TC.
KAYSERİ ÜNİVERİSTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK – ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

TUNGSTEN DİSÜLFİT İLE DESTEKLENEN ALTIN NANOANTEN DİZİLERİNİN FAZ DEĞİŞİM ANALİZLERİ

Hazırlayan
Duygu GÜMÜŞCÜ

Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Ekin ASLAN

Yüksek Lisans Tezi

Haziran 2022, Kayseri

TC.

KAYSERİ ÜNİVERİSTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK – ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

TUNGSTEN DİSÜLFİT İLE DESTEKLENEN ALTIN NANOANTEN DİZİLERİNİN FAZ DEĞİŞİM ANALİZLERİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Hazırlayan
Duygu GÜMÜŞCÜ

Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Ekin ASLAN

Bu çalışma Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 121E518 numaralı proje, Yurt İçi Öncelikli Alanlar Burs Programı (2210-C) ile ve Kayseri Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Merkezi tarafından FBA-2022-1057 numaralı proje ile desteklenmiştir.

Haziran 2022, Kayseri

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK

Bu tezin kendi çalışmam olduğunu, planlanmasından yazımına kadar hiçbir aşamasında etik dışı davranışımın olmadığını, tezdeki bütün bilgileri akademik ve etik kurallar içinde elde ettiğimi, tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara kaynak gösterdiğimi ve bu kaynakları kaynaklar listesine aldığımı, tez çalışması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını beyan ederim.

Duygu GÜMÜŞCÜ

T.C.

KAYSERİ ÜNİVERSİTESİ

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürlüğü

Anabilim Dalı : Elektrik-Elektronik Mühendisliği

Program Adı : Yüksek Lisans

Tez Başlığı : Tungsten Disülfit ile Desteklenen Altın Nanoanten Dizilerinin Faz Değişim Analizleri

Yukarıda bilgileri verilen tez çalışmasının a) Giriş, b) Ana bölümler ve c) Sonuç kısımlarından oluşan (Kapak, Önsöz, Özet, İçindekiler ve Kaynakça hariç) toplam 44 sayfalık kısmına ilişkin 18/07/2022 tarihinde ***Turnitin*** intihal programından aşağıda belirtilen filtreleme uygulanarak alınmış olan özgünlük raporuna göre tezin benzerlik oranı**: % 2'** dir.

Uygulanan filtrelemeler:

1- Giriş dahil

2- Ana Bölümler dahil

3- Sonuç dahil

4- Alıntılar dahil

5- Kapak hariç

6- Önsöz ve Teşekkür hariç

7- İçindekiler hariç

8- Kaynakça hariç

9- Özet hariç

10- Yedi (7) kelimeden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç Kayseri Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Önerisi Hazırlama, Tez Yazma ve Teslim Yönergesini inceledim ve bu yönergede belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini, aksinin tespit edileceği muhtemel durumlarda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Gereğini bilgilerinize arz ederim. ……../……./…….

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Ekin ASLAN Öğrenci: Duygu GÜMÜŞCÜ

YÖNERGEYE UYGUNLUK

Tungsten Disülfit ile Desteklenen Altın Nanoanten Dizilerinin Faz Değişim Analizleri adlı Yüksek Lisans Tezi, Kayseri Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi'ne uygun olarak hazırlanmıştır.

Tezi Hazırlayan	Danışman
Duygu GÜMÜŞCÜ	Dr. Öğr. Üyesi Ekin ASLAN

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü Anabilim Dalı Başkanı

Doç.Dr. Engin Cemal MENGÜÇ

ONAY

Dr. Öğr. Üyesi Ekin ASLAN danışmanlığında **Duygu GÜMÜŞCÜ** tarafından hazırlanan "**Tungsten Disülfit ile Desteklenen Altın Nanoanten Dizilerinin Faz Değişim Analizleri**" adlı bu çalışma jürimiz tarafından Kayseri Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü **Elektrik-Elektronik Mühendisliği** Anabilim Dalında **Yüksek Lisans** tezi olarak kabul edilmiştir.

28 / 06 / 2022

JÜRİ:

Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Ekin ASLAN

Üye : Doç. Dr. Mustafa TÜRKMEN

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Ahmet GANİ

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

……. /……../ ……

Doç. Dr. Engin Cemal MENGÜÇ

Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ / TEŞEKKÜRLER

Öncelikle bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde emeğini esirgemeyen, sabır gösterip beni geliştiren ve bilgisiyle vizyon katan değerli tez danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Ekin ASLAN'a destek ve katkılarından dolayı sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışma sürecinde yanımda olan aileme ve özellikle de anneme teşekkürü bir borç bilirim.Ayrıca yoğun çalışma dönemlerimde yanımda olup, beni hayatımın her alanında destekleyen sevgili eşim Ertuğrul GÜMÜŞCÜ'ye teşekkür ederim.

Duygu GÜMÜŞCÜ

KAYSERİ, 2022

TUNGSTEN DİSÜLFİT İLE DESTEKLENEN ALTIN NANOANTEN DİZİLERİNİN FAZ DEĞİŞİM ANALİZLERİ

DUYGU GÜMÜŞCÜ

Kayseri Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü,

Yüksek Lisans Tezi, Haziran 2022

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Ekin ASLAN

ÖZET

En genel tanımıyla doğada var olmayan malzemelere metamalzeme adı verilir. Yapay dizilimlere sahip kompozitler olan bu malzemeler olağanüstü optik özellikler sergiler. Yapı taşları olan dielektrik veya metal motifler gelen elektromanyetik alanlara karşı rezonans gösterebilir. Metayüzeyler ise metamalzemelerin iki boyutlu sürümleridir. İletim veya yansımada ışığın fazını, genliğini ve polarizasyonunu yerel olarak değiştirebilirler. Ayrıca ışığın dalga cephesini düzlemsel elemanlarla tam olarak kontrol edebilirler. Bu bağlamda da "düz optik" olarak adlandırılan "düzlemsel fotonik"i gerçekleştirme konusunda oldukça başarılıdırlar.

Bu çalışmada tungsten disülfit ile desteklenmiş plazmonik nanosaçıcılarla, tam periyot aralığında faz gradyanı oluşturarak kendine özgü özelliklere sahip farklı metayüzeyler tasarlanmıştır. Tez çalışması kapsamındaki nanosaçıcıların tasarımı için zaman domeninde sonlu farklar yöntemi kullanılarak nümerik analizler yapılmıştır. Öncelikle simülasyonlarda temel nanoanten olarak belirlenen altın nanosaçıcıların optik spektrumdaki rezonant davranışları incelenmiştir. Temel nanoanten yapısının farklı rotasyon ve geometrik parametrelerdeki türevi olan nanoantenlerin, ele alınan rezonant dalga boyundaki faz gradyanı oluşturma yetisi analiz edilmiştir. Son olarak da tungsten disülfit ile farklı versiyonlarda kaplanmış nanoantenlerin bu faz gradyanı yetilerine etkisi araştırılmıştır. Gelecekteki çalışmalarımızda, görünür spektral aralıklarda büyük iletim genliklerine sahip olan tungsten disülfit katmanlar ile hem uygun faz değişimi çözünürlüğü hem de uygun rezonant genlik sağlanması beklenmektedir.

Anahtar Kelimeler: Nanosaçıcı; faz gradyanı; metayüzey; plazmonikler

PHASE CHANGE ANALYZES OF GOLD NANOANTENNA ARRAYS SUPPORTED BY TUNGSTEN DISULFIDE

DUYGU GÜMÜŞCÜ

Kayseri University Institute of Graduate Education

Ms. D Program Thesis, June 2022

Supervisor: Asst. Prof. Ekin ASLAN

ABSTRACT

In its most general definition, materials that do not exist in nature are called metamaterials. These materials, which are composites with artificial arrays, exhibit extraordinary optical properties. Dielectric or metal motifs, which are the building blocks, can resonate against incoming electromagnetic fields. Metasurfaces are two-dimensional versions of metamaterials. They can locally change the phase, amplitude, and polarization of light in transmission or reflection. They can also precisely control the wavefront of light with planar elements. In this context, they are quite successful in realizing “planar photonics”, which is called “flat optics”.

In this study, different metasurfaces with unique properties were designed with plasmonic nanoscatterers supported by tungsten disulfide created a phase gradient in the full period range. For the design of the nanoscatterers in this thesis, numerical analyzes were performed using the finite difference method in the time domain. First of all, the resonant behavior of the gold nanoscatterers, which were determined as the basic nanoantenna in the simulations, was investigated in the optical spectrum. The phase gradient formation of the nanoantennas, which are the derivatives of the basic nanoantenna structure in different rotation and geometric parameters, at the considered resonant wavelength was analyzed. Finally, the effect of nanoantennas coated with tungsten disulfide in different versions on this phase gradient was investigated. In our future studies, it is expected to provide both appropriate phase change resolution and appropriate resonant amplitude with tungsten disulfide layers, which have large transmittance values in the visible spectral ranges.

Key Words: Nanoscatterer; phase gradient; metasurface; plasmonics

İÇİNDEKİLER

TUNGSTEN DİSÜLFİT İLE DESTEKLENEN ALTIN NANOANTEN DİZİLERİNİN FAZ DEĞİŞİM ANALİZLERİ

Sayfa

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK i
TEZ İNTİHAL RAPORU TESLİM FORMU ii
YÖNERGEYE UYGUNLUK iii
ONAY iv
ÖNSÖZ / TEŞEKKÜRLER v
ÖZET vi
ABSTRACT vii
İÇİNDEKİLER viii
KISALTMALAR VE SİMGELER x
ŞEKİLLER LİSTESİ xiv
TABLOLAR LİSTESİ xvii

GİRİŞ 1

BİRİNCİ BÖLÜM

TEMEL TANIMLAR 2
Metamalzemeler ve Metayüzeyler 2

İKİNCİ BÖLÜM

MATERYAL VE YÖNTEM 14

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

TEMEL ANTEN YAPISI VE TUNGSTEN DİSÜLFİT İLE DESTEKLENEN ANTEN YAPILARININ SPEKTRAL DAVRANIŞLARI VE FAZ ANALİZLERİ 22

3.1. Temel Anten Yapısının, Rotasyonlu Anten Yapılarının ve Kolları WS_2 ile Kaplanmış Anten Yapılarının Spektral Davranışları 22

3.2. Tasarlanan Antenlerin Faz Analizi 27

DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

TARTIŞMA-SONUÇ VE ÖNERİLER 35

TEZ ÇALIŞMASINDAN ÜRETİLEN ESERLER 36

KAYNAKÇA 37

ÖZGEÇMİŞ

KISALTMALAR VE SİMGELER

Au	Altın
dB	Desibel
ED	Elektrik Dipol
FDTD	Finite Difference Time Domain; Zaman Domaninde Sonlu Faktörler
FIR	Far infrared; Uzak Kızılötesi
IR	İnfrared; Kızılötesi
MD	Manyetik Dipol
MgF_2	Magnezyum Florür
NIR	Near infrared; Yakın Kızılötesi
R	Reflectance; Yansıma
PB Faz	Pancharatnam–Berry-faz
RO	Refractive Optics; Kırınım Optikler
RGB	Red-Green-Blue; Kırmızı-Yeşil-Mavi
SiO_2	Silisyum Dioksit
Si_3N_4	Silisyum Nitrür
T	Transmitance; Geçiş
TMD	Transition Metal Dichalcogenide; Geçiş Metali Dialkojenit
TMDC	Transition Metal Dichalcogenide; Geçiş Metali Dialkojenit
VIS	Visible; Görünür
WS_2	Tungsten Disülfit
2D	2-Dimensional; 2 Boyutlu
3D	3-Dimensional; 3 Boyutlu

â	Antisimetrik Eksen
C	Nanoanten Kolları Arasındaki Uzaklık
$\frac{d}{dx}$	x'e Göre Kısmi Türev
$\frac{d}{dy}$	y'ye Göre Kısmi Türev
E	Elektrik Alan
E_x	$x-$ Doğrultusundaki Elektrik Alan
E_y	$y-$ Doğrultusundaki Elektrik Alan
E_z	$z-$ Doğrultusundaki Elektrik Alan
ε	Dielektrik Geçirgenlik
$\varepsilon_{\|\|}$	Düzlem İçi Tensör Bileşeni
ε_{zz}	Düzlem Dışı Tensör Bileşeni
Φ	Faz Farkı
$\phi(x,y)$	Faz Profili
ϕ_{ij}	Faz Pikseli
FF^a	Anten Yapısı İçin Faz Farkı
K_x	$x-$Düzleminde Faz Gradyanı.
K_y	$y-$Düzleminde Faz Gradyanı.
k_i	Gelen Dalga Sayısı
k_t	Yansıyan Dalga Sayısı
k_o	Boş Uzayın Dalga Sayısı
k	Dalga Sayısı
L	Nanoanten Kol Uzunluğu
λ	Dalga Boyu

λ_c	Malzeme Kayıplarının Kesilmesini ve WS_2 Soğurumunda Önemli Bir Düşüşü Gösteren Dalga Boyu
μ	Manyetik Geçirgenlik
h	Nanodisk Yüksekliği
H	Manyetik Alan
H_z	$z-$ Doğrultusundaki Manyetik Alan
μm	Mikrometre
nm	Nanometre
n_{WS_2}	WS_2 Kompleks Kırılma İndisi
n_s	Çevresel kırılma indisi
n_t	Kırılma Ortamının Kırılma İndisi
n_i	Geliş Ortamının Kırılma İndisi
n'	Kırılma İndisinin Gerçek Kısmı
n''	Kırılma İndisinin Sanal Kısmı
P_x	$x-$ eksenindeki periyodiklik
P_y	$y-$ eksenindeki periyodiklik
π	Pi Sayısı
R_n	Nanodisk Yarıçapı
$\hat{s}$	Simetrik Eksen
t_{Au}	Altın Katman Kalınlığı
z_1	Birinci Maksimum Pozitif Elektrik Alan Konumu
z_2	İkinci Maksimum Pozitif Elektrik Alan Konumu
z_1^a	Anten Yapısı için Birinci Maksimum Pozitif Elektrik Alan Konumu
z_2^a	Anten Yapısı için İkinci Maksimum Pozitif Elektrik Alan Konumu

W	Nanoanten Kol Genişliği
θ_i	Geliş Açısı (Normal Yansımada Aynı Düzlemde)
θ_r	Kırılma Açısı (Normal Yansımada Aynı Düzlemde)
θ_t	Yansıma Açısı (Normal Yansımada Aynı Düzlemde)
φ_r	Anormal Yansıma Açısı
φ_t	Anormal Kırılma Açısı

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Dielektrik geçirgenlik (ε) ve manyetik geçirgenlik (μ) ile karakterize edilen malzeme sınıflandırması**.** 3
Şekil 1.2. Genel yansıma ve kırılmanın pozitif faz gradyanı için şematik gösterimi. 5
Şekil 1.3. Faz gradyanı için plazmonik V-şekilli anten yaklaşımı. 6
Şekil 1.4. (a) Yakın kızılötesi bir boşluk-plazmon metayüzeyinin şematik görünümü. (b) H-şeklindeki nanoantenlerden oluşan fabrikasyon boşluk-plazmon metayüzeyi. 7
Şekil 1.5. Burada, geniş bir ayar aralığı ile 600 μm ile 1400 μm arasında polarizasyondan bağımsız çalışma ve yüksek iletim sağlayan, elastik alttaşlara dayalı, mekanik olarak ayarlanabilen dielektrik meta yüzeyleri sunulmuştur. 8
Şekil 1.6. Huygens metayüzeyine gelen bir y-polarize düzlem dalganın manyetik alanının (Hz) simüle edilmiş anlık dağılımı. 8
Şekil 1.7. Faz kontrolü için bir metayüzey şeması. 9
Şekil 1.8. (a) WS_2 nanoanten tabanlı bir tasarım. (b) WS_2 dielektrik geçirgenlik bileşenleri. (c) Soğurma ve yansıma spektrumları. 12
Şekil 1.9. Değişken kalınlıktaki silikon tabakası ile bir silikon oksit alt tabaka üzerindeki disk WS_2 nanodisk dizisi. 12

Şekil 2.1. Faz pikselleri oluşturmak için kullanılan, farklı büklüm açıları ve farklı rotasyonlarda V-şeklindeki altın nanosaçıcılar. 15
Şekil 2.2. V-şekilli metamoleküller kullanılarak gerçekleştirilen saptırıcı metayüzeyin elektron mikroskobu görüntüsü. 16
Şekil 2.3. WS_2'nin görünür frekanslardaki spektral kırılma indisi. 17
Şekil 2.4. Simülasyon ayarlarının gösterimi. 18
Şekil 2.5. Tasarımı yapılan temel anten yapısının (a) kuşbakışı, (b) perspektif ve (c) yandan görünümleri. 19
Şekil 2.6. Rotasyon tabanlı tasarımların geometrik gösterimleri. 19
Şekil 2.7. (a) Üst anten katmanının bir kolu WS_2 ile kaplanmış temel anten (b) Üst anten katmanının iki kolu WS_2 ile kaplanmış temel anten (c) Bir kolu WS_2 ile kaplanmış anten versiyonları. (d) İki kolu WS_2 ile kaplanmış anten versiyonları. 20
Şekil 2.8. Faz farkının belirlenmesi 21

Şekil 3.1. Temel anten yapısının spektral davranışları 23
Şekil 3.2. Seçilen geometrik parametreler için temel anten yapısının yansıma ve iletim spektrumları.....24
Şekil 3.3. Seçilen geometrik parametreler için rotasyonlu anten yapılarının yansıma ve iletim spektrumları: (a) Temel anten yapısı, (b) 15° rotasyonlu anten yapısı, (c) 30° rotasyonlu anten yapısı, (d) 45° rotasyonlu anten yapısı, (e) 60° rotasyonlu anten yapısı ve (f) 75° rotasyonlu anten yapısı için. 24
Şekil 3.4. Seçilen geometrik parametreler için bir kolu WS_2 kaplı rotasyonlu anten yapılarının yansıma ve iletim spektrumları: (a) Bir kolu WS_2 kaplı temel anten yapısı, (b) bir kolu WS_2 kaplı 15° rotasyonlu anten yapısı, (c) bir kolu WS_2 kaplı 30° rotasyonlu anten yapısı, (d) bir kolu WS_2 kaplı 45° rotasyonlu anten yapısı, (e) bir kolu WS_2 kaplı 60° rotasyonlu anten yapısı ve (f) bir kolu WS_2 kaplı 75° rotasyonlu anten yapısı için. 25
Şekil 3.5. Seçilen geometrik parametreler için iki kolu WS_2 kaplı rotasyonlu anten yapılarının yansıma ve iletim spektrumları: (a) İki kolu WS_2 kaplı temel anten yapısı, (b) iki kolu WS_2 kaplı 15° rotasyonlu anten yapısı, (c) iki kolu WS_2 kaplı 30° rotasyonlu anten yapısı, (d) iki kolu WS_2 kaplı 45° rotasyonlu anten yapısı, (e) iki kolu WS_2 kaplı 60° rotasyonlu anten yapısı ve (f) iki kolu WS_2 kaplı 75° rotasyonlu anten yapısı için. 26
Şekil 3.6. Temel anten yapısının ve rotasyon tabanlı tasarımların faz farkı analizleri: (a) Temel anten ve alan dağılımı, (b) 15° rotasyonlu anten ve alan dağılımı, (c) 30° rotasyonlu anten ve alan dağılımı, (d) 45° rotasyonlu anten ve alan dağılımı, (e) 60° rotasyonlu anten ve alan dağılımı, (f) 75° rotasyonlu anten ve alan dağılımı. 28
Şekil 3.7. Bir kol WS_2 kaplı temel anten yapısının ve bir kol WS_2 kaplı rotasyon tabanlı tasarımların alan dağılımları: (a) Temel anten ve alan dağılımı, (b) 15° rotasyonlu anten ve alan dağılımı, (c) 30° rotasyonlu anten ve alan dağılımı, (d) 45° rotasyonlu anten alan dağılımı, (e) 60° rotasyonlu anten ve faz grafiği, (f) 75° rotasyonlu anten ve alan dağılımı**.** 29
Şekil 3.8. İki kol WS_2 kaplı temel anten yapısının ve iki kol WS_2 kaplı rotasyon tabanlı tasarımların alan dağılımları: (a) Temel anten ve alan dağılımı, (b) 15° rotasyonlu anten ve alan dağılımı, (c) 30° rotasyonlu anten ve alan dağılımı, (d) 45° rotasyonlu anten ve

alan dağılımı, (e) 60° rotasyonlu anten ve alan dağılımı, (f) 75° rotasyonlu anten ve alan dağılımı**.** 30
Şekil 3.9. Tablo 3.1, 3.2 ve 3.3'teki faz farkı değerlerine göre oluşturulmuş faz grafiği. 34

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 3.1. Temel anten ve rotasyonlu formlarının faz farkı değerleri. 31
Tablo 3.2. Bir kolu WS_2 kaplı antenlerin faz farkı değerleri.....32
Tablo 3.3. İki kolu WS2 kaplı antenlerin faz farkı değerleri.....33

GİRİŞ

Bu tezin amacı görünür bölgede çalışan metayüzey tasarımları için [0, 2π] tam aralığında yüksek çözünürlüklü faz gradyanı oluşturan özgün meta-hücre tasarımlarının yapılmasıdır. İstenen faz gradyanı aperiyodik dizilimli, WS_2 ile kısmen kaplanmış Au nanosaçıcılarla sağlanacaktır. Bu amaçla tez çalışması kapsamında nanosaçıcıların tasarımı için zamanda sonlu farklar yöntemi (FDTD; Finite-difference time-domain) kullanılarak nümerik analizler yapılacaktır. Öncelikle simülasyonlarda temel nanoanten olarak belirlenen Au nanosaçıcıların optik spektrumdaki rezonant davranışları incelenecek ve ele alınan her rezonant dalga boyunda temel nanoanten yapısının farklı rotasyon ve geometrik parametrelerdeki türev nanoantenlerin faz gradyanı oluşturma yetisi analiz edilecektir. Son olarak da WS_2 ile farklı versiyonlarda kaplanmış nanoantenlerin bu faz gradyanı yetilerine etkisi analiz edilecektir. Görünür ve kızılötesi spektral aralıklarda büyük geçirgenlik değerlerine sahip olan, desenli olduklarından iyi tanımlanmış rezonansları destekleyebilen WS_2 katmanlar ile hem uygun faz değişimi hem uygun rezonant genlik parametrelerinde çözünürlük artışı beklenmektedir.

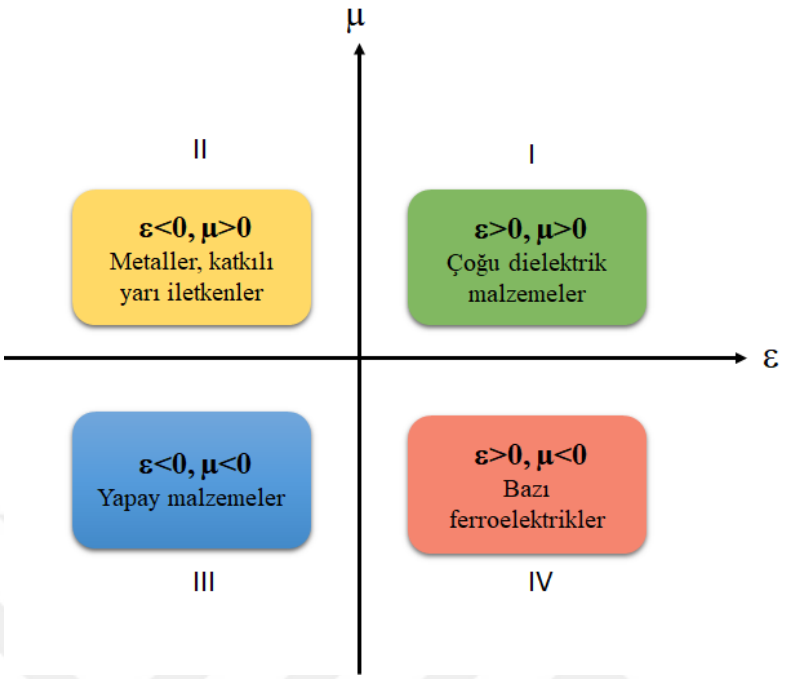
Tez dört bölümden oluşmuştur. Birinci bölümde metamalzemeler ve metayüzeylerle ilgili temel tanımlardan bahsedilmiştir. İkinci bölümde materyal ve yöntem kısmı anlatılmış. Üçüncü bölümde temel anten yapısı ve tugsten disülfit ile desteklenen anten yapılarını spektral davranışları ve faz analizleri incelenmiştir. Dördüncü bölümde ise tartışma sonuç ve önerileri sunularak tez tamamlanmıştır.

BİRİNCİ BÖLÜM

TEMEL TANIMLAR

Metamalzemeler ve Metayüzeyler

Çalışma dalga boylarından daha küçük ölçekte (alt dalga boylu) periyodik/aperiyodik metal veya dielektrik yapılardan oluşan metamalzemelerin iki boyutlu sürümü olan metayüzeyler iletilen/yansıyan ışığın fazını, genliğini ve polarizasyonunu yerel olarak değiştirebilirler. Özellikle faz gradyanı oluşturabilen çeşitli meta-moleküller yoluyla ışığın fazına yön verebilen bu elektromanyetik malzemeler, ışığı şekillendirmede ve holografik etki üretmede efektif sonuçlar sunmaktadır [1]. Her bir meta-molekülün teşkil ettiği kademeli ve iyi çözünürlükteki faz gradyanı ve sabit rezonant genlik cevabı ile daha verimli optik davranışlar elde edilebilir [2]. İçeriğindeki kompnentlerin özel bir şekilde düzenlenmesiyle oluşturulan bu yapay malzemelerin özellikleri, içindeki bileşenlerin özelliklerinden farklıdır. Bu benzersiz elektromanyetik özellikleri nedeniyle elektromanyetik dalganın genliği, yönü, polarizasyonu, dalga boyu ve fazı etkili ve kolay bir şekilde kontrol edebilir [3]. Metamalzemeler geleneksel malzemelere kıyasla ultra ince özellikler gibi benzeri görülmemiş avantajlara sahiptir. Örneğin, optik anahtarlar, optik rezonatörler, dalga kılavuzları ve optik filtreler gibi [3]. Metamalzemelerin elektromanyetik özelliklerinin aktif ayarlanabilirliği ve değiştirilmesi ise iki şekilde elde edilir. Birincisi bireysel meta-molekül rezonatörlerinin şeklini değiştirerek veya aralarındaki yakın alan etkileşimlerini manipüle etmektir. İkincisi ise, meta-moleküler yapının sıralarının göreceli konumunu değiştirmek veya üç boyutlu metamoleküller oluşturmaktır [4]. Elektromanyetizmada, dielektrik geçirgenlik (ε) ve manyetik geçirgenlik (μ), bir ortamın elektromanyetik (EM) özelliğini karakterize eden iki temel parametredir [5]. Şekil 1.1'de malzeme sınıflandırılması gösterilmiştir.



Şekil 1.1. *Dielektrik geçirgenlik (ε) ve manyetik geçirgenlik (μ) ile karakterize edilen malzeme sınıflandırması.*

Sağ üst kadran (kadran I), pozitif manyetik ve pozitif dielektrik geçirgenliğe sahip çoğu dielektrik malzemeleri kapsar. Kadran II, belirli frekanslarda negatif geçirgenlik gösterebilen metalleri, ferroelektrik malzemeleri ve katkılı yarı iletkenleri kapsar. Bölge IV, negatif geçirgenliğe sahip bazı ferrit malzemelerden oluşur, ancak manyetik tepkileri mikrodalga frekanslarının üzerinde hızla kaybolur. Kadran III, malzeme parametre alanındaki en ilginç bölgedir; hem manyetik hem de dielektrik geçirgenlikleri negatiftir. Metamalzemelerin bilinen en iyi sınıfı, ε ve/veya μ'nün negatif olduğu ikinci ve üçüncü kadranlardır [5], [6].

Son on yılda, negatif kırılma, mükemmel lensleme, ışın ayrıma, polarizasyon değiştirme ve gizleme gibi benzersiz özellikler sergileyen metamalzemeler üzerinde büyük ilerlemeler kaydedilmiştir [7]–[12]. Bu uygulamalardan mükemmel lensleme, ışın ayırma ve polarizasyon değiştirme gibi fonksiyonları metayüzeyler üstlenmektedir.

3D metamalzemelerin imalat karmaşıklığı şimdiye kadar optik dalga boylarındaki teknolojik uygulamaları engellemiştir. Bu durum metayüzeylerin ortaya çıkmasıyla kökten değişmiştir [13]. Örneğin refraktif optik (RO; refractive optics), birçok açıdan çok gelişmiş olsa da lensler gibi çok hassas yüzeyleri şekillendirmeyi ve çok sayıda

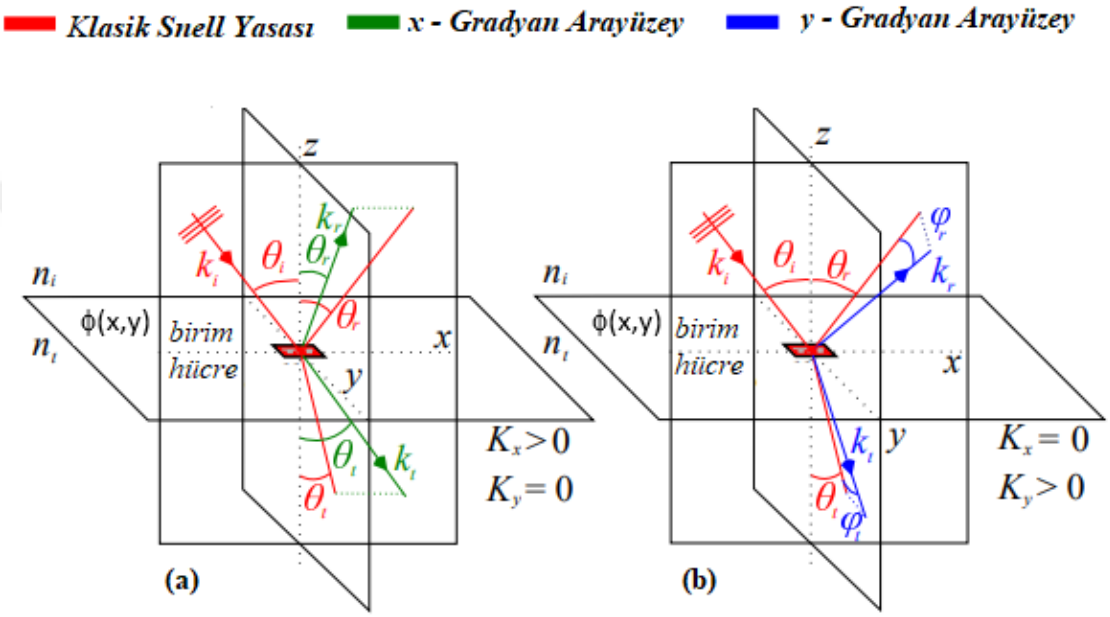
elemanın optik hizalanmasını gerektiren hantal ve genellikle pahalı bileşenlere yol açan asırlık cam kalıplama teknolojisine dayanmaktadır [14]. Fakat metayüzeyler, mikrodalgadan görünür frekanslara kadar dalgaları bloke etmek, soğurmak, odaklamak, dağıtmak veya yönlendirmek için benzersiz yeteneklere sahiptir. Yüzey dalgaları, faz veya grup hızını manipüle etmek için gerekli empedansa sahip metayüzey birim hücreleri tasarlanarak kontrol edilebilir. Birim hücreler, dalgaları belirli yönlere yönlendirebilecek veya bölebilecek biçimde şekillendirilerek saçılma kontrolü için gerekli uygulamalarda kullanılırlar [14], [15].

Metayüzeyler, optik özelliklerinde ani değişiklikler sergileyerek geleneksel optik aygıtlardaki yayılma etkisine olan bağımlılığı azaltır [16]–[19]. Aperiyodik saçıcı dizilerinden veya optik olarak ince filmlerden tasarlanabilirler. Kontrol edilebilir ani optik özellik değişiklikleri, ışık ve saçıcılar [20] arasındaki etkileşimin sonucudur ve bu saçıcılar metalik/dielektrik mikro/nanoyapılardır [3], [21]. Metayüzey tasarımlarında; uzamsal olarak değişen bir optik tepki oluşturmak için, alt dalga boyunda boyutları olan ve değişik geometrilerdeki aperiyodik nanoanten dizilimleri kullanılır. Böylece optik dalga cepheleri, istenildiği gibi şekillendirilebilir. Kırınımlı yüzeylerin dışına çıkıp metayüzey birim hücreleri tasarlayarak ışığın faz değişimi, genliği ve polarizasyonu daha etkili bir şekilde kontrol edilebilir [14]. Bu durumda var olan optik sistemlere metayüzey eklenebilir ya da tüm geleneksel optik bileşenler yeniden tasarlanabilir. Bu alandaki ilk girişim, sapma açısının faz gradyanı tarafından kontrol edildiği genelleştirilmiş Snell ve yansıma yasalarını karşılayan sabit faz gradyanı (gradyan metayüzey) ile bir metayüzey tasarımıdır [14], [22].

Metayüzeyler en geniş kapsamda, geometrik metayüzeyler [23], [24], metal bir ekranın yakınındaki metayüzeyler [25]–[27], elektrik ve manyetik dipol tepkileri içeren metayüzeyler [28], [29] ve manyeto-elektrik kuplajlı metayüzeyler [30], [31] olmak üzere dört farklı şekilde sınıflara ayrılmaktadır.

Pratikte geleneksel düz optik bileşenler kırınım ızgaraları ile sınırlıdır. Bu ızgaraların işlevselliği, metayüzeyler yoluyla faz gradyanı dahil edilerek düzenlenebilir. Böylece yansıyan veya iletilen ışık, ışığın anormal yansıma ve kırılması ile sonuçlanan ek bir davranış kazanacaktır. Şekil 1.2(a) ve Şekil 1.2 (b)'de gösterilen kırmızı yansımalar klasik Snell yasası olan normal yansımadır. Mavi ve yeşil yansımalar ise ışığın

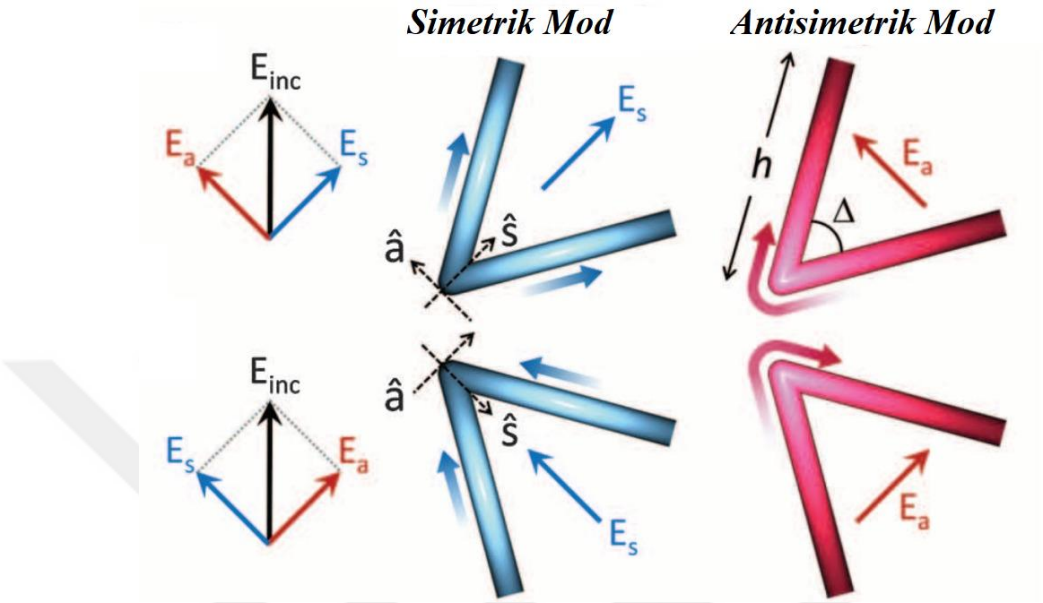
anormal yansımalarını göstermektedir. Normal yansımada θ_i geliş açısı olmak üzere, aynı düzlemde yansıma yapan θ_i ve θ_t, kırılma ve yansıma açıları birbirine eşittir. Anormal yansımada ise, ya yeşil ile gösterilen durumda olduğu gibi, aynı düzlemdeki kırılma ve yansıma açıları farklıdır; ya da mavi ile gösterilen durumda olduğu gibi ışık kırılır veya yansırken sapma açısı oluşturarak (φ) farklı düzlemlere sapar [32].



Şekil 1.2. *Genel yansıma ve kırılmanın pozitif faz gradyanı için şematik gösterimi.*

Şekil 1.2'ye göre [32] gelen dalga, tüm arayüzün boyutuyla karşılaştırılabilir bir çapa sahip bir düzlem dalga olarak kabul edilir. Gelen dalga $x0z-$ düzlemi üzerinde yer alır ve dalga vektörü kırmızıyla gösterilir. Klasik Snell yasasındaki, sıfır-gradyan arayüzey durumunda; gelen, yansıyan ve kırılan dalgalar, sırasıyla θ_r ve θ_t yansıma ve kırılma açıları ile aynı $x0z-$ düzleminde bulunur. Bu durum Şekil 1.2(a) ve Şekil 1.2(b)'de düz kırmızı çizgilerle gösterilmiştir. K_x ve K_y sırasıyla $x-$ ve $y-$ doğrultularındaki faz gradyanları olmak üzere bu gradyanlarının sıfırdan farklı olduğu durumlar iki şekilde açıklanabilir. $x-$ gradyan arayüzey söz konusu ise ($K_x > 0$ ve $K_y = 0$), yansıyan ve kırılan dalgaların açıları değişecek, ancak yine geliş düzleminde ($x0z-$ düzleminde) kalacaktır. Bu durum Şekil 1.2(a)'da yeşil renkteki ışınlarla ve yeşil renkteki yansıma ve kırılma açılarıyla ifade edilmiştir. $y-$ gradyan arayüzey söz konusu olduğunda da ($K_x = 0$ ve $K_y > 0$), yansıyan ve kırılan

dalgalar, φ_r ve φ_t açılarında geliş düzleminin dışına yayılacaktır. Bu durum Şekil 1.2(b)'de mavi renkteki ışınlarla ve mavi renkteki açılarla gösterilmiştir [32].



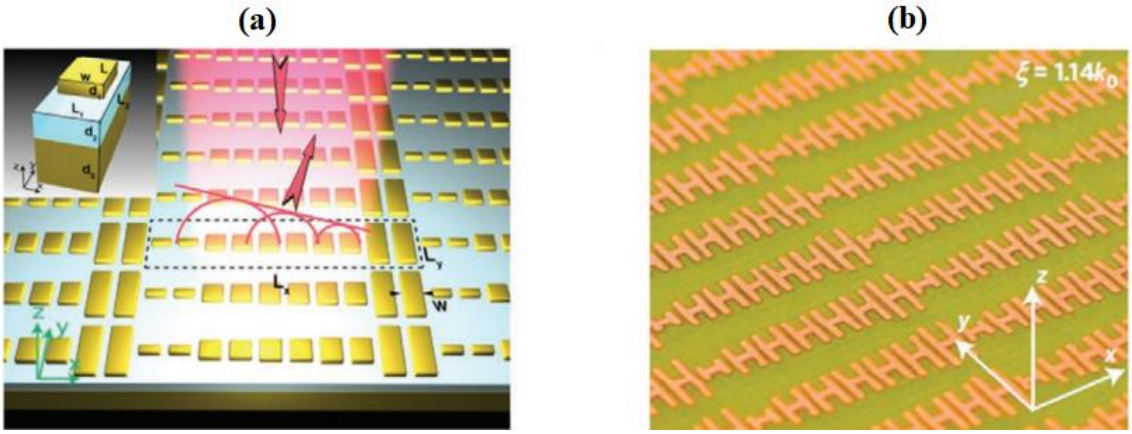
Şekil 1.3. *Faz gradyanı için plazmonik V-şekilli anten yaklaşımı.*

Yukarıda bahsedilen faz gradyanları oluşturabilmek için başvurulan yaklaşımlardan biri çoklu rezonant metayüzeylerdir. Bu tür bir çalışma da belirli bir açıyla birbirine bağlanan eşit uzunluktaki iki nanoçubuktan oluşan ve 0 ila 2π arasında bir faz değişimine izin veren V şeklindeki antenlerdir. Bu plazmonik antenler, Şekil 1.3'te gösterilen akım dağılımlarına göre simetrik ve antisimetrik modlar olarak karakterize edilen iki rezonans modunu destekler [22], [33], [34]. Buradaki simetrik ve antisimetrik modlar, sırasıyla $\hat{s}$ ve $\hat{a}$ eksenleri boyunca, gelen alan bileşenleri tarafından uyarılır. Şematik akım dağılımı, akım akışının yönünü gösteren oklarla ve daha büyük akımlar için daha parlak renklerle temsil edilmektedir [33], [22].

Diğer bir metayüzey türü ise boşluk-plazmon yüzeylerdir. Plazmon oda sıcaklığında enerjisini harcayarak ışık enerjisini içerisine hapsedebilen, metal-dielektrik bileşimli nanoboyuttaki yapılardır. Bu özellikleri sayesinde birçok optik uygulamada kullanılır. Plazmonik yapılar ise alt dalga boylu malzemeler içinde elektromanyetik (EM) alanların nasıl hapsedildiğini tanımlar. Bu yapılar nanofotoniğin büyük bir bölümünü oluşturmaktadır. Plazmoniklerin çalışma nedeni olan plazmonlar ışık ile etkileşen metallerdeki serbest elektron osilasyonları olarak tanımlanır. Plazmonik yapılar EM

radyasyon ile dielektrik-metal arayüzündeki iletim elektronları arasındaki etkileşime dayanır ve böylece yüzey dalgaları meydana gelir.

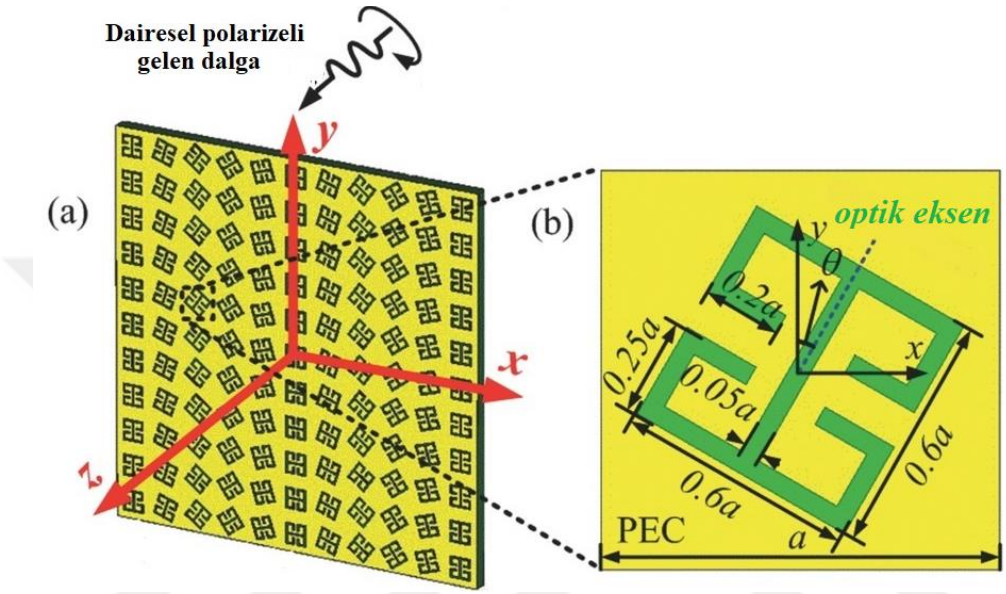
Metal-izolatör-metal yapıyı temel yapı taşı olarak kullanan yansıtıcı dizilerden metayüzeyler, metalik anten dizilerinin altına bir dielektrik aralayıcı ve metalik bir zemin tabakası eklenerek inşa edilir. Bu yaklaşımda nanoantenler ve zemin düzlemi üzerindeki indüklenen akımlar antiparaleldir. Böylece izolatör içinde boşluk yüzeyi, plazmon modları olarak bilinen güçlü bir manyetik alan oluşturur [35]. Şekil 1.4(a) ve Şekil 1.4(b), sırasıyla yakın kızılötesi ve mikrodalga rejimlerinde çalışan nanoçubuk antenlerinin [36] ve H şeklindeki antenlerin tasarımlarını göstermektedir [37].



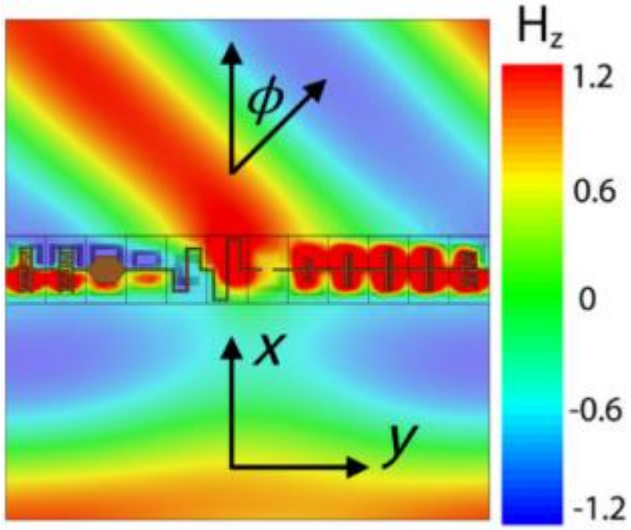
Şekil 1.4. *(a) Yakın kızılötesi bir boşluk-plazmon metayüzeyinin şematik görünümü. (b) H-şeklindeki nanoantenlerden oluşan fabrikasyon boşluk-plazmon metayüzeyi.*

Şekil 1.4(a), üst katmanı aperiyodik Au (altın) nanoçubuktan oluşan bir Au nanoanten-MgF_2 izolatör-Au ayna katmanı şeklindeki temel yapı taşını ifade etmektedir. Şekil 1.4(b) faz tepkisini manipüle etmek için değişen kol uzunluklarına sahip H-şekilli antenler kullanan fabrikasyon bir mikrodalga boşluk-plazmon metayüzeyini göstermektedir [37]. Bir diğer metayüzey çeşidi ise Pancharatnam–Berry faz metayüzeyleridir. Daha önce belirtilen metayüzeyler faz veya genlik varyasyonları değişen anten geometrilerine dayanmaktadır. Fakat Pancharatnam–Berry faz metayüzeyler olarak bilinen başka bir teknik, aynı geometriye sahip antenlerin oryantasyon açısını ayarlayarak tam bir faz kontrolü sağlamaktadır [33], [38], [39]. Polarizasyon durumu değiştirilen bir ışık huzmesinin fazını ele alan bu yaklaşımda,

polarizasyona bağlı faz değişimi, Pancharatnam-Berry faz elemanlarının uzamsal olarak değişen eksen oryantasyonu ile birleştirilmesiyle tanıtılır ve tasarlanır [40]. Bu yaklaşımla yapılan bir çalışmada, yeni ultra ince çift fonksiyonlu metaller mikrodalga rejiminde ilk kez önerilmiş, üretilmiş, test edilmiş ve doğrulanmıştır (Şekil 1.5).



Şekil 1.5. *Burada, geniş bir ayar aralığı ile 600 μm ile 1400 μm arasında polarizasyondan bağımsız çalışma ve yüksek iletim sağlayan, elastik alttaşlara dayalı, mekanik olarak ayarlanabilen dielektrik meta yüzeyleri sunulmuştur.*

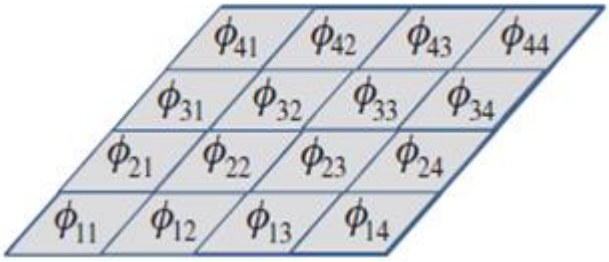


Şekil 1.6. *Huygens metayüzeyine gelen bir y-polarize düzlem dalganın manyetik alanının (Hz) simüle edilmiş anlık dağılımı.*

Başka bir tür olan Huygens metayüzeyleri yansıma kayıplarına neden olmaz ve yalnızca çapraz polarize radyasyon fazını manipüle etmekle sınırlı değildir. Huygens metayüzeyleri hem ko-polarize hem de çapraz polarize radyasyonu tamamen manipüle edebilir. Bu bağlamda bir dalga cephesini verimli bir şekilde manipüle eden alternatif bir yöntem, çoklu frekans seçici yüzey katmanlarını istiflemek olmuştur [41]–[45]. Bununla birlikte, tipik bir yapı ise, tam 360° faz kapsamını gerçekleştirmek için yedi katman gerektirmiştir. Bu, ek üretim ve tasarım zorlukları sunmaktadır [28].

Metayüzeylerin kullanıldığı uygulama alanlarından bazıları; ışın ayırıcılar [46], metalensler [47] ve meta-reflektörler [48], spiral faz dalgaları [49], geniş bant soğurucular [50], yüksek çözünürlüklü renkli baskı [46], hologramlar [51], polarimetreler [52] ve yüzey dalga kuplörleridir [53]. Sonuç olarak metayüzeyler, özellikle gradyan metayüzeyler, yeni elektromanyetik özellikleri nedeniyle hızla büyüyen bir araştırma alanı haline gelmiştir [31], [33].

Metayüzeyler, istenilen bir faz veya genlik değişiminin pikselleri olarak kabul edilebilecek alt dalga boylu nanoyapı dizilerinden oluşur Şekil 1.7'de görüldüğü gibi, düz bir yüzey, ayrı piksellere bölünür, burada her piksel, bir faz profili $\phi(x,y)$'nin ayrıklaştırılmış versiyonunu temsil eden ve ϕ_{ij} ile gösterilen belirli, yerel bir faz kayması sağlar. $\phi(x,y)$, istenilen ışın şeklini elde etmek için gerekli olan faz profilidir [1].



Şekil 1.7. *Faz kontrolü için bir metayüzey şeması.*

Işın şekillendirme ve holografi uygulamaları için bir metayüzey tasarımı iki ana zorluk sergiler. Birincisi istenen ışın şeklini elde etmek için gereken uygun faz gradyanı

tasarlamak; ikincisi ise 0 ile 2π arasında istenen herhangi bir faz kaymasını elde etmek için ihtiyaç duyulan her bir faz pikseli için farklı nanoyapılar tasarlamaktır [1]. Uygulamanın türüne göre istenilen faz değişimi ne ise türetilen metamoleküllerin, bu faz değişimine göre yüzeye yerleştirilmesi gerekir.

Şekil 1.2'deki genel yansıma ve kırılmanın pozitif faz gradyanı için şematik gösterimi dikkate alınarak, aşağıda her eksene göre genelleştirilmiş Snell yasası verilmiştir [22], [32], [35].

$$\sin\theta_r - \sin\theta_i = \frac{1}{n_i k_0}\frac{\partial\phi}{\partial y} \tag{1.1}$$

$$\cos\theta_r - \sin\varphi_r = \frac{1}{n_i k_0}\frac{\partial\phi}{\partial x} \tag{1.2}$$

Denklem (1.1) ve Denklem (1.2) genelleştirilmiş yansıma yasasını ifade etmektedir [32]. Burada n_i, geliş ortamının kırılma indisini; $\frac{\partial}{\partial x}$, x'e göre kısmi türevi ve $\frac{\partial}{\partial y}$, y'ye göre kısmi türevi ifade etmektedir.

$$n_t\sin\theta_t - n_i\sin\theta_i = \frac{1}{k_0}\frac{\partial\phi}{\partial y} \tag{1.3}$$

$$\cos\theta_t - \sin\varphi_t = \frac{1}{n_t k_0}\frac{\partial\phi}{\partial x} \tag{1.4}$$

Denklem (1.3) ve Denklem (1.4) ise, n_t kırılma ortamının kırılma indisi olmak üzere, genelleştirilmiş kırılma yasasını temsil etmektedir [32].

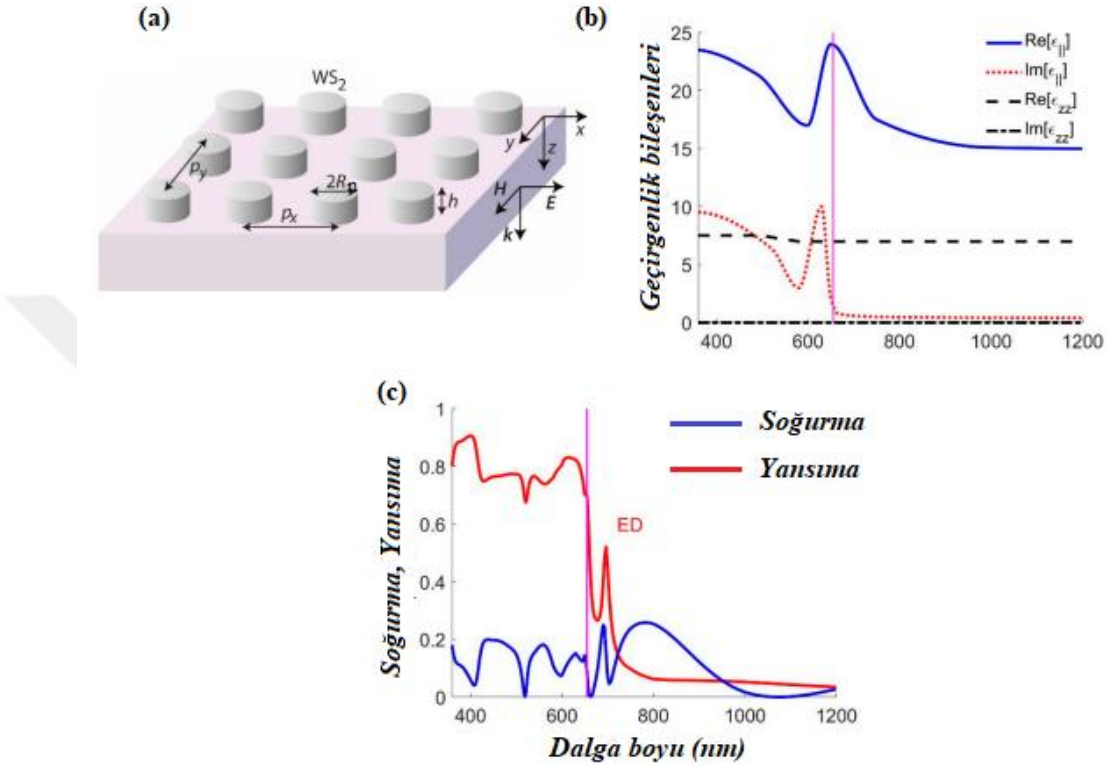
Yapılan uygulamalar, yukarıda verilen bu genel yansıma ve kırılma yasalarındaki kısmi türevlerle ifade edilen faz değişiminin ne olması gerektiğini belirler ve bu faz değişimleri farklı anten tasarımlarıyla sağlanarak uygulama türüne göre anten dizilimleri tasarlanır.

Faz gradyanını optimize etmek için en yaygın kullanım, %80'i aşan verimliliği sunan tasarımlar sağlamaktır [1]. Bunun için belirlenen nanoanten geometrilerinin sayısal

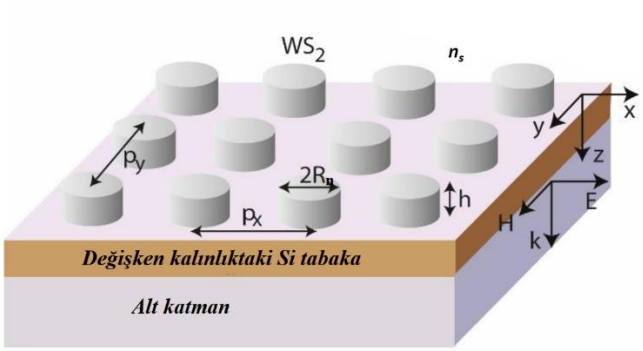
veya analitik olarak sürekli faz haritaları incelenmelidir. Faz çözünürlüğü, uygulama verimliliği, bant genişliği ve doğruluk metayüzey tasarımı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir [1], [2], [54]–[56].

Bu tez çalışması kapsamında gradyan metayüzey tasarımı üzerinde çalışılarak $0 < \phi < 2\pi$ aralığında faz kayması oluşturabilen faz pikselleri tasarımı yapılmıştır. Faz pikselleri nanoanten yapılarıyla tasarlanmıştır. İlk aşamada plazmonik nanosaçıcılar içeren özgün tasarımlarla bu faz profili incelenmiştir. Literatürdeki plazmonik metayüzey tasarımlarından [35], [57], [58] farklı olarak iki katmanlı ve rotasyon verilmiş nanoantenler içeren tasarımlar üzerinde durulmuştur. Bu özelliği elde etmedeki ana zorluklardan biri, basit olmayan nanosaçıcılar (veya "nanoantenler") gerektirmesidir [19]. Bu bağlamda istenilen faz gradyanı çözünürlüğünü arttırmak için; ikinci aşamada görünür frekanslarda büyük iletim genliklerine sahip olan, desenlendiklerinde iyi tanımlanmış Mie rezonanslarını destekleyebilen [59], [60] ve bir geçiş metali dikalkojeniti WS_2'nin (Tungsten Disülfit) özgün tek tabaka kaplamalarına başvurulmuştur. WS_2 gibi geçiş metali dikalkojenitler (TMD veya TMDC; transition metal dichalcogenide), malzeme katmanlarını bir arada tutan kuvvet türü nedeniyle Van Der Waals malzemeleri olarak bilinir [59], [61]. Zayıf moleküller arası bağ veya fiziksel sınırlama nedeniyle, TMDC sınıfındaki eksitonlar (bir elektron ve bir boşluğun bağlı halleri), oda sıcaklıklarında bile güçlü bağlanma enerjileri sergiler ve optik tepkilere hakimdir. Bu eksitonik malzemelerden WS_2 güçlü eksiton bağlanması, eksiton rezonansının yakınında yüksek kırılma indisleri ve sönümlenme katsayıları sergiler. Işık-eksiton etkileşimi, tek katmanlı doğrudan bant aralıklı WS_2 filmlerinde kapsamlı bir şekilde incelenmiştir [62]. WS_2'nin de içinde olduğu bu TMDC malzemelerin katmanlı malzeme anizotropisi, farklı düzlem içi ve düzlem dışı dielektrik geçirgenlik bileşenleri ile sonuçlanır ve görünür aralıkta, artan dielektrik geçirgenlik ile büyük bir sanal dielektrik geçirgenlik sergiler. Bu büyük sanal kısım, yalnızca ışınımsız kayıplara neden olmakla kalmaz, yönlendirici nano tabaka [63] veya nanoparçacıklar [64] içinde ışık hapsini de sağlar. Nanoparçacıklar rezonansları arttırılabilir ve rezonansların spektral konumları sadece nanoparçacık boyutu, şekil ve malzemesi ile değil, aynı zamanda nanoparçacık dizilimleri ile de kontrol edilebilir. Bu bağlamda literatürde 2D veya 3D WS_2 [59], [65], [66] görünür ve kızılötesi spektral aralıklarda iyi tanımlanmış

rezonanslar sergilediği gösterilmiştir. Yakın kızılötesi aralıkta ise bu malzemelerde kayıplar sıfıra yakındır ve nanoparçacık, yüksek kalite faktörlü Mie rezonanslarını destekleyebilir [66].



Şekil 1.8. *(a) WS_2 nanoanten tabanlı bir tasarım. (b) WS_2 dielektrik geçirgenlik bileşenleri. (c) Soğurma ve yansıma spektrumları.*



Şekil 1.9. *Değişken kalınlıktaki silikon tabakası ile bir silikon oksit alt tabaka üzerindeki disk WS_2 nanodisk dizisi.*

Literatürde WS_2 ile kombine edilmiş metayüzey tasarımları mevcuttur. Bunlardan bazıları Au tabanlı plazmonik anten üzerine tek katman WS_2 kaplama [67]–[69]

tabanlı, bazıları da WS_2 nanoanten [59], [70] tabanlı tasarımlardır. Bunlardan Babicheva ve Moloney, (2019a) [8], Ahmed ve Babicheva, (2020) [9] WS_2 nanoantenlerin sadece rezonant davranışlarını incelemiştir. İncelenen nanodisk dizisinin şeması (Şekil 1.8(a)) için parametreler şunlardır: Nanodisk yarıçapı R_n = 100 nm, yükseklik h = 200 nm ve çevredeki kırılma indisi n_s= 1,5 Şekil 1.8(b) bu nanodisk dizisinin spektral dielektrik geçirgenliği verirken, Şekil 1.8(c) de $P_x = P_y$ = 240 nm dizi periyotları için nanoparçacık dizisinin soğurma ve yansıma spektrumlarını vermektedir. Burada $\varepsilon_{||}$ düzlem içi ve ε_{zz} düzlem dışı tensör bileşenleridir. $\lambda < \lambda c = 655$ nm için $\varepsilon_{||}$ kayıplarının nispeten yüksek olduğu ve bu spektral bölgedeki nanoparçacık rezonanslarının iyi tanımlanmadığı görülebilir (Şekil 1.8(c)).

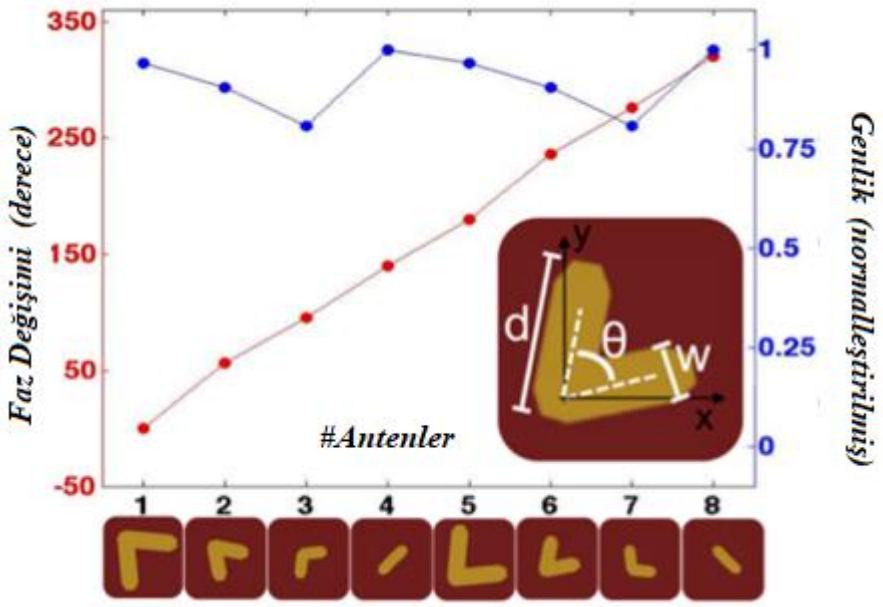
Başka bir WS_2 nanoanten çalışmasında da, Şekil 1.8'deki anizotropik malzeme yaklaşımıyla, değişken kalınlıktaki silikon tabakası ve bir silikon dioksit alttaş üzerindeki WS_2 nanodisk dizisi incelenmiştir (Şekil 1.9) [70].

Bu tez çalışmasında ise özgün olarak, faz gradyanı çeşitliliği için, üst anten katmanındaki bir ya da iki kol tek tabaka WS_2 kaplanarak analiz edilmiştir. Faz değişimine katkısı araştırılmıştır. Nümerik analizlerde tek tabaka WS_2'nin kırılma indisi n_{WS_2} [71] dikkate alınmıştır. Bu tasarımlarda metayüzey verimini etkileyen kriterlerden biri olan daha yüksek ve sabit rezonant genlik değerleri de hedeflenmektedir

İKİNCİ BÖLÜM

MATERYAL VE YÖNTEM

WS_2 ile desteklenmiş Au nanosaçıcılarla [0, 2π] aralığında faz gradyanı oluşturarak Şekil 1.7'deki gibi faz pikselleri tasarımı bu tez çalışmasının yöntemidir. Amaçlanan faz piksellerinin tasarımı nanoyapılarla sağlanmaktadır. Daha sonra istenilen optik uygulamanın gerektirdiği faz haritası bu faz piksellerinin uygun dizilimi ile gerçekleştirilebilecektir. Faz piksellerini elde etmedeki ana zorluklardan biri basit olmayan saçıcılar (veya "nanoantenler") gerektirmesidir, çünkü basit dipol antenler (en yaygın olarak kullanılan elemanlardır) bu görev için uygun değildir [1]. Örneğin literatürde, 1500 nm çalışma dalga boyunda metalens tasarımında $0 < \phi < 2\pi$ faz pikselleri oluşturmak için 60 nm kalınlığında farklı büklüm açılarında ve farklı rotasyonlarda V-şeklindeki altın nanosaçıcılar kullanılmıştır [57]. Şekil 1.1'de temel analizi verilen bu çalışmada sekiz tip V-şeklindeki nanoyapı için çapraz polarizasyondaki faz kaymaları ve saçılma genlikleri sunulmuştur. 1'den 4'e kadar olan elementleri karakterize eden parametreler d = 180, 140,130 ve 85 nm ve θ = 79°, 88°, 104° ve 175°'dir. 5'ten 8'e kadar olan elemanlardan ise ilk eleman seti saat yönünün tersine 90° döndürülerek elde edilmiştir. Her antenin genişliği ise w = 50 nm olarak alınmıştır [57]. Elementlerdeki kol açısı ve rotasyon farkıyla ihtiyaç duyulan faz adımları ve yüksek değerde saçılma karakteristikleri sağlanabilmiştir.



Şekil 2.1. *Faz pikselleri oluşturmak için kullanılan, farklı büklüm açıları ve farklı rotasyonlarda V-şeklindeki altın nanosaçıcılar.*

Bu nanosaçıcılar metalens uygulamaları için gerekli olan aşağıdaki faz denklemini sağlayabilmek için kullanılmıştır;

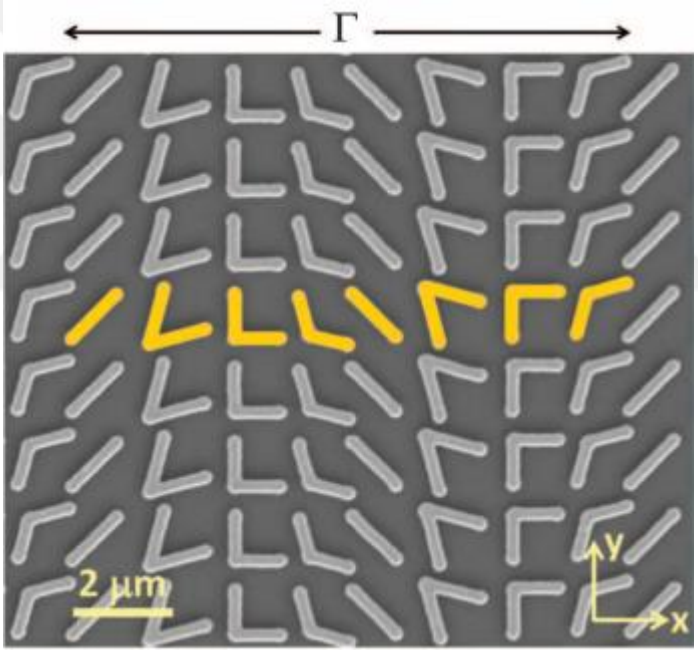
$$\phi(x,y) = \frac{2\lambda}{\pi}\left(\sqrt{(x^2+y^2)+f^2} - f\right) \tag{2.1}$$

Çünkü düz lenslerin odaklama yapabilmesi için yüzeyindeki faz değişimi Denklem (2.1)'deki gibi olmalıdır. Burada f odak uzaklığını belirtmektedir. Bu eşitlikle, istenilen bir odak uzaklığında odaklama sağlanabilir [57].

Daha önce bahsedildiği gibi, faz kontrolü ve ışın şekillendirme için metayüzeylerin kullanılmasındaki ana zorluk, [0, 2π] aralığında faz piksellerinin amaçlanan faz kaymasını elde ederken, genlik tepkilerini sabit tutmaktır. Bu talepleri karşılayacak meta-hücreleri gerçekleştirmek için çeşitli teknikler ve yaklaşımlar geliştirilmiştir. Bu teknikler, plazmonik ve dielektrik rezonanslar, çapraz polarizasyon etkileşimleri, kuple edilmiş nanoantenler, geometrik faz vb. gibi çeşitli mekanizmaları kullanır [1].

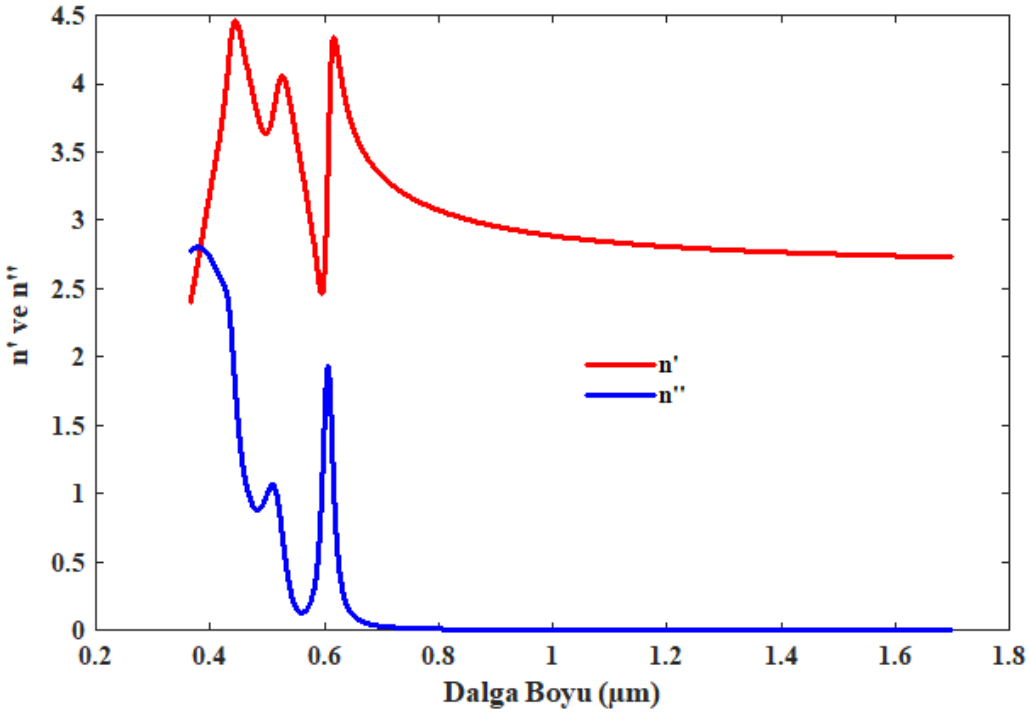
Yukarıda bahsettiğimiz V-şekilli antenler metayüzeylerin faz kontrolü üzerine bilinen en iyi örneklerindendir [1], [22], [72]. Bu antenler nispeten geniş bantlı ve çok yönlüdür. Bu anten geometrisine yönelik başka bir çalışma olarak da literatürde

Şekil 2.2'deki gibi tasarlanan bir metayüzey çalışması mevcuttur. Bu çalışmada uzak kızılötesi (far infrared; FIR) [22] ve daha sonra yakın kızılötesinde (near infrared; NIR) [72] yüzey üzerinde faz gradyanı indüklemek ve kırılma ile yansıma açılarını değiştirmek için (yani bir saptırıcı gerçekleştirmek için) yine V-şekilli antenler kullanılmıştır. Taramalı elektron mikroskobu görüntüsü sunulan bu çalışma ışın saptırıcı olarak önerilmiştir. Bu antenler, polarizasyon dönüşümü yoluyla gerekli faz kontrolüne izin vermektedir. Her pikselin spesifik faz yanıtı, antenlerin iki kolu arasındaki açı ve rotasyonu ile belirlenmiştir. Şekil 2.2'de işaretlenen sekiz anten, her elemanın π/4'ün katı olan farklı bir faz kayması sağladığı bir saptırıcının birim hücresine karşılık gelmektedir [1].



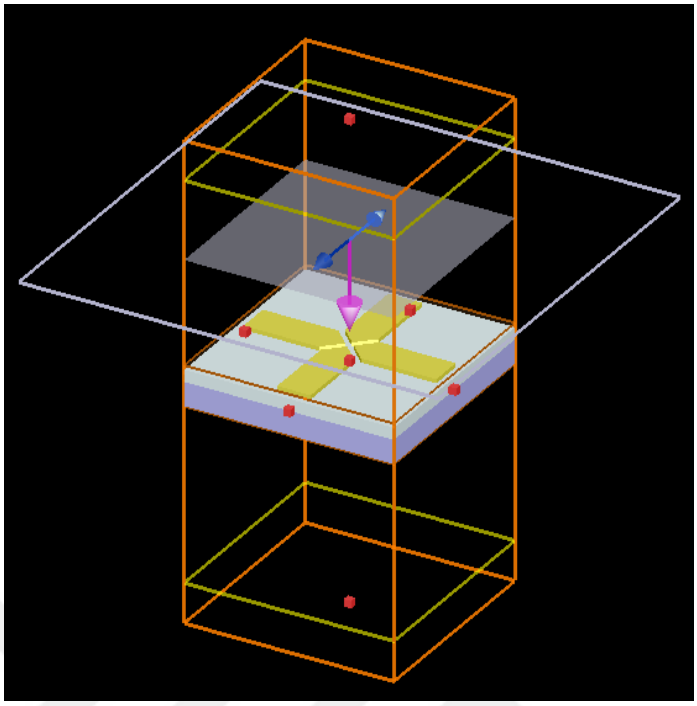
Şekil 2.2. *V-şekilli metamoleküller kullanılarak gerçekleştirilen saptırıcı metayüzeyin elektron mikroskobu görüntüsü.*

Bu tez kapsamındaki meta-hücreleri tasarımında Nanosaçıcıların tasarımı için zaman domeninde sonlu farklar (FDTD; Finite-difference time-domain) yöntemi kullanılarak simülasyonlar yapılmıştır. Au dielektrik fonksiyonu Palik, 1985 [73]'den ve tek tabaka WS_2 kırılma indisi verisi Ermolaev vd. (2020) [71]'den alınmıştır. WS_2'nin tek tabaka kırılma indisi grafiği Şekil 2.3'te verilmiştir ve bu grafik dikkate alınarak simülasyonlar görünür frekans sahasında yapılmıştır. Burada n' kırılma indisinin gerçek kısmını, n'' ise sanal kısmı olan sönümlenme katsayısını ifade etmektedir.



Şekil 2.3. *WS_2'nin görünür frekanslardaki spektral kırılma indisi.*

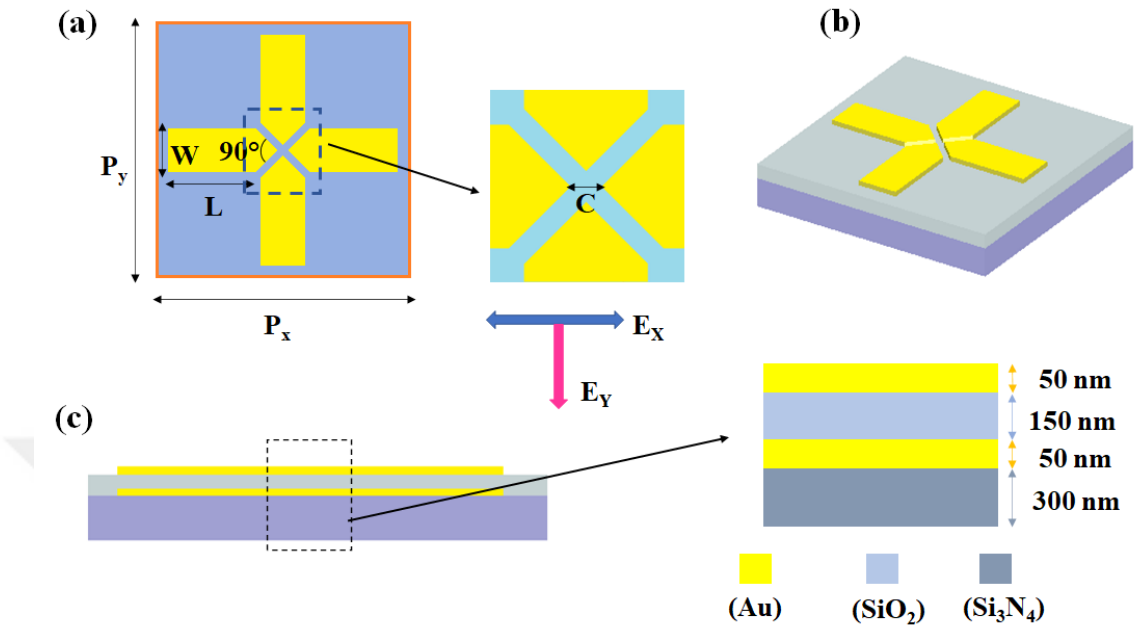
Periyodiklikler yani $xy-$ düzleminde uzanan meta-moleküllerin $x-$ ve $y-$ doğrultusundaki boyutları P_X ve P_y olarak seçilmiş olup sistemin $z-$ eksenine yerleştirilen düzlem dalga kaynağının genişliği de P_X ve P_y olarak belirlenmiştir. Daha doğru bir simülasyon elde etmek için yapıyı kaplayacak şekilde en minimum özelleştirilmiş FDTD hücreleme bölgesi oluşturulmuştur. Özel hücreleme değerleri yapının kenarlarından 5 nm dışarıda olacak şekilde ayarlanarak nanosaçıcının uzaysal olarak bölündüğü küplerden $x-$ ve $y-$ doğrultularında 10 nm, $z-$ doğrultusunda ise 7 nm seçilmiştir. Yansıma (R; reflectance) ve geçişi (T; transmittance) uzak alanda ölçmek için alan ve güç ölçer monitörler, yapının uzak alanlarına, birbirlerine simetrik olacak şekilde yerleştirilmiştir (Şekil 2.4). Simülasyonlar boyunca, $x-$ ve $y-$ eksenleri doğrultusunda periyodik sınır koşulları ve $z-$ ekseni doğrultusunda mükemmel şekilde eşleşen katmanlar kullanılır. Meta-hücre tasarımları yayılma doğrultusu $-z$ olan ve $y-$ polarizasyonlu düzlem dalga ile aydınlatılmıştır.



Şekil 2.4. *Simülasyon ayarlarının gösterimi.*

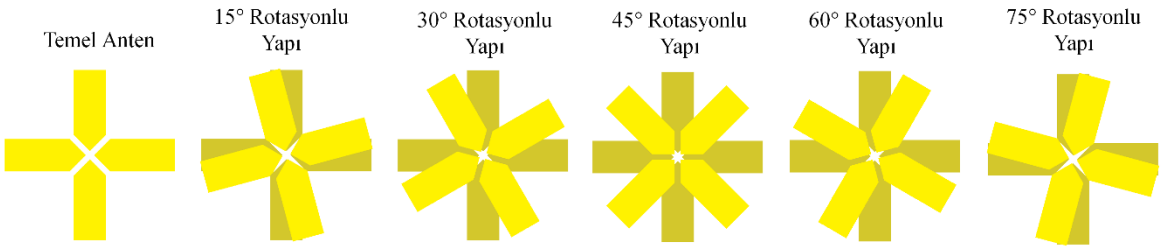
Bu çalışmada başta, perspektif ve profil şemaları Şekil 2.5'te verilen temel anten yapısı dikkate alınmıştır. Bu geometri kullanılarak üst katmandaki saçıcının rotasyon değişikliği ve kol açısı değişikliği ile yeni meta-hücreler türetilmiştir. Nümerik analizlerin ilk aşamasında temel anten yapısının ve türetilmiş antenlerin görünür spektrumdaki yansıma karakteristikleri sunulmuştur.

Şekil 2.5'teki temel anten yapısı, SiO_2 (silisyum dioksit) aralayıcı malzeme yardımıyla Si_3N_4 (silisyum nitrür) membran üzerine tasarlanmış iki Au anten katmanından oluşmaktadır. Şekil 2.5(a)'da kuşbakışı görünümü, Şekil 2.5(b)'de perspektif görünümü, Şekil 2.5(c)'de profil görünümü verilen temel anten yapısında; L nanoanten kollarının uzunluğunu, W nanoanten kollarının genişliğini ve C kollar arasındaki uzaklığı ifade etmektedir. Aksi söylenmedikçe, alt dalga boyundaki bu anten kollarının sivri uçlarının açısı 90°, Au katman kalınlıkları 50 nm, toplam aralayıcı katman kalınlığı 150 nm ve Si_3N_4 membran kalınlığı 300 nm olarak alınmıştır. P_X ve P_y değerleri 2500 nm olacak şekilde ayarlanmıştır. Alt anten katmanının amacı rezonatif davranışı kontrol edebilmek, üst anten katmanının amacı da verilen rotasyon yoluyla hedeflenen yerel fazı elde etmektir.



Şekil 2.5. *Tasarımı yapılan temel anten yapısının (a) kuşbakışı, (b) perspektif ve (c) yandan görünümleri.*

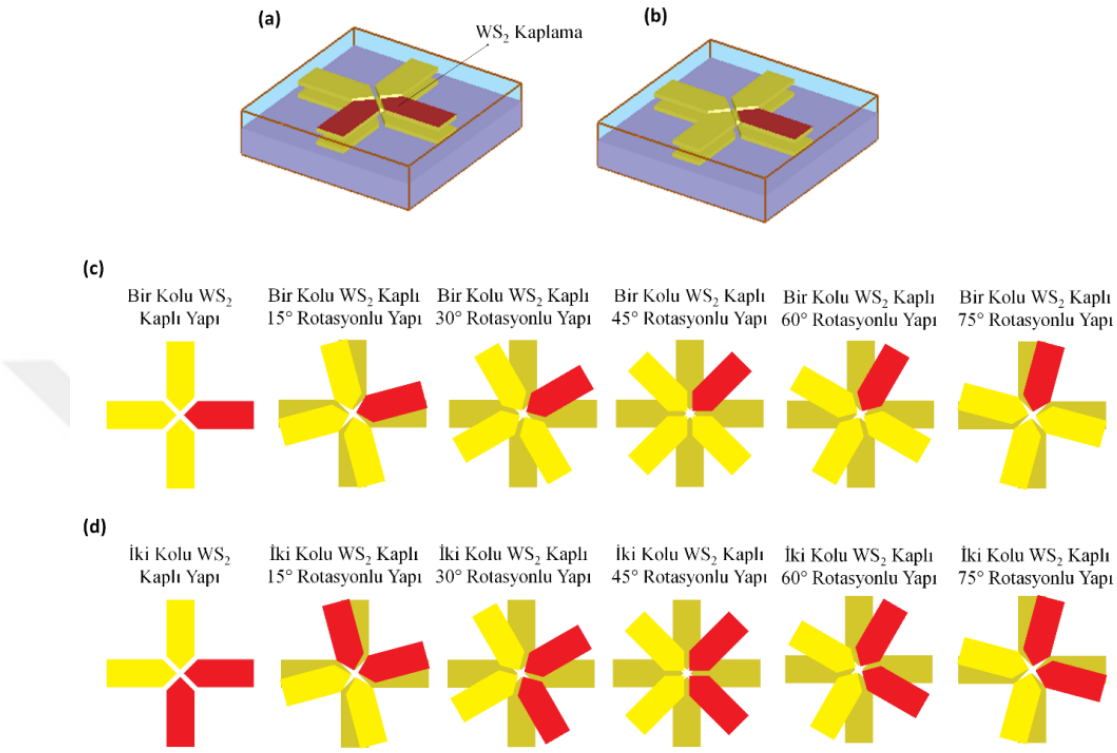
Hedeflenen yerel faz değerlerini elde edebilmek için tasarımı yapılmış olan rotasyon tabanlı meta-hücre setinin her bir rotasyon değeri için geometrik gösterimleri Şekil 2.6'da verilmektedir. Bu anten versiyonlarında sadece üst anten katmanına rotasyon verilmiştir. Burada açık sarı renkli katman üst anten katmanını, koyu sarı renk katman alt anten katmanını ifade etmektedir.



Şekil 2. 6. *Rotasyon tabanlı tasarımların geometrik gösterimleri.*

Başvurulan diğer anten tasarımları ise bir veya iki kolu WS_2 ile kaplanmış ve üst anten katmanına rotasyon verilmiş versiyonlardır. Şekil 2.7(a) ve Şekil 2.7(b) sırasıyla bir kolu ve iki kolu WS_2 ile kaplanmış temel antenleri perspektif olarak göstermektedir. Şekil 2.7(c) bir kolu WS_2 ile kaplanmış versiyonları gösterirken,

Şekil 2.7(d) iki kolu WS_2 ile kaplanmış versiyonları göstermektedir. Her iki kaplama türünde de rotasyon değerleri 15°, 30°, 45°, 60° ve 75°'dir.



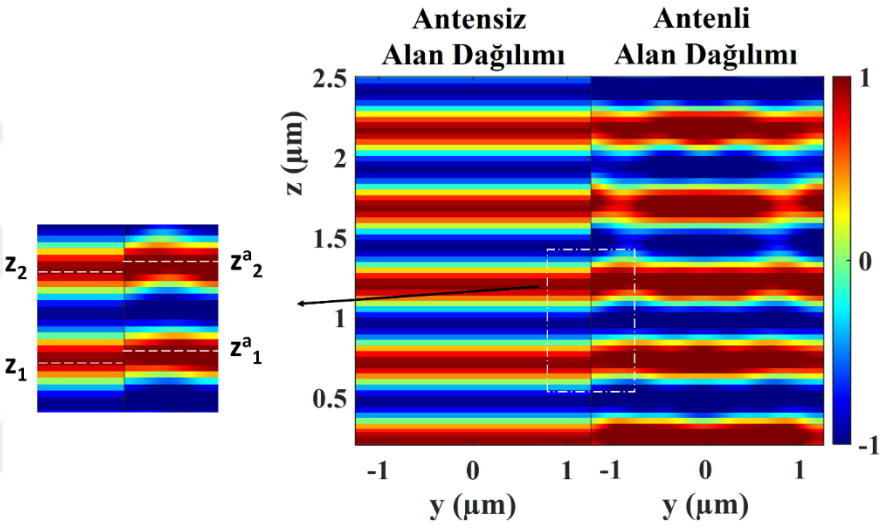
Şekil 2.7. *(a) Üst anten katmanının bir kolu WS_2 ile kaplanmış temel anten (b) Üst anten katmanının iki kolu WS_2 ile kaplanmış temel anten (c) Bir kolu WS_2 ile kaplanmış anten versiyonları. (d) İki kolu WS_2 ile kaplanmış anten versiyonları.*

Şekil 2.6 ve Şekil 2.7'deki anten yapılarının ilk olarak yansıma ve geçiş analizleri sunulmuştur. Burada bu analizlerle anten yapılarının rezonatif davranışları değerlendirilip ardından faz farkı analizlerine geçilmiştir. Her bir antenin neden olduğu faz farkı belirlenirken, sadece kaynak yayılımı (antensiz) simülasyonundaki elektrik alan dağılımı baz alınarak ve ilgili antenin elektrik alan dağılımındaki maksimum pozitif elektrik alan değerleri belirlenerek hesaplanmıştır (Şekil 2.8). Buna göre baz alınan alan dağılımındaki maksimum pozitif elektrik alan konumu $z_1 = 0{,}56\,\mu m$ ve sonraki maksimum pozitif elektrik alan konumu $z_2 = 1{,}048\,\mu m$ olmak üzere Şekil 2.8'in sol bloğundan $z_2 - z_1 = 488\,nm$ olarak belirlenip rezonant dalga boyu teyit edilmiştir. Daha sonra temel anten yapısının neden olduğu faz farkını (FF^a) hesaplayabilmek için; ilgili anten yapısının neden olduğu dağılımdaki (Şekil 2.8 sağ

blok) en yakın maksimum pozitif elektrik alan değerinin konumu olan z_1^a'dan hareketle $z_1^a - z_1$ şeklinde faz farkı belirlenmiştir.

$$FF^a = (z_1^a - z_1) * 2\pi/(z_2 - z_1) \tag{2.2}$$

Denklem (2.2) kullanılarak elde edilen faz farkı π cinsinden ifade edilmiştir. Örneğin temel anten yapısı için $z_1^a = 0{,}74\ \mu m$ olup FF^a= 0.176 π olarak hesaplanmıştır.



Şekil 2.8. *Faz farkının belirlenmesi*

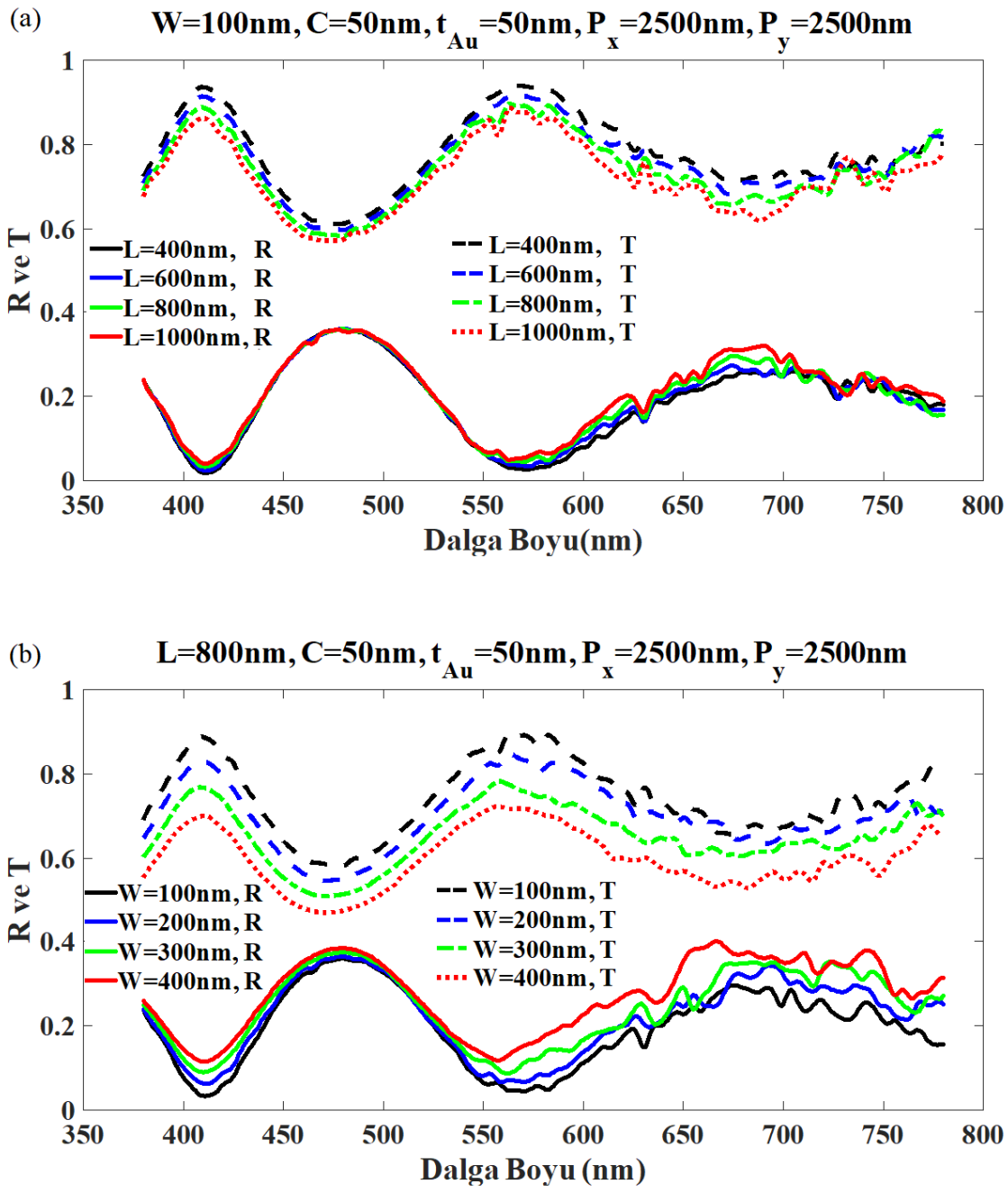
ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

TEMEL ANTEN YAPISI VE TUNGSTEN DİSÜLFİT İLE DESTEKLENEN ANTEN YAPILARININ SPEKTRAL DAVRANIŞLARI VE FAZ ANALİZLERİ

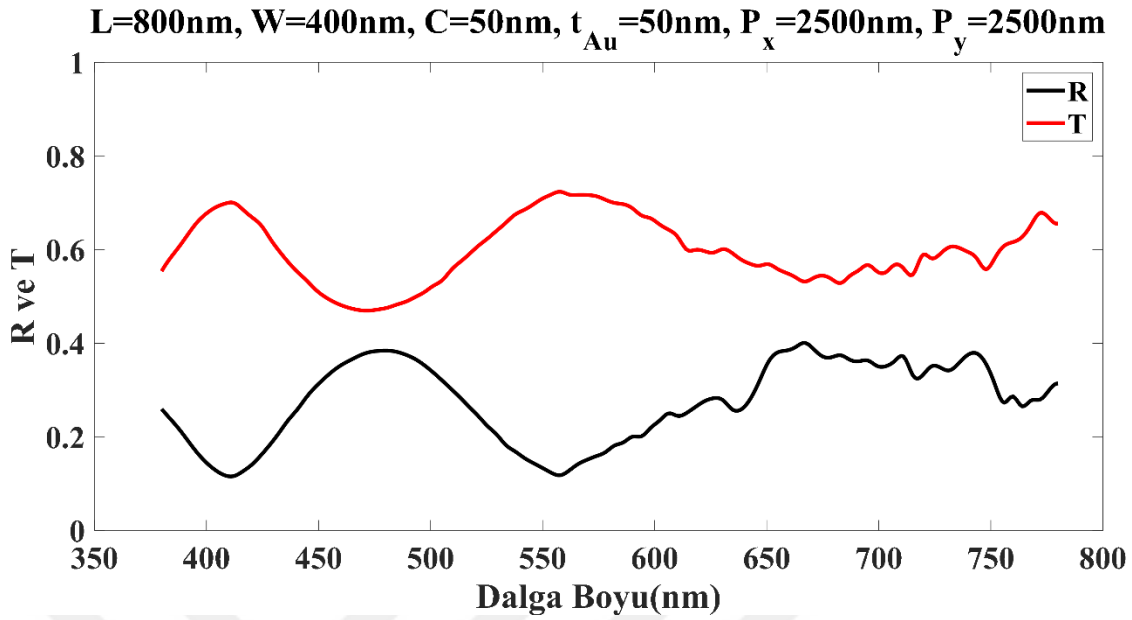
3.1. Temel Anten Yapısının, Rotasyonlu Anten Yapılarının ve Kolları WS_2 ile Kaplanmış Anten Yapılarının Spektral Davranışları

Geometrik parametrelerin temel anten yapısının spektral davranışları üzerindeki etkisini gözlemlemek için farklı geometrik parametrelerdeki temel anten yapısı nümerik olarak analiz edilmiştir. Temel anten yapısının bu analiz sonuçları spektral yansıma ve iletim grafikleri olarak. Şekil 3.1'de sunulmaktadır. Öncelik olarak C, L, t_{Au}, P_x ve P_y sabit tutulup W parametresi 100 nm, 200 nm, 300 nm, 400 nm olarak değiştirilerek hepsi için ayrı ayrı yansıma (kalın düz çizgiler) ve iletim (ince düz çizgiler) eğrileri verilmiştir. Şekil 3.1(a) $L = 800$ nm, t_{Au}= 50 nm, C = 50 nm ve P_x = P_y = 2500 nm sabit parametreleri için anten kol genişliğinin etkisini göstermektedir. Ardından W, C, t_{Au}, P_x ve P_y parametreleri sabit tutularak L parametresi 400 nm, 600 nm, 800 nm, 1000 nm için yine yansıma (kalın düz çizgiler) ve iletim (ince düz çizgiler) eğrileri verilmiştir. Şekil 3.1(b) ise $W = 100$ nm, t_{Au}= 50 nm, C = 50 nm ve P_x = P_y = 2500 nm sabit parametreleri için anten kol uzunluğunun etkisini göstermektedir. İlgili spektrumlara bakıldığında RGB (red-green-blue; kırmızı-yeşil-mavi) renk dalga boyları (488 nm mavi dalga boyu, 532 nm yeşil dalga boyu, 633 kırmızı dalga boyu) rezonant bantlar içinde yer almaktadır. Bu da görünür bölgede RGB renk modlarında çalışabilecek bir metayüzey tasarlanabileceği anlamına gelmektedir. Görünür frekans bölgesinde belirlenen bu spektral davranışlara göre RGB dalga boyları iki rezonant bant içerisinde yer almaktadır. Bu grafiklerden hareketle temel anten yapısının geometrik parametreleri, yansıma ve iletim

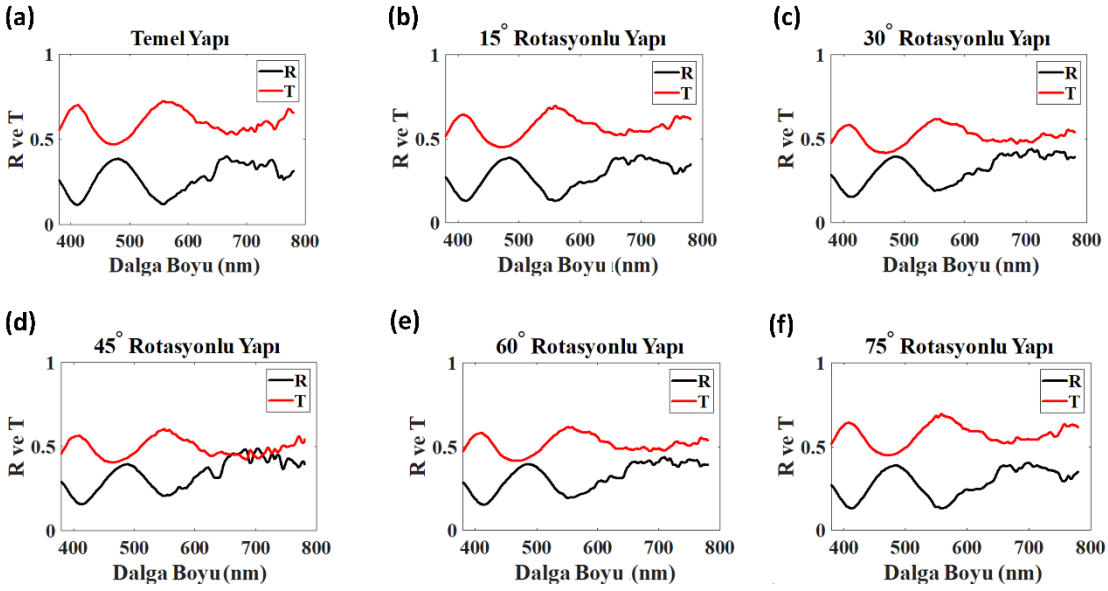
Karakteristikleri iyi olduğundan ve simülasyon kurulumlarındaki teknik imkanlardan dolayı $L = 800$ nm, $W = 400$ nm, t_{Au}= 50 nm, C = 50 nm ve P_x = P_y = 2500 nm olarak belirlenmiştir.



Şekil 3.1. *Temel anten yapısının spektral davranışları*

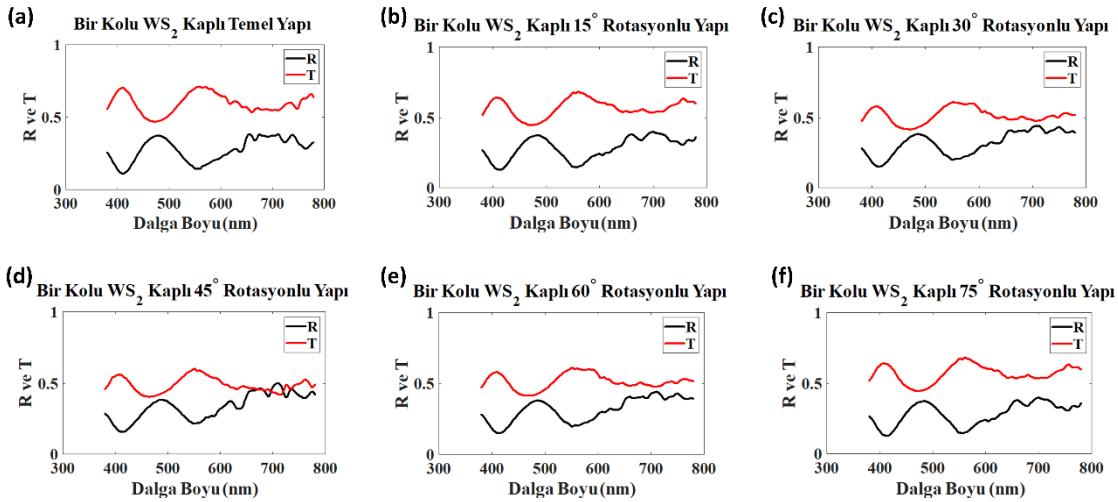


Şekil 3.2. *Seçilen geometrik parametreler için temel anten yapısının yansıma ve iletim spektrumları.*

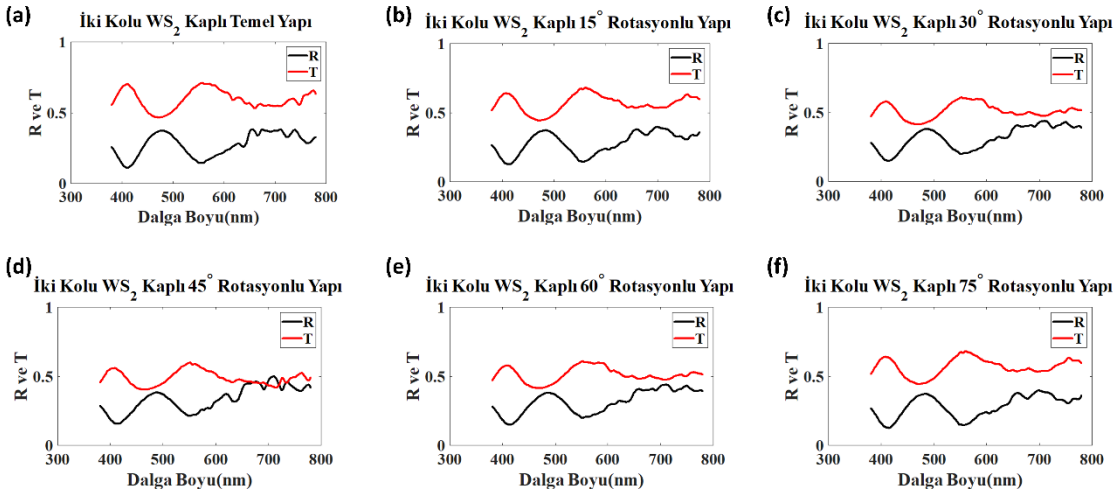


Şekil 3.3. *Seçilen geometrik parametreler için rotasyonlu anten yapılarının yansıma ve iletim spektrumları: (a) Temel anten yapısı, (b) 15° rotasyonlu anten yapısı, (c) 30° rotasyonlu anten yapısı, (d) 45° rotasyonlu anten yapısı, (e) 60° rotasyonlu anten yapısı ve (f) 75° rotasyonlu anten yapısı için.*

Temel anten tasarımı ile rotasyonlu anten tasarımlarının spektral yansıma ve iletim cevaplarının karşılaştırılması amacıyla Şekil 3.3'teki analizler yapılmıştır. Çünkü temel antenin rezonatif davranış sergilediği 488 nm dalga boyunda rotasyonlu antenlerinde rezonatif davranış sergilemesi beklenmektedir. Burada daha önce Şekil 3.2'de verilen temel anten yapısının sonucu Şekil 3.3(a)'da karşılaştırmayı kolaylaştırmak için yeniden verilmiştir. Şekil 3.3(b) 15° rotasyonlu yapının spektral davranışını, Şekil 3.3 (c) 30° rotasyonlu yapının spektral davranışını Şekil 3.3(d) 45° rotasyonlu yapının spektral davranışını, Şekil 3.3 (e) 60° rotasyonlu yapının spektral davranışını, Şekil 3.3(f) ise 75° rotasyonlu yapının spektral davranışını göstermektedir. Bu grafiklerde yansıma siyah düz çizgiyle, iletim ise kırmızı düz çizgi ile ifade edilmiştir. Gelen dalganın elektrik alan polarizasyonu doğrultusunda, 15° ile 75° ve 30° ile 60° rotasyonlu yapılar simetri göstermektedir. Bu nedenle spektral davranışları aynıdır. Bu analizlerde görüldüğü gibi 488 nm'de temel antende olduğu gibi rotasyonlu antenlerde rezonatif davranış göstermektedir.



Şekil 3.4. *Seçilen geometrik parametreler için bir kolu WS_2 kaplı rotasyonlu anten yapılarının yansıma ve iletim spektrumları: (a) Bir kolu WS_2 kaplı temel anten yapısı, (b) bir kolu WS_2 kaplı 15° rotasyonlu anten yapısı, (c) bir kolu WS_2 kaplı 30° rotasyonlu anten yapısı, (d) bir kolu WS_2 kaplı 45° rotasyonlu anten yapısı, (e) bir kolu WS_2 kaplı 60° rotasyonlu anten yapısı ve (f) bir kolu WS_2 kaplı 75° rotasyonlu anten yapısı için.*



Şekil 3.5. *Seçilen geometrik parametreler için iki kolu WS_2 kaplı rotasyonlu anten yapılarının yansıma ve iletim spektrumları: (a) İki kolu WS_2 kaplı temel anten yapısı, (b) iki kolu WS_2 kaplı 15° rotasyonlu anten yapısı, (c) iki kolu WS_2 kaplı 30° rotasyonlu anten yapısı, (d) iki kolu WS_2 kaplı 45° rotasyonlu anten yapısı, (e) iki kolu WS_2 kaplı 60° rotasyonlu anten yapısı ve (f) iki kolu WS_2 kaplı 75° rotasyonlu anten yapısı için.*

WS_2 kaplı antenlerin de 488 nm benzer rezonatif davranışlar göstermesi gerekmektedir. Bu bağlamda hem bir kol hem de iki kol kaplı antenlerin rezonatif davranışları analiz edilmiştir. Şekil 3.4'te bir kolu WS_2 kaplı antenlerin rezonatif davranışları verilmiştir. Bir kolu WS_2 kaplı antenlerden; Şekil 3.4(a) temel anten yapısının rezonatif davranışını, Şekil 3.4(b) 15° rotasyonlu yapının spektral davranışını, Şekil 3.4(c) 30° rotasyonlu yapının spektral davranışını, Şekil 3.4(d) 45° rotasyonlu yapının spektral davranışını, Şekil 3.4(e) 60° rotasyonlu yapının spektral davranışını, Şekil 3.4(f) 75° rotasyonlu yapının spektral davranışını göstermektedir. Şekil 3.5'te ise iki kolu WS_2 kaplı antenlerin rezonatif davranışları verilmiştir. Bu antenlerden; Şekil 3.5(a) temel anten yapısının rezonatif davranışını, Şekil 3.5(b) 15° rotasyonlu yapının spektral davranışını, Şekil 3.5(c) 30° rotasyonlu yapının spektral davranışını Şekil 3.5(d) 45° rotasyonlu yapının spektral davranışını, Şekil 3.5(e) 60° rotasyonlu yapının spektral davranışını, Şekil 3.5(f) 75° rotasyonlu yapının spektral davranışını göstermektedir. Bu grafiklerde yine yansıma siyah düz çizgiyle, iletim ise kırmızı düz çizgi ile ifade edilmiştir. Rotasyonlu temel anten yapılarının rezonatif davranışlarında görüldüğü gibi burada da gelen dalganın elektrik alan polarizasyonu doğrultusunda, 15° ile 75° ve 30° ile 60° rotasyonlu yapılar simetri göstermektedir. Bu nedenle spektral davranışları aynıdır. Bu analizlerde de temel antende olduğu gibi 488 nm'de rezonatif davranış gözlemlenmektedir.

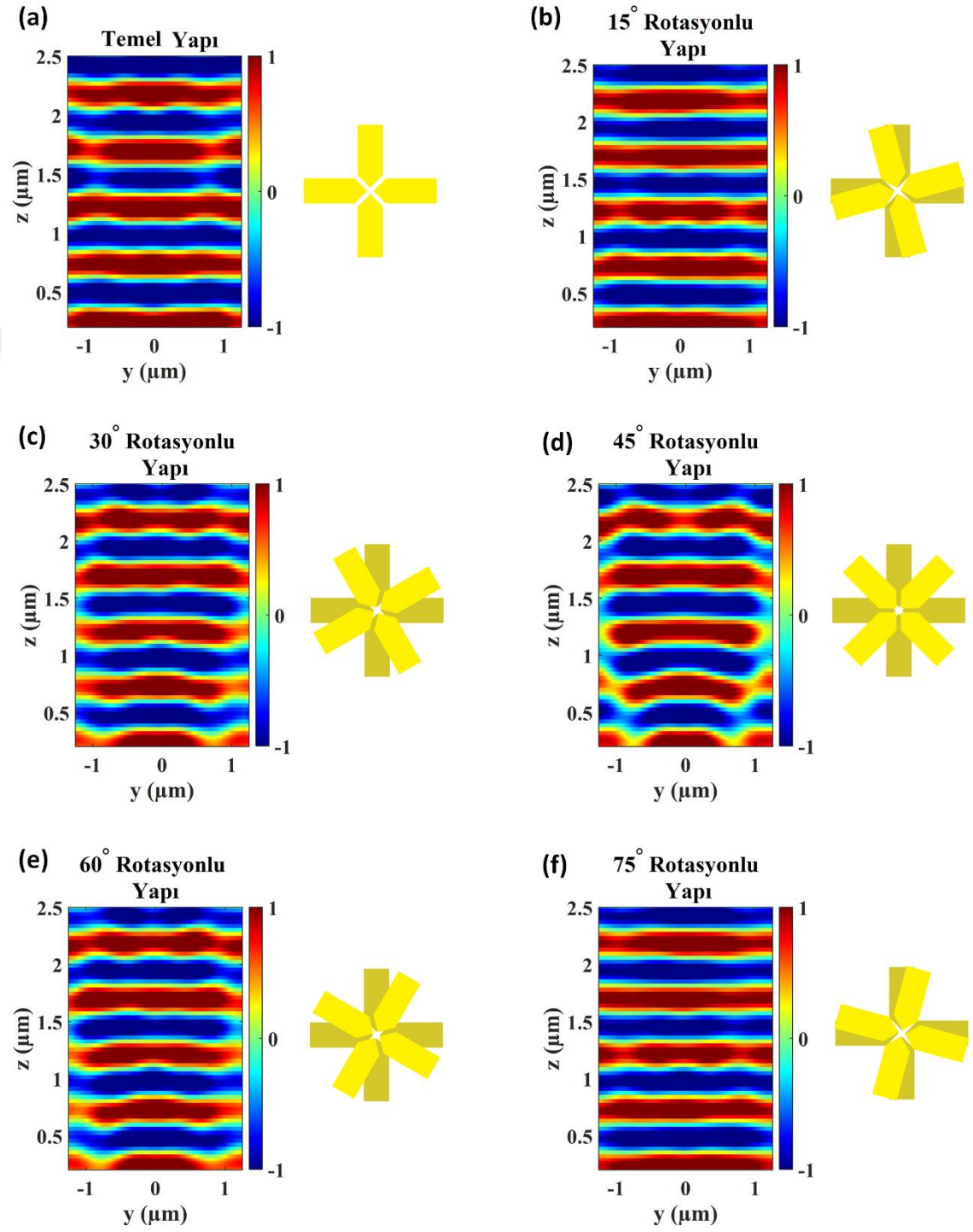
3.2. Tasarlanan Antenlerin Faz Analizi

İlgili antenlerin neden olduğu faz farkını belirlemek için Şekil 1.8'deki gibi rezonant elektrik alan dağılımlarından yararlanılmıştır. Bunun için simülasyon bölgesinin merkezi yz düzleminde $(x = 0)$ oluşturduğu E_y dağılımlarının reel değerlerinden faydalanılmıştır. E_x ve E_z dağılımları çok küçük değerler sergilediğinden ve faz farkı hakkında bilgi vermediğinden değerlendirmeye alınmamıştır.

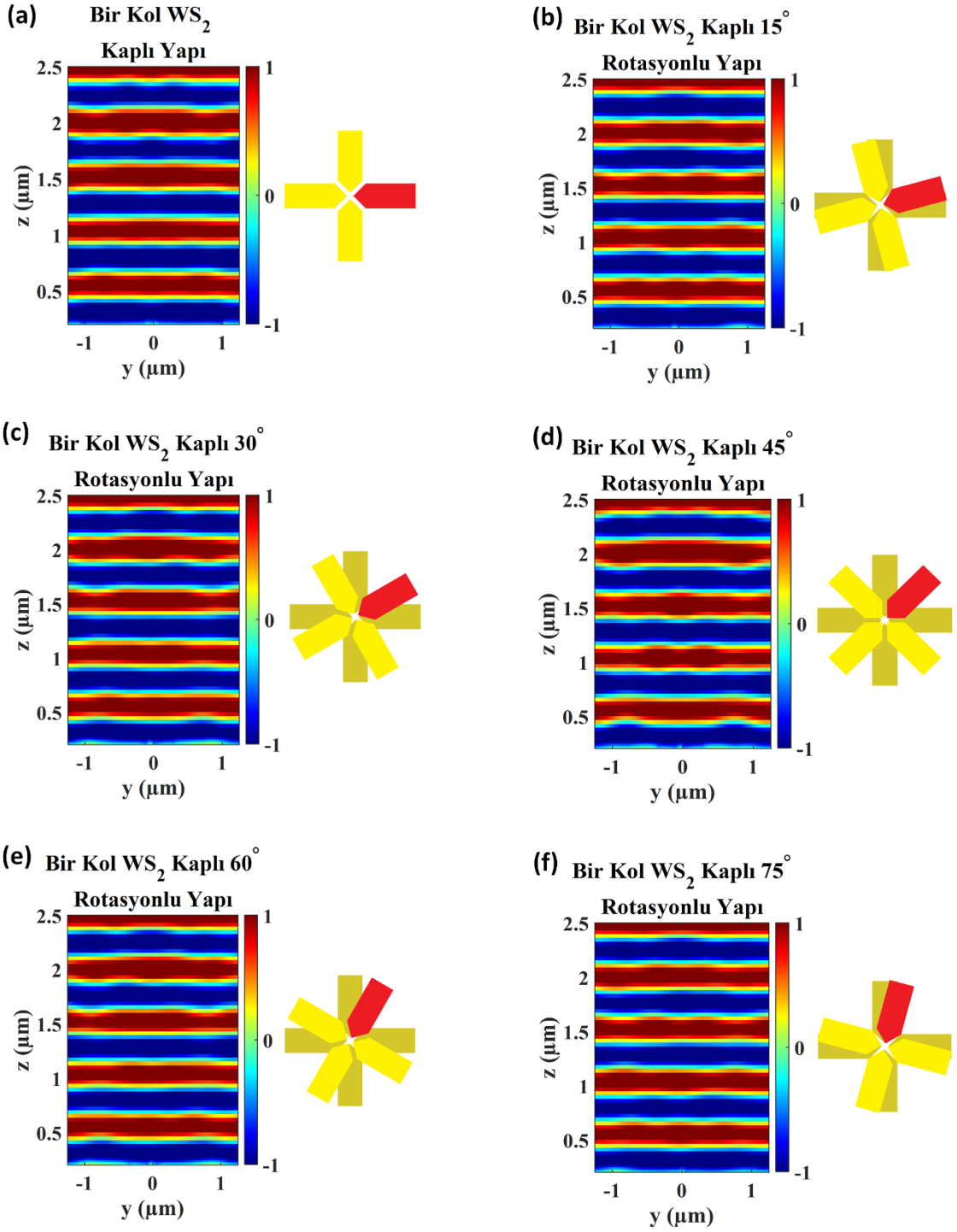
Temel anten ve rotasyonlu versiyonları için gerçekleştirilen elektrik alan dağılımları Şekil 3.6'da gösterilmektedir. Kaynak yapıdan 2500 nm uzağa yerleştirildiğinden ölçümler z değerleri 0-2500 nm aralığındaki alan dağılımını analiz etmiştir. Şekil 3.6(a) temel anten yapısının alan dağılımı, Şekil 3.6(b) 15° rotasyonlu temel anten yapısının alan dağılımını, Şekil 3.6(c) 30° rotasyonlu temel anten yapısının dağılımını, Şekil 3.6(d) 45° rotasyonlu temel anten yapısının dağılımını, Şekil 3.6(e) 60° rotasyonlu temel anten yapısının dağılımını, Şekil 3.6(f) 75° rotasyonlu temel anten yapısının dağılımını göstermektedir. Bu analizlerde de görüldüğü üzere 15° ile 75° ve 30° ile 60° rotasyonlu yapılar için alan dağılımları rezonatif davranışlarında olduğu gibi simetri göstermektedir.

WS_2 kaplı antenler için de benzer faz analizleri gerçekleştirilmişti. Bir kolu WS_2 kaplı anten yapısı için rotasyonlu ve rotasyonsuz antenler ve ilgili dağılımları Şekil 3.7'de gösterilmiştir Şekil 3.7 (a) bir kolu WS_2 kaplı temel anten yapısının alan dağılımını, Şekil 3.7 (b) bir kolu WS_2 kaplı 15° rotasyonlu yapının alan dağılımını, Şekil 3.7 (c) bir kolu WS_2 kaplı 30° rotasyonlu yapının alan dağılımını, Şekil 3.7 (d) bir kolu WS_2 kaplı 45° rotasyonlu yapının alan dağılımını Şekil 3.7(e) bir kolu WS_2 kaplı 60° rotasyonlu yapının alan dağılımını ve Şekil 3.7(f) bir kolu WS_2 kaplı 75° rotasyonlu yapının alan dağılımını göstermektedir. Şekil 3.8'de ise iki kolu WS_2 kaplı rotasyonlu ve rotasyonsuz anten yapıları için alan dağılımları incelenmiştir. Bu antenlerden; Şekil 3.8(a) iki kolu WS_2 kaplı temel anten yapısının alan dağılımını, Şekil 3.8 (b) iki kolu WS_2 kaplı 15° rotasyonlu yapının alan dağılımını, Şekil 3.8(c) iki kolu WS_2 kaplı 30° rotasyonlu yapının alan dağılımını, Şekil 3.8(d) iki kolu WS_2 kaplı 45° rotasyonlu yapının alan dağılımını, Şekil 3.8(e) iki kolu WS_2 kaplı 60° rotasyonlu yapının alan dağılımını ve Şekil 3.8(f) iki kolu WS_2 kaplı 75° rotasyonlu yapının alan dağılımını

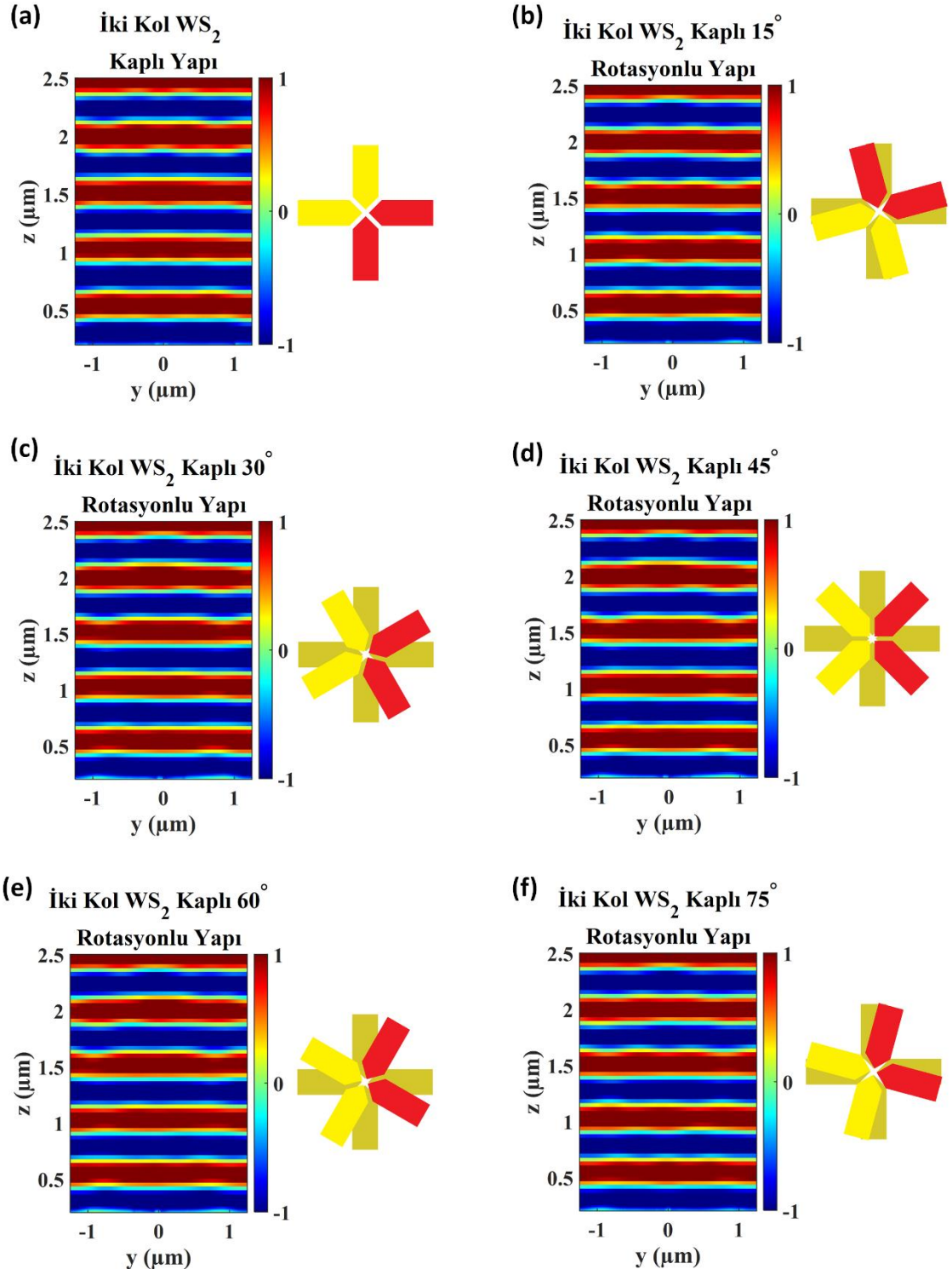
ifade etmektedir. Benzer şekilde bu analizlerde de görüldüğü üzere 15° ile 75° ve 30° ile 60° rotasyonlu yapılar için alan dağılımları simetri göstermektedir.



Şekil 3.6. *Temel anten yapısının ve rotasyon tabanlı tasarımların faz farkı analizleri: (a) Temel anten ve alan dağılımı, (b) 15° rotasyonlu anten ve alan dağılımı, (c) 30° rotasyonlu anten ve alan dağılımı, (d) 45° rotasyonlu anten ve alan dağılımı, (e) 60° rotasyonlu anten ve alan dağılımı, (f) 75° rotasyonlu anten ve alan dağılımı.*



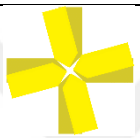
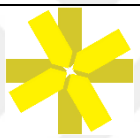
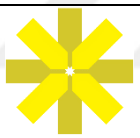
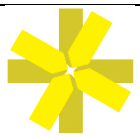
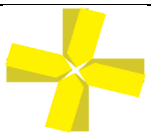
Şekil 3.7. *Bir kol WS_2 kaplı temel anten yapısının ve bir kol WS_2 kaplı rotasyon tabanlı tasarımların alan dağılımları: (a) Temel anten ve alan dağılımı, (b) 15° rotasyonlu anten ve alan dağılımı, (c) 30° rotasyonlu anten ve alan dağılımı, (d) 45° rotasyonlu anten alan dağılımı, (e) 60° rotasyonlu anten ve faz grafiği, (f) 75° rotasyonlu anten ve alan dağılımı.*



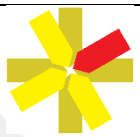
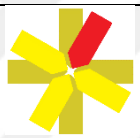
Şekil 3.8. *İki kol WS_2 kaplı temel anten yapısının ve iki kol WS_2 kaplı rotasyon tabanlı tasarımların alan dağılımları: (a) Temel anten ve alan dağılımı, (b) 15° rotasyonlu anten ve alan dağılımı, (c) 30° rotasyonlu anten ve alan dağılımı, (d) 45° rotasyonlu anten ve alan dağılımı, (e) 60° rotasyonlu anten ve alan dağılımı, (f) 75° rotasyonlu anten ve alan dağılımı.*

Şekil 3.6, Şekil 3.7 ve Şekil 3.8'deki farklı anten türlerine göre elde edilen faz analiz grafiklerinden yola çıkılarak Şekil 2.8'deki gibi her bir anten için faz farkı hesaplaması yapılmıştır. Elde edilen bu değerler Tablo 3.1 ve Tablo 3.2 ve Tablo 3.3'te verilmiştir.

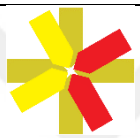
Tablo 3.1. *Temel anten ve rotasyonlu formlarının faz farkı değerleri.*

Anten Numarası	**Anten Şematiği**	**Anten Türleri**	**Z_1^a**	**Z_1^a-Z_1**	**FF^a (π)**
1		Temel Yapı	0,74	0,18	0,17568
2		15° Rotasyonlu Yapı	0,742	0,182	0,177632
3		30° Rotasyonlu Yapı	0,7225	0,1625	0,1586
4		45° Rotasyonlu Yapı	0,716	0,156	0,152256
5		60° Rotasyonlu Yapı	0,718	0,158	0,154208
6		75° Rotasyonlu Yapı	0,722	0,162	0,158112

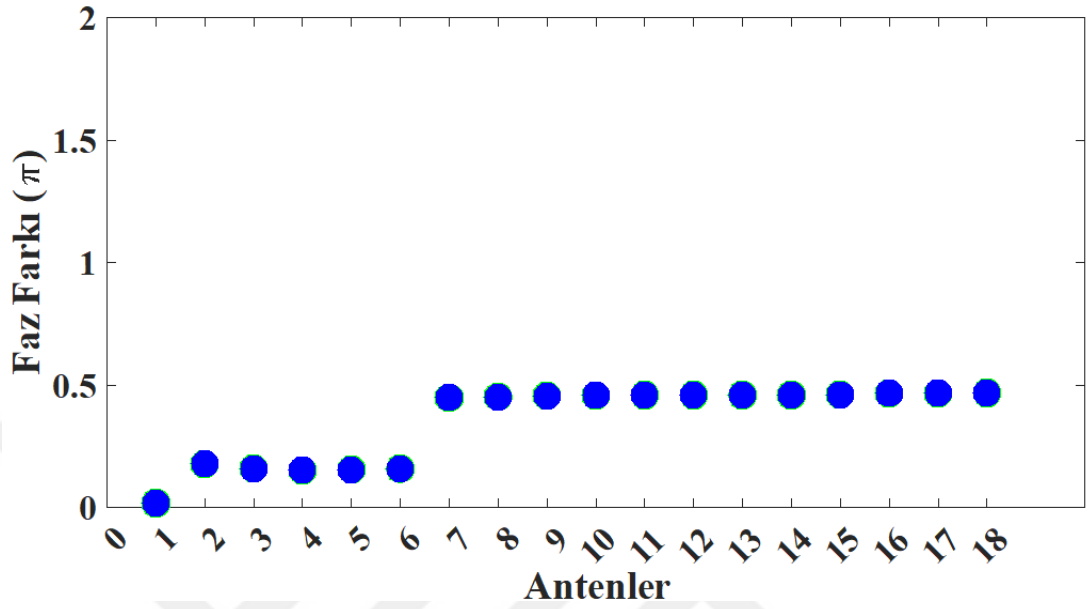
Tablo 3.2. *Bir kolu WS_2 kaplı antenlerin faz farkı değerleri.*

Anten Numarası	Anten Şematiği	Anten Türleri	Z_1^a	Z_1^a-Z_1	FF^a (π)
7		Bir Kol WS_2 Kaplı Yapı	1,033	0,473	0,461648
8		Bir Kol WS_2 Kaplı 15° Rotasyonlu Yapı	1,03	0,47	0,45872
9		Bir Kol WS_2 Kaplı 30° Rotasyonlu Yapı	1,0326	0,4726	0,4612576
10		Bir Kol WS_2 Kaplı 45° Rotasyonlu Yapı	1,0327	0,4727	0,4613552
11		Bir Kol WS_2 Kaplı 60° Rotasyonlu Yapı	1,0328	0,4728	0,4614528
12		Bir Kol WS_2 Kaplı 75° Rotasyonlu Yapı	1,035	0,475	0,4636

Tablo 3.3. *İki kolu WS2 kaplı antenlerin faz farkı değerleri.*

Anten Numarası	Anten Şematiği	Anten Türleri	Z_1^a	Z_1^a-Z_1	FF^a (π)
13		İki Kol WS_2 Kaplı Yapı	1,04	0,48	0,46848
14		İki Kol WS_2 Kaplı 15° Rotasyonlu Yapı	1,031	0,471	0,459696
15		İki Kol WS_2 Kaplı 30° Rotasyonlu Yapı	1,025	0,465	0,45384
16		İki Kol WS_2 Kaplı 45° Rotasyonlu Yapı	1,041	0,481	0,469456
17		İki Kol WS_2 Kaplı 60° Rotasyonlu Yapı	1,042	0,482	0,470432
18		İki Kol WS_2 Kaplı 75° Rotasyonlu Yapı	1,022	0,462	0,450912

Bu tablolarda her bir anten, 1'den 18'e kadar ardışık olacak şekilde numaralandırılmıştır. Elde edilen faz farkı değerlerine göre de antenler arasında kıyaslamayı daha net görebilmek için [0, 2π] aralığında faz farkı grafiği çizdirilmiştir (Şekil 3.9). Bu grafikteki yatay eksen anten türlerini, dikey eksen ise bu antenlerin analizlerinden elde edilen faz farkı değerlerini ifade etmektedir. Grafikte de görüldüğü gibi 2, 3, 4, 5, 6 numaralı rotasyonlu antenler temel antene (1 numaralı anten) göre bir faz farkı sağlamıştır. Fakat bu antenler kendi aralarında önemli ölçüde bir faz farkı oluşturamamıştır. 8'den 18'e kadar numaralandırılan bir ve iki kolu WS_2 destekli antenlerden ise temel antene ve rotasyonlu versiyonlarına göre bir faz farkı elde edilmiştir. Fakat kendi aralarında faz farkı oluşturamamıştır. Tüm antenler ise [0,2π] tam faz aralığını düzenli adımlarla bölen faz farkları sağlayamamaktadır.



Şekil 3.9. *Tablo 3.1, 3.2 ve 3.3'teki faz farkı değerlerine göre oluşturulmuş faz grafiği.*

DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

TARTIŞMA-SONUÇ VE ÖNERİLER

Sonuç olarak, bu çalışmada ilk olarak iki plazmonik anten katmanına sahip bir meta hücre seti incelenmiştir. Daha sonra hem üst anten katmanı döndürülerek hem de üst katmandaki kollardan bir ve ikisi tek katmanlı WS_2 ile desteklenerek, bu fiziksel manipülasyonların faz değişimi üzerindeki etkisi analiz edilmiştir. Burada sunulan yapılar tam bir faz değişimi göstermese de kollar arasındaki açılar değiştirilerek [0, 2π] tam faz aralığını düzenli bölen faz değerleri elde etmek için çalışmalarımız devam etmektedir.

Metalens uygulamalarında kullanılabilecek, görünür bölgede çalışan plazmonik meta-hücreler tasarlamak amacıyla bu tez çalışmasında, iki plazmonik anten katmanına sahip bir meta hücre seti incelenmiştir. Temel anten yapıları olarak; iki katmanlı dört kollu bir temel nanoanten tasarımı, bu temel antenin üst katmanı rotasyonlu türevleri ve tek tabaka WS_2 kaplı türevleri nümerik olarak analiz edilmiştir. WS_2 kaplı türev antenlerin ise üst katmandaki kollarından bir ve ikisi kaplanmıştır. Böylece hem özgün anten tasarımları analiz edilmiş hem de literatüre meta-hücre tasarımları için ilk kez tek katmanlı WS_2 kaplı plazmonik nanoantenler sunulmuştur.

TEZ ÇALIŞMASINDAN ÜRETİLEN ESERLER

Teze özgü olarak yapılan çalışmalar 8 Mayıs 2022'de 2. Uluslararası Mühendislik ve Doğa Bilimleri Çalışmaları Kongresi'nde (2. International Congress of Engineering and Natural Sciences Studies) İngilizce olarak sunulmuş olup "**Analysis of Tungsten Disulfide Contribution to the Reflected Phase of the Four-Arm Bilayer Nanoantenna Structure**" başlığı ile *Current Debates on Natural and Engineering Sciences 3 (Bilgin Kültür Sanat Yayınları)* kitabında İngilizce tam metin halinde kitap bölümü olarak yayımlanmıştır. Bu yayınların atıfları;

- Gümüşcü D., Aslan E., Aslan E. (2022). "Analysis of Tungsten Disulfide Contribution to the Reflected Phase of the Four-ArmBilayer Nanoantenna". Hikmet Y. Çoğun, Zeynel Karacagil (Editörler). ***Structure Current Debates on Natural and Engineering Sciences 3.*** 1.baskı. Ankara. Bilgin Kültür Sanat Yayınları, ss. 53-59

- Gümüşcü D., Aslan E., Aslan E. (2022, 7-9 Mayıs). Analysis of Tungsten Disulfide Contribution to the Reflected Phase of the Four-Arm Bilayer Nanoantenna Structure. 2. Uluslararası Mühendislik ve Doğa Bilimleri Çalışmaları Kongresi'nde sunuldu (ICENSS2022), Ankara.

şeklindedir.

Bu çalışma Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 121E518 numaralı proje, Yurt İçi Öncelikli Alanlar Burs Programı (2210-C) ile ve Kayseri Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Merkezi tarafından FBA-2022-1057 numaralı proje ile desteklenmiştir.

KAYNAKÇA

[1] J. Scheuer, “Metasurfaces-based holography and beam shaping: engineering the phase profile of light,” *Nanophotonics*, vol. 6, no. 1, pp. 137–152, 2017, doi: doi:10.1515/nanoph-2016-0109.

[2] Y. Yifat, M. Eitan, Z. Iluz, Y. Hanein, A. Boag, and J. Scheuer, “Highly Efficient and Broadband Wide-Angle Holography Using Patch-Dipole Nanoantenna Reflectarrays,” *Nano Lett.*, vol. 14, no. 5, pp. 2485–2490, May 2014, doi: 10.1021/nl5001696.

[3] Y.-S. Lin and Z. Xu, “Reconfigurable metamaterials for optoelectronic applications,” *Int. J. Optomechatronics*, vol. 14, no. 1, pp. 78–93, 2020, doi: 10.1080/15599612.2020.1834655.

[4] N. I. Zheludev and Y. S. Kivshar, “From metamaterials to metadevices,” *Nat. Mater.*, vol. 11, no. 11, pp. 917–924, 2012, doi: 10.1038/nmat3431.

[5] Y. Liu and X. Zhang, “Metamaterials: a new frontier of science and technology,” *Chem. Soc. Rev.*, vol. 40, no. 5, pp. 2494–2507, 2011, doi: 10.1039/C0CS00184H.

[6] V. Veselago, L. Braginsky, V. Shklover, and C. Hafner, “Negative Refractive Index Materials,” *J. Comput. Theor. Nanosci.*, vol. 3, pp. 189–218, 2006.

[7] W. Cai, U. K. Chettiar, A. V Kildishev, and V. M. Shalaev, “Optical cloaking with metamaterials,” *Nat. Photonics*, vol. 1, no. 4, pp. 224–227, 2007, doi: 10.1038/nphoton.2007.28.

[8] N. Fang, H. Lee, C. Sun, and X. Zhang, “Sub-diffraction-limited optical imaging with a silver superlens.,” *Science*, vol. 308, no. 5721, pp. 534–537, Apr. 2005, doi: 10.1126/science.1108759.

[9] Pendry, “Negative refraction makes a perfect lens,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 85 18, pp. 3966–3969, 2000.

[10] D. R. Smith, J. B. Pendry, and M. C. K. Wiltshire, “Metamaterials and Negative Refractive Index,” *Science* vol. 305, no. 5685, pp. 788–792, 2004, doi: 10.1126/science.1096796.

[11] J. Valentine, J. Li, T. Zentgraf, G. Bartal, and X. Zhang, “An optical cloak made of dielectrics,” *Nat. Mater.*, vol. 8, no. 7, pp. 568–571, 2009, doi: 10.1038/nmat2461.

[12] Z.-J. Yang, R. Jiang, X. Zhuo, Y.-M. Xie, J. Wang, and H.-Q. Lin, “Dielectric nanoresonators for light manipulation,” *Phys. Rep.*, vol. 701, pp. 1–50, 2017, doi: https://doi.org/10.1016/j.physrep.2017.07.006.

[13] A. Li, S. Singh, and D. Sievenpiper, “Metasurfaces and their applications,” *Nanophotonics*, vol. 7, no. 6, pp. 989–1011, 2018, doi: https://doi.org/10.1515/nanoph-2017-0120.

[14] F. Capasso, “The future and promise of flat optics: a personal perspective,” *Nanophotonics*, vol. 7, no. 6, pp. 953–957, 2018, doi: doi:10.1515/nanoph-2018-0004.

[15] R. Quarfoth and D. Sievenpiper, “Artificial Tensor Impedance Surface Waveguides,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 61, no. 7, pp. 3597–3606, 2013, doi: 10.1109/TAP.2013.2254433.

[16] C. L. Holloway, E. F. Kuester, J. A. Gordon, J. O’Hara, J. Booth, and D. R. Smith, “An Overview of the Theory and Applications of Metasurfaces: The Two-Dimensional Equivalents of Metamaterials,” *IEEE Antennas Propag. Mag.*, vol. 54, no. 2, pp. 10–35, 2012, doi: 10.1109/MAP.2012.6230714.

[17] A. V Kildishev, A. Boltasseva, and V. M. Shalaev, “Planar Photonics with Metasurfaces,” *Science* vol. 339, no. 6125, 2013, doi: 10.1126/science.1232009.

[18] M. A. Kats, R. Blanchard, P. Genevet, and F. Capasso, “Nanometre optical coatings based on strong interference effects in highly absorbing media,” *Nat. Mater.*, vol. 12, no. 1, pp. 20–24, 2013, doi: 10.1038/nmat3443.

[19] N. Yu and F. Capasso, “Flat optics with designer metasurfaces,” *Nat. Mater.*, vol. 13, no. 2, pp. 139–150, 2014, doi: 10.1038/nmat3839.

[20] H. Gao, J. K. Hyun, M. H. Lee, J.-C. Yang, L. J. Lauhon, and T. W. Odom, “Broadband Plasmonic Microlenses Based on Patches of Nanoholes,” *Nano Lett.*, vol. 10, no. 10, pp. 4111–4116, Oct. 2010, doi: 10.1021/nl1022892.

[21] F. Walter, G. Li, C. Meier, S. Zhang, and T. Zentgraf, “Ultrathin Nonlinear Metasurface for Optical Image Encoding,” *Nano Lett.*, vol. 17, no. 5, pp. 3171–3175, May 2017, doi: 10.1021/acs.nanolett.7b00676.

[22] N. Yu *et al.*, “Light Propagation with Phase Discontinuities: Generalized Laws of Reflection and Refraction,” *Science*, vol. 334, no. 6054, pp. 333–337, 2011, doi: 10.1126/science.1210713.

[23] S. Pancharatnam, “Generalized theory of interference, and its applications,” *Proc. Indian Acad. Sci. - Sect. A*, vol. 44, no. 5, pp. 247–262, 1956, doi: 10.1007/BF03046050.

[24] D. Wen, F. Yue, W. Liu, S. Chen, and X. Chen, “Geometric Metasurfaces for Ultrathin Optical Devices,” *Adv. Opt. Mater.*, vol. 6, no. 17, p. 1800348, 2018, doi: https://doi.org/10.1002/adom.201800348.

[25] W. Luo, S. Xiao, Q. He, S. Sun, and L. Zhou, “Photonic Spin Hall Effect with Nearly 100% Efficiency,” *Adv. Opt. Mater.*, vol. 3, no. 8, pp. 1102–1108, 2015, doi: https://doi.org/10.1002/adom.201500068.

[26] A. Kelkar, “FLAPS: conformal phased reflecting surfaces,” in *Proceedings of the 1991 IEEE National Radar Conference*, 1991, pp. 58–62. doi: 10.1109/NRC.1991.114725.

[27] T. A. Metzler, “Analysis of a reflectarray antenna using microstrip patches of variable size,” *Electron. Lett.*, vol. 29, no. 8, pp. 657-658(1), 1993.

[28] C. Pfeiffer and A. Grbic, “Metamaterial Huygens’ surfaces: tailoring wave fronts

with reflectionless sheets.," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 110 19, p. 197401, 2013.

[29] V. V Kornienko, A. N. Shaimanov, and A. V Baryshev, "Overlapping the electric and magnetic dipole resonances of a silver 2D Babinet-type metasurface: Broadband high reflectance with local field enhancement," *J. Appl. Phys.*, vol. 126, no. 6, p. 63102, 2019, doi: 10.1063/1.5096612.

[30] V. E. Babicheva and A. B. Evlyukhin, "Metasurfaces with Electric Quadrupole and Magnetic Dipole Resonant Coupling," *ACS Photonics*, vol. 5, no. 5, pp. 2022–2033, May 2018, doi: 10.1021/acsphotonics.7b01520.

[31] F. Ding, A. Pors, and S. I. Bozhevolnyi, "Gradient metasurfaces: a review of fundamentals and applications," *Reports Prog. Phys.*, vol. 81, no. 2, p. 26401, 2017, doi: 10.1088/1361-6633/aa8732.

[32] O. Danila and D. Manaila-Maximean, "Bifunctional Metamaterials Using Spatial Phase Gradient Architectures: Generalized Reflection and Refraction Considerations," *Materials (Basel).*, vol. 14, no. 9, 2021, doi: 10.3390/ma14092201.

[33] H.-H. Hsiao, C. H. Chu, and D. P. Tsai, "Fundamentals and Applications of Metasurfaces," *Small Methods*, vol. 1, no. 4, p. 1600064, 2017, doi: https://doi.org/10.1002/smtd.201600064.

[34] R. Blanchard *et al.*, "Modeling nanoscale V-shaped antennas for the design of optical phased arrays," *Phys. Rev. B*, vol. 85, no. 15, p. 155457, 2012, doi: 10.1103/PhysRevB.85.155457.

[35] A. Pors and S. I. Bozhevolnyi, "Plasmonic metasurfaces for efficient phase control in reflection," *Opt. Express*, vol. 21, no. 22, pp. 27438–27451, 2013, doi: 10.1364/OE.21.027438.

[36] S. Sun *et al.*, "High-Efficiency Broadband Anomalous Reflection by Gradient Meta-Surfaces," *Nano Lett.*, vol. 12, no. 12, pp. 6223–6229, Dec. 2012, doi: 10.1021/nl3032668.

[37] S. Sun, Q. He, S. Xiao, Q. Xu, X. Li, and L. Zhou, "Gradient-index meta-

surfaces as a bridge linking propagating waves and surface waves.," *Nature materials*, vol. 11, no. 5. England, pp. 426–431, Apr. 2012. doi: 10.1038/nmat3292.

[38] L. Huang *et al.*, "Dispersionless Phase Discontinuities for Controlling Light Propagation," *Nano Lett.*, vol. 12, no. 11, pp. 5750–5755, Nov. 2012, doi: 10.1021/nl303031j.

[39] S.-C. Jiang *et al.*, "High-efficiency generation of circularly polarized light via symmetry-induced anomalous reflection," *Phys. Rev. B*, vol. 91, no. 12, p. 125421, Mar. 2015, doi: 10.1103/PhysRevB.91.125421.

[40] C.-Y. Yu, Q.-C. Zeng, C.-J. Yu, C.-Y. Han, and C.-M. Wang, "Scattering Analysis and Efficiency Optimization of Dielectric Pancharatnam–Berry-Phase Metasurfaces," *Nanomaterials* ,vol. 11, no. 3. 2021. doi: 10.3390/nano11030586.

[41] M. A. Al-Joumayly and N. Behdad, "A Generalized Method for Synthesizing Low-Profile, Band-Pass Frequency Selective Surfaces With Non-Resonant Constituting Elements," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 58, no. 12, pp. 4033–4041, 2010, doi: 10.1109/TAP.2010.2078474.

[42] D. M. Pozar, "Flat lens antenna concept using aperture coupled microstrip patches," *Electron. Lett.*, vol. 32, no. 23, p. 2109, 1996, doi: 10.1049/el:19961451.

[43] K. Sarabandi and N. Behdad, "A Frequency Selective Surface With Miniaturized Elements," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 55, no. 5, pp. 1239–1245, 2007, doi: 10.1109/TAP.2007.895567.

[44] C. G. M. Ryan, M. R. Chaharmir, J. Shaker, J. R. Bray, Y. M. M. Antar, and A. Ittipiboon, "A Wideband Transmitarray Using Dual-Resonant Double Square Rings," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 58, no. 5, pp. 1486–1493, 2010, doi: 10.1109/TAP.2010.2044356.

[45] B. Memarzadeh and H. Mosallaei, "Array of planar plasmonic scatterers functioning as light concentrator," *Opt. Lett.*, vol. 36, no. 13, pp. 2569–2571,

2011, doi: 10.1364/OL.36.002569.

[46] W. Yang *et al.*, "All-dielectric metasurface for high-performance structural color," *Nat. Commun.*, vol. 11, no. 1, p. 1864, 2020, doi: 10.1038/s41467-020-15773-0.

[47] M. Khorasaninejad and F. Capasso, "Metalenses: Versatile multifunctional photonic components," *Science*, vol. 358, no. 6367, 2017, doi: 10.1126/science.aam8100.

[48] G. Sen, A. Banerjee, M. Kumar, and S. Das, "An ultra-wideband monopole antenna with a gain enhanced performance using a novel split-ring meta-surface reflector," *Microw. Opt. Technol. Lett.*, vol. 59, no. 6, pp. 1296–1300, 2017, doi: 10.1002/mop.30527.

[49] M. W. Beijersbergen, R. P. C. Coerwinkel, M. Kristensen, and J. P. Woerdman, "Helical-wavefront laser beams produced with a spiral phaseplate," *Opt. Commun.*, vol. 112, no. 5, pp. 321–327, 1994, doi: https://doi.org/10.1016/0030-4018(94)90638-6.

[50] Y. Ma *et al.*, "Ultra-wideband, optically transparent, and flexible microwave metasurface absorber," *Opt. Mater. Express*, vol. 11, no. 7, pp. 2206–2218, 2021, doi: 10.1364/OME.426685.

[51] D. GABOR, "A New Microscopic Principle," *Nature*, vol. 161, no. 4098, pp. 777–778, 1948, doi: 10.1038/161777a0.

[52] F. Ding, Y. Chen, and S. I. Bozhevolnyi, "Metasurface-Based Polarimeters," *Appl. Sci.*, vol. 8, no. 4, 2018, doi: 10.3390/app8040594.

[53] H. Lee and D.-H. Kwon, "Large and efficient unidirectional plane-wave--surface-wave metasurface couplers based on modulated reactance surfaces," *Phys. Rev. B*, vol. 103, no. 16, p. 165142, 2021, doi: 10.1103/PhysRevB.103.165142.

[54] L. Huang *et al.*, "Three-dimensional optical holography using a plasmonic

metasurface," *Nat. Commun.*, vol. 4, no. 1, p. 2808, 2013, doi: 10.1038/ncomms3808.

[55] V. Egorov, M. Eitan, and J. Scheuer, "Genetically optimized all-dielectric metasurfaces," *Opt. Express*, vol. 25, no. 3, pp. 2583–2593, 2017, doi: 10.1364/OE.25.002583.

[56] G. Zheng, H. Mühlenbernd, M. Kenney, G. Li, T. Zentgraf, and S. Zhang, "Metasurface holograms reaching 80% efficiency," *Nat. Nanotechnol.*, vol. 10, no. 4, pp. 308–312, 2015, doi: 10.1038/nnano.2015.2.

[57] F. Aieta *et al.*, "Aberration-Free Ultrathin Flat Lenses and Axicons at Telecom Wavelengths Based on Plasmonic Metasurfaces," *Nano Lett.*, vol. 12, no. 9, pp. 4932–4936, Sep. 2012, doi: 10.1021/nl302516v.

[58] X. Ni, S. Ishii, A. V Kildishev, and V. M. Shalaev, "Ultra-thin, planar, Babinet-inverted plasmonic metalenses," *Light Sci. Appl.*, vol. 2, no. 4, pp. e72–e72, 2013, doi: 10.1038/lsa.2013.28.

[59] V. E. Babicheva and J. V Moloney, "Lattice Resonances in Transdimensional WS_2 Nanoantenna Arrays," *Appl. Sci.*, vol. 9, no. 10, 2019, doi: 10.3390/app9102005.

[60] S. A. Han, R. Bhatia, and S.-W. Kim, "Synthesis, properties and potential applications of two-dimensional transition metal dichalcogenides," *Nano Converg.*, vol. 2, no. 1, p. 17, 2015, doi: 10.1186/s40580-015-0048-4.

[61] C. Cong, J. Shang, Y. Wang, and T. Yu, "Optical Properties of 2D Semiconductor WS_2," *Adv. Opt. Mater.*, vol. 6, no. 1, p. 1700767, 2018, doi: https://doi.org/10.1002/adom.201700767.

[62] H. Zhang *et al.*, "Hybrid exciton-plasmon-polaritons in van der Waals semiconductor gratings," *Nat. Commun.*, vol. 11, no. 1, p. 3552, 2020, doi: 10.1038/s41467-020-17313-2.

[63] V. E. Babicheva, S. Gamage, L. Zhen, S. B. Cronin, V. S. Yakovlev, and Y. Abate, “Near-Field Surface Waves in Few-Layer MoS2,” *ACS Photonics*, vol. 5, no. 6, pp. 2106–2112, Jun. 2018, doi: 10.1021/acsphotonics.7b01563.

[64] V. E. Babicheva and J. V Moloney, “Lattice Zenneck Modes on Subwavelength Antennas,” *Laser Photon. Rev.*, vol. 13, no. 2, p. 1800267, Feb. 2019, doi: https://doi.org/10.1002/lpor.201800267.

[65] B. Munkhbat *et al.*, “Electrical Control of Hybrid Monolayer Tungsten Disulfide–Plasmonic Nanoantenna Light–Matter States at Cryogenic and Room Temperatures,” *ACS Nano*, vol. 14, no. 1, pp. 1196–1206, Jan. 2020, doi: 10.1021/acsnano.9b09684.

[66] R. Verre, D. G. Baranov, B. Munkhbat, J. Cuadra, M. Käll, and T. Shegai, “Transition metal dichalcogenide nanodisks as high-index dielectric Mie nanoresonators,” *Nat. Nanotechnol.*, vol. 14, no. 7, pp. 679–683, 2019, doi: 10.1038/s41565-019-0442-x.

[67] J. Chen *et al.*, “Tungsten Disulfide–Gold Nanohole Hybrid Metasurfaces for Nonlinear Metalenses in the Visible Region,” *Nano Lett.*, vol. 18, no. 2, pp. 1344–1350, Feb. 2018, doi: 10.1021/acs.nanolett.7b05033.

[68] J. Shi *et al.*, “Plasmonic Enhancement and Manipulation of Optical Nonlinearity in Monolayer Tungsten Disulfide,” *Laser Photon. Rev.*, vol. 12, no. 10, p. 1800188, 2018, doi: https://doi.org/10.1002/lpor.201800188.

[69] G. Hu *et al.*, “Coherent steering of nonlinear chiral valley photons with a synthetic Au–WS_2 metasurface,” *Nat. Photonics*, vol. 13, no. 7, pp. 467–472, 2019, doi: 10.1038/s41566-019-0399-1.

[70] H. Ahmed and V. E. Babicheva, “Nanostructured Tungsten Disulfide WS_2 as Mie Scatterers and Nanoantennas,” *MRS Adv.*, vol. 5, no. 35–36, pp. 1819–1826, 2020, doi: DOI: 10.1557/adv.2020.173.

[71] G. A. Ermolaev, D. I. Yakubovsky, Y. V Stebunov, A. V Arsenin, and V. S. Volkov, “Spectral ellipsometry of monolayer transition metal dichalcogenides: Analysis of excitonic peaks in dispersion,” *J. Vac. Sci. Technol. B*, vol. 38, no. 1, p. 14002, Dec. 2020, doi: 10.1116/1.5122683.

[72] X. Ni, N. K. Emani, A. V Kildishev, A. Boltasseva, and V. M. Shalaev, “Broadband Light Bending with Plasmonic Nanoantennas,” *Science.*, vol. 335, no. 6067, p. 427, 2012, doi: 10.1126/science.1214686.

[73] E. D. Palik, *Handbook of optical constants of solids*. Orlando : Academic Press, 1985.

ÖZGEÇMİŞ

Adı, Soyadı: Duygu Gümüşcü

Uyruğu: Türkiye (T.C.)

EĞİTİM

Derece	Kurum	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	Kayseri Üniversitesi Elektrik-Elektronik Müh.	2022
Lisans	Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fak., Elektrik-Elektronik Müh. Böl.	2015
Lise	Nuh Mehmet Baldöktü Anadolu Lisesi	2011

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görev
Kasım 2019-Mart 2020	Elektrik Dizayn Mühendislik San. ve Tic. A. Ş	Proje Mühendisi
Temmuz 2017-Ekim 2018	3A ENERJİ A.Ş – SOLONN ENERJİ A. Ş	Proje ve Saha Mühendisi
Aralık 2016-Temmuz 2017	ÖDÜL SOLAR ENERJİ Proje ve Üretim mühendisi	Proje ve Üretim mühendisi

YABANCI DİL

İngilizce

YAYINLAR

Kitap &Kitap Bölümleri

Gümüşcü D., Aslan E., Aslan E. (2022). "Analysis of Tungsten Disulfide Contribution to the Reflected Phase of the Four-ArmBilayer Nanoantenna". Hikmet Y. ÇOĞUN, Zeynel KARACAGİL (Editörler). ***Structure Current Debates on Natural and Engineering Sciences.*** 3.baskı. Ankara. Bilgin Kültür Sanat Yayınları, ss. 53-59.

Hakemli Kongre / Sempozyum Bildiri Kitaplarında Yer Alan Yayınlar

Gümüşcü D., Aslan E., Aslan E. (2022, 7-9 Mayıs). Analysis of Tungsten Disulfide Contribution to the Reflected Phase of the Four-Arm Bilayer Nanoantenna Structure. 2. Uluslararası Mühendislik ve Doğa Bilimleri Çalışmaları Kongresi'nde sunuldu (ICENSS2022), Ankara.

PROJELER

Aslan E. (Yürütücü), Aslan E. (Araştırmacı), Gümüşcü D. (Araştırmacı), Ersoy B. (Araştırmacı) (2022). Yükseköğretim Kurumları Destekli Proje, Tungsten Disülfit Destekli Plazmonik Metayüzey Tasarımı.

BURSLAR

Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) 2021/2 Dönemi Yurt İçi Öncelikli Alanlar Burs Programı (2210-C) Bursiyeri