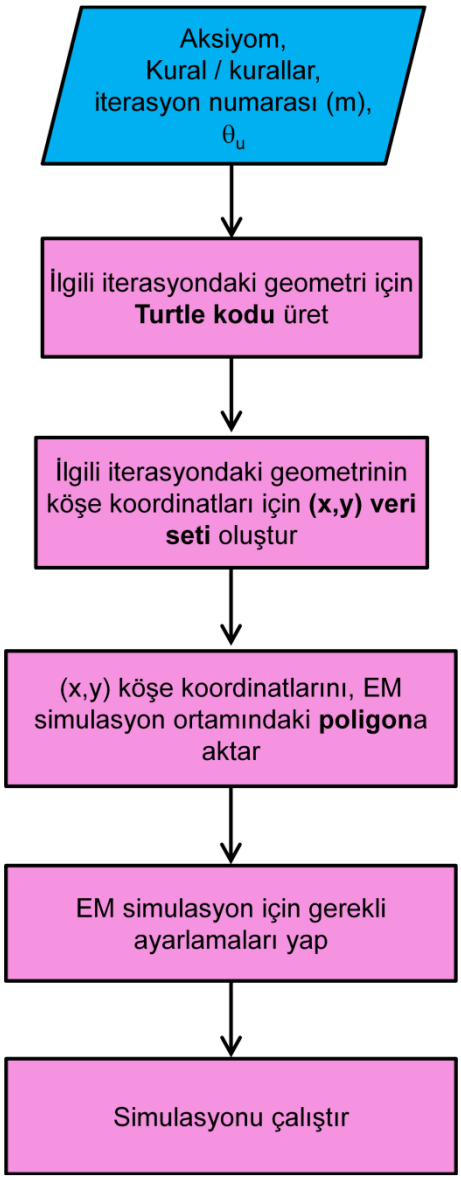
Sivrilik açısı θ=10°	Fraktalın genişliği (W_m) (nm)	Minimum ayrıt uzunluğu (L_m) (nm)	Yüzey Alanı (A_m) (μm^2)
1. iterasyon	$W_1 = 6849$	$L_1 = 4470$	$A_1 = 6.9528\times$
2. iterasyon	$W_2 = 6849$	$L_2 = 2056$	$A_2 = 9.8886$
3. iterasyon	$W_3 = 6849$	$L_3 = 946$	$A_3 = 12.373$
4. iterasyon	$W_4 = 6849$	$L_4 = 435$	$A_4 = 14.474$
5. iterasyon	$W_5 = 6849$	$L_5 = 200$	$A_5 = 16.252$

Tablo 1.8. Tablo 1.7'deki geometrik parametrelere bağlı olarak *ters-Cesaro tip fraktal*ın ilk beş iterasyonu için ölçek faktörü, ölçek oranı, element sayısı ve fraktal boyutu.

Sivrilik açısı θ=10°	Ölçek faktörü (k_f)	Ölçek oranı (r_m)	Element sayısı (N_m)	Fraktal boyutu ($D_F = D_C$)
1. iterasyon	0.46	0.46	4	1.7852
2. iterasyon	0.46	$(0.46)^2$	16	1.7852
3. iterasyon	0.46	$(0.46)^3$	64	1.7852
4. iterasyon	0.46	$(0.46)^4$	256	1.7852
5. iterasyon	0.46	$(0.46)^5$	1024	1.7852

*L-sistem alfabesi*ne göre her bir iterasyonun karakter-dizisi kodu değerlendirilerek ilgili iterasyondaki geometrinin (*x,y*) koordinatları belirlenebilir. Belirlenen bu koordinatlar yardımıyla ilgili fraktal nanoanten geometrisi FDTD simülasyon yazılımına [133] aktarılabilir ve gerekli simülasyon parametreleri ayarlanabilir. Böylece fraktal geometrilerdeki nanoantenlerin EM modellemesinin yapılmasında izlenilen aşamalar Şekil 1.4'deki gibidir.

Fraktal antenlerin EM modellemesinde 3D-FDTD metodu kullanılarak aksi belirtilmedikçe vakumdaki fraktal antenler analiz edilip tüm eksenlerde mükemmel şekilde uyumlu katmanlar seçilmiştir. Tüm simülasyonlar *x*-kutuplu ışık kaynağı için yapılmıştır ve anten yapısını kapsayan bölge düzgün 3 nm × 3 nm × 3 nm'lik hücrelere bölünmüştür. Au ve Ti dağınım verileri Palik (1985) [3]'ten alınmış olup CaF_2 dağınım verisi Li (1980) [144]'den alınmıştır. Saçılma ve soğurma kesit alanı analizlerinde 0.375 μm ila 30 μm (10 THz ila 800 THz) veya 0.375 μm ila 37.5 μm (8 THz ila 00 THz) spektral aralığında analizler yapılırken FTIR ölçümlerinin getirdiği sınırlamalar nedeniyle yansıma ve geçiş spektrumları 1.3 μm ila 16.7 μm (18 THz ila 230 THz) aralığında simüle edilmiştir. *E*-alan ve *H*-alan dağılımları, yine ilgili rezonant modlardaki normalize edilmiş yük yoğunluğu ρ ve akım yoğunluğu *J* dağılımları ise söz konusu rezonant dalga boylarında analiz edilmiştir. Üretilip ölçümü alınan anten dizileri ile karşılaştırma söz konusu olduğundan yansıma ve geçiş spektrumu simülasyonlarında antenler CaF_2 alt taban üzerine yerleştirilip *x*- ve *y*- eksenlerinde periodik dizilmiş olup *x*- ve *y*-doğrultusunda periodik sınır koşulları, *z*-doğrultusunda eksenlerde mükemmel şekilde uyumlu katmanlar olarak seçilmiştir.



Şekil 1.4. *Cesaro tip* ve *ters-Cesaro tip* fraktal geometrilerinin EM modellemesi için izlenen algoritma.

1.5. Çok-Kutuplu Açılım Ayrıştırma Analizi

Çoklu-rezonant yapıların her bir rezonant modunun fiziksel temelini incelemek için yapılan çok-kutuplu açılım ayrıştırma analizi; toroidal çoklu-kutup momentleri de içeren moment türlerini araştıran ve karmaşık nanoyapılardaki indüksiyon akımının analizi ile ilgili olan bir analizdir [118-121]. Özellikle kartezyen koordinatlar için, nanoyapılardan şaçılan uzak alan gücüne katkı sağlayan momentlerin belirlenmesi etkin

bir çok-kutuplu açılım türüdür [119,120]. Toroidal momentler; ilginç, resiprokal olmayan davranışlarla sonuçlanan [145] manyetik girdapların uyarılan mıknatıslanmasının kıvrılması ile ilişkisi [115-117] tarafından karakterize edilen malzemeler olan ferrotoroidlerle ve manyeto-elektrikli etkinin zengin fiziğini destekleyen yoğun madde fiziği ile anlaşılabilir. Plazmonik ve yeterince büyük kırılma indisine sahip dielektrik yapılarda optik frekanslarda belirli toroidal cevaplar elde edilebilir [120]. Elektrik çoklu-kutuplar yük salınımlarından kaynaklanıp yük düzenlemelerinden oluşurken, manyetik çoklu-kutuplar akım dolanımlarından kaynaklanıp akım döngüsü düzenlemelerinden oluşur (Şekil 1.5). Toroidal çift kutuplar; bir torus yüzeyindeki poloidal akımlarının durumuna benzer olarak, manyetik momentlerin kapalı döngülerini oluşturan, uyarılmış akımlarım belirli düzenlemelerine bağlı olarak oluşmaktadır (Şekil 1.5) [122].

EM geçiş veya yansıma spektrumları; elektrik, manyetik ve toroidal momentler gibi çok-kutuplu momentlerin ışınım katkılarına aşağıdaki formüller yardımıyla ayrıştırılabilir:

Çift-kutuplu elektrik moment:

$$\boldsymbol{p} = \frac{1}{i\omega}\int \boldsymbol{J} d^3\, r, \tag{1.19}$$

çift-kutuplu manyetik moment:

$$\boldsymbol{m} = \frac{1}{2c}\int (\boldsymbol{r} \times \boldsymbol{J}) d^3\, r, \tag{1.20}$$

çift-kutuplu toroidal moment:

$$\boldsymbol{t} = \frac{1}{10c}\int [(\boldsymbol{r}.\boldsymbol{J})\boldsymbol{r} - 2r^2\boldsymbol{J}]\, d^3 r, \tag{1.21}$$

dört-kutuplu (kuadrupol) elektrik moment:

$$\boldsymbol{Qe}_{\alpha\beta} = \frac{1}{i2\omega}\int \left[r_\alpha J_\beta + r_\beta J_\alpha - \frac{2}{3}(\boldsymbol{r}.\boldsymbol{J})\delta_{\alpha\beta}\right] d^3 r, \tag{1.22}$$

dört-kutuplu manyetik moment:

$$\boldsymbol{Qm}_{\alpha\beta} = \frac{1}{3c}\int\left[(\boldsymbol{r}\times\boldsymbol{J})_{\alpha}\mathrm{r}_{\beta} + (\boldsymbol{r}\times\boldsymbol{J})_{\beta}\mathrm{r}_{\alpha}\right]\mathrm{d}^{3}\mathrm{r} \tag{1.23}$$

(1.19-1.23) eşitlikleri, nanoyapıdaki hacim akım yoğunluğunun yerelleştirilmiş dağılımları kullanılarak Kartezyen koordinat siteminde hesaplanmaktadır. Bu eşitliklerde, *c* boş uzaydaki ışık hızı, *r* merkezden (x, y, z) noktasına olan mesafe ve α, β x, y, z koordinatlarından ikisidir [119,120]. Bu çok-kutuplu momentlerin saçılmaya katkıları, ayrıştırılmış saçılan uzak alan gücü olarak;

$$I_p = \frac{2\omega^4}{3c^3}|\boldsymbol{p}|^2, \tag{1.24}$$

$$I_m = \frac{2\omega^4}{3c^3}|\boldsymbol{m}|^2, \tag{1.25}$$

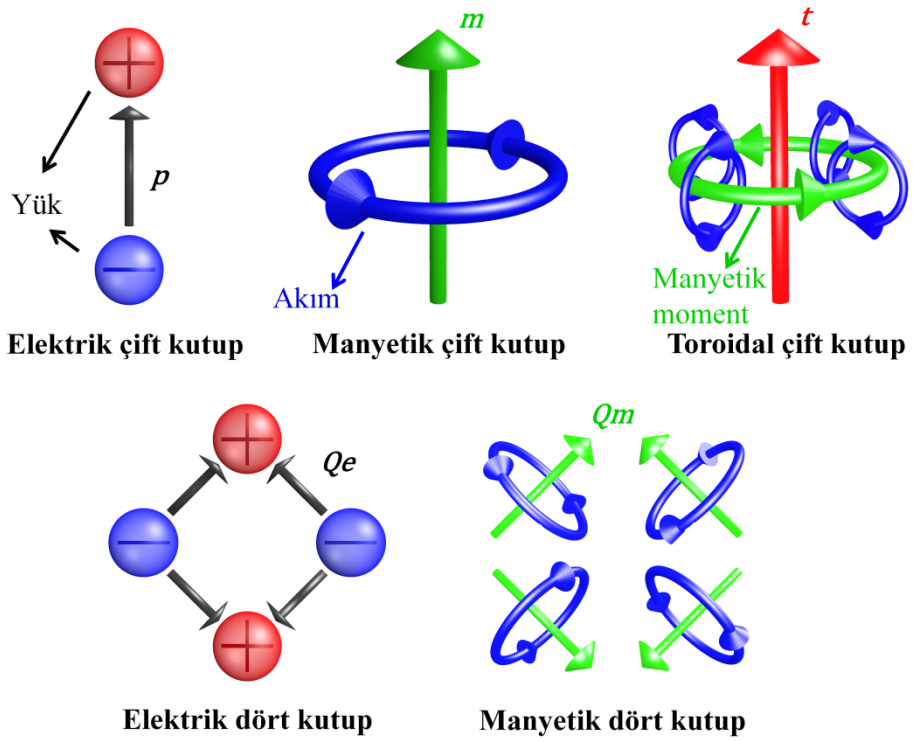
$$I_t = \frac{2\omega^6}{3c^5}|\boldsymbol{t}|^2, \tag{1.26}$$

$$I_{Qe} = \frac{\omega^6}{5c^5}\sum\left|\boldsymbol{Qe}_{\alpha\beta}\right|^2, \tag{1.27}$$

$$I_{Qm} = \frac{\omega^6}{40c^5}\sum\left|\boldsymbol{Qm}_{\alpha\beta}\right|^2 \tag{1.28}$$

eşitlikleri ile belirlenir [119,120].

Bu analizin gerçekleştirilmesi için FDTD ortamında tasarlanan nanoantenlerin periodik dizilerinin yansıma ve geçiş spektrumları belirlenerek rezonant dalga boyları civarındaki frekans bölgeleri seçilmiştir. Nanoanten dizisi analiz edildiğinden *x*- ve *y*-doğrultusunda periodik sınır koşulları seçilmiştir ve sistem *z*-yönünde aydınlatılmıştır. Boş uzayda anten dizisinin birim hücresi dikkate alınarak anten, 3D *E*-alan monitörü ve kırılma indisi monitörü içine yerleştirilmiştir. Söz konusu frekans aralıklarında elde edilen alan ve kırılma indisi verisi $\boldsymbol{J} = i\omega\varepsilon_0\boldsymbol{D}$ formülünde kullanılarak 3D hacim akım yuğunluğu verisi elde edilir ve bu veri (1.19-1.23) eşitliklerinin sayısal olarak hesaplanarak çok-kutuplu momentler elde edilir [119,120]. Çok-kutuplu momentler de (1.24-1.28) eşitliklerinde yerine yazılarak momentlerin saçılmaya katkıları, ayrıştırılmış saçılan uzak alan gücü olarak elde edilir. Böylece tasarlanan nanoantenlerin çoklu-rezonant davranışına momentlerin katkısı belirlenmektedir.



Şekil 1.5. Çift-kutuplu elektrik moment ile dört-kutuplu elektrik moment için yük düzenlemeleri, çift-kutuplu manyetik moment ile dört-kutuplu manyetik moment için akım düzenlemeleri ve çift-kutuplu toroidal moment için manyetik moment düzenlemesi gösterimi [146].

2. BÖLÜM
NANOÜRETİM, GÖRÜNTÜLEME VE OPTİK KARAKTERİZASYON TEKNİKLERİ

2.1. Giriş

Soy metallerden oluşan optik metalik nanoyapıların üretimlerinde son yıllarda büyük gelişmeler olmuştur [26,31,147]. Bu tür yapılar 100 nm'den daha küçük boyutlara sahip olabilirler, aşağıdan yukarıya (bottom-up) veya yukarıdan aşağıya (top-down) yaklaşımlarla üretilebilirler [31,148,149]. Optik rezonanslar antenlerin geometri ve boyutlarına bağlı olduğundan; üretimleri, 10 nm'nin altında çözünürlüklü, güvenilir ve tekrarlanabilir yapılanma teknikleri gerektirmektedir. Bu durum optik nanoantenler ve plazmonik aygıtların gerçekleştirilmesinde başlıca zorluklardan biri olarak kabul edilmekte ve nano-yapılandırma teknikleri alanındaki araştırmaları teşvik ederek, nanoüretim teknikleri geliştirilmekte ya da yenilenmektedir. Yukarıdan aşağıya nanoüretim yaklaşımları, istenilen şekil ve karakteristiklerde nano-ölçekli yapı ya da fonksiyonel devreleri daha büyük boyutlardan gerekli en küçük boyuta doğru yapmak için dış deneysel parametreler tarafından kontrol edilen nanoüretim araçlarını kullanmaya karşılık gelir [149]. Aşağıdan yukarıya yaklaşımlar ise moleküler ya da atomik bileşenlerin üst üste konulması ya da biriktirilmesiyle daha karmaşık nano-ölçekli yapılar oluşturmayı amaçlamaktadır [149].

Anten yapılarında, boyut ve şekil bağıntılı optik rezonansların çalışılmasında, rezonant ışık saçılımı hem teorik hem de deneysel olarak popüler bir tekniktir ve optik antenlerin nano-ölçekli boyutları bunlarla ilişkili karakterizasyon zorlukları getirmektedir. Plazmonik nanoantenlerde ise kuvvetli ışık-iletim elektronu etkileşimi, rezonant modlarda kuvvetli saçılma karakteristikleri ve oda sıcaklığında aygıtın belirli bölgelerinde depolanan EM alanlar ile sonuçlanmaktadır. Depolanan bu alan plazmonik

nanoantenlerin; görünmezlik [36], yüksek harmonik üretimi [37], biyolojik ve kimyasal algılama [38,39], optik görüntüleme [40], refraktif optik [41], difraktif optik [42] ile akromatik metayüzeyler [43], yüzey yükseltmeli spektroskopiler [38,44], çeşitli VIS ve NIR uygulamaları [39,43,45] gibi farklı birçok uygulamada kullanılabilmelerine olanak sağlamaktadır. Bu nedenle plazmonik nanoantenlerin özellikle IR bölgedeki spektral davranışları IR spektroskopi teknikleriyle ölçülebilmektedir [26]. Ayrıca IR spektroskopi çok yönlü deneysel bir tekniktir; maddenin katı, sıvı ve gaz halindeki numunelerinden de spektrumlar elde edilebilir ve organik bağların IR bölgedeki titreşimsel soğurma bantları da IR spektroskopi ile ölçülebilmektedir [68,69]. Böylece, özellikle IR bölgedeki yansıma ve iletim sinyallerinin elde edilmesi ile; nanoantenlerin, IR spektroskopisi ve FTIR gibi yaygın spektrometreler yoluyla biyoalgılama veya kimyasal moleküllerin algılanmasında kullanılmaları sağlanabilir [114].

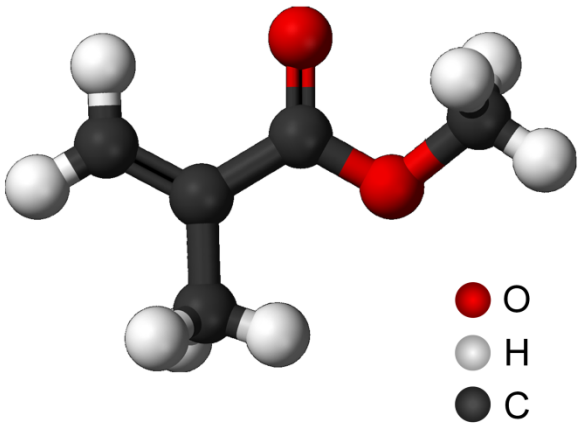
Bu tez çalışmasında, parçacık tabanlı fraktal geometrili metalik nanoanten dizilerinin üretiminde, yukarıdan aşağıya yaklaşım olan EBL ile bu işleme destek olan metal biriktirme (metal deposition) ve kaldırma (lift-off) işlemleri, üretilen nanoantenlerin görüntülenmesinde kullanılan taramalı elektron mikroskopisi (SEM; scanning electron microscopy) ve optik karakterizasyonunda kullanılan FTIR cihazı bileşenleri ve bu bileşenlerin çalışma prensibi bu bölümde açıklanmaktadır. Ayrıca tez çalışması kapsamında üretilen fraktal geometrili nanoanten dizilerinin üretim aşamaları da bu bölümde sunulmaktadır.

2.2. Nanoüretim Teknikleri

EBL, odaklanmış iyon demeti frezeleme (FIB; focused ion beam milling), nano-şablon (nano-imprint) litografisi, fotolitografi gibi mikroüretim tekniklerinin bir uzantısı olan yukarıdan aşağıya yaklaşımlar; optik olarak geçirgen fakat elektriksel olarak iletken bir alt taban üzerindeki ince çoklu kristalin metal film ile kaplanmasıyla başlar. Çünkü şarj etkilerinin önlenmesi gereklidir [26,31,147]. Ayrıca bu yaklaşımlarla istenenle hemen hemen aynı boyutlardaki nanoyapıların büyük dizileri, iyi tanımlanmış yönelim ve mesafelerle üretilebilmektedir. Bu tez çalışmasında başvurulan nanoüretim teknikleri aşağıda açıklanmaktadır.

2.2.1. Elektron Demet Litografisi (EBL)

Düz yüzeyler üzerine nanoantenlerin üretiminde en popüler tekniklerden biri olan EBL uygulamasında; birçok sayıda, farklı özelliklere sahip ve tab etme ile kaldırma işlemleri için farklı kimyasallar gerektiren, elektron-duyarlı rezistlerin kullanılması gerekmektedir. Bunlardan pozitif elektron ışını rezisti olan ve monomer yapısı Şekil 2.1'de verilen PMMA ile yüksek çözünürlüklü desen oluşturulabilir [26,38,39,44,77,79,93,126,134] ve genellikle klorobenzen içinde çözünebilen moleküler ağırlıkta (50 K- 950 K) birçok PMMA temin edilebilir. Alt taban üzerine dönel kaplama ile kaplanmış PMMA 170 ila 200 °C'de konveksiyon fırınında ısıtılır. Takiben uygulanan elektron ışını, polimeri metil izobütil keton (MIBK; methyl isobutyl ketone) içinde çözülebilecek kısımlara kırar. MIBK tek başına tab edici kimyasal olarak çok kuvvetlidir, hatta ışına tabi olmamış PMMA'i bile çözebilir. Bu nedenle tab etmede, 3 ölçü izopropanol (IPA; isopropanol) ile 1 ölçü MIBK çözeltisi kullanılır. Böylece EBL ile PMMA pozlamanın ardından, elektron demeti ile rezist film üzerinde desenlenmiş bölgeler tab edilerek temizlenebilir. Desenlenmiş PMMA üzerine farklı yollarla metal kaplanarak ve artık-PMMA aseton gibi kimyasal çözücülerle kaldırılarak düz alt taban üzerinde belirli şekillere sahip metal desenler oluşturulabilir. Ayrıca EBL esnasında optimal yük dozajının aşılması PMMA'in negatif rezist durumuna geçmesine neden olacağından bu durum istenen desenlemeyi engeller.



Şekil 2.1. Poli metil metakrilat (PMMA monomeri) kimyasal yapısı [150].

EBL işlemi için seçilen alt taban da bazı şartları sağlamalıdır:

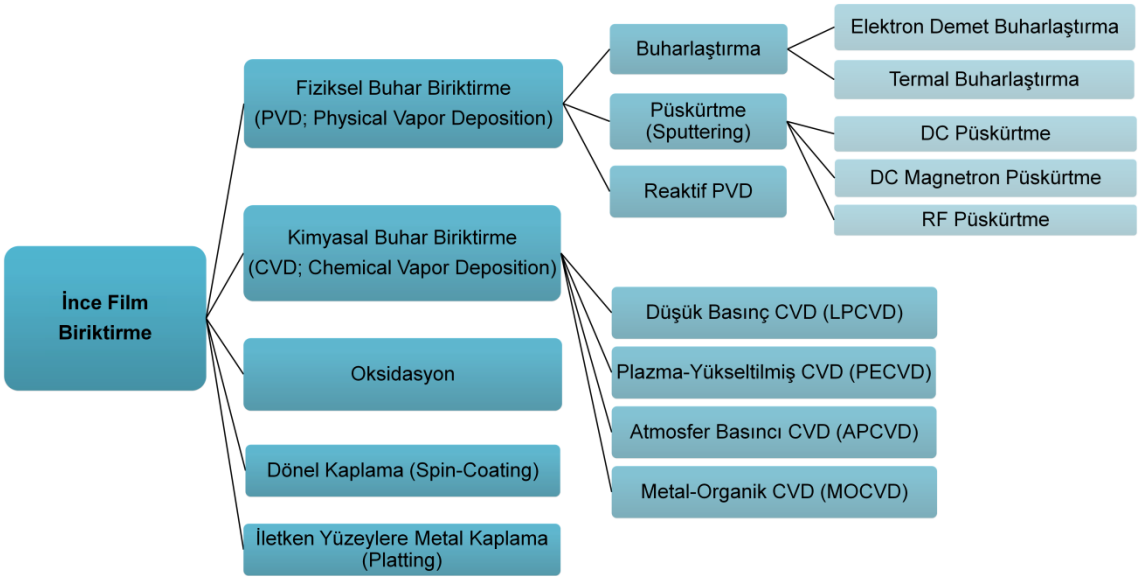
- Nispeten iletken olmalıdır. Aksi taktirde numune üzerinde EBL esnasında elektrik yük birikimi oluşur, bu da elektron demetini saptırır ve çarpık desen oluşur.
- Diğer taraftan elektronik devre tabanı yalıtkan olmalıdır çünkü tüm devre, kısa devre olur.

Dolayısıyla alt taban deseni bozmayacak şekilde mümkün olduğu kadar yalıtkan olmalıdır. EBL için diğer bir koşul da numunede var olan metal tabakaların topraklanmasıdır.

Bir elektron mikroskobu elektron demet yazma işlemini yapabilmek için EBL sistemine dönüştürülebilir. Bunun için daha düşük güçlerde (1kV ila 3kV) görüntüleme yapan bir SEM, sistem gücü 10kV'un üstüne çıkarılacak şekilde geliştirildiğinde EBL yapabilir. Bu gerilim değeri elektronlar için hızlandırma gerilimidir.

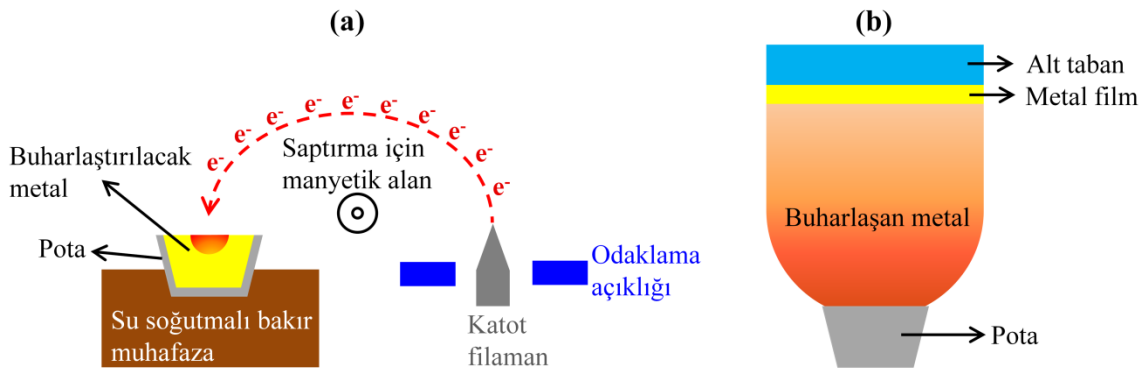
2.2.2. Elektron Demet Buharlaştırma

Nanoyapılar için seçilen malzemelere, devre şekline, vb. nedenlerle numuneye uygun olabilecek farklı prensiplerde ince film biriktirme tekniği mevcuttur [151-153]. Bunlar başlıklar halinde Şekil 2.2'de verilmektedir.



Şekil 2.2. İnce film biriktirme teknikleri [151-153].

İnce film biriktirme teknikleri; uygulamalarda, özellikle kaplanacak malzeme veya alt taban özelikleri ile bunların ortaya çıkaracağı fiziksel ve kimyasal kriterler gibi kısıtlamalar kullanılacak tekniği belirlemektedir. İnce metal film kaplamak için yaygın olarak kullanılan teknik, fiziksel buhar biriktirme (PVD; physical vapor deposition) tekniklerinden olan elektron demet buharlaştırma tekniğidir. Bu teknik, hedef anodun yüksek vakum altında tungsten bir katot filamandan çıkan elektron demeti ile bombardıman edilmesi işlemidir. Bu yolla pota içindeki kaplanacak malzeme, buharlaştırılarak atomları elektron demet ısıtıcısı (Şekil 2.3a) tarafından gaz fazına geçirilip daha sonra da yoğunlaşarak katı hale çökelir ve vakum bölmesindeki (Şekil 2.3b) cisimlere kaplanır.



Şekil 2.3. Elektron demet buharlaştırma için temel çalışma prensibi: (a) Elektron demet ısıtıcısı ve (b) vakum bölmesi.

Tablo 2.1. Vakum içinde kaplama metodlarında pota olarak kullanılabilecek malzemeler.

	Malzeme
Isıya dayanıklı metaller	Tungsten (W)
	Tantal (Ta)
	Molibden (Mo)
Isıya dayanıklı seramik	Grafit karbon (C)
	Alümina (Al_2O_3)
	Bor Nitrür (BN)

Elektron demet buharlaştırma ile kirliliği çok az olan metal ve dielektrik malzemelerin kaplamaları yapılabilir. Kaplama hızı 10 ila 100 A/s civarındadır. Potanın akımla ısıtılarak malzemenin buharlaştırıldığı termal buharlaştırma sistemleriyle ise metal veya

erime noktası düşük ve kirliliği yüksek malzemeler kaplanabilir. Pota olarak kullanılacak malzeme ısıya dayanıklı malzeme olmalıdır ve buharlaştırmak için kullanılan malzemeye göre belirlenmelidir. Tablo 2.1'de pota olarak kullanılabilecek malzemeler verilmektedir. Tez çalışmasında nanoanten üretimi için Au ve Ti kaplamaları yapıldığından tungsten pota kullanılmıştır.

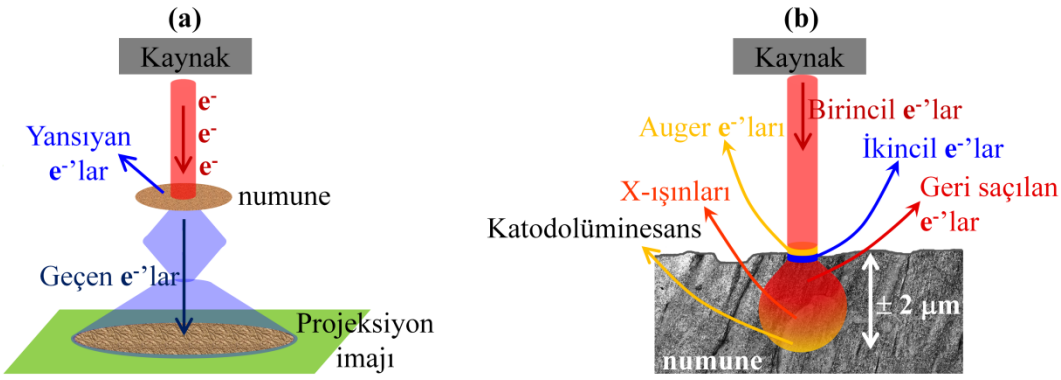
2.3. Görüntüleme Teknikleri

2.3.1. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

Işık mikroskopisi ile görüntülenemeyecek kadar küçük boyutlardaki yapıları görüntüleyebilen elektron mikroskopi tekniklerinde çok küçük bir alana odaklanan yüksek enerjili elektronlar yoluyla ilgili yapı görüntülenebilir. Bu görüntüleme, SEM ve TEM olarak iki farklı teknikle yapılabilir ve her iki teknikle oluşan görüntüler farklıdır. TEM yapının kesit görünümünü verirken SEM yapının yüzey görüntüsünü verir. Şekil 2.4a'da görüldüğü gibi TEM çalışma prensibi numuneden geçen elektronların toplanarak görüntü oluşturulmasına dayanır. SEM prensibi ise numuneden saçılan elektronların toplanarak görüntü oluşturulmasına dayanır. Bu prensibe göre vakumlu bir ortamda numuneye gönderilen elektronlar numuneye çarptıklarında malzeme içine birkaç mikronluk derinliğe kadar nüfuz eder ve farklı saçılmalar gösterir (Şekil 2.4b). Kaynaktan gönderilen elektronlar birincil elektronlar (PE; primary electrons) olmak üzere; saçılan enerji, ikincil elektronlar (SE; secondary electrons), geri saçılım elektronları (BSE; back scattering electrons), Auger elektronları, karakteristik X-ışınları ve katodolüminesans (CL; cathodoluminescence) olarak saçılır. Bu saçılmaların oluşma nedenleri ve görüntülemeye katkıları aşağıdaki gibidir:

- İkincil elektronlar numunenin yüzeyine yakın atomların yüksek enerjili elektron ışını ile uyarılarak saçılan elektronlardır ve toplanarak numunenin topolojik bilgisi için kullanılır. SEM cihazlarında standart olarak mevcut olan SE detektör ile toplanır ve 10 nm'lik çözünürlük sağlar.
- Geri saçılım elektronları malzemenin atom numarasına bağlı olarak meydana gelen elastik saçılmadır ve atom numarası bilgisi ve topolojik bilgi sağlar. BSE detektör ile toplanır ve 1 μm'lik çözünürlük sağlar.

- Auger elektronları yüksek enerjili elektron ışınlarının numune atomlarının dış yörünge elektronları ile elastik olmayan girişimi sonucunda oluşan düşük enerjili saçılmalardır ve hassas yüzey bileşimi bilgisi sağlar.
- Karakteristik X-ışınları yüksek enerjili elektronlarla, atomun daha yüksek enerji seviyesi tarafından kompanse edilen alt seviyedeki elektronun etkileşerek fırlatılması ile oluşur. Kompozisyon ve numune içindeki element miktarları bilgisi yani elemental (kimyasal) analiz sağlar ve EDAX (energy-dispersed analysis of X-rays; X-ışınlarının enerji dağılım analizi) veya WDAX (wavelength-dispersed analysis of X-rays; X-ışınlarının dalga boyu dağılım analizi) dedektörleri ile toplanır.
- Katodolüminesans, fosfor gibi lüminesant malzemelerle yüksek enerjili elektronların etkileşimi sonucu oluşan foton emisyonudur ve numune hakkında elektriksel bilgi sağlar. CL dedektörü ile toplanır. Bu tip lüminesans molekülün kimyasal yapısına bağlı olduğu için morfolojinin ve bileşimin eşzamanlı ölçümü sağlanabilir.



Şekil 2.4. (a) TEM'in çalışma prensibi ve **(b)** SEM'in çalışma prensibi [154,155].

2.4. Optik Karakterizasyon

2.4.1. Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR)

Optik bir nanoanten rezonansa girdiğinde, anten civarındaki saçılma, soğurma veya lokal alanlar belirgin bir şekilde yükseltilebilir. Kızılötesi titreşim spektroskopisi karakteristik molekül soğurma bantlarına duyarlıdır ve özellikle yakın alan

yükseltilmesi IR spektroskopinin hassasiyetini arttırmada kullanılır [26,38,39,44,77,79,93,126,134]. Bu etkiyi kullanabilmek için anten rezonansı analitin titreşimsel soğurma bandına ayarlanmalıdır.

Optik antenlerin IR bölgedeki karakterizasyonunda kullanılan FTIR sistemi daha eski dispersif sistemlere göre daha avantajlıdır [66]. Birim zaman başına sinyal gürültü oranındaki (SNR; signal-to-noise ratio) iyileştirilmiştir. Ayrıca FTIR sistemi yarık ya da başka sınırlama cihazı gerektirmediğinden kaynak çıkışı numune üzerine sürekli olarak gönderilebilir. Bu da dedektör enerjisinde önemli bir kazanç, dolayısıyla daha yüksek sinyal ve iyileştirilmiş SNR anlamına gelmektedir. FTIR spektroskopisinin diğer bir avantajı da hızdır. Çünkü FTIR içinde bulunan interferometre aynalarının çok kısa mesafede hızlı hareketi ve SNR deki iyileştirmeler yardımıyla milisaniyelik sürelerde spektrumlar elde edilebilir. FTIR sisteminin temel bileşenleri Şekil 2.5'de verilmektedir. Optik karakterizasyon, FTIR ile gerçekleştirildiğinde kaynak ışığı polikromatik (çok renkli) IR ışındır ve dedektörler yoluyla toplanan yansıma veya iletim sinyalleri Fourier dönüşümü yoluyla değerlendirilerek nanoantenlerin spektral davranışları belirlenebilir [33]. Böylece yongaların karakterizasyonu, frekansları ayrı ayrı taramaya ihtiyaç duymadan hızlı ve yüksek çözünürlükte spektrumlar halinde alınır (Şekil 2.5a). FTIR'da kullanılan en genel interferometre türü Michelson interferometresidir (Şekil 2.5b). Bu interferometre türü, biri hareketli diğeri hareketsiz iki ayna ve yarı yansıtıcı özellikte bir ışın ayırıcı içerir. Kaynaktan gönderilen IR ışın, ışın ayırıcıya çarparak iki eşdeğer ışına ayrılır. Bu ışınlar iki aynadan da yansıyıp birleşerek detektöre gönderilir. Hareketli ayna sıfır yol farkının dışında ise yani referans mesafede değilse bu aynaya gelen ışın $d_m = 2d$ kadar daha fazla yol alır ve dedektörde algılanan girişim deseni;

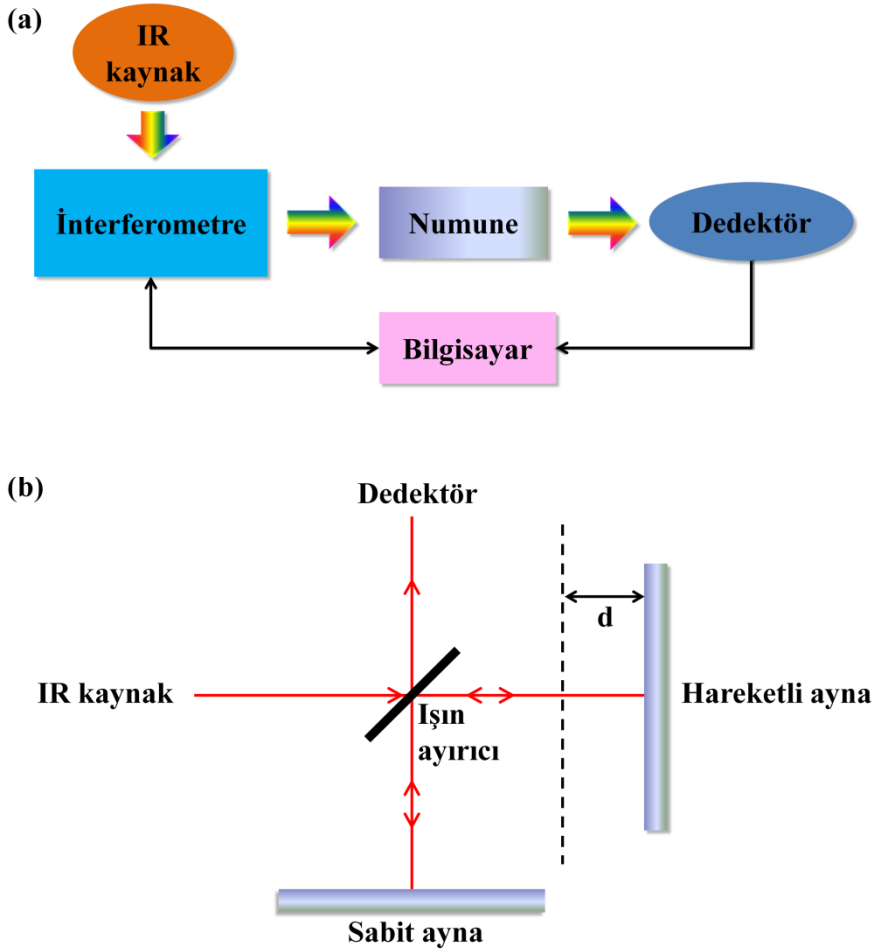
$$\mathrm{I}(d_m) = \int_0^\infty \mathrm{I}(f)\cos[2\pi d_m f + \theta(f)]\,\mathrm{d}\nu \tag{2.1}$$

eşitliği ile verilen şiddete sahiptir. Burada I(f), detektöre düşen spektral güç yoğunluğudur. Böylece interferogramın Fourier dönüşümü bilgisayar vasıtasıyla,

$$\mathrm{I}(f) = \mathrm{F}[\mathrm{I}(d_m)] = \frac{1}{2\pi}\int_0^\infty \mathrm{I}(d_m)\cos[2\pi d_m f]\,\mathrm{d}d_m \tag{2.2}$$

olarak hesaplanır. (2.2) eşitliği de sadece hareketli optik yol farkına ve frekansa bağlı bir ışık şiddeti fonksiyonu verir. Yine hareketli aynanın konumu bilindiğinden işlenen

sinyal frekansa bağımlı ışık şiddeti olarak elde edilebilir. Hareketli aynalarda referans olarak helyum-neon lazer kullanıldığından ayna hareketi yüksek hassasiyetle belirlenmektedir.



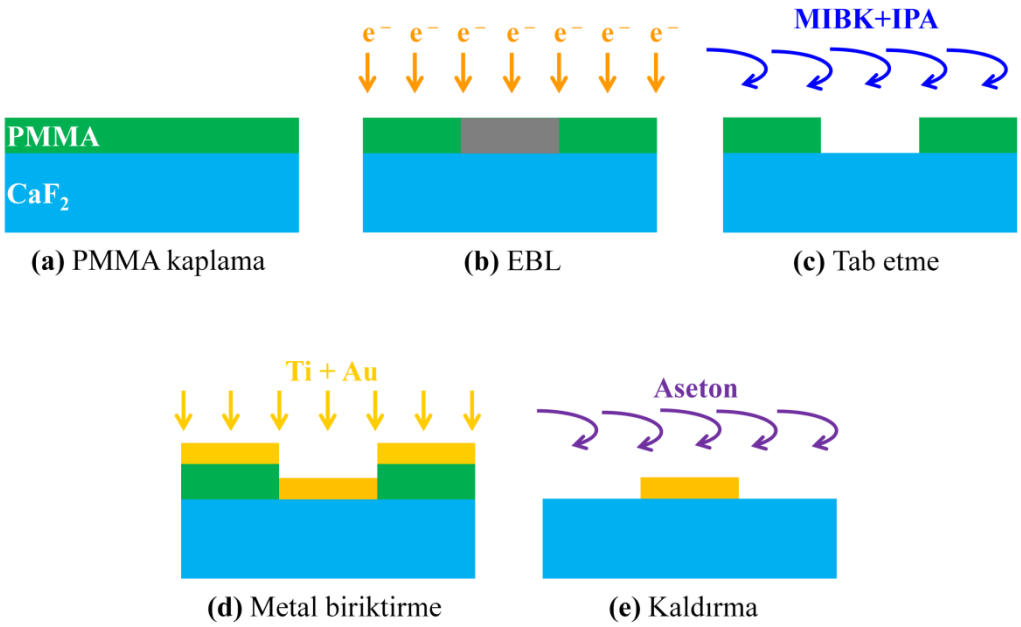
Şekil 2.5. (a) FTIR temel bileşenleri ve **(b)** Michelson interferometresi şematiği [66].

Tez çalışması kapsamında üretilen fraktal nanoanten dizilerinin optik karakterizasyonları FTIR yoluyla gerçekleştirilmiş olup spektral ölçümler için, yansıma ve geçiş verisi; sıvı nitrojen soğutmalı cıva kadmiyum tellür detektörü, bir potasyum bromid ışın ayırıcı, silisyum karbür kutuplanmamış MIR ışık kaynağı ve 4 cm^{-1} çözünürlüklü bir kızılötesi mikroskop (Bruker, Hyperion 1000) ile kuple edilmiş FTIR spektrometresi (Bruker, Vertex 70v) ile ölçülmüştür. Her spektrum 20 kHz'lik bir tarayıcı hızı ile elde edilmiştir. Spektral ölçüm çözünürlüğü 4 cm^{-1} veya 8 cm^{-1}; tarama hızı da 1000 taramadır. Daha iyi açısal çözünürlük sağlamak amacıyla da yansıma ve

geçiş sinyalleri, 15x Opticon objektif ve 150 × 150 μm diyafram açıklığı ile toplanmıştır. Yansıma modundaki tüm ölçümlerde; referans spektrum, altın aynadan alınmıştır ve geçiş modu için de havadaki geçiş spektrumu dikkate alınmıştır.

2.5. Tez Çalışmasında Kullanılan Nanoüretim ve Görüntüleme Teknikleri

Bu tez çalışmasında optik geçirgen CaF_2 alt taban üzerine Cesaro fraktal geometrilerin farklı iterasyonları şeklindeki Au nanoantenlerin EBL tekniği ile nanoüretimi gerçekleştirilmiş olup aşamalar Şekil 2.6'de verilmektedir.



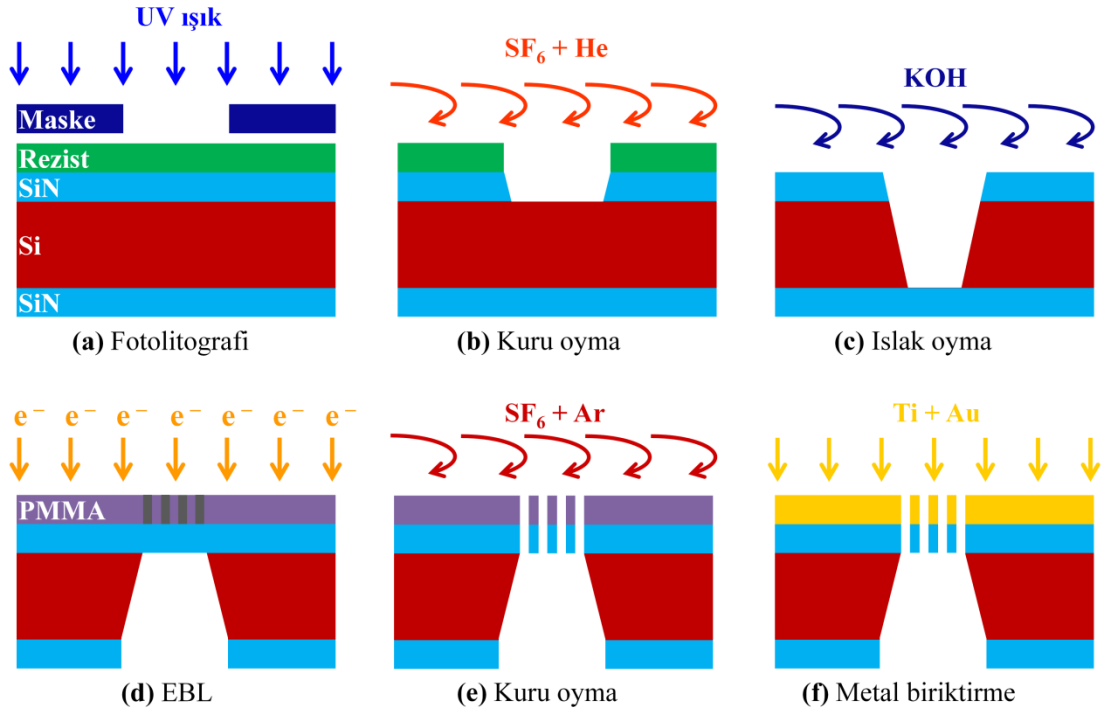
Şekil 2.6. Parçacık tabanlı nanoüretim tekniği; **(a)** geçirgen alt taban üzerine dönel kaplama ile fotorezist kaplama, **(b)** EBL ile fotorezist pozlama, **(c)** fotorezistin ışınlanmış kısımlarının tab edilmesi, **(d)** metal biriktirme ve **(e)** fotorezist kaldırma (litf-off) işlemi.

Parçacık tabanlı, **Cesaro ve ters-Cesaro geometrili nanoanten** dizilerini gerçekleştirmek için takip edilen üretim aşamaları Şekil 2.6'de verilmektedir. Bu aşamalara göre, CaF_2 alt taban üzerine dönel kaplama yoluyla 150 nm'lik PMMA (Microchem PMMA 950 A3) fotorezist kaplanmıştır (Şekil 2.6a). Bunun için 45 sn, 2000 rpm döndürme yapılmış ve numune konveksiyon fırınında 180 °C'de 24 dk. ısıtılmıştır. Ardından numune, Zeiss ışın kesicili ve NPGS nano-desenleme yazılımı olan Zeiss SUPRA 40VP taramalı elektron mikroskopu (SEM; Scanning Electron

Microscope) sistemi yoluyla EBL işlemine tabi tutulmuştur (Şekil 2.6b). Burada elektron yük birikimini engellemek için PMMA katman üzerine 10 nm kalınlıkta ince Au film kaplanmıştır. Nanodesenler 30 kV ışın voltajı ve 40 pA ışın akımı altında, 6 mm'lik çalışma mesafesinde ve 800 $\mu C/cm^2$'lik alan yük dozajı altında oluşturulmuştur. EBL işleminden sonra optimal doğruluk ve yapısal kalitede numuneler elde etmek için, yonga Peltier termoelektrik soğutucu plaka ile sıcaklığı 8 °C'den daha düşük tutulan 1:3 oranındaki MIBK / IPA çözeltisi içine daldırılarak, EBL esnasında PMMA'in ışına maruz kalan kısımları temizlenmiştir (Şekil 2.6c). Burada yüksek alan yük dozajı ve soğuk tab etme (cold development), yüksek çözünürlük elde etmek için uygulanmıştır. Diğer yandan tipik bir EBL işlemi, oda sıcaklığındaki PMMA tab etme işlemi için 350 $\mu C/cm^2$'lik alan yük dozajı kullanmaktadır. Bu durumda ters-Cesaro nanodesenler daha az çözünürlükle meydana gelecektir ve daha az sivri köşeler oluşacaktır. Soğuk tab etme işleminden sonra, elektron demet buharlaştırma tekniği kullanan elektron demet buharlaştırıcı (CHA) ile numune üzerine 5 nm kalınlığında Ti yapıştırma katmanı ve 30 nm kalınlığında Au katman kaplanmıştır (Şekil 2.6d). Son aşama olarak da kaldırma işleminde (Şekil 2.6e) 50 °C'deki aseton içine numune daldırılarak 30 dk. bekletilip IPA ve nitrojen ile temizlenerek artık-PMMA uzaklaştırılmıştır.

Açıklık tabanlı, kare fraktal benzeri nanoanten dizilerini gerçekleştirmek için takip edilen üretim aşamaları Şekil 2.7'de verilmektedir. Burada, tüm katmanlar boyunca açılan, kare fraktal benzeri geometriye sahip nanoaçıklık dizilerinin havada asılı SiN_x zar üzerine üretim aşamaları gösterilmektedir. Başlangıçta; her iki tarafına 100 nm kalınlığında SiN_x kaplanmış 500 µm'lik Si alttaban üzerine, 2 µm kalınlığında dönel kaplama ile kaplanmış MICROPOSIT™ S1818™ pozitif fotorezisti için 30 sn, 3000 rpm döndürme yapılmış ve numune konveksiyon fırınında 100 °C'de 95 sn ısıtılmıştır. Fotorezist kaplı zar SUSS MicroTec MA/BA6 Maske Hizalayıcı kullanılarak fotolitografiye tabi tutulmuştur (Şekil 2.7a) ve 1:1 oranda MicroDev/H_2O çözeltisi ile pozlanmış fotorezist çözülüp tab edilerek istenilen mikronda periyot ve genişliklerde kare açıklık desenler oluşturulmuştur. Şekil 2.7b ile gösterilen aşamada, oluşturulan açıklıklar içindeki SiN_x katmanı kaldırmak için Plasma-Therm. Reactive İyon Oyucu kullanarak SF_6 ve He gazları ile kuru oyma yapılmıştır. Ardından da Şekil 2.7c ile gösterilen aşamada da KOH ile ıslak oyma yapılarak Si katman

oyulmuştur. Şekil 2.7d'de gösterildiği gibi alt SiN_x tabaka üzerine kaplanan 150 nm'lik PMMA (950 PMMA A5, MICROCHEM) EBL (Zeiss SUPRA 40VP) ile şekillendirilir. SF_6 ve Ar gazları yoluyla kuru oyma işlemi uygulanarak da asılı SiN_x zar üzerinde nanoaçıklıklar oluşturulmuştur (Şekil 2.7e) ve numune üzerindeki PMMA önce aseton sonra da IPA ile temizlenmiştir. Şekil 2.7f'de gösterilen son aşamada da elektron demet buharlaştırıcı (CHA) kullanılarak metal biriktirme ile önce 5 nm Ti katman ardından da 30 nm Au kaplanmıştır. Bu nanoüretim aşamaları sonucunda havada asılı SiN_x zar üzerinde 100 x 100'lük nanoaçıklık dizileri oluşturulup 2 µm'lik periyotlarla ve her biri eş yapıdaki nanoaçıklıklar üretilmiştir.



Şekil 2.7. Asılı SiN_x zar üzerine açıklık tabanlı nanoüretim tekniği; **(a)** fotolitografi, **(b)** SF_6 + He ile kuru oyma, e **(c)** KOH ile ıslak oyma, **(d)** alt SiN_x tabaka üzerine PMMA üzerine EBL, **(e)** Kuru oyma ile açıklık oluşturma ve **(f)** metal biriktirme.

3. BÖLÜM
FRAKTAL GEOMETRİLİ PLAZMONİK NANOANTEN DİZİLERİ

3.1. Giriş

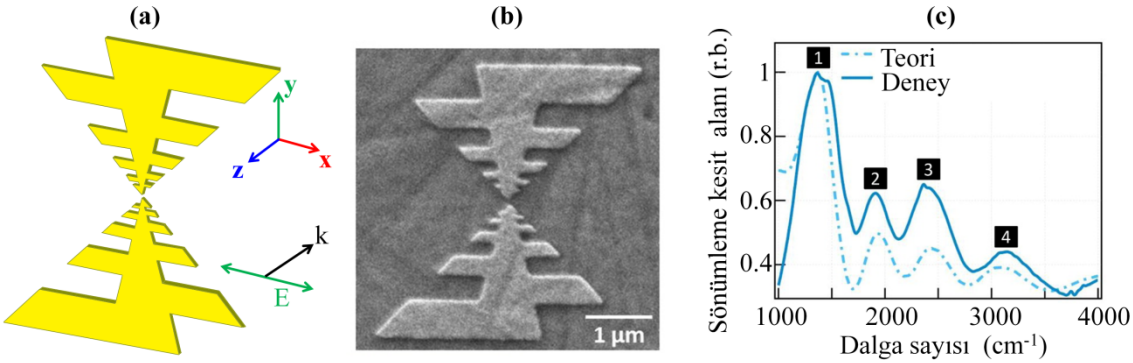
Fraktal antenler, özellikle gösterdikleri çoklu-rezonant davranışları ile aynı devre ile birden fazla uygulama veya aynı tür uygulamanın çoklu çalışması gibi avantajlar sağlayabilirler. Bu bölümde literatürde öncü çoklu-spektral veya fraktal nanoanten çalışmaları incelenerek; tez kapsamında tasarlanan, nanoüretimi ve optik karakterizasyonu yapılan, özgün çoklu-spektral fraktal geometrili nanoanten dizilerinin detayları sunulmaktadır.

3.2. Literatürdeki Çoklu-Spektral veya Fraktal Geometrili Nanoanten Dizileri

3.2.1. L#1 Çoklu-spektral, Log-Periyodik Trapez Şekilli Anten Tasarımı

VIS bölgeden IR frekanslara kadar, sistematik olarak spektroskopik deneyler gerçekleştirmek, çoklu plazmonik yapı düzenlemeleri tasarlayıp üretmeyi gerektirir. Bu da zaman istemektedir ve aynı anda birden fazla spektral parmak izi bölgesini görüntülemek ya da rasgele moleküler türleri araştırmak için entegre sensör gelişimini zorlaştırır. Bu sınırlamalara çözüm olarak; çoklu-rezonant, lineer olmayan plazmonik yapıların geniş bantlı davranışları kullanılabilir. Bu amaçla genişbant log-periyodik trapez nanoanten yapısı tasarlanıp üretilmiş ve çoklu-spektral biyoalgılama uygulamalarına yeni bakış açısı sunmak için önce çoklu-spektral SEIRA spektroskopisi [38] ardından da eşzamanlı floresans, Raman ve IR soğurma [44] ölçümleri literatüre sunulmuştur. Aouani vd. (2013b) geometrik özellikleri Şekil 3.1'deki gibi olan log-periyodik trapez şekilli altın optik antenin baryum florür (BaF_2) alt taban üzerine üretimini EBL işlemi ile gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada alt taban üzerine 40 nm

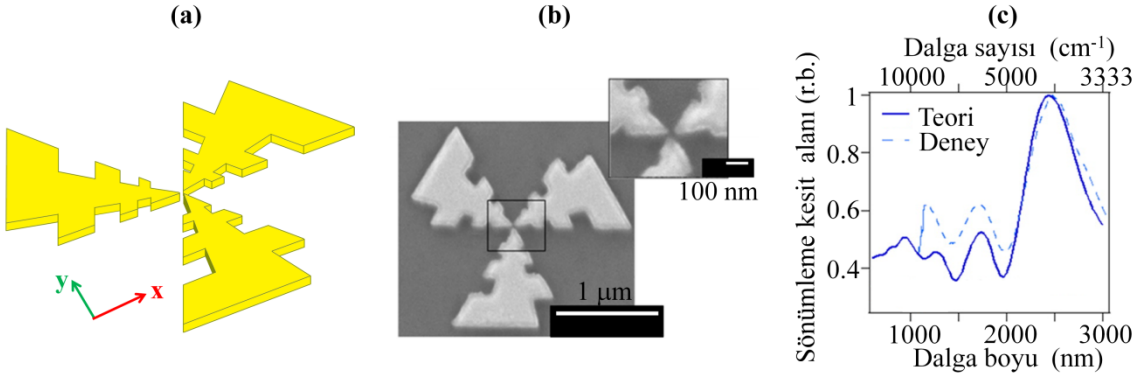
kalınlıktaki Au nanoantenler 3 nm Ti yapıştırma katmanı ile üretilmiştir. Deneysel sönümleme spektrumu optik anten dizisinden alınan FTIR ölçümleriyle IR sinyalin integrali ile elde edilmiştir. Hesaplanmış sönümleme spektrumu ve yakın alan dağılımları da 3D-FDTD yazılım paketi [133] ile hesaplanmıştır. Bu nanoanten dizisi ile ilk olarak, anten yüzeyine tutunmuş alkantiyol moleküllerinin SEIRA spectroskopisi ve çoklu-spektral algılanması üzerinde çalışılmıştır [38].



Şekil 3.1. (a) Çoklu-spektral, log-periyodik trapez şekilli altın optik antenin şematik görüntüsü ve **(b)** üretilen antenin SEM görüntüsü. **(c)** Hesaplanan ve ölçülen sönümleme kesit alanı [38].

Aouani vd. (2013b), Şekil 3.2'deki üç kollu log-periyodik trapez şekilli anten tasarımı ile de; eşzamanlı olarak yüzey yükseltilmiş floresans, Raman ve IR spektroskopileri yapmayı amaçlamışlardır. Bunun için ise SiO_2 alt taban üzerine, PMMA rezist yerine hidrojen silseskioksan negatif rezist kullanan EBL işlemi ile iki kollu log-periyodik trapez deseni oluşturulup; 3 nm Ti yapıştırma katmanı yardımıyla 40 nm Au kaplanarak nanoantenler üretilmiştir. Ayrıca kaldırma yerine iyonlama yapılmıştır. Tasarlanan yapının hesaplanmış sönümleme spektrumu ve yakın alan dağılımları da 3D-FDTD yazılım paketi [133] ile hesaplanmıştır. Deneysel sönümleme spektrumu ise optik anten dizisinden alınan FTIR ölçümleriyle IR sinyalin integrali ile elde edilmiştir. Yapının SEFS uygulamasında floresant boyalarla etiketlenmiş DNA sondaları ile fonksiyonelleştirilmiş antenler numune olarak kullanılmıştır. Aynı yapı ile gerçekleştirilen SERS uygulamasında ise; analit, anten yüzeyine tek tabaka alkanetiol yuluyla tutturulan streptavidin molekülleridir ve Raman spektroskopi deneyleri mikrospektrofotometre yoluyla yapılmıştır. Üretilen bu antenlerin SEIRA

spektroskopisi uygulamasında da yine tek tabaka alkanetiol yuluyla tutturulan streptavidin molekülleri için FTIR kullanılan algılama uygulamaları gerçekleştirilmiştir.



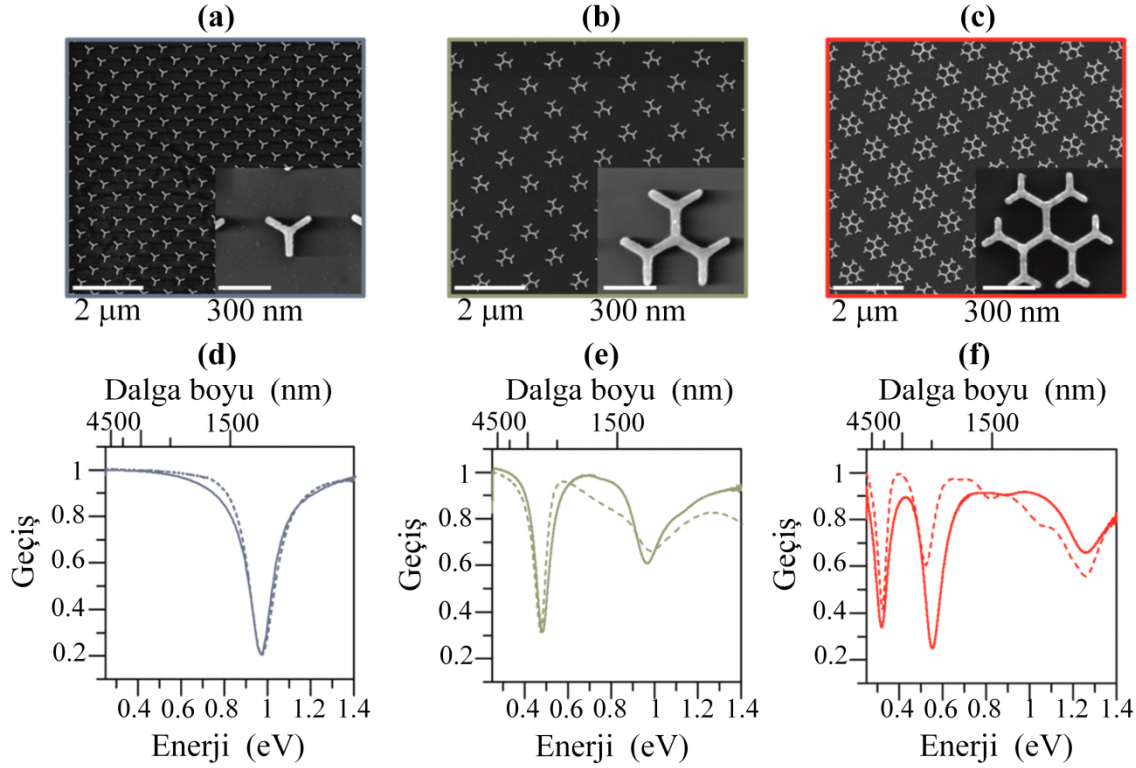
Şekil 3.2. (a) Çoklu-spektral, üç kollu log-periyodik trapez şekilli altın optik antenin şematik görüntüsü ve **(b)** üretilen antenin SEM görüntüsü. **(c)** Hesaplanan ve ölçülen sönümleme kesit alanı [44].

3.2.2. L#2 Cayley Ağacı Şeklindeki Fraktal Nanoanten Tasarımı

Fraktal yapılar, çoklu uzunluk ölçülerindeki aynı şekilli rezonant elemanlar yoluyla çok-bantlı plazmon cevapları verebilmektedir. Bu çalışmalardan biri çoklu-spektral davranış gösteren fraktal geometrili nanoanten tasarımlarından olan Cayley ağacı çalışmasıdır [93]. Bu çalışmada, üç iterasyonlu Cayley ağacı şeklindeki fraktal gelişiminde olan nanoanten tasarımlarının sergilediği spektral davranışlar belirlenerek iterasyon artışı karşısında oluşan yeni rezonant davranışlar incelenmiştir (Şekil 3.3).

NIR'dan MIR'a kadar olan geniş bir frekans sahasında çoklu-rezonant davranış elde edilmesini sağlayan Cayley ağacı fraktalının ilk üç iterasyonu olarak 50 nm kalınlıktaki Au nanoantenlerin yüksek kaliteli kuvars alt taban üzerine üretimi, PMMA rezist kullanılan EBL işlemi ile gerçekleştirilmiştir ve üretilen nanoantenler SEM ile görüntülenmiştir (Şekil 3.3a-c). 1. iterasyon anten dizisinin periyodu 500 nm iken 2. ve 3. iterasyon anten dizilerinin periyodu 1 μm'dir. 1. ve 2. iterasyon antenlerin (Şekil 3.3a,b) kol uzunlukları 140 nm ve genişlikleri 40 nm iken 3. iterasyon antenlerin 3. mertebe kol uzunlukları 100 nm'dir. Üretilen nanoantenlerin deneysel optik geçiş spektrumları da FTIR ile ölçülmüş ve hesaplanmış geçiş spektrumları ise sonlu elemanlar metodu ile elde edilmiştir. Şekil 3.3d-f'deki deneysel ve nümerik sonuçlardan

görüldüğü üzere, her iterasyon artışı, aynı spektral aralıkta yeni bir rezonant mod eklemektedir. Her bir antenin minimum uzunluğu aynı olduğundan iterasyon artışıyla anten boyutu artmakta ve sisteme, ışık ile etkileşecek daha büyük boyutlar eklendiğinden daha uzun rezonant dalga boyları eklenmektedir.



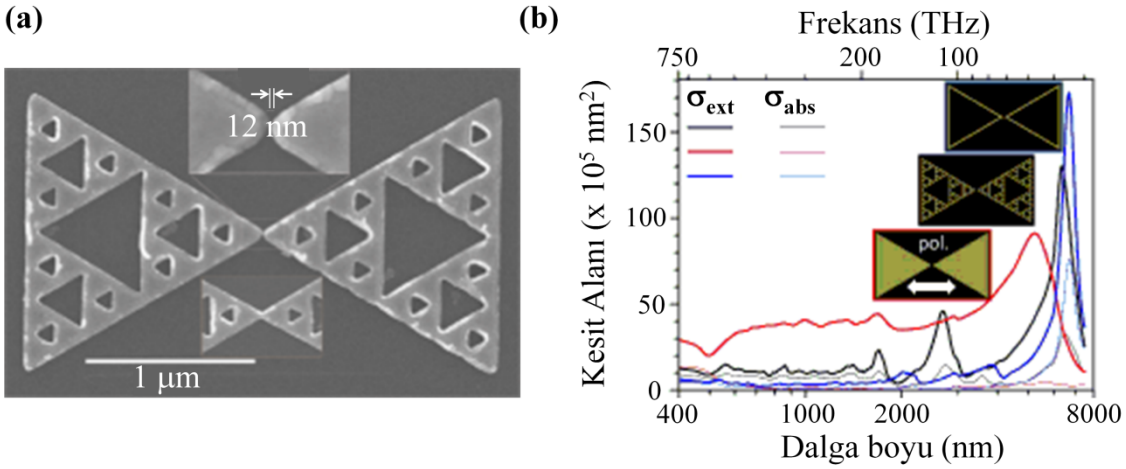
Şekil 3.3. (a) 1, **(b)** 2. ve **(c)** 3. iterasyon nanoanten dizilerinin SEM görüntüleri. [93]. **(d)** 1, **(e)** 2. ve **(f)** 3. iterasyon nanoanten dizilerinin deneysel FTIR geçiş spektrumları.

3.2.3. L#3 Sierpiński Tip Fraktal Nanoanten Tasarımı

THz'den VIS'e genişbant uygulamalar için gerçekleştirilmiş nanoanten üretimi konulu bir çalışmada Sierpiński tip fraktal nanoanten, nümerik olarak simüle edilmiş ve deneysel olarak üretilmiştir [95]. Ancak optik karakterizasyonu düşük sinyal ve fazla gürültü nedeniyle belirlenemeyip sunulmamıştır.

Şekil 3.4a'da SEM görüntüsü verilen nanoanten yapısının nümerik sönümleme ile soğurma kesit alanı spektrumları (Şekil 3.4b) ve alan dağılımı analizleri FDTD ile belirlenmiştir. Nanoantenler, fraktal desenler silika cam üzerine EBL yoluyla

oluşturularak ve 2 nm Cr yapıştırma katmanı yardımıyla 40 nm kalınlıkta Au kaplanarak üretilmiştir.



Şekil 3.4. (a) 3. mertebe Sierpiński tip nanoantenin SEM görüntüsü. **(b)** Hesaplanan sönümleme ve soğurma kesit alanları [95].

3.3. Teze Özgü Olarak Tasarlanan Fraktal Geometrili Plazmonik Nanoanten Dizileri

3.3.1. Üretilen Fraktal Geometrili Plazmonik Nanoanten Dizilerine Ait Sonuçlar

Biyoalgılama uygulamaları için çoklu-spektral fraktal nanoantenler tasarlamak ve üretmek amacıyla yapılan bu tez çalışmasında, *Cesaro tip* ve *ters-Cesaro tip* fraktal geometrili plazmonik nanoanten dizileri, FDTD metodu ile tasarlanarak EBL yöntemi ile nanoüretimleri gerçekleştirilmiş ve FTIR ile optik karakterizasyonları yapılmıştır. Bu fraktal geometrileri L-sistem alfabesi kullanılarak iteratif olarak tasarlanmıştır. Nümerik normalize saçılma ve soğurma kesit alanları, ilgili rezonant modlardaki *E*-alan ve *H*-alan dağılımları, yine ilgili rezonant modlardaki normalize edilmiş yük yoğunluğu ve akım yoğunluğu dağılımları; iterasyon artışının etkilerini gösterecek biçimde, sistematik olarak sunulmuştur. Her iki tip için de nümerik yansıma ve geçiş spektrumları FDTD yoluyla hesaplanıp FTIR ile ölçülen deneysel yansıma ve geçiş spektrumlarıyla karşılaştırılarak nümerik ve deneysel sonuçlar arasında çok iyi bir uyum içinde olduğu

gözlemlenmiştir. Nanoüretimi gerçekleştirilen anten dizilerinin SEM görüntüleri de bu bölümde sunulmaktadır.

Devre boyutunu aynı tutarak ve iterasyon sayısını arttırarak yapılan 10°'lik sivrilik açısına sahip *ters-Cesaro tip* fraktal geometrili nanoanten dizilerinin nanoüretim, optik karakterizasyon ve nümerik analiz sonuçları *U#1* koduyla sunulmaktadır. Bu geometrideki anten; Au miktarının azlığı nedeniyle hem saçılma hem soğurma karakteristiklerinde belirgin pikler sergileyeceği düşünüldüğünden, daha önce üretilmiştir. Devre boyutunu aynı tutarak ve iterasyonu arttırarak yapılan *12.5°'lik girinti açısına sahip Cesaro tip fraktal* geometrili nanoanten dizilerinin nanoüretim, optik karakterizasyon ve nümerik analiz sonuçları da *U#2* koduyla ve "*Cesaro-1 tip fraktal geometrili nanoanten dizileri*" başlığı ile sunulmaktadır. Ancak *U#2* çalışmasında, altın yüzey alanının çok fazla oluşu nedeniyle, EBL sırasında meydana gelen yük birikimi sınırlamasının etkisini azaltarak üretim yapmak amacıyla *20°'lik girinti açısına sahip Cesaro tip fraktal* geometri, her iterasyon artışında aynı minimum fraktal uzunluğu ve dolayısıyla artan devre boyutu için de üretilmiştir. Bu çalışma ise *U#3* koduyla ve "*Cesaro-2 tip fraktal geometrili nanoanten dizileri*" başlığı ile sunulmaktadır.

Açıklık tabanlı yapılarından gelen avantajlarla nanoaçıklık dizileri, IR dalgaboyları için kimyasal ve biyolojik numunelerin küçük moleküler yapılarının optik sondalamasında kullanılabilir. Geleneksel açıklık dizilerinden farklı olarak, dalga boyundan daha küçük fraktal nanoaçıklıklar ise ayarlanabilir frekans yeteneği ve sınırlı bir hacim içinde ıraksayan yüzey alanı gibi eşsiz fraktal karakteristikleri nedeniyle büyük bir potansiyele sahiptir. Bu bağlamda yapılan fraktal nanoaçıklık tasarımları *kare fraktal benzeri* ve *diktörtgen fraktal* nanoaçıklık anten dizileri tasarımlarıdır. FDTD metodu ile tasarlanan *kare fraktal benzeri nanoaçıklık dizileri*, EBL yöntemi ile nanoüretimleri gerçekleştirilmiş ve FTIR ile optik karakterizasyonları yapılmıştır. Bu nanoanten sisteminin analitik, nümerik ve deneysel olarak optik karakteristikleri belirlenmiştir. Nanoüretim, optik karakterizasyon ve analiz sonuçları da *U#4* koduyla ve "*Kare Fraktal Benzeri Nanoanten Dizileri*" başlığı ile sunulmaktadır. Çift-bant rezonanslara sahip *dikdörtgen fraktal geometrili nanoaçıklıkların* optik karakteristikleri FDTD

metodu ile yapılan nümerik analizler yoluyla incelenmiştir ve analiz sonuçları, *U#5* koduyla ve "*Dikdörtgen Fraktal Nanoanten Dizileri*" başlığı ile sunulmaktadır.

3.3.1.1. U#1 Ters-Cesaro Tip Fraktal Nanoanten Dizileri

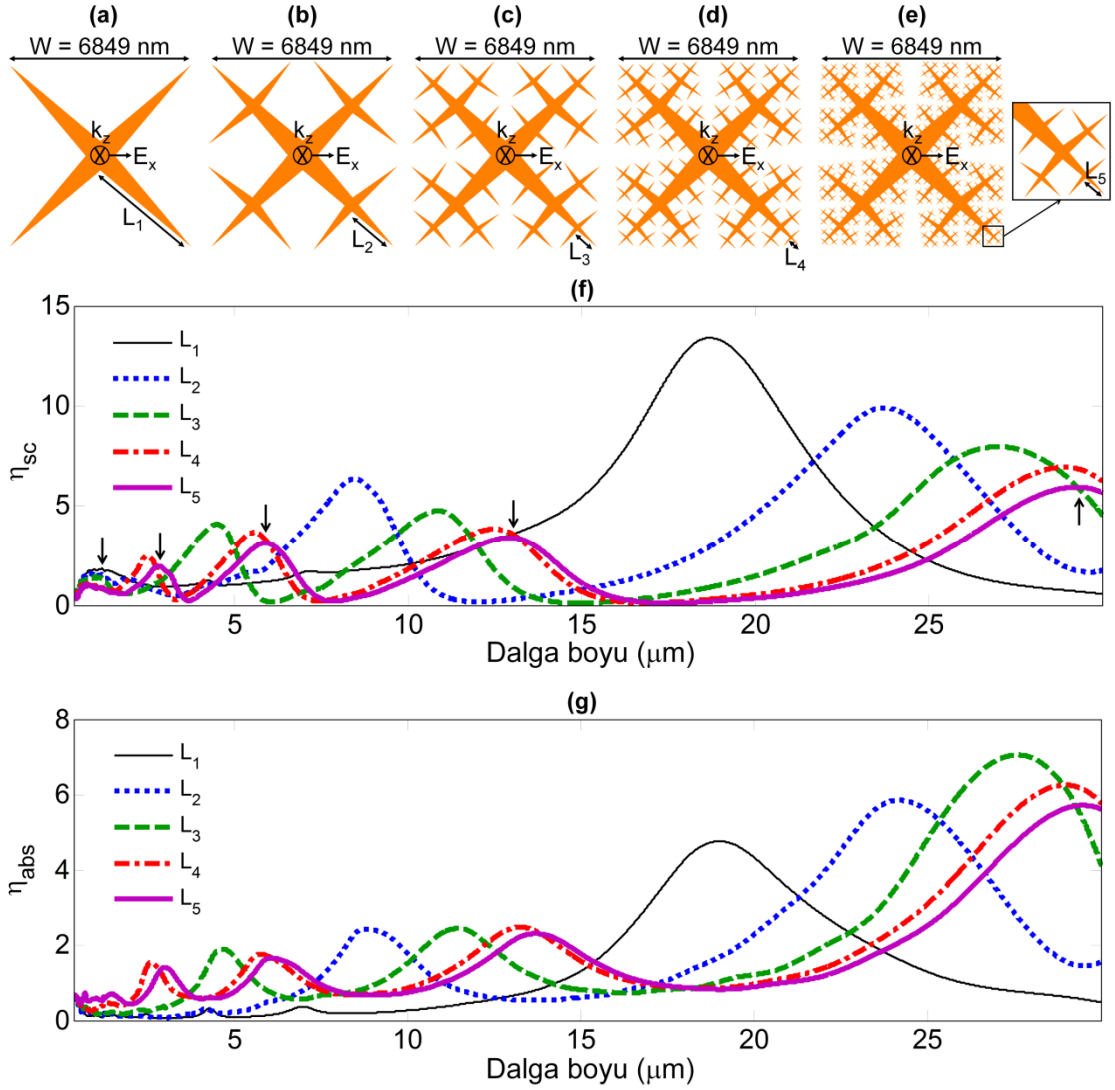
Literatürde olmayan *ters-Cesaro tip fraktal* geometrisinin matematiksel modellemesi ilk kez yapılmış olup yine bu geometrinin ilk beş iterasyonundaki nanoanten dizileri ilk kez üretilmiştir. Devre boyutunun sabit tutulup iterasyon sayısının arttırıldığı fraktal geometrili plazmonik nanoanten yapıları için, her iterasyon artışında aynı frekans sahası içinde; spektral cevaba daha kısa dalga boyunda olan bir rezonant mod daha eklenecektir. Bunun nedeni anten yapısına daha kısa boyutlarda metalik adacıklar eklenmesi, dolayısıyla etkin uzunluğu daha kısa olan rezonant elemanlar eklenmesidir. Bu çalışmada *ters-Cesaro tip fraktal* geometrisinin ilk beş iterasyonu *sabit devre boyutu* mantığı ile tasarlanak yeni bir fraktal geometrili nanoanten tasarımı yapılmıştır ve sistematik olarak yapılan nümerik ile deneysel çalışmalarla iterasyon gelişiminin etkisi incelenmiştir.

İlgili çalışmanın ilk aşamasında, Şekil 1.3'deki gibi ilk beş iterasyondaki geometriler türetilip her bir iterasyon için minimum ayrıt uzunlukları Tablo 1.7'deki gibi; L_1 = 4470 nm, L_2 = 2056 nm, L_3 = 946 nm, L_4 = 435 nm, ve L_5 = 200 nm alınarak; θ=10°'lik sivrilik açısına ve sabit devre boyutuna sahip *ters-Cesaro tip fraktal* nanoantenler tasarlanmış ve FDTD metodu ile nümerik olarak analiz edilmiştir. Her bir iterasyon için normalize saçılma kesit alanı η_{sc} ve normalize soğurma kesit alanı η_{abs};

$$\eta_{\mathrm{sc}} = \frac{\sigma_{sc}}{A_{\mathrm{m}}}, \tag{3.1a}$$

$$\eta_{\mathrm{abs}} = \frac{\sigma_{abs}}{A_{\mathrm{m}}} \tag{3.1b}$$

eşitlikleri ile hesaplanmıştır ve ilgili sonuçlar Şekil 3.5'de verilmektedir. Her bir iterasyon artışında birim hücre boyutu sabit tutulup daha kısa dalga boyunda yeni bir rezonant mod eklenmektedir. *m* iterasasyon sayısı olmak üzere L_{m} minimum ayrıt uzunluğunu göstermekte ve bu tasarımda her bir iterasyon için fraktal genişliği W_{m} = 6849 nm'de sabit tutulmaktadır (Şekil 3.5a-e). Böylece nanoanten devre boyutları sabit tutulmaktadır.



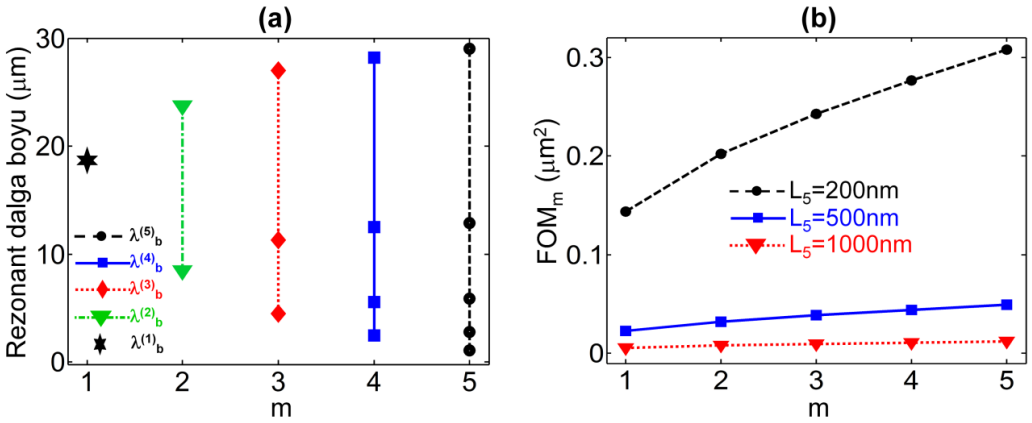
Şekil 3.5. Saçılma ve soğurma kesit alanlarının fraktal gelişimine bağlılığı. **(a)** 1., **(b)** 2., **(c)** 3., **(d)** 4. ve **(e)** 5. iterasyondaki *ters-Cesaro tip fraktal*ların üstten görünümü. Her bir iterasyon için spektral normalize **(f)** saçılma ve **(g)** soğurma kesit alanları.

Tablo 3.1. Şekil 3.5 ile verilen fraktal nanoantenler için rezonant dalga boyları.

m	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5
5	29 μm	12.9 μm	5.9 μm	2.8 μm	1.1 μm
4	28.2 μm	12.5 μm	5.6 μm	2.5 μm	
3	27 μm	11.3 μm	4.5 μm		
2	23.7 μm	8.5 μm			
1	18.7 μm				

Tablo 3.2. *Ters-Cesaro tip nanoanten*lerin farklı minimum ayrıt uzunlukları için *FOM* değerleri.

	***m*=1**	***m*=2**	***m*=3**	***m*=4**	***m*=5**
	L_1=4470nm	**L_2=2056nm**	**L_3=946nm**	**L_4=435nm**	**L_5=200nm**
A_m (μm^2)	6.9528	9.8886	12.3730	14.4740	16.2520
FOM_m ($1/\mu m^2$)	0.1440	0.2020	0.2425	0.2764	0.3077
	L_1=11175nm	**L_2=5140nm**	**L_3=2364nm**	**L_4=1087nm**	**L_5=500nm**
A_m (μm^2)	43.4530	61.8020	77.3260	90.4620	101.5760
FOM_m ($1/\mu m^2$)	0.0230	0.0324	0.0388	0.0442	0.0492
	L_1=22351nm	**L_2=10279nm**	**L_3=4738nm**	**L_4=2174nm**	**L_5=1000nm**
A_m(μm^2)	173.8270	247.2170	309.3140	361.8540	406.3080
FOM_m ($1/\mu m^2$)	0.00575	0.00809	0.0097	0.01105	0.01231



Şekil 3.6. (a) Şekil 3.5'de verilen nanoantenlerin, *m*. iterasyondaki rezonant dalga boyu değişimi ve **(b)** beş iterasyonlu anten sistemi için hesaplanmış, Tablo 3.2'deki *FOM* değerleri.

Altın yüzey fazla olmadığından, fraktal antenler hem belirgin soğurma pikleri hem de belirgin saçılma pikleri sergilemektedir ve çoklu-rezonant davranış hem saçılma karakteristiklerinde hem de soğurma karakteristiklerinde daha belirgin olarak gözlenmektedir. Şekil 3.5'te bu spektral karakteristikler için; spektral normalize saçılma kesit alanı η_{sc} (Şekil 3.5f) ve soğurma kesit alanı η_{abs} (Şekil 3.5f) (çizgiler her bir iterasyonun minimum ayrıt uzunluğuna göre etiketlenmek üzere); 0.375 μm ila 30 μm (10 THz ila 800 THz) spektral aralığında verilmekte ve rezonant dalga boyları

belirlenmiş olup Tablo 3.1'de sunulmaktadır. Bu tabloda rezonant pikler, m=5 için uzun dalga boyundan kısa dalga boyuna λ_1, λ_2, λ_3, λ_4 ve λ_5 olarak adlandırılmaktadır. Bu tabloda görüldüğü gibi kompakt bir tasarımla kontrol edilebilir bir spektral yoğunluk, yani iterasyon sayısıyla aynı sayıda rezonant mod sağlanmaktadır. Bu nedenle bu tez çalışmasında başarı ölçütü (FOM; figure-of-merit) olarak birim alan başına spektral yoğunluk, rezonant dalga sayısı m ile aynı olduğundan, $FOM = m/A_{\mathrm{m}}$ olarak tanımlanmıştır ve bu fraktal geometrisinin farklı minimum ayrıt uzunlukları için FOM değerleri de Tablo 3.2'de sunulmaktadır. Birbirinden ayrı rezonanslar, sayıca iterasyon sayısı m ile aynıdır. Şekil 3.5'de verilen nanoantenlerin, söz konusu geometrinin minimum ayrıt uzunluğu L_{m}'e bağlı olarak, Tablo 3.1'de verilen her bir mod için rezonant dalga boyu değişimi Şekil 3.6a'da gösterilmektedir. Burada çizgilerin ilgili spektral aralıkta ifade ettiği değerler aşağıdaki gibidir:

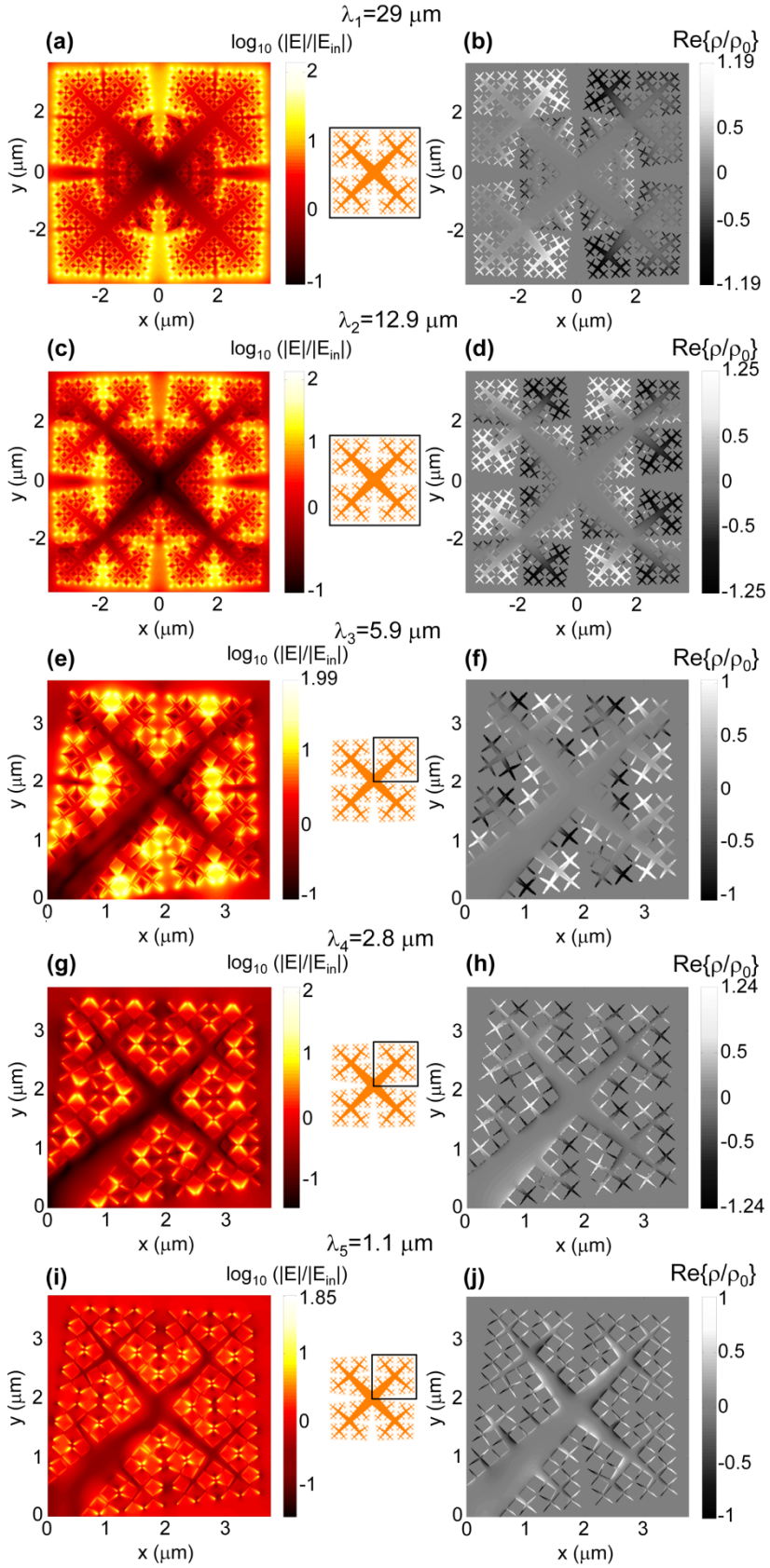
- λ_1'i tanımlayan kesikli ve daire damgalı siyah çizgi, tüm iterasyonların en uzun dalga boyuna sahip 1. mertebe modunu ifade etmektedir.
- λ_2'i tanımlayan düz ve kare damgalı mavi çizgi; 2., 3., 4. ve 5. iterasyonların daha kısa dalga boyuna sahip 2. mertebe modunu ifade etmektedir.
- λ_3'i tanımlayan noktalı ve eşkenar dörtgen damgalı kırmızı çizgi; 3., 4. ve 5. iterasyonların 3. mertebe modunu ifade etmektedir.
- λ_4'i tanımlayan kesikli noktalı ve eşkenar dörtgen damgalı yeşil çizgi; 4. ve 5. iterasyonların 4. mertebe modunu ifade etmektedir.
- λ_5'i tanımlayan siyah yıldız damga, 5. iterasyonun en kısa dalga boylu 5. mertebe modunu ifade etmektedir.

Görüldüğü gibi fraktal ölçekleme etkisi rezonant dalga boyları üzerinde de söz konusudur ve iterasyon sayısı m'in arttırılması, daha kısa dalga boylu rezonant modlara sebep olmaktadır. Ayrıca aynı tür rezonant modun dalga boylarında, iterasyon artışıyla birlikte kırmızıya kayma meydana getirmektedir. Çünkü iterasyonların genel ve yerel geometrik özellikleri değiştiğinden antenlerin ilgili rezonant modlardaki etkin uzunlukları da değişmektedir. Aynı iterasyonun tüm modları dikkate alındığında ise fraktal ölçekleme etkisinin logaritmik ölçekte meydana gelen modlara neden olduğu da gözlenmektedir. Dolayısıyla, b aynı iterasyonun (kesin bir m değeri için) mod mertebesi olmak üzere, tüm modları arasında ölçek faktörü ile, $\lambda^{(m)}_b \approx k_{\mathrm{f}}\lambda^{(m)}_{b\text{-}1}$ bağıntısı vardır. Farklı boyutlarda beş iterasyonlu üç anten siteminin tüm modları ve iterasyonları için

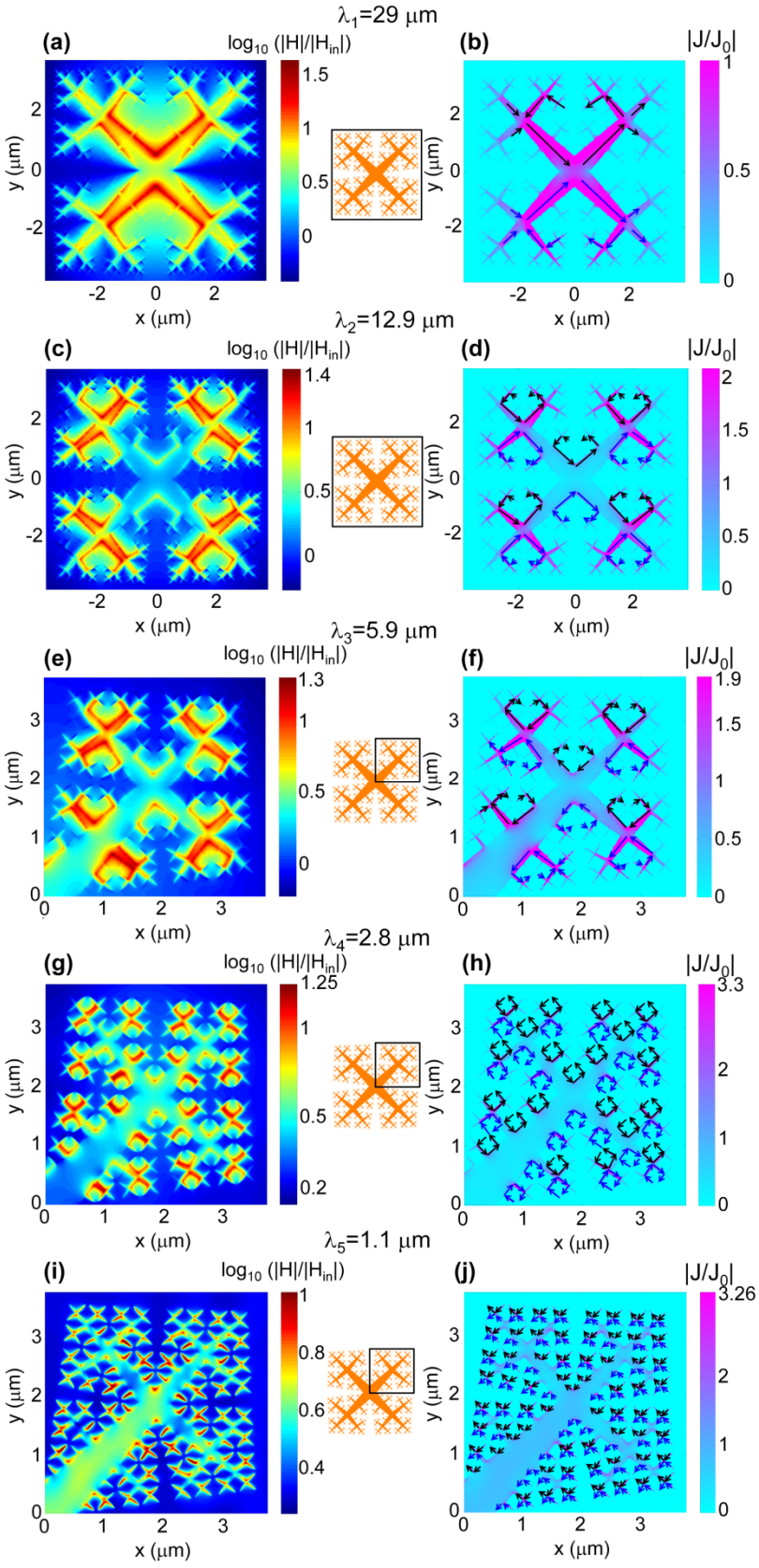
hesaplanmış *FOM* değerleri (Tablo 3.2) de Şekil 3.6b'de verilmektedir (çizgiler L_5 değerlerine göre etiketlenmiştir). Bu analiz sabit birim hücre boyutunda tasarlanan *ters-Cesaro tip fraktal* nanoantenlerin çok-frekanslı çalışmasını ve rezonant dalga boylarının iteratif olarak kontrolünü göstermektedir. Şekil 3.5'deki *ters-Cesaro tip nanoanten*lerin çoklu-spektral davranışı; ρ yük yoğunluğuna bağlı olarak *E*-alan dağılımlarından ve *J* akım yoğunluğuna bağlı olarak *H*-alan dağılımlarından da anlaşılabilir. Bu nedenle iterasyon değişimine ve mod türlerine bağlı olarak yapılan sistematik alan dağılımı analizleri yoluyla, kaynağa göre normalize edilmiş yakın EM alanların konumsal $|E|/|E_{in}|$ ve $|H|/|H_{in}|$ dağılımları ve bu dağılımları destekleyecek, sistemdeki rezonant maksimum yük ve akım yoğunluklarının en küçük değerlerine (ρ_0 ve J_0) normalize edilmiş, yük yoğunluğu $\mathrm{Re}\{\rho/\rho_0\}$ ile akım yoğunluğu $|J/J_0|$'ın konumsal dağılımları sistematik olarak belirlenmiştir. Böylece plazmonik yapının yerel ve genel geometrik simetrilerinin rezonant modlar üzerindeki etkileri, incelenen her bir iterasyonda sistematik olarak anlaşılabilecektir. Simülasyonlarda E_{in} = 1 genlikli E_x-kutuplu kaynak kullanılmıştır. H_y gelen manyetik alanı $H_{in} = E_{in}\sqrt{\varepsilon_0/\mu_0}$ = 2.654x10^{-3} A/m'dir. EM alanlar da $|E|/|E_{in}|=|E|$ ve $|H|/|H_{in}|=|H|$ eşitlikleri yoluyla normalize edilmiştir. Sistemdeki yük yoğunluğu ve deplasman akım yoğunluğu, FDTD simülasyonlarından elde edilen 3D alan verisinden, sırasıyla, $\nabla.\boldsymbol{D} = \rho_V$ ve, $\boldsymbol{J} = i\omega\varepsilon_0\boldsymbol{D}$ formülleri ile hesaplanmıştır. Akım ve yük dağılımları için normalizasyon değerleri $\rho_0 =$ 0.141 C/m^3 ve $J_0 =$ 1.75x10^6 A/m^2 olarak alınmıştır. Şekil 3.7'da, 5. iterasyondaki nanoantenin tüm rezonant modları (λ_1, λ_2, λ_3, λ_4 ve λ_5) için konumsal elektrik alan ve ilgili yük yoğunluğu dağılımları verilmektedir. Fraktalın ölçekleme etkisi bu dağılımlarda kolaylıkla gözlemlenebilmektedir. Sol panellerdeki (Şekil 3.7a,c,e,g,i) logaritmik $|E|/|E_{in}|$ dağılımlarına bakıldığında alan yoğun nokta desenlerinin, fraktalın bir alt ölçeğindeki parçacık kümelerine indiği görülmektedir. Alan yoğun noktaların belirlenmesi; bu noktaların sayıca daha fazla olması ve alan yükseltmesinin miktarı bu bölgelerde anten yüzeyine tutunacak olan molekülerin algılanma hassasiyetini arttıracağından önemlidir. Bu etki Şekil 3.7b,d,f,h,j panellerindeki lineer ölçekli normalize yük dağılımları $\mathrm{Re}\{\rho/\rho_0\}$'dan daha kolay anlaşılmaktadır. Şekil 3.7a-d panellerindeki konumsal dağılımlar, yapı yüzeyinin tamamı için sunulurken Şekil 3.7e-j panellerindeki konumsal dağılımlar, daha açık bir gösterim için yapının ilk çeyreğinde sunulmaktadır. Görüldüğü gibi çift-kutuplu-tip modlar tüm yapı boyunca uzanmaktadır.

Diğer taraftan iterasyon arttıkça daha küçük boyuttaki rezonant metalik adacık kümeleri kendini göstermekte ve aynı geometrik yapıda olan bu kümeler daha yüksek plazmonik frekansla etkileşime girmektedir. Şekil 3.7a,c,e,g,i panelleri, nanoantendeki metalik adacıkların her alt kümesinin (yani daha küçük ölçekteki kümesinin) daha kısa dalga boylarıyla etkileştiğini göstermektedir. Farklı uzunluk ölçeklerinde optik rezonansların bu hiyerarşik kademedeki dizisi yük dağılımlarından, böylece anlaşılabilir (Şekil 3.7b,d,f,h,j).

*Ters-Cesaro tip nanoanten*lerin çoklu-spektral potansiyelinin tam olarak anlaşılabilmesi için ilgili rezonant modlardaki konumsal *H*-alan ve akım yoğunluğu dağılımları da incelenmiştir. Bu bağlamda Şekil 3.8'de, 5. iterasyondaki nanoantenin tüm rezonant modları (λ_1, λ_2, λ_3, λ_4 ve λ_5) için logaritmik $|H|/|H_{in}|$ ve normalize akım yoğunluğu dağılımları $|J/J_0|$ verilmektedir. Şekil 3.8a-d panellerindeki konumsal dağılımlar yapı yüzeyinin tamamı için sunulurken; Şekil 3.8e-j panellerindeki konumsal dağılımlar, daha açık bir gösterim için yapının ilk çeyreğinde sunulmuştur. Rezonant plazmon modlardaki *H*-alan yükseltmesi ≈52 kata kadar ulaşmaktadır (Şekil 3.8a). Metalik parçacıkların üzerinde oluşan akım döngüsü çiftleri ise mavi ve siyah renklerle ayırt edici düzenlemelerde verilmiş olup bu akım döngüleri, dielektrik aralıklı ayrık-halka rezönatörü [119] benzeri yapıların fraktal dağılımı gibi davranmaktadır ve döngüler içinde *z*-doğrultusunda manyetik alan yükseltilmektedir (Şekil 3.8b,d,f,h,j). Çünkü daha kısa dalga boylarında, bir alt ölçekte akım döngüleri oluşmaktadır. Bu da yukarıda bahsedilen fraktal ölçekleme etkisinin manyetik alan ve akım yoğunluğu bakımından sonuçlarıdır. *E*-alan yoğun noktalarına göre *H*-alan yoğun noktalarının başka bölgelerde yerelleşmesi maddenin manyetik geçişlerinin yerel kontrolünü sağlamaktadır [156]. Ayrıca daha kısa dalga boylarında, manyetik alan yükseltmesi azalıp deplasman akım yoğunluğu genlikleri artmaktadır [123]. Böylece Şekil 3.7 ve 3.8'deki sonuçlar; en küçük metal adacık kümelerinin en kısa dalga boyunda rezonansa girdiğini gösterirken, daha büyük metal adacık kümelerinin daha uzun dalga boyuyla rezonansa girdiğini göstermektedir. Bu dağılım analizi sonuçları; 1. mod (λ_1 = 29 μm) (Şekil 3.7a,b ve Şekil 3.8a,b), 2. mod (λ_2 = 12.9 μm) (Şekil 3.7c,d ve Şekil 3.8c,d), 3. mod (λ_3 = 5.9 μm) (Şekil 3.7e,f ve Şekil 3.8e,f), 4. mod (λ_4 = 2.8 μm) (Şekil 3.7g,h ve Şekil 3.8g,h) ve 5. mod (λ_5 = 1.1 μm) (Şekil 3.7i,j ve Şekil 3.8i,j) için *x*-kutuplu ışık altında 5. iterasyon Au nanoantenin (L_5 = 200 nm) üst yüzeyindeki konumsal (Şekil 3.7a,c,e,g,i) logaritmik

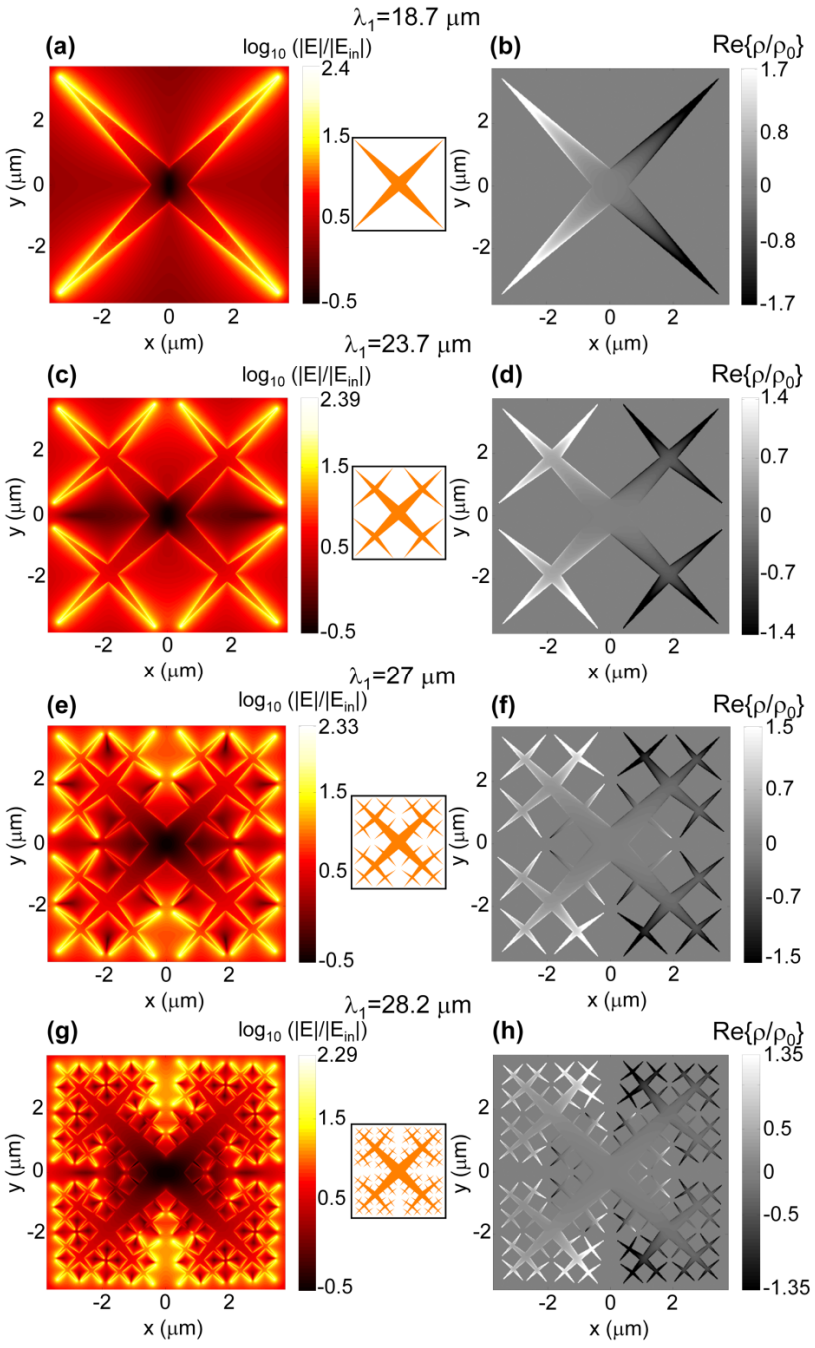


Şekil 3.7. *x*-kutuplu ışık altında, 5. iterasyon Au nanoantenin, üst yüzeyindeki konumsal **(a,c,e,g,i)** logaritmik $|E|/|E_{in}|$ ve **(b,d,f,h,j)** Re$\{\rho/\rho_0\}$ dağılımları.

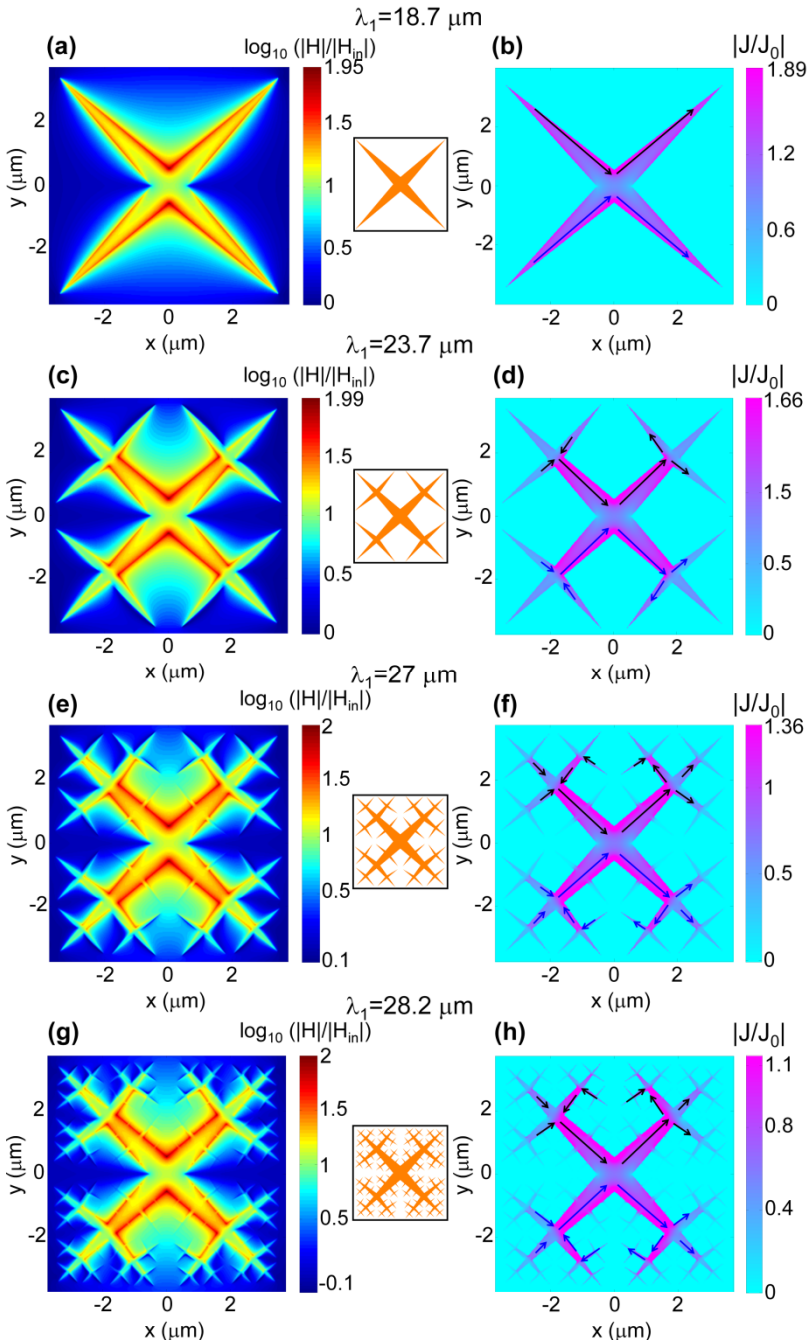


Şekil 3.8. *x*-kutuplu ışık altında, 5. iterasyon Au nanoantenin, üst yüzeyindeki konumsal **(a,c,e,g,i)** logaritmik $|H|/|H_{in}|$ ve **(b,d,f,h,j)** $|J|/|J_0|$ dağılımları.

$|E|/|E_{in}|$ dağılımıları ile (Şekil 3.7b,d,f,h,j) Re$\{\rho/\rho_0\}$ dağılımlarını ve (Şekil 3.8a,c,e,g,i) logaritmik $|H|/|H_{in}|$ dağılımları ile (Şekil 3.8b,d,f,h,j) $|J|/|J_0|$ dağılımlarını vermektedir. Son altı paneldeki dağılımlar, daha açık bir gösterim için yapı yüzeyinin ilk çeyreğinde gösterilmiştir. Bu mekanizma, yüksek değerlerde yakın EM alanlara sahip çoklu-ölçekte *E*-alan ve *H*-alan yoğun noktaları sağlamaktadır [157].



Şekil 3.9. 1. mod için; ilk dört iterasyondaki nanoantenlerin, *x*-kutuplu ışık altında, üst yüzeyindeki **(a,c,e,g)** logaritmik $|E|/|E_{in}|$ ve **(b,d,f,h)** Re$\{\rho/\rho_0\}$ dağılımları.

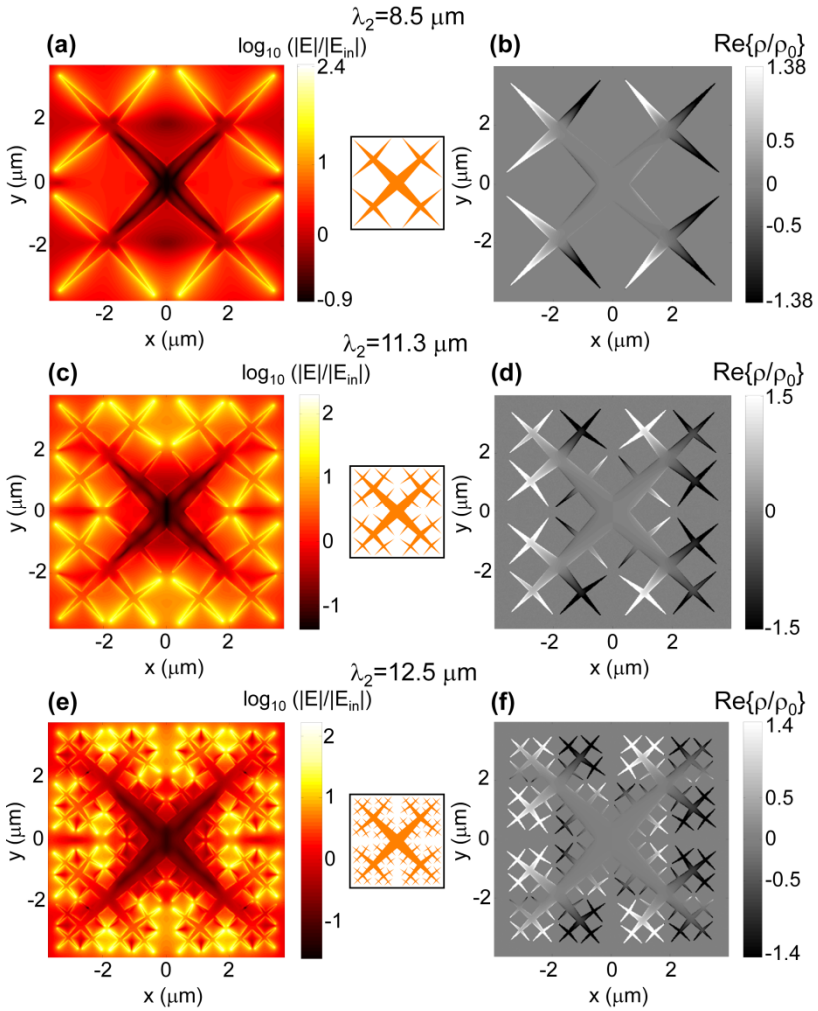


Şekil 3.10. 1. mod için; ilk dört iterasyondaki nanoantenlerin, *x*-kutuplu ışık altında, üst yüzeyindeki **(a,c,e,g)** logaritmik $|H|/|H_{in}|$ ve **(b,d,f,h)** $|J|/|J_0|$ dağılımları.

Yatay panel çiftleri arasındaki geometrik şekil, konumsal dağılımların hangi bölgede verildiğini göstermek üzere; Şekil 3.5'deki geometrik parametreler için verilen

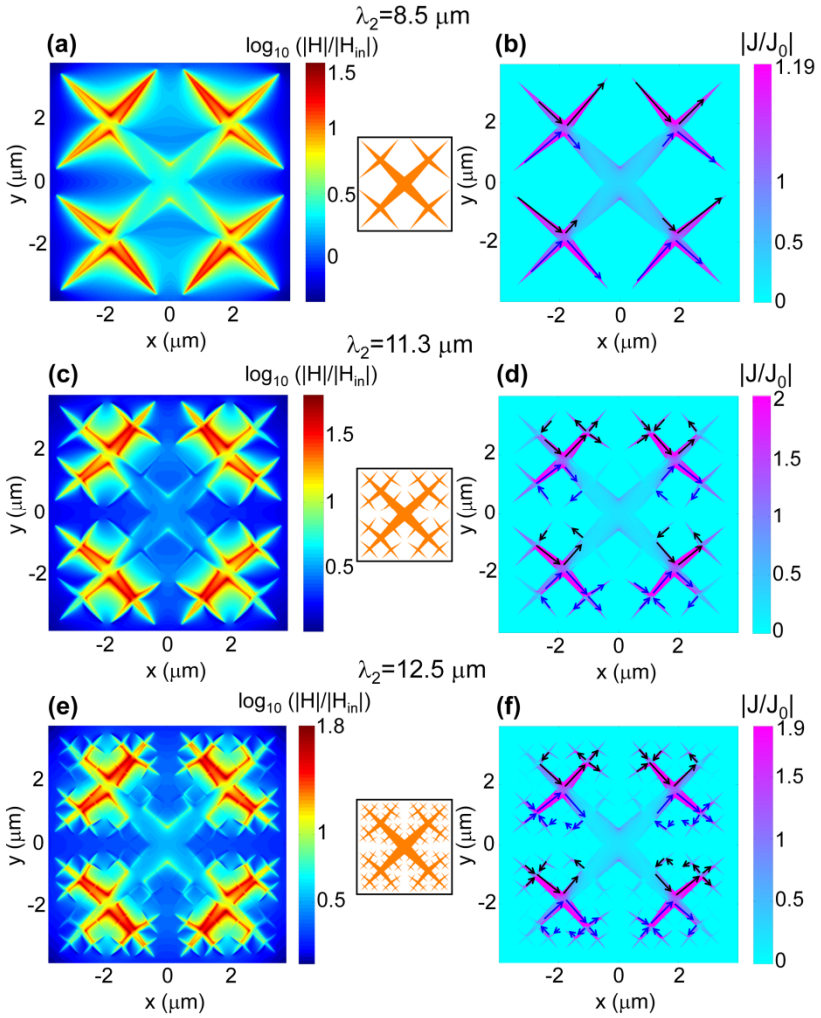
- 1. iterasyon (Şekil 3.9a,b ile Şekil 3.10a,b), 2. iterasyon (Şekil 3.9c,d ile Şekil 3.10c,d), 3. iterasyon (Şekil 3.9e,f ile Şekil 3.10e,f) ve 4. iterasyon (Şekil 3.9g,h ile Şekil 3.10g,h) Au nanoantenlerin; 1.moddaki (λ_1) logaritmik

E-alan (Şekil 3.9a,c,e,g) ve normalize yük yoğunluğu (Şekil 3.9b,d,f,h) dağılımları Şekil 3.9'da; rezonant plazmon modlardaki *H*-alan yükseltmesi ≈100 kata kadar ulaşmak üzere (Şekil 3.10e,g) logaritmik *H*-alan (Şekil 3.10a,c,e,g) ve normalize akım yoğunluğu (Şekil 3.10b,d,f,h) dağılımları Şekil 3.10'da;



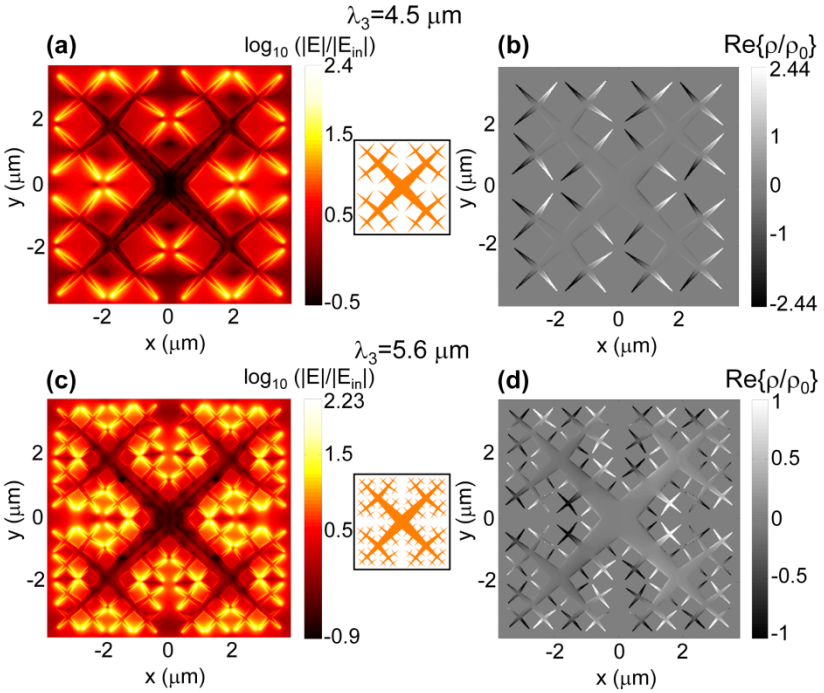
Şekil 3.11. 2. moddaki (λ_2) **(a,b)** 2., **(c,d)** 3. ve **(e,f)** 4. iterasyon nanoantenlerin, *x*-kutuplu ışık altında, üst yüzeyindeki **(a,c,e)** logaritmik $|E|/|E_{in}|$ ve **(b,d,f)** Re$\{\rho/\rho_0\}$ dağılımları.

- 2. iterasyon (Şekil 3.11a,b ve Şekil 3.12a,b), 3. iterasyon (Şekil 3.11c,d ve Şekil 3.12c,d) ve 4. iterasyon (Şekil 3.11e,f ve Şekil 3.12e,f) Au nanoantenlerin; 2. moddaki (λ_2) logaritmik $|E|/|E_{in}|$ (Şekil 3.11a,c,e) ve Re$\{\rho/\rho_0\}$ (Şekil 3.11b,d,f) dağılımları Şekil 3.11'da; logaritmik $|H|/|H_{in}|$ (Şekil 3.12a,c,e) ve $|J|/|J_0|$ dağılımları (Şekil 3.12b,d,f) Şekil 3.12'da;

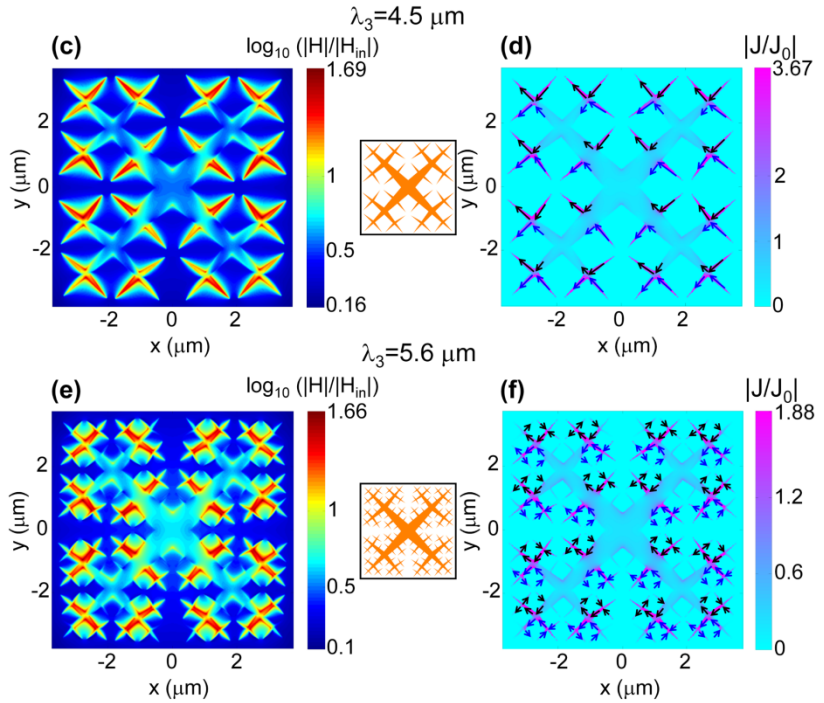


Şekil 3.12. 2. moddaki (λ_2) **(a,b)** 2., **(c,d)** 3. ve **(e,f)** 4. iterasyon nanoantenlerin, *x*-kutuplu ışık altında, üst yüzeyindeki **(a,c,e)** logaritmik $|H|/|H_{in}|$ ve **(b,d,f)** $|J|/|J_0|$ dağılımları.

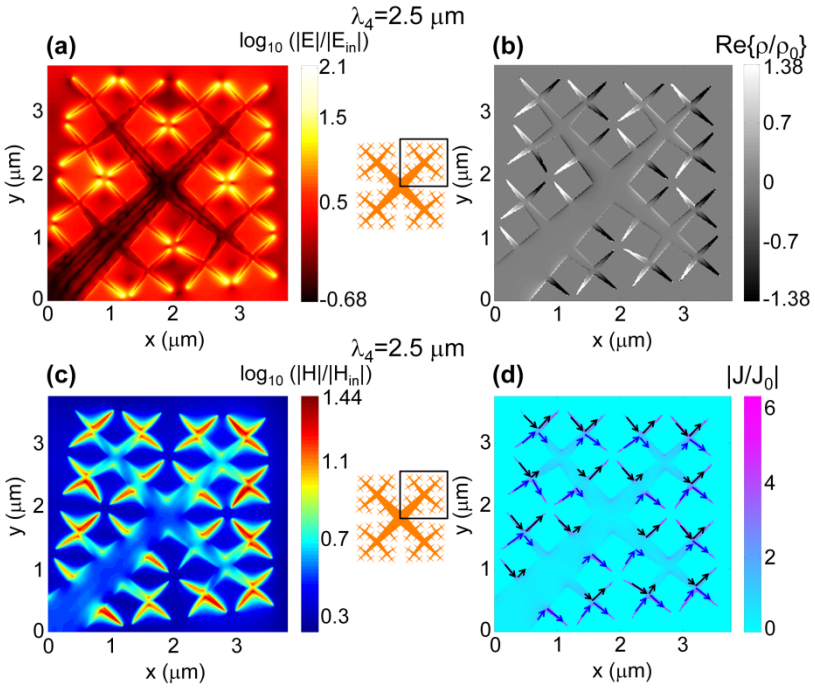
- 3. iterasyon (Şekil 3.13a,b ve Şekil 3.14a,b) ve 4. iterasyon (Şekil 3.13c,d ve Şekil 3.14c,d) Au nanoantenlerin; 3. moddaki (λ_3) logaritmik $|E|/|E_{in}|$ (Şekil 3.13a,c) ve Re$\{\rho/\rho_0\}$ dağılımları (Şekil 3.13b,d) Şekil 3.13'de; logaritmik $|H|/|H_{in}|$ (Şekil 3.14a,c) ve $|J|/|J_0|$ dağılımları (Şekil 3.14b,d) Şekil 3.14'de;
- 4. iterasyon geometrideki Au nanoantenin; 4.moddaki (λ_4) (Şekil 3.14a) logaritmik $|E|/|E_{in}|$ ile (Şekil 3.14b) Re$\{\rho/\rho_0\}$ dağılımları ve (Şekil 3.14c) logaritmik $|H|/|H_{in}|$ ile (Şekil 3.14d) $|J|/|J_0|$ dağılımları Şekil 3.14'de sunulmaktadır.



Şekil 3.13. 3. moddaki (λ_3) **(a,b)** 3. ve **(c,d)** 4. iterasyon nanoantenlerin, x-kutuplu ışık altında, üst yüzeyindeki **(a,c)** logaritmik $|E|/|E_{in}|$ ve **(b,d)** Re$\{\rho/\rho_0\}$ dağılımları.



Şekil 3.14. 3. moddaki (λ_3) **(a,b)** 3. ve **(c,d)** 4. iterasyon nanoantenlerin, x-kutuplu ışık altında, üst yüzeyindeki **(a,c)** logaritmik $|H|/|H_{in}|$ ve **(b,d)** $|J|/|J_0|$ dağılımları.

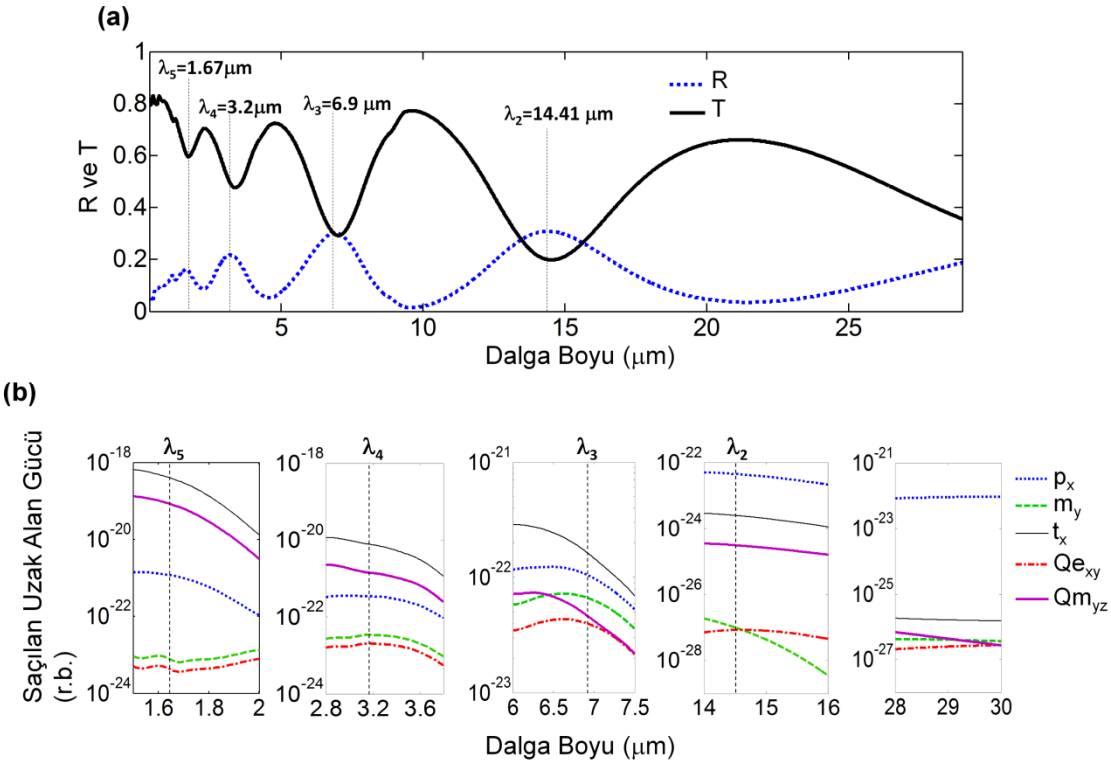


Şekil 3.15. 4. iterasyon nanoantenin, *x*-kutuplu ışık altında, 4. mod (λ_4) için üst yüzeyindeki **(a)** logaritmik $|E|/|E_{in}|$ ile **(b)** Re$\{\rho/\rho_0\}$ ve **(c)** logaritmik $|H|/|H_{in}|$ ile **(d)** $|J|/|J_0|$ dağılımları.

Şekil 3.9-3.15 ile verilen dağılımlarda, yüksek alan depolama ve fraktal ölçekleme mekanizması sistematik olarak gözlenmektedir. Bu çoklu-ölçekli davranış ters-Cesaro tip nanoantenlerin çoklu-spektral davranışının kaynağıdır.

Karmaşık geometrilere sahip bu *ters-Cesaro tip fraktal* nanoantenlerin; uyarılan farklı optik modlarının fiziksel kaynağının anlaşılabilmesi için yapılabilecek diğer bir analiz de çok-kutuplu açılım yöntemidir [115-120,122,123]. Bu nedenle tasarlanan ve beş ayrı modu da sergileyen, geometrik parametreleri Şekil 3.5 ile verilen 5. iterasyon *ters-Cesaro tip nanoanten*in; *x*- ve *y*- eksenlerinde 9 μm'lik periyotlara sahip dizisinin boş uzaydaki çok-kutuplu açılım ayrıştırması FDTD metodu yardımıyla yapılmaktadır. Bu bağlamda, ilgili nanoanten dizisinin rezonant dalga boylarını belirlemek için yansıma (*R*) ile geçiş (*T*) spektrumları ve rasgele birimlerdeki moment katkılarına ayrıştırılmış saçılan uzak alan güçleri Şekil 3.16'da sunulmuştur. Bu analiz sonuçlarına göre, 30 μm'den ötede olduğu anlaşılan 1. modda (λ_1; en uzun dalga boylu rezonant mod) ve 2. modda (λ_2) çoğunlukla *x*-doğrultusundaki çift-kutuplu elektrik moment $\boldsymbol{p_x}$ baskın iken $\boldsymbol{p_x}$'in diğer modlarda da etkin olduğu gözlenmektedir. Ancak daha kısa dalga boylarına doğru baskınlıkları artan; *x*-doğrultusundaki toroidal moment $\boldsymbol{t_x}$ ve

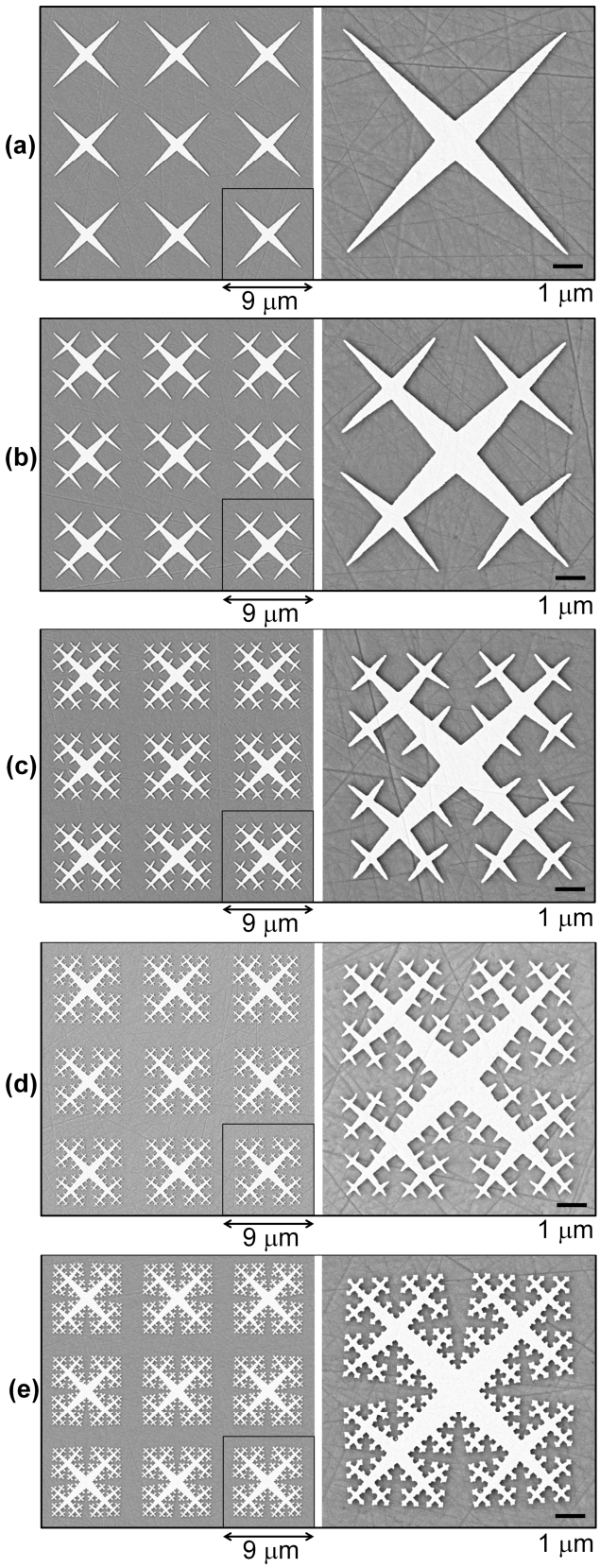
yz-yüzeyindeki dört-kutuplu manyetik moment $\boldsymbol{Qm}_{yz}$, Şekil 3.8, 3.10, 3.12, 3.14 ve 3.15 şekillerindeki akım yoğunluğu dağılımları ile belirlenen akım döngüleri içinde yakın manyetik alanı birlikte yükseltmektedirler.



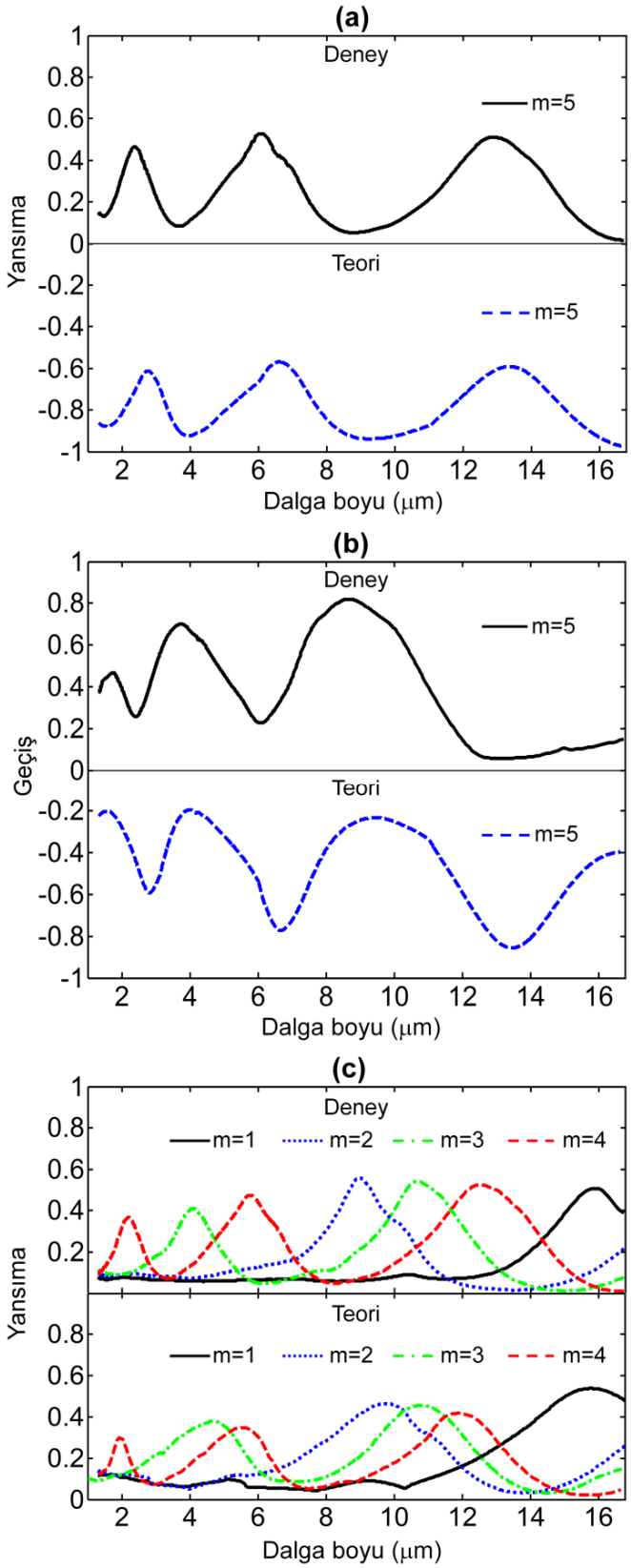
Şekil 3.16. (a) 9 μm periyotlardaki 5. iterasyon *ters-Cesaro nanoanten* dizisinin *R* ve *T* spektrumları. **(b)** Rezonant mod bölgelerinde her bir momentin saçılan güce katkısı.

Şekil 3.5'te geometrik parametreleri ile iterasyon geometrileri verilen ve nümerik analizler yoluyla çoklu-spektral davranışı ile bu davranışların fiziksel nedenleri incelenen *ters-Cesaro tip fraktal* nanoantenlerin, çoklu-spektral cevaplarının deneysel olarak da gösterilmesi için; 20 × 20 birim hücreden oluşan, 9 μm'lik periyotlara sahip dizileri, Şekil 2.6'daki nanoüretim aşamalarının ardından üretilelerek SEM yoluyla görüntülenmiştir. 10°'lik sivrilik açısına sahip ve minimum uzunlukları L_1 = 4470 nm, L_2 = 2056 nm, L_3 = 946 nm, L_4 = 435 nm ile L_5 = 200 nm olarak tasarlanan *ters-Cesaro tip fraktal* şeklindeki Au nanodevrelerin ilk beş iterasyonu CaF_2 alt taban üzerine üretilmiş olup; SEM görüntüleri Şekil 3.17'de gösterilmektedir. Şeklin sol panelleri tüm dizinin 3 × 3'lük kısmını gösterirken sağ panelleri ilgili birim hücreyi vermektedir ve sağ panellerdeki ölçek 1 μm'dir. Üretilen tüm iterasyonlar için aynı maksimum boyut ve

9 μm'lik periyotlar yani aynı devre boyutu seçilmiştir. Dolayısıyla her iterasyon artışında sisteme, ölçek faktörüne göre boyutları küçülen bir alt ölçekteki sivri elemanlar eklenmiştir. Çözünürlük gibi EBL sınırlamaları ve CaF_2 alt tabana metal yapıştırmanın daha zor olması nedeniyle ideal geometrilerdeki sivri uçlar, yaklaşık olarak 10 nm'lik eğrilik yarıçapı ile kırpılarak ve 5. iterasyonla gelen 5. mertebe sivri uçlar da yarı yarıya kırpılarak üretilmiştir. Üretilen yapıların plazmonik rezonanslarını deneysel olarak da göstermek için FTIR spektroskopisi ile deneysel yansıma ve geçiş spektrumları ölçülmüştür ve nümerik olarak analiz edilen yansıma ve geçiş spektrumlarıyla karşılaştırılmıştır. Şekil 3.18a'da, 5. iterasyon *ters-Cesaro tip nanoanten* dizilerinin yansıma modundaki FTIR spektrumları ile FDTD simülasyon sonuçları arasındaki karşılaştırma; benzer olarak Şekil 3.18b'da bu anten dizilerinin geçiş modundaki FTIR spektrumları ile FDTD simülasyon sonuçları arasındaki karşılaştırma sunulmaktadır. Yine ilk dört iterasyondaki anten dizilerinin yansıma modundaki FTIR spektrumları ile FDTD simülasyon sonuçları da Şekil 3.18c'de verilmektedir. Şekil 3.18, deneysel sonuçlar ile nümerik sonuçlar arasında, karşılıklı rezonant modlardaki ihmal edilebilecek kaymalar haricinde, çok iyi bir uyum olduğunu göstermektedir. Ayrıca simülasyonlarda kullanılan CaF_2 dağınım verisi 12 μm'lik dalga boyuna kadardır [144] ve pratikte CaF_2 alt taban, 12 μm'den sonraki dalga boylarında düşük optik geçirgenlik sergilemektedir. FDTD simülasyon programı kullanılan veriyi çoklu-katsayılı modele (MCM; multi-coefficient model) göre daha yüksek dalga boylarına uydurmaktadır [133]. Bu nedenle 5. iterasyon antenlerin geçiş modundaki FTIR spektrumları ile FDTD simülasyon sonuçları, 12 μm'den sonraki dalga boylarında uyum göstermemektedir. Deneysel sonuçlar ile nümerik sonuçların karşılıklı rezonant modlarındaki ihmal edilebilir kaymalara, çoğunlukla EBL işlemindeki yük birikmesi gibi sınırlamalar nedeniyle yapının merkezinden kenarlarına doğru farklılaşan genişleme problemi neden olmaktadır. Yine simülasyonlarda dikkate alınan malzeme dağınım verilerinin de bu kaymaya etkisi olmaktadır. Ayrıca üretilen nanoantenlerin köşeleri tasarlanan geometrilerdeki gibi tam sivri değildir. Bu nedenle yansıma ve geçiş spektrumları FDTD metodu ile analiz edilirken nanoanten köşeleri 10 nm'lik yarıçapla yuvarlatılarak ve ayrıca 5. iterasyon için L_5 boyutunda tasarlanmış küçük adacıklar 70 nm kırpılarak simülasyon yapılmıştır. Bu sınırlamalar dışında Şekil 3.18'de, NIR'dan MIR'a kadar olan geniş bir spektral aralıkta, *ters-Cesaro tip nanoanten*lerin birbirinden ayrı plazmon modlarına sahip olduğu açıkça gözlenmektedir.

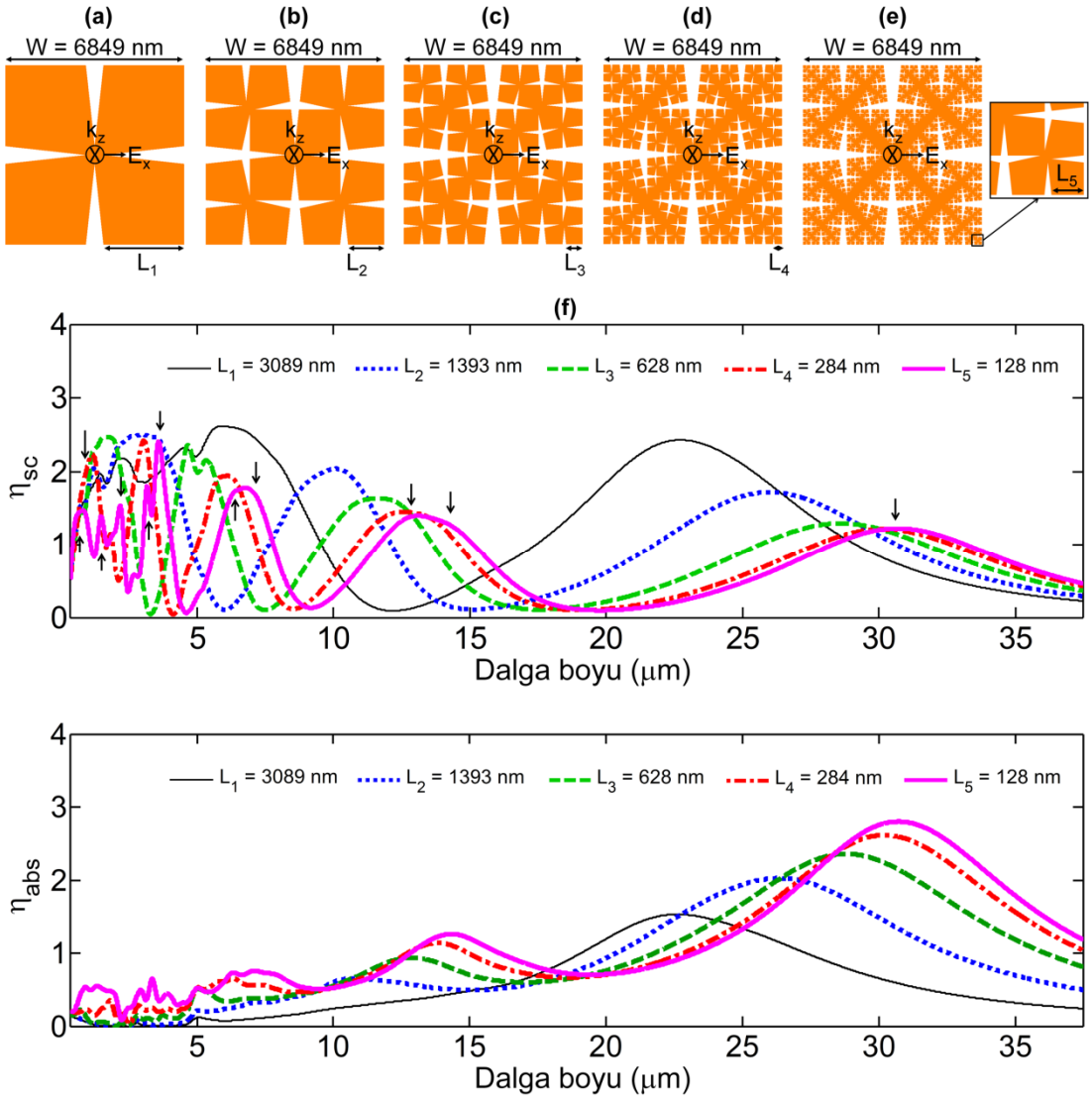


Şekil 3.17. CaF_2 alt taban üzerine üretilmiş olan *ters-Cesaro tip fraktal nanoantenler*: **(a)** 1. iterasyon, **(b)** 2. iterasyon, **(c)** 3. iterasyon, **(d)** 4. iterasyon ve **(e)** 5. iterasyon anten dizilerinin 3 × 3'lük kısmının (sol paneller) ve birim hücresinin (sağ paneller) SEM görüntüleri.



Şekil 3.18. Üretilen *ters-Cesaro tip nanoanten* dizilerinin (Şekil 3.17) **(a)** 5. iterasyonu için yansıma modundaki, **(b)** 5. iterasyonu için geçiş modundaki ve **(c)** 1., 2., 3. ile 4. iterasyonları için yansıma modundaki FTIR spektrumları ile FDTD simülasyon sonuçları arasındaki karşılaştırma.

3.3.1.2. U#2 Cesaro-1 Tip Fraktal Nanoanten Dizileri



Şekil 3.19. Saçılma ve soğurma kesit alanlarının fraktal gelişimine bağlılığı: **(a)** 1., **(b)** 2., **(c)** 3., **(d)** 4. ve **(e)** 5. iterasyonlardaki *Cesaro-1 tip fraktal*ların üstten görünümü. Her bir iterasyon için spektral normalize **(f)** saçılma ve **(g)** soğurma kesit alanları.

Devre boyutunun sabit tutulup iterasyon sayısının arttırıldığı fraktal geometrili plazmonik nanoanten yapıları için tasarlanan diğer bir fraktal geometrisi *Cesaro-1 tip fraktal* geometrisidir. Tez çalışmasının bu kısmında Şekil 1.2'deki gibi ilk beş iterasyondaki geometriler türetilip; her bir iterasyon için minimum ayrıt uzunlukları Tablo 1.2'deki gibi L_1 = 3089 nm, L_2 = 1393 nm, L_3 = 628 nm, L_4 = 283 nm ve L_5 = 128 nm alınarak; θ=12.5°'lik girinti açısı için nümerik olarak tasarlanan; sabit

devre boyutuna sahip *Cesaro-1 tip nanoantenler* FDTD metodu ile analiz edilmiştir. Her bir iterasyon için saçılma kesit alanı ile soğurma kesit alanı spektrumları elde edilmiştir. (3.1a,b) eşitlikleri kullanılarak da normalize saçılma kesit alanı η_{sc} ve normalize soğurma kesit alanı η_{abs} belirlenmiştir ve Şekil 3.19'da sunulmaktadır (çizgiler her bir iterasyonun minimum ayrıt uzunluğuna göre etiketlenmiştir). Şekil 3.19a-e'de sırasıyla ilk beş iterasyondaki Au nanoantenler için seçilen geometrik parametreler verilmektedir. Bu panellerden anlaşılacağı üzere, tüm iterasyonlar sabit devre boyutunda tasarlanmıştır. Yani *m* iterasyon sayısı ve L_m minimum ayrıt uzunluğu olmak üzere bu tasarımda her bir iterasyon için fraktal genişliği W_m, 6849 nm'de sabit tutulmuştur. Şekil 3.19'dan 0.375 μm ila 37.5 μm (8 THz ila 800 THz) spektral aralığındaki saçılma kesit alanı için belirlenmiş rezonant dalga boyları, Tablo 3.3'de verilmektedir. Bu tasarımda altın yüzey fazla olduğundan bu fraktal antenler, daha belirgin ve çoklu-rezonant saçılma karakteristikleri sergilemektedir. Şekil 3.19f'de, 5. iterasyon için oklarla belirtilen rezonant dalga boyları, en uzun dalga boyundan kısa dalga boyuna doğru (hibrit modlarla birlikte) λ_1, λ_2, $\lambda_2^{(h)}$, λ_3, $\lambda_3^{(h)}$, λ_4, $\lambda_4^{(h)}$, λ_5, $\lambda_5^{(h)}$, λ_6 ve $\lambda_6^{(h)}$ olarak adlandırılmaktadır. $\lambda_2^{(h)}$, $\lambda_3^{(h)}$, $\lambda_4^{(h)}$, $\lambda_5^{(h)}$ ve $\lambda_6^{(h)}$ aşağıda inceleneceği gibi kendinden daha uzun dalga boylu modun hibrit modu olup; farklı alan, yük ve akım dağılımlarına sahiptir ve $^{(h)}$ üst simgesi ile belirtilmektedir.

Tablo 3.3'de görüldüğü gibi bu kompakt tasarımla, kontrol edilebilir bir spektral yoğunluk ve iterasyon sayısından daha fazla sayıda rezonant mod sağlanmaktadır. Şekil 3.19'daki geometrik parametrelere sahip fraktal geometrisi için başarı ölçütü, rezonant dalga sayısı *m*+1 olduğundan, $FOM = (m+1)/A_m$ olarak tanımlanıp Tablo 3.4'de sunulmaktadır. *Ters-Cesaro fraktal* nanoantenler için Tablo 3.2'de verilen *FOM* değerleri ile *Cesaro-1 tip fraktal* nanoantenler için Tablo 3.4'de verilen *FOM* değerleri karşılaştırıldığında; *ters-Cesaro tip fraktal* nanoantenlerin *FOM* değerlerinin iterasyon sayısının artışı ile arttığı, ancak *Cesaro-1 tip fraktal* nanoantenlerin *FOM* değerlerinin iterasyon sayısı artışı ile azaldığı görülmektedir. Şekil 3.5 ve 3.19'daki antenlerin devre boyutunun aynı olmasına ve *Cesaro-1 tip fraktal* nanoantenlerin daha fazla sayıda rezonant mod sergilemesine rağmen *FOM* değerlerindeki bu fark, *Cesaro-1 tip fraktal* nanoantenlerin yüzey alanında azalış olurken *ters-Cesaro tip fraktal* nanoantenlerin yüzey alanında artış olmasına bağlıdır.

Tablo 3.3. Şekil 3.19 ile verilen fraktal nanoantenler için rezonant dalga boyları.

	***m*=5**	***m*=4**	***m*=3**	***m*=2**	***m*=1**
λ_1	30.7 μm	30.2 μm	28.6 μm	26 μm	22.75 μm
λ_2	14.5 μm	14 μm	12.56 μm	10.2 μm	6.6 μm
$\lambda_2^{(h)}$	13.1 μm	12.76 μm	11.5 μm	8.6 μm	4.5 μm
λ_3	7 μm	6 μm	5.4 μm	3 μm	
$\lambda_3^{(h)}$	6.2 μm	5.2 μm	4.3 μm	2 μm	
λ_4	3.6 μm	3.2 μm	2.5 μm		
$\lambda_4^{(h)}$	3.1 μm	2.5 μm	1.65 μm		
λ_5	2.2 μm	1.8 μm			
$\lambda_5^{(h)}$	1.8 μm	1.1 μm			
λ_6	0.8 μm				
$\lambda_6^{(h)}$	0.6 μm				

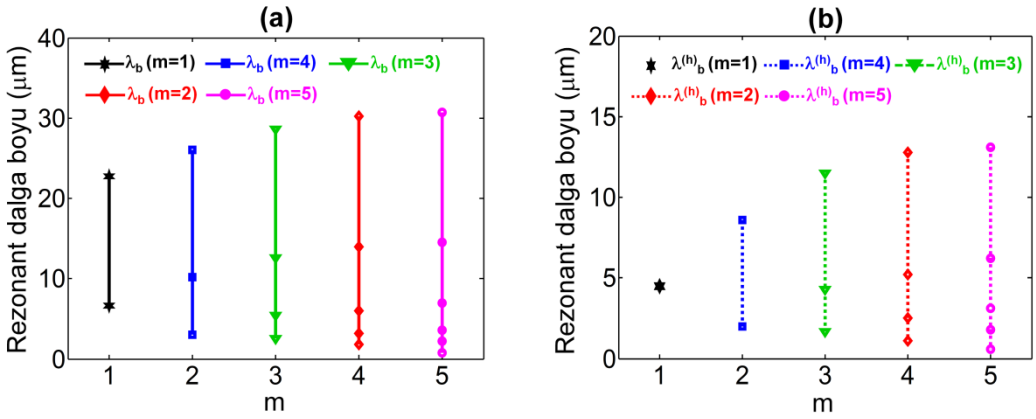
Tablo 3.4. Şekil 3.19'daki *Cesaro-1 tip nanoanten*lerin farklı iterasyonları için *FOM* değerleri.

	***m*=1**	***m*=2**	***m*=3**	***m*=4**	***m*=5**
A_m **(μm²)**	42.7999	39.4484	36.702	34.6824	24.5273
FOM_m **(1/μm²)**	0.0467	0.0761	0.109	0.1442	0.2446

İlgili spektral aralıktaki birbirinden ayrı rezonanslar, sayıca iterasyon sayısı *m*'den fazladır. Şekil 3.19'da verilen nanoantenlerin, Tablo 3.3'de verilen her bir mod için rezonant dalga boyu değişimine göre ifade ettiği değerler aşağıdaki gibidir:

- λ_1, tüm iterasyonlar için en uzun dalga boyundaki 1. mertebe modu ifade etmektedir.
- λ_2, tüm iterasyonlar için daha kısa dalga boyundaki 2. mertebe modu; $\lambda_2^{(h)}$, hibridizasyon sonucu oluşan λ_2'deki EM alan deseninin hibridi olan alan desenine sahip hibrit modu ifade etmektedir.

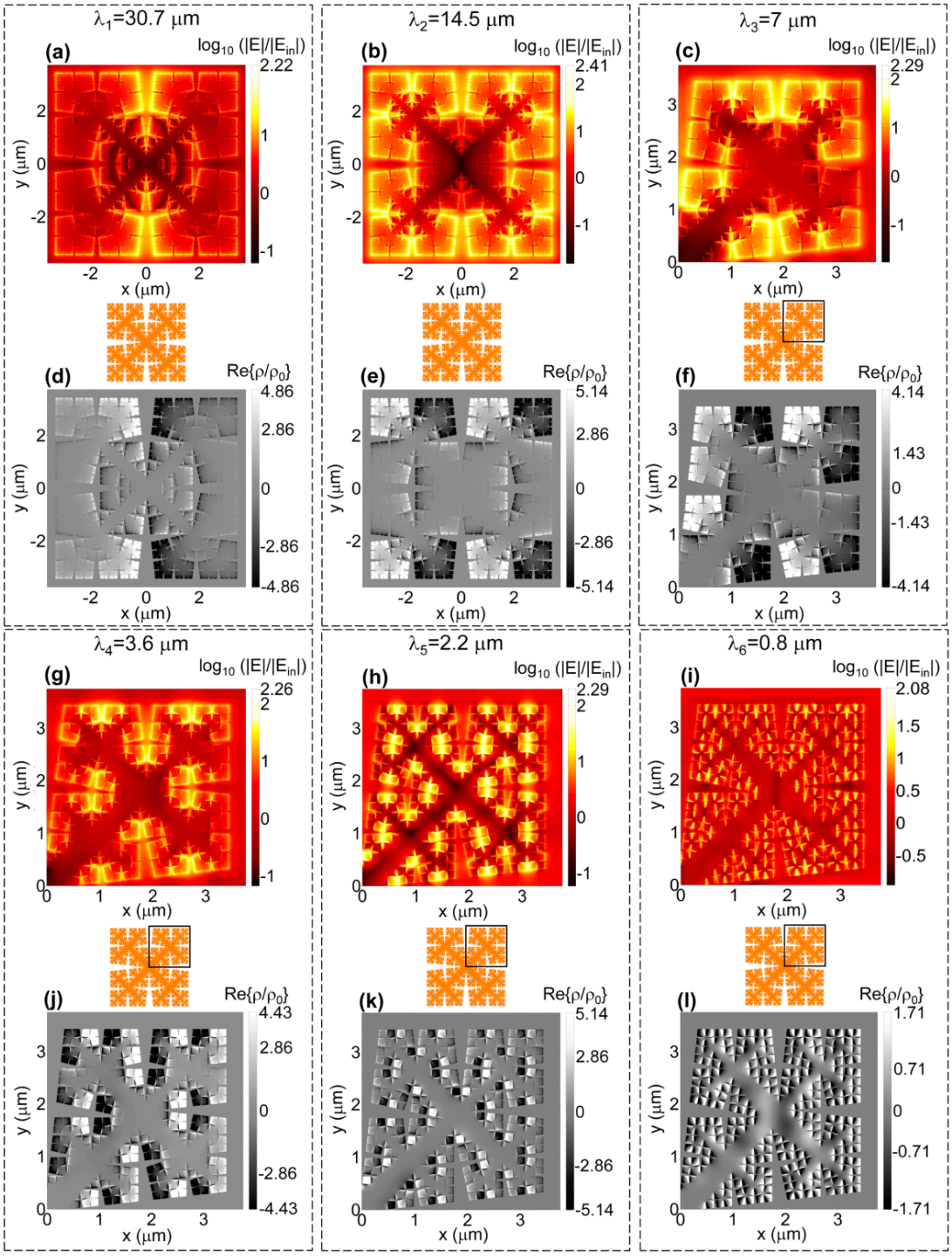
- λ_3; 2., 3., 4. ve 5. iterasyonlar için 3. mertebe modu; $\lambda_3^{(h)}$, hibridizasyon sonucu oluşan λ_3'deki EM alan deseninin hibridi olan alan desenine sahip hibrit modu ifade etmektedir.
- λ_4; 3., 4. ve 5. iterasyonlar için 4. mertebe modu; $\lambda_4^{(h)}$ hibridizasyon sonucu oluşan λ_4'deki EM alan deseninin hibridi olan alan desenine sahip hibrit modu ifade etmektedir.
- λ_5, 4. ve 5. iterasyonlar için 5. mertebe modu; $\lambda_5^{(h)}$ hibridizasyon sonucu oluşan λ_5'deki EM alan deseninin hibridi olan alan desenine sahip hibrit modu ifade etmektedir.
- λ_6, 5. iterasyonun en kısa dalga boylu 6. mertebe modu; $\lambda_6^{(h)}$ hibridizasyon sonucu oluşan λ_6'deki EM alan deseninin hibridi olan alan desenine sahip hibrit modu ifade etmektedir.



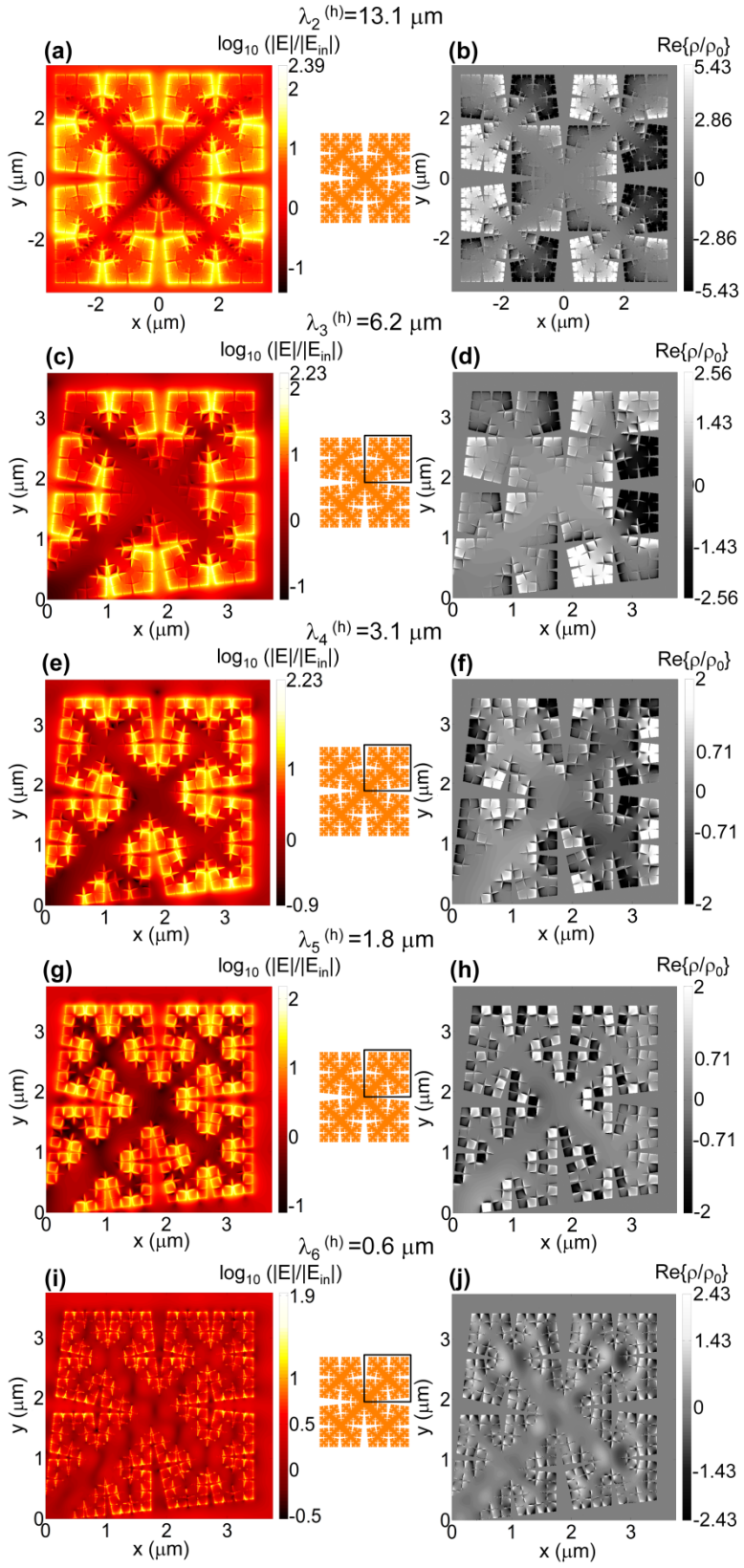
Şekil 3.20. (a) Şekil 3.19'da verilen nanoantenlerin, *m.* iterasyondaki ana rezonant dalga boyu değişimleri ve **(b)** *m.* iterasyondaki hibrit mod değişimleri.

Görüldüğü gibi fraktal ölçekleme etkisi rezonant dalga boyları üzerinde de söz konusudur ve iterasyon sayısı *m*'in arttırılması daha kısa dalga boylu rezonant modlara sebep olmaktadır. Ayrıca iterasyon artışıyla birlikte, aynı tür rezonant modun dalga boylarında kırmızıya kayma meydana getirmektedir. Çünkü iterasyonların genel ve yerel geometrik özellikleri değiştiğinden antenlerin ilgili rezonant modlardaki etkin uzunlukları da değişmektedir. Ayrıca, Şekil 3.20'deki gibi, aynı iterasyonun tüm modları dikkate alındığında, fraktal ölçekleme etkisinin logaritmik ölçekte meydana gelen modlara neden olduğu da gözlenmektedir. Şekil 3.20'deki çizgi etiketlerinde;

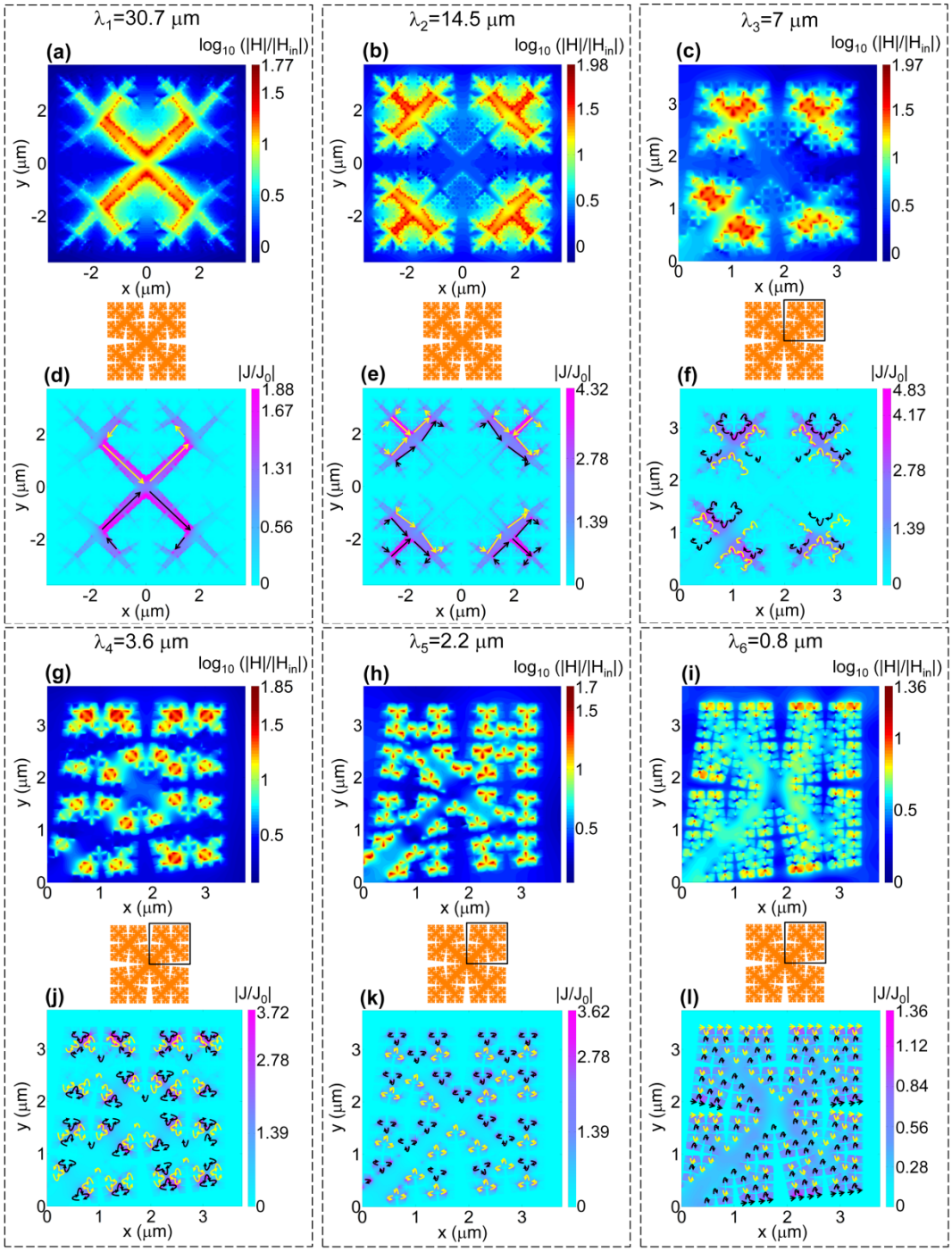
b mod mertebesini ve $^{(h)}$ üst simgesi ilgili modun hibrit modunu belirtmektedir. Şekil 3.20a'da *m* iterasyon sayısına karşılık ana rezonant modlar verilirken Şekil 3.20b'de *m* iterasyon sayısına karşılık hibrit modlar verilmektedir.



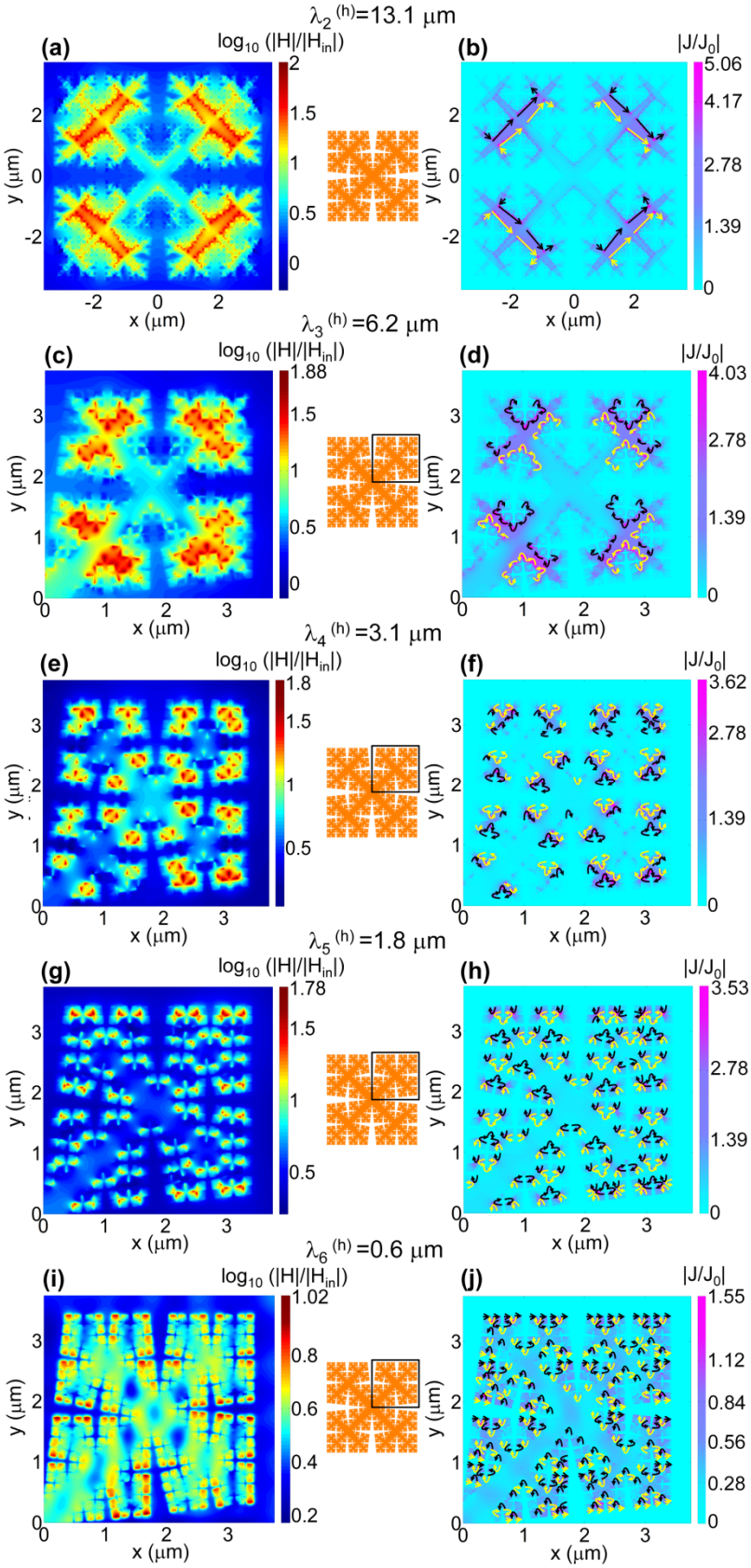
Şekil 3.21. Ana modlar için, x-kutuplu ışık altında, 5. iterasyon Au nanoantenin üst yüzeyindeki konumsal **(a-c,g-i)** logaritmik $|E|/|E_{in}|$ ve **(d-f,j-l)** Re$\{\rho/\rho_0\}$ dağılımları.



Şekil 3.22. Hibrit modlar için, x-kutuplu ışık altında, 5. iterasyon Au nanoantenin üst yüzeyindeki konumsal **(a,c,e,g,i)** logaritmik $|E|/|E_{in}|$ ve **(b,d,f,h,j)** Re$\{\rho/\rho_0\}$ dağılımları.



Şekil 3.23. Ana modlar için, x-kutuplu ışık altında, 5. iterasyon Au nanoantenin üst yüzeyindeki konumsal **(a-c,g-i)** logaritmik $|H|/|H_{in}|$ ve **(d-f,j-l)** $|J|/|J_0|$ dağılımları.



Şekil 3.24. Hibrit modlar için, x-kutuplu ışık altında, 5. iterasyon Au nanoantenin üst yüzeyindeki **(a,c,e,g,i)** logaritmik $|H|/|H_{in}|$ ve **(b,d,f,h,j)** $|J|/|J_0|$ dağılımları.

Şekil 3.19'daki *Cesaro-1 tip nanoanten*lerin çoklu-spektral davranışı, ρ yük yoğunluğuna bağlı olarak *E*-alan dağılımlarından ve *J* akım yoğunluğuna bağlı olarak *H*-alan dağılımlarından tayin edilebilir. Bu nedenle iterasyon değişimine ve mod türlerine bağlı olarak yapılan sitematik alan dağılımı analizleri yoluyla, kaynağa göre normalize edilmiş yakın EM alanların konumsal dağılımları $|E|/|E_{in}|$ ile $|H|/|H_{in}|$ ve bu dağılımları destekleyecek, sistemdeki rezonant maksimum yük ve akım yoğunluklarının en küçük değerlerine normalize edilmiş yük yoğunluğu $\mathrm{Re}\{\rho/\rho_0\}$ ile akım yoğunluğu $|J/J_0|$'nun konumsal dağılımları sistematik olarak belirlenmiştir. Böylece plazmonik yapının yerel ve genel geometrik simetrilerinin rezonant modlar üzerindeki etkileri, incelenen her bir iterasyonda sistematik olarak anlaşılabilmektedir. Simülasyonlarda E_{in} = 1 genlikli E_x-kutuplu kaynak kullanılmıştır. H_y gelen manyetik alanı $H_{in} = E_{in}\sqrt{\varepsilon_0/\mu_0}$ = 2.654x10^{-3} A/m'dir. EM alanlar da $|E|/|E_{in}|=|E|$ ve $|H|/|H_{in}|=|H|$ eşitlikleri yoluyla normalize edilmiştir. Sistemdeki yük yoğunluğu ve deplasman akım yoğunluğu, FDTD simülasyonlarından elde edilen 3D alan verisinden, sırasıyla, $\nabla.\boldsymbol{D} = \rho_V$ ve, $\boldsymbol{J} = i\omega\varepsilon_0\boldsymbol{D}$ formülleri ile hesaplanmıştır. Akım ve yük dağılımları için normalizasyon değerleri ρ_0 = 0.14 C/m^3 ve J_0 = 3.6x10^6 A/m^2 olarak alınmıştır. Şekil 3.21'de, dikey panel çiftleri arasındaki geometrik şekil, dağılımların hangi bölgede verildiğini göstermek üzere, tüm ana rezonant modlar olan 1. mod (λ_1 = 30.7 μm) (Şekil 3.21a,d), 2. mod (λ_2 = 14.5 μm) (Şekil 3.21b,e), 3. mod (λ_3 = 7 μm) (Şekil 3.21c,f), 4. mod (λ_4 = 3.6 μm) (Şekil 3.21g,j), 5. mod (λ_5 = 2.2 μm) (Şekil 3.21h,k) ve 6. mod (λ_6 = 0.8 μm) (Şekil 3.21i,l) için, *x*-kutuplu ışık altında, 5. iterasyon Au nanoantenin (L_5 = 128 nm) (Şekil 3.19e) üst yüzeyindeki konumsal logaritmik $|E|/|E_{in}|$ (Şekil 3.21a-c,g-i) ve $\mathrm{Re}\{\rho/\rho_0\}$ (Şekil 3.21d-f,j-l) dağılımları verilmektedir. Fraktalın ölçekleme etkisi bu dağılımlarda kolaylıkla gözlemlenebilmektedir. Logaritmik $|E|/|E_{in}|$ panellerindeki (Şekil 3.21a-c,g-i) dağılımlara bakıldığında alan yoğun nokta desenlerinin fraktalın bir alt ölçeğindeki parçacık kümelerine indiği görülmektedir. Yine fraktalın ölçekleme etkisi Şekil 3.21d-f,j-l panellerindeki lineer ölçekli normalize yük dağılımları $\mathrm{Re}\{\rho/\rho_0\}$'dan da kolaylıkla anlaşılmaktadır. Şekil 3.21a,b,d,e panellerindeki konumsal dağılımlar yapı yüzeyinin tamamı için sunulurken diğer panellerdeki konumsal dağılımlar, daha açık bir gösterim için yapının ilk çeyreğinde sunulmaktadır. Görüldüğü gibi çift-kutuplu-tip modlar tüm yapı boyunca uzanmaktadır. Diğer taraftan iterasyon arttıkça daha küçük

boyuttaki rezonant metalik adacık kümesi kendini göstermekte ve aynı geometrik yapıda olan bu kümeler sonuçları daha yüksek plazmonik frekansla etkileşime girmektedir. Şekil 3.21a-c,g-i panelleri, nanoantendeki metalik adacıkların her alt kümesinin (yani daha küçük ölçekteki kümesinin) daha kısa dalga boylarıyla etkileştiğini göstermektedir. Farklı uzunluk ölçeklerinde optik rezonansların bu hiyerarşik kademedeki dizisi yük dağılımlarından da anlaşılabilir (3.21d-f,j-l). Şekil 3.22 ile de; yatay panel çiftleri arasındaki geometrik şekil, dağılımların hangi bölgede verildiğini göstermek üzere; tüm hibrit modlar olan 2. hibrit mod ($\lambda_2^{(h)}$ = 13.1 μm) (Şekil 3.22a,b), 3. hibrit mod ($\lambda_3^{(h)}$ = 6.2 μm) (Şekil 3.22c,d), 4. hibrit mod ($\lambda_4^{(h)}$ = 3.1 μm) (Şekil 3.22e,f), 5. hibrit mod ($\lambda_5^{(h)}$ = 1.8 μm) (Şekil 3.22g,h) ve 6. hibrit mod ($\lambda_6^{(h)}$ = 0.6 μm) (Şekil 3.22i,j) için *x*-kutuplu ışık altında 5. iterasyon Au nanoantenin (L_5 = 128 nm) (Şekil 3.19e) üst yüzeyindeki konumsal logaritmik $|E|/|E_{in}|$ (Şekil 3.22a,c,e,g,i) ve Re{ρ/ρ_0} (Şekil 3.22b,d,f,h,j) dağılımları verilmektedir. Burada bir ana mod ile hibrit modunun alan yükseltmeleri benzer lokal bölgelerde meydana gelmektedir. Ancak yük ve akım dağılımları farklılaşmış olup bu da enerji yoğun noktalarda belirgin değişikliklere neden olmaktadır. Hibrit modların nedeni, ilgili rezonant dalga boyundaki ilgili adacık kümelerinin, birbirlerine çok yakın olduklarından, hibrit etkileşimler göstermeleridir. Bu nanoanten yapısı ile 1. mod haricindeki tüm modlara hibrit modlar eşlik etmekte ve geniş bir bantta EM alan yükseltmesi sağlanmaktadır. Bu da geniş bant SEIRA uygulamaları için daha uygun bir nanoanten tasarımı anlamına gelmektedir. Fraktalın ölçekleme etkisi bu dağılımlarda kolaylıkla gözlemlenebilmektedir. Logaritmik $|E|/|E_{in}|$ panellerindeki (Şekil 3.22a,c,e,g,i) dağılımlarına bakıldığında, alan yoğun nokta desenlerinin fraktalın bir alt ölçeğindeki parçacık kümelerine indiği görülmektedir. Yine bu etki Şekil 3.22b,d,f,h,j panellerindeki lineer ölçekli normalize yük dağılımları Re{ρ/ρ_0}'dan daha kolay anlaşılmaktadır. Bu yük dağılımlarının, Şekil 3.21e,f,j-l panellerindeki ilgili yük dağılımlarından farklı olduğuna dikkat edilmelidir. Şekil 3.22a,b panellerindeki konumsal dağılımlar yapı yüzeyinin tamamı için sunulurken diğer panellerdeki konumsal dağılımlar, daha açık bir gösterim için yapının ilk çeyreğinde sunulmuştur.

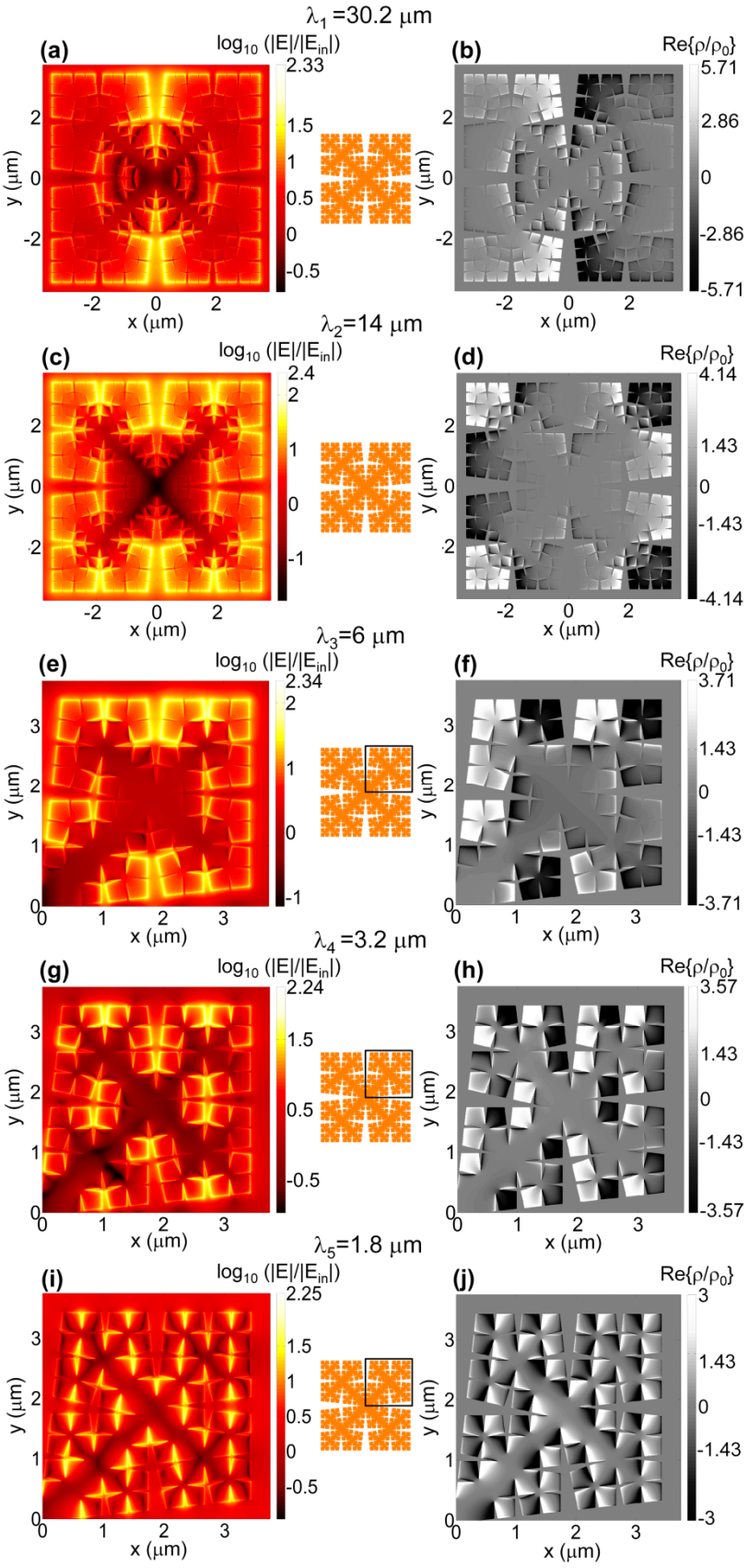
*Cesaro-1 tip nanoanten*lerin çoklu-spektral potansiyelinin tam olarak anlaşılabilmesi için ilgili rezonant modlardaki konumsal *H*-alan ve ilgili akım yoğunluğu dağılımları da

incelenmiştir. Bu bağlamda Şekil 3.23'de; dikey panel çiftleri arasındaki geometrik şekil, dağılımların hangi bölgede verildiğini göstermek üzere; tüm ana rezonant modlar olan 1. mod (λ_1 = 30.7 μm) (Şekil 3.23a,d), 2. mod (λ_2 = 14.5 μm) (Şekil 3.23b,e), 3. mod (λ_3 = 7 μm) (Şekil 3.23c,f), 4. mod (λ_4 = 3.6 μm) (Şekil 3.23g,j), 5. mod (λ_5 = 2.2 μm) (Şekil 3.23h,k) ve 6. mod (λ_6 = 0.8 μm) (Şekil 3.23i,l) için, *x*-kutuplu ışık altında, 5. iterasyon Au nanoantenin (L_5 = 128 nm) (Şekil 3.19e) üst yüzeyindeki konumsal logaritmik $|H|/|H_{in}|$ (Şekil 3.23a-c,g-i) ve $|J|/|J_0|$ (Şekil 3.23d-f,j-l) dağılımları verilmektedir. Şekil 3.23a,b,d,e panellerindeki konumsal dağılımlar, yapı yüzeyinin tamamı için sunulurken diğer panellerdeki konumsal dağılımlar, daha açık bir gösterim için yapının ilk çeyreğinde sunulmuştur. Metalik parçacıkların üzerinde oluşan akım döngüsü çiftleri ise sarı ve siyah renklerle ayırt edici düzenlemelerde verilmiş olup bu akım döngüleri, dielektrik aralıklı ayrık-halka rezönatörü benzeri yapıların fraktal dağılımı gibi davranmaktadır ve döngüler içinde *z*-doğrultusunda manyetik alan daha fazla yükseltilmektedir (Şekil 3.23a-c,g-i). Çünkü daha kısa dalga boylarında, bir alt ölçekte akım döngüleri oluşmaktadır. Bu da yukarıda bahsedilen fraktal ölçekleme etkisinin manyetik alan ve akım yoğunluğu bakımından sonuçları olmaktadır. *E*-alan enerji yoğun noktalarına göre *H*-alan enerji yoğun noktalarının başka bölgelerde yerelleşmesi maddenin manyetik geçişlerinin yerel kontrolünü sağlamaktadır [156]. Yatay panel çiftleri arasındaki geometrik şekil, dağılımların hangi bölgede verildiğini göstermek üzere, tüm hibrit modlar olan 2. hibrit mod ($\lambda_2^{(h)}$ = 13.1 μm) (Şekil 3.24a,b), 3. hibrit mod ($\lambda_3^{(h)}$ = 6.2 μm) (Şekil 3.24c,d), 4. hibrit mod ($\lambda_4^{(h)}$ = 3.1 μm) (Şekil 3.24e,f), 5. hibrit mod ($\lambda_5^{(h)}$ = 1.8 μm) (Şekil 3.24g,h) ve 6. hibrit mod ($\lambda_6^{(h)}$ = 0.6 μm) (Şekil 3.24i,j) için, *x*-kutuplu ışık altında, 5. iterasyon Au nanoantenin (L_5 = 128 nm) (Şekil 3.19e) üst yüzeyindeki konumsal logaritmik $|H|/|H_{in}|$ (Şekil 3.24a,c,e,g,i) ve $|J|/|J_0|$ (Şekil 3.24b,d,f,h,j) dağılımları da bu modların hibrit özelliklerinin anlaşılmasında önemlidir. Şekil 3.22'deki *E*-alan ve yük dağılımlarına benzer olarak, Şekil 3.24a,b panellerindeki konumsal dağılımlar yapı yüzeyinin tamamı için sunulurken diğer panellerdeki konumsal dağılımlar, daha açık bir gösterim için yapının ilk çeyreğinde sunulmuştur. Böylece Şekil 3.21-24'deki sonuçlar, en küçük metal adacık kümelerinin en kısa dalga boyunda rezonansa girerken; daha büyük metal adacık kümelerinin daha uzun dalga boyuyla rezonansa girdiğini göstermektedir. Bu mekanizma, yüksek değerlerde yakın EM alanlara sahip, çoklu-ölçekte EM enerji yoğun

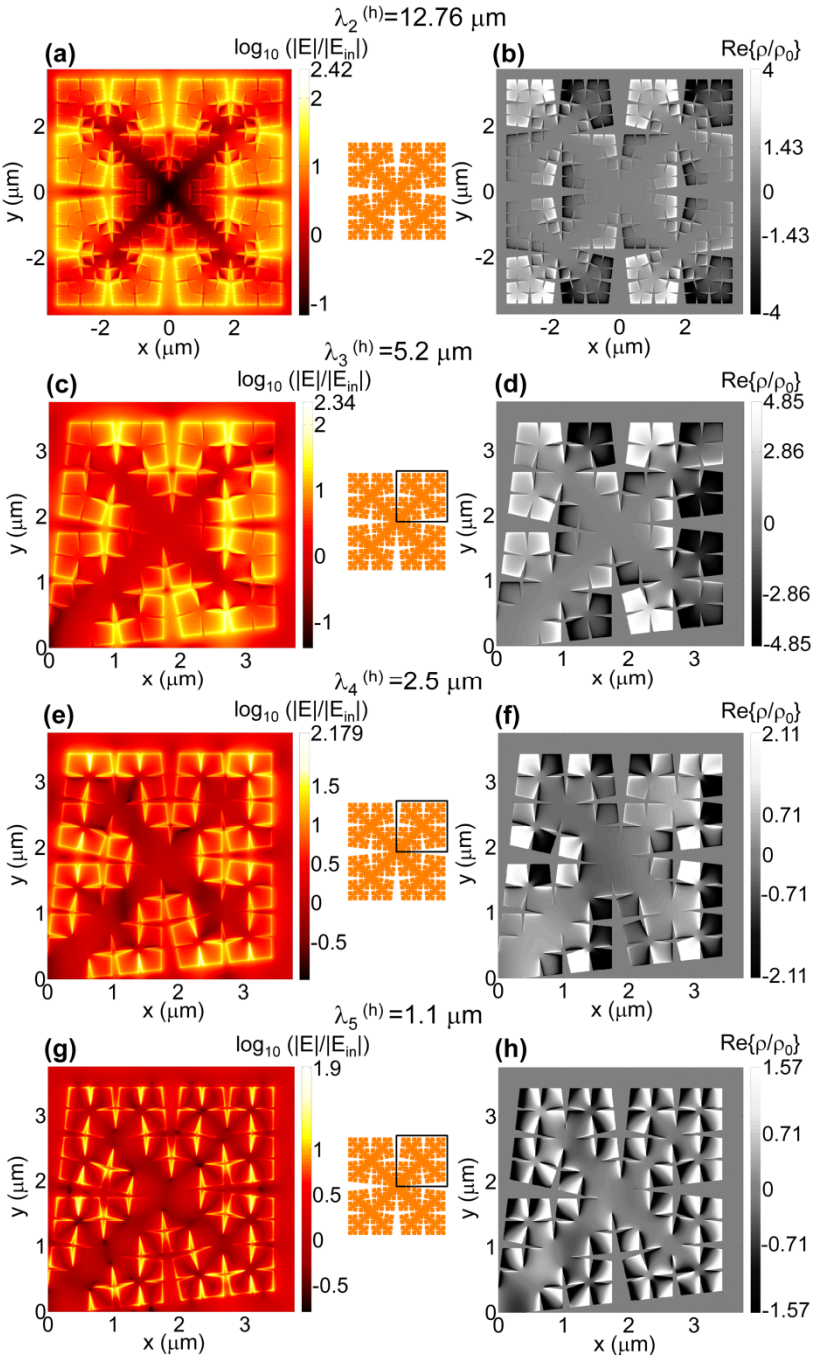
noktaları sağlamaktadır [157]. Şekil 3.19'daki 5. iterasyon nanoanten için rezonant plazmon modlardaki *E*-alan yükseltmesi ≈128 kata kadar ulaşırken (Şekil 3.21 ve 3.22) *H*-alan yükseltmesi ≈108 kata kadar ulaşmaktadır (Şekil 3.23 ve 3.24).

Yatay veya dikey panel çiftleri arasındaki geometrik şekil, konumsal dağılımların hangi bölgede verildiğini göstermek üzere ve *x*-kutuplu ışık altında; Şekil 3.19'da geometrik parametreleri verilen

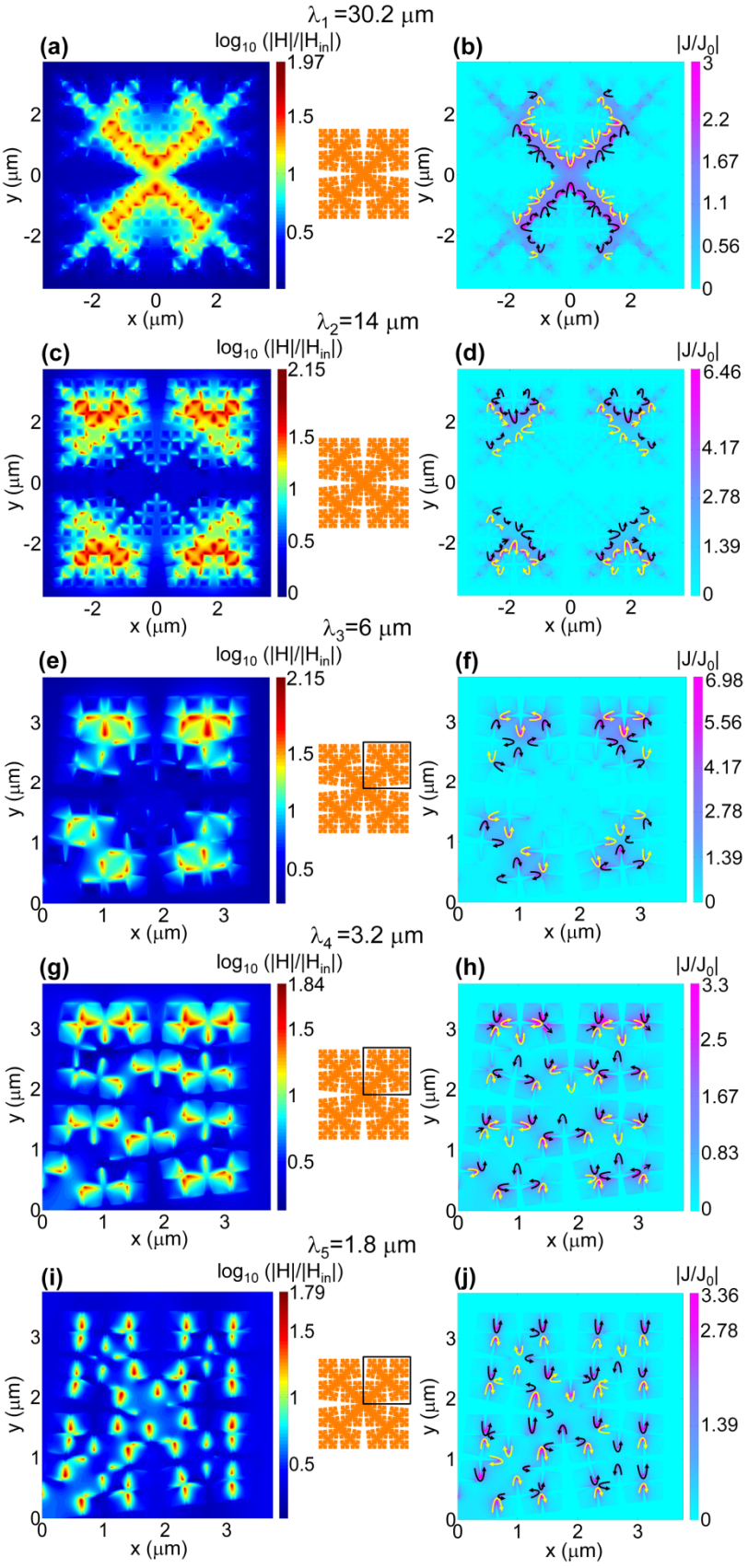
- 4. iterasyon Au nanoantenin (L_4 = 284 nm) üst yüzeyindeki; 1. mod (λ_1 = 30.2 μm) (Şekil 3.25a,b), 2. mod (λ_2 = 14 μm) (Şekil 3.25c,d), 3. hibrit mod (λ_3 = 6 μm) (Şekil 3.25e,f), 4. mod (λ_4 = 3.2 μm) (Şekil 3.25g,h) ve 5. mod (λ_5 = 1.8 μm) (Şekil 3.25i,j) için; logaritmik $|E|/|E_{in}|$ (Şekil 3.25a,c,e,g,i) ve $\mathrm{Re}\{\rho/\rho_0\}$ dağılımları (Şekil 3.25b,d,f,h,j) Şekil 3.25'de sunulmaktadır.
- 4. iterasyon Au nanoantenin (L_4 = 284 nm) üst yüzeyindeki; 2. hibrit mod ($\lambda_2^{(h)}$ = 12.76 μm) (Şekil 3.26a,b), 3. hibrit mod ($\lambda_3^{(h)}$ = 5.2 μm) (Şekil 3.26c,d), 4. hibrit mod ($\lambda_4^{(h)}$ = 2.5 μm) (Şekil 3.26e,f) ve 5. hibrit mod ($\lambda_5^{(h)}$ = 1.1 μm) (Şekil 3.26g,h) için; logaritmik $|E|/|E_{in}|$ (Şekil 3.26a,c,e,g) ve $\mathrm{Re}\{\rho/\rho_0\}$ (Şekil 3.26b,d,f,h) dağılımları Şekil 3.26'da sunulmaktadır.
- 4. iterasyon Au nanoantenin (L_4 = 284 nm) üst yüzeyindeki; 1. mod (λ_1= 30.2 μm) (Şekil 3.27a,b), 2. mod (λ_2= 14 μm) (Şekil 3.27c,d), 3. hibrit mod (λ_3= 6 μm) (Şekil 3.27e,f), 4. mod (λ_4= 3.2 μm) (Şekil 3.27g,h) ve 5. mod (λ_5= 1.8 μm) (Şekil 3.27i,j) için; logaritmik $|H|/|H_{in}|$ (Şekil 3.27a,c,e,g,i) ve $|J|/|J_0|$ dağılımları (Şekil 3.27b,d,f,h,j) Şekil 3.27'de sunulmaktadır.
- 4. iterasyon Au nanoantenin (L_4 = 248 nm) üst yüzeyindeki; 2. hibrit mod ($\lambda_2^{(h)}$ = 12.76 μm) (Şekil 3.28a,b), 3. hibrit mod ($\lambda_3^{(h)}$ = 5.2 μm) (Şekil 3.28c,d), 4. hibrit mod ($\lambda_4^{(h)}$ = 2.5 μm) (Şekil 3.28e,f) ve 5. hibrit mod ($\lambda_5^{(h)}$ = 1.1 μm) (Şekil 3.28g,h) için; logaritmik $|H|/|H_{in}|$ (Şekil 3.28a,c,e,g) ve $|J|/|J_0|$ (Şekil 3.28b,d,f,h) dağılımları Şekil 3.28'de sunulmaktadır.
- 3. iterasyon Au nanoantenin (L_3 = 628 nm) üst yüzeyindeki; 1. mod (λ_1= 28.6 μm) (Şekil 3.29a,b), 2. mod (λ_2= 12.56 μm) (Şekil 3.29c,d), 3. mod (λ_3= 5.4 μm) (Şekil 3.29e,f) ve 4. mod (λ_4= 2.5 μm) (Şekil 3.29g,h) için; üst yüzeyindeki logaritmik $|E|/|E_{in}|$ (Şekil 3.29a,c,e,g) ve $\mathrm{Re}\{\rho/\rho_0\}$ dağılımları (Şekil 3.29b,d,f,h) Şekil 3.29'da sunulmaktadır.



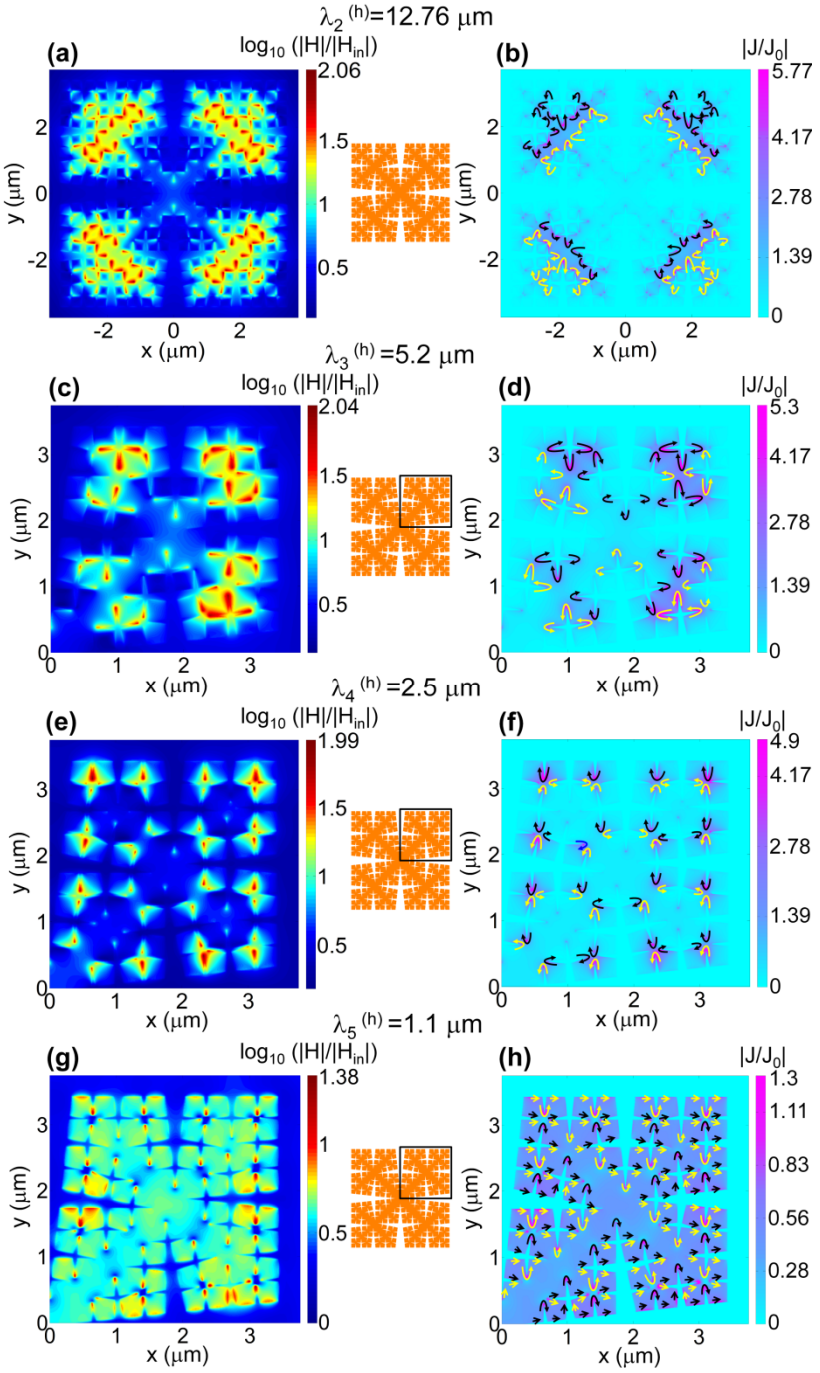
Şekil 3.25. Ana modlar için, x-kutuplu ışık altında, 4. iterasyon Au nanoantenin üst yüzeyindeki **(a,c,e,g,i)** logaritmik $|E|/|E_{in}|$ ve **(b,d,f,h,j)** $\mathrm{Re}\{\rho/\rho_0\}$ dağılımları.



Şekil 3.26. Hibrit modlar için, x-kutuplu ışık altında, 4. iterasyon Au nanoantenin üst yüzeyindeki **(a,c,e,g)** logaritmik $|E|/|E_{in}|$ ve **(b,d,f,h)** Re$\{\rho/\rho_0\}$ dağılımları.



Şekil 3.27. Ana modlar için, x-kutuplu ışık altında, 4. iterasyon Au nanoantenin üst yüzeyindeki **(a,c,e,g,i)** logaritmik $|H|/|H_{in}|$ ve **(b,d,f,h,j)** $|J|/|J_0|$ dağılımları.



Şekil 3.28. Hibrit modlar için, x-kutuplu ışık altında, 4. iterasyon Au nanoantenin üst yüzeyindeki **(a,c,e,g)** logaritmik $|H|/|H_{in}|$ ve **(b,d,f,h)** $|J|/|J_0|$ dağılımları.

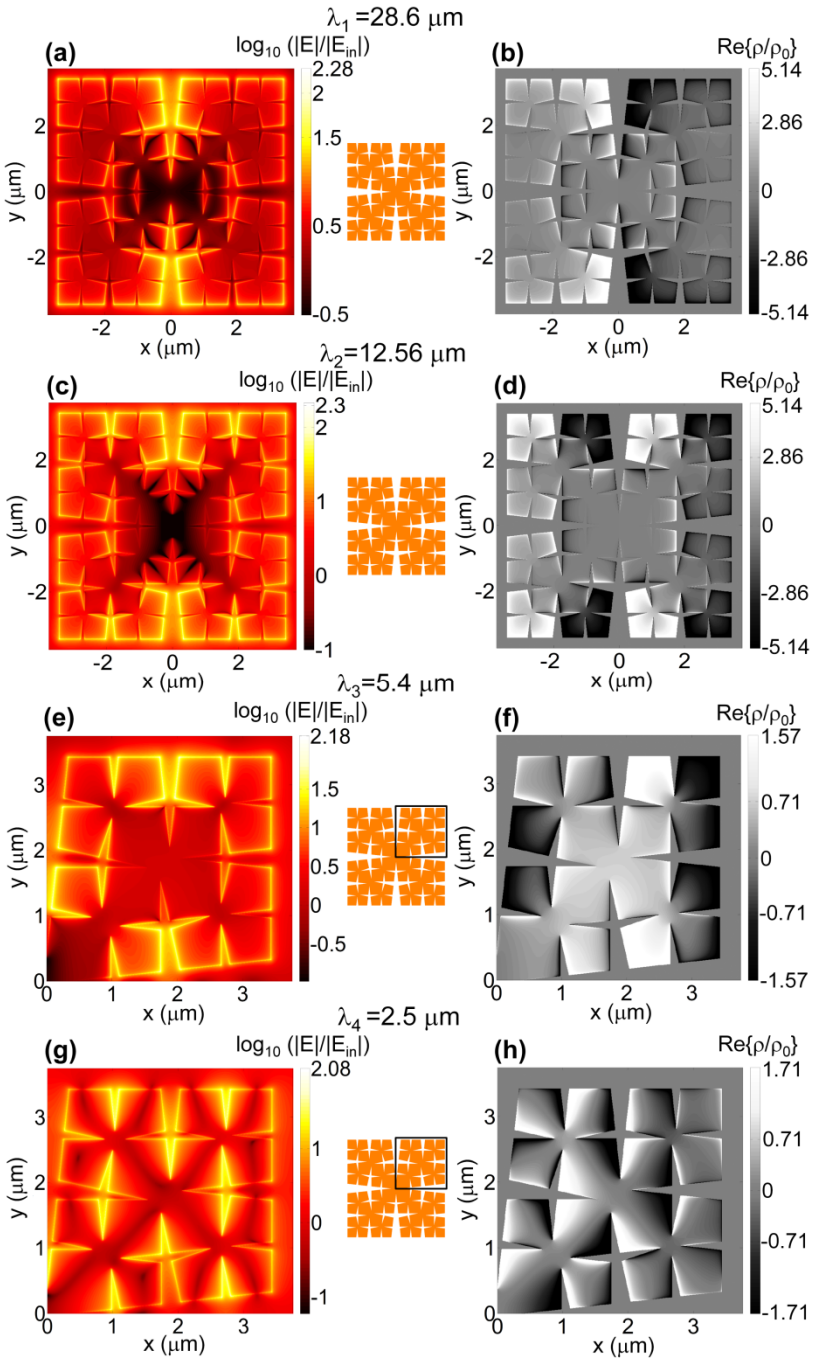
- 3. iterasyon Au nanoantenin (L_3 = 628 nm) üst yüzeyindeki; 2. hibrit mod ($\lambda_2^{(h)}$ = 11.5 μm) (Şekil 3.30a,b), 3. hibrit mod ($\lambda_3^{(h)}$ = 4.3 μm) (Şekil 3.30c,d) ve 4. hibrit mod ($\lambda_4^{(h)}$ = 1.65 μm) (Şekil 3.30e,f) için; üst yüzeyindeki logaritmik

$|E|/|E_{in}|$ (Şekil 3.30a,c,e) ve Re$\{\rho/\rho_0\}$ (Şekil 3.30b,d,f) dağılımları Şekil 3.30'da sunulmaktadır.

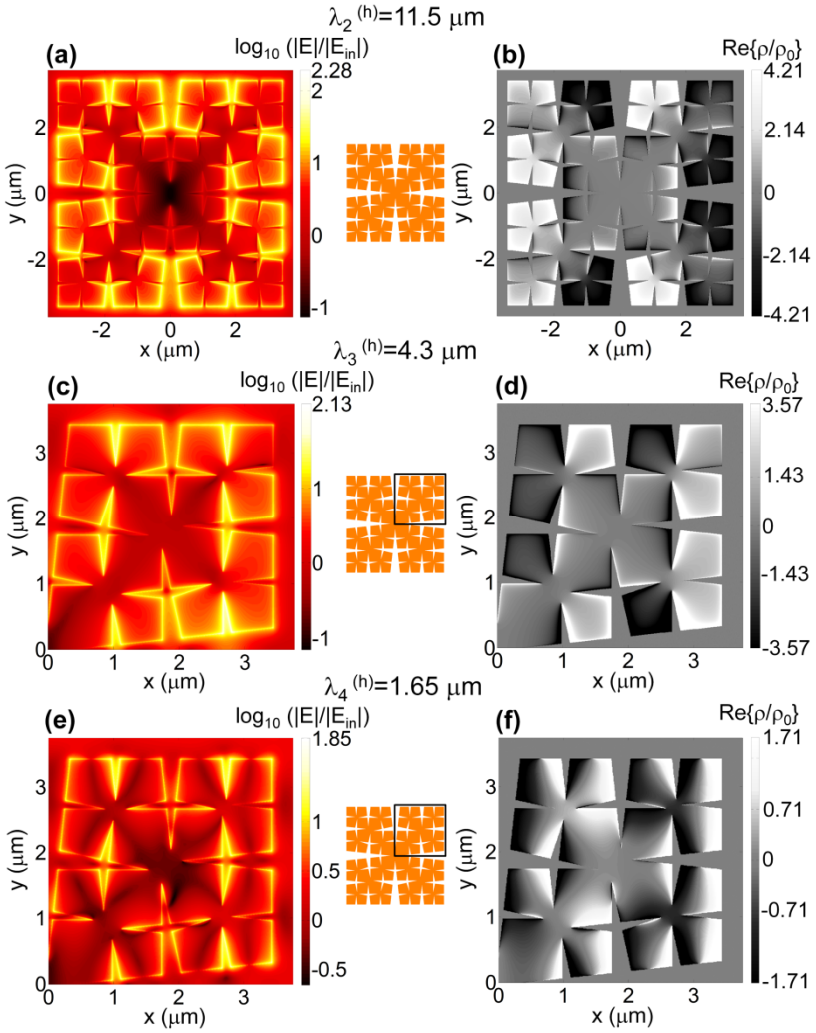
- 3. iterasyon Au nanoantenin (L_3 = 628 nm) üst yüzeyindeki; 1. mod (λ_1= 28.6 μm) (Şekil 3.31a,b), 2. mod (λ_2= 12.56 μm) (Şekil 3.31c,d), 3. mod (λ_3= 5.4 μm) (Şekil 3.31e,f) ve 4. mod (λ_4= 2.5 μm) (Şekil 3.31g,h) için; logaritmik $|H|/|H_{in}|$ (Şekil 3.31a,c,e,g) ve $|J|/|J_0|$ dağılımları (Şekil 3.31b,d,f,h) Şekil 3.31'de sunulmaktadır.
- 3. iterasyon Au nanoantenin (L_3 = 628 nm) üst yüzeyindeki; 2. hibrit mod ($\lambda_2^{(h)}$ = 11.5 μm) (Şekil 3.32a,b), 3. hibrit mod ($\lambda_3^{(h)}$ = 4.3 μm) (Şekil 3.32c,d) ve 4. hibrit mod ($\lambda_4^{(h)}$ = 1.65 μm) (Şekil 3.32e,f) için; logaritmik $|H|/|H_{in}|$ (Şekil 3.32a,c,e) ve $|J|/|J_0|$ (Şekil 3.32b,d,f) dağılımları Şekil 3.32'de sunulmaktadır.
- 2. iterasyon Au nanoantenin (L_2 = 1393 nm) üst yüzeyindeki; 1. mod (λ_1 = 26 μm) (Şekil 3.33a,b), 2. mod (λ_2 = 10.2 μm) (Şekil 3.33c,d), 2. hibrit mod ($\lambda_2^{(h)}$ = 8.6 μm) (Şekil 3.33e,f), 3. mod (λ_3 = 3 μm) (Şekil 3.33g,h) ve 3. hibrit mod ($\lambda_3^{(h)}$ = 2 μm) (Şekil 3.33i,j) için; logaritmik $|E|/|E_{in}|$ (Şekil 3.33a,c,e,g,i) ve Re$\{\rho/\rho_0\}$ (Şekil 3.33b,d,f,h,j) dağılımları Şekil 3.33'de sunulmaktadır.
- 2. iterasyon Au nanoantenin (L_2 = 1393 nm) üst yüzeyindeki; 1. mod (λ_1 = 26 μm) (Şekil 3.34a,b), 2. mod (λ_2 = 10.2 μm) (Şekil 3.34c,d), 2. hibrit mod ($\lambda_2^{(h)}$ = 8.6 μm) (Şekil 3.34e,f), 3. mod (λ_3 = 3 μm) (Şekil 3.34g,h) ve 3. hibrit mod ($\lambda_3^{(h)}$ = 2 μm) (Şekil 3.34i,j) için; logaritmik $|H|/|H_{in}|$ (Şekil 3.34a,c,e,g,i) ve $|J|/|J_0|$ (Şekil 3.34b,d,f,h,j) dağılımları Şekil 3.34'de sunulmaktadır.
- 1. iterasyon Au nanoantenin (L_1 = 3089 nm) üst yüzeyindeki; 1. mod (λ_1 = 22.75 μm) (Şekil 3.35a,d,g,j), 2. mod (λ_2 = 6.6 μm) (Şekil 3.35b,e,h,k), 2. hibrit mod ($\lambda_2^{(h)}$ = 4.5 μm) (Şekil 3.35c,f,i,l) için; logaritmik $|E|/|E_{in}|$ (Şekil 3.35a,b,c), Re$\{\rho/\rho_0\}$ (Şekil 3.35d,e,f), logaritmik $|H|/|H_{in}|$ (Şekil 3.35g,h,i) ve $|J|/|J_0|$ (Şekil 3.35j,k,l) dağılımları Şekil 3.35'de sunulmaktadır.

Fraktalın iterasyon değişimiyle oluşan ölçekleme etkisi aynı iterasyondaki antenin tüm modları incelenerek açıklanmaktadır (Şekil 3.21-3.35). Sistematik bir yaklaşımla, Şekil 3.21-3.35 ile verilen şekillerdeki dağılımlarda yüksek alan depolama ve iterasyon artışının sonucu olan fraktal ölçekleme mekanizması gözlenmektedir. Bu çoklu-ölçekli

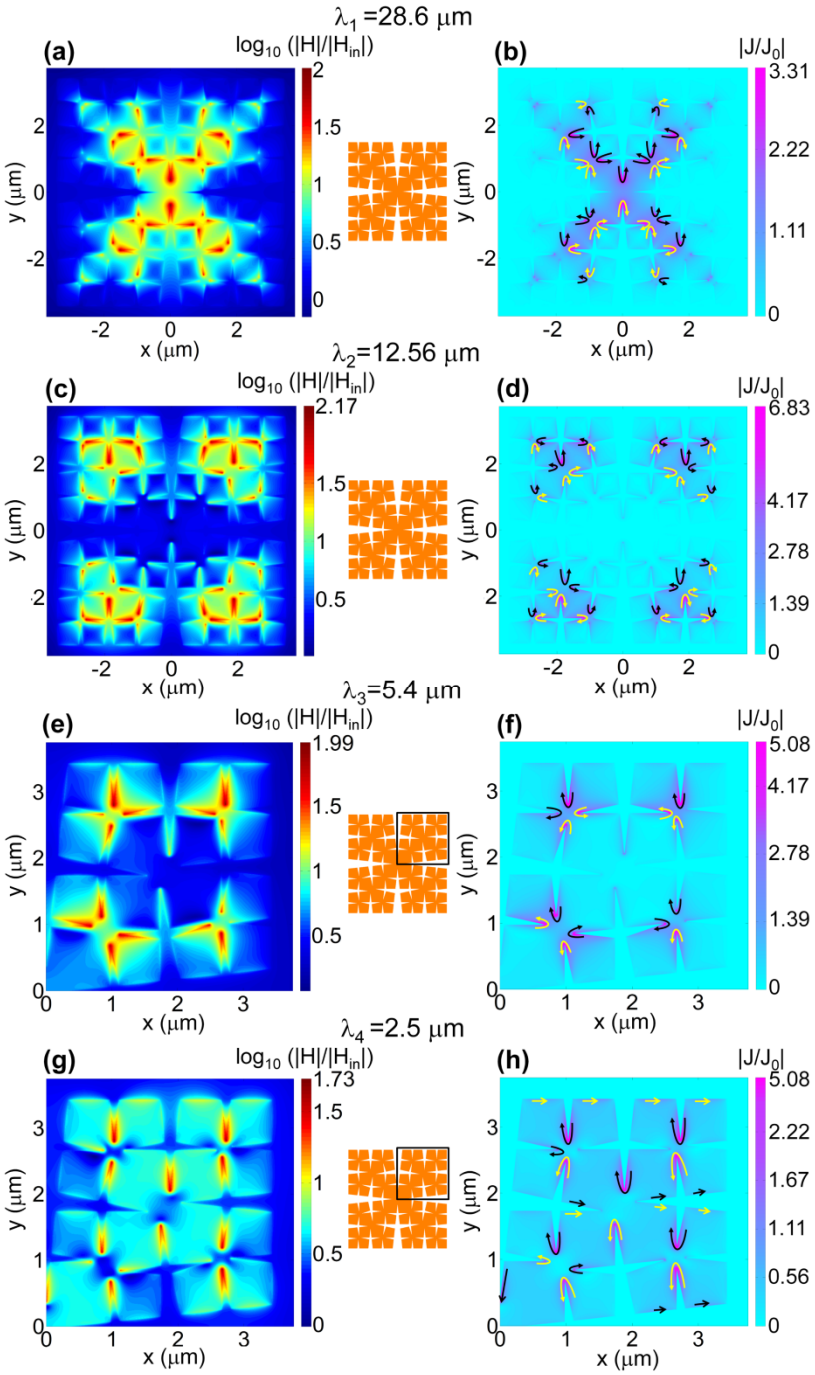
davranışın, Cesaro-1 tip nanoantenlerin çoklu-spektral davranışının kaynağı olduğu düşünülmektedir.



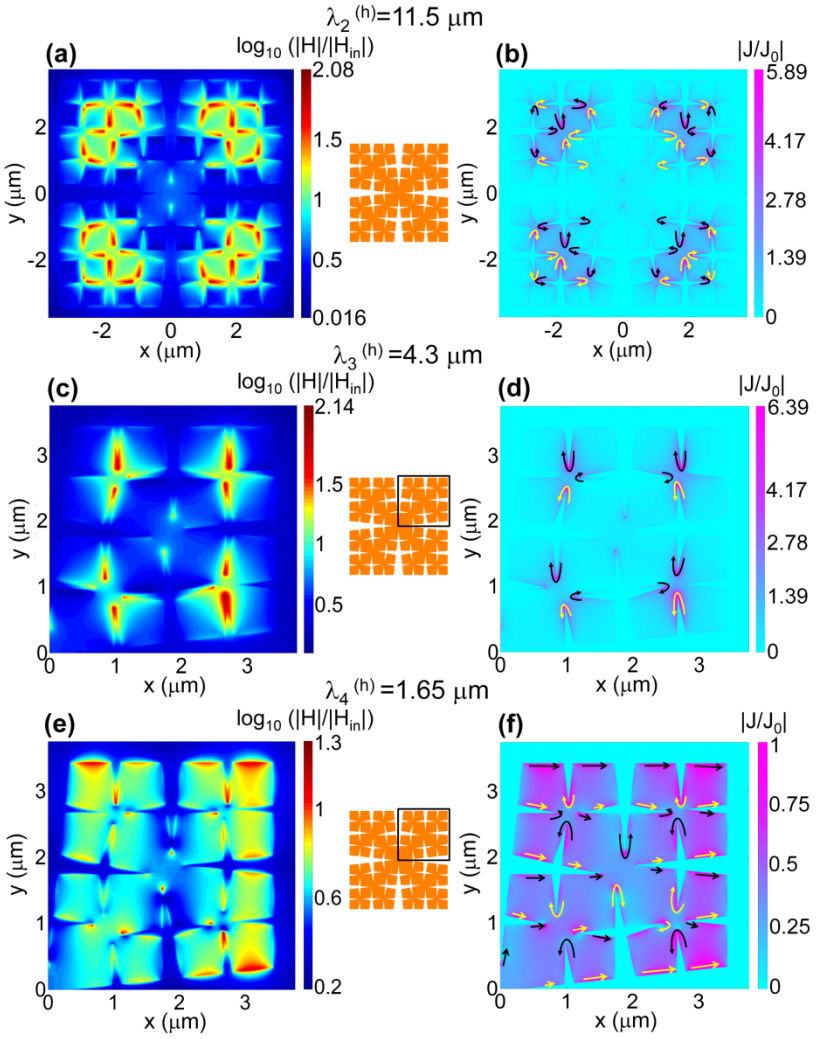
Şekil 3.29. Ana modlar için, x-kutuplu ışık altında, 3. iterasyon Au nanoantenin üst yüzeyindeki **(a,c,e,g)** logaritmik $|E|/|E_{in}|$ ve **(b,d,f,h)** Re$\{\rho/\rho_0\}$ dağılımları.



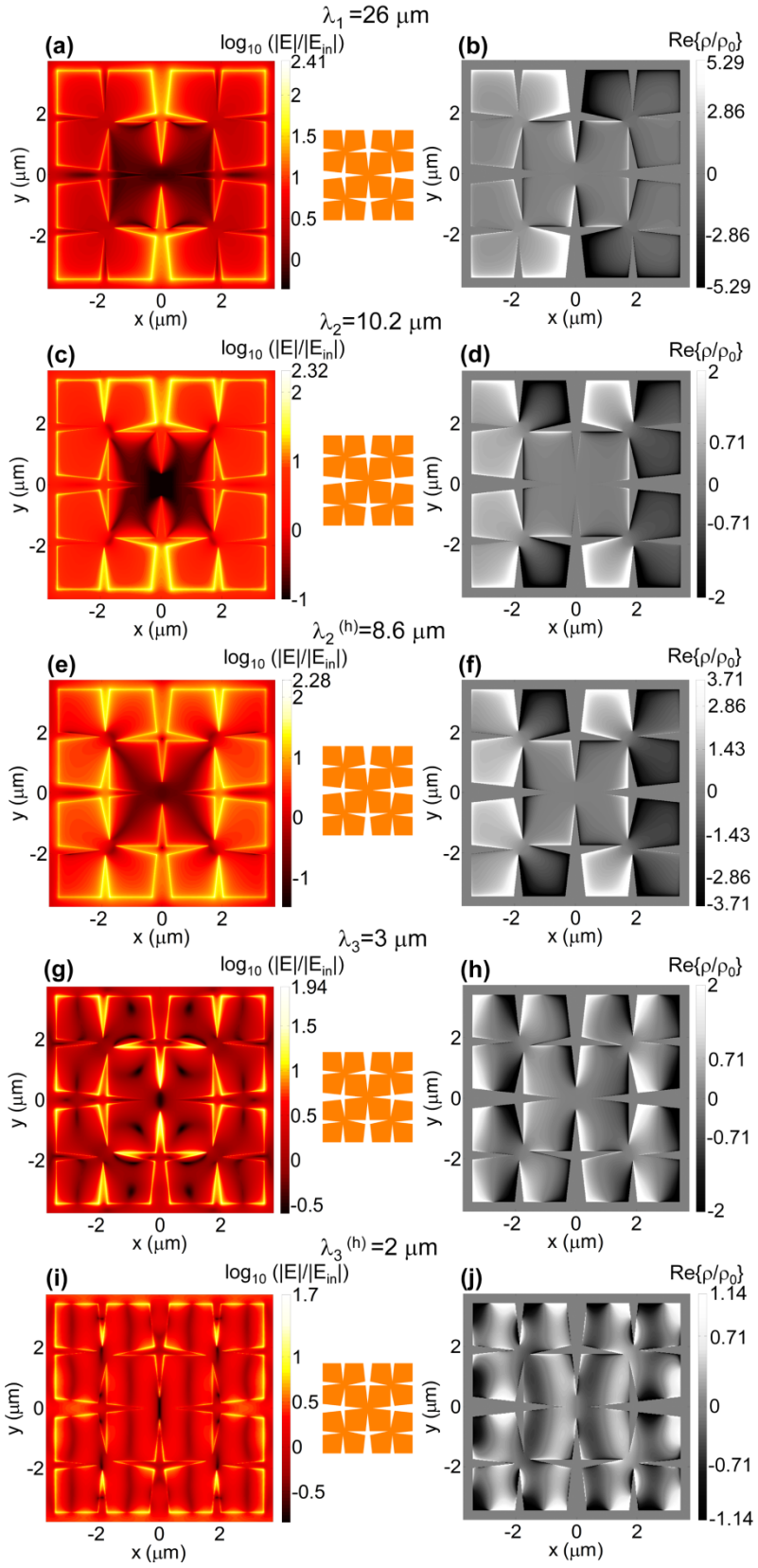
Şekil 3.30. Hibrit modlar için, x-kutuplu ışık altında, 3. iterasyon Au nanoantenin üst yüzeyindeki **(a,c,e)** logaritmik $|E|/|E_{in}|$ ve **(b,d,f)** Re$\{\rho/\rho_0\}$ dağılımları.



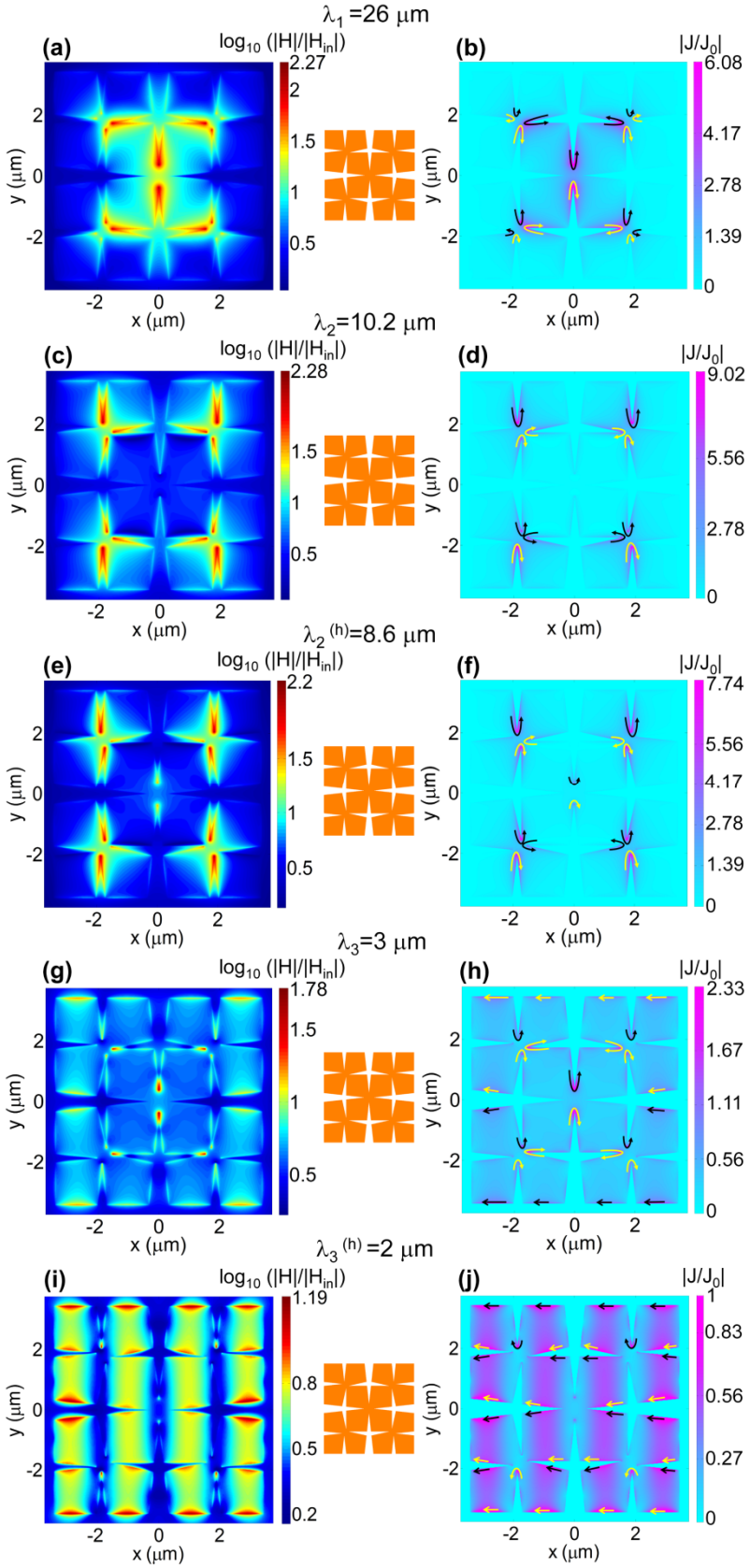
Şekil 3.31. Ana modlar için, x-kutuplu ışık altında, 3. iterasyon Au nanoantenin üst yüzeyindeki **(a,c,e,g)** logaritmik $|H|/|H_{in}|$ ve **(b,d,f,h)** $|J|/|J_0|$ dağılımları.



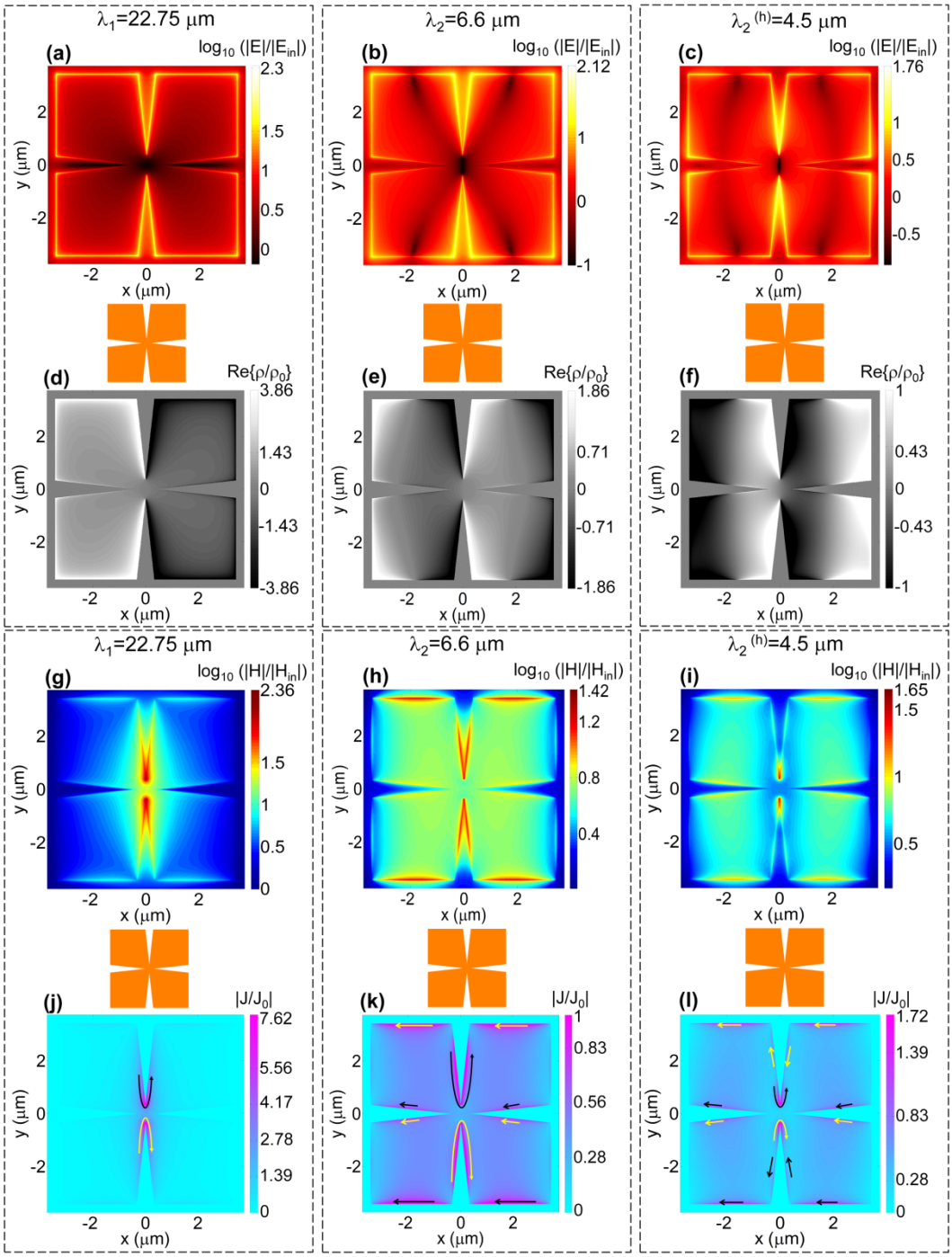
Şekil 3.32. Hibrit modlar için, *x*-kutuplu ışık altında, 3. iterasyon Au nanoantenin üst yüzeyindeki **(a,c,e)** logaritmik $|H|/|H_{in}|$ ve **(b,d,f)** $|J|/|J_0|$ dağılımları.



Şekil 3.33. Ana ve hibrit modlar için, *x*-kutuplu ışık altında, 2. iterasyon Au nanoantenin üst yüzeyindeki **(a,c,e,g,i)** logaritmik $|E|/|E_{in}|$ ve **(b,d,f,h,j)** $\mathrm{Re}\{\rho/\rho_0\}$ dağılımları.



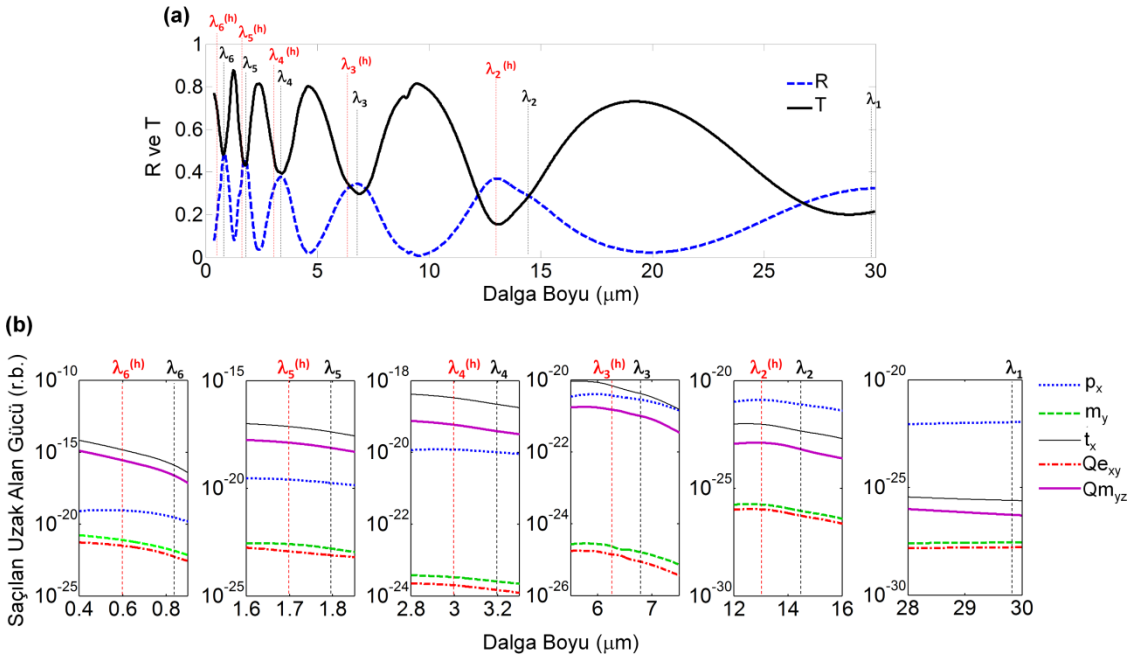
Şekil 3.34. Ana ve hibrit modlar için, *x*-kutuplu ışık altında, 2. iterasyon Au nanoantenin üst yüzeyindeki **(a,c,e,g,i)** logaritmik $|H|/|H_{in}|$ ve **(b,d,f,h,j)** $|J|/|J_0|$ dağılımları.



Şekil 3.35. Ana ve hibrit modlar için, *x*-kutuplu ışık altında, 1. iterasyon Au nanoantenin üst yüzeyindeki **(a,b,c)** logaritmik $|E|/|E_{in}|$, **(d,e,f)** $\mathrm{Re}\{\rho/\rho_0\}$, **(g,h,i)** logaritmik $|H|/|H_{in}|$ ve **(j,k,l)** $|J|/|J_0|$ dağılımları.

Karmaşık geometrilere sahip *Cesaro-1 tip fraktal* nanoantenlerin (Şekil 3.19) uyarılan farklı optik modlarının fiziksel kaynağının anlaşılabilmesi için yine çok-kutuplu açılım yöntemi [115-120,122,123] kullanılabilir. Bu bağlamda, altı rezonant mod sergileyen,

geometrik parametreleri Şekil 3.19 ile verilen 5. iterasyon *Cesaro-1 tip nanoanten*in *x*- ve *y*- eksenlerinde 9 μm'lik periyotlara sahip dizisinin boş uzayda çok-kutuplu açılım ayrıştırması FDTD metodu yardımıyla yapılmıştır. İlgili nanoanten dizisinin rezonant dalga boylarını belirlemek için yansıma ile geçiş spektrumları ve rastgele birimlerdeki (r.b.) moment katkılarına ayrıştırılmış saçılan uzak alan güçleri Şekil 3.35'de sunulmuştur.



Şekil 3.36. (a) 9 μm periyotladdaki 5. iterasyon Cesaro-1 dizisinin yansıma (R) ve geçiş (T) spektrumları. **(b)** Rezonant mod bölgelerinde her bir momentin saçılan güce katkısı.

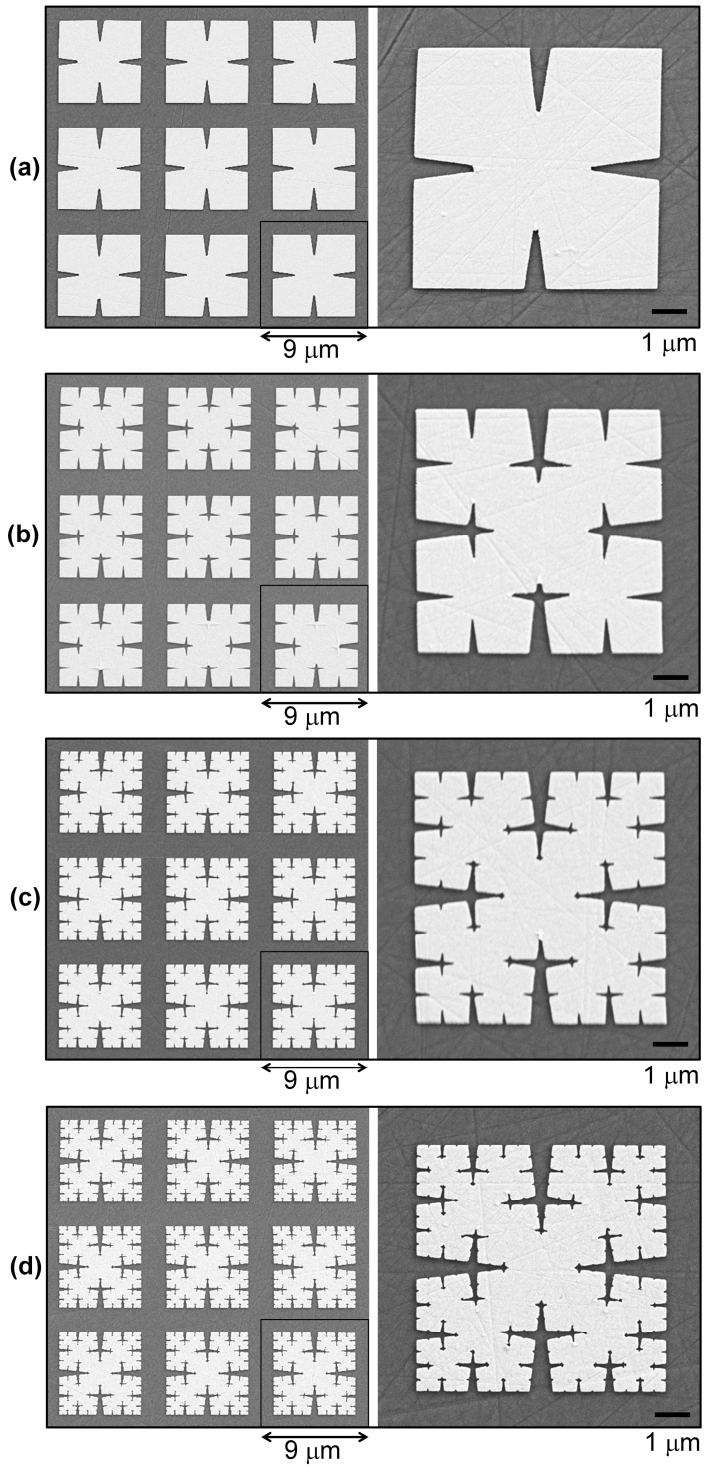
Boşlukta analiz edilen nanoanten dizisinin Şekil 3.35a panelindeki yansıma ile geçiş spektrumlarından elde edilen rezonant dalga boyları da Tablo 3.5 ile verilmektedir. Bu analiz sonuçlarına göre, 1. modda (λ_1; en uzun dalga boylu rezonant mod) ve 2. modda (λ_2 ve $\lambda_2^{(h)}$) çoğunlukla *x*-doğrultusundaki çift-kutuplu elektrik moment $\boldsymbol{p_x}$ baskın iken $\boldsymbol{p_x}$'in diğer modlarda da etkin olduğu gözlenmektedir. Ancak daha kısa dalga boylarına doğru baskınlıkları artan, *x*-doğrultusundaki toroidal moment $\boldsymbol{t_x}$ ve *yz*-yüzeyindeki dört-kutuplu manyetik moment $\boldsymbol{Qm_{yz}}$, akım yoğunluğu dağılımları ile belilenen akım döngüleri içinde yakın manyetik alanı birlikte yükseltmektedirler (Şekil 3.22, 3.23, 3.26, 3.27, 3.30, 3.31, 3.33 ve 3.34).

Tablo 3.5. Şekil 3.36a'dan belirlenen rezonant dalga boyları.

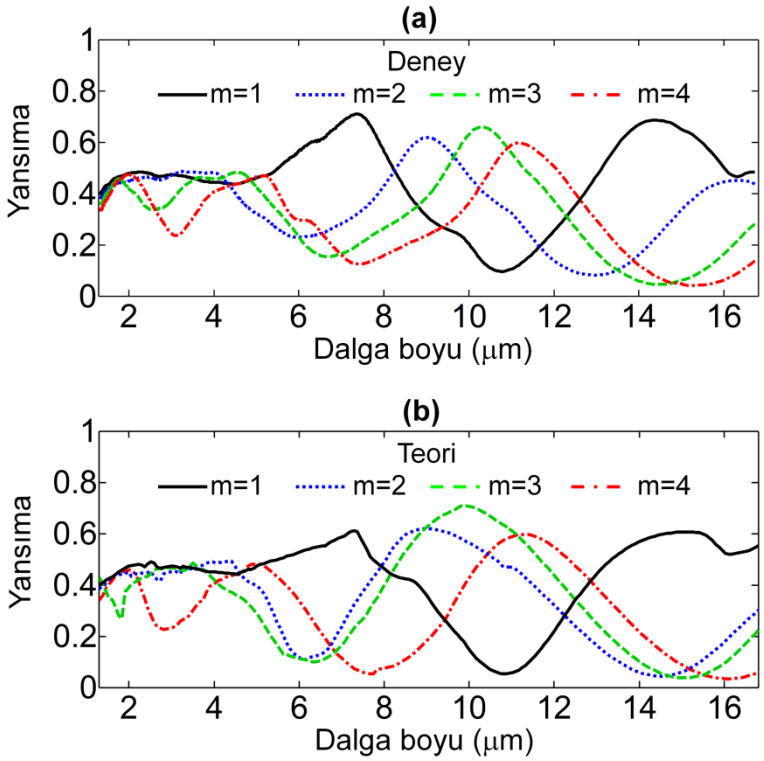
	***m*=5**
λ_1	29.8 μm
λ_2	14.5 μm
λ_2 (h)	13 μm
λ_3	6.8 μm
λ_3 (h)	6.2 μm
λ_4	3.2 μm
λ_4 (h)	3 μm
λ_5	1.8 μm
λ_5 (h)	1.7 μm
λ_6	0.84 μm
λ_6 (h)	0.6 μm

Parçacık tabanlı ve minimum uzunlukları L_1 = 3089 nm, L_2 = 1393 nm, L_3 = 628 nm, L_4 = 284 nm ile L_5 = 128 nm olarak tasarlanan *Cesaro-1 tip fraktal* nanoanten dizilerinin üretiminde de başta, her iterasyon için aynı 9 μm'lik periyotlar ve aynı devre boyutu seçilmiştir. Bunun için de 12.5°'lik girinti açısına sahip iterasyonların geometrileri kullanılmıştır ve 20 × 20 birim hücreden oluşan anten dizileri üretilmiştir. Bu defa altın alanın daha fazla oluşundan EBL sırasında meydana gelen daha fazla yük birikimi ve yine CaF_2 alt tabana metal yapıştırmanın daha zor olması; söz konusu boyutlardaki fraktal geometrinin 5. iterasyonunun üretimini engellemiştir. Her iterasyonda sabit tutulan anten boyutu ve değiştirilen minimum boyut için üretilen, ilk dört iterasyondaki, *Cesaro-1 tip nanoanten* dizilerinin SEM görüntüleri Şekil 3.37'de verilmektedir. Şeklin sol panelleri tüm dizinin 3 × 3'lük kısmını gösterirken, sağ panelleri ilgili birim hücreyi vermektedir ve sağ panellerdeki ölçek 1 μm'dir. Burada görüldüğü gibi üretimdeki kısıtlamalar nedeniyle, iterasyon arttıkça, oluşturalan girintiler, hesaplanana göre daha fazla kırpılmıştır. Yine EBL kısıtlamaları nedeniyle yapıda merkezden kenara doğru azalan bir genişleme meydana geldiğinden girintilerdeki kırpılmalar da merkezden kenara doğru azalmaktadır ve girintilerdeki kırpılma miktarları 1. iterasyon geometri için ~1000 nm (Şekil 3.37a), 2. iterasyon geometri için ~500 nm (Şekil 3.37b),

3. iterasyon geometri için ~350 nm (Şekil 3.37c) ve 4. iterasyon geometri için ~150 nm (Şekil 3.37d) olarak; geniş açılı köşelerde meydana gelen eğrilik yarıçapı da ~30 nm olarak belirlenmiştir.



Şekil 3.37. CaF_2 alt taban üzerine üretilmiş *Cesaro-1 tip fraktal* nanoantenler; **(a)** 1. iterasyon, **(b)** 2. iterasyon, **(c)** 3. iterasyon ve **(d)** 4. iterasyon anten dizilerinin 3×3'lük kısmının (sol paneller) ve birim hücresinin (sağ paneller) SEM görüntüleri.



Şekil 3.38. Üretilen *Cesaro-1 tip nanoanten* dizilerinin (Şekil 3.37) 1., 2., 3. ile 4. iterasyon için **(a)** deneysel ve **(b)** teorik yansıma spektrumları.

Bu çalışmada üretilen yapıların FTIR spektroskopisi ile plazmonik rezonanslarını deneysel olarak göstermek için deneysel yansıma spektrumları ölçülmüştür. Üretimi gerçekleştirilebilen ilk 4 iterasyondaki Cesaro-1 tip nanoanten dizilerinin (Şekil 3.37) FTIR spektrumları yansıma modu için Şekil 3.38a'da verilmektedir. Şekil 3.37'dan da görüldüğü gibi nanoüretim aşamalarındaki kısıtlamalar nedeniyle yapıların girinti köşeleri farklı uzunluklarda kırpılarak üretim gerçekleştirilebilmiştir. İterasyon artıkça girintilerde oluşan kırpılma normal boyutuna oranla daha da büyümektedir. Bu durum özellikle, yukarıda bahsedilen EBL kısıtlamaları nedeniyle yapıda merkezden kenara doğru azalan genişlemenin sonucudur. Bu nedenle rezonant modlar hibrit modlarla birlikte genişleme göstermektedir. Ayrıca CaF_2 alt tabanın 12 μm'den sonraki spekral bölgede geçiş karakteri azaldığından bu çalışmada sadece yansıma spektrumları dikkate alınmıştır. Şekil 3.38b'de ise Şekil 3.37'deki ilk dört iterasyondaki fraktal anten dizilerinin girinti kırpılmaları ve köşe eğrilikleri dikkate alınarak yapılan simülasyonlarda elde edilen teorik yansıma sonuçları sunulmuştur. Üretilen anten geometrilerindeki aksaklıkların tam olarak modellenememesi ve simülasyonlarda

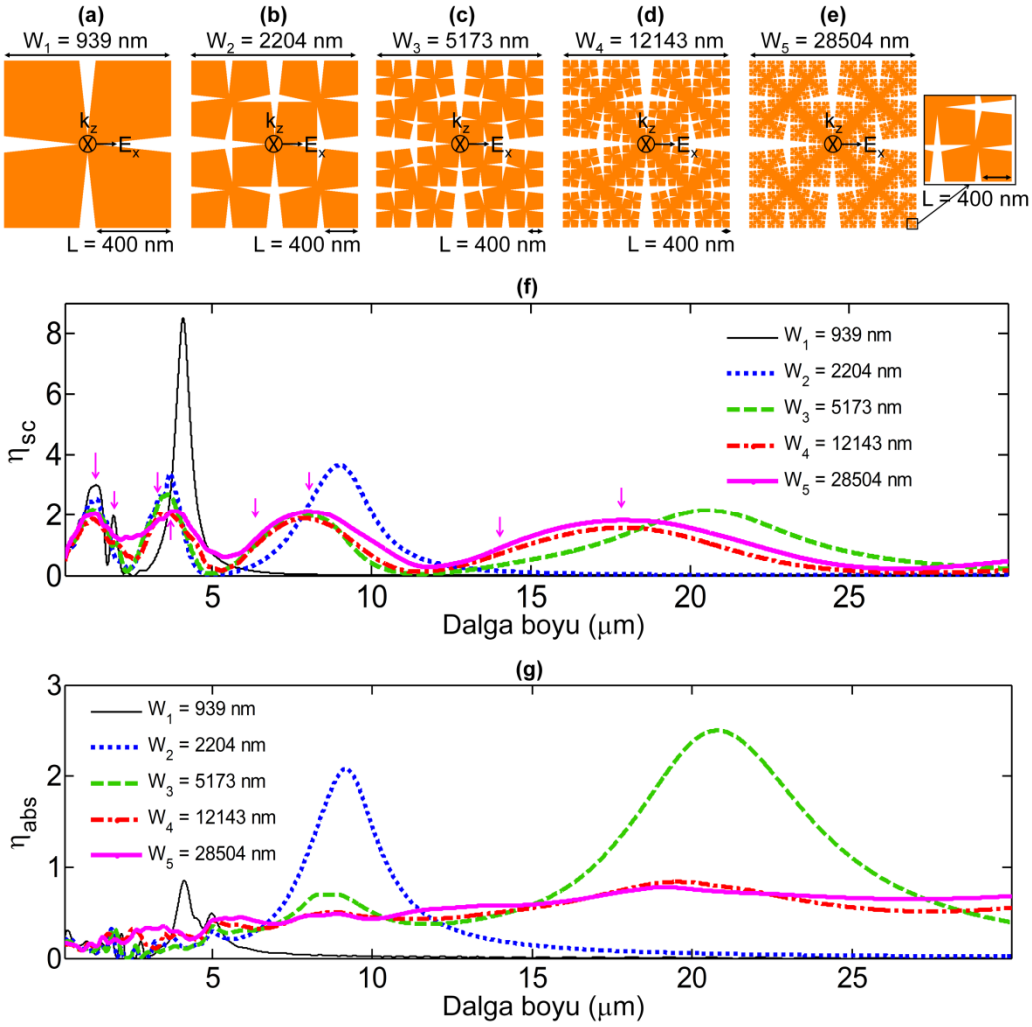
kullanılan malzeme dağınım verilerine bağlı olarak küçük farklılıklar göstermelerine rağmen deneysel sonuçlar ile teorik sonuçlar arasında iyi bir uyum söz konusudur. Şekil 3.38'deki spektral aralıkta, 4. iterasyon için (noktalı ve kesikli kırmızı çizgi) λ_2, $\lambda_2^{(h)}$, λ_3, $\lambda_3^{(h)}$, λ_4 ve $\lambda_4^{(h)}$ görüntülenebilmektedir. Ancak 1. iterasyonun uzun dalga boylarındaki 1. modunda yansıma spektrumunda 16 μm'den biraz büyük dalga boyunda, nümerik saçılma ve soğurma kesit alanı spektrumlarından (Şekil 3.19) anlaşılamayan bir hibrit mod gözlenmektedir. Bu modun alan dağılımları, yük ve akım dağılımları aşağıda verilen *U#3* çalışmasındaki ölçümler ve analizlerde daha belirgin olarak anlaşılmaktadır ve bundan dolayı bu kısımda sunulmamaktadır.

3.3.1.3. U#3 Cesaro-2 Tip Fraktal Nanoanten Dizileri

Bu çalışma Cesaro fraktal geometrisinin, minimum ayrıt uzunluğu sabit tutulup iterasyon sayısı arttırılarak tasarlanan diğer bir fraktal geometrili plazmonik nanoanten tasarımıdır. Tez çalışmasının bu kısmında Şekil 1.2'deki gibi ilk beş iterasyondaki geometriler türetilip; her bir iterasyon için fraktal genişlikleri Tablo 1.4'deki gibi θ=20°'lik girinti açısı için W_1 = 939 nm, W_2 = 2204 nm, W_3 = 5173 nm, W_4 = 12143 nm ile W_5 = 28504 nm alınarak nümerik olarak tasarlanan, *sabit minimum ayrıt uzunluğuna sahip Cesaro-2 tip nanoantenler* FDTD metodu ile analiz edilmiştir ve her bir iterasyon için saçılma kesit alanı ile soğurma kesit alanı spektrumları elde edilmiştir. Bu çalışmadaki girinti açısının *U#2* çalışmasına göre daha geniş seçilme nedeni, nanoüretim esnasında geometri girintilerindeki kırpılmaları azaltmaktır. (3.1a,b) eşitlikleri kullanılarak da normalize saçılma kesit alanı η_{sc} ile normalize soğurma kesit alanı η_{abs} belirlenmiştir ve Şekil 3.39'da sunulmaktadır. Şekil 3.39a-e'de sırasıyla ilk beş iterasyondaki Au nanoantenler için seçilen geometrik parametreler verilmektedir. Bu panellerden anlaşılacağı üzere, tüm iterasyonlar sabit devre boyutunda tasarlanmıştır. Yani *m* iterasasyon sayısı olmak üzere L_m minimum ayrıt uzunluğunu göstermekte ve bu tasarımda her bir iterasyon için fraktal genişliği $L_m = L$ = 400 nm'de sabit tutulmaktadır.

Şekil 3.39'dan, 0.375 μm ila 30 μm (10 THz ila 800 THz) spektral aralığındaki saçılma kesit alanı için rezonant dalga boyları belirlenerek Tablo 3.6'da verilmektedir. Saçılma karakteristiklerindeki çoklu-rezonant davranışı daha belirgin olarak gözlenen bu

çalışmada, *U#2* çalışmasından farklı olarak iterasyon arttıkça devre boyutu arttığından daha uzun dalga boylarında ek modlar belirmektedir ve 1. mertebe mod (λ_1) iterasyon artışıyla kırmıza kaymaktadır. 4. ve 5. iterasyonların neden olduğu λ_1, 35 μm'nin de ötesindedir. Bu nedenle Şekil 3.39f'de; 5. iterasyon için oklarla belirtilen rezonant dalga boyları, en uzun dalga boyundan kısa dalga boyuna doğru (hibrit modlarla birlikte) λ_2, $\lambda_2^{(h)}$, λ_3, $\lambda_3^{(h)}$, λ_4, $\lambda_4^{(h)}$, λ_5 ve $\lambda_5^{(h)}$ olarak adlandırılmaktadır. Bu tasarımla daha belirgin olarak gözlemlenebilen $\lambda_1^{(h)}$ ile $\lambda_2^{(h)}$, $\lambda_3^{(h)}$, $\lambda_4^{(h)}$ ve $\lambda_5^{(h)}$ aşağıda inceleneği gibi kendinden daha uzun dalga boylu ana modun hibrit modu olup; farklı alan, yük ve akım dağılımlarına sahiptir.



Şekil 3.39. Saçılma ve soğurma kesit alanlarının fraktal gelişimine bağlılığı. **(a)** 1., **(b)** 2., **(c)** 3., **(d)** 4. ve **(e)** 5. iterasyondaki *Cesaro-2 tip fraktal*ların (*U#3*) üstten görünümü. Her bir iterasyon için spektral normalize **(f)** saçılma kesit alanı η_{sc} ve **(g)** soğurma kesit alanı η_{abs}; çizgiler her bir iterasyonun minimum ayrıt uzunluğuna göre etiketlenmiştir.

Tablo 3.6'da görüldüğü gibi artan devre boyutuna sahip bir tasarımla yine kontrol edilebilir bir spektral yoğunluk sağlanmaktadır. Bu tez çalışmasında; 1., 2. ve 3. iterasyonlar için rezonant mod sayısı *m*+1 ve 4. ile 5. iterasyonlar için de *m*'dir. Bu nedenle Şekil 3.39'daki geometrik parametrelere sahip fraktal geometrisi için başarı ölçütü; 1., 2. ile 3. iterasyonlar için $FOM = (m+1)/A_m$ ve 4. ile 5. iterasyonlar için $FOM = m/A_m$ olarak tanımlanarak Tablo 3.7'de sunulmaktadır. *Cesaro-2 tip fraktal* nanoantenler için Tablo 3.7'de verilen *FOM* değerleri ile *Cesaro-1 tip fraktal* nanoantenler için Tablo 3.2'de verilen *FOM* değerleri karşılaştırıldığında; Tablo 3.2'deki değerlerin sabit devre boyutu söz konusu olduğundan iterasyon artışı ile arttığı; Tablo 3.7'deki değerlerin de artan devre boyutu ve artan anten yüzey alanından dolayı iterasyon artışı ile azaldığı gözlenmektedir.

Tablo 3.6. Şekil 3.39 ile verilen fraktal nanoantenlerin saçılma kesit alanı spektrumu için rezonant dalga boyları.

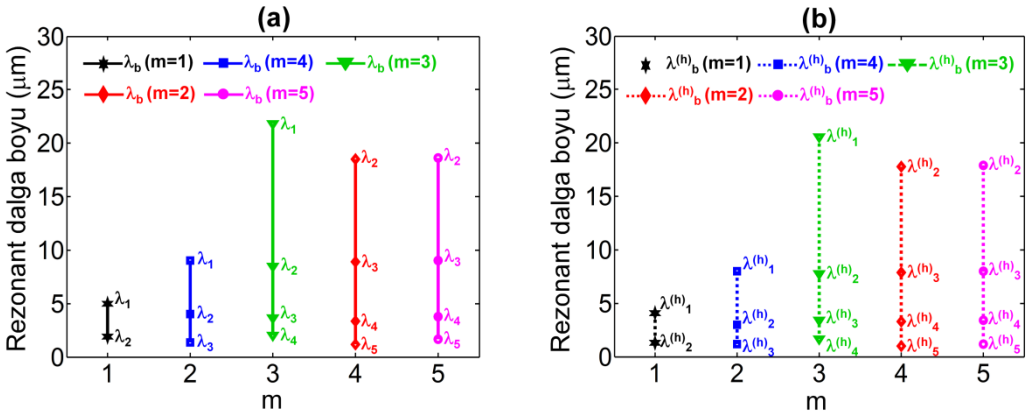
	***m*=5**	***m*=4**	***m*=3**	***m*=2**	***m*=1**
λ_1	>35 μm	>35 μm	21.8 μm	9 μm	5 μm
λ_1 (h)	>35 μm	>35 μm	20.55 μm	8 μm	4.08 μm
λ_2	18.6	18.5 μm	8.5 μm	4 μm	1.9 μm
λ_2 (h)	17.9 μm	17.8 μm	7.76 μm	3 μm	1.3 μm
λ_3	9 μm	8.9 μm	3.63 μm	1.38 μm	
λ_3 (h)	8 μm	7.9 μm	3.4 μm	1.2 μm	
λ_4	3.8 μm	3.36 μm	2 μm		
λ_4 (h)	3.4 μm	3.26 μm	1.68 μm		
λ_5	1.68 μm	1.2 μm			
λ_5 (h)	1.2 μm	1 μm			

Tablo 3.7. Şekil 3.39'deki *Cesaro-2 tip nanoanten*lerin farklı iterasyonları için *FOM* değerleri.

	***m*=1**	***m*=2**	***m*=3**	***m*=4**	***m*=5**
A_m **(μm²)**	0.8123	4.1986	22.0253	116.9224	518.589
FOM_m **(1/μm²)**	2.4621	0.7145	0.1816	0.0342	0.0077

Söz konusu spektral aralıktaki rezonant modlar;, 1., 2. ve 3. iterasyonlar için sayıca iterasyon sayısı *m*'den fazla ve 4. ile 5. iterasyonlar için sayıca iterasyon sayısı *m*'e eşittir. Şekil 3.39'da verilen nanoantenlerin, Tablo 3.6'da verilen, her bir mod için rezonant dalga boyu değişimine göre ifade ettiği değerler aşağıdaki gibidir:

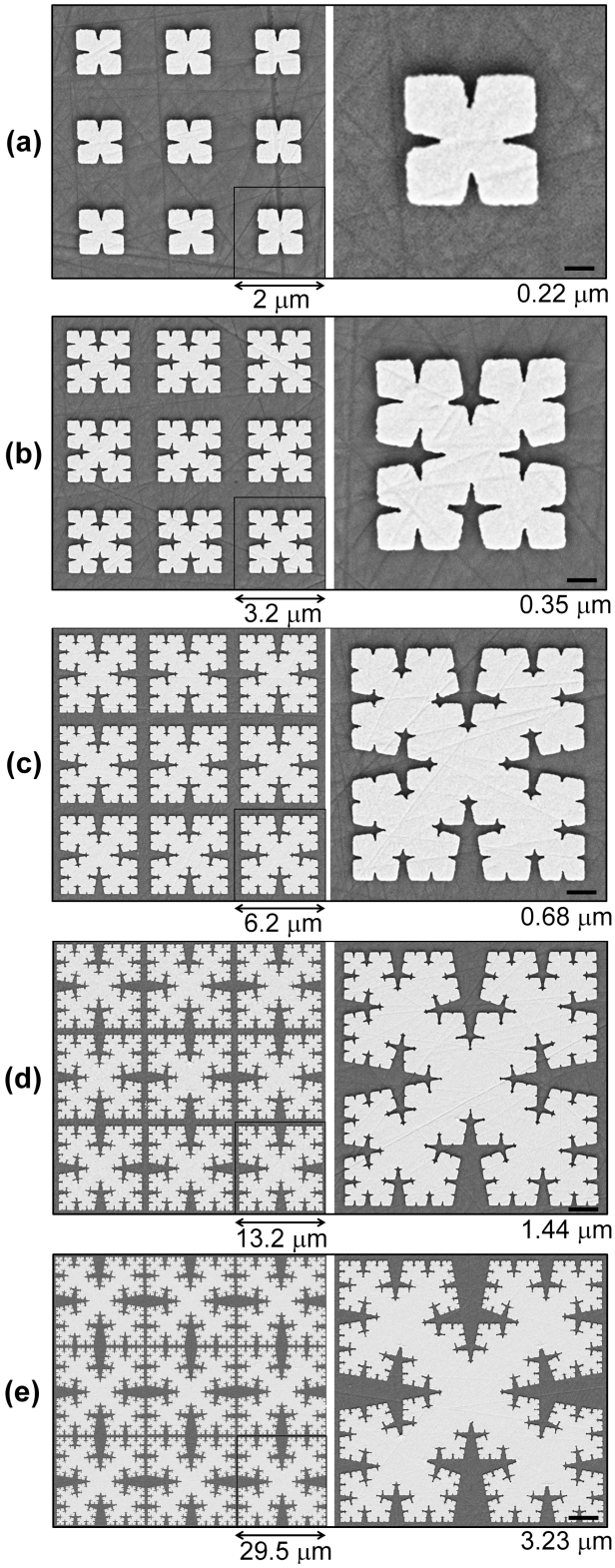
- λ_1; 1., 2. ve 3. iterasyonların ilgili spektral aralıktaki en uzun dalga boyuna sahip 1. mertebe modu ve $\lambda_1^{(h)}$; hibridizasyon sonucu oluşan, λ_1'deki EM alan deseninin hibridi olan alan desenine sahip hibrit modu ifade etmektedir.
- λ_2; tüm iterasyonların ilgili spektral aralıktaki daha kısa dalga boyuna sahip 2. mertebe modu ve $\lambda_2^{(h)}$; hibridizasyon sonucu oluşan, λ_2'deki EM alan deseninin hibridi olan alan desenine sahip hibrit modu ifade etmektedir.
- λ_3; 2., 3., 4. ve 5. iterasyonların ilgili spektral aralıktaki 3. mertebe modu ve $\lambda_3^{(h)}$; hibridizasyon sonucu oluşan, λ_3'deki EM alan deseninin hibridi olan alan desenine sahip hibrit modu ifade etmektedir.
- λ_4; 3., 4. ve 5. iterasyonların ilgili spektral aralıktaki 4. mertebe modu ve $\lambda_4^{(h)}$; hibridizasyon sonucu oluşan, λ_4'deki EM alan deseninin hibridi olan alan desenine sahip hibrit modu ifade etmektedir.
- λ_5; 4. ve 5. iterasyonun ilgili spektral 5. mertebe modu ve $\lambda_5^{(h)}$; hibridizasyon sonucu oluşan, λ_5'deki EM alan deseninin hibridi olan alan desenine sahip hibrit modu ifade etmektedir.



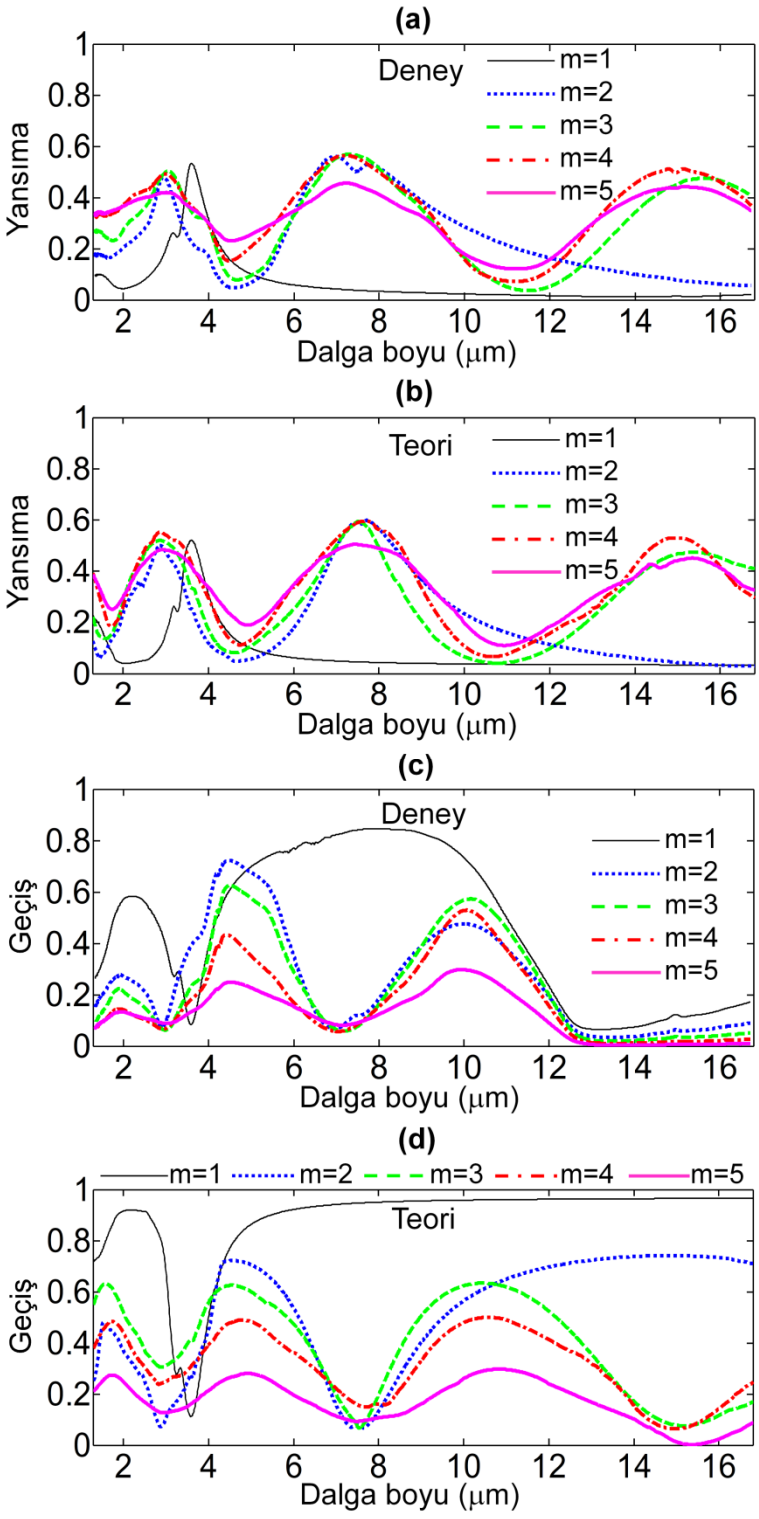
Şekil 3.40. (a) Şekil 3.39'da verilen nanoantenlerin, *m.* iterasyondaki ana rezonant dalga boyu değişimleri ve **(b)** *m.* iterasyondaki hibrit mod değişimleri.

Görüldüğü gibi fraktal ölçekleme etkisi rezonant dalga boyları üzerinde de söz konusudur ve iterasyon sayısı *m*'in arttırılması aynı tür modun rezonant dalga boylarında kırmızıya kayma meydana getirmektedir. Çünkü iterasyonların genel ve yerel geometrik özellikleri değiştiğinden antenlerin ilgili rezonant modlardaki etkin uzunlukları da büyümektedir. Ayrıca, Şekil 3.40'daki gibi, aynı iterasyonun tüm modları dikkate alındığında, fraktal ölçekleme etkisinin logaritmik ölçekte meydana gelen modlara neden olduğu da gözlenmektedir. Şekil 3.40'da çizgi etiketlerindeki *b* mod mertebesi ve $^{(h)}$ üst simgesi ilgili modun hibrit modunu belirtmektedir. Şekil 3.40a'da iterasyon sayısın *m*'e karşılık ana rezonant modlar verilirken, Şekil 3.40b'de iterasyon sayısın *m*'e karşılık hibrit modlar verilmektedir.

Aynı devre boyutunda, iterasyonu arttırarak tasarlanan Cesaro-1 tip fraktal geometrili nanoanten dizilerinin (**U#2**) üretiminin ardından; EBL sırasındaki yük birikimi sınırlamasının etkisini azaltarak üretim yapmak amacıyla, aynı fraktal geometrisinin, *her iterasyon artışında aynı minimum fraktal uzunluğu ve dolayısıyla farklı devre boyutu için* de nanoüretim gerçekleştirilmiştir (*U#3*). CaF_2 alt tabana metal yapıştırmak daha zor olduğundan ve istenilen IR bölgede daha fazla rezonant mod oluşturmak için olabildiğince kısa daha keskin köşeli yapılar üretebilmek için, fraktal birim boyutlarının olabildiğince uzun şeçilmesi gerekmektedir. Böylece minimum uzunlukları L_1 = 400 nm, L_2 = 400 nm, L_3 = 400 nm, L_4 = 400 nm ile L_5 = 400 nm alınarak ve 20°'lik girinti açısına sahip ilk beş iterasyonun da üretimi yapılmıştır. CaF_2 alt taban üzerine üretilen parçacık tabanlı bu fraktal nanoanten dizilerinin SEM görüntüleri Şekil 3.41'de verilmektedir. Üretilen bu nanoanten dizilerinin periyotları 1., 2, 3., 4. ve 5. iterasyonlar için sırasıyla P_1 = 2 μm (Şekil 3.41a), P_2 = 3.2 μm (Şekil 3.41b), P_3 = 6.2 μm (Şekil 3.41c), P_4 = 13.2 μm (Şekil 3.41d) ve P_5=29.5 μm (Şekil 3.41e) olarak alınmıştır. Bu defa *U#2* çalışmasına göre Au anten alanı iterasyon arttıkça arttığından; EBL sırasında, daha düşük iterasyonlarda daha az yük birikimi meydana gelmiştir. Söz konusu boyutlardaki fraktal geometrinin köşeleri yuvarlatılmış olarak üretilebilmiştir. Köşeler, yaklaşık olarak 20 nm'lik yarıçap ile kırpılarak üretilmiştir.



Şekil 3.41. CaF_2 alt taban üzerine üretilmiş *Cesaro-2 tip fraktal* nanoantenler; sırasıyla **(a)** 1. iterasyon, **(b)** 2. iterasyon, **(c)** 3. iterasyon, **(d)** 4. iterasyon ve **(e)** 5. iterasyon için üretilmiş anten dizilerinin 3 × 3'lük kısmının (sol paneller) ve birim hücresinin (sağ paneller) SEM görüntüleri.

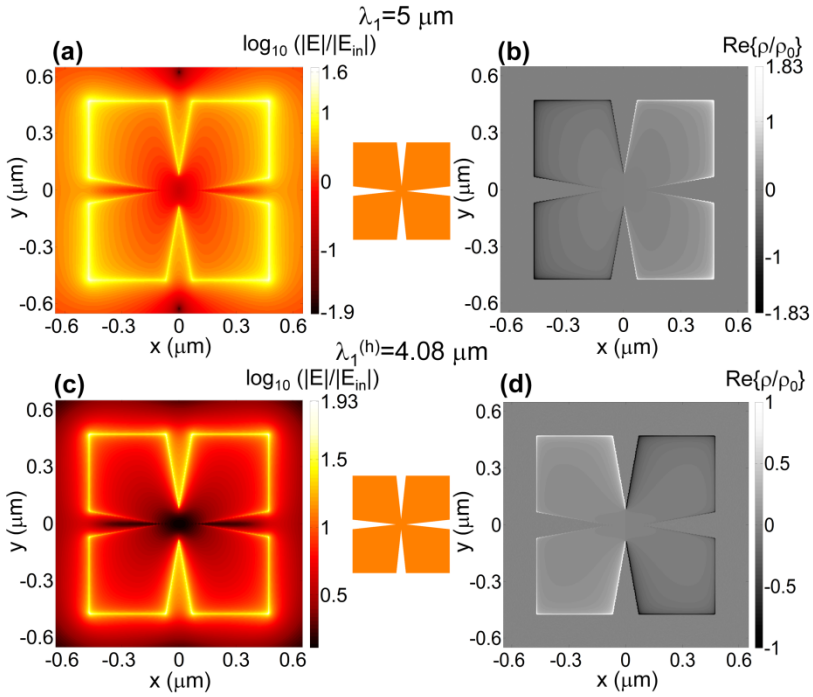


Şekil 3.42. Üretilen *Cesaro-2 tip nanoanten* dizilerinin (Şekil 3.39) 1., 2., 3., 4. ve 5. iterasyonlar için deneysel **(a,b)** yansıma ve **(c,d)** geçiş **(a,c)** spektrumları ile **(b,d)** FDTD simülasyon sonuçları arasındaki karşılaştırma.

Üretilen yapıların plazmonik rezonanslarını deneysel olarak da göstermek için Şekil 3.42'de; sabit minimum uzunluğa (L_m) ve iterasyon artışıyla artan devre boyutlarına sahip, *Cesaro-2 tip fraktal* nanoanten dizilerinin (Şekil 41), FTIR spektroskopisi ile deneysel yansıma ve geçiş spektrumları ölçülmüş ve nümerik olarak analiz edilen yansıma ve geçiş spektrumlarıyla karşılaştırılmıştır. İlk beş iterasyondaki *Cesaro-2 tip nanoanten* dizilerinin yansıma modundaki FTIR spektrumları Şekil 3.42a'da ve FDTD simülasyon sonuçları Şekil 3.42b'de verilmektedir. Benzer olarak bu anten dizilerinin geçiş modundaki FTIR spektrumları Şekil 3.42c'de ve FDTD simülasyon sonuçları da Şekil 3.42d'de verilmektedir. Burada, deneysel sonuçlar ile nümerik sonuçlar arasında, özellikle yansıma modunda, karşılıklı rezonant modlardaki küçük farklılıklar haricinde iyi bir uyum olduğu görülmektedir. Ayrıca simülasyonlarda kullanılan CaF_2 dağınım verisi 12 μm'lik dalga boyuna kadardır [144] ve pratikte CaF_2 alt tabanın 12 μm'den sonraki spekral bölgede geçiş karakteri azalmaktadır. FDTD simülasyon programı, kullanılan veriyi [144] çok-katsayılı modele (MCM; multi-coefficient model) göre daha yüksek dalga boylarına uydurmaktadır. Bu nedenle 12 μm'den sonra antenlerin geçiş modundaki FTIR spektrumları ile FDTD simülasyon sonuçları arasındaki küçük farklılıklar olmaktadır.

Deneysel sonuçlar ile nümerik sonuçlarda, karşılıklı rezonant modlardaki bu kaymalara çoğunlukla EBL işlemindeki yük birikmesi gibi sınırlamalar nedeniyle yapının merkezinden kenarlarına doğru farklılaşan genişleme problemi neden olmaktadır. Yine simülasyonlarda dikkate alınan malzeme dağınım verilerinin de bu kaymaya etkisi olmaktadır. Ayrıca üretilen nanoantenlerin köşeleri tasarlanan geometrilerdeki gibi tam sivri değildir. Şekil 3.41'den de görüldüğü gibi, nanoüretim aşamalarındaki bu kısıtlamalar nedeniyle yapıların girinti köşeleri farklı uzunluklarda kırpılarak üretim gerçekleştirilebilmiştir ve diğer köşeler de yukarıda belirtildiği gibi yaklaşık 20 nm'lik eğrilik yarıçapına sahiptir. İterayon artıkça girintilerde oluşan kırpılma, normal boyutuna oranla daha da büyümektedir. Bu durum özellikle, yukarıda bahsedilen EBL kısıtlamaları nedeniyle yapıda merkezden kenara doğru azalan genişlemenin sonucudur. Bu nedenle yapıların 400 nm uzunlukla hesaplanan en küçük adacığının üretilmiş yüzey alanı ve boyutları küçüldüğünden (dolayısıyla etkin uzunluklar küçüldüğünden) Şekil 3.42 'deki ölçülen rezonant modlar Şekil 3.39'daki, hesaplanan rezonant modlara göre maviye kaymaktadır. Şekil 3.42a'da; 1. iterasyon için λ_1 ile $\lambda_1^{(h)}$, 2. iterasyon için

λ_1, $\lambda_1^{(h)}$, λ_2 ile $\lambda_2^{(h)}$, 3. iterasyon için λ_1, $\lambda_1^{(h)}$, λ_2, $\lambda_2^{(h)}$, λ_3 ile $\lambda_3^{(h)}$, 4. ve 5. iterasyonlar için de λ_2, $\lambda_2^{(h)}$, λ_3, $\lambda_3^{(h)}$, λ_4 ile $\lambda_4^{(h)}$ görüntülenebilmektedir. Ancak CaF_2 alt tabanın 12 μm'den sonra azalan geçiş karakteri 3.,4. ve 5. iterasyonların 12 μm'den sonraki geçiş spektrumlarındaki rezonant karakterlerini bozmaktadır. Yine de 1.3 μm ila 16.8 μm aralığındaki FTIR yansıma ölçümleri ile 3.,4. ve 5. iterasyonların üç rezonant modu da gösterilebilmektedir. Söz konusu nanoüretim sınırlamaları dışında Şekil 3.41'de, NIR'dan MIR'a kadar olan geniş bir spektral aralıkta *Cesaro-2 tip nanoanten*lerin birbirinden ayrı plazmon modları açıkça görülmektedir.



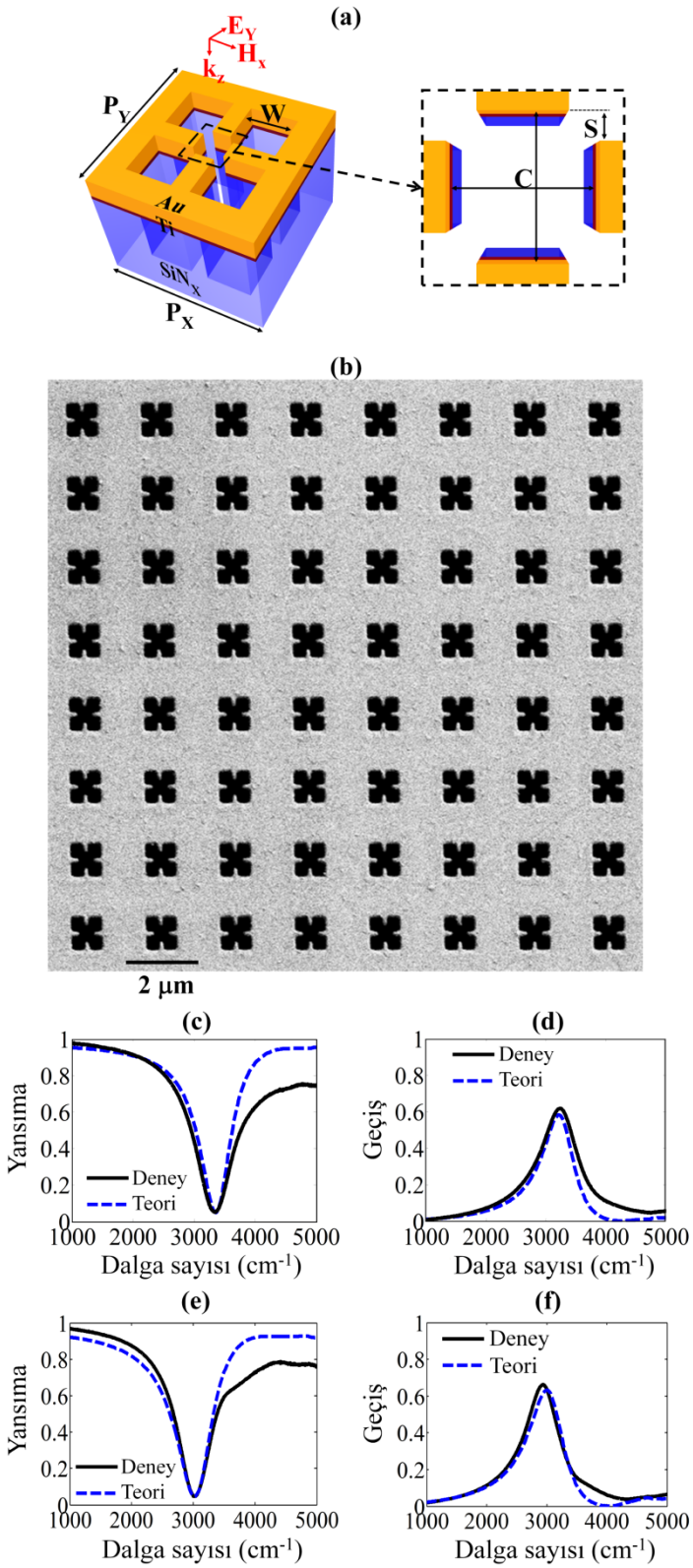
Şekil 3.43. 1. ana mod ve 1. hibrit modlar için, *x*-kutuplu ışık altında, 1. iterasyon Au nanoantenin üst yüzeyindeki **(a,c)** logaritmik $|E|/|E_{in}|$ ve **(b,d)** Re$\{\rho/\rho_0\}$ dağılımları.

1. iterasyon *Cesaro-1 tip antende* FTIR sonuçlarında belirlenen 1. hibrit mod $\lambda_1^{(h)}$, *Cesaro-2 tip* antenlerde daha belirgin olarak hesaplanmış ve ölçülmüştür. $\lambda_1^{(h)}$'nin *Cesaro-2 tasarımı*nda daha belirgin gözlenebilmesinin; *Cesaro-1 tasarımı*na göre daha girinti açısının daha geniş olmasından ve birinci modun uzun dalga boylarında değil de kısa dalga boylarında oluşmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu konumsal dağılımlardaki değişimin anlaşılması amacıyla; 1. iterasyon *Cesaro-2 tip nanoanten* için, λ_1 = 5 μm ve $\lambda_1^{(h)}$ = 4.08 μm'deki, hesaplanmış konumsal dağılımlar, Şekil 3.43'de verilmektedir. Bu dağılımlar için simülasyonlarda E_{in} = 1 genlikli

E_x-kutuplu kaynak kullanılmıştır ve E-alanlar da $|E|/|E_{in}|=|E|$ eşitliği yoluyla normalize edilmiştir. Sistemdeki yük yoğunluğu, FDTD simülasyonlarından elde edilen 3D alan verisinden $\nabla . \boldsymbol{D} = \rho_V$ formülü ile hesaplanıp, yük dağılımları için normalizasyon değeri $\rho_0 = 0.0529$ C/m^3 olarak alınmıştır.

3.3.1.4. U#4 Kare Fraktal Benzeri Nanoanten Dizileri

Geleneksel açıklık dizilerinden farklı olarak, dalga boyundan daha küçük boyutlara sahip fraktal nanoaçıklıklar; ayarlanabilir frekans yeteneği ve sınırlı bir hacim içinde ıraksayan yüzey alanı gibi eşsiz fraktal karakteristikleri [83] nedeniyle büyük bir potansiyele sahiptir. Bu çalışmada kare fraktal benzeri nanoaçıklık anten dizilerinin analitik, nümerik ve deneysel olarak optik karakteristikleri belirlenmiştir. Önerilen nanoaçıklık dizilerinin spektral cevapları ve yakın alan dağılımları FDTD metodu [133] ile elde edilmiştir. Sensör hassaisyeti parametrelerinden biri olan kırılma indisi hassasiyetini teorik olarak incelemek için; yapının kırılma indisi algılama karakteristikleri de belirlenmiştir. Frekans cevabının fiziksel kaynağı ise bir dizi parametre değişimi simülasyonu ile belirlenmektedir. Nümerik çalışmalar sayesinde kare fraktal benzeri bu sistemin yüksek yakın alan kuvvetlendirme kapasitesi gösterilmiştir. Ayrıca SEIRA uygulamaları için oldukça avantajlı olan yükseltilmiş bu yakın alanların, sistemin yüzey koşullarına hassasiyetini arttırdığı da gösterilmektedir. MIR bölgede, yüksek rezonant SEIRA güçlendirmesi [73] gözlemlenmiş ve spektral cevabın geometrik parametrelere bağımlılığı belirlenmiştir. Analitik çalışmalarda ise yapının rezonant dalga sayıları için bağıntılar sunulmuştur. Bu bağıntılarla belirli geometrik parametre değerleri için kare fraktal benzeri nanoaçıklık dizisinin rezonans frekansları hesaplanabilir. Bu çalışmada rezonans frekansları için sunulan sentez formülleri, plazmonik nanoanten dizileri için sunulan sentez yöntemi bakımından bir ilktir. Yapılan yansıma ve geçiş simülasyonlarında, *x*- ve *y*-doğrultusunda periodik sınır koşulları; *z*-doğrultusunda, eksenlerde mükemmel şekilde uyumlu katmanlar seçilmiştir. Anten yapısı üzerindeki bölge düzgün 3 nm × 3 nm × 3 nm'lik hücrelere bölünmüştür. Au ve Ti dağınım verisi Palik (1985) [3]'ten alınmış olup SiN_x gerçel kırılma indisi 2.14 olarak alınmıştır. Aksi belirtilmedikçe bu çalışmadaki simülasyonlarda, *y*-kutuplu düzlem dalga kaynağı ve C = 450 nm, W = 370 nm, S = 165 nm, $P_x = P_y$ = 2000 nm, t_d = 100 nm, t_{Ti} = 5 nm ile t_{Au} = 30 nm geometrik parametreleri dikkate alınmıştır.



Şekil 3.44. **(a)** *Kare fraktal benzeri nanoaçıklık* dizilerinin birim hücre ve aydınlatma kaynağı perspektif görünümü. **(b)** Üretilen dizilerin 8 × 8'lük kısmının SEM görüntüsü. *y*-kutuplu kaynak altında; C = 450 nm, W = 370 nm, S = 165 nm, P_x = P_y = 2000 nm parametreleri için **(c)** yansıma ve **(d)** geçiş spektrumları ile C = 530 nm, W= 385 nm, S = 165 nm, P_x = P_y = 2000 nm parametreleri için **(e)** yansıma ve **(f)** geçiş spektrumları.

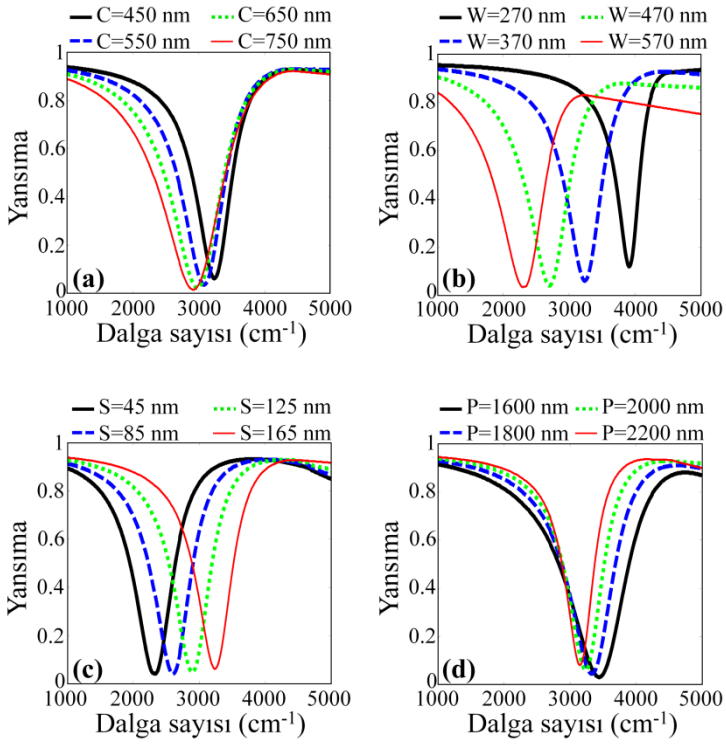
Birim hücresi Şekil 3.44a'da verilen ve Şekil 2.7'deki nanoüretim yöntemi ile yüksek hassasiyette ve düzgün bir dağılımla gerçekleştirilen *kare fraktal benzeri nanoaçıklık* sisteminin SEM görüntüsü Şekil 3.44b'de verilmektedir. Üretim için girilen geometrik parametreler; açıklık genişliği W = 370 nm, merkezi kare genişliği C = 450 nm ve kareler arası geometrik girişim miktarı S = 165 nm'dir. Açıklıkların x-ekseni ve y-ekseni boyunca periodu da 2 μm'dir. Au katman kalınlığı (t_{Au}) 30nm ve SiN_x zar kalınlığı (t_d) 100 nm seçilmiştir. t_{Ti} = 5 nm kalınlıkta Ti katman da yapıştırma katmanı olarak kullanılmıştır. Ayrıca, farklı C = 530 nm, W= 385 nm, S = 165 nm, $P_x = P_y$ = 2000 nm, t_d = 100 nm, t_{Ti} = 5 nm ve t_{Au} = 30 nm değerlerinde parametrelere sahip diğer bir anten dizisi de üretilmiş olup SEM görüntüleri bu kısımda sunulmaktadır.

Nanoüretimi gerçekleştirilmiş anten dizilerinin iki farklı parametre seti için ölçülmüş FTIR yansıma ve geçiş spektrumları Şekil 3.44c-f'de verilmektedir. C = 450 nm, W = 370 nm, S = 165 nm, $P_x = P_y$ = 2000 nm, t_d = 100 nm, t_{Ti} = 5 nm ve t_{Au} = 30 nm parametreleri için hesaplanmış ve ölçülmüş yansıma (Şekil 3.44c) ile geçiş (Şekil 3.44d) spektrumları iyi uyum sergilemektedir. Önerilen yapı f = 100.6 THz (λ = 2980.05 nm, ν = 3355.65 cm^{-1})'de yansıma için (Şekil 3.44c); f = 96.45 THz (λ = 3108.27 nm, ν = 3217.22 cm^{-1})'de geçiş için (Şekil 3.44c) rezonans piklerine sahiptir. İkinci parametre seti, C = 530 nm, W= 385 nm, S = 165 nm, $P_x = P_y$ = 2000 nm, t_d = 100 nm, t_{Ti} = 5 nm ve t_{Au} = 30 nm için y-kutuplu aydınlatma kaynağı altındaki yansıma ve geçiş spektrumu karşılaştırmaları da Şekil 3.44e,f'de verilmektedir. Yine bu panellerden de deneysel ve nümerik sonuçlar arasında çok iyi bir uyum olduğu gözlenmektedir. Bu 2. parametre seti için ise rezonant pikler; yansıma için f = 91.14 THz (λ = 3289.47 nm, ν = 3040 cm^{-1}) (Şekil 3.44e) ve geçiş için f =88.92 THz (λ = 3371.54 nm, ν = 2967 cm^{-1})'dir (Şekil 3.44f).

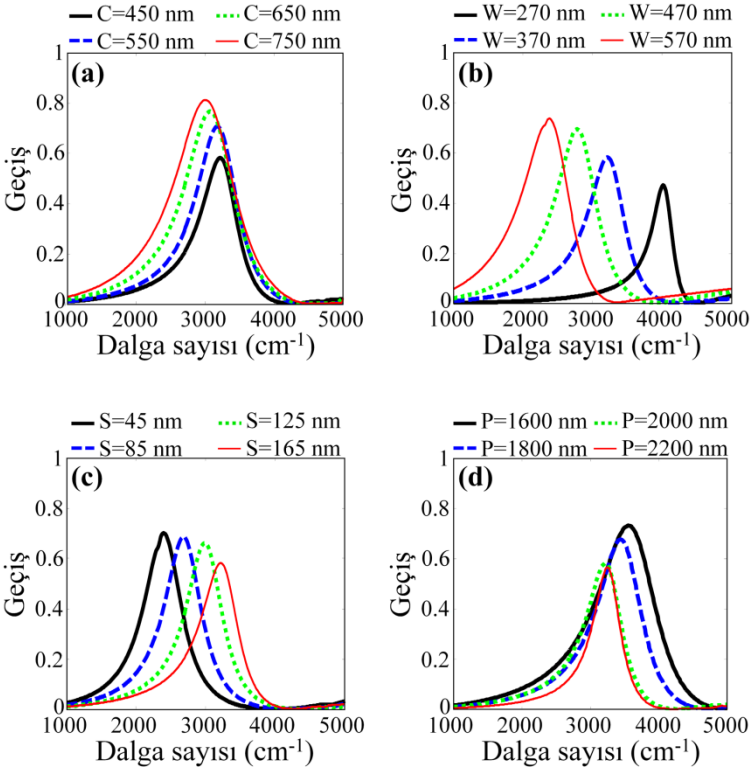
Rezonans frekansı akortu IR spektroskopi uygulamaları için oldukça önemlidir. Organik moleküllerin birçoğu 3-20 μm (~3000-500 cm^{-1}) bölgesinde fonksiyonel titreşimlere sahiptir. Algılama sisteminin rezonans frekansının ilgili moleküler rezonans frekansına ayarlanması gerekmektedir. Yapının spektral cevabında iyi bir kontrol mekanizması elde etmek için anahtar parametre değişimleri için bir dizi nümerik çalışma yapılmıştır (Şekil 3.45). Burada C parametresindeki değişim rezonans frekasında kırmızıya kayma meydana getirirken (Şekil 3.45a); artışı ile yansımayı düşürmektedir (Şekil 3.45a).

Çünkü *C* parametresindeki artış metal kaplı alanı azaltmaktadır. *W* parametresindeki artış da yansımayı düşürüp (Şekil 3.45b), rezonanslarda belirgin miktarda kırmızıya kayma sağlamaktadır. Bunun nedeni ise *E*-alana dik olan boyutların değişmesi ve açıklık alanının artmasıdır. Kareler arası geometrik girişim miktarı, diğer bir tanımlama ile düğüm genişliği *S* parametresindeki artış ise rezonans frekanslarında maviye kaymaya neden olmakta ve açıklık alanını azalttığından yansımayı arttırmaktadır (Şekil 3.45c). Şekil 3.45d antenlerin dizi periyotlarındaki ($P = P_x = P_y$) yansıma değişimlerini göstermektedir. Periyot değeri arttıkça metal yüzey alanı arttığından, rezonanslarda kırmızıya kayma meydana gelmekte ve yansıma (Şekil 3.45d) artmaktadır.

Önerilen yapının geçiş spektrumları da geometrik parametre değişimine karşı nümerik olarak analiz edilmiştir (Şekil 3.46). *C* değişimi neticesinde artan açıklık alanı, geçişi arttırmakta ve etkileşen SPP modlar, rezonanslarda kırmızıya kaymaya neden olmaktadır (Şekil 3.46a) [114]. Benzer olarak *W* parametresindeki artış da açıklık alanına bağlı olarak EM geçişi arttırmakta ve *E*-alana dik boyutların artmasından dolayı rezonans frekansında kırmızıya kaymaya neden olmaktadır (Şekil 3.46b). *S* parametresindeki artış ise LSPP modların daha kısa dalga boylu ışık ile etkileştiği boyutlara bağlı olarak rezonanslarda maviye kayma ile sonuçlanmaktadır [158] (Şekil 3.46c). Açıklıklar arasındaki mesafenin artması LSP rezonansların kırmızıya kaymasına neden olmaktadır [159] ve böylece daha küçük periyotlardaki nanoaçıklıklar, Şekil 3.46d'deki gibi rezonansları maviye kaydırıp EM geçişi düşürmektedir. Çünkü altın kaplı yüzey alanı genişlemekte, yük ve akım dağılımları yayılarak iletilen dalga kılavuzu modları daha az desteklenmektedir [160]. Bu geometrik parametreler değiştirilerek; sistemin rezonans frekansı, moleküllerin titreşim bantlarının çoğunlukla bulunduğu IR'den VIS'e olan spektral bölgede değiştirilebilir. Böylelikle arzu edilen birçok kimyasal veya biyolojik molekülün algılanmasında kullanılabilecek nanoanten dizileri elde edilebilir.



Şekil 3.45. Kare fraktal benzeri nanoaçıklık dizilerinin **(a)** *C* değişimi, **(b)** *W* değişimi, **(c)** *S* değişimi ve **(d)** *P* değişimi için yansıma spektrumları.



Şekil 3.46. Kare fraktal benzeri nanoaçıklık dizilerinin **(a)** *C* değişimi, **(b)** *W* değişimi, **(c)** *S* değişimi ve **(d)** *P* değişimi için geçiş spektrumları.

İkili devre parametreleri değiştirilerek söz konusu nanoaçıklık sistemi için akort edilebilir bir uzak alan davranışı belirlenmiştir. Burada analitik bir gösterge yoluyla anten dizisi için istenilen dalga boyunda bir çalışma sağlanabilmektedir. Böylece farklı geometrik parametre çiftleri için EM yansıma ve geçiş spektrumlarının rezonant dalga sayıları nümerik olarak analiz edilerek regresyon metodu yoluyla söz konusu parametre çiftlerinin bir bağıntısı olarak rezonant dalga sayıları analitik bağıntıları elde edilmiştir. Geometrik parametre çiftleri değişimine karşılık yansıma spektrumları rezonant dalga sayıları (ν_R) değişimleri Şekil 3.47'da gösterilmektedir. Bu analizde kare fraktal benzeri açıklığın parametreleri 450 nm ≤ C ≤ 600 nm, 270 nm ≤ W ≤ 570 nm, and 85 nm ≤ S ≤ 165 nm olarak değiştirilmiştir ve bağıntılar birimsiz olarak kurulmuştur. Yansıma için $\nu_R(W, C)$ bağıntısı;

- (S = 165 nm'de tutularak) 450 nm ≤ C ≤ 600 nm ve 270 nm ≤ W ≤ 570 nm için W ve C parametre çifti değişimi sonucunda (Şekil 3.47b)

$$\nu_R(W, C) = (-92.1 \times 10^{-4} + 15.88 \times 10^{-6} * W) * C * W - 7.251 * W + 6463.35 \quad (3.2a)$$

- (C = 450 nm'de tutularak) 85 nm ≤ S ≤ 165 nm ve 450 nm ≤ C ≤ 600 nm parametre aralığında (Şekil 3.47c)

$$\nu_R(S, C) = -67.08 * 10^{-9} * S^2 * C^2 + 23.96 * 10^{-3} * S * C + 1682.24 \quad (3.2b)$$

- (W = 370 nm'de tutularak) 270 nm ≤ W ≤ 570 nm ve 85 nm ≤ S ≤ 165 nm aralığı için analiz edilip (Şekil 3.47d)

$$\nu_R(W, S) = 0.0079525 * W^2 - 9.5404 * W + 4375.01575 - 0.0153125 * W * S + 13.484375 * S \quad (3.2c)$$

bağıntıları belirlenmiştir.

İkili parametre değişimleri için geçiş spektrumlarının rezonant dalga sayıları (ν_T) da aynı yolla analiz edilmiştir (Şekil 3.48). Buna göre $\nu_T(W, C)$ bağıntısı;

- (S = 165 nm'de tutularak) 450 nm ≤ C ≤ 600 nm ve 270 nm ≤ W ≤ 570 nm parametre aralığında (Şekil 3.48b)

$$\nu_T(W,C) = C * W * (33.61 \times 10^{-9} * C * W - 24.08 \times 10^{-3}) + 2.33 * C + 5244.71 \quad (3.3a)$$

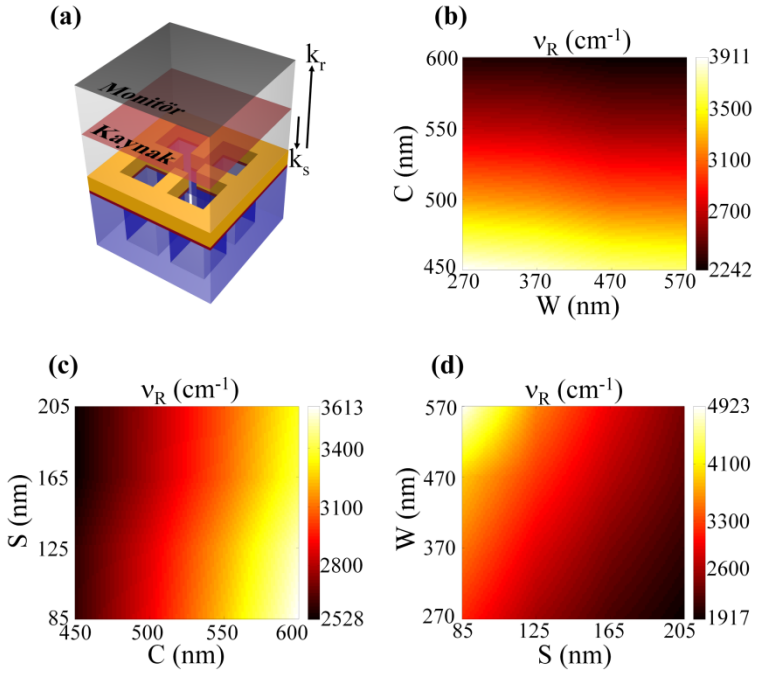
- (C = 450 nm'de tutularak) 85 nm ≤ S ≤ 165 nm ve 450 nm ≤ C ≤ 600 nm parametre aralığında (Şekil 3.48c)

$$\nu_T(C,S) = C * S * (-20.8478 * 10^{-8} * C * S + 40.4205 * 10^{-3}) + 3.766 * S - 2.4933 * C + 2154.3803 \quad (3.3b)$$

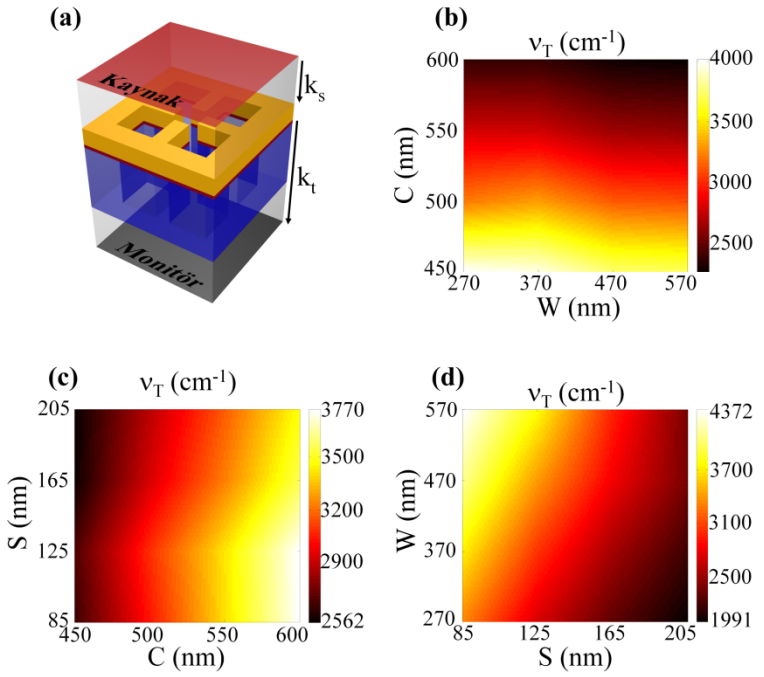
- (W = 370 nm'de tutularak) 270 nm ≤ W ≤ 570 nm ve 85 nm ≤ S ≤ 165 nm aralığı için (Şekil 3.48d)

$$\nu_T(W,S) = -11.8666 \times 10^{-3} * W^2 + 19.17786 \times 10^{-3} * W * S - 11.0169 \times 10^{-7} * W * S^2 + 3954.7766 \quad (3.3c)$$

bağıntıları elde edilmiştir.



Şekil 3.47. **(a)** Yansıma modu EM modelleme güç monitörü konumu ve rezonant dalga sayıları; **(b)** sabit S için $\nu_R(C,W)$, **(c)** sabit W için $\nu_R(S,C)$ ile **(d)** sabit C için $\nu_R(S,W)$.

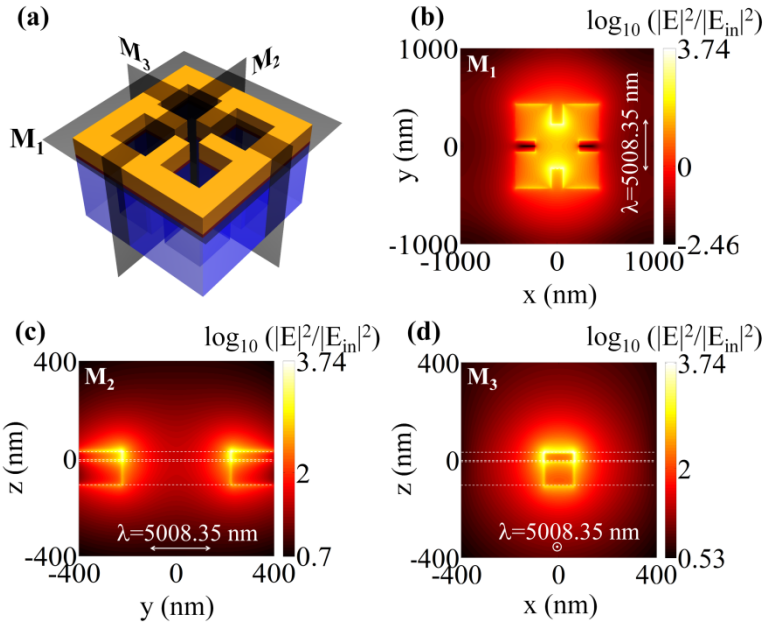


Şekil 3.48. Geçiş modu için EM modelleme güç monitörü konumu ve rezonant dalga sayıları; **(b)** sabit S için $\nu_T(C,W)$, **(c)** sabit W için $\nu_T(S,C)$ ile **(d)** sabit C için $\nu_T(S,W)$.

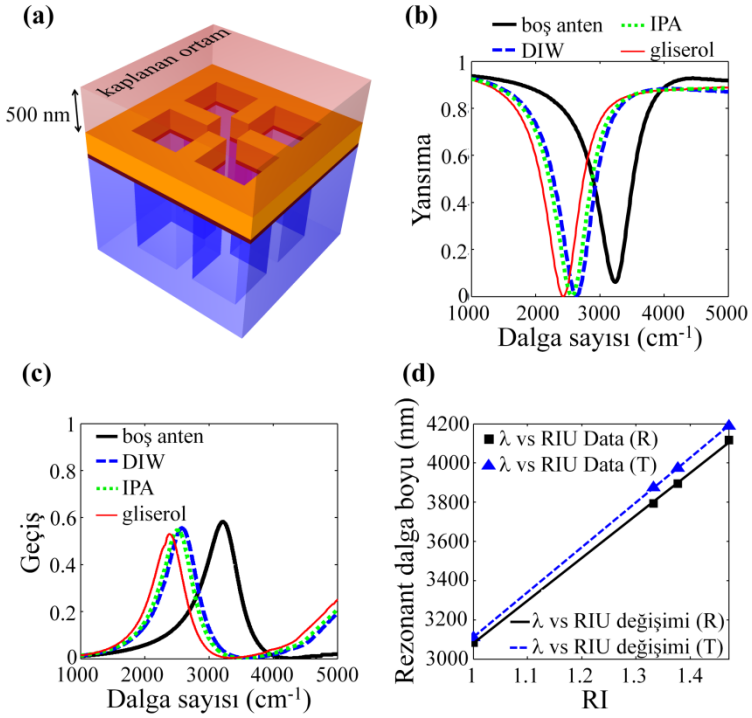
Regresyon eşitliklerini doğrulamak için 1. parametre seti olan C = 450 nm, W = 370 nm, S = 165 nm, P_x = P_y = 2000 nm, t_d = 100 nm, t_{Ti} = 5 nm ve t_{Au} = 30 nm geometrik parametrelerine göre üretilmiş olan nanoaçıklık dizisi ile; 2. parametre seti olan C = 530 nm, W= 385 nm, S = 165 nm, P_x = P_y = 2000 nm, t_d = 100 nm, t_{Ti} = 5 nm ve t_{Au} = 30 nm geometrik parametrelerine göre üretilmiş olan nanoaçıklık dizisi ölçülüp akort mekanizması yukarıda verilen eşitliklere göre değerlendirilmiştir. Bu geometrik parametre seti dikkate alınarak ve (3.2a) ile (3.3a) eşitlikleri kullanılarak; rezonant dalga sayıları, yansıma için $\nu_R(385,530)$ = 3039.9 cm^{-1}, geçiş için $\nu_T(385,530)$ = 2965.5 cm^{-1} olarak hesaplanmıştır. Bu rezonant dalga sayısı değeri 2. parametre setindeki anten dizisinin optik karakterizasyonu ile ~%0.1 hata ile örtüşmektedir. Ayrıca bu sonuçlar Şekil 3.45a,b'den yansımadaki kırmızıya kayma ve Şekil 3.46a,b'den geçişteki kırmızıya kayma ile de açıklanabilir.

Alan yoğun nokta konumu kontrolü, spektroskopi uygulamaları için gerekli bir analizdir. Eğer alan yoğun nokta konumu, biyomolekül ile yapı içinde hapsedilen ışığın etkileşimini arttırırsa algılama işlemi daha kalitatif olacaktır ve sensör hassasiyet artacaktır. Bu bağlamda 1. set parametreler için nümerik alan dağılımı analizleri

yapılarak yatay ve dikey monitörlerlerden (Şekil 3.49a; M_1, M_2, and M_3) rezonant dalga boylarında, SEIRA güçlendirmeleri ($|E|^2/|E_{in}|^2$) [73] belirlenip daha anlaşılır bir görüntü için logarithmik ölçekte, Şekil 3.49b-d'de sunulmaktadır. *xy*-düzlemi üzerinde (hava-metal arayüzünde) yüksek SEIRA güçlendirmeleri gözlenmektedir. Şekil 3.49b'den görülebileceği gibi, ışık çoğunlukla yapının merkez açıklığının *E*-alana dik olan kenarlarında yerelleştirilmiştir. Dikey konumsal SEIRA dağılımları da ışığın *z*-doğrultusundaki metal katman boyunca yoğunlaştığını göstermektedir (Şekil 3.49c,d). Dolayısıyla alan yoğun nokta yerelleştirmeleri *E*-alana diktir ve alan yoğun noktalardaki SEIRA güçlendirmesi ~5370'dir. Bu değer SEIRA spektroskopisi gibi yakın alan güçlendirmesi gereken uygulamalar için oldukça avantajlıdır. Klasik dairesel nanoanten dizilerine [161] göre daha yüksek yakın alan hapsetme özelliğine sahip olan bu yapı, nano-ölçekli açıklıklarındaki LSPP'ler yoluyla, küçük moleküler yapıların optik sondalamasında kullanılabilir.



Şekil 3.49. (a) Yatay ve dikey alan monitörleri (hava-metal arayüzünde M_1, x = -60 nm'de M_2 ve y = 225 nm'de M_3). **(b)** M_1 üzerindeki, **(c)** M_2 üzerindeki ve **(d)** M_3 üzeindeki rezonant SEIRA yükseltmesi.



Şekil 3.50. **(a)** Kaplanmış yapının şematik görünümü. Yapının üzerinde hava, DIW, IPA veya gliserol olduğu durumlar için **(b)** yansıma spektrumları ve **(c)** geçiş spektrumları. **(d)** Yapının kırılma indisi hassasiyeti.

Teze özgü olarak tasarlanıp üretilen bu yapının kırılma indisi hassasiyetini vurgulamak için nanoanten dizisinin daldırıldığı dielektrik ortamın çevresel kırılma indisi değişimine karşı, plazmonik rezonansların daha uzun dalga boylarına kaymaları üzerinde nümerik hesaplamalar yapılmıştır. Bunun için rezonant dalga boyu değişimi ile çevresel ortamın kırılma indisi değişimi arasındaki oran olan ve

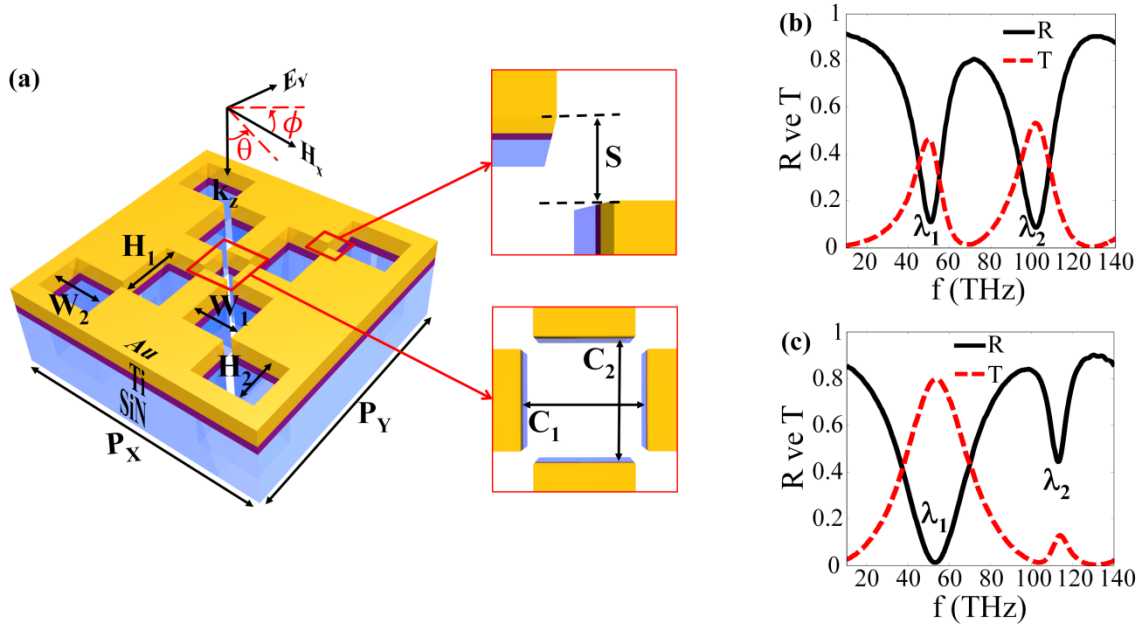
$$S = \Delta\lambda/\Delta n \tag{3.4}$$

eşitliği ile tanımlanan kırılma indisi hassasiyeti [162] hesaplanmıştır. Burada, farklı kırılma indisi değerlerine sahip olan farklı biyomoleküllerin tutunarak katman oluşturduğu antenlerin, rezonant davranışlarındaki kaymayı analiz etmek amacıyla; farklı çevresel ortamlar seçilmiştir (Şekil 3.50a). Bu çevresel ortamların kırılma indisleri de DIW için n = 1.3325, IPA için n = 1.3776 ve gliserol için n = 1.4722 [134] olarak alınmıştır. Şekil 3.50b,c; 500 nm kalınlıktaki farklı çevresel ortamlarla kaplanmış nanoanten dizilerinin, yansıma ve geçiş için dalga sayısı domenindeki spektral değişimlerini göstermektedir. Çevresel kırılma indisinin artışı rezonant dalga boyunda

kırmızıya kayma meydana getirmektedir. Bu kaymanın bir sonucu olarak yansıma rezonant dalga boyları (Şekil 3.50d; siyah kare damgalı veriler) ve geçiş rezonant dalga boyları (Şekil 3.50d; mavi üçgen damgalı veriler) için doğrusal bağıntılar elde edilmiştir $\lambda_{res} = 2171 \times n + 909.47$ (Şekil 3.50d; siyah düz çizgi) ve $\lambda_{res} = 2286.785 \times n + 824.84$ (Şekil 3.50d; mavi kesikli çizgi). Bu sonuçlar, yüksek hassasiyet belirten, yansıma için ~2171 nm/RIU ve geçiş için ~2287 nm/RIU değerlerini vermektedir. Burada RIU (refractive index unit; birim kırılma indisi) birim ifade etmektedir. Bu değerler sensör hasssasiyetinin bir ölçüsüdür ve MIR bölgede plazmonik biyosensör etiketsiz algılama konsepti için oldukça iyi değerlerdir [163,164].

Yüksek iletim ile yansıma karakteristiklerine ve yüksek alan yerelleştirmesi davranışına bağlı olarak önerilen bu algılama platformu analitik ve nümerik olarak analiz edilip deneysel olarak gerçekleştirilmiştir ve yüksek hassasiyette spektroskopi uygulamaları için iyi bir aday olduğu görülmüştür.

3.3.1.5. U#5 Dikdörtgen Fraktal Nanoanten Dizileri



Şekil 3.51. (a) Önerilen nanoaçıklık dizilerinin birim hücre ve aydınlatma kaynağı perspektif görünümü. (b) *y*-kutuplu ve (c) *x*-kutuplu aydınlatma altındaki yansıma ve geçiş spektrumları.

İkili rezonanslara sahip *dikdörtgen fraktal geometrili nanoaçıklıkları*n, nümerik olarak analiz edildiği bu çalışmada önerilen anten yapısının kırılma indisi hassasiyet karakteristikleri incelenmektedir. Spektral cevap ve yakın alan dağılımları, *x*- ve *y*-kutuplu aydınlatma kaynaklarının her ikisi için de FDTD metodu kullanılarak elde edilmektedir. Teze özgü olarak sunulan nanoaçıklık dizilerinin optik karakterizasyonu çalışılmıştır ve ikili rezonant davranışın fiziksel kaynağı parametre değişimi analizi ve yakın alan dağılımları ile belirlenmiştir. MIR bölgedeki ikili rezonanslarda yüksek yakın alan güçlendirmesi ($|E|^2/|E_{in}|^2$) elde edilmiş olup ikili spektral davranışın, fraktal antenin geometrik parametrelerine bağımlılığı belirlenmiştir. Bu nanoplazmonik anten dizisinin IR algılama uygulamalarındaki algılama kapasitesini göstermek için de bir dizi hassasiyet testi yapılmıştır [78]. Bu testlerde kırılma indisi hassasiyeti ve yonga üzerine DIW, SiO_2 ile magnezyum florid MgF_2 gibi farklı dielektrik malzemeler kaplanarak çevresel ortam kalınlığı hassasiyeti hesaplanmıştır. Her iki rezonant mod için de; çevresel kırılma indisi-rezonant dalga boyu ve çevresel ortam kalınlığı-dalga boyu değişimleri doğrusal bağıntılar göstermektedir. Bu doğrusallık algılama uygulamaları için çok önemli olan sabit çevresel ortam kırılma indisi hassasiyeti ve çevresel kalınlık bağımlılığını [132] sağlamaktadır. Bu hassasiyet analizleri aynı anda iki molekülün algılanmasında kullanılabilir.

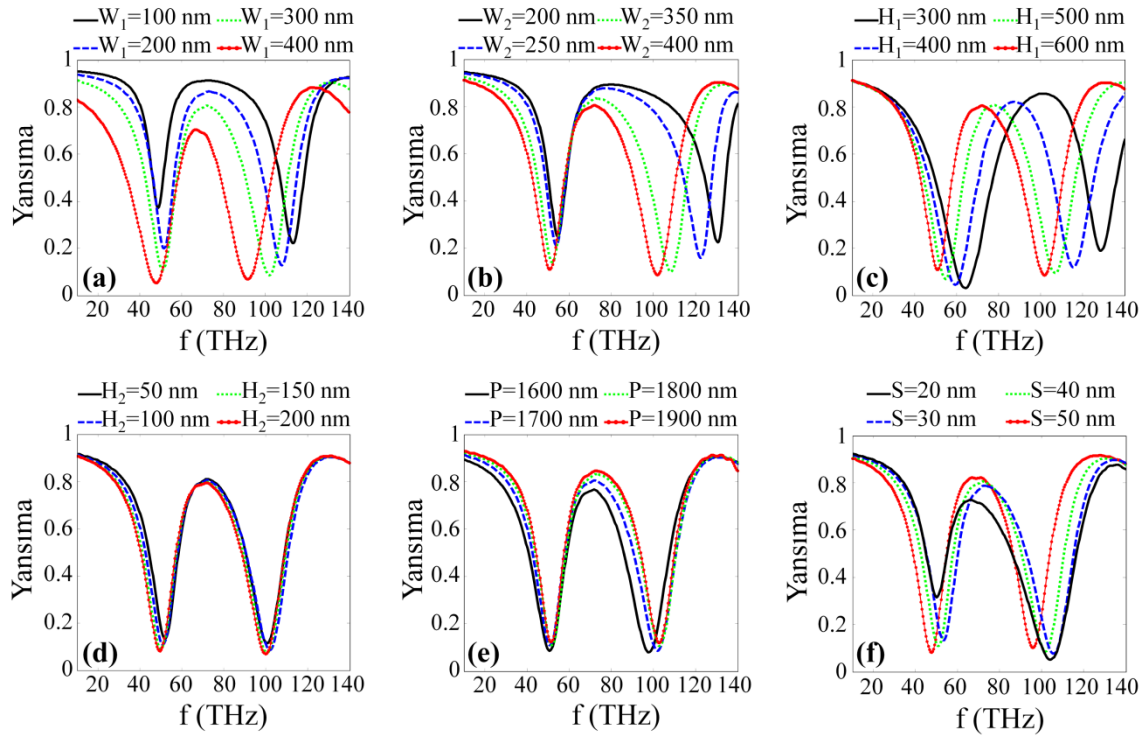
Önerilen dikdörtgen fraktal şekilli nanoaçıklık dizisinin birim hücresi için şematik gösterim Şekil 3.51a'da verilmektedir. İlgili şekil, aydınlatma kaynağını da içermektedir. Yapının geometrik parametreleri; merkezi açıklığın genişlik ve uzunluğu olan C_1 ve C_2, 1. iterasyon dikdörtgen açıklıkların genişlik ve uzunluğu olan W_1 ve H_1, 2. iterasyon dikdörtgen açıklıkların genişlik ve uzunluğu olan W_2 ve H_2, dikdörtgen açıklıkların geometrik girişim miktarı olan S, fraktal açıklıkların dizi periyotları P_x ve P_y, SiN_x zar kalınlığı t_d, Ti katman kalınlığı t_{Ti} ve Au katman kalınlığı t_{Au} olarak tanımlanmaktadır. Düğümler, yani açıklıkların girişim yaptığı bölgeler 1. mertebe düğümler (fraktal merkezine yakın olan) ve 2. mertebe düğümler (fraktal merkezinden uzak olan) olarak tanımlanmaktadır. Yapının *x*- ve *y*-kutuplu aydınlatma kaynakları altındaki yansıma ve geçiş spektrumları da Şekil 3.51b,c'de verilmektedir. Şekil 3.51b'deki spektral cevaplara göre ilgili nanoaçıklık anten dizisi, tek bir platformda ikili analit algılamayı mümkün kılan, f_1 = 50.6 THz (λ_1 = 5928.9 nm) ve f_2 = 101.8 THz (λ_2 = 2947 nm) frekanslarında ikili rezonant davranışa sahiptir.

y-kutuplu aydınlatma altında her iki rezonant mod da kuvvetli yansıma karakteristikleri sergilemektedir. *x*-kutuplanma altında ise (Şekil 3.51c), *E*-alan daha uzun ayrıtların olduğu eksene dik olduğundan, yayılan modlar desteklenmemekte ve geçiş azalmakta dolayısıyla da aydınlatma kutuplanması yapının spektral cevabını değiştirmektedir [160]. Bu durumda rezonans frekansları, f_1 = 53.1 THz (λ_1 = 5641.6 nm) ve f_2 = 113.1 THz (λ_2 = 2650.5 nm)'dir. Açıklıklar içinde ya da metal katman kenarında yerelleşen, dik kutuplu modlar oluşmaktadır. Bu nedenle önerilen nanoantenlerin geometrisine bağlı olarak E-alan, *x*- ve *y*-kutuplu aydınlatma altında, farklı boşluklar ve farklı keskin metal kenarlar ile yüzleşecektir. Böylece simetrik ve anti-simetrik SPP mod türleri uyarılacak ve farklı yayılma sabitleri sergileyeceklerdir [160]. *y*-kutuplu aydınlatma altında ilgili nanoanten bakımından W_1'e ve simetrik yük dağılımlarına bağlı olarak keskin kenar ve metal kol uzunluğu farkları ve böylece benzer ikili pikler oluşmaktadır (Şekil 3.51b). *x*-kutuplanma altında ise H_1 metal kol uzunluğunu, açıklık miktarını ve keskin kenar koşulunu değiştirmekte ve sonuç olarak anti-simetrik yük dağılımları oluşmaktadır. Bu da Şekil 3.51c'de görüldüğü gibi rezonant modların farklı olmasına neden olmaktadır.

Nümerik analizlerde, sistem 10-140 THz frekans sahası için düzlem dalga ile uyarılıp, *x*- ile *y*-doğrultusunda periodik sınır koşulları seçilmiştir; aydınlatma doğrultusu olan *z*-doğrultusunda da eksenlerde mükemmel şekilde uyumlu katmanlar seçilmiştir. Au ve Ti dağınım verisi Palik (1985) [3]'ten alınmış olup SiN_x gerçel kırılma indisi 2.14 olarak alınmıştır. Düzgün 0.3 nm'lik minimum hücre ayarları kullanılmıştır. Aksi belirtilmedikçe analizler, *y*-kutuplanma altında ve C_1 = 100 nm, C_2 = 100 nm, H_1 = 600 nm, W_1 = 300 nm, H_2 = 100 nm, W_2 = 400 nm, S = 20 nm, P = 1700 nm, t_d = 100 nm, t_{Ti} = 5 nm ile t_{Au} = 30 nm geometrik parametreleri için yapılmıştır.

Önerilen yapının spektral cevabında iyi bir akort mekanizması elde edebilmek için bir dizi nümerik çalışma yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 3.52'de sunulmaktadır. C_1 ve C_2 değişimleri de analiz edilmiştir ve C_1 ile C_2 artışı yansımayı çok az değiştirdiği için, burada sunulmamıştır. Plazmonik etkileşimi yüksek tutmak için merkezi açıklığın küçük tutulması gerektiğinden [165] C_1 ile C_2 değerleri olabildiğince küçük tutulup C_1 = C_2 = 100 nm olarak seçilmiştir. Şekil 3.52a W_1 değişimi için elde edilen spektral yansımaları göstermektedir. W_1 artışı ile tüm modlardaki yansıma azalmakta ve

W_1 = 100 nm değeri haricinde her iki rezonant modda da kırmızıya kayma olmaktadır. Bunun nedeni *E*-alana dik ayrıtların uzaması ve açıklık alanının artmasıdır. Bunun 2. mod üzerindeki etkisi daha fazladır; daha düşük dalga boyunda ayrıtlardaki değişim, daha büyük etki oluşturmaktadır. Benzer olarak W_2 değişimi de yansımayı azaltmakta ve rezonanslarda kırmızıya kayma meydana getirmektedir (Şekil 3.52b). Yine bu etki 2. modda daha belirgin olarak gözlenmektedir. Bu iki parametre değişiminde de açıklık alanı genişlemekte ve iletilen dalga kılavuzu modları daha fazla desteklenmektedir.

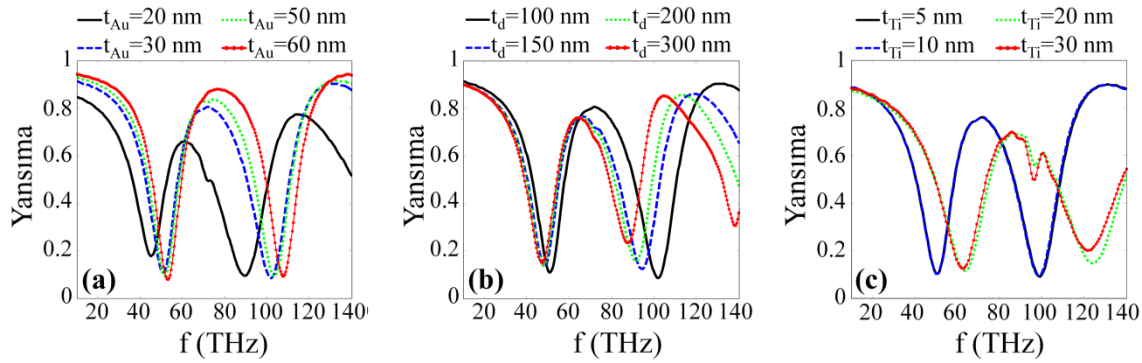


Şekil 3.52. Önerilen nanoaçıklık dizilerinin **(a)** W_1 değişimi, **(b)** W_2 değişimi, **(c)** H_1 değişimi, **(d)** H_2 değişimi, **(e)** P değişimi ve **(e)** S değişimi için yansıma spektrumları.

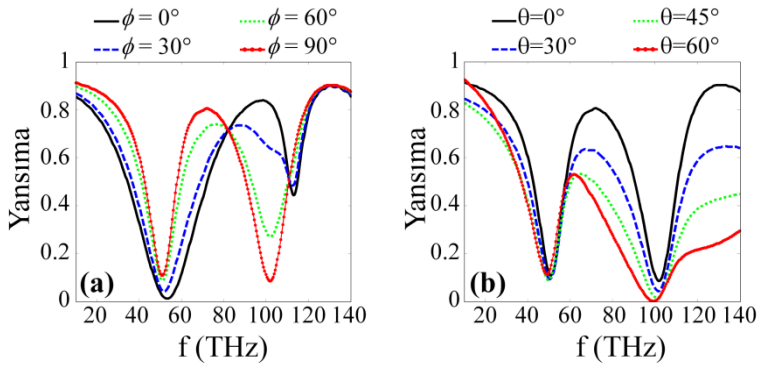
H_1 parametresi yansıma spektrumunu belirgin biçimde etkilerken (Şekil 3.52c), H_2 parametresinden kaynaklanan değişim çok daha azdır (Şekil 3.52d). H_1 değişimi ile her iki rezonant mod da daha uzun dalga boyuna kaymaktadır. 1. iterasyon açıklık alanına bağlı olarak H_1 artışı, 1. moddaki yansımayı arttırırken 2. moddakini azaltmaktadır (Şekil 3.52c). Benzer olarak, 2. iterasyon açıklık alanına bağlı olarak, H_2 artışı tüm modlarda yansımayı azaltmakta ve H_2 = 50 nm haricinde modlarda kırmızıya kayma meydana getirmektedir (Şekil 3.52d). Şekil 3.52e'de gösterildiği gibi, nanoanten dizilerinin periodundaki ($P = P_x = P_y$) artış, 2. modda daha belirgin olmak üzere

yansımayı arttırmakta ve rezonanslarda maviye kayma görülmektedir. Dikdörtgen nanoaçıklıklar arası düğüm bölgeleri de plazmonik etkileşimi yüksek tutmak için eşdeğer ve küçük tutulmuştur (Şekil 3.51a). Bu düğümlerdeki geometrik girişim miktarı olan *S* parametresi artışı ise yansımayı azaltmaktadır (Şekil 3.52f).

Metal ve dielektrik katman kalınlıkları da önerilen nanoanten yapısının spektral davranışı üzerinde etkili olan parametrelerdir. Bu bağlamda yapılan analizler Şekil 3.53'de sunulmaktadır. Au katman kalınlığının, 30 nm < t_{Au} < 60 nm aralığındaki artışı rezonanslarda maviye kayma sağlamakta ve ikili modların yansımalarını düşürmektedir (Şekil 3.53a). SiN_x zar kalınlığı t_d, 100 nm < t_d < 300 nm aralığında arttıkça da rezonanslar kırmızıya kaymakta ve yansıma azalmaktadır (Şekil 3.53b). Ti katman kalınlığının, 5 nm < t_{Ti} < 30 nm aralığındaki artışı ise yapının ikili spektral cevabını bozmaktadır (Şekil 3.53c).



Şekil 3.53. Önerilen nanoanten dizisinin farklı malzeme kalınlıkları için yansıma spektrumları; **(a)** t_{Au} değişimi, **(b)** t_d değişimi ve **(c)** t_{Ti} değişimi.

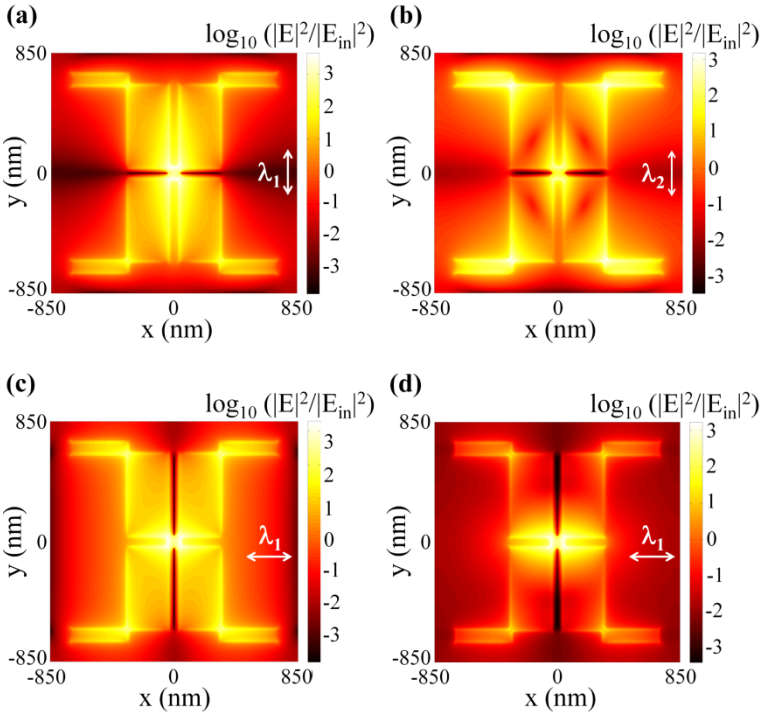


Şekil 3.54. Önerilen nanoanten dizisinin farklı **(a)** polarizayon ve **(b)** geliş açıları için yansıma spektrumları.

Tek bir dikdörtgen açıklık, aydınlatma kaynağının kutuplanmasına bağlı olarak farklı modlar destekler [166]. Eğer aydınlatma kaynağı *x*-kutuplu ise *E*-alan, açıklığın kısa ekseni boyunca (açıklığın uzun eksenine dik) yerelleşecektir. *y*-kutuplu kaynak altında da *E*-alan, açıklığın uzun ekseni boyunca (açıklığın kısa eksenine dik olarak) yerelleştirilecektir. Böylece bu sistem için *y*-kutuplanma durumunda *E*-alan, açıklığın kısa eksenine dik olduğundan yayılan modlar desteklenecektir [160]. Yapının kutuplanma bağımlılığını belirlemek amacıyla, dik geliş için ($\theta = 0°$) farklı kutuplanma açıları ϕ için yansıma spektrumları analiz edilmiştir. $\phi = 0°$'dan (*x*-kutuplanma) $\phi = 90°$ (*y*-kutuplanma)'e kadar olan kutuplanma açısı değişimi (Şekil 3.54a), yapının 2. modunu çok daha belirgin bir biçimde maviye kaydırmaktadır çünkü bu değişim ile *E*-alanın etkileştiği ve *E*-alana dik olan etkin açıklık boyutu (uzunluğu) azalmaktadır. Bu nedenle λ_2 için ϕ değişimi plazmonik ile dalga kılavuzu modlarını daha farklı desteklemekte ve yansıma azalıp geçiş artmaktadır. Bu sonuçlar dikdörtgen fraktal nanoaçıklıklar olarak tasarlanan bu nanoyapının kutuplanma bağımlı olduğunu göstermektedir. Kare şekilli veya iki eksende aynı özellikleri taşıyan orjine göre simetrik yapıların spektral davranışı *U#1*, *U#2*, *U#3* ve *U#4* çalışmalarındaki gibi aydınlatma kaynağının kutuplanmasından bağımsız olacaktır. Eğik geliş durumunda ($\theta \neq 0°$), nanoyapının sergilediği spektral değişimler spektral davranış analizleri için önemli olabilir. Nanoaçıklık dizisinin farklı θ geliş açıları için yansıma spektrumları Şekil 3.54b'de verilmektedir. θ arttıkça rezonanslar kırmızıya kaymakta ve yansıma düşmektedir. Çünkü eğik geliş açısı büyüdükçe *E*-alanın z-ekseniyle de etkileşimi oluşmakta, dolayısıyla *E*-alanın etkileştiği etkin uzunluk artmaktadır. Elde edilen sonuçlar 2. yansıma pikinin daha çok etkilendiğini göstermektedir. Bu da devreye giren (sistem şematiğine göre dik) uzunlukların, *xy*-düzlemindeki ayrıt uzunluklarına göre daha kısa oldukları için, daha kısa dalga boyları (daha yüksek frekanslar) ile etkileşmesinin sonucudur. Sonuç olarak bu nanoyapı aydınlatma kaynağının geliş açısına bağımlıdır.

Yapının her iki modu için de SEIRA güçlendirmelerinin konumsal haritaları Şekil 3.55'de gösterilmektedir. *y*-kutuplanma durumunda, hava-metal arayüzünde gözlenen ve yayılma yönünde şiddeti azalan, oldukça yüksek SEIRA güçlendirmeleri; bu frekanslar için *xy*-düzlemi üzerinde elde edilmektedir. Her iki kutuplanma için de; 1. modda (λ_1), ışık çoğunlukla 1. mertebe düğüm bölgelerinde yoğunlaşmaktadır

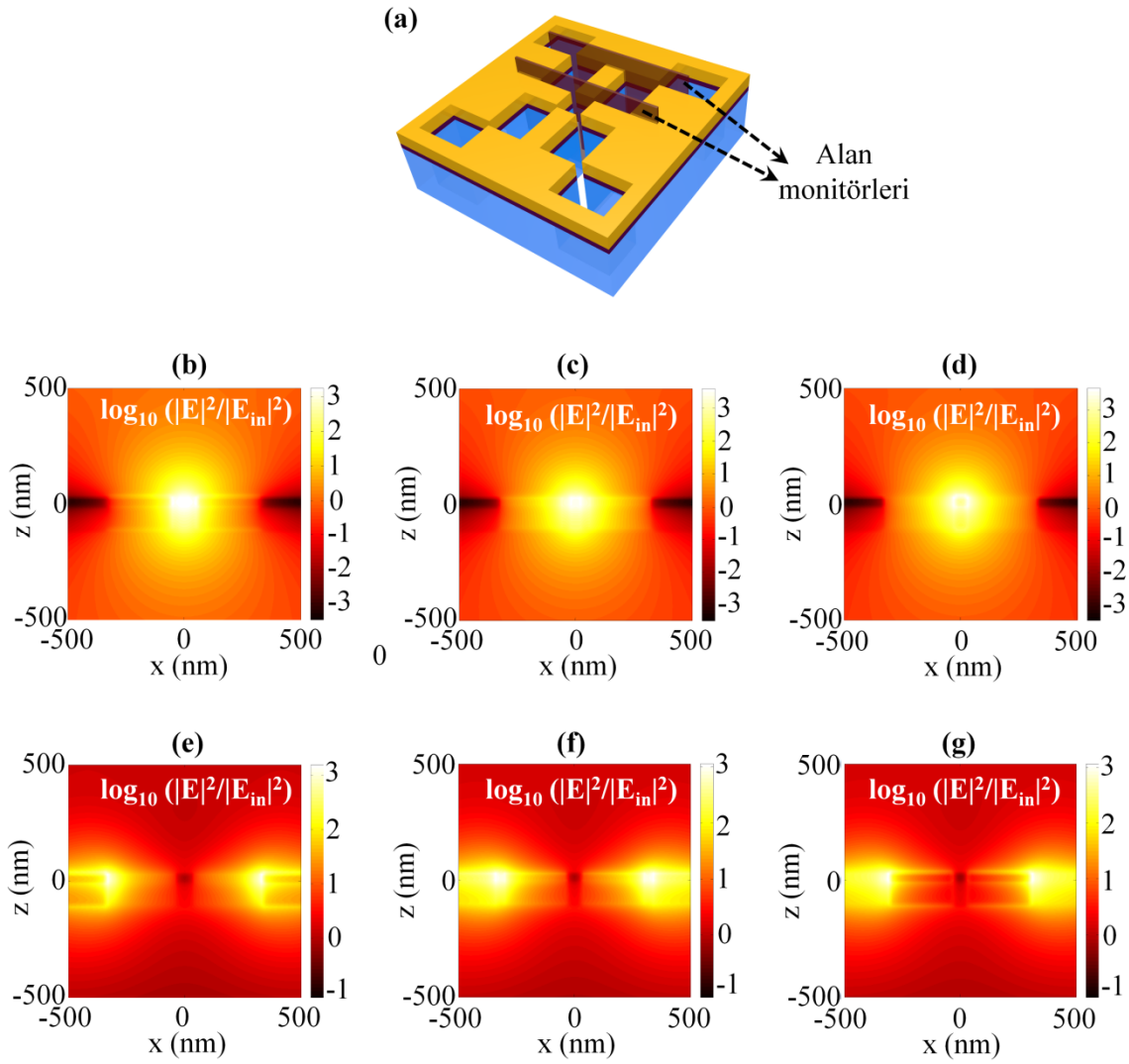
(Şekil 3.55a,c). İkinci moddaki (λ_2) alan şiddetleri, 2. mertebe düğüm bölgelelerinde yerelleştirilmektedir (Şekil 3.55b,d). Ayrıca tüm modlarda, önerilen yapı hem LSPP'leri hem de yayılan dalgakılavuzu modlarını desteklemektedir. 2. rezonant mod, yayılan dalga kılavuzu modlarını daha çok desteklemekte böylece ışığın antenden iletimi daha fazla olmakta ve SEIRA güçlendirmesi ilk moda göre zayıflatılmaktadır. Rezonant modları daha uygun olan *y*-kutuplanma durumunda, alan güçlendirmeleri literatürdeki Hilbert fraktal açıklığına [84] (~670 kat) göre daha fazladır (f_1 için ~4720 kat ve f_2 için ~1570 kat (Şekil 3.55a,b).



Şekil 3.55. *y*-kutuplu aydınlatma altındaki **(a)** 1. mod ile **(b)**2. mod için ve *x*-kutuplu aydınlatma altındaki **(c)** 1. mod ile **(d)** 2. mod için logaritmik SEIRA güçlendirmeleri.

x-kutuplanma durmunda, *E*-alanlar metal-dielektrik arayüzünde yerelleştirilmektedir. 1. modda (f_1=53.1 THz, λ_1=5641.6 nm), alan yoğun nokta yerelleştirmesi, *E*-alana diktir. Yapıdaki dik boyutlar daha uzundur bu nedenle hapsedilen enerji 1. ve 2. mertebe düğüm bölgeleri arasında paylaşılmaktadır (Şekil 3.55c). Bundan dolayı yansıma düşmekte ve geçiş yükselmektedir. Hava-metal arayüzünde SEIRA güçlendirmesi ~1920 kattır. *x*-kutuplanma durumunun 2. modunda (f_2=113.1 THz, λ_2=2650.5 nm), *E*-alana dik boyutlar daha uzundur ve plazmonik etkileşimler iletim daha az olduğundan yansıma ile geçiş düşmektedir. SEIRA güçlendirmesi ise ~1740 kattır (Şekil 3.55d). Bu

ise ikili rezonanslar ve daha iyi alan yerelleştirmesi, nanoyapının *y*-kutuplanma durumunu tercih edilebilir kılmaktadır.



Şekil 3.56. (a) Alan monitorü gruplarının yerleşkeleri. **(b)** y = 30 nm, **(b)** y = 40 nm ile **(d)** y = 50 nm'deki monitörlerden 1. mod için alınan **(e)** y = 610 nm, **(f)** y = 620 nm ile **(g)** y = 630 nm'deki monitörlerden 2. mod için alınan konumsal SEIRA güçlendirmeleri.

Alan yoğun nokta konumlarının kontrolü algılama uygulamaları için önemlidir. Eğer alan yoğun nokta konumu, biyomolekül ile hapsedilmiş ışığın etkileşimini arttırırsa algılama işlemi daha kalitatif olacaktır ve algılamada sensör hassasiyeti artacaktır. Şekil 3.56, FDTD dikey alan monitörlerinden elde edilen SEIRA güçlendirmelerini göstermektedir. Yapının kesitindeki EM alan dağılımını veren dikey monitör konumları da Şekil 3.56a'da şematik olarak gösterilmektedir. Altı farklı alan monitörü, üst 1.

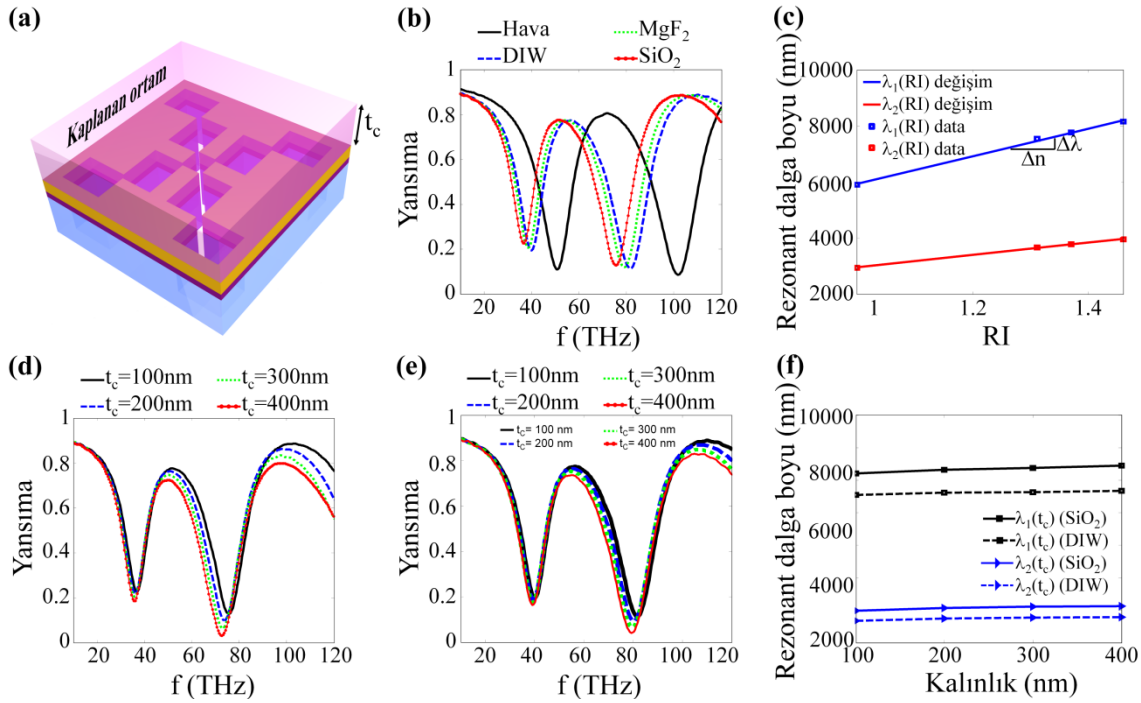
mertebe düğüm bölgesi çiftinde (y = 30 nm, 40 nm ve 50 nm) ve üst 2. mertebe düğüm bölgesi çiftinde (y = 610 nm, 620 nm ve 630 nm) konumlandırılmıştır. Şekil 3.56b-d, y-kutuplanma durumu için 1. moddaki (f_1 = 50.6 THz, λ_1 = 5928.9 nm) dağılımları sunmaktadır. Şekil 3.56e-g ise y-kutuplanma durumu için 2. moddaki (f_2 = 101.8 THz, λ_2 = 2947 nm) dağılımları sunmaktadır. 1. modda (λ_1) ~4720 kat güçlendirilmiş ışık 1. mertebe düğüm bölgesinde dikey metal kolun kenarında, Au ve Ti katmanlar boyunca yoğunlaşmıştır (Şekil 3.56b-d). İkinci modda (λ_2) ise ~1570 kat güçlendirilmiş ışık 2. mertebe düğüm bölgesi içinde Au ve Ti katmanlar boyunca yerelleştirilmiştir (Şekil 3.56e-g). Bu alan dağılımlarından görüldüğü gibi yerelleştirilmiş ışık metal katman boyunca yoğunlaşmıştır.

Tasarlanan açıklık tabanlı algılama platformunun algılama kapasitesini göstermek için, anten yapısı farklı kırılma indisli dielektrik malzemeler içinde analiz edilerek hassasiyet ve spektral akort karakteristiği analiz edilmiştir. Bu malzemeler DIW (n = 1.312) [166], SiO_2 (n = 1.46) ve MgF_2 (n = 1.37) [167,168]. İlgili nanoyapı için eşitlik (3.4) ile tanımlanan doğrusal kırılma indisi hassasiyeti, çevresel ortamın kırılma indisi değişimine karşı oluşan LSPR cevabı incelenerek belirlenmektedir. Bu EM modellemede antenler, çevresel ortam metal katmandan t_c = 100 nm yukarıda kalacak şekilde ortam içine gömülüp (Şekil 3.57a), farklı çevresel kırılma indisleri için ilgili nanoanten dizisinin yansıma spektrumları belirlenmiştir. Şekil 3.57b'deki sonuçlara göre artan çevresel kırılma indisi rezonanslarda kırmızıya kayma sağlamaktadır. Kırılma indisi hassasiyeti algılama performansını ölçmek için kullanılmaktadır. İlgili nanoanten sisteminin kırılma indisi hassasiyetini analiz etmek için, her iki rezonant mod için de hesaplanıp kırılma indisi değişimine karşı rezonant dalga boyu değişimi belirlenmiştir ve lineer bir bağıntı elde edilmiştir (Şekil 3.57c). Buna göre nanoyapının kırılma indisi hassasiyeti, 1. mod için 4943.1 nm RIU^{-1} ve 2. mod için 2214.2 nm RIU^{-1} olarak belirlenmiştir. Bu lineer bağıntılar etiketsiz algılama uygulamaları için önemlidir [49] ve tasarlanan algılama platformu her iki rezonant mod için de algılama doğrusallığını sağlamaktadır. Her iki rezonant mod için çevresel ortam kalınlığının etkisi de belirlenip Şekil 3.57d-f'de sunulmaktadır. Bu şekiller çevresel ortam kalınlığının spektral davranışa etkisini göstermektedir. Farklı kalınlıklardaki (t_c) çevresel ortam içinde SiO_2 (Şekil 3.57d) veya DIW (Şekil 3.57e), kalınlık arttıkça her iki modda da rezonans frekansı kırmızıya kaymakta ve yansıma düşmektedir. Çevresel ortam türüne göre de

farklı sabit kalınlık hassasiyeti vermektedir. Nanoyapının çevresel ortam kalınlık hassasiyeti ilgili kalınlıktaki rezonant dalga boyu hem SiO_2 (Şekil 3.57f; düz çizgi) hem DIW (Şekil 3.57f; kesikli çizgi) için belirlenerek;

$$S = \Delta\lambda/\Delta t_c \tag{3.5}$$

formulü [132] ile hesaplanmıştır ve 1. mod (Şekil 3.57f; kare damgalı siyah çizgiler) için sabit 0.4834 ile 2. mod (Şekil 3.57f; üçgen damgalı mavi çizgiler) için sabit 0.3198 olarak belirlenmiştir. İki molekülün aynı anda algılanması bazı durumlarda daha doğru algılamayı sağlayabilir. Algılama platformunun rezonansları iki hedef molekülün titreşim modlarıyla örtüştüğünde aynı anda algılama sağlanabilir. Sonuç olarak iki farklı dielektrik çevresel ortam için, her iki rezonant modda da ayrı ayrı, aynı sabit kalınlık hassasiyeti; bir algılama platformu için, ikili IR titreşim moduna sahip bir molekülü ya da iki farklı molekülü algılamada avantaj sağlayan bir sensör parametresi olabilir. Sonuç olarak önerilen dikdörtgen fraktal şekilli nanoaçıklık dizileri ikili rezonanslara, yüksek yakın alan yerelleştirmesine ve sabit hassasiyet karakteristiklerine bağlı olarak yeni bir etiketsiz (label-free) algılama platformu için yeni bir yol açmaktadır.



Şekil 3.57. (a) Farklı dielektrik malzemeler ile kaplanmış nanoaçıklık dizisinin şematik görünümü. Yapının **(b)** hava, DIW, MgF_2 ile SiO_2 için yansıma spektrumları ve **(c)** kırılma indisi hassasiyeti. Farklı **(d)** SiO_2 ve **(e)** DIW kalınlıkları için yansıma spektrumları. **(f)** SiO_2 ve DIW için t_c hassasiyeti.

4. BÖLÜM
ÜRETİLEN NANOANTEN DİZİLERİ İLE YAPILAN BİYOLAGILAMA UYGULAMALARI

4.1. Giriş

Optik antenler, düşük konsantrasyonlardaki hedef moleküllerin moleküler titreşim sinyallerini arttırarak bu molekülleri tanımlamada ve numunenin kimyasal bileşimini araştırmada elverişli bir teknoloji sunmaktadır [44]. Bununla birlikte, moleküler türün varlığının (veya yokluğunun) belirlenmesi için farklı titreşim modlarının verimli olarak tespiti, birkaç mikrometrelik bir pencerede birden fazla bandı sorgulamayı gerektirir. Özellikle biyomoleküller için bilgilendirici parmak izi spektrumları, genellikle MIR frekans sahasındadır. Birçok nanoanten çift-kutuplu tabiatlarından dolayı dar-bant rezonant modlara sahip olup çoklu algılama uygulamaları için uygun değildir.

Bu tez çalışmasında üretilen fraktal plazmonik nanoanten dizilerinin çoklu-spektral biyoalgılama karakterinin belirlenmesi için PMMA *içerisindeki üç farklı moleküler titreşim bandı* ve *zar protein olan bakteriyorodopsinin on farklı moleküler titreşim bandı* algılanmaktadır. PMMA bazı organik bağları barındıran bir polimer olup döndürme yöntemi ile kolaylıkla anten üzerine kaplanabilir bir malzeme olduğundan antenlerin biyoalgılama potansiyeli anlamak için iyi bir numune olmaktadır. Bakteriyorodopsin (BR; bacteriorhodopsin) yani ışıkla aktive olan proton pompası Halobakteriyum bakterisinin hücre zarından elde edilen mor renkli zar proteinidir [129,130] ve nanoantenlerin, geniş bir frekans bölgesinde tek bir molekülü çoklu-spektral olarak algılama kapasitesini belirlemek amacıyla numune olarak kullanılmıştır.

Hedef molekülü metal yüzeye tutturmak için en iyi yollardan biri, özel bir antikor (biyotanıma molekülü) (Şekil G.11) kullanmaktır. Bu tekniğe immobilizasyon tekniği

adı verilmektedir. Antikorları yüzeye bağlama işlemi ise fonksiyonlandırma işlemi olarak adlandırılır. Ancak PMMA ve zar protein kullanıldığından immobilizasyon tekniği yerine her analit için analitleri nanoanten üzerine kaplamada farklı yöntem kullanılmaktadır:

- Biyoalgılaması yapılmak istenen PMMA çözelti farklı hızlarda döndürme ile antenler üzerine kaplanıp farklı kalınlıkta PMMA tabakalar elde edilmiştir. FTIR spektrumlarının elde edilebilmesi için anten dizisi üzerine farklı kalınlıkta PMMA kaplama işlemi 4 nm için 1/56, 4.6 nm 1/40, 5.4 nm için 1/32, 6.7nm için 1/20 ve 10 nm için 1/16 derişimlerde PMMA'in tolüen çözeltisi numune üzerine damlatılıp dönel kaplama ile kaplanmıştır. Her kaplama işleminin ardından PMMA katman kalınlıkları, bilinen PMMA optik parametreleri ile spektroskopik J. A. Woollam Co. VASE ellipsometre kullanılarak numune üzerindeki farklı bölgelerde ölçülmüştür ve elipsometri tarafından ortalama film kalınlığı için hata tahmin aralığı ± 0.05 nm olarak belirlenmiştir.
- Mor zar proteini bakteriyorodopsin ise 1/20 oranındaki sulu çözeltisi nanoanten dizileri üzerine damlatılıp kurutularak anten yüzeyine tek katman proteinden oluşan zar kaplanabilmiştir.

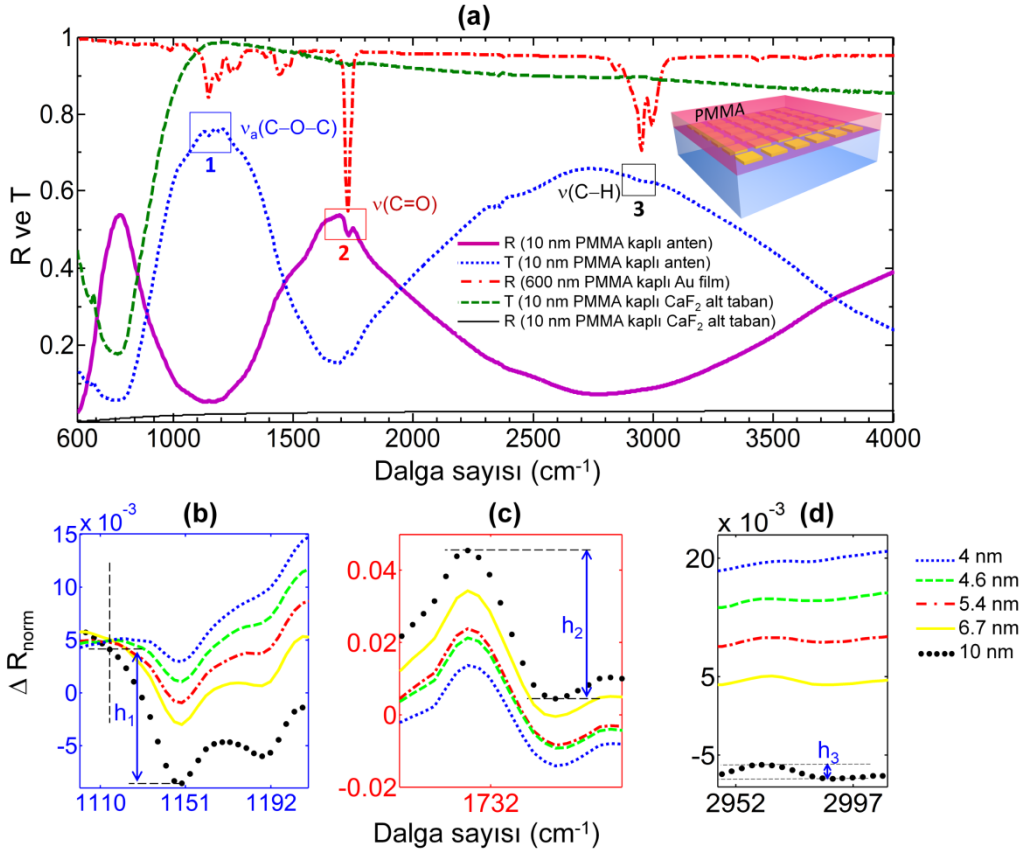
4.2. Biyosensör Uygulamaları

4.2.1. U#1'e Ait Algılama Sonuçları

4.2.1.1. PMMA İçerisindeki Moleküler Bağların Algılanması

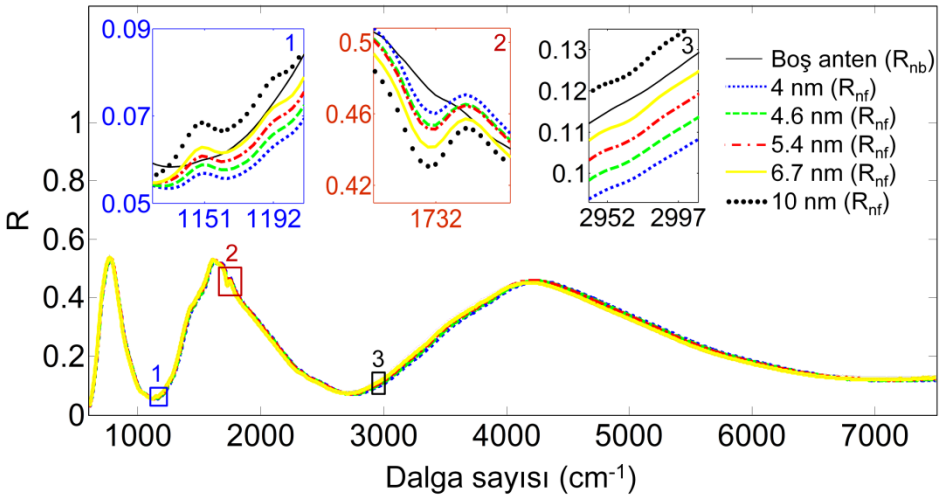
Teze özgü olarak literatüre sunulan *ters-Cesaro tip fraktal* nanoantenlerin (*U#1*) çoklu-spektral optik algılama potansiyelini belirlemek için 5. iterasyon anten yüzeyine kaplanmış ince PMMA filmlerin soğurma bantları ölçülmüştür. Kuvvetli soğurma bantları olan PMMA sırasıyla ester ν_a(C–O–C) antisimetrik germe modu, karbonil ν(C=O) germe modu ve ν(C–H) germe kombinasyon moduna bağlı olan 1150-1250 cm^{-1}, 1732 cm^{-1} ve 2952-2992 cm^{-1} bantlarıyla iyi karakterize edilebilir [169]. Şekil 4.1, 5. iterasyon ters-Cesaro tip nanoanten dizisi yüzeyine kaplanmış 10 nm kalınlıktaki PMMA nanokatmanının FTIR yansıma (kalın mor çizgi) ve geçiş (noktalı mavi çizgi) ölçümlerini göstermektedir. Ayrıca Şekil 4.1a sadece CaF_2 alt taban üzerine kaplanmış 10 nm kalınlıktaki PMMA katmanın yansıma (ince siyah çizgi) ve geçiş

(kesikli yeşil çizgi) spektrumlarını ve Au film üzerine kaplanmış 600 nm kalınlıktaki PMMA katmanın yansıma spektrumunu da içermektedir. Bu analiz için anten dizisi yüzeyine başta ayrı ayrı 4 nm, 4.6 nm, 5.4 nm, 6.7nm ve 10 nm'lik PMMA katmanlar kaplanmış olup 10 nm'lik katman için ölçülen sonuçlar temel alınmıştır. Şekil 4.1b-d, ayrı ayrı PMMA'in IR soğurma bantlarını göstermektedir. 1150-1250 cm^{-1} (Şekil 4.1b), 1732 cm^{-1} (Şekil 4.1c) ve 2952-2992 cm^{-1}'deki (Şekil 4.1d) tüm PMMA katman kalınlıkları için soğurma spektrumları normalize edilmiş yansıma olarak tanımlanmıştır. PMMA'deki karbonil germesi fraktal antenden yansıma verilerinin analizi için iyi karakterize edilmiş bir sistem sunmaktadır.



Şekil 4.1. *Ters-Cesaro tip nanoantenler*in PMMA'li çok-bantlı algılama konsepti. **(a)** 10 nm PMMA kaplı 5. iterasyon fraktal nanoantenlerin FTIR yansıma ve geçiş ölçümleri. Ayrıca 10 nm PMMA kaplı boş CaF_2 alt tabanın yansıma ile geçiş spektrumları ve 600 nm PMMA kaplı Au filmden ölçülen yansıma spektrumu. **(b)** 1150-1250 cm^{-1}, **(c)** 1732 cm^{-1} ve **(d)** 2952-2992 cm^{-1} bantları için yüzeyi farklı kalınlıktaki PMMA katmanlarla kaplı anten dizisinin ve boş anten dizisinin FTIR ile ölçülmüş ve büyütülmüş yansıma fark spektrumları.

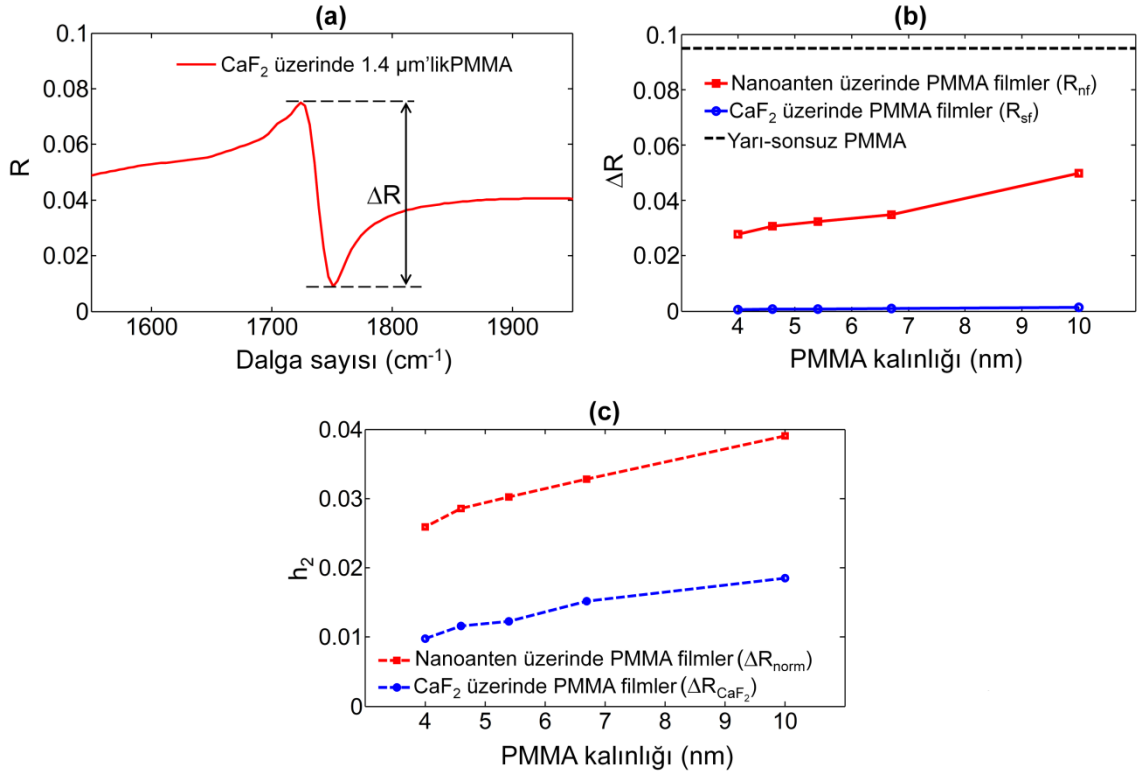
Moleküler soğurma kesit alanı, soğurucu konsantrasyonu ve film kalınlığı ile doğrudan orantılıdır. CaF_2 üzerindeki anten ve farklı kalınlıktaki PMMA filmleri dikkate alarak bu tanımlamayı alt taban üzerindeki fraktal antenlere adapte etmek, ince film etkin ortam yaklaşımı [124] kullanılarak çözüm olabilir. O halde fraktal anten yüzeyindeki PMMA filmin normalize yansıma spektrumu olan R_{nf} ve CaF_2 alt taban üzerindeki boş fraktal antenin yansıma spektrumu olan R_{nb} arasındaki fark $\Delta R_{norm} \equiv R_{nf} - R_{nb}$ olarak hesaplanmaktadır. Şekil 4.1 değişen PMMA kalınlıkları için ΔR_{norm} grafiklerini göstermektedir. Bu fark spektrumları kırılma indisi değişimine bağlı olarak meydana gelen değişimleri göstermektedir. Şekil 4.2 ise değişen PMMA kalınlıkları için R_{nf} ve R_{nb} spektrumlarını, grafik içindeki ilgili PMMA bantları civarında büyütülmüş bölgeler için göstermektedir.



Şekil 4.2. Değişen PMMA kalınlıkları ile kaplı 5. iterasyon fraktal nanoantenlerin ve boş antenlerin FTIR yansıma spektrumları ve grafik içinde, söz konusu PMMA titreşim bantları için büyütülmüş frekans bölgeleri.

Yerel moleküler konsantrasyonla ilgili olan pik yükseltmesini belirlemek için önceki yöntemlerden biri yansıma spektrumunda maksimum ve minimum arasındaki frekans kaydırmalı farkın alınmasıdır [39,126]. Bu da kırılma indisi ile belirlenen frekans ölçeğindeki kaymayı kullanan ham verilerin dönüşümünü gerektirir. Burada alternatif ve doğrudan bir yaklaşım olarak, PMMA'den alınan normalize yansıma spektrum farkını [127] kullanan daha önce teorik ve deneysel çalışmalardan elde edilen muhafazakar bir yöntem kullanılmıştır. Bu yaklaşımda ise daha fenomenolojik bir

değerlendirme ölçütü olarak, ölçüm verilerinden elde edilen Şekil 4.1'deki pik yükseklikleri olan h_1, h_2 ve h_3 kullanılmıştır. Şekil 4.1b-d'den anlaşılacağı üzere h_1, h_2 ve h_3 değerleri PMMA katmanının kalınlığı arttıkça artmaktadır ve PMMA tabakaların üç soğurma bandının başarılı olarak algılanması üretilen yongalarla sağlanmaktadır.



Şekil 4. 3. Karbonil ν(C=O) germe modu civarındaki yansıma spektrumu değerlendirmeleri. **(a)** CaF_2 alt taban üzerine kaplı 1.4 μm kalınlıklı PMMA'den ölçülen FTIR yansıma spektrumu. **(b)** CaF_2 alt taban üzerine kaplı, farklı nano-ölçekli kalınlıktaki PMMA katmanların yansıma spektrumları için; nanoanten üzerinde kaplı farklı nano-ölçekli kalınlıktaki PMMA katmanların yansıma spektrumları için ve yarı-sonsuz PMMA ortamdan hesaplanan yansıma spektrumu için mak. ve min. yansıma değerleri arasındaki farklar. **(c)** CaF_2 alt taban üzerine kaplı farklı nano-ölçekli kalınlıktaki PMMA katmanların fark spektrumu için mak. ve min. değerler arasındaki fark ile nanoanten üzerinde kaplı farklı nano-ölçekli kalınlıktaki PMMA katmanların fark spektrumlarındaki H_2 değerleri karşılaştırması.

Ters-Cesaro tip nanoantenler özellikle karbonil ν(C=O) germe modunu yükseltmektedir (Şekil 4.1c). FTIR spektroskopi kullanılarak Au film üzerinde [124,125,170] ve geleneksel plazmonik yapılar üzerinde kaplı PMMA filmlerin karbonil germe bölgesi daha önce çalışılmıştır [39,126]. Şekil 4.1c'deki film kalınlığına bağımlılığı gösterilen h_2, *ters-Cesaro tip fraktal* anten için diferansiyel soğurma yükseltmesini göstermektedir.

10 nm'den ince PMMA kalınlıkları için bile PMMA'in kompleks dielektrik cevabının temel bir Lorentz-Drude osilatör modeliyle tanımlandığı etkin ortam yaklaşımı, literatürle uyumlu sonuçlar vermektedir. Model sadece geçiş spektrumlarını tanımlamayıp, külçe PMMA yüzeylerden yansıma spektrumunun da karakteristik şeklini belirlemektedir: İzole edilmiş bir titreşim bandı için kırılma indisi bandın yüksek dalga sayısı tarafında minimuma ve düşük dalga sayısı tarafında maksimuma sahiptir. Bu nedenle yansıma spektrumu önceki literatürle uyumlu olarak [124,125] 1. türeve benzemektedir (Şekil 4.3a). Şekil 4.3a'deki ΔR, ilgili frekans aralığında, yansıma spektrumundaki maksimum ve minimum değerler arasındaki farkı göstermektedir.

Külçe PMMA'in yansımasının maksimum ve minimum noktaları arasındaki fark ΔR, tamamen malzemenin kompleks dielektrik sabitine bağlıdır. İnce filmlerden yansıma olayında, soğurma ve girişim etkilerinin ikisine de bağlı olarak, film kalınlığı da etkilidir. EM geçiş, soğurma ve girişim tarafından belirlenir. Geçen şiddetin logaritması ile orantılı olan soğurma, moleküler konsantrasyonun doğrusal bir fonksiyonudur. Dolayısıyla, dalga boyundan daha küçük kalınlıklarda olan ve izole edilmiş ince bir film için h_2 parametresi, film kalınlığının doğrusal bir fonksiyonu olmaktadır. Fonksiyonun eğimi sadece malzeme parametrelerine ve gelen alan şiddetinden türetilen etkin *E*-alana bağlıdır. Bu da anten yapılarına bağlı olarak oluşan alan yükseltmesi ile karakterize edilebilir. 1732 cm^{-1} karbonil ν(C=O) germe modu, fraktal anten ile alan yükseltmesinin en yüksek olduğu frekansta etkileştiği için PMMA'in en çok bu soğurma modu yükseltilmektedir (Şekil 4.3b). CaF_2 alt taban üzerine kaplı farklı nano-ölçekli kalınlıktaki PMMA katmanların yansıma spektrumu olan R_{sf} için (daire damgalı mavi çizgi) ile nanoanten üzerinde kaplı farklı nano-ölçekli kalınlıktaki PMMA katmanların yansıma spektrumu olan R_{nf} için (kare damgalı kırmızı çizgi); Şekil 4.3b panelinde görüldüğü gibi karbonil ν(C=O) germe modu civarındaki maksimum ve minimum yansıma değerleri arasındaki farklar karşılaştırılmaktadır ve PMMA kaplı nanoanten için ΔR değerleri daha yüksektir. Bu, ters-Cesaro antenlerin SEIRA etkisinin sonucudur ve analitin ilgili titreşimsel modunun antenler yoluyla güçlendirildiğinin göstergesidir. Ayrıca karbonil ν(C=O) germe modu civarında, yarı-sonsuz PMMA ortamdan hesaplanan yansıma spektrumundaki maksimum ve minimum değerler arasındaki fark (siyah kesikli çizgi) 0.095 değerindedir. Şekil 4.3c panelinde ise ν(C=O) germe modu civarında, CaF_2 alt taban yansıma spektrumları (R_{CaF_2}) ile CaF_2 alt taban üzerine kaplı

farklı nano-ölçekli kalınlıktaki PMMA katmanların yansıma spektrumu R_{sf}'nin fark spektrumu $\Delta R_{CaF_2} = R_{sf} - R_{CaF_2}$ için maksimum ve minimum değerler arasındaki fark (daire damgalı ve kesikli mavi çizgi) ile nanoanten üzerinde kaplı farklı nano-ölçekli kalınlıktaki PMMA katmanların ΔR_{norm} fark spektrumlarındaki h_2 değerleri (kare damgalı ve kesikli kırmızı çizgi) karşılaştırılmaktadır. Sadece CaF_2 alt tabana göre nanoanten kaplı CaF_2 alt tabanın, bu modu daha fazla kuvvetlendirdiği gözlenmektedir. Bu da yine *ters-Cesaro tip nanoantenler*in SEIRA etkisinin sonucudur ve analitin ilgili titreşimsel modunu güçlendiren ve algılama hassasiyeti iyi olan bir yapı oluşturulduğunun göstergesidir.

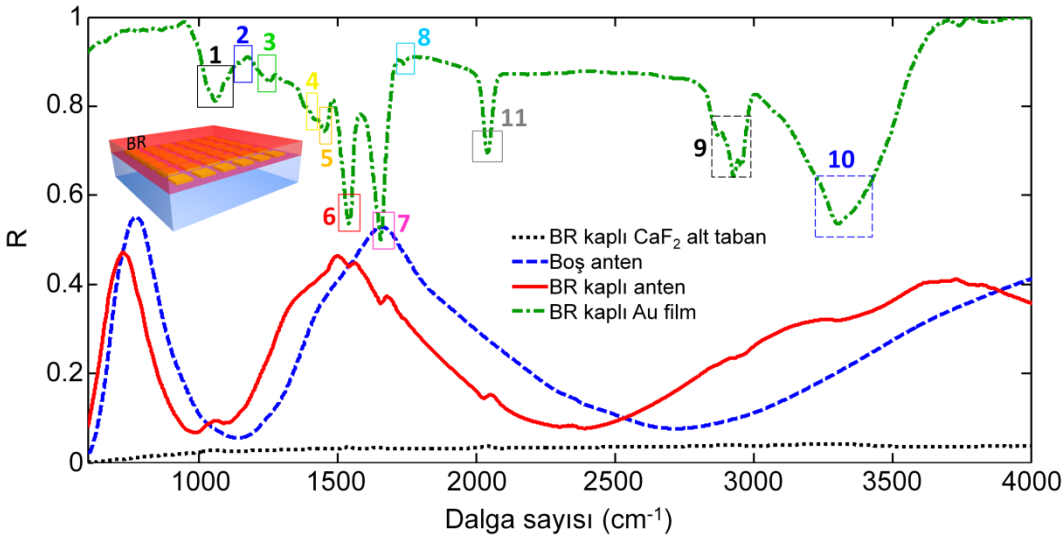
4.2.1.2. Bakteriyorodopsin Proteinin Algılama Sonuçları

Tablo 4.1. BR fonksiyonel gruplarına ait IR titreşim soğurma bantları ve sodyum azidin, azid (N_3) fonksiyonel grubuna ait IR titreşim soğurma bandı [129,130,171].

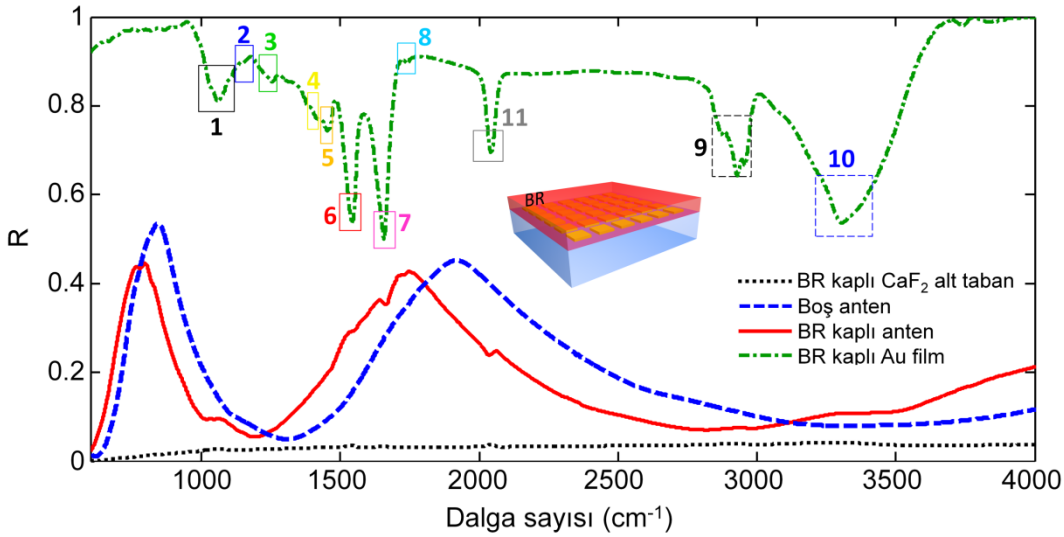
	Sıra	**Fonksiyonel grup**	**IR soğurma frekansı (cm^{-1})**
BR	1	P–O–C	1062
	2	Ester karbonil germe, CH_3	1167
	3	P=O germe	1235
	4	CO_2 germe	1415 zayıf
	5	CH_3 bükme	1457
	6	Amid II	1547
	7	Amid I	1661
	8	Ester karbonil germe, C=0	1740
	9	CH germeleri	2850 kuvvetli 2870 2929 2958
	10	Amid A	3310
Sodyum azid	11	Azid (N_3)	2150

Tez çalışmasının bu kısmında *ters-Cesaro tip nanoanten* dizileri (*U#1*) ile yapılan BR çözeltisinin içeridiği 10 farklı molekülün (BR çözeltisi fonksiyonel gruplarına) algılama uygulaması açıklanmaktadır. Bu bağlamda üretilen 5.iterasyon fraktal antenler ile yapılan algılama ölçüm sonuçları Şekil 4.4'de verilmektedir. Algılama deneyleri sırasında öncelikle BR'nin titreşim bantlarını gözlemlemek için Si alt taban üzerine elektron demet buharlaştırma ile 100 nm kalınlıkta Au film kaplanmış ve bu film üzerine saf su ile seyreltilmiş BR çözeltisi damlatılıp kurutularak ve böylece yonga üzerine ince BR zarı kaplanarak, FTIR yansıma ölçümü alınmıştır (Şekil 4.4 ve Şekil 4.5; noktalı ve kesikli yeşil çizgi). Bu yansıma sinyali üzerindeki pikler BR fonksiyonel gruplarına ait IR titreşim soğurma bantları ve çözelti içine başka bakterilerin türememesi için katılan sodyum azidin, azid (N_3) fonksiyonel grubuna ait IR titreşim soğurma bandıdır (Tablo 4.1). CaF_2 alt tabanın anten olmayan ancak BR kaplanmış kısımlarından alınan FTIR yansıma spektrumunda (Şekil 4.4 ve Şekil 4.5; noktalı ve kesikli yeşil çizgi) bu karakteristik soğurma bantları belirgin olarak gözlenememektedir. Birçok BR fonksiyonel grup soğurmaları bu anten ile belirgin olarak yükseltilmektedir ve geniş bir frekans sahası içinde tek bir spektral ölçümle belirlenebilmektedir (Şekil 4.4 ve Şekil 4.5; düz kırmızı çizgi). Yine bu değerlendirmede BR kaplı anten ölçümleri (Şekil 4.4 ve Şekil 4.5; düz kırmızı çizgi) ile boş anten ölçümleri (Şekil 4.4 ve Şekil 4.5; kesikli mavi çizgi) arasındaki spektral kayma da antenlerin kırılma indisi değişimine hassasiyetini vermektedir. Ayrıca BR kaplı CaF_2 alt tabanın ölçümleri (Şekil 4.4 ve Şekil 4.5; noktalı siyah çizgi) ile BR kaplı anten ölçümleri (Şekil 4.4 ve Şekil 4.5; düz kırmızı çizgi) dikkate alındığında BR fonksiyonel bantlarının anten ile daha fazla kuvvetlendirildiği görülmektedir. Bu da IR spektroskopisi yoluyla yapılan bu algılama deneyi ile BR'nin çoklu-spektral verilerle kalitatif olarak algılanmasını sağlamaktadır. İterasyon değişiminin aynı analit için algılama kapasitelerinin karşılaştırılması amacı ile, aynı CaF_2 alt taban üzerine üretilen 4. iterasyon fraktal antenlerin (*U#1*) de BR algılama ölçümleri yapılarak sonuçları Şekil 4.5'de sunulmaktadır. Au film üzerine damlatma yoluyla kaplanmış ince BR zarının FTIR yansıma spektrumundaki (Şekil 4.5 noktalı ve kesikli yeşil çizgi) karakteristik grup frekanslarında (Tablo 4.1), bu anten yoluyla da fonksiyonel grupların soğurma modları yükseltilmektedir (Şekil 4.5 kırmızı düz çizgi). Bu yine boş antenin FTIR spektrumunda (Şekil 4.5 kesikli mavi çizgi) oluşan *kayma ve çökmelerden* anlaşılmaktadır. Şekil 4.4 ve 4.5 'deki, BR kaplı, 5. iterasyon ve 4. iterasyon

ters-Cesaro tip nanoanten spektrumları (düz kırmızı çizgiler) karşılaştırıldığında 5. iterasyondaki anten dizisinin BR'nin fonksiyonel soğurma bantlarını daha çok kuvvetlendirdiği gözlenmektedir. Bunun en temel nedeni 5. iterasyon antende, 4. iterasyon antene göre, aynı tür rezonant modlarda daha fazla EM alan yükseltmesinin sağlanmasıdır. Yani SEIRA etkisi 5. iterasyon antende daha fazla oluşturulduğundan anten üzerine kaplanmış proteinin fonksiyonel soğurma modları bu iterasyondaki antenle daha fazla yükseltilmektedir.



Şekil 4.4. 5. iterasyon *ters-Cesaro tip nanoantenler* ile BR'nin algılanması.

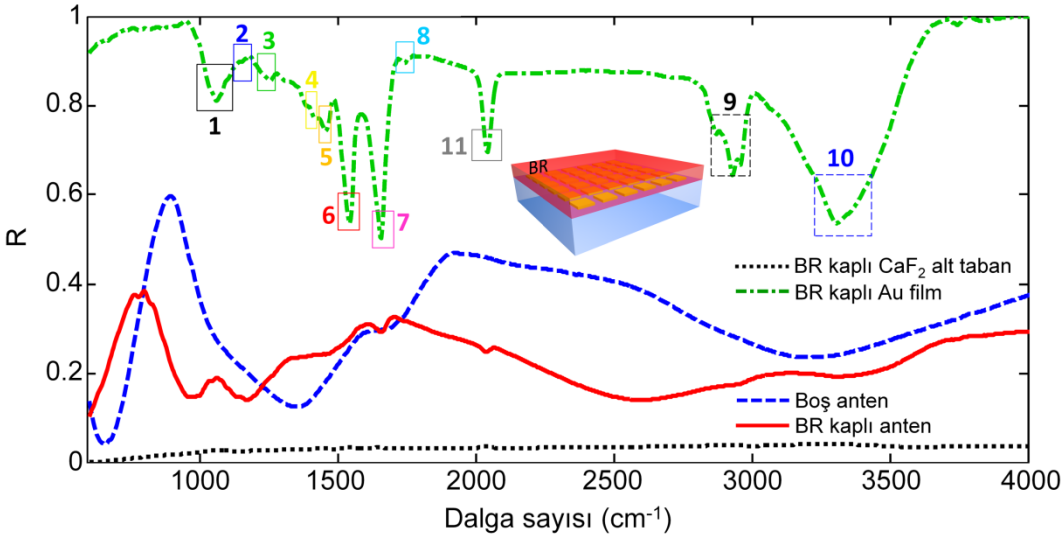


Şekil 4.5. 4. iterasyon *ters-Cesaro tip nanoantenler* ile BR'nin algılanması.

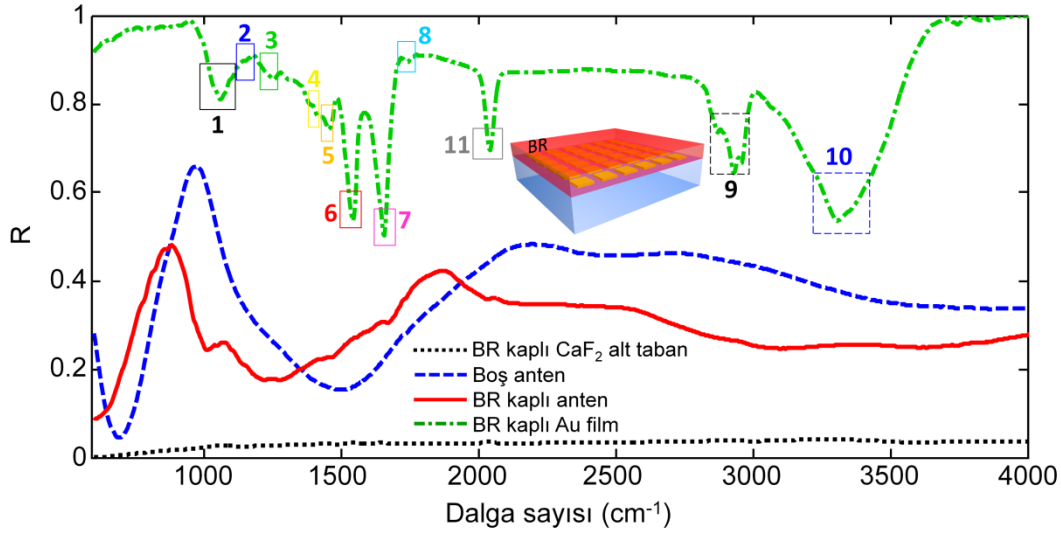
4.2.2. U#2'e Ait Algılama Sonuçları

Tez çalışmasının bu kısmında *Cesaro-1 tip nanoanten* dizileri (*U#2*) ile yapılan BR algılama uygulaması verilmektedir. Bu bağlamda, üretilen 4. iterasyon fraktal antenler ile yapılan algılama ölçüm sonuçları Şekil 4.6'de verilmektedir. *U#1* çalışmasının algılama deneyleri sırasında, BR'nin titreşim bantlarını gözlemlemek için Si alt taban üzerine elektron demet buharlaştırma ile 100 nm kalınlıkta kaplanmış olan ve üzerine saf su ile seyreltilmiş BR çözeltisi damlatılıp kurutularak ince BR zarı ile kaplanan Au filmin FTIR yansıma ölçümleri (Şekil 4.6; kesikli ve noktalı yeşil çizgi); bu deneylerde de dikkate alınmıştır. Yine bu yansıma sinyali üzerindeki BR fonksiyonel gruplarına ait IR titreşim soğurma pikleri ve çözelti içindeki sodyum azidin, azid (N_3) fonksiyonel grubuna ait IR titreşim soğurma bantları da (Tablo 4.1) şekil üzerinde verilmektedir. CaF_2 alt tabanın anten olmayan ancak BR kaplanmış kısımlarından alınan FTIR yansıma spektrumunda (Şekil 4.6; noktalı siyah çizgi) bu karakteristik soğurma bantları belirgin olarak gözlenememektedir. Birçok BR fonksiyonel grup soğurmaları bu BR kaplı antenler ile belirgin olarak yükseltilmektedir (Şekil 4.6; düz kırmızı çizgi) ve geniş bir frekans sahası içinde tek bir spektral ölçümle belirlenebilmektedir. Yine bu değerlendirmede BR kaplı anten ölçümleri (Şekil 4.6; düz kırmızı çizgi) ile boş anten ölçümleri (Şekil 4.6; kesikli mavi çizgi) arasındaki spektral kayma da antenlerin kırılma indisi değişimine hassasiyetini bağlıdır. Bu da IR spektroskopisi yoluyla yapılan bu algılama deneyi ile BR'nin çoklu-spektral verilerle kalitatif olarak algılanmasını sağlamaktadır. İterasyon değişiminin aynı analit için algılama kapasitelerinin karşılaştırılması amacıyla, aynı CaF_2 alt taban üzerine üretilen 3. iterasyon fraktal antenler (*U#2*) ile de BR algılama ölçümleri yapılarak sonuçları Şekil 4.7'de sunulmaktadır. Au film üzerine damlatma yoluyla kaplanmış, ince BR zarının FTIR yansıma spektrumunda (Şekil 4.7; noktalı ve kesikli yeşil çizgi) görülen karakteristik grup frekansları (Tablo 4.1); ince BR zarı kaplı bu anten dizisi yoluyla, BR kaplı CaF_2 alt tabana (Şekil 4.7 noktalı siyah çizgi) göre daha fazla yükseltilmektedir (Şekil 4.7 kırmızı düz çizgi). Bu yine boş antenin FTIR spektrumunda (Şekil 4.7 kesikli mavi çizgi) oluşan *kayma ve çökmelerden* anlaşılmaktadır. Şekil 4.6 ve 4.7 'deki BR kaplı 4. iterasyon ve 3. iterasyon Cesaro-1 tip anten (*U#2*) spektrumları (düz kırmızı çizgiler) karşılaştırıldığında; 4. iterasyondaki anten dizisi, BR'nin Tablo 4.1'deki; 3, 4, 5, 6, 7 ve 11 nolu fonksiyonel grupları daha fazla

kuvvetlendirirken, 3. iterasyondaki anten dizisi BR'nin 1, 4, 5, 6, 7 ve 11 nolu fonksiyonel soğurma modlarını daha çok kuvvetlendirdiği gözlenmektedir. Bu durum; analitin kırılma indisine bağlı olarak sonuçlanan kayma ile beraber oluşan rezonant modlarla, hangi fonksiyonel grubun örtüştüğü ile ilgilidir.



Şekil 4.6. 4. iterasyon *Cesaro-1 tip nanoantenler* ile BR'nin algılanması.

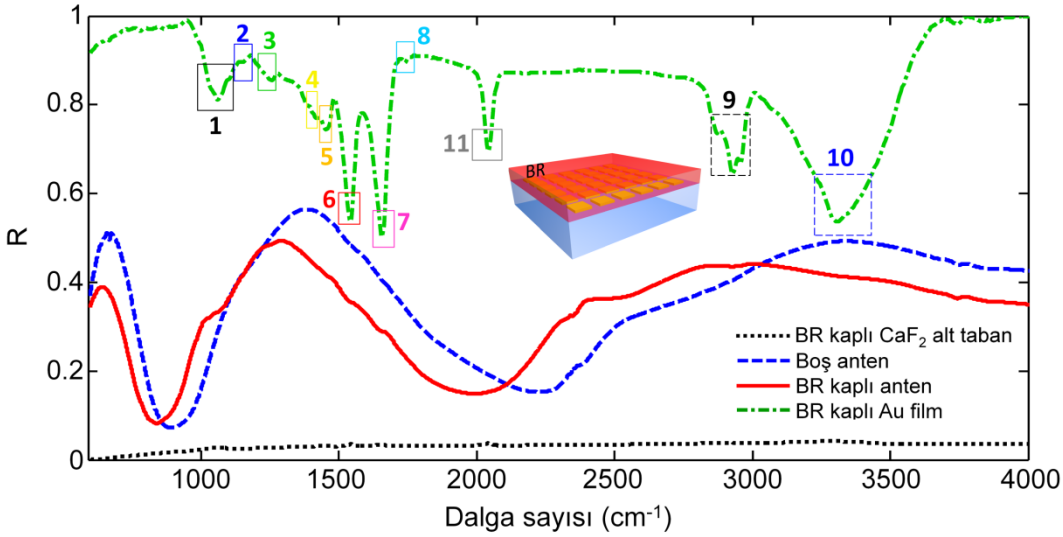


Şekil 4.7. 3. iterasyon *Cesaro-1 tip nanoantenler* ile BR'nin algılanması.

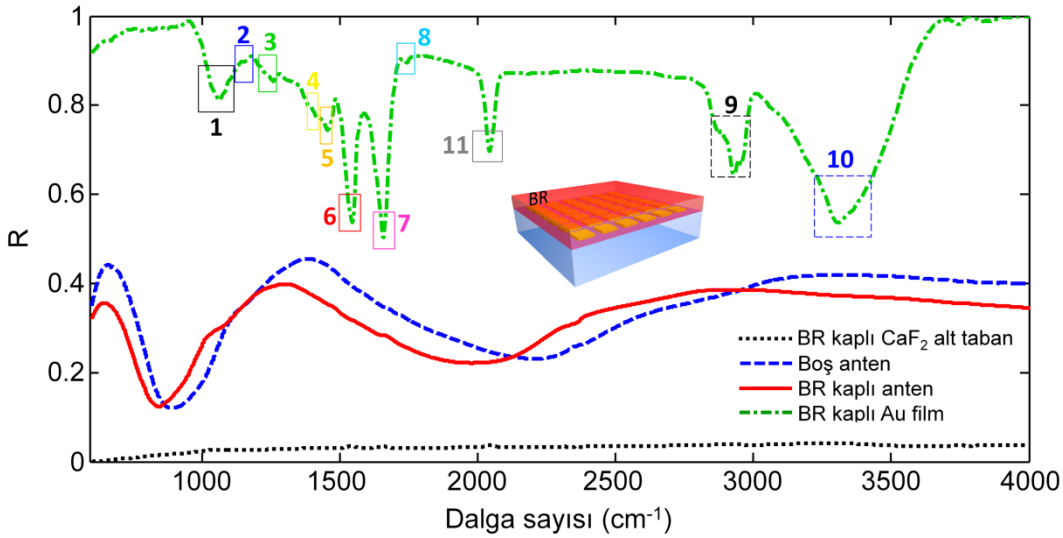
4.2.3. U#3'e Ait Algılama Sonuçları

Tez çalışmasının bu kısmında, *Cesaro-2 tip nanoanten* dizileri (*U#3*) ile yapılan BR algılama uygulaması açıklanmaktadır. Bu bağlamda, üretilen 4. iterasyon fraktal antenler ile yapılan algılama ölçüm sonuçları Şekil 4.8'de verilmektedir. *U#1* çalışmasının algılama deneyleri sırasında, BR'nin titreşim bantlarını gözlemlemek için Si alt taban üzerine elektron demet buharlaştırma ile 100 nm kalınlıkta kaplanmış olan ve üzerine saf su ile seyreltilmiş BR çözeltisi damlatılıp kurutularak ince BR zarı ile kaplanan Au filmin FTIR yansıma ölçümleri (Şekil 4.8; kesikli ve noktalı yeşil çizgi); bu deneylerde de dikkate alınmıştır. Yine bu yansıma sinyali üzerindeki BR fonksiyonel gruplarına ait IR titreşim soğurma pikleri ve çözelti içindeki sodyum azidin, azid (N_3) fonksiyonel grubuna ait IR titreşim soğurma bantları da (Tablo 4.1) şekil üzerinde verilmektedir. CaF_2 alt tabanın anten olmayan ancak BR kaplanmış kısımlarından alınan FTIR yansıma spektrumunda (Şekil 4.8; noktalı siyah çizgi) bu karakteristik soğurma bantları belirgin olarak gözlenememektedir. Birçok BR fonksiyonel grup soğurmaları, BR kaplı anten dizileri ile belirgin olarak yükseltilmektedir (Şekil 4.8; düz kırmızı çizgi) ve geniş bir frekans sahası içinde tek bir spektral ölçümle belirlenebilmektedir. Yine bu değerlendirmede BR kaplı anten ölçümleri (Şekil 4.8; düz kırmızı çizgi) ile boş anten ölçümleri (Şekil 4.8; kesikli mavi çizgi) arasındaki spektral kayma da antenlerin kırılma indisi değişimine hassasiyetini bağlıdır. Bu da IR spektroskopisi yoluyla yapılan bu algılama deneyi ile BR'nin çoklu-spektral verilerle kantitatif olarak algılanmasını sağlamaktadır. İterasyon değişiminin aynı analit için algılama kapasitelerinin karşılaştırılması amacıyla; aynı CaF_2 alt taban üzerine üretilen 5.iterasyon fraktal antenler (*U#3*) ile de BR algılama ölçümleri yapılarak sonuçları Şekil 4.9'de sunulmaktadır. Au film üzerine damlatma yoluyla kaplanmış, ince BR zarının FTIR yansıma spektrumunda (Şekil 4.9, noktalı ve kesikli yeşil çizgi) görülen grup frekansları (Tablo 4.1); ince BR zarı kaplı bu anten dizisi yoluyla, BR kaplı CaF_2 alt tabana (Şekil 4.9 noktalı siyah çizgi) göre daha fazla yükseltilmektedir (Şekil 4.9 kırmızı düz çizgi). Bu yine boş antenin FTIR spektrumunda (Şekil 4.9 kesikli mavi çizgi) oluşan *kayma ve çökmelerden* anlaşılmaktadır. Şekil 4.8 ve 4.9 'deki BR kaplı 4. iterasyon ve 5. iterasyon *Cesaro-2 tip nanoanten* (*U#3*) spektrumları (düz kırmızı çizgiler) karşılaştırıldığında; 4. iterasyondaki anten dizisi, BR'nin Tablo 4.1'deki; 1, 3, 5, 6, 7, 9 ve 10 nolu fonksiyonel grupları daha fazla kuvvetlendirirken 5. iterasyondaki anten

dizisinin fonksiyonel soğurma modlarını daha az kuvvetlendirdiği gözlenmektedir. Bu durum; 5. iterasyon antene göre, 4. iterasyon antenin rezonant yansımalarının daha yüksek olması ve fonksiyonel soğurma modlarına karşılık gelen frekanslarda daha yüksek alan kuvvetlendirmesi sağlamasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 4.8. 4. iterasyon *Cesaro-2 tip nanoantenler* ile BR'nin algılanması.



Şekil 4.9. 5. iterasyon *Cesaro-2 tip nanoantenler* ile BR'nin algılanması.

5. BÖLÜM
TARTIŞMA-SONUÇ VE ÖNERİLER

5.1. Tartışma-Sonuç ve Öneriler

Biyolojik algılama uygulamalarında kullanılabilecek, IR bölgede çalışan, özgün, fraktal geometrili, çoklu-spektral plazmonik nanoantenler tasarlamak ve üretimlerini gerçekleştirmek ve bu nanoanten yapılarının çoklu-spektral optik algılama potansiyellerini göstermek amacıyla bu tez çalışmasında; çoklu-ölçekli alan dağılımlarına ve yüksek spektral yoğunluklara sahip Cesaro tip ve ters-Cesaro tip fraktal geometrili, yeni çoklu-spektral plazmonik nanoantenler tasarlanıp deneysel olarak üretilmiştir ve optik karakterizasyonları gerçekleştirilmiştir. İlk olarak, literatürde yer alan *L#1*, *L#2*, *L#3* çalışmaları incelenerek, yapılan çalışmanın özgün değeri belirlenmiştir. Çalışılan nanoanten yapılarının özgün değerleri özgün fraktal geometrili, fraktal çift-kutuplu karakterini fraktal hiyerarşisine uygun olarak taşıyan, çoklu-spektral plazmonik nanoanten yapıları olmaları; farklı analiz yöntemleri ile fiziksel temellerinin incelenmiş olması ve literatürde ilk kez plazmonik nanoantenler için sentez formüllerinin sunulmuş olmasıdır. Teze özgü olarak yapılan çalışmalarda;

- *U#1* çalışması ile *ters-Cesaro tip fraktal* geometrisinin *sabit devre boyutuna sahip ilk beş iterasyonu şeklindeki Au nanoantenler* tasarlanmış ve üretilmiştir. FDTD metodu ile tasarlanan antenlerin NIR'dan MIR'a kadar olan geniş bir frekans sahasında çoklu-rezonant saçılma ile soğurma karakteristikleri belirlenmiş ve çoklu-ölçekli ve hiyerarşik fraktal özelliklere sahip olan yakın alan, yük ve akım dağılımları, fraktal gelişimi dikkate alınarak sistematik bir biçimde analiz edilmiştir. UV frekanslardan MIR'a kadar olan bölgede geçirgen olan CaF_2 alt taban üzerine EBL yoluyla üretilen Au nanoanten dizileri, FTIR ile karakterize edilerek, hesaplanmış yansıma ve iletim spektrumları ile ölçülen yansıma ve iletim spektrumlarının oldukça iyi uyum içinde

oldukları gözlenmiştir. Ardından 5. iterasyon yapıdaki antenlerin çoklu-spektral algılama kapasitesinin gösterilmesi için farklı kalınlıklarda kaplanmış *ince PMMA katmanlarının üç farklı moleküler bandının SEIRA spektroskopisi ile algılanması* gerçekleştirilmiştir. 5. iterasyon ve 4. iterasyon yapılardaki antenlerin protein algılama kapasitesinin gösterilmesi için de SEIRA spektroskopisi ile, mor renkli zar proteini olan *BR'nin on farklı moleküler bandının çoklu-spektral algılama uygulaması* gerçekleştirilmiştir.

- *U#2* çalışması ile *Cesaro-1 tip fraktal* geometrisinin *sabit devre boyutuna sahip ilk beş iterasyonu şeklindeki Au nanoantenler* tasarlanmış ve üretilmiştir. FDTD metodu ile tasarlanan antenlerin NIR'dan MIR'a kadar olan geniş bir frekans sahasında çoklu-rezonant saçılma ile soğurma karakteristikleri belirlenmiş ve çoklu-ölçekli ve hiyerarşik fraktal özelliklere sahip olan yakın alan, yük ve akım dağılımları, fraktal gelişimi dikkate alınarak sistematik bir biçimde analiz edilmiştir. UV frekanslardan MIR'a kadar olan bölgede geçirgen olan CaF_2 alt taban üzerine EBL yoluyla üretilen Au nanoanten dizileri, FTIR ile karakterize edilerek, hesaplanmış yansıma ve iletim spektrumları ile ölçülen yansıma ve iletim spektrumlarının oldukça iyi uyum içinde oldukları gözlenmiştir. Ardından, 4. iterasyon ve 3. iterasyon yapılardaki antenlerin algılama kapasitesinin gösterilmesi için de SEIRA spektroskopisi ile, mor renkli zar proteini olan *BR'nin on farklı moleküler bandının çoklu-spektral algılama uygulaması* gerçekleştirilmiştir.
- U#3 çalışması ile *her iterasyon artışında aynı minimum fraktal uzunluğu ve dolayısıyla farklı devre boyutu için Cesaro-2 tip fraktal geometrisinin ilk beş iterasyonu şeklindeki Au nanoantenler* tasarlanmış ve üretilmiştir. FDTD metodu ile tasarlanan antenlerin NIR'dan MIR'a kadar olan geniş bir frekans sahasında çoklu-rezonant saçılma ile soğurma karakteristikleri belirlenmiş UV frekanslardan MIR'a kadar olan bölgede geçirgen olan CaF_2 alt taban üzerine EBL yoluyla üretilen Au nanoanten dizileri, FTIR ile karakterize edilerek, hesaplanmış yansıma ve iletim spektrumları ile ölçülen yansıma ve iletim spektrumlarının arasında iyi uyum içinde oldukları gözlenmiştir. *Cesaro-2 tip fraktal* geometrisi ile daha belirgin şekilde gözlenebilen 1. mertebe ana ve hibrit modlara ait yakın alan, yük ve akım dağılımları analiz edilmiştir. Ardından, 4. iterasyon ve 5. iterasyon yapılardaki antenlerin algılama kapasitesinin gösterilmesi için de SEIRA spektroskopisi ile, mor renkli zar

proteini olan *BR'nin on farklı moleküler bandının çoklu-spektral algılama uygulaması* gerçekleştirilmiştir.

- *U#4* çalışması ile SEIRA uygulamaları için *kare fraktal benzeri açıklık* tabanlı yeni bir nanoanten dizisi tasarlanıp analiz edilmiş ve deneysel olarak gerçekleştirilmiştir. Yapının spektral davranışın fiziksel kaynağını anlamak için FDTD analizleri yapılmıştır ve yüksek yansıma ile iletim karakteristiklerine sahip teorik ile deneysel spektrumlarda çok iyi bir uyum elde edilmiştir. Anahtar geometrik parametrelerin etkisini belirlemek ve nanoaçıklık sisteminin spektral davranışını kontrol edebilmek için iyi bir akort mekanizması tanımlanmıştır. Ayrıca yapının rezonant davranışı analitik olarak çalışılıp rezonant dalga sayıları için analiz formülleri önerilmiştir. İstenilen hedef molekülün IR algılama uygulamasına yönelik olarak istenilen çalışma dalga boyunu sağlamak için geometrik parametre değişimlerine karşı ayarlanabilir bir davranış elde edilmiştir. Bu akort özelliği *kare fraktal benzeri nanoaçıklık* sisteminin iki farklı geometrik parametre seti için nümerik ve deneysel optik karakterizasyonuyla doğrulanmıştır. Ayrıca tasarlanan anten dizisinin farklı çevresel ortamlar için kırılma indisi algılama karakteristiği incelenmiştir. Bununla birlikte yapının MIR bölgedeki rezonant modunda yüksek SEIRA güçlendirmesine sahip olduğu gözlenmiştir. Yüksek iletim ile yansıma karakteristiklerine ve yüksek alan yerelleştirmesi davranışına bağlı olarak önerilen bu algılama platformu, analitik ve nümerik olarak analiz edilip deneysel olarak gerçekleştirilmiştir ve yüksek hassasiyette spektroskopi uygulamaları için iyi bir aday olarak gösterilmiştir.
- *U#5* çalışması ile; çok amaçlı IR algılama uygulamaları için, ikili rezonant davranışa sahip, *dikdörtgen fraktal* şeklinde yeni bir nanoaçıklık dizisi sunulmaktadır. Tamamen nümerik olarak yapılan bu çalışmada ikili rezonant davranışın fiziksel kaynağını belirlemek amacıyla FDTD analizleri yapılmıştır. Geometrik parametreler sayesinde, bu nanoaçıklık sisteminin spektral davranışını kontrol etmek için iyi bir akort mekanizması sunulmuştur. Ayrıca iki farklı kutuplanma için konumsal alan güçlendirmeleri analiz edilmiştir. Son olarak da nanoaçıklık sisteminin değişen yüzey koşullarına karşı hassas karakterini göstermek amacıyla sensör parametrelerinden olan kırılma indisi hassasiyeti ve çevresel ortam kalınlığı hassasiyeti için bir dizi nümerik test yapılmıştır. Sonuç olarak önerilen dikdörtgen fraktal şekilli nanoaçıklık dizileri ikili rezonanslara, yüksek yakın alan

yerelleştirmesine ve sabit hassasiyet karakteristiklerine bağlı olarak biyolojik ve kimyasal algılama için yeni bir etiketsiz algılama platformu olabilecektir.

Bu çalışmaların uluslararası literatüre sunumu şöyledir:

- U#1 çalışmasının büyük bir kısmı uluslararası hakemli dergilerden "*ACS Photonics*" dergisinde "*Multispectral Cesaro-type Fractal Plasmonic Nanoantennas*" başlığı ile yayımlanmıştır.
- *U#1* çalışmasının bir kısmı ve *U#2* ile *U#3* çalışmalarındaki deneysel analizler, *2016 MRS Fall Meeting & Exhibit* (27 Kasım - 2 Aralık 2016) adlı uluslararası konferansta "*Multi-spectral Fractal Plasmonics for Surface-Enhanced Spectroscopy*" başlıklı çalışma olarak sunulmuştur.
- *U#2* ile *U#3* çalışmaları ayrıca uluslararası hakemli dergilerden birine sunulmak üzere hazırlanmaktadır.
- *U#4* çalışması, "*Square Fractal-Like Nanoapertures for SEIRA Spectroscopy: An Analytical, Numerical and Experimental Study*" makele başlığı ile uluslararası hakemli dergilerden "*Journal: Sensors & Actuators: A. Physical*" dergisine sunulmuş olup hakem değerlendirmesindedir.
- U#5 çalışması, "*Refractive Index Sensing Characteristics of Dual Resonances in Rectangular Fractal Nano-Apertures*" makele başlığı ile uluslararası hakemli dergilerden "*Optical Materials*" dergisinde yayımlanmıştır.

Sonuçlarımıza bağlı olarak; *U#1*, *U#2*, *U#3*, *U#4* ve *U#5* çalışmalarındaki fraktal tabanlı nanoanten mühendisliğinin, yonga üstünde etiketsiz (label-free) biyoalgılama ve spektroskopi uygulamaları için kompakt devreler olarak sonuçlanacağına inanmaktayız.

U#1, *U#2*, *U#3*, *U#4* ve *U#5* çalışmalarına ait nümerik analizler ve deneysel çalışmalar 113E277 nolu TÜBİTAK projemiz ile; *U#1*, *U#2*, *U#3* ve *U#4* çalışmalarına ait nümerik analizler ve deneysel çalışmalar TÜBİTAK Yurt Dışı Doktora Sırası Araştırma Burs Programı (2214-A) ile; *U#1*, *U#2*, *U#3* ve *U#4* çalışmalarına ait nümerik analizler ve deneysel çalışmalar Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından FDK-2015-5649 nolu tez projesi kapsamında ve Boston Üniversitesi Fotonik Merkezi imkanları kullanılarak tarafımca yapılmıştır. Deneysel çalışmalara Arş. Gör. Erdem Aslan yardımcı olmuştur.

KAYNAKÇA

1. Maier S. A., 2007. Plasmonics: Fundamentals and applications. Springer, New York, 224 pp.
2. Toropov, A. A., Shubina, T. V., 2015. Plasmonic Effects in Metal-Semiconductor Nanostructures. Oxford University Press, New York, 400 pp.
3. Palik E. D., 1985. Handbook of Optical Constants of Solids. Academic, Orlando, 804 pp.
4. Johnson, P. B., Christy R. W., 1972. Optical Constants of Nobel Metals. **Physical Review B**, **6** (12):4370–4379.
5. Ritchie, R. H., 1957. Plasma Losses by Fast Electrons in Thin Films. **Physical Review, 106** (5):874–881.
6. Schuller J. A., et al., 2010. Plasmonics for Extreme Light Concentration and Manipulation. **Nature Materials, 9**: 193–204.
7. Stockman M. I., 2011. Nanoplasmonics: Past, Present, and Glimpse into Future. **Optics Express**, **19** (22): 22029–22106.
8. Ashcroft, N. W., Mermin, N. D., 1976. Solid State Physics. Saunders College Publishing, Orlando, FL, 826 pp.
9. Marder, M. P., 2000. Condensed Matter Physics. JohnWiley & Sons, New York, 983 pp.
10. Jackson, J. D., 1999. Classical Electrodynamics, Third Edition. John Wiley & Sons, New York, 832 pp.
11. Zeng, S., Baillargeat, D., Ho, H.P., Yong, K.T., 2014. Nanomaterials Enhanced Surface Plasmon Resonance for Biological and Chemical Sensing Applications. **Chemical Society Reviews, 43** (10): 3426–3452.
12. Barnes, W. L., 2006. Surface Plasmon-Polariton Length Acales: A Route to Sub-Wavelength Optics. **Journal of Optics A:Pure and Applied Optics, 8** (4): S87–S93.
13. Haynes, C. L., McFarland, A. D., Van Duyne, R. P. 2005. Surface-Enhanced Raman Spectroscopy. **Analytical Chemistry, 77** (17): 338A–346A.
14. Haes, A. J., Haynes, C. L., McFarland, A. D., Zou, S. , Schatz, G. C.,Van Duyne, R. P., 2005. Plasmonic Materials for Surface-Enhanced Sensing and Spectroscopy. **MRS Bulletin, 30**: 368–375.

15. Kawata, S., Inouye, Y., Verma, P., 2009. Plasmonics for Near-Field Nano-Imaging and Superlensing. **Nature Photonics, 3** (7): 388–394.
16. Anker, J.N., Hall, W.P., Lyandres, O., Shah, N.C., Zhao, J., Van Duyne, R. P., 2008. Biosensing with Plasmonic Nanosensors. **Nature Materials, 7** (6): 442–453.
17. Sambles, J. R., Bradbery, G. W., Yang, F., 1991. Optical Excitation of Surface Plasmons: an Introduction. **Contemporary Phsysics, 32** (3): 173–183.
18. Eustisa, S., El-Sayed, M. A., 2006. Why Gold Nanoparticles are More Precious than Pretty Gold: Noble Metal Surface Plasmon Resonance and Its Enhancem**ent of the Radiati**ve and Nonradiative Properties of Nanocrystals of Different Shapes. **Chemical Society Reviews, 35**: 209–217.
19. Willets, K. A., Van Duyne, R. P., 2007. Localized Surface Plasmon Resonance Spectroscopy and Sensing. **Annual Review of Physical Chemistry, 58**: 2**67–297.**
20. **Cao, J., Sun,T., Gra**ttan, K. T. V., 2014. Gold Nanorod-Based Localized Surface Plasmon Resonance Biosensors: A Review. **Sensors and Actuators B, 195**: 332–351.
21. Zhang, J., Song, F., Lin, S., Liu, S., Liu, Y., 2016. Tunable fluorescence lifetime of Eu-PMMA films with plasmonic nanostructures for multiplexing. **Optics Express, 24** (8): 8228-8236.
22. Petryayeva, E., Krull, U. J., 2011. Localized Surface Plasmon Resonance: Nanostructures, Bioassays and Biosensing – A Review. **Analytica Chimica Acta, 706**: 8–24.
23. Mayer, K. M., Hafner, J. H., 2011. Localized surface plasmon resonance sensors. **Chemical Reviews, 111**: 3828–3857.
24. Njoki, P. N., Lim, I. I. S., Mott, D., Park, H. Y., Khan, B., Mishra, S., Sujakumar, R., Luo, J., Zhong, C. J., 2007. Size Correlation of Optical and Spectroscopic Properties for Gold Nanoparticles. **Journal of Physical Chemistry C, 111**: 14664–14669.
25. Hu, M., Chen, J., Li, Z. Y., Au, L., Hartland, G. V., Li, X., Marquez, M., Xia, Y. 2006. Gold Nanostructures: Engineering Their Plasmonic Properties for Biomedical Applications. **Chemical Society Reviews, 35**: 1084–1094.

26. Biagioni, P., Huang, J.S., Hecht, B., 2012. Nanoantennas for Visible and Infrared Radiation. **Reports on Progress in Physics, 75**: 024402.
27. Balanis, C. A., 2005. Antenna Theory: Analysis and Design. John Wiley & Sons, New Jersey, 1099 pp.
28. Feynman, R.P., 1960. There's Plenty of Room at the Bottom. **Engineering and Science**: 22–36.
29. Bohren, C. F., Huffman, D. R., 2004. Absorption and Scattering of Light by Small Particles, 3rd ed. Wiley-VCH, Weinheim, Germany, 544 pp.
30. Novotny, L., Hecht, B., 2006. Principles of Nano-Optics. Cambridge University Press, New York, 539 pp.
31. Giannini,V., Fernández-Domínguez, A. I., Heck, S. C., Maier,S. A., 2011. Plasmonic Nanoantennas: Fundamentals and Their Use in Controlling the Radiative Properties of Nanoemitters. **Chemical Review, 111** (6): 3888–3912.
32. Born, M., Wolf, E., 2000. Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light. Cambridge University Press: Cambridge, U.K., 986 pp.
33. Agio, M., Alù A., 2013. Optical Antennas. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 480 pp.
34. Novotny, L., Van Hulst, N., 2011. Antennas for Light. **Nature Photonics, 5**: 83–90.
35. Barnes W. L., Dereux, A., Ebbesen, T. W., 2003. Surface Plasmon Subwavelength Optics. **Nature, 424**: 824–830.
36. Baumeier B., Leskova T. A., and Maradudin A. A., 2009. Cloaking from Surface Plasmon Polaritons by a Circular Array of Point Scatters. **Physical Review Letters, 103:** 246803.
37. Walsh, G. F., Dal Negro, L., 2013. Enhanced Second Harmonic Generation by Photonic–Plasmonic Fano-Type Coupling in Nanoplasmonic Arrays. **Nano Letters, 13** (7): 3111–3117.
38. Aouani, H., Šípová, H., Rahmani, M., Navarro-Cia, M., Hegnerová, K., Homola, J.Hong, M., Maier, S. A., 2013a. Ultrasensitive Broadband Probing of Molecular Vibrational Modes with Multifrequency Optical Antennas. **ACS Nano, 7** (1): 669−675.

39. Cheng, F., Yang, X., Gao, J., 2015. Ultrasensitive Detection and Characterization of Molecules with Infrared Plasmonic Metamaterials. **Scientific Reports, 5**: 14327.

40. Lindfors, K., Dregely D., Lippitz, M., Engheta, N., Totzeck, M., Giessen, H., 2016. Imaging and Steering Unidirectional Emission from Nanoantenna Array Metasurfaces. **ACS Photonics, 3**: 286−292.

41. Ni, X., Emani, N. K., Kildishev, A. V., Boltasseva, A., Shalaev, V. M., 2012. Broadband Light Bending with Plasmonic Nanoantennas. **Science, 335** (6067): 427.

42. Walther, B., Helgert, C., Rockstuhl, C., Pertsch, T., 2011. Diffractive Optical Elements Based on Plasmonic Metamaterials. **Applied Physics Letters, 98**: 191101.

43. Aieta, F., Kats, M. A., Genevet , P., Capasso, F., 2015. Multiwavelength Achromatic Metasurfaces by Dispersive Phase Compensation. **Science, 347** (6228): 1342–1345.

44. Aouani, H., Sípova, H., Rahmani, M., Navarro-Cia, M., Hegnerova, K., Homola, J., Hong, M., Maier, S. A., 2013b. Plasmonic Nanoantennas for Multispectral Surface-Enhanced Spectroscopies. **The Journal of Physical Chemistry C, 117** (36): 18620–18626.

45. Rechberger, W., Hohenau, A., Leitner, A., Krenn, J. R., Lamprecht, B., Aussenegg, F. R., 2003. Optical Properties of Two Interacting Gold Nanoparticles. **Optics Communications, 220**: 137–141.

46. Bharadwaj, P., Deutsch, B, Novotny, L., 2009. Optical Antennas. **Advances in Optics and Photonics, 1** (3): 438–483.

47. Auguié, B., Bendaña, X. M., Barnes, W. L., Javier García de Abajo, F., 2010. Diffractive Arrays of Gold Nanoparticles Near an Interface: Critical Role of the Substrate. **Physical Review B, 82**: 155447.

48. Haus, J., 2010. Optical Sensors: Basics and Applications. Wiley-VCH, Weinheim, Germany, 189 pp.

49. Fan, X., White, I. M., Shopova, S. I., Zhu H., Suter, J. D., Sun Y., 2008. Sensitive Optical Biosensors for Unlabeled Targets: A Review. **Analytica Chimica Acta, 620**: 8–26.

50. Chen, Y., Ming H., 2012. Review of Surface Plasmon Resonance and Localized Surface Plasmon Resonance Sensor. **Photonic Sensors, 2** (2): 37–49.
51. Homola J., 2008. Surface Plasmon Resonance Sensors for Detection of Chemical and Biological Species. **Chemical Reviews, 108**: 462−493.
52. Kim, J.-H., Heller, D. A., Jin, H., Barone, P. W., Song, C., Zhang, J., Trudel, L. J., Wogan, G. N., Tannenbaum, S. R., Strano, M. S., 2009. The Rational Design of Nitric Oxide Selectivity in Single-Walled Carbon Nanotube Near-Infrared Fluorescence Sensors for Biological Detection. **Nature Chemistry, 1**: 473−481.
53. McCreery, R. L., 2000. Raman Spectroscopy for Chemical Analysis. Wiley, New York, 448 pp.
54. Freudiger, C. W., Min, W., Saar, B. G., Lu, S., Holtom, G. R., He,C., Tsai, J. C., Kang, J. X., Xie, X. S., 2008. Label-Free Biomedical Imaging with High Sensitivity by Stimulated Raman Scattering Microscopy. **Science, 322:** 1857−1861.
55. Holton, S. E., Walsh, M. J., Kajdacsy-Balla, A., Bhargava, R., 2011. Label-Free Characterization of Cancer-Activated Fibroblasts Using Infrared Spectroscopic Imaging. **Biophysical Journal, 101**: 1513−1521.
56. Urano, Y., Asanuma, D., Hama, Y., Koyama, Y., Barrett, T., Kamiya, M., Nagano, T., Watanabe, T., Hasegawa, A., Choyke, P. L., Kobayashi, H., 2009. Selective Molecular Imaging of Viable Cancer Cells with pH-Activatable Fluorescence Probes. **Nature Medicine, 15** (1): 104−109.
57. Brolo. A.G. 2012. Plasmonics for future biosensors. **Nature Photonics, 6**: 709–713.
58. Abbas, A., Tian, L., Morrissey, J. J., Kharasch, E. D., Singamaneni, S., 2013. Hot Spot-Localized Artificial Antibodies for Label-Free Plasmonic Biosensing. **Advanced Functional Materials, 23** (14): 1789–1797.
59. Palonpon, A. F., Ando, J., Yamakoshi, H., Dodo, K., Sodeoka, M., Kawata, S., Fujita, K., 2013. Raman and SERS microscopy for molecular imaging of live cells. **Nature Protocols, 8**: 677–692.
60. Ataka, K., Heberle, J., 2007. Biochemical Applications of Surface-Enhanced Infrared Absorption Spectroscopy. **Analytical and Bioanalytical Chemistry, 388** (1): 47–54.

61. D'Andrea, C., Bochterle, J., Toma, A., Huck, C., Neubrech, F., Messina, E., Fazio, B., Marago, O. M., Fabrizio, E. D., Lamy de La Chapelle, M., Gucciardi, P. G., Pucci, A. 2013. Optical Nanoantennas for Multiband Surface-Enhanced Infrared and Raman Spectroscopy. **ACS Nano, 7**: 3522–3531.

62. Larkin, P. J., 2011. IR and Raman Spectroscopy; Principles and Spectral Interpretation. Elsevier, Waltham, MA, 230 pp.

63. Le Ru, E., Etchegoin, P., 2009. Principles of Surface-Enhanced Raman Spectroscopy. Elsevier, UK, 688 pp.

64. Fort, E., Grésillon, S. 2008. Topical Review:Surface Enhanced Fluorescence. **Journal of Physics D: Applied Physics, 41**: 013001-1–013001-31.

65. Yu, F., Yao, D., Knoll, W., 2003. Surface Plasmon Field-Enhanced Fluorescence Spectroscopy Studies of the Interaction between an Antibody and Its Surface-Coupled Antigen. **Analytical Chemistry, 75**: 2610– 2617.

66. Stuart B., 2004. Infrared Spectroscopy: Fundamentals and Applications. John Wiley & Sons, England, 242 pp.

67. Socrates G., 2001. Infrared and Raman Characteristic Group Frequencies: Tables and Charts, 3rd Edition, John Wiley & Sons, England, 347 pp.

68. Osawa, M., Ataka, K., Yoshii, K., Nishikawa, Y., 1993. Surface-Enhanced Infrared-Spectroscopy — the Origin of the Absorption Enhancement and Band Selection Rule in The Infrared-Spectra of Molecules Adsorbed on Fine Metal Particles. **Applied Spectroscopy, 47** (9): 1497–1502.

69. Kawata, S., 2001. Near-Field Optics and Surface Plasmon Polaritons. Springer-Verlag, Berlin, 210 pp.

70. Zaitseva, E., Saavedra, M., Banerjee, S., Sakmar, T. P., Vogel R., 2010. SEIRA Spectroscopy on a Membrane Receptor Monolayer Using Lipoprotein Particles as Carriers. **Biophysical Journal, 99** (7): 2327–2335.

71. Wanzenböck, H. D., Mizaikoff, B., Weissenbacher, N., Kellner, R., 1998. Surface Enhanced Infrared Absorption Spectroscopy (SEIRA) Using External Reflection on Low-Cost Substrates. **Fresenius' Journal of Analytical Chemistry, 362**: 15–20.

72. Huck, C. W., 2016. Recent Developments in Solid-Phase Extraction for Near and Attenuated Total Reflection Infrared Spectroscopic Analysis. **Molecules, 21** (5): 633.

73. Brown, L. V., Yang, X., Zhao, K., Zheng, B. Y., Nordlander, P., Halas, N.J., 2015. Fan-Shaped Gold Nanoantennas above Reflective Substrates for Surface-Enhanced Infrared Absorption (SEIRA). **Nano Letters, 15**: 1272–1280.

74. Park, T. H., Mirin, N., Lassiter, J. B., Nehl, C. L., Halas, N. J., Nordlander, P., 2008. Optical Properties of a Nanosized Hole in a Thin Metallic Film. **ACS Nano, 2** (1): 25–32.

75. Haes, A., Van Duyne, R. P., 2004. A Unified View of Propagating and Localized Surface Plasmon Resonance Biosensors. **Analytical and Bioanalytical Chemistry, 379** (7): 920–930.

76. Wang, F., Shen, Y. R., 2006. General properties of local plasmons in metal nanostructures. **Physical Review Letters, 97**: 206806.

77. Cetin, A. E., Korkmaz, S., Durmaz, H., Aslan, E., Kaya, S., Paiella, R., Turkmen, M., 2016. Quantification of Multiple Molecular Fingerprints by Dual-Resonant Perfect Absorber. **Advanced Optical Materials 4**(8): 1274–1280.

78. Aslan, E., Kaya, S., Aslan, E., Korkmaz, S., Saracogluc, O. G., Turkmen, M., 2017. Polarization Insensitive Plasmonic Perfect Absorber with Coupled Antisymmetric Nanorod Array. **Sensors and Actuators B: Chemical, 243**: 617–625.

79. Turkmen, M., Aksu, S., Çetin, A. E., Yanik, A. A., Altug, H., 2011. Multi-Resonant Metamaterials Based on UT-Shaped Nano-Aperture Antennas. **Optics Express, 19** (8): 7921–7928.

80. Turkmen, M., 2013. Characterization of X-Shaped Nanoaperture Antenna Arrays Operating in Mid-Infrared Regime. **Chinese Optics Letters, 11** (7): 070501.

81. Cetin, A. E., Aksu, S., Turkmen, M., Etezadi, D., Altug, H., 2015a. Theoretical and Experimental Analysis of Subwavelength Bowtie-Shaped Antennas. **Journal of Electromagnetic Waves and Applications, 29** (13): 1686–1698.

82. Fedotov, V. A., Uchino, T., Ou, J. Y., 2012. Low-Loss Plasmonic Metamaterial Based on Epitaxial Gold Monocrystal Film. **Optics Express, 20** (9): 9545–9550.

83. Miyamaru, F., Saito, Y., Takeda, M. W., Hou, B., Liu, L., Wen, W., Sheng, P., 2008. Terahertz Electric Response of Fractal Metamaterial Structures. **Physical Review B, 77**: 045124.

84. Matteo, J. A., Hesselink, L., 2005. Fractal Extensions of Near-Field Aperture Shapes for Enhanced Transmission and Resolution. **Optics Express, 13** (2): 636 – 647.

85. Lal, S., Link, S., Halas, N. J., 2007. Nano-Optics from Sensing to Waveguiding. **Nature Photonics, 1**: 641–648.

86. Brongersma, M. L., 2008. Plasmonics: Engineering Optical Nanoantennas. **Nature Photonics, 2**: 270–272.

87. Liu, K., Li N., Sadana, D. K., Sorger, V. J., 2016. Integrated Nanocavity Plasmon Light Sources for On-Chip Optical Interconnects. **ACS Photonics, 3** (2): 233–242.

88. Berini, P., 2014. Surface Plasmon Photodetectors and Their Applications. **Laser & Photonics Reviews, 8** (2): 197–220.

89. MacDonald, K. F., Sámson, Z. L., Stockman, M. I., Zheludev, N. I., 2009. Ultrafast Active Plasmonics. **Nature Photonics, 3**: 55–58.

90. Boriskina, S. V., Dal Negro, L., 2010. Multiple-Wavelength Plasmonic Nanoantennas. **Optics Letters, 35** (4): 538–540.

91. Blanchard, R., Boriskina, S. V., Genevet, P., Kats, M. A., Tetienne, J.-P., Yu, N., Scully, M. O., Dal Negro, L., Capasso, F., 2011. Multiple-Wavelength Mid-Infrared Plasmonic Antennas with single Nanoscale Focal Point. **Optics Express, 19** (22): 22113–22124.

92. Trevino, J., Walsh, G. F., Pecora, E. F., Boriskina, S. V., Dal Negro, L., 2013. Photonic-Plasmonic-Coupled Nanoantennas for Polarization-Controlled Multi-Spectral Nanofocusing. **Optics Letters, 38** (22): 4861–4863.

93. Gottheim, S., Zhang, H., Govorov, A. O., Halas, N. J., 2015. Fractal Nanoparticle Plasmonics: The Cayley Tree. **ACS Nano, 9**: 3284 –3292.

94. Yang, Y.; Dai, H. T.; Sun, X. W., 2014. Fractal Diabolo Antenna for Enhancing and Confining the Optical Magnetic Field. **AIP Advances, 4**: 017123.

95. Rosa, L., Sun, K., Juodkazis, S., 2011. Sierspinski Fractal Plasmonic Nanoantennas. **Physica Status Solidi - Rapid Research Letters, 5–6**: 175–177.

96. Jaggard, D. L., 1990. On Fractal Electrodynamics. In Recent Advances in Eletromagnetic Theory; Kritikos, H. N., Jaggard, D. L., Eds.; Springer New York, New York, pp. 183–224.

97. Puente-Baliarda, C., Pous, R., 1996. Fractal Design of Multiband and Low Side-Lobe Arrays. **IEEE Transactions Antennas and Propagation, 44** (5): 730–739.
98. Cohen, N. 1996. Fractal and Shaped Dipoles. **Communications Quarterly**, 25–36.
99. Zhu, J., Hoorfar A., 2003. Bandwidth, Cross-Polarization, and Feed-Point Characteristics of Matched Hilbert Antennas. **IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2**: 2–5.
100. Zhu, J., Hoorfar A., 2004. Peano Antennas. **IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 3**: 71–74.
101. McVay, J., Hoorfar, A., Engheta, N., 2006. Space-Filling Curve RFID Tags. pp. 199–202. *2006 IEEE Radio and Wireless Symposium*, January 17–19, 2006, San Diego.
102. Gaubert, C., Chusseau, L., Giani, A., Gasquet, D., Garet, F., Aquistapace, F., Duvillaret, L., Coutaz, J. L., Knap, W., 2004. THz Fractal Antennas for Electrical and Optical Semiconductor Emitters and Receptors. **Physica Status Solidi (C), 1** (6): 1439–1444.
103. Zhu, J., Hoorfar, A., Engheta N., 2003. Bandwidth, Cross Polarization, and Feed-Point Characteristics of Matched Hilbert Antennas. **IEEE Antennas and Wireless Propagation Letter, 2**: 2–5.
104. De Zuani, S., Reindl, T., Rommel, M., Gompf, B., Berrier, A., Dressel, M., 2015. High-Order Hilbert Curves: Fractal Structures with Isotropic, Tailorable Optical Properties. **ACS Photonics, 2** (12): 1719–1724.
105. Sederberg, S., Elezzabi, A.Y., 2011. Sierspinski Fractal Plasmonic Antenna: a Fractal Abstraction of the Plasmonic Bowtie Antenna. **Optics Express, 19** (11): 10456–10461.
106. Bao, Y. J., Zhang, B., Wu, Z., Si, J. W., Wang, M., Peng, R. W., Lu, X., Shao, J., Li, Z. F., Hao, X. P., Ming, N. B. 2007. Surface-Plasmon-Enhanced Transmission Through Metallic Film Perforated with Fractal-Featured Aperture Array. **AppliedPhysics Letters, 90**: 251914.
107. Zhu, L. H., Shao, M. R., Peng, R. W., Fan, R. H., Huang, X. R.; Wang, M., 2013. Broadband Absorption and Efficiency Enhancement of Ultra-Thin Silicon Solar Cell with a Plasmonic Fractal. **Optics Express, 21** (S3): A313–A323.

108. Volpe, G., Volpe, G., Quidant, R., 2011. Fractal Plasmonics: Subdiffraction Focusing and Broadband Spektral Response by a Sierpinski Nanocarpet. **Optics Express, 19**: 3612–3618.
109. Li, G., Chen, X., Ni, B., Li, O., Huang, L., Jiang, Y., Hu, W., Lu, W., 2013. Fractal H-shaped Plsmonic Nanocavity. **Nanotechnology, 24**: 205702.
110. Dhar, S., Patra, K., Ghatak, R., Gupta, B., Poddar, D. R., 2015. A dielectric Resonator-Loaded Minkowski Fractal Shaped Slot Loop Heptaband Antenna. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 63**(4): 1521 – 1529.
111. Hegde, R. S., Khoo, E. H., 2015. Broadband Optical Response in Ternary Tree Fractal Plasmonic Nanoantenna. Plasmonics, 11 (2): 465 – 473.
112. Ma, Y., Zhang, H., Li, Y., Wang, Y., 2014. Miniaturized and Dual-Band Metamaterial Absorber with Fractal Sierpinski Structure. Journal of the Optical Society of America B, 31 (2): 325 – 331.
113. Batty, M., Longley, P., 1994. Fractal Cities: A Geometry of Form and Function, 1st Edition. Academic Press, San Diago, 394 pp.
114. Adato, R., Yanik, A. A., Amsden, J. J., Kaplan, D. L., Omenetto, F. G., Hong, M. K., Erramilli, S., Altug, H., 2009. Ultra-Sensitive Vibrational Spectroscopy of Protein Monolayers with Plasmonic Nanoantenna Arrays. **PNAS, 106** (46): 19227–19232.
115. Dubovik, V. M., Tugushev, V. V., 1990. Toroid Moments in Electrodynamics and Solid-State Physics. **Physics Reports, 187** (4): 145–202.
116. Afanasiev, G. N., Dubovik, V. M., 1998. Some Remarkable Charge–Current Configurations. **Physics Of Particles And Nuclei, 29**: 366–391.
117. Afanasiev, G. N., 2001. Simplest Sources of Electromagnetic Fields as a Tool for Testing the Reciprocity-like Theorems. **Journal of Physics D: Applied Physics, 34**: 539–559.
118. Radescu, E. E., Vaman, G., 2002. Exact Calculation of the Angular Momentum Loss, Recoil Force, and Radiation Intensity for an Arbitrary Source in Terms of Electric, Magnetic, and Toroid Multipoles. **Physical Review E, 65**: 046609.
119. Huang, Y. W., Chen, W. T., Wu, P. C., Fedotov, V., Savinov, V., Ho, Y. Z., Chau, Y.F., Zheludev, N. I., Tsai, D. P., 2012. Design of Plasmonic Toroidal Metamaterials at Optical Frequencies. **Optics Express, 20**: 1760 – 1768.

120. Dong, Z. G., Zhu, J., Yin, X., Li, J., Lu, C., Zhang, X., 2013. All-Optical Hall Effect by the Dynamic Toroidal Moment in a Cavity-Based Metamaterial. **Physical Review B, 87**: 245429.
121. Wang, R., Dal Negro L., 2016. Engineering non-radiative anapole modes for broadband absorption enhancement of light. **Optics Express, 24**(17): 19048–19062.
122. Li, J., Shao, J., Li, J. Q., Yu, X. Q., Dong, Z. G., Chen, Q., Zhai, Y., 2014. Optical Responses of Magnetic-Vortex Resonance in Double-Disk Metamaterial Variations. **Physics Letters A, 378**: 1871–1875.
123. Monticone, F., Alu, A., 2014. The Quest for Optical Magnetism: From Split-Ring Resonators to Plasmonic Nanoparticles and Nanoclusters. **Journal of Materials Chemistry C, 2**: 9059–9072.
124. Yamamoto, K., Ishida, H. 1994. Optical Theory Applied to Infrared Spectroscopy. **Vibrational Spectroscopy, 8:** 1–36.
125. Yamamoto, K., Masui, A., Ishida, H., 1997. Application of Differential Absorption in Infrared Spectroscopy. **Vibrational Spectroscopy, 13**: 119–132.
126. Chen, K., Adato, R., Altug, H., 2012. Dual-Band Perfect Absorber for Multispectral Plasmon-Enhanced Infrared Spectroscopy. **ACS Nano, 6**: 7998–8006.
127. Adato, R., Altug, H., 2013. In-Situ Ultra-Sensitive Infrared Absorption Spectroscopy of Biomolecule Interactions in Real Time with Plasmonic Nanoantennas. **Nature Communication, 4**: 2154.
128. Yamamoto, K., Ishida, H., 1997. Kramers-Kronig Analysis Applied to Reflection-Absorption Spectroscopy. **Vibrational Spectroscopy, 15**: 27–36.
129. Rothschild K. J., Clark, N. A., 1979. Polarized Infrared Spectroscopy of Oriented Purple Membrane. **Biophysical Journal, 25** (3): 473–487.
130. Rothschild, K. J., Zagaeski M., Cantore, W. A., 1981. Conformational Changes Of Bacteriorhodopsin Detected By Fourier Transform Infrared Difference Spectroscopy. **Biochemical and Biophysical Research Communications, 103** (2): 483–489.
131. Hou, B., Liao, X. Q., Poon, J. K. S., 2010. Resonant Infrared Transmission and Effective Medium Response of Subwavelength H-Fractal Apertures. **Optics Express, 18** (4): 3946–3951.

132. You, B., Lu, J. Y., Liou, J. H., Yu, C. P., Chen, H. Z., Liu, T. A., Peng, J. L., 2010. Subwavelength Film Sensing Based on Terahertz Anti-Resonant Reflecting Hollow Waveguides. **Optics Express, 18**: 19353–19360.
133. Nümerik simülasyonlar sonlu farklar zaman domeni paketi, Lumerical FDTD™ ile gerçekleştirilmiştir, (**www.lumerical.com**), (Erişim tarihi: Mayıs 2016).
134. Cetin, A. E., Kaya S., Mertiri, A., Aslan, E., Erramilli, S., Altug, H., Turkmen M., 2015b. Dual-Band Plasmonic Resonator Based on Jerusalem Cross-Shaped Nanoapertures. **Photonics and Nanostructures - Fundamentals And Applications, 15**: 73–80.
135. Inan, U. S., Marshall, R. A., 2011. Numerical electromagnetics: The FDTD method. Cambridge University Press, Cambridge, 404 pp.
136. Yee, K. S., 1966. Numerical Solution of Initial Boundary Value Problems İnvolving Maxwell's Equations in Isotropic Media. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, **14** (3): 302–307.
137. Sevgi, L., 1999. Elektromagnetik Problemler ve Sayısal Yöntemler. Birsen Yayınevi, İstanbul, Türkiye, 214 pp.
138. Mandelbrot, B. B., 1982. The Fractal Geometry of Nature. WH Freeman and Company, San Francisco, 460 pp.
139. Cesaro, E., 1905. Remarques Sur La Courbe De Von Koch. Atti Della R. Accad. Della Scienze Fisiche E Matem. **Napoli, 12**(15): 1–12.
140. Flake, G. W., 1998. The Computational Beauty of Nature: Computer Explorations of Fractals, Chaos, Complex Systems, and Adaptation. The MIT Press, Cambridge, MA, 493 pp.
141. Gouyet J. -F., 1996. Physics and Fractal Structures. Springer, New York, 234 pp.,
142. Werner D. H., Mittra R., 1999. Frontiers in Electromagnetics. Wiley-IEEE Press: New York, 814 pp.
143. Falconer K., 2003. Fractal Geometry: Mathematical Foundations and Applications, Second Edition, John Wiley & Sons, England, 366 pp.
144. Li, H. H., 1980. Refractive Index of Alkaline Earth Halides and Its Wavelength and Temperature Derivatives. **Journal of Physical and Chemical Reference Data, 9**: 161–290.

145. Spaldin, N. A., Fiebig, M., Mostovoy, M., 2008. The Toroidal Moment in Condensed-Matter Physics and Its Relation to the Magnetoelectric Effect. **Journal of Physics: Condensed Matter, 20**: 434203.
146. Papasimakis, N., Fedotov, V. A., Savinov, V., Raybould, T. A., Zheludev, N. I., 2016. Electromagnetic Toroidal Excitations in Matter and Free Space. **Nature Materials, 15**: 263–271.
147. Cui B., 2011. Recent Advances in Nanofabrication Techniques and Applications. InTech, Rijeka, Hırvatistan, 614 pp.
148. Pelton, M., Aizpurua, J., Bryant, G., 2008. Metal-Nanoparticle Plasmonics. **Laser & Photonics Reviews, 2** (3): 136–159.
149. Biswas, A., Bayer, I. S., Biris, A. S., Wang, T., Dervishi, E., Faupel, F., 2012. Advances in Top–Down and Bottom–Up Surface Nanofabrication: Techniques, Applications & Future Prospects. **Advances in Colloid and Interface Science 170**: 2–27.
150. National Institutes of Health **(https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/methyl_methacrylate#section=Top)**, (Erişim tarihi: Şubat 2017).
151. Mattox, D. M., 1998. Handbook of Physical Vapor Deposition (PVD) Processing (Second Edition). William Andrew, Oxford, UK, 944 pp.
152. Seshan, K., 2001. Handbook of Thin Film Deposition Processes and Techniques. Noyes Publications, Norwich, NY, 430 pp.
153. Harsha, K. S. S., 2006. Principles of Vapor Deposition of Thin Films. Elsevier, UK, 1176 pp.
154. Kuo, J., 2007. Electron Microscopy: Methods and Protocols. Humana Press, Totowa, New Jersey, 608 pp.
155. Khursheed, A., 2011. Scanning Electron Microscope Optics and Spectrometers. World Scientific, 402 pp.
156. Mivelle, M., Grosjean, T., Burr, G. W., Fischer, U. C., Garcia-Parajo, M. F., 2015. Strong Modification of Magnetic Dipole Emission through Diabolo Nanoantennas. **ACS Photonics, 2** (8): 1071–1076.
157. Li, K., Stockman, M. I., Bergman, D. J., 2003. Self-Similar Chain of Metal Nanospheres as an Efficient Nanolens. **Physical Review Letters, 91**: 227402.

158. Adato, R., Yanik, A. A., Wu, C. H., Shvets, G., Altug, H., 2010. Radiative Engineering of Plasmon Lifetimes in Embedded Nanoantenna Arrays. **Optics Express, 18** (5): 4526–4537.

159. Catrysse, P. B., Fan, S., 2008. Propagating Plasmonic Mode in Nanoscale Apertures and its Implications for Extraordinary Transmission. **Journal of Nanophotonics, 2** (1): 021790.

160. Lezec, H., Thio, T., 2004. Diffracted Evanescent Wave Model for Enhanced and Suppressed Optical Transmission Through Subwavelength Hole Arrays. **Optics Express, 12**: 3629–3651.

161. Yanik, A. A., Cetin, A. E., Huang, M., Artar, A., Mousavi, S. H., Khanikaev, A., Connor, J. H., Shvets, G., Altug, H., 2011. Seeing Protein Monolayers with Naked Eye through Plasmonic Fano Resonances. **PNAS, 108** (29): 11784–11789.

162. Sherry, L. J., Jin, R. C., Mirkin, C. A., Schatz, G. C., Van Duyne, R. P., 2006. Localized Surface Plasmon Resonance Spectroscopy of Single Silver Triangular Nanoprisms. **Nano Letters, 6**: 2060–2065.

163. Martinsson, E., Shahjamali, M. M., Enander, K., Boey, F., Xue, C., Aili, D., Liedberg, B., 2013. Local Refractive Index Sensing Based on Edge Gold-Coated Silver Nanoprisms. **The Journal of Physical Chemistry C, 117** (44): 23148–23154.

164. Le, K. Q., Bienstman, P., 2011. Enhanced Sensitivity of Silicon-On-Insulator Surface Plasmon Interferometer with Additional Silicon Layer. **IEEE Photonics Journal, 3** (3): 538–545.

165. Ditlbacher, H., Krenn, J. R., Felidj, N., Lamprecht, B., Schider, G., Salerno, M., Leitner, A., Aussenegg, F. R., 2001. Fluorescence Imaging of Surface Plasmon Fields. **Applied Physics Letters, 80**: 404–406.

166. Liu, N., Mesch, M., Weiss, T., Hentschel, M., Giessen, H., 2010. Infrared Perfect Absorber and Its Application As Plasmonic Sensor. **Nano Letters, 10**: 2342–2348.

167. Cetin, A. E., Turkmen, M., Aksu, S., Altug, H., 2012. Nanoparticle-Based Metamaterials as Multiband Plasmonic Resonator Antennas. **IEEE Transactions on Nanotechnology, 11**: 208–212.

168. Aslan, E., Turkmen, M., 2013. Novel Dual-Band Resonator Nanoantenna Array for Infrared Detection Applications. **Sensors and Materials, 25**: 689–696.

169. Duan, G., Zhang, C., Li, A., Yang, X., Lu, L., Wang, X., 2008. Preparation and Characterization of Mesoporous Zirconia Made by Using a Poly (methyl methacrylate) Template. **Nanoscale Research Letters, 3**: 118–122.

170. Moore, D. S., McGrane, S. D., Funk, D. J., 2004. Infrared Complex Refractive Index Measurements and Simulated Reflection Mode Infrared Absorption Spectroscopy of Shock-Compressed Polymer Thin Films. **Applied Spectroscopy, 58**: 491– 498.

171. Lakatos, M., Groma, G. I., Ganea, C., Lanyi, J. K., Váró, G., 2002. Characterization of the Azide-Dependent Bacteriorhodopsin-Like Photocycle of Salinarum Halorhodopsin. **Biophysical Journal, 82** (4): 1687–1695.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı, Soyadı : Ekin ASLAN
Uyruğu : Türkiye (T.C.)
Doğum Tarihi ve Yeri :1981, Boğazlıyan
Medeni Durumu : Evli
Tel : +90 507 4517692
Email : eekin.aslan@gmail.com / ekin@bu.edu

EĞİTİM

Derece	**Kurum**	**Mezuniyet Tarihi**
Yüksek Lisans	Mustafa Kemal Üniversitesi Elektrik- Elektronik Müh.	2011
Lisans	ERÜ, Mühendislik Fak., Elektronik Müh. Böl.	2004
Lise	Kocasinan Lisesi	1998

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	**Kurum**	**Görev**
2013 - 2015	ERÜ Müh. Fak. TÜBİTAK 113E277 Nolu Proje	Bursiyer Araş. Gör.
2010 - 2013	MKÜ Mühendislik Fakültesi	Araştırma Görevlisi
2010 - 2010	MKÜ İskenderun Meslek Yüksekokulu	Öğretim Görevlisi
2008 - 2009	MKÜ Müh. Fak. TÜBİTAK 107M270 Nolu Proje	Bursiyer Araş. Gör.

YAYINLAR

Yazarlar	**Başlık**	**Dergi**	**Durumu**
Ekin Aslan, Mustafa Turkmen	Refractive Index Sensing Characteristics of Dual Resonances in Rectangular Fractal Nano-Apertures	Optical Materials, 2015, 46, 423–428	Yayımlandı

Arif E. Cetin, Sabri Kaya, Alket Mertiri Ekin Aslan, Shyamsunder Erramilli, Hative Altug, Mustafa Turkmen	Dual-Band Plasmonic Resonator Based on Jerusalem Cross-Shaped Nanoapertures	Photonics and Nanostructures -Fundamentals And Applications, 2015, 15, 73–80.	Yayımlandı
Ekin Aslan, Erdem Aslan, Ren Wang, Mi K. Hong , Shyamsunder Erramilli, Mustafa Turkmen, Ömer G. Saraçoğlu, Luca Dal Negro	Multispectral Cesaro-Type Fractal Plasmonic Nanoantennas	ACS Photonics, 2016, 3 (11), 2102–2111.	Yayımlandı
Ekin Aslan, Mustafa Turkmen	Square Fractal-Like Nanoaperture Arrays for Surface Enhanced Infrared Absorption Spectroscopy Applications	Sensors & Actuators: A. Physical	Gönderildi (hakem değerlendirmesinde)
Erdem Aslan, Sabri Kaya, Ekin Aslan, Semih Korkmaz, Ömer G. Saraçoğlu, Mustafa Turkmen	Polarization Insensitive Plasmonic Perfect Absorber with Coupled Antisymmetric Nanorod Array	Sensors and Actuators B: Chemical, 2017, 243, 617–625.	Kabul edildi
Arif E. Cetin, Semih Korkmaz Habibe Durmaz, Ekin Aslan, Sabri Kaya, Roberto Paiella, Mustafa Turkmen	Quantification of Multiple Molecular Fingerprints by Dual-Resonant Perfect Absorber	Advanced Optical Materials, 2016, 4 (8), 1274–1280.	Yayımlandı

ULUSLARARASI KONFERANSLAR

Yazarlar	Başlık	Konferans veya Bildiri	Durumu
Mustafa Turkmen, Erdem Aslan, Ekin Aslan	Optical Characterization Of Jerusalem Cross-Shaped Nanoaperture Antenna Arrays	Conference on Microfluidics, BioMEMS, and Medical Microsystems XII, San Francisco, 2-4 Şubat 2014, 8976 (1-10).	Sunuldu

Ekin Aslan, Sabri Kaya, Mustafa Turkmen	Enhanced Transmission Through Periodic Arrays of Jerusalem Cross-Shaped Nanoapertures for Sensing Applications	OSA Advanced Photonics Congress, Barselona, ISPANYA, 27-31 Temmuz 2014. pp. SeM2C.3.	Sunuldu
Semih Korkmaz, Ekin Aslan, Sabri Kaya, Mustafa Turkmen	Rhombic Nanoantenna Arrays with Extended Arms on Different Dielectric Substrates for Infrared Applications	OSA Advanced Photonics Congress, Boston, A.B.D., 27 Haziran - 1 Temmuz 2015, pp. SeS1B.5-1-SeS1B.5-3.	Sunuldu
Erdem Aslan, Ekin Aslan, Sabri Kaya, O. Galip Saracoglu, Mustafa Turkmen	Diamond Nanoparticle with Cross Aperture for Improving Absorbance Characteristics of Multispectral Sensors	OSA Advanced Photonics Congress, Boston, A.B.D., 27 Haziran - 1 Temmuz 2015, pp.a1-a2.	Sunuldu
Ekin Aslan, Sabri Kaya, Mustafa Turkmen	Effect of The Material Thicknesses on the Optical Properties of Fractal Perfect Absorber	META 2015, NEW YORK, A.B.D., 4-7 Ağustos 2015, pp.1-2.	Sunuldu
Ekin Aslan, Semih Korkmaz, Sabri Kaya, Mustafa Turkmen	Rotated First Iteration Square Fractal Shaped Perfect Absorbers	OSA Advanced Photonics Congress, Boston, A.B.D., 27 Haziran - 1 Temmuz 2015, SeW1B.6.	Sunuldu
Ekin Aslan, Erdem Aslan, Semih Korkmaz, Sabri Kaya, O. Galip Saracoglu, Mustafa Turkmen	Transmission and Reflection Characteristics of Fourfold Rotationally Symmetric Rectangular Nanoaperture Antenna Arrays	International Conference on Advanced Technology & Sciences (ICAT'16), KONYA, TÜRKIYE, 1-3 Eylül 2016, pp.632-634.	Sunuldu
Ekin Aslan, Erdem Aslan, Ren Wang, Mi K. Hong , Shyamsunder Erramilli, Mustafa Turkmen, Ömer G. Saraçoğlu, Luca Dal Negro	Multi-Spectral Fractal Plasmonics for Surface-Enhanced Spectroscopy	2016 MRS Fall Meeting & Exhibit 27 Kasım-2 Aralık 2016.	Sunuldu

ULUSAL KONFERANSLAR

Yazarlar	Başlık	Konferans veya Bildiri	Durumu
Ekin Aslan, Yakup Hameş	Sinüzoidal Kırışıklı, Yarı-Sonsuz, Paralel Plakalı, Empedans Yüklü Dalga Kılavuzunda Yayılan En Düşük Mertebeli Modun Analizi	3.Mühendislik ve Teknoloji Sempozyumu, Ankara, 29-30 Nisan 2010.	Sunuldu
Ekin Aslan, Yakup Hameş	Sinüzoidal Kırışıklı Paralel Plakalı Empedans Yüklü Dalga Kılavuzdan TE Modunda Elektromanyetik Dalgaların Işınımı	URSI-TÜRKİYE Ulusal Kongresi, Kuzey Kıbrıs, 25-27 Ağustos 2010	Sunuldu
Ekin Aslan, Sabri Kaya, Mustafa Turkmen	Kutuplanma Bağımsız Plazmonik Nanoanten Dizilerinde Metal Kalınlığının Etkisinin İncelenmesi	URSI-TÜRKİYE'2014 VII. Bilimsel Kongresi, 28-30 Ağustos 2014, ELAZIĞ, pp. 363-365.	Sunuldu
Erdem Aslan, Ekin Aslan, Semih Korkmaz, Sabri Kaya, O. Galip Saracoglu, Mustafa Turkmen	Biyoalgılama Uygulamaları için Çoklu-Rezonant Metamalzeme Soğurucu Tasarımı	20. Biyomedikal Mühendisliği Ulusal Toplantısı (Biyomut 2016), İzmir, Türkiye, 3-5 Kasım 2016, pp.206-209.	Sunuldu