

**TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**METAYÜZEYLERİN TASARIMI VE OPTOELEKTRONİK AYGIT  
UYGULAMALARI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Nazmi YILMAZ**

**Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Hamza KURT**

**NİSAN 2020**



## TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, alıntı yapılan kaynaklara eksiksiz atıf yapıldığını, referansların tam olarak belirtildiğini ve ayrıca bu tezin TOBB ETÜ Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlandığını bildiririm.

Nazmi Yılmaz



## ÖZET

Yüksek Lisans

METAYÜZEYLERİN TASARIMI VE OPTOELEKTRONİK AYGIT

UYGULAMALARI

Nazmi Yılmaz

TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Hamza Kurt

Tarih: Nisan 2020

Son zamanlarda, meta-yüzeyler ışığın dalga boyundan daha küçük ölçeklerde ışığın faz, genlik ve polarizasyonunu modüle etmek için ümit vaat eden bir yöntem olarak ortaya çıkmıştır. Meta-yüzeyleri, ışığın fazını eğimli optik yol boyunca toplayarak manipüle eden geleneksel optik malzemelerle karşılaştığımızda nano boyutlu antenlerden oluşan meta-yüzeyler düz bir yüzey boyunca ışığı kontrol ederler. Bununla birlikte, tamamen dielektrikten oluşan metayüzeyler geleneksel optik elementlerin yerine kayıplı plazmonik bileşenlerden daha iyi olan ve daha az üretim zorluğu getiren çok ince metayüzeylerin kullanılmasına yol açmaktadır.

Genel metayüzey yaklaşımı olan çapları değişen nano sütunlardan oluşan metayüzey yerine farklı yaklaşım olarak nano delik yapılar denenmiştir. Nano delik ile tasarlanan mercekle yapı ile görünür bölgede 70% üzerinde odaklama verimliliği elde edilmiştir. Ayrıca karşılaştırmalı olarak nano sütun ve nano delik ile oluşturulan iki farklı metayüzey incelenmiş ve nano delik ile oluşturulan yapıların daha iyi performans sağladığı gösterilmiştir.

Geleneksel optik malzemeler ile ayarlanabilir odak uzunluğu çalışmaları mevcuttur. Tezin üçüncü kısmında, Moiré mercek yapısı metayüzey yaklaşımı ile yeniden tasarlanmıştır. Birbirlerine dik olarak yerleştirilen iki zıt faza sahip metayüzeyden oluşan yapı metayüzeylerden birinin kendi eksenini etrafında dönmesi ile farklı odak oluşturur. Yapının odak noktası değişimi ve performansı incelenmiştir. Ayrıca, çok odaklı ayarlanabilir sistem önerilmiştir. Bu yapı sayesinde çok odak ve tek odaklı bir sistem elde edilebilir.

Güneş pilleri, gelen ışığın farklı dalgalıboylarına ayrılması ve her bir dalgalıboyunun uygun foto-voltaik malzemeler tarafından soğurulmasıyla daha verimli çalışırlar. Tezin dördüncü bölümünde ışığı dalgalıboylarına ayırıştırmak için metayüzey tabanlı bir tasarım önerilmiştir. Bu tasarımda ışığı öncelikle bükücü bir metayüzey ile farklı açılarda bükerek ayırmayı daha sonra ayrılan farklı dalgalıboyuna sahip hüzmeleri uygun bir düzlemde odaklamaya çalışılmıştır. foto-voltaik malzemeler üzerine metayüzey tabanlı bir mercek ile odaklanması gösterilmiştir.

İşığın doğada bir doğru boyunca ilerlemediği hüzmeler türleri çeşitli yöntemlerle gerçekleştirilmiştir. Tezin beşinci bölümünde doğrusal olarak hareket etmeyen Bessel tipi ışınlar metayüzey tabanlı bir tasarımla üretilmiştir. Tasarlanan metayüzeyler sahip oldukları özel faz dağılımları ile ışığa başlangıç fazı sağlayarak ışığı istenilen yörüngede hareket ettirir. Tasarlanan metayüzey karakteri nedeniyle geniş dalga boyu aralığında bu tarz ışınları üretmiştir.

Tezin altıncı bölümünde Baş Üstü Gösterge tasarımı yapılmıştır. Geleneksel elemanların aksine daha az yer kaplayan ve daha verimli olan dalga kılavuzu yapıları sistem tasarlanmıştır. Dalga kılavuzu ve ızgara yapıları ile tasarlanan yapının çalışması gösterilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Tamamen dielektrik metayüzeyler, Görünür bölge, Polarizasyon bağımsız metalens, Dalga önecephesi kontrolü, Düz optik, Geometrik optik

## **ABSTRACT**

Master of Science

**DESIGN OF METASURFACES AND OPTOELECTRONIC DEVICE**

**APPLICATIONS**

Nazmi Yılmaz

TOBB University of Economics and Technology  
Institute of Natural and Applied Sciences  
Electrical and Electronics Engineering Science Programme

Supervisor: Prof. Dr. Hamza Kurt

Date: April 2020

Recently, metasurface has been proposed as a promising method to modulate the phase, amplitude, polarization of the light at the subwavelength scale. Comparing to the conventional optical devices which manipulate light via the accumulation effect along the curved optical path, the two-dimensional metasurface composed of engineered nanostructured antennas array could realize the manipulation along flat medium surface. On the other hand, all dielectric metasurface schemes pave the way towards employing ultrathin metasurfaces elements to replace traditional bulky optical elements with much lower power loss than plasmonic counterparts and less fabrication complexity.

Contrary to usual approach for metasurfaces design consisting of nanopillars with varying diameters, nano hole based metasurfaces is proposed in this section. Nano hole metasurfaces shows high focusing efficiency above 70% in visible spectrum. Moreover, to demonstrate its superiority, performances of nano hole and nano pillar metasurfaces are compared and it is showed that nano hole metasurfaces have better performances.

Adjustable focal length studies are available with traditional optical materials. In the second part of this thesis, Moiré lenses are redesigned via metasurfaces. Different focal point can be created by rotating one of two metasurfaces on its axis which have reverse phase with respect to each other. Besides, multifunctional focal system is proposed in this section. Single and multiple focal plane can be formed by using the proposed multifunctional focal system.

Solar cells work more efficiently with separation of incoming light into different wavelengths and absorption each wavelength by suitable photo-voltaic materials. In this thesis, it is proposed a metasurface-based design for separating the incident light into wavelengths. In this design, it is demonstrated to separate the light by bending at different angles with a metasurface and then to focus the beams which have different wavelengths, on suitable photo-voltaic materials by using the lens which is based on metasurface.

The types of rays that the light does not travel along a path in the nature have been carried out in various methods. These types of beams are produced by a metasurface based design. Designed metasurfaces with their specific phase distributions provides the initial phase of light and the light is moved to the desired orbit. Due to its characteristic behavior, designed metasurfaces produces these type beam for different wavelength.

In the sixth part of the thesis, Head up Display system are designed and investigated. Unlike traditional elements, a system with waveguide structure that takes up less space and is more efficient is designed. The structure designed with waveguide and grating structures is shown.

**Keywords:** All-dielectric Metasurfaces, Visible spectrum, Polarization-insensitive Metalens, Wavefront control, Flat-optics, Geometrical optics.



## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans çalışmalarım boyunca beni yönlendiren, değerli vaktini ayıran ve emeğini esirgemeyen Prof. Dr. Hamza KURT ile çalışma imkanına sahip olduğum için kendisine sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarında bana yardımcı olan ve yönlendiren Dr. Ahmet ÖZER, Dr. Aytekin ÖZDEMİR, Fehim Taha BAĞCI ve Dr. Devrim ANIL' a ayrıca teşekkürlerimi sunuyorum. Her zaman destek aldığım değerli dostlarım Osman Oğuzhan KILIÇ, Hüseyin BOYNIKAR, Talha SUNMAN, Fırat Cem SAVAŐ, Selahattin KORKMAZ, Utku MENTEŐE ve Koray AYTAÇ' a teşekkür ederim. Hayatımın her evresinde bana destek olan babam Mustafa Şafak YILMAZ, annem NeŐe YILMAZ ve kardeşim Emire YILMAZ' a gönülden teşekkür ederim.

Son olarak yüksek lisans süresi içerisinde finansal destekte bulunan ASELSAN AŐ'ye (AHUD TEYDEB 1501 proje kapsamında) ve burs sağladığı için TOBB ETÜ'ye teşekkür ediyorum.



## İÇİNDEKİLER

Sayfa

<b>TEZ BİLDİRİMİ</b> .....	<b>iii</b>
<b>ÖZET</b> .....	<b>iv</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>vi</b>
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	<b>viii</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>ix</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b> .....	<b>x</b>
<b>KISALTMALAR</b> .....	<b>xii</b>
<b>SEMBOL LİSTESİ</b> .....	<b>xiii</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
<b>2. NANO DELİK YAPISIYLA OLUŞTURULAN METAYÜZEY İLE OPTİK UYGULAMALARI</b> .....	<b>7</b>
2.1    Tasarlanan Yapının Parametrik Analizi .....	8
2.2    Optik Performansın Analizi .....	10
2.3    Nano Delik ile Nano Sütundan Oluşan Metayüzeylerin Karşılaştırılması. 12	
<b>3. ROTASYONEL OLARAK AYARLANABİLİR POLARİZASYON BAĞIMSIZ TEK VE ÇOK ODAKLI METAYÜZEYLER</b> .....	<b>15</b>
3.1    Ayarlanabilir Optik Elemanlar .....	15
3.2    Döndürülerek Ayarlanan Optik Sistem Tasarım Ana Fikri .....	17
3.3    Sayısal Analizler ve Sonuçlar .....	19
3.4    Çok Odaklı Ayarlanabilir MetayüzeY Tasarımı .....	22
<b>4. POLARİZASYONA BAĞLI OLMAYAN DİELEKTRİK METAYÜZEY İLE DALGA BOYLARININ AYRIŞTIRILMASI VE GÜNEŞ ENERJİ PİLLERİ İÇİN ODAKLAYICI MERCEK İLE YAPI OLUŞTURULMASI....</b>	<b>27</b>
4.1    Dalgaboyu ve Güç Ayırıcılar .....	27
4.2    Kullanılan Yöntemler ve Oluşturulan Yapılar .....	28
4.3    Oluşturulan Yapının Sayısal Analiz ve Sonuçları.....	31
<b>5. BELİRLENEN YÖRÜNGEDE HAREKET EDEN BESSEL TİPİ İŞİNLERİN METAYÜZEY İLE OLUŞTURULMASI</b> .....	<b>33</b>
5.1    Faz Profilinin oluşturulması ve Yapının Analizleri .....	33
<b>6. DALGA KILAVUZU TABANLI BAŞ ÜSTÜ GÖSTERGE OPTİK TASARIM VE ANALİZİ</b> .....	<b>37</b>
6.1    Geleneksel Optik Sistemlerin sorunları ve Çözüm Önerisi .....	37
6.2    Dalgakılavuzu Tabanlı Optik Sistemin Tasarım ve Analizleri .....	38
<b>7. SONUÇ VE ÖNERİLER</b> .....	<b>43</b>
<b>KAYNAKLAR</b> .....	<b>45</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ</b> .....	<b>53</b>



## ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1: (a) Homojen ve (b) homojen olmayan arayüz ile karşılaşan ışığın Huygens prensibine göre hareketi. ....	2
Şekil 1.2: (a) ve (b) plazmonik saçıcılar kullanılarak yapılan örnek çalışmalar. ....	2
Şekil 1.3: Mie tipi rezonans ile çalışan metayüzey için elektrik ve manyetik rezonansları. ....	3
Şekil 1.4: (a) Üretilmiş olan dielektrik metayüzey elektron mikroskobu altında genel yapısı ve nano sütunların görüntüsü, (b) görünür bölgede farklı çapta nano sütunlar için iletim verimliliği. ....	4
Şekil 1.5: Geleneksel BÜG sistemlerinde ekranda oluşturulan görüntünün optik elemanlar aracılığıyla dışarındaki görüntüyle birlikte kullanıcıya aktarılması. ....	5
Şekil 2.1: Altıgen bir örgü üzerinde hizalanmış nano deliklerden oluşan metayüzeyin üç boyutlu gösterimi. Metayüzey iki SiO <sub>2</sub> katman arasında durmaktadır. TiO <sub>2</sub> deliklerinin çaplarının farklılaşması sonucu oluşan (b) Faz ve (c) iletim haritaları. ....	8
Şekil 2.2: Normalize edilmiş elektriksel alan yoğunluğunun üç boyutlu gösterimi ve odaklanan ışığın enine kesiti, ve elektriksel alan yoğunluk dağılımı (a) ve (d) 450 nm, (b) ve (e) 532 nm, (c) ve (f) 650 nm. ....	10
Şekil 2.3: (a) SA=0.6 için farklı dalga boylarında odaklanma verimliliği (b) 532 nm dalga boyu için farklı SA değerlerinde odaklanma verimliliği. ...	10
Şekil 2.4: 532 nm dalga boyunda birim hücrenin farklı deliklerin çaplarına göre açı bağımlılıkları; (a) faz ve (b) iletim verimliliği. ....	11
Şekil 2.5: Nano delik ve nano sütun birim hücreler ile tasarlanan metayüzeylerin (a)-(b) 450 nm ve (c)-(d) 650 nm' de farklı SA değerlerinde odak verimleri ve YDG değerlerinin karşılaştırılması. ....	12
Şekil 2.6: Farklı dalga boyları için (a) 450 nm ve (b) 532 nm farklı geliş açılarında odak verimliliği (tasarım dalgaboyu $\lambda_d = 532$ nm ve SA= 0.60). ....	13
Şekil 3.1: (a) Metayüzey yapısının üç boyutlu gösterimi. Her birim hücre SiO <sub>2</sub> alttaş üzerinde kare örgü ile düzenlenmiştir. Örgü sabiti ve TiO <sub>2</sub> nano sütun uzunluğu sırasıyla 250 nm ve 600 nm seçilmiştir. (b) Birim hücreyi oluşturan silindirlerin farklı çap değerlerine göre faz ve ilerim değerleri. ....	17
Şekil 3.2: (a)Tasarlanan yapının üç boyutlu gösterimi; iki metayüzey karşılıklı yerleştirilmiştir. Bu iki metayüzeyin fazlarıyla birleşmesi sonucu odak oluşturabilen faz profiline sahip olunur. Dönme açısının artırılması odak uzunluklarını f ile f' arasında değişikliğe neden olur. (b) her bir metayüzeyin örnek faz profilleri ve toplamları. ....	19

Şekil 3.3: (a) 45°, 90° and 135° dönme açılarında odaklanan ışığın yoğunluk dağılımı 532 nm dalga boyu için verilmiştir. (b) Odak uzaklığının ve (c) odaklanma verimliliğinin dönüş açısına bağlı olarak değişimi verilmiştir. (b) 1790 nm ve (c,d) çalışma dalgaboyları için kararlı hal elektrik alan (a,c) dağılımı ve (b,d) elektrik alan kesiti verilmiştir. ....	21
Şekil 3.4: Çok odak düzlemine sahip sistem için örneklenmiş faz profilleri. ...	23
Şekil 3.5: (75°, 90° ve 120° dönme açılarında çoklu odak düzleminde oluşan odakların ışık yoğunluğu dağılımı: (a) TM ve (b) TE. ....	24
Şekil 4.1: Periyodik TiO <sub>2</sub> nano-sütun ile metayüzeyin üç boyulu gösterimi (h=400 nm, P <sub>x</sub> =P <sub>y</sub> =250 nm) üstten görünüm ve yandan görünüş. (b) çapa göre oluşturulmuş birim hücre için faz verileri. ....	29
Şekil 4.2: (a) Tasarlanan yapının üç boyutlu gösterimi; ışığı dalga boylarına göre yönlendiren metayüzey ve odak düzlemi oluşturan metayüzey verilmiştir. Gelen ışık 400-550 ve 550-700 nm dalga boyu aralıklarında iki düzlemde oluşur. (b) Tasarlanan yapının dalga boylarına göre iletim verimliliği. ....	30
Şekil 4.3: (a) Görünür spektrumdaki ilgili dalga boylarına karşılık gelen yoğunluk dağılımları. (b) elde edilen yoğunluk dağılımları üzerinde (a)'nın turuncu kesikli çizgileri boyunca normalize edilmiş yoğunluk profilleri. Turuncu çizgi, ortak bir kesit alanı oluşturularak odak kesitlerinin gösterilmesi amacıyla oluşturulmuştur. ....	31
Şekil 4.4: Görünür spektrumda (a) birinci derece (b) sıfır derece odak düzlemlerinin odak verimlilikleri. ....	32
Şekil 5.1: (a) SiO <sub>2</sub> alt taş üzerine TiO <sub>2</sub> silindirik çubukların yerleştirilmesi ile oluşturulan metayüzeyin üç boyutlu gösterimi. (b) İletim verimliliği ve oluşan faz gecikmesinin 100 nm ila 220 nm arasında değişen farklı TiO <sub>2</sub> nano sütun çapları için dağılımı. ....	34
Şekil 5.2: (a) Bessel benzeri ışın elde etmek için faz dağılımı. (b) Bessel benzeri kirişin istenen yörünge boyunca yayılma yönü. (c-e) Bessel demetinin z = (8, 16, 24) µm'deki enine kesitleri. ....	35
Şekil 5.3: Bessel tarzı istenilen yörüngede hareket eden ışınlar farklı dalga boylarında gösterilmiştir (a) 475 nm, (b) 550 nm, (c) 600 nm. ....	36
Şekil 6.1: Geleneksel optik bileşenler ile yapılan BÜG sistemi. ....	37
Şekil 6.2: Dalga kılavuzu tabanlı BÜG genel tasarım şeması. Yapı bir dalga kılavuzu, giriş, yönlendirici ve çıkış ızgaralarından oluşmaktadır. ....	38
Şekil 6.3: Yapı üzerinde (a) giriş ızgarası (b) yönlendirici ızgara ve (c) çıkış ızgarası ve ışığın bu yüzeyler ile teması sonrası temsili hareketi. ....	40
Şekil 6.4: (a) Giriş ızgarası için oluşturulan yapı ve (b) analiz sonucu elde edilen iletim verimliliği ve ızgara yapısıyla etkileşimi sonrası ışığın dalga kılavuzu içerisine giriş açıları. ....	41
Şekil 6.5: Ekrandan "H" şeklinde verilen görüntünün giriş ızgarasından dalga kılavuzuna alınması ve yönlendirilerek çıkış ızgarasından çıkarılması sonucu tekrar oluşturulan görüntü. ....	41

## KISALTMALAR

<b>Maks.</b>	: Maksimum
<b>TE</b>	: Enine Elektrik (Transverse Electric)
<b>TM</b>	: Enine Manyetik (Transverse Magnetic)
<b>ZASF</b>	: Zaman-alanında Sonlu-farklar
<b>SA</b>	: Sayısal Açıklık
<b>YDG</b>	: Yarı Doruk Genişliği
<b>SOE</b>	: Saçıcı Optik Elemanlar
<b>MEMS</b>	: Mikroelektromekanik Sistemler
<b>BÜĞ</b>	: Baş Üstü Gösterge
<b>IR</b>	: Infrared(Kızıl ötesi)





## SEMBOL LİSTESİ

Bu çalışmada kullanılmış olan simgeler açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
$a,p$	Örgü sabiti
$p_x$	$x$ yönünde katman periyodu
$p_y$	$y$ yönünde katman periyodu
$E$	Elektrik alan
$\varphi$	Faz
$h$	Yükseklik
$\alpha$	Faz sabiti
$\lambda$	Dalga boyu
$\lambda_d$	Tasarım dalga boyu
$\phi$	Polar Koordinat açısı
$\theta$	Dönme açısı
$\beta$	Enine dalga numarası
$f$	Odak uzunluğu
$n$	Kırıcılık indisi
$k_0$	Boşluk uzayda dalga numarası
$\theta_t$	Kırılma Açısı
$\theta_r$	Yansıma Açısı
$\theta_i$	Geliş açısı
$d$	Silindir çapı
$L$	Talbot uzunluğu



## 1. GİRİŞ

İki farklı ortam arasında kalan arayüzde yansıma / kırılma, elektro manyetik (EM) dalganın yayılma yönünü kontrol etmek için muhtemelen en basit yaklaşımdır. İki homojen optik ortam arasındaki düzlemsel bir arayüzde, EM dalgalarının yansımaları ve kırılmaları Snell yasasına tabidir. Bu da geliş açısının,  $\theta_i$ , yansıma açısıyla,  $\theta_r$ , aynı olması gerektiğini belirtirken, kırılma açısının,  $\theta_t$ , ise,  $n_i$  ve  $n_t$  kırıcılık indeksine sahip iki ortamın  $n_i \sin \theta_i = n_t \sin \theta_t$  olarak formüle edilmesiyle elde edilmesidir (Şekil 1.1 (a)'da sol kısımda gösterilmiştir). Bu yasanın altında yatan temel fizik, yansıyan / kırılan ışık ışınlarının gelen ışına göre paralel momentumlarının korunmasıdır [1].

$$\vec{k}_{||}^t = \vec{k}_{||}^r = \vec{k}_{||}^i \quad (1.1)$$

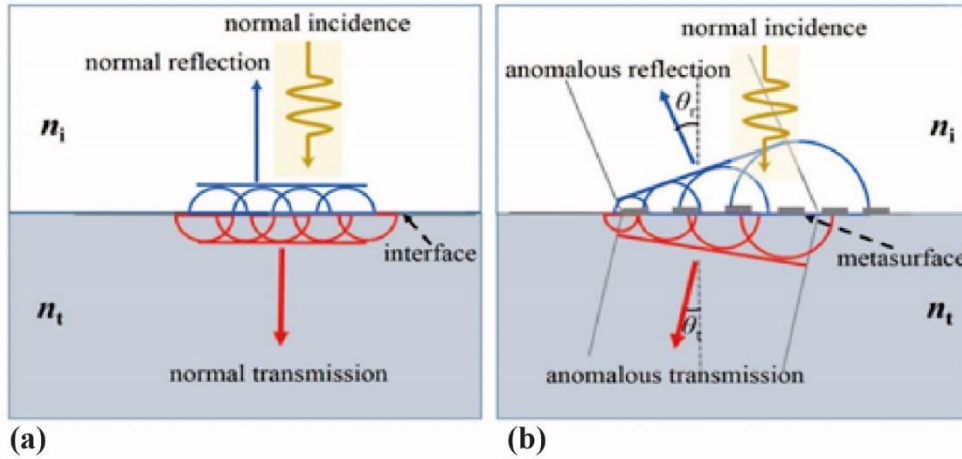
Yukarıdaki denklem, düzlemsel arayüz sayesinde EM alanlarının sınır koşullarından türetilir. Böyle bir yasa, Huygens prensibine göre de alternatif olarak anlaşılabilir. Şekil 1.1 (a)'da gösterildiği gibi, yansıyan / kırılan ışınlar, gelen dalganın arayüzde ışınması sonucu ikinci bir kaynak gibi arayüzdeki farklı yerel pozisyonlardan yayılan yeniden yapılanmış dalga olarak düşünülebilir. Bu yeniden yapılanmış aynı başlangıç fazına ( $\exp(ik_x^i, x)$ ) sahip dalgalar birleşerek yansıyan ve iletilen dalgayı oluştururlar. Bununla birlikte bu kaynaklar başlangıç fazlarına ek olarak farklı faz değerlerine sahip olduklarında Snell yasasının dışında hareket ederler. Dolayısıyla Snell yasasının homojen olmayan bir arayüzde geçerli olmadığı açıktır. Bunun için genelleştirilmiş Snell yasası oluşturulmuştur [2].

$$n_2 \sin \theta_t - n_1 \sin \theta_i = \frac{\lambda_0}{2\pi} \frac{d\varphi}{dx} \quad (1.2)$$

$$\sin \theta_r - \sin \theta_i = \frac{\lambda_0}{2\pi} \frac{d\varphi}{dx} \quad (1.3)$$

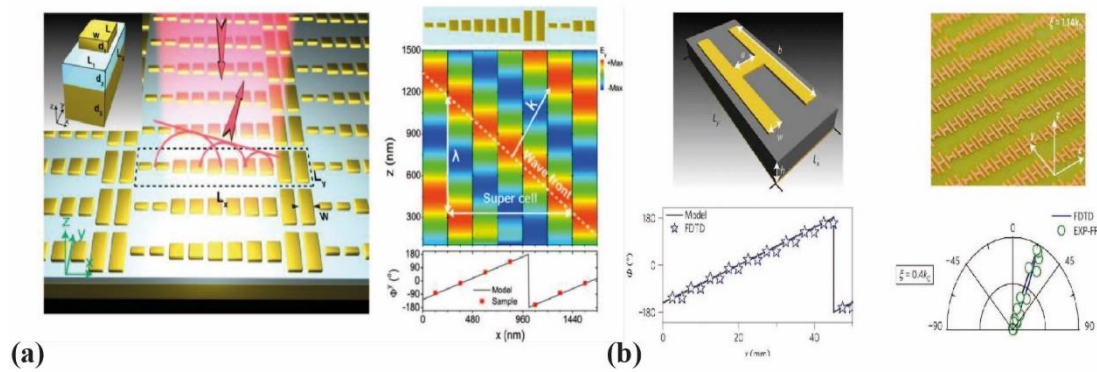
Denklem (2) kırılma ve Denklem (3) yansıma için verilmiştir. Yüzeyde  $d\varphi/dx$  faz gradyanı süreksizliği tanımlanmıştır. Bu süreksizlik ışığın Snell yasasından farklı olarak hareket etmesine neden olur. Şekil 1.1 (b)'de yüzeydeki faz süreksizliği

nedeniyle oluşan ikincil dalgaların birleşerek oluşturduğu tepeliğin hareket yönü verilmiştir. Bu da bize yansıtılan ve iletilen ışık huzmelerinin yayılma yönleri, sadece arayüzün faz gradyanını yapılandırarak düzleminin içinde, veya dışında neredeyse keyfi olarak kontrol edilebileceğini göstermektedir.



Şekil 1.1: (a) Homojen ve (b) homojen olmayan arayüz ile karşılaşan ışığın Huygens prensibine göre hareketi [3].

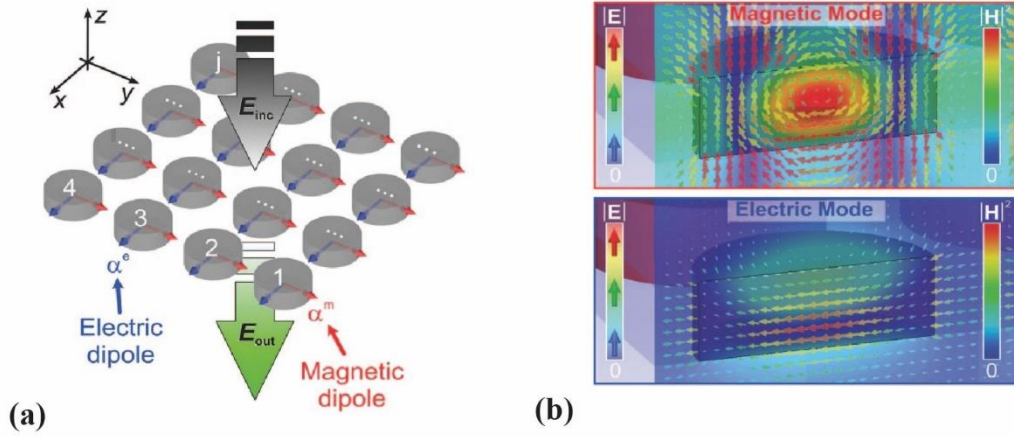
Metayüzelere dayanan ilk optik cihazlar, metal nano anten benzeri plazmonik saçıcılardan oluşuyordu [4-6]. (Şekil 1.2 (a) ve (b)'de plazmonik yapılarla yapılan çalışmalardan bazıları gösterilmiştir [7,8]). Optik frekanslardaki metallerin kaçınılmaz Ohmik kayıpları, plazmonik yapılardan oluşan metayüzeylerin performansını önemli ölçüde azalttığı için dielektrik metayüzeylerin gelişimine yol açmıştır [9].



Şekil 1.2: (a) ve (b) plazmonik saçıcılar kullanılarak yapılan örnek çalışmalar [7,8].

Optik frekanslarda, düşük kayıplı dielektrik rezonatörler, hem elektriksel hem de manyetik rezonansları plazmonik yapılardaki mekanizmaya benzer şekilde, Şekil 1.3 (a) ve (b)'de gösterildiği gibi Mie rezonansları tarafından yönetilen mekanizma ile

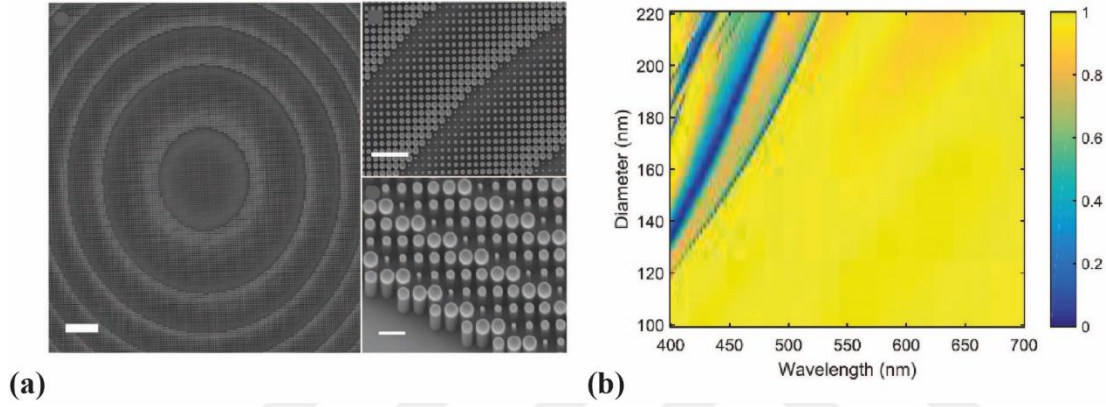
destekleyebilir [10,11]. Dielektrik rezonatörlerde elektrik rezonansının varlığı beklenirken, manyetik rezonans, ışığın rezonatörlerde dolaşan yer değiştirme akımları ile güçlü bir şekilde birleşmesinden kaynaklanır ve içeride güçlü bir manyetik dipol rezonansı oluşturur (Şekil 1.3 (b)). Genel olarak, dielektrik rezonatörlerin elektrik ve manyetik rezonansları farklı frekanslarda bulunduğunda, rezonatörlerden geçen iletim fazı sadece  $\pi$  kadar faz geçişi kapsayabilir.[1] Bununla birlikte, rezonatörün geometrisini ayarlayarak belirli frekanstaki iki rezonans tipini üst üste bindirerek, yüksek iletim ile tüm  $2\pi$  aralığını kapsayan bir faz varyasyonu elde etmek mümkündür [12,13]. Bu durum, Huygens metasyüzeyleri kavramına dayalı olarak iletilen ışıkta optimum manipülasyona olanak verir [14,15].



Şekil 1.3: Mie tipi rezonans ile çalışan metayüzey için elektrik ve manyetik rezonansları [14].

Bununla birlikte, dielektrik Huygens metayüzeylerinin kullanılabilirliğini sınırlayan bazı zorluklar vardır. Birincisi, yüksek bir iletim ile birlikte iyi bir dalga kontrolü için gereken tek bir dalga boyunda  $2\pi$  faz kapsamını sağlaması için rezonatorlerin tüm boyutları (yüksekliği de dahil) değiştirilmesi gerebilir. Bu durum üretimin başarılması için zorluklar yaratır. İkincisi, Huygens metayüzeyde yan yana dizilen rezonatorler arasında eşleşme oluşur. Bu durum, metayüzeylerin yüksek açılarda performanslarının düşmesine neden olur [16]. Dielektrik rezonatörlerde yüksek iletim, elektrik ve manyetik rezonanslar benzer genlikler ve fazlar sergilediğinde ortaya çıkar, bu da iletim yönünde yapıcı girişim ve yansıma yönünde yıkıcı girişim ile sonuçlanır. Dielektrik rezonatörlerin Huygens metayüzeyleri [14,15] ile yapılan çalışmalarda, rezonatorlerin geometrilerini ayarlayarak iki tip rezonansın örtüşme bölgesi genişletilmiş ve deneysel olarak gösterilmiştir [17,18]. Geniş bir dalga boyu aralığında

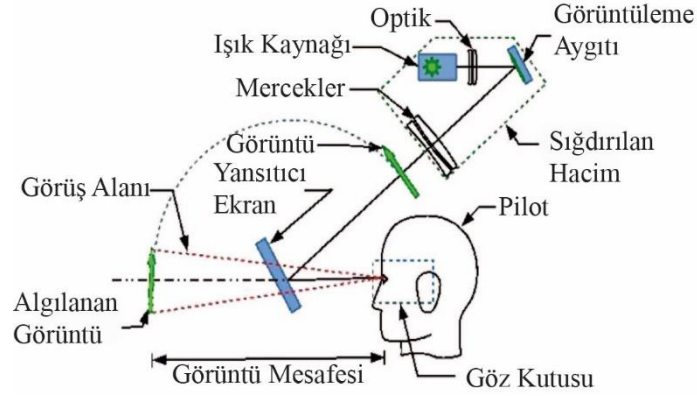
neredeyse mükemmel iletim ile dielektrik nanoparçacıklardan oluşan bir metayüzey, iletim durumunda  $2\pi$  faz aralığı sunarken, yakın kızıl ötesi ve optik frekans bölgesinde ışık demetini verimli bir şekilde manipüle etmek için yeni bir yol açar. Hem doğrusal polarize hem de dairesel polarize ışınları için hem yansıma hem de iletim geometrilerinde birçok büyüleyici ve yüksek verimli dalga kontrol etkisi gösterilmiştir [19-23]. Şekil 1.4 (a)'da üretilen metayüzey yapısının elektron mikroskobu altında genel yapısı verilmiştir. Bu yapılar Şekil 1.4 (b)'de gösterildiği gibi görünür bölgede yüksek iletim sağlarlar.



Şekil 1.4: (a) Üretilmiş olan dielektrik metayüzey elektron mikroskobu altında genel yapısı ve nano sütunların görüntüsü, (b) görünür bölgede farklı çapta nano sütunlar için iletim verimliliği [23].

Baş Üstü Gösterge (BÜG) sistemleri, Şekil 1.5'de gösterildiği gibi genellikle ekrandan alınan bilginin sonsuzda oluşturulması için optik elemanlar tarafından doğrultularak kullanıcının gözlerine yönlendirir [24-26]. Burada amaç dışarıdan alınan gerçek dünyanın görüntüsünün üzerine bilgi içeren ekran görüntüsünün yerleştirilmesidir. Geleneksel sistemlerdeki birincil limitler, aktarılan görüntünün genişletilmesi için optik elemanların boyutlarının artırılmasıdır. Ek olarak, göz kutusu, bir gözlemcinin kafasını yerleştirebileceği ve yansıtılan görüntünün tamamını görebileceği alanı ifade eder. Gözlemci gözlerini göz kutusunun dışına hareket ettirdiğinde, görüntü açıklığın kenarı tarafından kırılmaya başlar. Sonuçta, daha büyük kafa hareketleri görüntünün tamamen kaybolmasına neden olur [26]. Bu sınırlamaların üstesinden gelmek için, dalga kılavuzu ve saçıcı optik ile kullanılarak oluşturulan BÜG sistemleri araştırılmıştır [26,27]. Bu sayede sistemde göz kutusu ile tanımlanan alan artmakta olup optik sistem boyutları da sorun teşkil etmez. Dalga kılavuzu sistemleri daha az

hacim kaplarlar, daha hafiftirler ve geleneksel optik tasarımların oluşturduğu sorunları çözerler.



Şekil 1.5: Geleneksel BÜG sistemlerinde ekranda oluşturulan görüntünün optik elemanlar aracılığıyla dışarıdaki görüntüyle birlikte kullanıcıya aktarılması [26].

Bu tez çalışmasında ikinci bölümde önceki tasarımlardan farklı olarak iki aynı yada farklı malzeme arasına yerleştirilebilen yenilikçi bir yaklaşım olarak nano delik metayüzeyler tasarlanmıştır. Bu yaklaşım ile yüksek verimlilikte, polarizasyon bağımsız ve geniş bir dalga boyu aralığında çalışan metayüzeyin analizleri yapılmış ve kendinden önceki yaklaşım olan nano sütun'dan oluşan metayüzey ile karşılaştırılması yapılmıştır. Üçüncü bölümde farklı bir yaklaşım olarak Moire mercek yapısı metayüzey yaklaşımı ile yeniden tasarlanmış, bunun sayesinde kendi içerisinde döndürülen metayüzeyler ile farklı odak noktaları elde edilmiştir. Dördüncü bölümde metayüzeylerin devam etmekte olan dalga boyu bağımlılıkları avantaja çevrilerek birden fazla soğurucu malzeme içeren güneş pili yapıları için yeni bir tasarım kazandırılmıştır. Beşinci bölümde ise Bessel benzeri optik ışının istenen bir yörünge boyunca hareketini sağlamak için oluşturulan geleneksel yapılar yerine metayüzey yaklaşımı kullanılmıştır. Bu sayede geniş dalga boyu aralığında istenen yörüngede hareket eden Bessel benzeri optik ışınlar polarizasyon bağımsız yapılar aracılığı ile oluşturulmuştur. Altıncı bölümde ise dalga kılavuzu tabanlı Baş Üstü Gösterge yapıları tasarlanıp geometrik optik analiz yardımıyla sonuçları gösterilmiştir.





## 2. NANO DELİK YAPISIYLA OLUŞTURULAN METAYÜZEY İLE OPTİK UYGULAMALARI

Metayüzeylerin geliştirilmesi, dalga önü kontrolü için birçok araştırma çalışmasının bu alanda yoğunlaşmasına neden olmuştur. İlk araştırma çalışmalarının çoğu, özellikle iletim durumunda, optik frekanslardaki ohmik kayıplardan dolayı düşük verime sahip olan metal-dielektrik yapılara (plazmonik meta-yüzeyler olarak bilinir) odaklanmıştır [28,29]. Metal-yalıtkan-metal yapılar [30-32] dalga önü kontrolünü yüksek verimlilikte gerçekleştirebilirler, ancak bu yapılar sadece yansıma durumunda etkili olabilir ve günümüz yarı iletken teknolojileriyle olan uyumsuzlukları bu tarz sistemlerin küçültülmesini sınırlandırmaktadır. Bu yapıların noksanlıkları, araştırmacıları tamamen dielektrik malzemelerden oluşan yapılar ile tasarım yapmaya itmiştir çünkü dielektrik malzemeler optik ve kızıl ötesi frekanslarda düşük soğurma özelliğine sahiptir. Empedans eşleşmelerine izin verdikleri için, dielektrik metayüzeyler yüksek verimlilik ile iletim durumunda çalışabilirler.

İlk dielektrik metayüzey çalışmaları yüksek kırıcılık indeksli malzemeler kullanılarak yapılmıştır, ancak bu durum Mie-tarzı saçılmalara neden olur [33]. Elektrik ve manyetik dipollerin örtüşmesi sonucu, düşük boy-en oranlı silikon nano-yapılar  $0-2\pi$  faz geçişini yüksek verimlilikte gerçekleştirirler [14,17,34]. Mie-tipi saçılma ile çalışan metayüzeylerin en büyük dezavantajı dar dalga boyu aralığında çalışmalarıdır. Daha geniş dalga boyunda çalışmak için, yüksek boy-en oranına sahip, dalga kılavuzu gibi çalışan tamamen dielektrik nano sütunlardan oluşan metayüzeyler kullanılmıştır [23,35,36]. Genellikle, yüksek boy-en oranına sahip silikon sütunlar kızıl ötesi frekanslarda, düşük soğurma katsayısı nedeniyle kullanılırlar. Silikon görünür bölge dalga boylarında aynı soğurma karakteristiği sergilemez. Yüksek soğurma nedeniyle bu bölgede tercih edilmez. Kristal silikon, 500 nm dalgaboyunun üzerinde düşük soğurma göstermesinde rağmen, bütün görünür bölgede aynı etkiyi göstermez [13]. Silikon dışında bu bölge için kullanılan diğer malzemeler;  $Si_3N_4$  [37], GaN [38], ve  $TiO_2$  [23, 39, 40].  $TiO_2$  metayüzeyler atomic layer deposition üretim teknolojisiyle ilk olarak Capasso' nun gurubu tarafında üretilmiştir.  $TiO_2$  nano sütunlar dielektrik dalga

kılavuzu gibi hareket ederler ve düşük soğurma özelliği sergilerler [41]. Bunun bir sonucu olarak görünür bölgede yüksek verimlilikte bir metayüzey elde edilmiştir.

Kızıl ötesi bölgede,  $Al_2O_3$  yada silikon' dan yapılan sütunlar polidimetilsiloksan (PDMS) yada SU-8 polimer' in içerisine gömülerek tasarımlar yapılmıştır [42-43]. Fakat görünür bölgede,  $TiO_2$  nano sütunların polimer içerisine gömülmesi, periyot ve polimerin kırıcılık indeksin arasındaki ilişki nedeniyle saçılma etkilerinin gözlenmesine neden olabilir [43]. Ayrıca,  $0-2\pi$  arasında faz farkı elde edilemez. Saçılma olmaksızın  $0-2\pi$  faz farkı elde etmek için periyod küçültülmeli ve sütunların yüksekliği arttırılmalıdır.

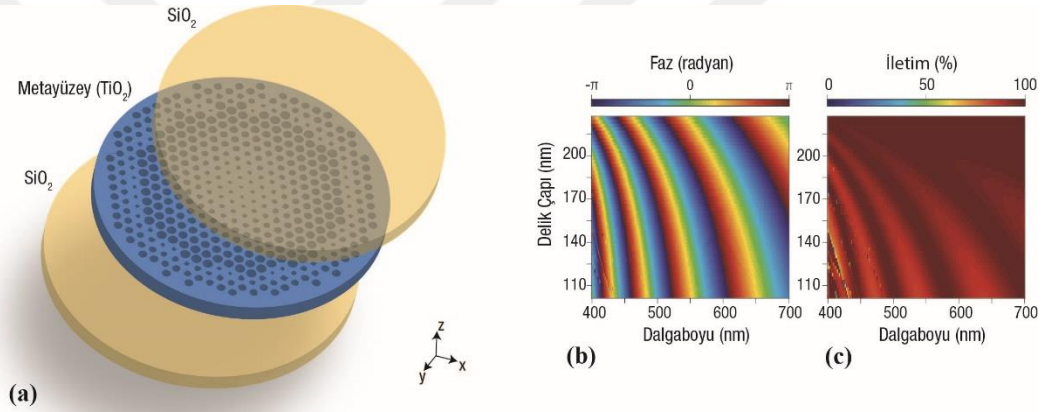
Bu çalışmanın arkasındaki motivasyon alternatif bir metayüzey tasarımı oluşturmaktır. Farklı çaptaki dielektrik sütunlar yerine, farklı hava-malzeme oranında nano delikli metayüzelerin iletim durumu ve faz haritası incelenmiştir. Böyle bir yapı, bir taban malzemenin üzerinde herhangi bir dış sütununun bulunmamasından dolayı gerçek bir düz optik olarak önerilebilir. Ayrıca, malzeme dolumu oranları (toplam malzemenin kapladığı hacmin birim hücrenin hacmine oranı) en fazla 0,28 ve en az 0,09'dur. Daha az dielektrik malzemenin kullanılmasından dolayı farklı dalga boyları arasında efektif indeks farklılığı azalır, bu durum kromatik aberasyonun azalmasına neden olur. Nano delikli metayüzeyler 475-625 dalga boyları arasında 18% daha az odak değişimine neden olmaktadır. Ayrıca, nano sütunlardan oluşan metayüzeyler 26% odak değişimi göstermektedir. Bu nedenle, nano delikli metayüzeyler kromatik aberasyonları azaltmak için avantaj sağlamaktadır. Farklı sayısal açıklık (SA, numerical aperture) değerleri için analizler yapılmış olup sistemin nano sütun ile tasarlanan metayüzey ile arasındaki farklar gözlemlenmiştir.

## 2.1 Tasarlanan Yapının Parametrik Analizi

Delikli metayüzeyler sınırlı sayıda kızılötesi ve terahertz frekans bölgesinde çalışılmıştır [44-47]. Dahası, plazmonik malzemeler ile oluşturulan metayüzeylerin uygulamaları görünür bölgede mevcuttur, fakat iletim verimlilikleri düşük düzeyde kalmıştır [47]. Yüksek verimlilik ile metayüzeyi tasarlamak için düşük soğurma ve yüksek iletim özelliği olan malzeme seçilmelidir.  $TiO_2$  görünür bölgede yüksek indeks ve düşük soğurma özelliği gösterir. [23,41] Bunun haricinde,  $SiO_2$  düşük kırılma ve düşük soğurma özelliği gösteren bir malzemedir. Nano-delik dizisi  $SiO_2$  katmanları

arasında altıgen örgü şeklinde dizilmiş olup Şekil 2.1(a) üzerinde gösterilmiştir. Altıgen örgü, efektif indeksin uzun aralıklı modülasyonu için yüksek göreceli hava oranı sağlar [47].

Bu çalışmada, SiO<sub>2</sub> katmanlar, iletim kayıplarını önlemek için metayüzeyin ön ve arka kısmına yerleştirilmiştir. Not edilmelidir ki SiO<sub>2</sub> malzemesinin yerine PDMS gibi farklı malzemeler kullanılabilir. Metayüzeyin altındaki SiO<sub>2</sub> alttaş olarak düşünülebilir. Ancak, diğer TiO<sub>2</sub> metayüzeyin üzerindeki ince SiO<sub>2</sub> katman iletimi arttırmak için yansıma önleyici katman olarak çalışır. Önceki çalışmalar, bu tür yapıların yapıştırma yöntemi kullanılarak hava deliklerinin üst tabaka malzemesi tarafından doldurulmadan üretilebileceğini göstermiştir [48-50]. Şekil 2.1(b) ve (c)'de bu yapının iletim ve faz değerleri görünür bölgede analiz edilerek gösterilmiştir.



Şekil 2.1: Altıgen bir örgü üzerinde hizalanmış nano deliklerden oluşan metayüzeyin üç boyutlu gösterimi. Metayüzey iki SiO<sub>2</sub> katman arasında durmaktadır. TiO<sub>2</sub> deliklerinin çaplarının farklılaşması sonucu oluşan (b) Faz ve (c) iletim haritaları.

Ayrıca, TiO<sub>2</sub> metayüzey düşük kırılma indeksli malzeme içerisine gömülebilir. Önerilen tasarımımızda, TiO<sub>2</sub> üzerindeki üst SiO<sub>2</sub> katmanın yüksekliği 1  $\mu\text{m}$  olarak alınmıştır. Birim hücrelerin her bir TiO<sub>2</sub> kısmı, delik çapına bağlı olarak temel modun bir efektif indeksi ile faz birikimine neden olan bir dalga kılavuzu olarak düşünülebilir. Nano deliklerin yüksekliği  $2\pi$  fazı kapsayacak şekilde 650 nm olarak seçilmiştir. TiO<sub>2</sub> malzemesinin üzerindeki SiO<sub>2</sub> malzemesinin yüksekliği istenildiği gibi ayarlanabilir. Ancak, bu durumda odak noktası kayabilir ve çeşitli aberasyonlar ortaya çıkabilir, bu nedenle kalınlığa bağlı olarak tasarım tekrar düzenlenmelidir. Örgü sabiti, Nyquist örnekleme teoremine uymak zorunda olup, saçıcı olmama ve dalga boyundan küçük olma özelliklerine sahip olmalıdır. Yüksek verimlilikte metayüzey elde etmek için,

örgü sabiti 250 nm olarak seçilmiştir. TiO<sub>2</sub> nano silindirlerin yüksekliği ve birim hücre boyutu görünür bölgede 0-2 $\pi$  faz aralığı elde edilirken yüksek iletiminde elde edilmesi için optimize edilmiştir. Ayrıca TiO<sub>2</sub> delikleri, deliklerin yatay kesitinin dairesel olması nedeniyle iletim yönünde polarizasyona duyarlı olmayan faz kayması sağlar. Faz ve iletim, Şekil 2.1(b) ve (c)'de verilmiş olup Lumerical' da zaman-alanında sonlu-farklar yöntemiyle (ZASF, the finite-difference time-domain) [51] kullanılarak elde edilmiştir. x ve y eksenlerinde periyodik sınır koşulları ve z ekseninde mükemmel uyumlu katman (Perfectly Matched Layers) nano deliklerin çaplarının oluşturacağı faz değişikliğini incelemek için kullanılmıştır. Işık kontrolünün eş zamanlı yüksek iletim ve 0-2 $\pi$  faz kontrolü ihtiyacı nedeniyle, dalga kılavuzu etkisi önemli olmaktadır. Çünkü bu etki faz kontrolünü sağlarken düşük optik kayıplara neden olur

## 2.2 Optik Performansın Analizi

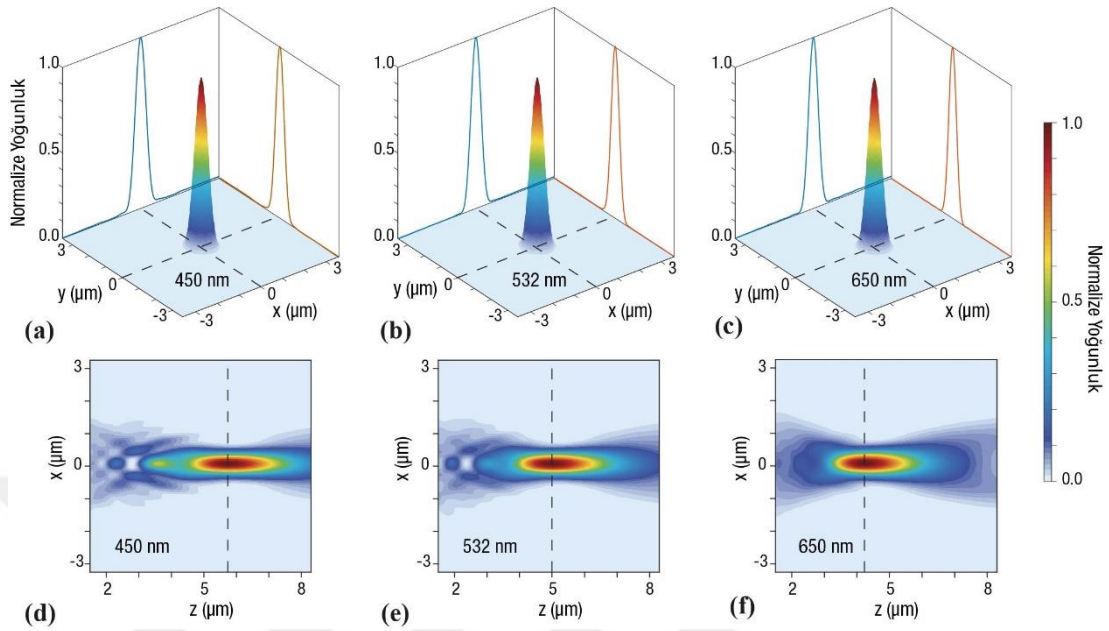
Şekil 2.1(b) ve (c)' de görüldüğü gibi, bizim tasarımıımız tüm görünür bölgede dalga kılavuzu etkisi ve altıgen örgünün yardımıyla 0-2 $\pi$  faz kontrolü ve yüksek iletim sağlar. İletim durumunda odak sağlayan metayüzey için ihtiyaç olan faz profili aşağıdaki denklemden elde edilebilir,

$$\varphi(x, y) = \frac{2\pi}{\lambda_d} (\sqrt{f^2 + x^2 + y^2} - f) \quad (2.1)$$

Burada  $\lambda_d$  tasarım dalga boyunu ve f odak uzaklığını temsil etmektedir. Tasarım dalga boyu 532 nm olarak seçilmiştir. Birim hücrenin ihtiyacı olan faz, nano deliklerin çaplarının ayarlanmasıyla denkleme uygun olarak elde edilir. Önerilen metayüzeyin odak uzaklığı 5  $\mu$ m olup çapı 8.4  $\mu$ m' dir.

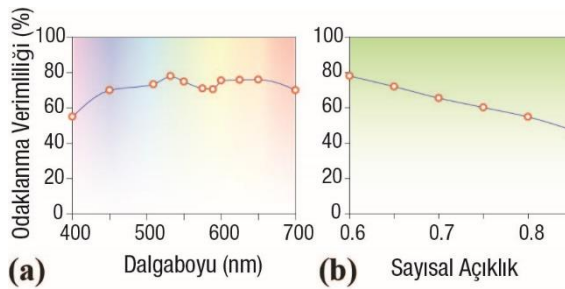
Odak benekleri ve onların dikey kesitleri 450 nm, 532 nm ve 650 nm dalga boyunda şekil 2.2 (a)-(c)' de gösterilmiştir. Odak benekleri yüksek simetrik ve kırınım sınırlı yarı-doruk genişliği (YDG, diffraction-limited full-width at half-maximums) 'e yakındırlar. Ek olarak, odaklanmış ışığın yoğunluk dağılımları Şekil 2 (d)-(f)'de verilmiştir. Bu grafiklerde görüldüğü gibi, farklı dalga boylarında 100 ve 160 nm arasında ki çaplarda aynı faz farkı oluştuğu için kromatik aberasyon beklenenden düşüktür. Odak verimliliği gelen ışığın gücü ile odaklanan ışığın gücünün oranıdır. Burada, odak verimi odak beneğin teorik olarak oluşturacağı YDG (= 0.514/(2SA))

değerinin 3 katı yarıçapta alınan odak düzleminde toplanan toplam ışığın başlangıçta gelen ışığa oranıdır [35].



Şekil 2.2: Normalize edilmiş elektriksel alan yoğunluğunun üç boyutlu gösterimi ve odaklanan ışığın enine kesiti, ve elektriksel alan yoğunluk dağılımı (a) ve (d) 450 nm, (b) ve (e) 532 nm, (c) ve (f) 650 nm

Simülasyon sonuçları iletimin 80% üzerinde olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, şekil 2.3(a)'da gösterildiği gibi odak verimi 450 ve 700 nm dalga boyları arasında 70%' den fazladır. Ayrıca not edilmelidir ki 400 nm dalga boyunda verimlilik 55% olarak hesaplanmıştır. Dahası, şekil 2.3(b)'de tasarlanan sistemin SA=0.85 değerinde bile verimlilik 47%' den fazladır.

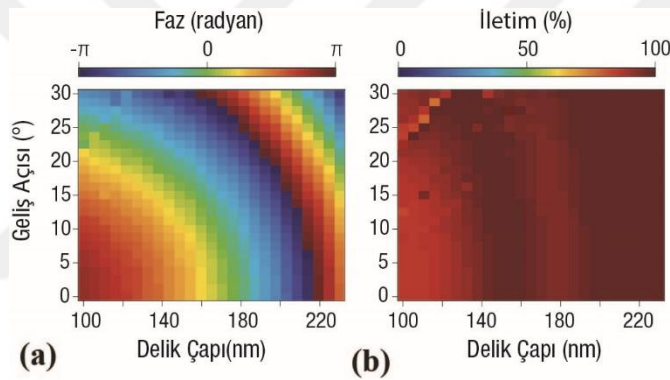


Şekil 2.3: (a) SA=0.6 için farklı dalga boylarında odaklanma verimliliği (b) 532 nm dalga boyu için farklı SA değerlerinde odaklanma verimliliği

Odaklama verimliliği 450 nm ve 650 nm arası dalga boylarında SA=0.6 için yaklaşık olarak değişim göstermemektedir. Odak verimi SA arttıkça azalmaktadır. Bu durumun bir nedeni seçilen örgü sabitinin Nyquist örnekleme kriterine uymaması ve faz

örneklemesinin yüksek SA değerlerin de artık yapılamamaya başlamasıdır. Bu yüzden, yüksek SA değerleri ile lensin çalışması için kazanç-kayıp (gain-loss) gibi farklı yaklaşımlar uygulanmalıdır [52].

Metayüzeylerin görüntüleme karakteristiğini etkileyen faktörlerden biri olan yüksek açı toleransı ayrıca incelenmiştir. Yapılan teorik analizler için, Bloch sınır koşulları x ve y sınırlarında ve mükemmel uyumlu katman z sınırında uygulanmış olup farklı yarıçap değerlerinde faz ve iletim karakteristiği 532 nm dalga boyu için incelenmiştir. Şekil 2.4(a)'da gösterildiği gibi, yapı  $0-2\pi$  faz kapsamını normal ile yaptığı açıdan  $30^\circ$  ye kadar geniş açıda devam ettirmektedir. Dahası, iletim verimliliği hala yüksektir. Şekil 2.4 (a) ve (b), nano-delik dizisi ile oluşturulacak metayüzeyin odaklanma performanslarının gelen dalganın normal ile yaptığı açı değişimlerinden ne kadar etkileneceğine dair bir fikir vermektedir.



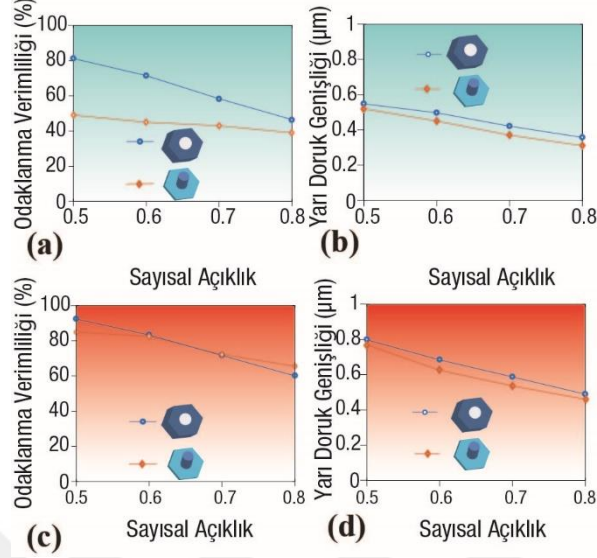
Şekil 2.4: 532 nm dalga boyunda birim hücrenin farklı deliklerin çaplarına göre açı bağımlılıkları; (a) faz ve (b) iletim verimliliği

### 2.3 Nano Delik ile Nano Sütundan Oluşan Metayüzeylerin Karşılaştırılması

Delik-birim hücre performansını daha iyi anlamak için,  $\text{TiO}_2$  nano sütunlar ile sonuçların karşılaştırılması şekil 2.5' te verilmiştir.  $\text{TiO}_2$  nano sütun yüksekliği 650 nm olarak alınmıştır. Farklı tasarım dalga boylarında ( $\lambda_d = 450$  nm and 650 nm) karşılaştırma yapılarak, tasarlanan metayüzeylerin farklı SA için performansları incelenmiştir.

Şekil 2.5 (a) ve (b) farklı SA değerlerine bağlı olarak odak verimi ve YDG değerleri 450 nm dalga boyunda analiz edilerek sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bunun yanında Şekil 2.5 (c) ve (d)'de, farklı olarak, farklı SA değerlerine bağlı olarak odak verimi ve YDG değerleri 650 nm dalga boyunda analiz edilerek sonuçlar gösterilmiştir. Şekil 2.5 (c)

ve (d) için, iki farklı birim hücre yapıları metayüzey hemen hemen eşit odak verimi ve YDG' değerine sahiptir. İki yapı arasındaki temel fark Şekil 2.5 (a)' da görülebilir. Kısa dalga boylarında delikli metayüzey etkili bir şekilde çalışmaya devam etmektedir.



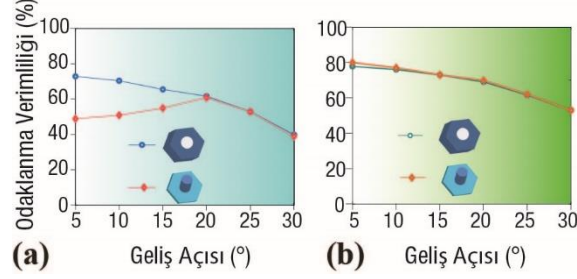
Şekil 2.5: Nano delik ve nano sütun birim hücreler ile tasarlanan metayüzeylerin (a)-(b) 450 nm ve (c)-(d) 650 nm' de farklı SA değerlerinde odak verimleri ve YDG değerlerinin karşılaştırılması

Odaklanma verimliliği, tüm SA değerleri için sütun tipi meta yüzeyden daha iyi performans gösterir. YDG, delik ve sütun tipli metayüzeylerde neredeyse eşit sonuçlar göstermiştir, fakat Şekil 2.5 (b) ve (d)' de görüleceği gibi nano sütun birim hücreden oluşan yapı azda olsa YDG değerleri için daha iyi performans göstermiştir.

650 nm dalga boyunda, iki farklı metayüzey tipi arasında odaklanma verimlilikleri farkı düşük olmasına karşın, 450 nm civarında(kısa dalga boylarında) odaklanma verimlilikleri farkı oldukça yüksektir. Altıgen örgü ile oluşturulan birim hücre örgü tipi ve dalga kılavuzu etkisi nedeniyle kısa dalga boylarında saçılmaya izin vermez.(Şekil 2.1(b)) Bu nedenle, bütün görünür bölgede, tasarladığımız yapı iletim durumunda yüksek iletim verimliliği ile saçılma oluşturmadan iletim yapar.

Nano hole ve nano-sütun ile oluşturulan metayüzeylerin geliş açısına göre performans analizleri Şekil 2.6'da gösterilmiştir. Bu analizlerde tasarım dalga boyu  $\lambda_d = 532$  nm olup tasarımda kullanılan SA=0.6 olarak belirlenmiştir. Şekil 2.6 (a)' da gösterildiği gibi, 450 nm dalga boyunda daha küçük geliş açılarında yüksek odaklanma verimliliği farkı vardır. Işığın geliş açısını arttırdığımızda, odaklanma verimlilikleri arasındaki fark azalmaya başlar. Bu nedenle, daha büyük geliş açılarında, iki tip metayüzeyde

aynı odaklanma verimliliğini gösterir. Bunun yanı sıra, Şekil 2.6 (b)' de gösterildiği gibi 532 nm dalga boyunda, iki farklı tipte tasarlanan metayüzey farklı geliş açılarında yaklaşık olarak aynı odaklanma verimliliğine sahiptirler.



Şekil 2.6: Farklı dalga boyları için (a) 450 nm ve (b) 532 nm farklı geliş açılarında odak verimliliği (tasarım dalgaboyu  $\lambda_d = 532$  nm ve SA = 0.60)

Özetle metayüzeylerin tasarımı için iki farklı birim hücre araştırılmış ve sonuçların karşılaştırılması gösterilmiştir. Delik ile oluşturulan metayüzeyler, yüksek verimlilik, yüksek SA ve düşük renk sapması ile tüm görünür spektrumda ve geniş geliş açısında çalıştığını kanıtlamıştır. İncelenen nano-delik tabanlı metayüzey' in geleneksel sütun tipi yapılara kıyasla gerçekten düz optik elemanlar olduğu varsayılabilir.



### 3. ROTASYONEL OLARAK AYARLANABİLİR POLARİZASYON BAĞIMSIZ TEK VE ÇOK ODAKLI METAYÜZEYLER

#### 3.1 Ayarlanabilir Optik Elemanlar

Yakın zamanda, metayüzeyler, yüksek iletim verimliliği ve efektif faz kontrolü sağlayan yegane özellikleri nedeniyle düz optikten freeform optiğe kadar geniş ölçekte uygulamalar için araştırılmaktadır [23, 35, 39, 40, 53]. Metayüzeyler, geleneksel hantal optiklerin minyatürleştirilmesine yönelik artan talebe cevap verebilecek umut verici adaylardır. Metayüzey optiğinin bir diğer önemli özelliği, mevcut tamamlayıcı metal oksit yarı iletken uyumlu yarı iletken üretim yöntemleri kullanılarak doğrudan üretilmesidir. Geleneksel saçıcı optik elemanlar (SOE), geleneksel kırıcı optik elemanlarıyla karşılaştırıldığında ince, kompakt ve hafif özelliklere sahiptir. Ancak, bu yapıların en büyük dezavantajı limitli dalga boyu aralığında tasarım dalga boyundan farklı dalga boyları için saçılma verimliliğindeki ani düşüşlerdir. [54] Ek olarak, standart SOE faz değişimlerinde yeterli örneklemeyi, sahip olduğu geniş örnekleme periyodu nedeniyle sağlayamaz. Ayrıca, geleneksel SOE,  $0-2\pi$  aralığında çok katmanlı faz değişimi için farklı kalınlıklarda elemana ihtiyaç duyar. Bu durum çoklu-evreli litografi metotları ile gerçekleştirilebilir. Bunun yanında, metayüzeyler sahip oldukları tekdüze kalınlıkları nedeniyle tek evreli litografi yöntemleri ile üretilebilir. Bu özellikler geleneksel kırıcı ve saçıcı optik elemanlar yerine metayüzey kullanımına teşvik eder.

Değişir odaklı mercek sistemleri en kritik optik sistemlerden birisidir ve çeşitli görüntüleme sistemlerinde geniş uygulamaya sahiptir. En geleneksel opto-mekanik değişir odaklı mercek sistem tasarımlarında, optik düzeni mekanik yardımıyla hareket ettirilen mercek gurupları ya da sıvı kristal mercekler ile sağlanır. Bu durum, sistem boyutunun büyümesine, üretim masrafının artmasına ve pratik uygulamalarda zorluğa neden olur [55,56]. Ayarlanabilir optik güçleri ile mercekler günümüz araştırma konuları arasında olup görüntüleme uygulamaları için odaklama veya yakınlaştırma optikleri veya lazer malzeme işleme gibi kompakt ve esnek optik sistemler

oluşturmalarına izin verir. Bunun yanı sıra, ayarlanabilir mercekler için geniş bir aralıktaki odak uzaklığının ayarlanması büyük ilgi görmektedir. Günümüzde, gerilebilir alüminyum ile yapılan metasurfaces yapısı gibi çeşitli tipte ayarlanabilir metayüzey yapıları geliştirilmektedir [57,58]. Bu yapılar, alüminyumun eski haline geri dönmek için oluşturduğu dirence karşı koymak için sürekli bir harici kuvvet uygulanmasını gerektirir. Bu tür sistemlerin elektrik kontrolü, ayarlama mekanizması bir elastomeri sıkıştırmak için kapasitif bir elektrostatik kuvvete bağlı olduğundan yüksek voltajlar (kV aralığı) gerektirir [59]. Mikroelektromekanik sistemler(MEMS, Microelectromechanical systems) tabanlı ayarlanabilir metayüzeyler önerilmiştir, fakat bu sistemler kapsamlı ve zorlu üretim yöntemleri gerektirmektedir [60,61]. Dahası, geniş alana sahip ayarlanabilir metayüzey tasarımları MEMS sistemleri ile mümkün değildir. Bunun en önemli nedeni, geniş alana sahip metayüzeyler için yeterli yer değiştirmeyi sağlayacak voltaj değerlerinin sistemde elektriksel arıza ya da çalışma hatası oluşturmaya neden olmasıdır [62]. Bir ilginç metot, iki SOE tarafından oluşturulan yapının, Alvarez-Lohman merceklerinin (geleneksel mercek ya da saçıcı yüzeyler kullanılarak), kendi ekseninde hareketleri ile daha kompakt ve daha hızlı odak değişimi sağlayan sistemler oluşturmalarıdır [63,64]. Bu sistemlerin temel çalışma prensibi oluşturulan mercekler arasındaki mesafe sabit tutulurken bir merceğin kendi eksenini etrafında açısal olarak dönmesi ya da eksene dik bir şekilde hareketi ile sistemin odaklama gücünün değiştirilmesidir.[63,64] Bu yöntemle, odak düzlemindeki değişim gözlemlenebilir. Alvarez mercekler, spiral faza sahip mercekler ve Moiré mercekler dalga ön yüzünün kontrolünü, kaydırılmış ya da açısal olarak döndürülmüş zıt faza sahip optik eleman ile sağlayarak odak düzlemlerinde çeşitliliği oluşturabilirler.

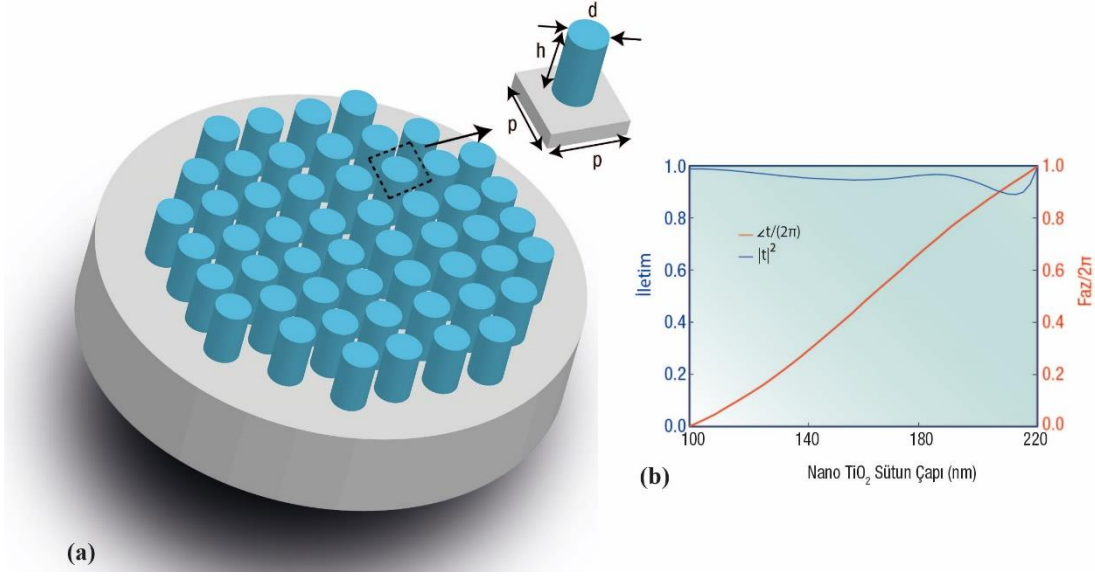
Döndürülebilir optik sistemlerdeki temel fikir enine yönde büyük lens çeviri hareketleri yerine karşılıklı rotasyon ile geniş odak aralığı sağlamaktır. Bu tür açısal olarak değişken elemanlar, merceğin açıklığını değiştirmezler. Ayrıca, karşılıklı rotasyonları optik sistemde kolay olduğundan daha uygun, pratik ve ilgi çekicidir. Bu tarz yaklaşımı kullanarak yapılan çok sayıda mevcut çalışma bulunmaktadır [54, 65–67]. Metayüzeylerin yukarıda belirtilen üstün özellikleri göz önüne alındığında, ayarlanabilir saçıcı optik sistemdeki performansı artırıcı ve üretimdeki karmaşıklığı kolaylaştırıcı bir yöntem olarak metayüzeyler önerilebilir.

Çok odak noktasına sahip optik sistemler çok odak düzlemlili mikroskop [68], çoklu odaklı kontakt lens [69] ve DVD / CD için çift odak objektif lens [70] gibi önemli optik elemanlardır. Çok odaklı mercekler saçıcı optik mercekler [71] ve metayüzeyler[72-73] ile gösterilmiştir. Bir değiştirilebilir çoklu odak düzlemine sahip sistem sıvı kristal yardımı ile gerçekleştirilmiştir [74]. Ne yazık ki, sıvı kristal yapısı gereği polarizasyona duyarlı olmakla birlikte yapının artan çaplarında etkili bir faz örnekleme sağlayamaz.

Bu çalışmada, Moiré saçıcı optik elemanı gibi döndürülerek değişim sağlayan metayüzey yapısı önerilmiştir. Önerilen yapı oldukça yüksek verimliliğe sahip olup basamaklı metayüzey faz plakalarının birbirine göre karşılıklı rotasyonu ile geniş odak düzlem aralığı elde edilmiştir. Diğer geleneksel kırıcı ve saçıcı sistemlerden farklı olarak, yapısındaki dalga boyu altı periyodu ve tamamen dielektrik malzemeden oluşması nedeniyle üstün faz örnekleme ve iletim verimliliği sağlar. Ayrıca, polarizasyon bağımsız yüksek odak aralığına sahip çoklu odak Moiré metayüzey yapısını bu çalışmada gösterilmiştir. Dalga formunu ve yayılımını incelemek için matematiksel bir model oluşturulmuştur. Bu model uygun sınır koşulları ile seçilen sayısal yöntem ile çözümlenmiştir.

### 3.2 Döndürülerek Ayarlanan Optik Sistem Tasarım Ana Fikri

Şekil 3.1(a)' da metayüzey tasarımının görseli yapının genel özelliğini göstermek için verilmiştir. Birim hücrenin örgü sabiti,  $p=250$  nm ve  $TiO_2$  nano sütun uzunluğu,  $h=600$  nm sabit tutulurken  $TiO_2$  nano sütun çapları değiştirilerek elde edilen faz ve iletim verimliliği grafiği Şekil 3.1(b)' de gösterilmiştir.  $8 \mu m$  açıklığa sahip metayüzey tasarımı yapmak için,  $600$  nm yüksekliğinde  $TiO_2$  nano sütun  $SiO_2$  altaş üzerine örgü sabiti  $250$  nm olacak şekilde kare örgü ile Şekil 3.1(a)'da görüldüğü gibi yerleştirilmiştir.  $SiO_2$  malzemesinin kırıcılık indeksi Palik veri tabanından [75] alınmış olup,  $TiO_2$  malzemesinin  $532$  nm dalga boyunda kırıcılık indeksi  $2.42$  olarak alınmıştır [41]. Şekil 3.1(b)' de birim hücredeki  $TiO_2$  sütun için farklı çaplardaki iletim verimliliği ve faz değişim karakteristiği gösterilmiştir. Modelleme ve sayısal analiz için Lumerical ZASF kullanılmıştır [51]. Periyodik sınır koşulları  $x$  ve  $y$  yönlerinde kullanılmış olup mükemmel uyumlu tabaka sınır koşulu dalganın ilerleyiş yönü olan  $z$  yönünde yerleştirilmiştir.



Şekil 3.1: (a) Metayüzey yapısının üç boyutlu gösterimi. Her birim hücre SiO<sub>2</sub> alttaş üzerinde kare örgü ile düzenlenmiştir. Örgü sabiti ve TiO<sub>2</sub> nano sütun uzunluğu sırasıyla 250 nm ve 600 nm seçilmiştir. (b) Birim hücreyi oluşturan silindirlerin farklı çap değerlerine göre faz ve ilerim değerleri.

Metayüzey faz plakası tasarımı için, TiO<sub>2</sub> nano-sütun pozisyonlarına [(x,y)] göre belirlenen aşağıdaki denklemde verilen ideal parabolik faz biçimi kullanılmalıdır:

$$\varphi(x, y) = \alpha(x^2 + y^2) \quad (3.1)$$

Burada  $\alpha$  değiştirilebilir ya da ayarlanabilir sabit ve ayrıca gelen ışığı odaklayacak metayüzeyin faz dağılımında kontrol parametresi olan optik gücün ölçekleme katsayısı. Bu çalışmada  $\alpha=56 \times 10^{10} \text{ m}^{-2}$  olarak alınmıştır. Döndürülerek ayarlanabilir metayüzey yapısının faz profili polar koordinat açılarına bağlı oluşu için ideal parabolik faz denklemi (Eşitlik (3.1)) birim hücre ile metayüzey merkezi arasındaki polar koordinat açısı ile çarpılmalıdır. Çarpım ardından Eşitlik (3.2) elde edilir [54,65]:

$$\varphi_n(x, y, \phi) = \varphi(x, y)\phi \quad (3.2)$$

Tasarlanan iki metayüzeyin toplam faz farkı sıfıra eşit olması için, ikisinden biri diğerinin tam tersi faz profiline sahip olmalıdır. İki metayüzeyin faz profili aşağıda verilmiştir [54,65]:

$$\varphi_1(x, y, \phi) = \varphi(x, y)\phi \quad (3.3)$$

$$\varphi_2(x, y, \phi) = -\varphi(x, y)\phi \quad (3.4)$$

İki farklı metayüzeyin faz profili toplandığında, üretilen faz profili sıfıra eşittir. Ancak, metayüzeylerden birisi kendi etrafında dönmeye başlarsa, toplam faz profili artık sıfır olmaz. Dönme açısı  $\theta$  ve toplam faz profili arasındaki ilişki aşağıda verilmiştir [54,65]:

$$\varphi_{total}(x, y, \phi; \Theta) = \varphi_1(x, y, \phi) - \varphi_2(x, y, \phi; \Theta) \quad (3.5)$$

$$\varphi_{total}(x, y, \phi; \Theta) = \varphi(x, y)\phi - \varphi(x, y)(\phi - \Theta) \quad (3.6)$$

$$\varphi(x, y, \phi; \Theta) = \varphi(x, y)\Theta \quad (3.7)$$

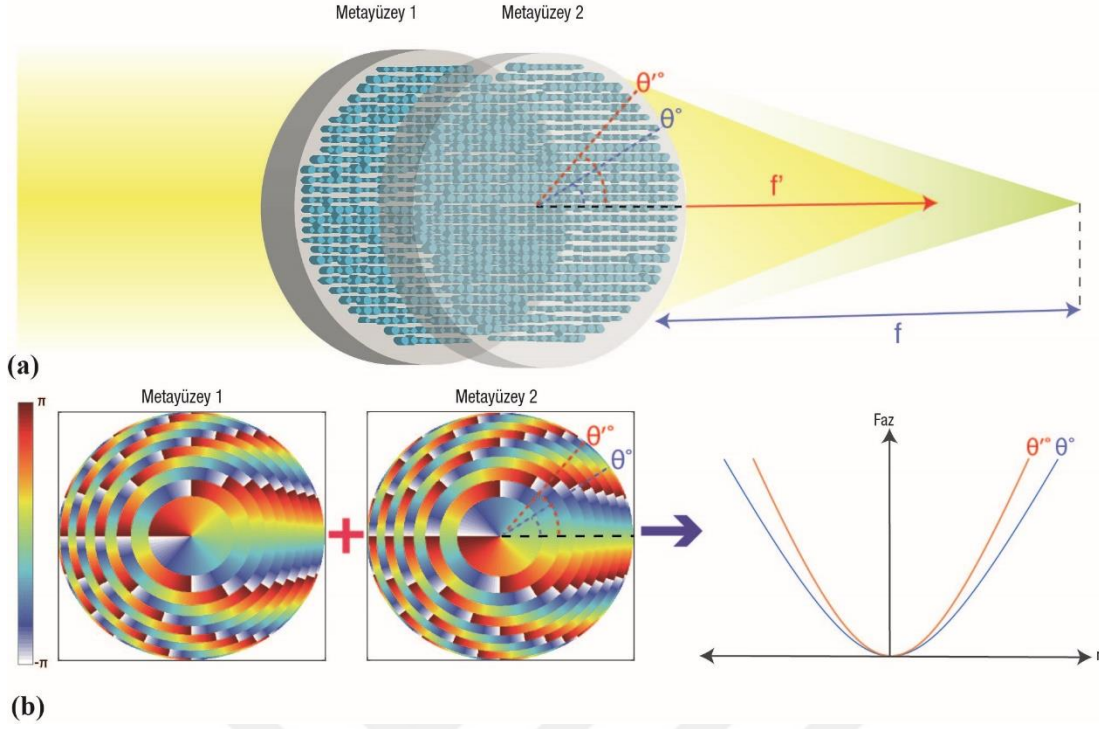
Not edilmelidir ki dönme açısı  $\theta$  metayüzeyin kendi eksenini etrafında dönüşünü temsil etmektedir. Metayüzeylerden birisinin kendi etrafında dönmesinin ardından Eşitlik (3.3)-(3.5) toplamı elde edilir ve bu sonuçlar Eşitlik (3.6) ve (3.7) sonuçlarına götürür. Eşitlik (3.7)' den, önerilen sistemin toplam parabolik faz dağılımındaki faz eğiminin metayüzeylerden birisinin hareketi ile değişeceği anlaşılmaktadır. Ayrıca, dönme açısı arttıkça daha küçük odak uzaklığına sahip Fresnel merceklerin farklı faz profili oluşur. Ancak, merkez noktası etrafında bir daire ve kutup çizgisinde radyal bir çizgi içerisindeki faz değişimindeki süreksizlik, döndürme açısının kendi derecesi kadar hata getirmesine neden olur. Bu çalışmada, her bir metayüzeyde, sayıları en büyük tam sayıya yuvarlayan  $\text{round}\{\dots\}$  fonksiyonu eklenerek dönme açısının getirdiği faz profilindeki hatalar düzeltilerek verilmiştir [54,65]. İki metayüzey için yenilenen faz profili aşağıda verilmiştir:

$$\varphi_1(x, y, \phi) = \text{round}(\varphi(x, y))\phi \quad (3.8)$$

$$\varphi_2(x, y, -\phi) = -\text{round}(\varphi(x, y))\phi \quad (3.9)$$

### 3.3 Sayısal Analizler ve Sonuçlar

Şekil 3.2 (a)' da, birbirine dik olarak bakan nano sütunlardan oluşan iki metayüzeyin bir üç boyutlu şeması gösterilmiştir. Şekil 3.2(b), iki metayüzeyin faz profilini Eşitlik (3.8)-(3.9) ve  $r(x,y)$  boyunca toplam faz profilini göstermektedir. Faz profilleri  $\pi$  ve  $-\pi$  arasında örneklenmiştir. İki metasüzeyin faz dağılımının birleştirilmesiyle oluşan toplam faz, bir odak düzleminin oluşturulmasına neden olur ve bu düzlem, toplam fazı değiştiren dönme açısı ile  $f$  ile  $f'$  arasında değiştirilebilir. Metayüzeyler fazı çok daha iyi örneklediğinden ve iletim durumunda yüksek verimli çalıştığından, geleneksel SOE sistemlere göre daha iyi bir tasarıma izin verir.

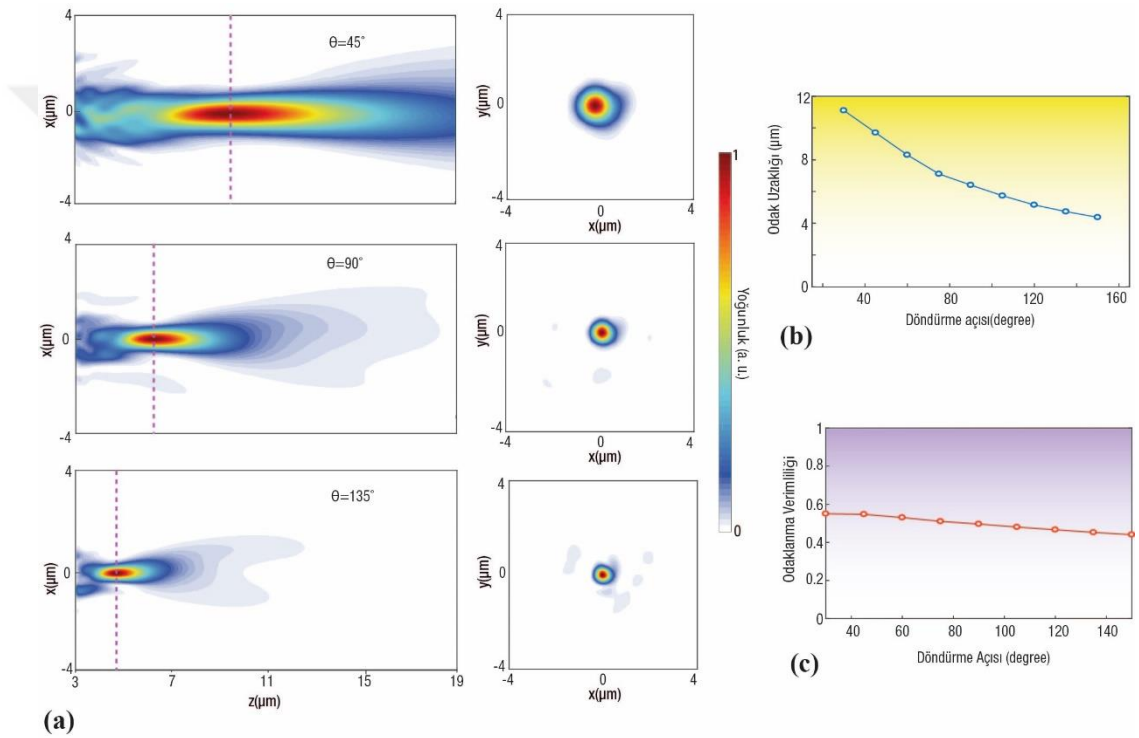


Şekil 3.2: (a)Tasarlanan yapının üç boyutlu gösterimi; iki metayüzey karşılıklı yerleştirilmiştir. Bu iki metayüzeyin fazlarıyla birleşmesi sonucu odak oluşturabilen faz profiline sahip olunur. Dönme açısının artırılması odak uzunluklarını  $f$  ile  $f'$  arasında değişikliğe neden olur. (b) her bir metayüzeyin örnek faz profilleri ve toplamları.

Talbot mesafesinin yarısı, iki metayüzeyin fazlarının toplanmasıyla oluşacak toplam faza ulaşmak için en uygun mesafe aralığını verir. Bu nedenle, metayüzeyler arasındaki mesafe Talbot uzunluğundan  $L = 2p^2/\lambda$  mesafesinden iki kat daha küçük olmalıdır [54, 65]. Tasarımımızda birim hücre boyutu çok küçük olduğu için (250 nm x 250 nm), Talbot uzunluğu,  $L$ , çok küçük olur. Uzunluk 235 nm olup, gerekli olan mesafe 117.5 nm olmalıdır. Küçük mesafe nedeniyle, aksel hizalama zorlaşmaktadır. Bu nedenle, uzunluk olarak Talbot mesafesinin katlarından olan yaklaşık 1  $\mu\text{m}$  seçilmiştir. Metayüzey faz örneklemesini daha sık yaptığı için, ışığın dalga ön yüzündeki hatalar SOE sistemlerden göreceli daha azdır. Ancak, bu etki, x ve y ekseninde odak düzleminde kayma sonucu oluşan fazlardan hata meydana getirir. Bu hatayı düzeltmek için x ve y'de odak düzlemi kaydırması yapmak gerekebilir. Bunun için faz denkleminde küçük değişiklikler yapılmalıdır. Eşitliklerdeki x ve y eksenlerine  $x_0$  ve  $y_0$  eklenmelidir. Bu çalışmada  $x_0=0.14 \mu\text{m}$ ,  $y_0=0.09 \mu\text{m}$  alınmıştır.

Şekil 3.3(a) 'da, farklı dönme açıları için sayısal olarak analiz edilmiş elektrik alan yoğunluğu dağılımı gösterilmektedir. Dönme açısı  $45^\circ$  'ye ayarlandığında, odak

uzunluğu yaklaşık 10  $\mu\text{m}$  olmaktadır. Dönme açısı arttıkça, odak uzunluğu küçük değerlere gitmektedir.  $90^\circ$  ve  $135^\circ$  'lik dönme açılarında oluşan iki durumda odak uzaklıkları sırasıyla yaklaşık olarak 6.6  $\mu\text{m}$  ve 4.53  $\mu\text{m}$ ' dir. Dönme açısının sıfır olması durumunda, iki fazın birbirlerinin tam tersi olması nedeniyle toplam faz sıfır olmakta ve herhangi bir odak oluşmamakta ya da sonsuzda oluşmaktadır. Metayüzeylerden biri, herhangi bir geometrik ve yapısal parametresini değiştirmeden döndürüldüğünde toplam faz, parabolik faz dağılımını oluşturur ve bu durum ışığın odaklanmasına neden olur. Şekil 3.3(b) 'de, dönme açılarının varyasyonuna göre odak uzaklığı değişimi gösterilmiştir.



Şekil 3.3: (a)  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  and  $135^\circ$  dönme açılarında odaklanan ışığın yoğunluk dağılımı 532 nm dalga boyu için verilmiştir. (b) Odak uzaklığının ve (c) odaklanma verimliliğinin dönüş açısına bağlı olarak değişimi verilmiştir.

Şekil 3.3(b)' den, odak mesafesindeki değişimin kırılma gücünün aşağıdaki Eşitlik (3.10)'da yazıldığı gibi doğrusal olmayan bir şekilde değiştiği görülmektedir [54,65].

$$f^{-1} = (\alpha\theta\lambda)/\pi \quad (3.10)$$

Eşitlik (3.10) dikkate alınarak, ideal bir mercekle için optik güç [54,65] dönme açısına bağlı olarak değişir. Eşitlik (1)'de verilen sabit  $a$  katsayısı, Eşitlik (3.10)'da belirlenen döndürme açıları arasında istenilen odak mesafesinin sağlanması için seçilir. Daha

yüksek dönme açılarında, tasarlanan mercekten elde edilen odak gücü, Eşitlik (3.10)' da elde edilen ideal kırınım merceğinin odak gücü ile uyumludur. Bununla birlikte, daha düşük dönme açılarında, Moiré merceğe göre tasarlanan yapı, odak gücü açısından ideal kırınım merceğinin odak gücü ile uyumlu olmaktan uzaklaşır. Bunun nedeni, toplam fazın odak mesafesi yaratacak gücü yaratabilmesi için en az  $\pi$  radyan faz farkına sahip olması gerektiğidir. Daha düşük dönme derecelerinde, toplam faz odak düzlemi oluşturmak için gerekli olan bu minimum koşulu sağlayamaz. Bu nedenle, odak noktası istenen düzlemde oluşmaz. Saçıcı optik elemanların kırınım verimliliğini hesaplamak için, odaklanmış ışığın gücünün miktarının iletilen toplam ışığın gücüne oranı kullanılır [54]. Ancak, odaklanma verimliliği, odaklanan ışık gücünün miktarının gelen ışığın gücünün miktarına oranı ile hesaplanır [35]. Bu çalışmada, odaklama verimliliği, teorik olarak hesaplanan YDG benek genişliğinin üç kat daha büyük bir yarıçapa sahip odak düzleminde toplanan ışığın gücü ile hesaplanmıştır(Şekil 3.3(c)). Önerdiğimiz yapıda iletim yaklaşık 70%'tir ve saçıcı optik elemanların kırınım verimliliği yerine odaklama verimliliğini hesaplırsak, önerilen metasurfaces yapımızın tüm dönme açıları için daha yüksek ve daha az değişen verimlilik sağladığı görülebilir.

### 3.4 Çok Odaklı Ayarlanabilir Metayüzey Tasarımı

Ayarlanabilir çok odaklı bir sistem elde etmek için, bölgesel olarak farklı faz dağılımlarına sahip iki metayüzeyden oluşan yeni bir yapı önerilmiştir ve tasarımı gerçekleştirilmiştir. İki farklı odağı elde edebilmek için metayüzey 3 yapısını denklem Eşitlik (3.8) ve metayüzey 4 yapısını Eşitlik (3.11) ve (3.12) kullanarak tasarladık.

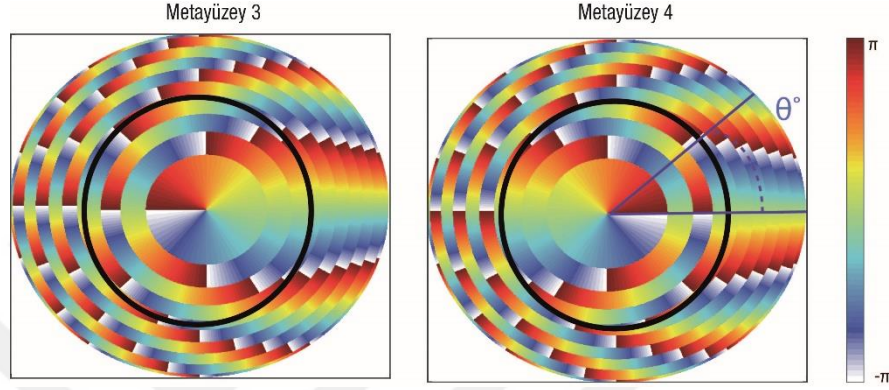
$$\varphi(x, y) = \text{round}(\varphi(x, y))(\pi - \phi) \quad (3.11)$$

$$\varphi(x, y) = -\text{round}(\varphi(x, y))(\phi) \quad (3.11)$$

Metayüzeylerin toplam fazı, uzamsal olarak değişen iki farklı faz dağılımına karşılık gelir. Metayüzey 3 ve 4 tasarımında,  $\alpha$  ve  $\lambda$  sırasıyla  $81 \times 10^{10} \text{ m}^{-2}$  ve 532 nm seçilmiştir. Eşitlik (3.11) yarıçapı 4.5  $\mu\text{m}$  olan bir daireyi kapsar ve bu alan dışındaki faz Eşitlik (3.12) tarafından belirlenir. Aynı parametreyi seçmemizin nedeni, tek bir dönme açısı varyasyonu aracılığıyla metayüzeylerin çoklu odaktan tek bir odak düzlemi oluşturmasına izin vermektir. Ayrıca, sayısal analizler için ışığın yayılma



yönünde periyodik sınır x ve y eksenleri boyunca ve mükemmel uyumlu tabaka sınır koşulları düzlem dalga kaynağının ekseninde yerleştirilir. Şekil 3.4' te, iki metayüzeyin faz profili gösterilmiştir. İki odak düzlemi oluşturmak için metasurface 3 ve 4, Eşitlik (3.11) ve (3.12) göre iç ve dış olarak iki farklı faz profili içerir. Şekil 3.4' te gösterilen faz haritaları ile tasarım gerçekleştirildiğinde, Şekil 3.5' te gösterildiği gibi çok odaklı bir düzlem üretilir.

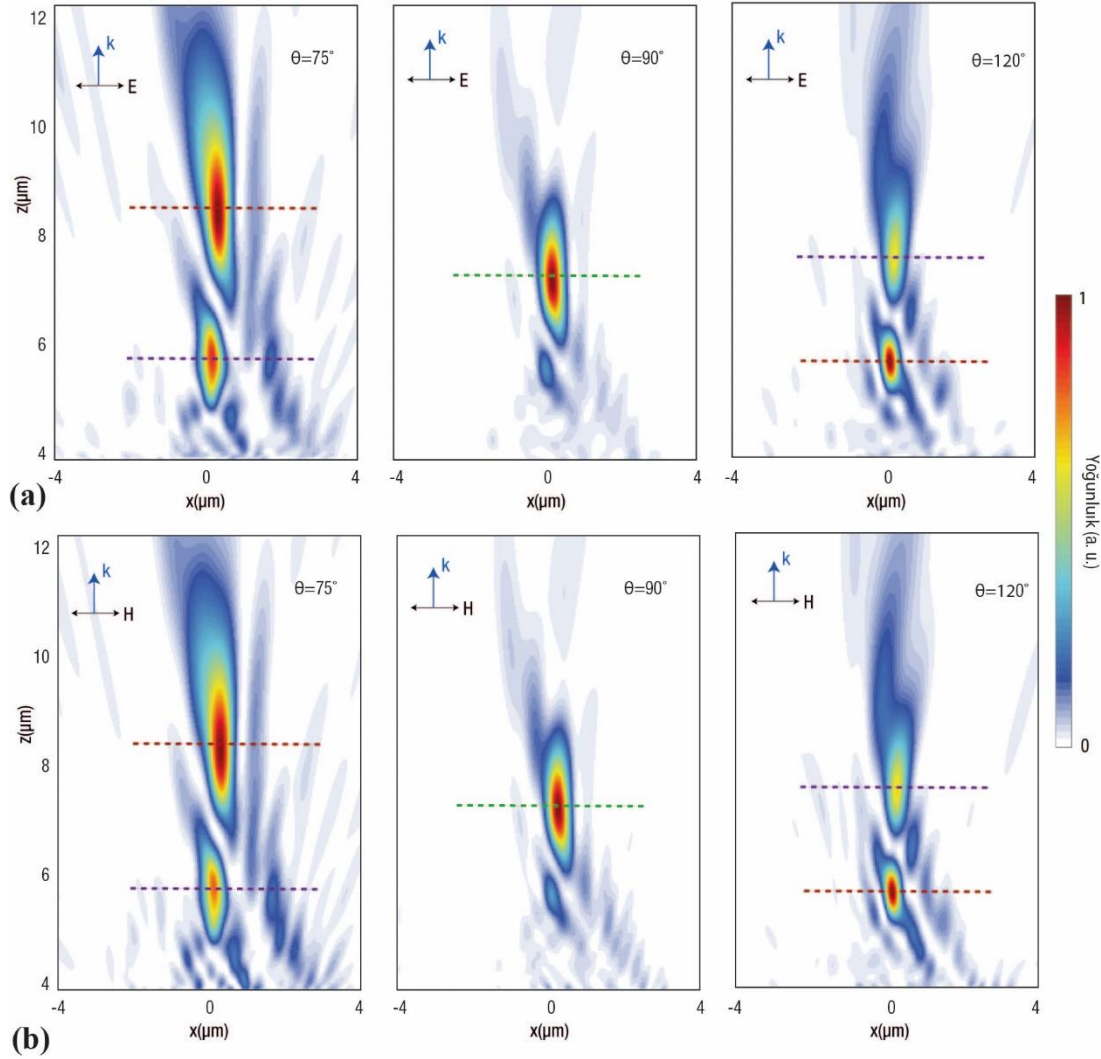


Şekil 3.4: Çok odak düzlemine sahip sistem için örneklenmiş faz profilleri

Şekil 3.5 (a) ve (b)' de, iki farklı polarizasyon açısı (ışığın x ekseninde polarize olduğu enine manyetik (TM) ve ışığın y ekseninde polarize olduğu enine elektrik (TE)) için elektriksel alan yoğunluğunu göstermektedir. İki metayüzeyin faz profilleri, mor çizgide (Şekil 5 (a) ve (b)) görüldüğü gibi  $75^\circ$  ve  $120^\circ$  dönüş açılarında odak düzlemi oluşturur. Bunun aksine, dış faz profilleri kırmızı çizgi ile gösterilen odak düzlemleri oluşturur (Şekil 5 (a) ve (b)). Dönme açısı arttığında, mor çizgideki odak düzlemi aşağı doğru hareket ederken kırmızı çizgide üzerindeki odak düzlemi yukarı doğru hareket eder. xz kesitleri boyunca odaklanan ışık, Şekil 3.5 (a) ve (b) 'de  $90^\circ$  dönüş açısıyla gösterilmiştir.  $75^\circ$  dönme açısında yayılma yönünde iki odak noktası meydana gelirken,  $90^\circ$  dönme açısında bu iki odak noktası aynı odak düzleminde (yeşil çizgi) üst üste gelerek tek bir odak noktasını oluşturur. Bunun nedeni, aynı odak düzlemini oluşturmak için aynı parametrenin kullanılması ve düzenlenmesidir. Bu ayarlanabilir metayüzey Moiré mercekler çoklu veya tekli odak oluşturabildiğinden bazı avantajlar getirir.

Şekil 3.5 (a) ve (b) 'de  $75^\circ$  ve  $120^\circ$  dönüş açılarında gösterildiği gibi, dönüş açısının artmasıyla Eşitlik (3.8) ve (3.11) kullanılarak oluşturulan bir dış faz profili tarafından üretilen kırmızı çizgi yukarıdan aşağıya doğru hareket ederken, Eşitlik (3.8) ve (3.12)

kullanılarak oluşturulan iç faz profili tarafından üretilen mavi çizgi aşağıdan yukarıya hareket eder.



Şekil 3.5: 75°, 90° ve 120 ° dönme açılarında çoklu odak düzleminde oluşan odakların ışık yoğunluğu dağılımı: (a) TM ve (b) TE

Farklı başlangıç odak uzunluklarını kullanarak, Eşitlik (3.8), (3.11) ve (3.12) içerisindeki açı değiştirerek veya iç yada dış kısma farklı denklem parametreleri ekleyerek, tasarım odak oluşturmayan, çok odaklı veya tek odaklı Moiré metayüzey olarak oluşturulabilir. Ek olarak, Şekil 3.5 (a) ve (b) 'nin, oluşturulan tasarımların polarizasyona duyarsız olarak çalışan sistemler olduğu gösterilmiştir.

Özetle, Moiré merceği yapısı baz alınarak tasarlanan dönüş açısına göre odak düzlemi değişen metayüzey önerilmiş ve tasarlanmıştır. Farklı dönme açıları için, odaklanmış ışık yoğunluğunda ve odak düzlemindeki değişim gösterilmiştir. Metayüzeyler dalga boyu altı örgü sabitine sahip olduğundan, faz profilini geleneksel SOE' den çok daha

iyi örnelemektedir. Ayrıca, önerilen metayüzey tasarımının üretimi sadece tek aşamalı bir litografi gerektirir. Bu yapılar, zoom lens sistemleri, lazer tarayıcılar ve fiber optik sistemlerde, geleneksel optik bileşenler yerine sivil ve savunma uygulamalarında büyük potansiyele sahiptir. Son olarak, polarizasyona duyarlı ve geniş odak aralığı için ayarlanabilen çok odaklı Moiré metayüzeyleri ile oluşturulan yapıları tasarlanmış ve analiz edilmiştir. Ayarlanabilir çok odaklı, tek odaklı ve odağı olmayan sistemleri tek bir yapıda önerdiğimiz sistem ile gerçekleştirebilir.





## **4. POLARİZASYONA BAĞLI OLMAYAN DİELEKTRİK METAYÜZEY İLE DALGA BOYLARININ AYRIŞTIRILMASI VE GÜNEŞ ENERJİ PİLLERİ İÇİN ODAKLAYICI MERCEK İLE YAPI OLUŞTURULMASI**

### **4.1 Dalgaboyu ve Güç Ayırıcılar**

Işın demeti ayırıcılar, polarizasyon, dalga boyu ve güce göre gelen ışığı birkaç ışına ayırabilen önemli optik bileşenlerden biridir. En bilinen şekliyle, iki dikey prizma birleştirilerek, küp şeklinde bir ışın ayırıcı oluşturulabilir. Bu yapıların, ara yüzey özellikleri değiştirilerek işlevi kontrol edilebilir. Bununla birlikte, prizmalar ve cam plakalar gibi geleneksel optik bileşenler kullanılarak, hacimli optik bileşenlerin ultra-ince düzlemsel elemanlarla değiştirilmesini kolaylaştıran nano-fotonik ilerlemeler göz önüne alındığında, hem öğelerin sistemlere yerleştirilmesi hem de minyatür optik devrelerin oluşturulması ile ilgili çeşitli sorunlar ortaya çıkmaktadır. Ayrıca, fotonik kristal yapılar ve mikro prizma dizileri gibi ışın bölücüler önerilmiştir, ancak polarizasyonun bağımlılığı bir sorun olarak karşımıza çıkmaktadır [76].

Metayüzeyler bu tarz sorunlara çözüm önerisi olarak düşünülmektedir ve dalga boyu altında kalınlıklarıyla daha iyi hizmet sunarlar. Metayüzeyler, ultra küçük ölçekli entegre devreler elde etmek için yeni fırsatlar sunarken, faz, polarizasyon ve genliğin eşsiz kontrolünü sağladığı için önemlidir [23, 35]. Bu çok etkili özellikler nedeniyle, araştırmacılar çeşitli uygulamalar için dalga ön cephesini kontrolünü sağlayan metayüzeylere büyük ilgi göstermektedir. Dalga boyundan küçük plazmonik yapılar kullanılarak dalga cephesinin yansıma kontrolü gösterilmiştir ve son zamanlarda oluşturulan dielektrik metayüzeyler ile ışığın görünür bölgede kontrolü iletim durumunda yüksek verimlilikle sağlanmıştır [23,39,40]. Işığın çok ince düz mercekle yapılarıyla odak düzlemi oluşturması birçok araştırma ile gösterilmiştir [23,35-40]. Ayrıca, ışın ve dalga ön cephesinin şekillendirilmesi [35], hologram [30] ve girdap demeti üretimi [77] için tasarımlar araştırmacılar tarafından yoğun olarak çalışılmıştır.

Gelen ışığı belirli bir noktaya yoğunlaştırmak ve ya dalga boylarına bölmek için bir optik sistem tasarlanabilir. Bu yaklaşım, verimliliği artırmak için birden fazla soğurma

malzemesine sahip güneş pillerinde kullanılmaktadır [78-79]. Farklı soğurma bölgesi özelliklerine sahip materyalleri bir araya getirerek güneş pillerinin verimliliğini arttırmaya yarayan bu tasarım yaklaşımı için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir [80,81]. Bununla birlikte, güneş ışığının farklı dalga boylarının ayrılmasına ve odaklanmasını sağlamak için tasarlanmış optik sistemler karmaşık ve hantaldır [82]. Pahalı imalat süreci göz önüne alındığında, bu tür karmaşık optik sistemleri benimsemek çok zordur. Ayrıca, cihazların dolu hacmi göz önüne alındığında, performans önemli ölçüde düşer. Bu nedenle, birden fazla soğurma malzemesine sahip güneş pilleri için kolayca imal edilebilen, düşük hacimli ve düşük maliyetli ışın ayırıcı tasarımı geliştirmek çok önemlidir.

Bu çalışmada, gelen ışığın farklı dalga boylarını polarizasyona bağlı olmadan yüksek verimlilikte ayırabilen metayüzey çalışması gösterilmiştir. Ayrıca ayrılan ışığın belirli bir noktaya yoğunlaşması için odaklayıcı ikinci bir metayüzey kullanılmıştır. İlk olarak ışık ilk metayüzeyde dalga boylarına göre farklı bölgelere hareket ederken geniş dalga boyunda çalışan ikinci metayüzey ışığı yoğunlaştırmaktadır. Sistemin üstünlüğünü göstermek için yapının performansları tüm görünür bölgede incelenmiş ve gösterilmiştir.

## 4.2 Kullanılan Yöntemler ve Oluşturulan Yapılar

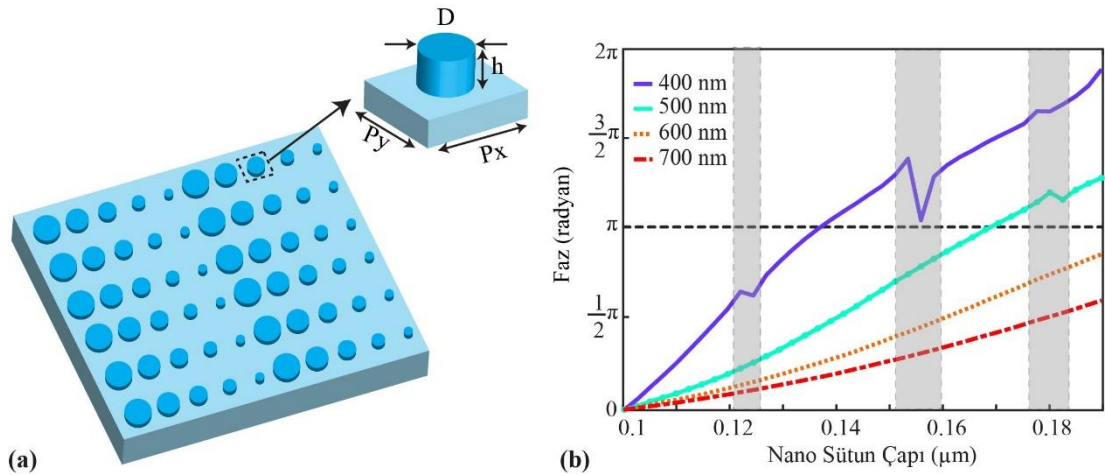
Bu çalışmanın arkasındaki motivasyon, metayüzey ışın ayırıcılarının tasarımı için alternatif konfigürasyonları araştırmaktır. Bizim çalışmamızda, önerilen ışın ayırıcısı sıradan bir standart SOE sisteminden ziyade bir metayüzey yaklaşımına dayanarak tasarlanmıştır [18,19], çünkü SOE sistemlere kıyasla bir metayüzey daha yüksek verimlilikte ve polarizasyon bağımsız olarak çalışır. Yüzeye dik gelen ışın için iki farklı ortam arasındaki arayüzde faz gradyanı mevcutsa ışının hareket yönü değişir. Dalga manipülasyonunu sağlamak için aşağıdaki faz denklemi kullanılmıştır.

$$\varphi(x, y) = \frac{2\pi}{\lambda_d} n_t \sin\theta_t \quad (4.1)$$

Burada  $n_t$  iletilen ışığın bulunduğu ortamın kırılma indisidir,  $\theta_t$  kırılan ışığın yüzeye yaptığı açıdır,  $\lambda_0$  ışığın serbest uzay dalga boyudur. x eksenini boyunca oluşturulan faz gradyanı ile, ışın belirli bir doğrultuda hareket etmeye başlar. Faz eğimine bağlı olarak

tasarlanan tamamen dielektrik metayüzeyler Şekil 4.1 (a) 'da gösterilmiştir. Titanyum dioksit ( $\text{TiO}_2$ ) nano sütun, kare örgü ile  $\text{SiO}_2$  alttaş üzerine yerleştirilmiştir.

Tam  $2\pi$  faz kapsama alanı, ışığın etkili bir şekilde değiştirilmesine neden olur.  $2\pi$  faz kapsamına gerek kalmadan,  $\pi$  faz kapasmasına kadar ışık yönlendirilebilir, ancak  $2\pi$  faz kapsama alanı elde edilemediğinde verimlilik düşer. [83,84]. Metayüzeyi oluşturan birim hücrelerde nano sütun çapına bağlı olarak faz kapsamı elde edilir ancak farklı dalga boylarında farklı faz kapsamları oluşur. Bu durum kromatik aberasyona gibi istenmeyen hatalara neden olsa da bu çalışmada bu özellik dalga boylarını ayırmak için kullanılmıştır. Farklı nano sütunların belirli çap aralığında neden olduğu faz kaymaları tasarım dalga boyunda  $2\pi$  faz aralığında elde edilir. Ancak, dalga boyu tasarım dalga boyundan büyük olduğunda  $2\pi$  aralığını sağlayamaz. Bu durum sistemin çalışmasına engel olmayıp verimlilikte azalmaya neden olur. Ancak sistemin limiti olan  $\pi$  faz farkı elde edilemezse sistem çalışmaz. Bizim tasarımımızda tasarladığımız metayüzey 400-500 nm dalga boylarında enerjinin çoğunu yönlendirebilirken 500-650 nm arasında belli bir kısmını yönlendirebilir. 650 nm dalga boyundan büyük dalga boylarında artık  $\pi$  faz kapsamı sağlanamadığından enerji geldiği doğrultuda devam eder. Tasarımda dalga boyu 400 nm olarak alınmıştır. Şekil 4.1(a)'da ilk metayüzeyin tasarımı ve Şekil 4.1 (b)' de çapa bağlı olarak değişen faz değerleri gösterilmiştir.

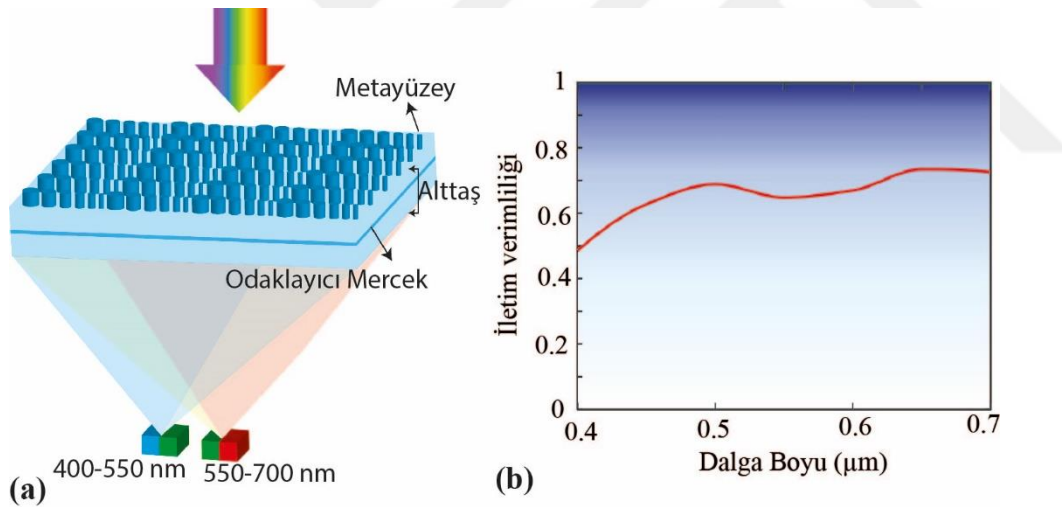


Şekil 4.1: (a) Periyodik  $\text{TiO}_2$  nano-sütun ile metayüzeyin üç boyulu gösterimi ( $h=400$  nm,  $p_x=p_y=250$  nm) üstten görünüm ve yandan görünüş. (b) çapa göre oluşturulmuş birim hücre için faz verileri.

$\text{SiO}_2$  alttaş üzerinde kare örgüyle dizilmiş nano-sütunlar, Eşitlik (4.1)' de verilen denklem ile belirlenen bir faz gradyana göre dizilmiştir. Işığın yönlendirilme açısı  $15^\circ$  olarak verilmiştir.  $\text{TiO}_2$  üretimi zor olsa da sahip olduğu yüksek kırıcılık indeksi ve

görünür bölgede hemen hemen kayıpsız olması [23,41] tasarımda kullanılmasına neden olmuştur. Şekil 4.1 (b)' de görüldüğü gibi tasarım dalga boyu olan,  $\lambda=400$  nm,  $0-2\pi$  faz kapsamı belirli çaplar arasında sağlanmıştır. Bazı bölgelerde fazda süreksizlikler oluşur. Bu bölgelerde iletim verimi çok düştüğü için tasarımda bu çaplar kullanılmamıştır. Dalga boyu büyüdüğünde Şekil 4.1 (b)'de görüleceği gibi faz kapsamı  $\pi$  altına düşer. 400 nm ve 500 nm dalga boyunda sınır koşulunu sağlayan faz geçişi sağlanırken 600 nm ve 700 nm dalga boylarında bu sınırı sağlayamaz.

Dalga boylarına göre ışığın ayrılmasını sağlayacak yapının tasarımı yapıldıktan sonra görünür bölgede belli bir odak oluşturacak ikinci bir metayüzey yapısı Şekil 4.2(a)'da görüldüğü gibi eklenmiştir. Burada kullanılan odak düzlemi oluşturan mercek delikli metayüzey yapısı ile oluşturulmuştur. Bu tasarımın seçilmesinde oluşturulan merceğin görünür bölgede güçlü iletim ve odaklama verimi ile çalışmasıdır. Not edilmelidir ki burada kullanılan mercek, geleneksel ya da SOE kullanılarak da oluşturulabilir. Şekil 4.2 (b)' de ise iletim verimliliği verilmiştir.



Şekil 4.2: (a) Tasarlanan yapının üç boyutlu gösterimi; ışığı dalga boylarına göre yönlendiren metayüzey ve odak düzlemi oluşturan metayüzey verilmiştir. Gelen ışık 400-550 ve 550-700 nm dalga boyu aralıklarında iki düzlemde oluşur. (b) Tasarlanan yapının dalga boylarına göre iletim verimliliği.

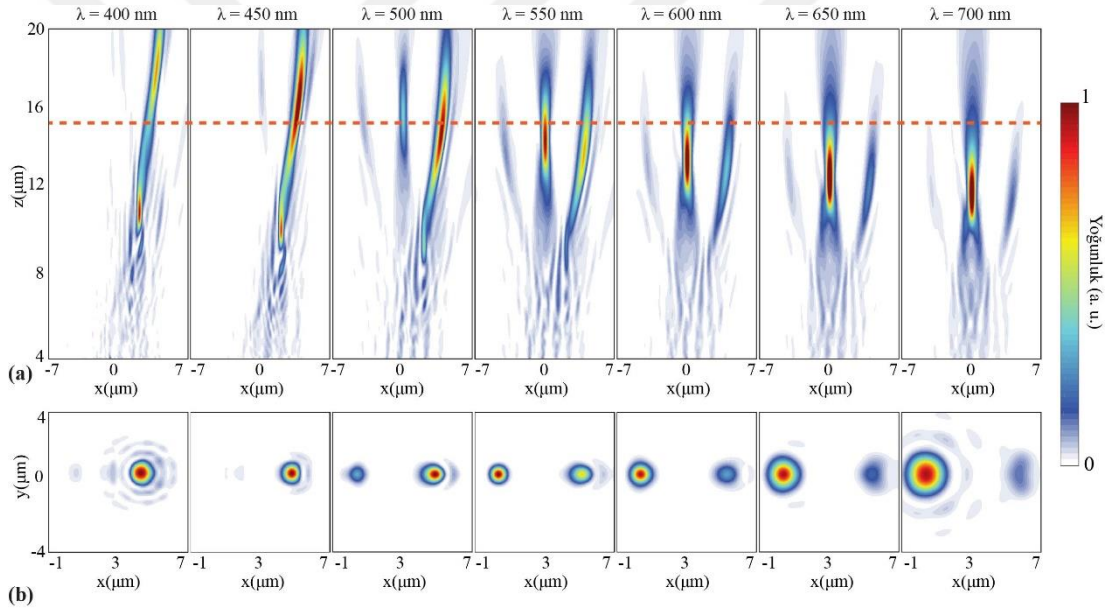
Görünür bölgede toplam yapının verimliliği önemli olduğu için oluşturulan yapının yüksek verimlilik ile çalışması hedeflenmiştir. Bu nedenle hafif, yenilikçi, verimi yüksek ve odak düzlemi oluşturan nano delik metayüzey kullanılmıştır. Nano delik



metayüzey altında yerleştirilmiş ikinci bir alttaş bulunmaktadır. İletimi arttırmak için ince bir SiO<sub>2</sub> taban malzemesi yerleştirilmiştir. Nano delik metayüzey tasarımında, SA=0.54, çap 15 µm, odak uzaklığı 12 µm ve çalışma dalga boyu 532 nm olarak alınmıştır. 400-700 nm dalga boyları arasında 45% üzerinde iletim verimliliği elde edilmiştir. Buda göstermektedir ki tüm görünür bölgede yüksek iletim verimliliği elde edilmiştir.

### 4.3 Oluşturulan Yapının Sayısal Analiz ve Sonuçları

Şekil 4.3 (a) ve (b)' de yapının oluşturduğu elektriksel alan yoğunluğunun enine ve boyuna kesitleri verilmiştir. Geniş dalga boyu aralığında önerilen yapının çalıştığı görülmektedir. İlk metayüzey  $\lambda=400$  nm dalga boyunda tasarlandığı için 400 nm- 500 nm arasında istenilen şekilde çalışmaktadır.

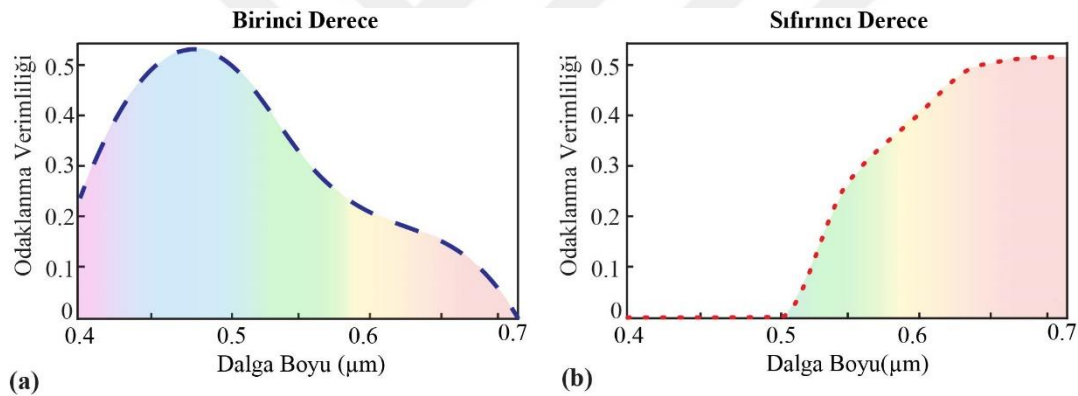


Şekil 4.3: (a) Görünür spektrumdaki ilgili dalga boylarına karşılık gelen yoğunluk dağılımları. (b) elde edilen yoğunluk dağılımları üzerinde (a) 'nın turuncu kesikli çizgileri boyunca normalize edilmiş yoğunluk profilleri. Turuncu çizgi, ortak bir kesit alanı oluşturularak odak kesitlerinin gösterilmesi amacıyla oluşturulmuştur.

Odak düzlemi oluşturan ikinci metayüzey kendisine yönlendirilmiş olarak gelen ışını  $x$  ekseninde kayma yaparak odaklar. Dalga boyu arttıkça ilk metayüzey ışığı yönlendiremeyeceği için ışın ikinci metayüzeye yönlendirilmeden, normale sıfır derece açı yaparak, gelir. Bu nedenle sistem birinci ve sıfıncı derece olarak adlandırılan ışık yoğunlaşması olur. Merkezde oluşan enerji yoğunlaşması sıfıncı derece,  $x$  ekseninde kaymış olarak gösterilen diğer yoğunlaşma birinci derecedir. 400

nm dalga boyundan sonra ışın yoğunlaşması birinci dereceden sıfırncı dereceye geçmeye başlar. Şekil 4.3(a)' da görüleceği gibi çok büyük dalga boylarında birinci derece oluşmaz. Şekil 4.3(b)' de ise Şekil 4.3(a)'da görülen turuncu çizgide oluşan beneklerin enine kesiti verilmiştir. Benek konumundaki kayma sağdan sola doğrudur.

Şekil 4.4'te odaklanan ışığın odaklama verimi verilmiştir. Odak verimini hesaplamak için, teorik olarak hesaplanan  $YDG = 0.514 \frac{\lambda}{2NA}$  değerinin üç katına eşit bir yarıçapa sahip bir alanda odak düzleminde toplanan ışığın enerjisinin gelen ışığın enerjisine oranı alınır. Şekil 4.4(a) göstermektedir ki belli dalga boylarında çok az olsa da tüm görünür bölgede birinci derecede ışık yoğunlaşması olur. Şekil 4.4(b)'de ise 500 nm ye kadar neredeyse sıfıra yakın odak verimliliği elde edilmiştir. Yüksek dalga boylarında ise odak verimi çoğunlukla sıfırncı derece oluşur. Orta dalga boylarında hem sıfırncı hem birinci derece oluşur.



Şekil 4.4: Görünür bölgede (a) birinci derece (b) sıfır derece odak düzlemlerinin odak verimlilikleri.

Özetle, normalde metayüzeyler ile yapılan sistemlerde problem teşkil eden farklı dalga boylarında çalışma sorunsalı bu çalışmada yenilikçi bir yaklaşımla birden fazla soğurmalı güneş enerjisi sistemleri için oluşturulmuştur. Önerilen metayüzeyin görünür bölgede geniş dalga aralığında çalıştığı gösterilmiştir. Önerilen metayüzey, görünür dalga boylarındaki yüzeye dik gelen ışık huzmelerini, dalga boylarına göre iki farklı hüzmeye ayırabilir. ZASF yöntemi kullanılarak, farklı dalga boylarında odaklanma verimliliği sayısal olarak analiz edilmiştir. Bu çalışmada, 400 nm-700 nm dalga boyu aralığını kapsayan yüksek bir odaklama verimliliği elde edilmiştir. Önerilen tasarım yapısı, mevcut nanofabrikasyon teknikleri kullanılarak imal edilebilir. Ayrıca, çalışma prensibi görünür bölge ile sınırlı değildir ve tasarım dalga boyunu ayarlayarak farklı dalga boyu aralıklarına genişletilebilir.

## 5. BELİRLENEN YÖRÜNGEDE HAREKET EDEN BESSEL TİPİ IŞINLARIN METAYÜZEY İLE OLUŞTURULMASI

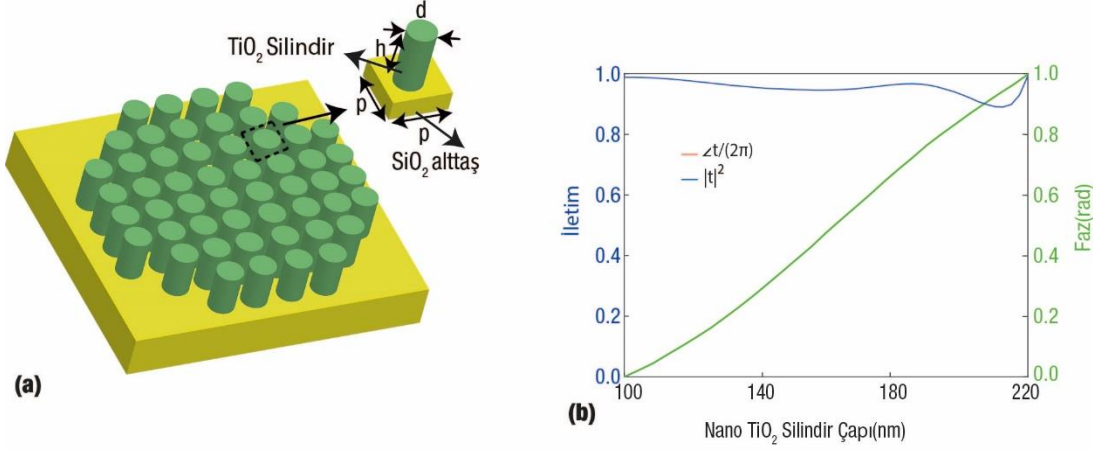
Metayüzeyler, ışığın polarizasyonunu, genliğini ve fazını kontrol etmeye yarayan benzersiz özellikleri nedeniyle çeşitli gelişmiş uygulamalarda büyük ilgi görmektedir. İlk çalışmalar çoğunlukla metal-dielektrik esaslı yapıları içermektedir [4,6]. Bu yapılar faz kapsamını ve yayılma yönünün kontrolünü sağlamasına rağmen, özellikle iletim durumunda optik kayıplar nedeniyle kullanışsızdırlar. Metalik metayüzeylerin aksine, Mie saçılma esaslı tamamen dielektrik metayüzeyler optik kayıpları tolere edebilir [14]. Üretimler yoğun imalat zorlukları gerektirmez. Mie saçılma esasına göre çalışan metayüzeyler yüksek verimlilik sağlamasına rağmen, sadece dar bir bant üzerinde çalışabilirler. Geniş bantta yüksek verim elde etmek için [23,39], yüksek boy-en oranına sahip metayüzeyler tasarlanmıştır. Bu tarz yaklaşımlar, faz ve genliğin yüksek verimli tam kontrolünü sağlar. Bu yapılar ile mercekler [40], ışın ayırıcı yapılar [39] ve hologramlar [85] gibi optik cihazlar gösterilmiştir.

Keyfi yörüngelerde hareket eden ışınlar uzun yıllardır çalışmaktadır. Bu tip ışınlar, boş uzayda bile farklı yörüngelerde yayılması gibi benzersiz özellikleri nedeniyle birçok uygulamada ilgi görmektedir[86-89]. Hiperbol ve spiral şeklinde belirlenmiş yörüngeler boyunca ilerleyen Bessel benzeri ışın desenleri, özellikle spatial light modulators (SLM) ve SOE tarafından üretilmiştir. Bu çalışmada, benzer bir yaklaşım kullanarak, istenen bir yörünge boyunca ilerleyen Bessel benzeri optik ışın metayüzey ile üretilmiştir.

### 5.1 Faz Profilinin oluşturulması ve Yapının Analizleri

Yüksek iletim verimi elde etmek için, 600 nm yüksekliğe ve yüksek boy-en oranına sahip TiO<sub>2</sub> nano sütunlar kullanılmıştır. Ayrıca, Şekil 5.1 (a) 'da gösterildiği gibi, kalın SiO<sub>2</sub> alttaş üzerindeki nano sütunlar periyodik olarak örgü sabiti 250 nm olan kare bir örgü üzerinde düzenlenmiştir. Şekil 5.1 (b) 'de, farklı TiO<sub>2</sub> nano sütun çaplarının iletim

ve faz karakteristikleri gösterilmektedir. Sayısal hesaplama için Lumerical ZASF yöntemi kullanılmıştır [51].



Şekil 5.1: (a) SiO<sub>2</sub> alt taş üzerine TiO<sub>2</sub> silindirik çubukların yerleştirilmesi ile oluşturulan metayüzeyin üç boyutlu gösterimi. (b) İletim verimliliği ve oluşan faz gecikmesinin 100 nm ila 220 nm arasında değişen farklı TiO<sub>2</sub> nano sütun çapları için dağılımı.

Boş alanda belirlenen bir yörünge boyunca yayılan Bessel benzeri ışın elde etmek için yörünge  $(f(z), g(z), z)$  ile belirlenir, burada  $f, g$  istenen hareket fonksiyonları ve  $z$ , yayılma düzlemidir.  $z = 0'$  da giriş optik alan dağılımı aşağıdaki eşitlik ile belirlenir [87-89];

$$u(x, y) = \exp(-(x^2 + y^2)/w^2) \exp[iQ(x, y)] \quad (5.1)$$

Denklemdaki  $w$ , Gauss ışın boyutu, tasarımımda  $6 \mu\text{m}$  alınmıştır.  $Q$  faz terimi ile modüle edildikten sonra Gauss ışını istenen yörünge  $(f(z), g(z), z)$  boyunca boş uzayda yayılır.  $Q$  'nun  $z$  ye göre ilk kısmi türevleri  $Q_x = (f-x)/z$  ve  $Q_y = (g-y)/z$  ile ilişkili olmalıdır, burada  $(x, y, 0)$  konik ışın demetindeki herhangi bir ışının başlangıç noktasını belirtir. Başlangıç noktası dışındaki diğer noktalar, merkezi  $(x_0, y_0)$  olan  $x_0(z) = f - zf'$ ,  $y_0(z) = g - zg'$  ve  $R(z)$  sabit faz noktalarını tanımlayan geometrik daire  $C(z)$  oluşturur.  $(f(z), g(z), z)$  ile tanımlanan yörüngeyi elde etmek için faz  $Q(x, y)$  aşağıda ifade edilir [86-88],

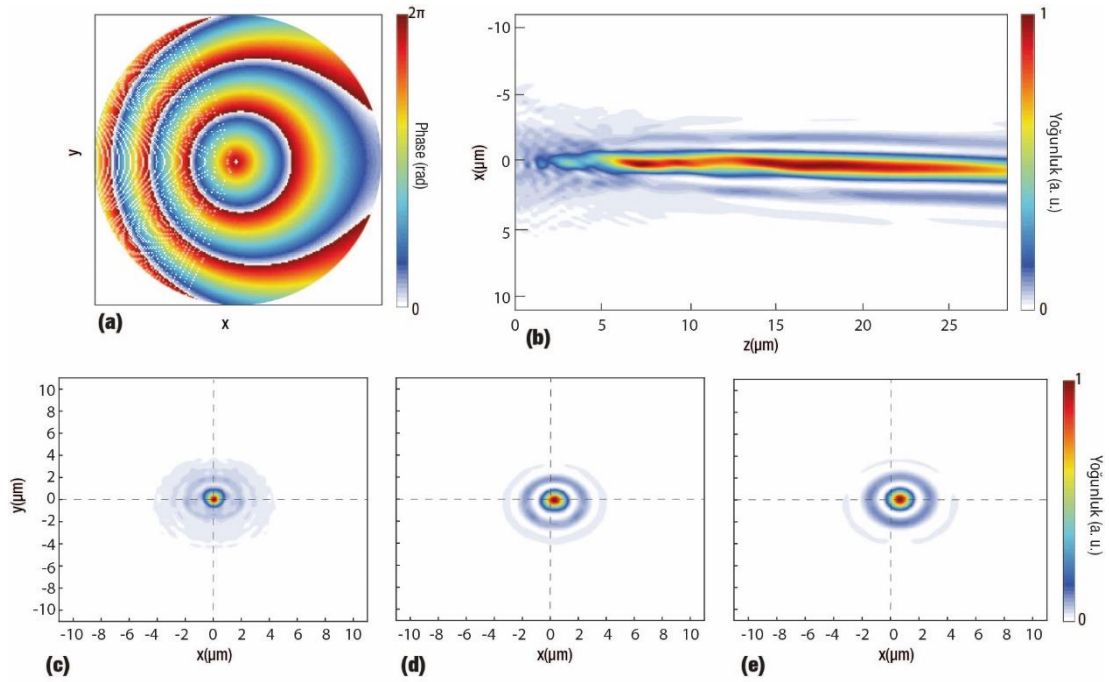
$$Q(x, y) = \frac{k_0}{2} \int_0^z \{[f'(\xi)]^2 + [g'(\xi)]^2\} - \left(\frac{\beta}{k_0}\right)^2 d\xi + k_0[(f - x)^2 + (g - y)^2] \quad (5.2)$$

$$\frac{\beta^2 z^2}{k_0^2} = [x - f(z) + zf'(z)]^2 + [y - g(z) + zg'(z)]^2 \quad (5.3)$$

$k_0$  ve  $\beta$  boşluk uzayda ve enine dalga numaralarını belirtir.  $z$  için yegane bir çözüm sunan Eşitlik (5.3)' te ki daire denklemi çözüldükten sonra, faz  $Q$  Eşitlik (5.2)'de bulunabilir. Ayrıca, Eşitlik (5.3)'te  $z$  için eşitlik çözüldüğünde, çözüm aşağıdaki verilen koşula uymak zorundadır [88,89],

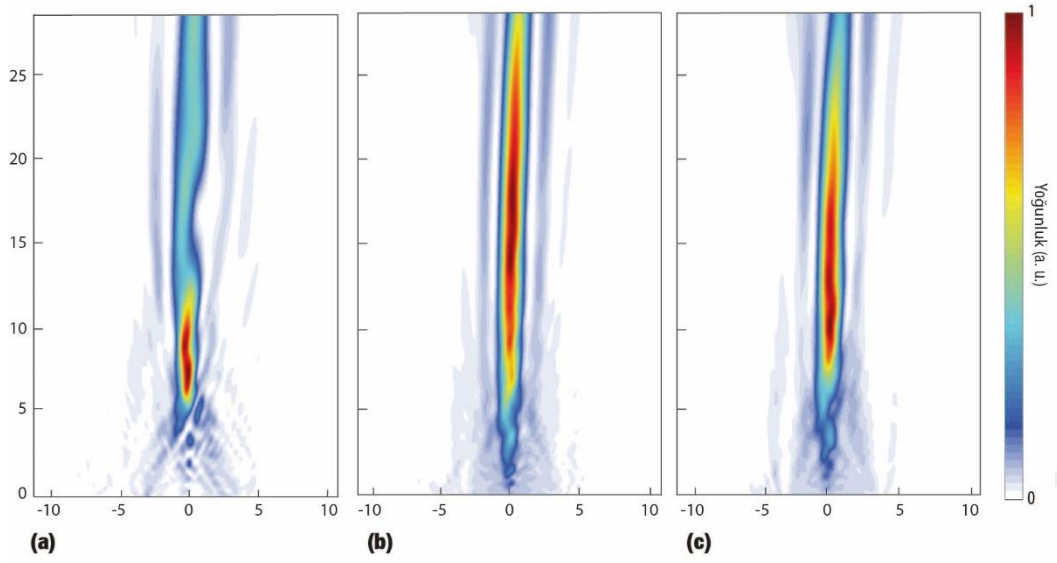
$$R'(z) > z\sqrt{[f''(z)]^2 + [g''(z)]^2} \quad (5.4)$$

Bu koşul, maksimum  $C(z)$ ' nin elde edildiği maksimum yörünge mesafesi  $z_m$ ' yi verir. Maksimum mesafe Eşitlik (5.4) ile belirlendikten sonra, farklı bir yörünge uygulanmalıdır. Şekil 5.2 (b) 'de, Bessel benzeri ışın Şekil 5.2 (a)' da gösterildiği gibi faz yapısı yoluyla parabolik yörünge ( $f(z)=(10^5 z^2/40)$ ,  $g=0$ ) boyunca ilerlediği gösterilmektedir. Çalışılan dalga boyu 532 nm olarak seçilmiştir ve Gaussian ışın şekli, faz plakası ile etkileşime girdikten sonra Bessel benzeri ışın olarak hareket eder. Şekil 5.2(c), 5.2(d) ve 5.2(e), Bessel benzeri ışının farklı  $z$  mesafelerinde enine kesit görünümünü göstermektedir. Bessel benzeri ışının belirlenen yörüngeye göre  $x$  ekseninde kaydığı görülebilir. Bununla birlikte, iletim verimi 80%' den fazla elde edilmiştir.



Şekil 5.2: (a) Bessel benzeri ışın elde etmek için faz dağılımı. (b) Bessel benzeri kirişin istenen yörünge boyunca yayılma yönü. (c-e) Bessel demetinin  $z = (8, 16, 24) \mu\text{m}$ 'deki enine kesitleri.

Dielektrik metayüzey birim hücre yapısı nedeniyle geniş dalga boyu aralığında çalışabilir. Diğer sistemlerin aksine geniş dalga boyunda çalışabilmesi bu çalışmanın etkisini arttırmaktadır. Metayüzey'in farklı dalga boylarında istenen yörüngeyi izleyen ışın üretip üretmediğini gözlemlemek için, oluşturulan yapıya farklı dalga boyları için Gauss ışın gönderilmiştir. Tasarlanan dalga boyuna (532 nm) yakın olan çalışma dalga boyunda (550 nm), Şekil 5.3(b) 'de gösterildiği gibi ışının aynı yörüngede hareket ettiğini gösterir. Bununla birlikte, dalga boyları tasarlanan dalga boyundan çok fazla uzaklaştığında, yörünge Şekil 5.3(a) ve 5.3(c) 'de (sırasıyla 475 ve 600 nm dalga boylarında) gösterildiği gibi değişmeye başlar.



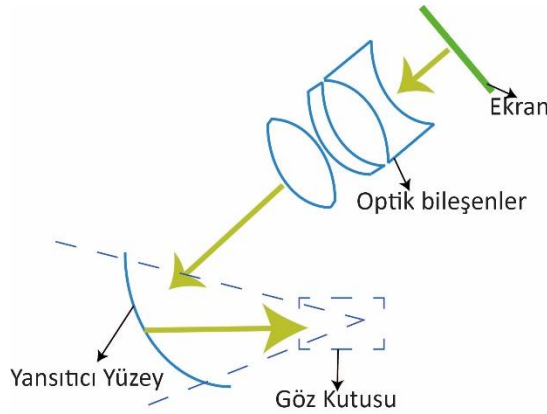
Şekil 5.3: Bessel tarzı istenilen yörüngede hareket eden ışınlar farklı dalga boylarında gösterilmiştir (a) 475 nm , (b) 550 nm, (c) 600 nm

Sonuç olarak, bu çalışmada Bessel tarzı istenilen yönde hareket eden ışınların metayüzeyler tarafından üretilebileceği gösterilmiştir. Metayüzeyler, istenilen yörüngede ışınlar üretirken polarizasyon bağımlılığı ve iletim verimliliği gibi SOE sistemlerin sınırlarını ortadan kaldırır. Ayrıca, ışınların yayılımı farklı dalga boylarında yüksek iletim verimliliğine sahip olmaya devam etmektedir. Sonuçlarımız, keyfi yörüngeleri takip eden ışınların oluşturulması için büyük fırsatlar yaratmaktadır.

## 6. DALGA KILAVUZU TABANLI BAŞ ÜSTÜ GÖSTERGE OPTİK TASARIM VE ANALİZİ

### 6.1 Geleneksel Optik Sistemlerin sorunları ve Çözüm Önerisi

Baş üstü göstergeler(BÜG), kullanıcı dışarıdaki görüntüyle birlikte ikincil bir kaynaktan gelen görüntünün otomobil ve ya uçak gibi ulaşım araçlarına yerleştirilmesi amacı ile oluşturulan sistemlerdir. Bu önemli avantaj, pilotun durumsal farkındalığının geliştirilmesine yardımcı olur ve reaksiyon süresini azaltır. BÜG sistemlerin birçok farklı sürümü mevcuttur. Bunların en basiti ön camın üzerine yerleştirilen yansıtıcı bir yüzeye akıllı telefonda oluşturulan görüntünün gönderilmesidir. Ne yazık ki, bu yaklaşım dış görüntü ve ekran görüntüsünün algılanması için gözün uyum sağlamasını zorlaştırır. Mevcut uçak sistemlerinde ise gelen ışının bir yansıtıcı yüzey yada hologram yüzeyden yansıtılmasıyla oluşturulur. Şekil 6.1'de görüldüğü gibi projektörden gönderilen görüntü önce mercek sistemi yardımıyla düzeltilip toplanarak yansıtıcı yüzey ile göze ulaştırılır [90,91].



Şekil 6.1: Geleneksel optik bileşenler ile yapılan BÜG sistemi

Geleneksel uçak sistemlerinde kullanılan BÜG sistemlerinin sınırlamaları, görüş alanının veya algılanan görüntünün isterleri karşılaması ve projeksiyon optiklerinin boyutuna bağlı olmasından kaynaklanır. Aviyonik kokpit veya otomobil gösterge tablosu gibi alanlarda, elde edilmek istenen görüş alanı ciddi şekilde kısıtlanmıştır. Başka bir sorun, bir sürücünün görüntüyü görebilmesi için sınırlı alanda bulunması



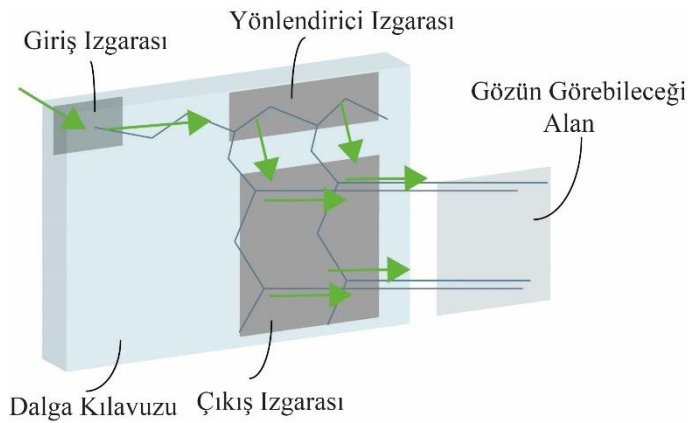
sorunudur. Bu alana göz kutusu denir ve Şekil 6.1’ de görüldüğü gibi görüntü (sonsuzda bulunan), yansıtıcı yüzeyin alanı ve kullanıcının konumuna bağlıdır. Buna göre, yansıtıcı alan büyüdükçe, göz kutusu ve görüş alanı potansiyel olarak büyük olabilir.

Geleneksel BÜG sistemlerinin kapladığı alan, göz kutusu boyutu ve görüş alanı üzerindeki bu sınırlamalar, serbest biçimli optikler, çoklu ayna elemanları ve dalga kılavuzları gibi başka çözümler bulmaya yol açmıştır [92-93]. Bu sistemler hem toplam sistemin alanını küçültür hemde kısıtlamaları kaldırır.

Bu çalışmada amacımız dalga kılavuzu ve ızgara yapılarını kullanarak BÜG yapıları tasarlayıp analiz etmektir. Dalga kılavuzuna ızgara yapılarıyla hapsedilen yine farklı bir ızgara yapısı ile dışarıya çıkarılmıştır. Görüntü analizi yapılmış ve çıkan sonuçlar tartışılmıştır.

## 6.2 Dalga kılavuzu Tabanlı Optik Sistemin Tasarım ve Analizler

BÜG sistemimizde, giriş, yönlendirme ve çıkış için dalga kılavuzu üzerinde üç adet ızgara yapısı kullanılmıştır. Not edilmelidir ki burada kullanılan ızgara yapılarının yerine hologram yada metayüzey yaklaşımları uygulanabilir. Şekil 6.2’de oluşturulan BÜG yapısının şeması gösterilmiştir.



Şekil 6.2: Dalga kılavuzu tabanlı BÜG genel tasarım şeması. Yapı bir dalga kılavuzu, giriş, yönlendirici ve çıkış ızgaralarından oluşmaktadır.

Şekil 6.2’ de görüleceği gibi gelen ışınlar giriş ızgarası ile dalga kılavuzu içerisine aktarılırlar. Burada önemli olan kısım dalga kılavuzuna giren ışığın hareketini tam iç yansıma(TİY) kuralına uyarak devam ettirmesidir. Şekil 6.3(a),(b) ve (c)’ de ışının

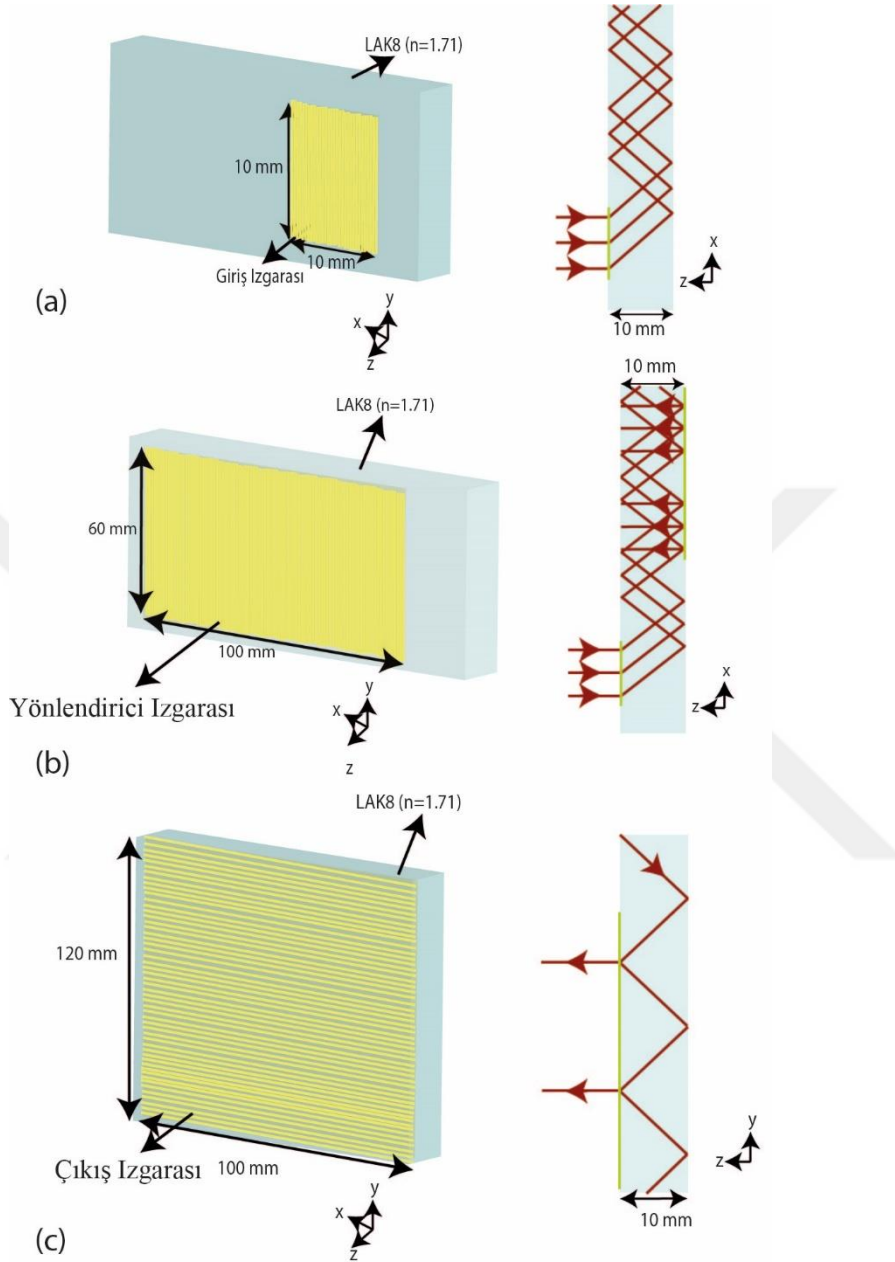


dalga kılavuzu içerisinde hareketi ve ızgara yapılarının göstereceği davranış resmedilmiştir. Şekil 6.3(a)'da dışarıdan gelen ışın giriş ızgarası sayesinde dalga kılavuzu içerisine TİY kuralına uyarak devam eder. Şekil 6.3(b)'de ise giriş ızgarasından çıktıktan sonra x yönünde TİY kuralına uyarak hareket eden ışınlar yönlendirme ızgarası aracılığı ile hareket yönü y eksenine olacak şekilde kayarak hareket ederler. Bu tasarımda yönlendirme ızgarası, giriş ızgarası gibi tam verimlilikte çalışmamaktadır çünkü yönlendirici ızgara gözün görebileceği alanı x ekseninde genişletmektedir. Aynı tavır çıkış ekseninde geçerlidir. Şekil 6.3(c)'de gösterildiği gibi y ekseninde ışığın büyümesini sağlar. Yönlendirici ve çıkış ızgaraları yüzeyine çarpan ışığın %10'a yakın kısmını yönlendirirken ışığın kalan kısmını aynı şekilde hareket edecek şekilde devam ettirir. Bu nedenle her çarpmada bir kısım ışık geliş hareketine devam ederken diğer kalan kısımdaki ışınlar yönlendirilir. Bu tasarımda giriş ve çıkış ızgara periyotları 500 nm olup yönlendirme ızgarasının periyodu 353 olarak belirlenmiştir. Dalga kılavuzunun kalınlığı 10 mm, 130 mm genişlik ve 200 mm uzunluk olarak alınmıştır. Giriş ızgarası boyutu itibariyle 10 mm x 10 mm, yönlendirme ızgarası 60 mm x 100 mm ve çıkış ızgarası 100 mm x 100 mm olarak yapılmıştır.

Bu çalışmada ızgara tasarımını göstermek için sadece giriş ızgarası tasarlanmıştır. Diğer ızgaralarda benzer yöntemler ile tasarlanabilirler. Tasarım dalga boyu 532 nm olarak belirlenmiş olup ızgara yapısı bu dalgaboyu üzerine tasarlanmıştır. Tasarlanan ızgara yapısının analizi ZASF kullanılarak yapılmıştır. İlk olarak giriş ızgarası dışarıdan gelen ışığın enerjinin olabildiğince çoğunu alabilmesi için özel olarak tasarlanmalıdır. Bu nedenle ızgara yapıları eğri biçiminde ızgara yapıları ile tasarlanmıştır.

Bu yapılar diğer ızgara türlerine göre daha etkili olarak ışığı bükerekler [94]. Yapılan analizlerde farklı period ve geliş açılarında çıkış verimliliği ve çıkış açısı ölçülmüştür. Şekil 6.4(a)'da verilen yapı optimize edilerek yüksek verimlilik elde edilmiştir. Burada dikkat edilmesi gereken husus istenilen açı değerleri için yapı analizinin doğru yapılmasıdır. Örneğin dalga kılavuzu içerisinde ışığın hareket etmesi için TİY kuralına uymak zorundadır. Yapıda hesaplanan TİY açısı  $35.78^\circ$  olarak belirlenmiştir. Bu nedenle parametreler doğru alınmalıdır. Bu nedenle periyot 500 nm olarak alınan bir tasarımda yapılan optimizasyon işlemi ile şekil 4'te gösterildiği gibi c/d oranı 0.55 ve

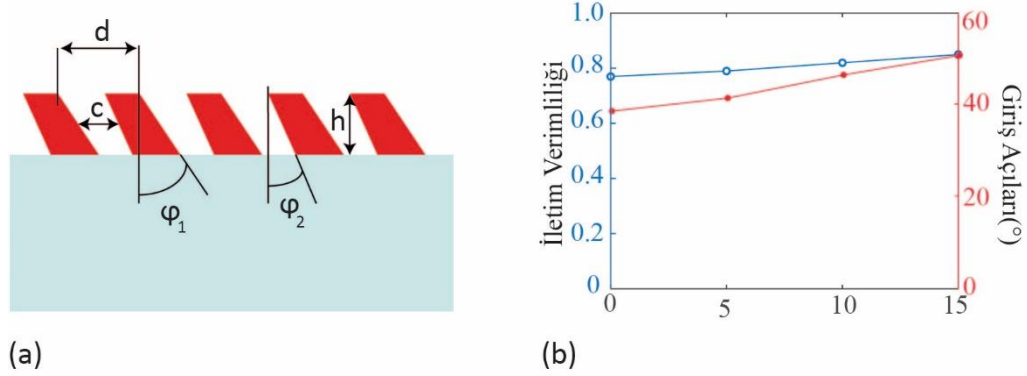
yükseklik(h) 300 nm olarak alınmış olup  $\phi_1$  ve  $\phi_2$  açıları sırasıyla  $40^\circ$  ve  $30^\circ$  açıları olarak belirlenmiştir.



Şekil 6.3: Yapı üzerinde (a) giriş ızgarası (b) yönlendirici ızgara ve (c) çıkış ızgarası ve ışığın bu yüzeyler ile teması sonrası temsili hareketi

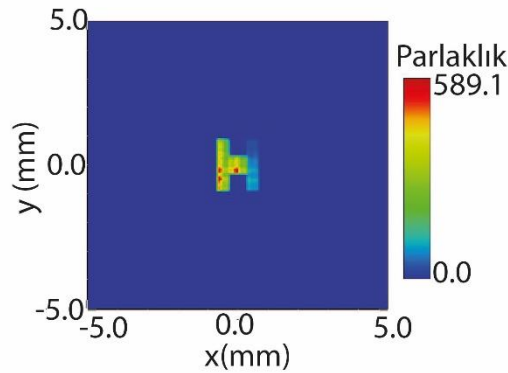
Kulelerin malzemesi verimliliği arttırmak için  $\text{TiO}_2$  malzemesi altta üzerine yerleştirilmiştir. Şekil 6.4(b) için geliş açılarına göre giriş ve çıkış ızgaralarının performansı gösterilmiştir. Açı değişimine bağlılıkları ne kadar az ise alınan görüntüdeki aydınlanma şiddeti o derece homojen olur. Yönlendirme ızgarası içinde benzer bir yaklaşım kullanılarak tasarım tamamlanır.

Son olarak Zemax OpticStudio [95] yardımıyla oluşturulan tasarım analiz edilmiştir. Şekil 6.3'te gösterilen değerler ile tasarım oluşturulmuş olup giriş ızgarasının verimi 80%, yönlendirici ve çıkış ızgaralarının verimi 20% alınarak tasarım tamamlanmıştır.



Şekil 6.4: (a) Giriş ızgarası için oluşturulan yapı ve (b) analiz sonucu elde edilen iletim verimliliği ve ızgara yapısıyla etkileşimi sonrası ışığın dalga kılavuzu içerisine giriş açıları

Şekil 6.5'te "H" şeklinde basılan görüntü tekrardan elde edilmiştir. Görüntüde homojen olmayan etkiler mevcuttur. Burada soldan sağa gidildikçe görüntüde solgunlaşma olmaktadır. Bunu gidermek için dalga kılavuzunun kalınlığı yada ızgara yapılarının periyodu, verimliliği gibi değerler değiştirilerek daha iyi performans sağlanabilir.



Şekil 6.5: Ekrandan "H" şeklinde verilen görüntünün giriş ızgarasından dalga kılavuzuna alınması ve yönlendirilerek çıkış ızgarasından çıkarılması sonucu tekrar oluşturulan görüntü

Özetle, BÜG yapısı oluşturulup analiz edilmiş olup her bir parametrenin seçiminde ayrı bir önem bulunmaktadır. Iızgara yapıları ayrıca etkileri ve verimlilikleri için dalga teorisi kullanılarak hesaplanmıştır. Geometrik optik ve dalga optiğinin bir arada

kullanıldığı bu yapılar ayrı ayrı analiz edilip hesaplamalar yapılır. Bununla birlikte, ızgara yapıları yerine hologram yada metayüzey yaklaşımları kullanılabilir.



## 7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Son zamanlarda, metayüzeyler ışığın faz, genlik ve polarizasyonunu modüle etmek için ümit vaat eden bir yöntem olarak ortaya çıkmıştır. Metayüzeyleri, ışığı kontrol etmek için kullanılan geleneksel optik malzemelerle karşılaştırdığında nano boyutlu antenlerden oluşan metayüzeyler düz bir yüzey boyunca ışığı kontrol ederler. Bununla birlikte, tamamen dielektrikten oluşan metayüzeyler kayıplı plazmonik bileşenlerden daha verimli ve daha az üretim zorluğu getirdikleri için daha fazla kullanıma yol açmaktadır. Bu tez kapsamında farklı metayüzey yaklaşımları ve uygulamaları getirilmiştir.

Değişken çaplara sahip nano deliklerden ile büyük sayısal açıklık ve geniş geliş açılarında yüksek verimle çalışabilen metayüzey tasarımı yapılmıştır. 450 nm-700 nm dalga boyu aralığında yüksek odaklama verimliliği ( $\geq 70\%$ ) elde edilmiştir. Çalışmayı genişletmek için, metayüzey tasarımı için iki farklı birim hücre araştırılmış ve sonuçların karşılaştırılması gösterilmiştir. Nano delik metayüzeyler, yüksek SA değerlerinde yüksek verimlilik ve düşük kromatik hata ile tüm görünür bölgede nano sütun ile oluşturulan metayüzeylere göre daha iyi performans sağlamıştır. İncelenen nano delik metayüzey, geleneksel sütun tipi yapılara kıyasla gerçekten düz optik elemanlar olarak kabul edilebilir.

Moiré lens tabanlı rotasyonel olarak ayarlanabilen metayüzey mercek sistemi gerçekleştirilmiştir. Farklı dönme açıları için, odaklanmış ışık yoğunluğunun ve odak düzleminin değiştiği gösterilmiş ve yüksek performans sağladığı gösterilmiştir. Polarizasyon bağımsız ve geniş odak aralığı ayarlanabilir tek ve çok odaklı sistem tasarımı yapılmıştır. Bu yapı sayesinde ayarlanabilir tekli, çoklu ya da odaksız sistemlerin hepsi tek bir yapıda oluşturulabilir.

Görünür bölgede kısa dalga boylarında ışınların hareket doğrusunu değiştirirken uzun dalga boylarında ışığa hareket etkisi olmamasına rağmen ışığı geçiren metayüzey tasarımı yapılmıştır. Bu yapı sayesinde kısa dalga boyları ve uzun dalga boyları farklı yerlerde toplanmıştır. Yapı ışın ayırıcı bir metayüzey ve odaklayıcı mercek ile oluşturulmuş olup odaklayıcı yapı nano delik metayüzeyler ile oluşturulmuştur. Yüksek iletim karakteristiğine sahip olan bu yapı tasarım dalga boyu değiştirilerek

farklı dalga boyu aralığında çalışması sağlanabilir. Birden fazla soğurma malzemelerine sahip güneş pilleri gibi çeşitli uygulamalarda kullanılabilir.

Işığın doğada bir doğru boyunca ilerlemediği hüzmeler türleri çeşitli yöntemlerle gerçekleştirilmesine rağmen kullanılan yöntemler performansını sınırlar. Metayüzeyler yüksek verimlilik ve polarizasyon bağımsız yapılarıyla ışığın farklı yörüngede gitmesini sağlamıştır. Ayrıca geniş dalga boyu aralığında çalıştıkları gösterilmiştir. Bu yapılar sayesinde belirli yörünge izleyen ışınların uygulama alanları daha fazla araştırma olanağı bulabilir.

Dalga kılavuzu tabanlı BÜG sistemlerinin nasıl tasarlanacağı ve hangi analiz araçlarının kullanılması gerektiği gösterilmiştir. 80% yakın yüksek verimlilikle çalışan ızgara yapısı tasarlanmış olup toplam yapının geometrik optik analizleri sonucunda ekrandan basılan bir görüntü göze getirilerek tekrar oluşturulmuştur. Bu yapılar daha optimum hale getirilerek daha verimli ve daha iyi performans sunan hale getirilebilirler.

## KAYNAKLAR

- [1] **He, Q., Sun, S., Xiao, S., & Zhou, L.** (2018). High-efficiency metasurfaces: principles, realizations, and applications. *Adv. Opt. Mater.*, 6, 1800415.
- [2] **Yu, N., Genevet, P., Kats, M. A., Aieta, F., Tetienne, J. P., Capasso, F., Gaburro, Z.** (2011). Light propagation with phase discontinuities: generalized laws of reflection and refraction. *Science*, 334, 333-337.
- [3] **Wang, X., Ding, J., Zheng, B., An, S., Zhai, G., Zhang, H.** (2018). Simultaneous realization of anomalous reflection and transmission at two frequencies using bifunctional metasurfaces. *Sci. Rep.*, 8, 1876.
- [4] **Ranjbar, A., Grbic, A.** (2017). Analysis and synthesis of cascaded metasurfaces using wave matrices. *Phys. Rev. B*, 95, 205114.
- [5] **Yu, N., Capasso, F.** (2014). Flat optics with designer metasurfaces. *Nat. Mater.*, 13, 139-150.
- [6] **Kildishev, A. V., Boltasseva, A., Shalaev, V. M.** (2013). Planar photonics with metasurfaces. *Science*, 339, 1232009.
- [7] **Sun, S., Yang, K. Y., Wang, C. M., Juan, T. K., Chen, W. T., Liao, C. Y., He, Q., Xiao, S., Kung, W. T., Guo, G. Y., Zhou, L., Tsai, D. P.** (2012). High-efficiency broadband anomalous reflection by gradient meta-surfaces. *Nano lett.*, 12, 6223-6229.
- [8] **Sun, S., He, Q., Xiao, S., Xu, Q., Li, X., Zhou, L.** (2012). Gradient-index metasurfaces as a bridge linking propagating waves and surface waves. *Nat. Mater.*, 11, 426-431.
- [9] **Jahani, S., & Jacob, Z.** (2016). All-dielectric metamaterials. *Nat. Nanotechnol.*, 11, 23.
- [10] **Fu, Y. H., Kuznetsov, A. I., Miroschnichenko, A. E., Yu, Y. F., Luk'yanchuk, B.** (2013). Directional visible light scattering by silicon nanoparticles. *Nat. commun.*, 4, 1527.
- [11] **Ginn, J. C., Brener, I., Peters, D. W., Wendt, J. R., Stevens, J. O., Hines, P. F., Basilio, L. I., Warne, L. K., Ihlefeld, J. F., Clem, P. G., Sinclair, M. B.** (2012). Realizing optical magnetism from dielectric metamaterials. *Phys. Rev. Lett.*, 108, 097402.
- [12] **Yu, Y. F., Zhu, A. Y., Paniagua-Domínguez, R., Fu, Y. H., Luk'yanchuk, B., Kuznetsov, A. I.** (2015). High-transmission dielectric metasurface with  $2\pi$  phase control at visible wavelengths. *Laser Photonics Rev.*, 9, 412-418.
- [13] **Zhou, Z., Li, J., Su, R., Yao, B., Fang, H., Li, Zhou, L., Liu, J., Stellinga, D., Reardon, C. P., Krauss, T. F., Wang, X.** (2017). Efficient silicon metasurfaces for visible light. *ACS Photonics*, 4, 544-551.

- [14] **Decker, M., Staude, I., Falkner, M., Dominguez, J., Neshev, D. N., Brener, I., Pertsch, T., Kivshar, Y. S.** (2015). High-efficiency dielectric Huygens' surfaces. *Adv. Opt. Mater.*, 3, 813-820.
- [15] **Shalaev, M. I., Sun, J., Tsukernik, A., Pandey, A., Nikolskiy, K., Litchinitser, N. M.** (2015). High-efficiency all-dielectric metasurfaces for ultracompact beam manipulation in transmission mode. *Nano lett.*, 15, 6261-6266.
- [16] **Yu, Y. F., Zhu, A. Y., Paniagua-Domínguez, R., Fu, Y. H., Luk'yanchuk, B., Kuznetsov, A. I.** (2015). High-transmission dielectric metasurface with  $2\pi$  phase control at visible wavelengths. *Laser Photon Rev.*, 9, 412-418.
- [17] **Staude, I., Miroschnichenko, A. E., Decker, M., Fofang, N. T., Liu, S., Gonzales, E., Dominguez, J., Luk, T. S., Neshev, D. N., Brener, I., Kivshar, Y. S.** (2013). Tailoring directional scattering through magnetic and electric resonances in subwavelength silicon nanodisks. *ACS Nano*, 7, 7824-7832.
- [18] **Luk'yanchuk, B. S., Voshchinnikov, N. V., Paniagua-Domínguez, R., Kuznetsov, A. I.** (2015). Optimum forward light scattering by spherical and spheroidal dielectric nanoparticles with high refractive index. *ACS Photonics*, 2, 993-999.
- [19] **Arbabi, A., Horie, Y., Bagheri, M., Faraon, A.** (2015). Dielectric metasurfaces for complete control of phase and polarization with subwavelength spatial resolution and high transmission. *Nat. Nanotechnol.*, 10, 937.
- [20] **Khorasaninejad, M., Chen, W. T., Devlin, R. C., Oh, J., Zhu, A. Y., Capasso, F.** (2016). Metalenses at visible wavelengths: Diffraction-limited focusing and subwavelength resolution imaging. *Science*, 352, 1190-1194.
- [21] **Khorasaninejad, M., Shi, Z., Zhu, A. Y., Chen, W. T., Sanjeev, V., Zaidi, A., Capasso, F.** (2017). Achromatic metalens over 60 nm bandwidth in the visible and metalens with reverse chromatic dispersion. *Nano Lett.*, 17, 1819-1824.
- [22] **Chen, W. T., Zhu, A. Y., Sanjeev, V., Khorasaninejad, M., Shi, Z., Lee, E., Capasso, F.** (2018). A broadband achromatic metalens for focusing and imaging in the visible. *Nat. Nanotechnol.*, 13, 220-226.
- [23] **Khorasaninejad, M., Zhu, A. Y., Roques-Carmes, C., Chen, W. T., Oh, J., Mishra, I., Devlin, R. C., Capasso, F.** (2016). Polarization-insensitive metalenses at visible wavelengths. *Nano Lett.*, 16, 7229-7234.
- [24] **Han, J., Liu, J., Yao, X., Wang, Y.** (2015). Portable waveguide display system with a large field of view by integrating freeform elements and volume holograms. *Opt. Express*, 23, 3534-3549.
- [25] **Peng, H., Cheng, D., Han, J., Xu, C., Song, W., Ha, Yang, J., Hu, Q., L., Wang, Y.** (2014). Design and fabrication of a holographic head-up display with asymmetric field of view. *Appl. Opt.*, 53, H177-H185.
- [26] **Bigler, C. M., Blanche, P. A., Sarma, K.** (2018). Holographic waveguide heads-up display for longitudinal image magnification and pupil expansion. *Appl. Opt.*, 57, 2007-2013.



- [27] Draper, C. T., Bigler, C. M., Mann, M. S., Sarma, K., Blanche, P. A. (2019). Holographic waveguide head-up display with 2-D pupil expansion and longitudinal image magnification. *Appl. Opt.*, 58, A251-A257.
- [28] Aieta, F., Genevet, P., Kats, M. A., Yu, N., Blanchard, R., Gaburro, Z., Capasso, F. (2012). Aberration-free ultrathin flat lenses and axicons at telecom wavelengths based on plasmonic metasurfaces. *Nano Lett.*, 12, 4932-4936.
- [29] Forouzmmand, A., Tao, S., Jafar-Zanjani, S., Cheng, J., Salary, M. M., Mosallaei, H. (2016). Double split-loop resonators as building blocks of metasurfaces for light manipulation: bending, focusing, and flat-top generation. *J. Opt. Soc. B*, 33, 1411-1420.
- [30] Zheng, G., Mühlenbernd, H., Kenney, M., Li, G., Zentgraf, T., Zhang, S. (2015). Metasurface holograms reaching 80% efficiency. *Nat. Nanotechnol.*, 10, 308-312.
- [31] Pors, A., Albrechtsen, O., Radko, I. P., Bozhevolnyi, S. I. (2013). Gap plasmon-based metasurfaces for total control of reflected light. *Sci. Rep.*, 3, 2155.
- [32] Chen, W. T., Yang, K. Y., Wang, C. M., Huang, Y. W., Sun, G., Chiang, I. D., Liao, C. Y., Hsu, W. L., Lin, H. T., Sun, S., Zhou, L., Liu A. Q., Tsai, D. P., (2014). High-efficiency broadband meta-hologram with polarization-controlled dual images. *Nano Lett.*, 14(1), 225-230.
- [33] Cheng, J., Ansari-Oghol-Beig, D., Mosallaei, H. (2014). Wave manipulation with designer dielectric metasurfaces. *Opt. Lett.*, 39, 6285-6288.
- [34] Ozdemir, A., Hayran, Z., Takashima, Y., Kurt, H. (2017). Polarization independent high transmission large numerical aperture laser beam focusing and deflection by dielectric Huygens' metasurfaces. *Opt. Commun.*, 401, 46-53.
- [35] Arbabi, A., Horie, Y., Ball, A. J., Bagheri, M., Faraon, A. (2015). Subwavelength-thick lenses with high numerical apertures and large efficiency based on high-contrast transmitarrays. *Nat. Commun.*, 6, 7069.
- [36] Arbabi, A., Briggs, R. M., Horie, Y., Bagheri, M., Faraon, A. (2015). Efficient dielectric metasurface collimating lenses for mid-infrared quantum cascade lasers. *Opt. Express*, 23, 33310-33317.
- [37] Zhan, A., Colburn, S., Trivedi, R., Fryett, T. K., Dodson, C. M., Majumdar, A. (2016). Low-contrast dielectric metasurface optics. *ACS Photonics*, 3, 209-214.
- [38] Emani, N. K., Khaidarov, E., Paniagua-Domínguez, R., Fu, Y. H., Valuckas, V., Lu, S., Zhang, X., Tan, S. T., Demir, H. V., Kuznetsov, A. I. (2017). High-efficiency and low-loss gallium nitride dielectric metasurfaces for nanophotonics at visible wavelengths. *Appl. Phys. Lett.*, 111, 221101.
- [39] Ozer, A., Yilmaz, N., Kocer, H., Kurt, H. (2018). Polarization-insensitive beam splitters using all-dielectric phase gradient metasurfaces at visible wavelengths. *Opt. Lett.*, 43, 4350-4353.
- [40] Ozdemir, A., Yilmaz, N., Alboon, S. A., Takashima, Y., Kurt, H. (2018). Analysis of the focusing crosstalk effects of broadband all-dielectric planar

metasurface microlens arrays for ultra-compact optical device applications. *OSA Contin.*, 1, 506-520.

- [41] **Devlin, R. C., Khorasaninejad, M., Chen, W. T., Oh, J., Capasso, F.** (2016). Broadband high-efficiency dielectric metasurfaces for the visible spectrum. *Proc. Natl Acad. Sci.*, 113, 10473-10478.
- [42] **Kamali, S. M., Arbabi, A., Arbabi, E., Horie, Y., Faraon, A.** (2016). Decoupling optical function and geometrical form using conformal flexible dielectric metasurfaces. *Nat. commun.*, 7, 1-7.
- [43] **Arbabi, A., Arbabi, E., Kamali, S. M., Horie, Y., Han, S., Faraon, A.** (2016). Miniature optical planar camera based on a wide-angle metasurface doublet corrected for monochromatic aberrations. *Nat. commun.*, 7, 13682.
- [44] **Ong, J. R., Chu, H. S., Chen, V. H., Zhu, A. Y., Genevet, P.** (2017). Freestanding dielectric nanohole array metasurface for mid-infrared wavelength applications. *Opt. Lett.*, 42, 2639-2642.
- [45] **Su, X., Li, G., Yang, H., Zhao, Z., Yu, F., Chen, X.** (2017). Polarization-independent beam deflection and focusing with dielectric non-resonant metasurfaces. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 50, 345102.
- [46] **Park, S. G., Lee, K., Han, D., Ahn, J., Jeong, K. H.** (2014). Subwavelength silicon through-hole arrays as an all-dielectric broadband terahertz gradient index metamaterial. *Appl. Phys. Lett.*, 105, 091101.
- [47] **Gao, H., Hyun, J. K., Lee, M. H., Yang, J. C., Lauhon, L. J., Odom, T. W.** (2010). Broadband plasmonic microlenses based on patches of nanoholes. *Nano Lett.*, 10, 4111-4116.
- [48] **Imada, M., Noda, S., Chutinan, A., Tokuda, T., Murata, M., Sasaki, G.** (1999). Coherent two-dimensional lasing action in surface-emitting laser with triangular-lattice photonic crystal structure. *Appl. Phys. Lett.*, 75, 316-318.
- [49] **Noda, S., Yokoyama, M., Imada, M., Chutinan, A., Mochizuki, M.** (2001). Polarization mode control of two-dimensional photonic crystal laser by unit cell structure design. *Science*, 293, 1123-1125.
- [50] **Yoshida, M., Kawasaki, M., De Zoysa, M., Ishizaki, K., Hatsuda, R., Noda, S.** (2016). Fabrication of photonic crystal structures by tertiary-butyl arsine-based metal-organic vapor-phase epitaxy for photonic crystal lasers. *Appl. Phys. Express*, 9, 062702.
- [51] **High-Performance Nanophotonic Simulation Software.**  
<https://www.lumerical.com/>, 10.04.2020
- [52] **Estakhri, N. M., & Alù, A.** (2016). Wave-front transformation with gradient metasurfaces. *Phys. Rev. X*, 6, 041008.
- [53] **Zhan, A., Colburn, S., Dodson, C. M., Majumdar, A.** (2017). Metasurface freeform nanophotonics. *Sci. Rep*, 7, 1673.
- [54] **Bernet, S., Harm, W., Ritsch-Marte, M.** (2013). Demonstration of focus-tunable diffractive Moiré-lenses. *Opt. Express*, 21, 6955-6966.

- [55] **Akram, M. N.** (2003). A design study of dual-field-of-view imaging systems for the 3–5  $\mu\text{m}$  waveband utilizing focal-plane arrays. *J. Opt. A: Pure Appl.*, 5, 308.
- [56] **Peng, R., Chen, J., Zhu, C., Zhuang, S.** (2007). Design of a zoom lens without motorized optical elements. *Opt. Express*, 15, 6664-6669.
- [57] **Kamali, S. M., Arbabi, E., Arbabi, A., Horie, Y., Faraon, A.** (2016). Highly tunable elastic dielectric metasurface lenses. *Laser Photonics Rev.*, 10, 1002-1008.
- [58] **Komar, A., Paniagua-Dominguez, R., Miroshnichenko, A., Yu, Y. F., Kivshar, Y. S., Kuznetsov, A. I., Neshev, D.** (2018). Dynamic beam switching by liquid crystal tunable dielectric metasurfaces. *ACS Photonics*, 5, 1742-1748.
- [59] **She, A., Zhang, S., Shian, S., Clarke, D. R., Capasso, F.** (2018). Adaptive metalenses with simultaneous electrical control of focal length, astigmatism, and shift. *Science Advances*, 4, 9957.
- [60] **Roy, T., Zhang, S., Jung, I. W., Troccoli, M., Capasso, F., Lopez, D.** (2018). Dynamic metasurface lens based on MEMS technology. *APL Photonics*, 3, 021302.
- [61] **Arbabi, E., Arbabi, A., Kamali, S. M., Horie, Y., Faraji-Dana, M., Faraon, A.** (2018). MEMS-tunable dielectric metasurface lens. *Nat. commun.*, 9, 812.
- [62] **Shimoyama, I.** (1995). Scaling in microrobots. *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems. Human Robot Interaction and Cooperative Robots*, 2, 208–11.
- [63] **Barton, I. M., Dixit, S. N., Summers, L. J., Thompson, C. A., Avicola, K., Wilhelmsen, J.** (2000). Diffractive alvarez lens. *Opt. Lett.*, 25, 1-3.
- [64] **Lohmann, A. W., Paris, D. P.** (1967). Variable Fresnel zone pattern. *Appl. Opt.*, 6, 1567-1570.
- [65] **Bernet, S., Ritsch-Marte, M.** (2008). Adjustable refractive power from diffractive moiré elements. *Appl. Opt.*, 47, 3722-3730.
- [66] **Harm, W., Bernet, S., Ritsch-Marte, M., Harder, I., Lindlein, N.** (2015). Adjustable diffractive spiral phase plates. *Opt. Express*, 23, 413-421.
- [67] **Grewe, A., Sinzinger, S.** (2016). Efficient quantization of tunable helix phase plates. *Opt. Lett.*, 41, 4755-4758.
- [68] **Blanchard, P. M., Greenaway, A. H.** (1999). Simultaneous multiplane imaging with a distorted diffraction grating. *Appl. Opt.*, 38, 6692-6699.
- [69] **Freeman, M. H.** (1987). U.S. Patent No. 4,637,697. *Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.*
- [70] **Liu, P. Y., Shieh, H. P., Ju, J. J., Tsai, S. T., Yang, T. M., Chang, T. K., Liu, J. S.** (1998). A novel dual focus objective lens for DVD/CD pick-up head. *IEEE Trans. Magn.*, 34, 462-464.

- [71] **Doskolovich, L. L., Bezus, E. A., Morozov, A. A., Osipov, V., Wolffsohn, J. S., Chichkov, B.** (2018). Multifocal diffractive lens generating several fixed foci at different design wavelengths. *Opt. Express*, 26, 4698-4709.
- [72] **Veysi, M., Guclu, C., Boyraz, O., Capolino, F.** (2017). Reflective metasurface lens with an elongated needle-shaped focus. *J. Opt. Soc. Am. B*, 34, 374-382.
- [73] **Yang, H., Li, G., Su, X., Cao, G., Zhao, Z., Chen, X., Lu, W.** (2017). Reflective metalens with sub-diffraction-limited and multifunctional focusing. *Sci. Rep.*, 7, 12632.
- [74] **Algorri, J. F., Bennis, N., Urruchi, V., Morawiak, P., Sánchez-Pena, J. M., Jaroszewicz, L. R.** (2017). Tunable liquid crystal multifocal microlens array. *Sci. Rep.*, 7, 17318.
- [75] **Palik, E. D.**, (1999). Handbook of optical constants of solids. San Diego, USA: Academic
- [76] **Li, D., Michel, J., Hu, J., Gu, T.** (2019). Compact spectrum splitter for laterally arrayed multi-junction concentrator photovoltaic modules. *Optics letters*, 44, 3274-3277.
- [77] **Genevet, P., Yu, N., Aieta, F., Lin, J., Kats, M. A., Blanchard, R., Scully, M. O., Gaburro, Z., Capasso, F.** (2012). Ultra-thin plasmonic optical vortex plate based on phase discontinuities. *Appl. Phys Lett.*, 100, 013101.
- [78] **Barnett, A., Kirkpatrick, D., Honsberg, C., Moore, D., Wanlass, M., Emery, K., Schwartz, R., Carlson, D., Bowden, S., Aiken, D.** (2009). Very high efficiency solar cell modules. *Prog. Photovoltaics Res. Appl.*, 17, 75-83.
- [79] **Stefancich, M., Zayan, A., Chiesa, M., Rampino, S., Roncati, D., Kimerling, L., Michel, J.** (2012). Single element spectral splitting solar concentrator for multiple cells CPV system. *Opt. Express*, 20, 9004-9018.
- [80] **Xiong, K., Lu, S., Dong, J., Zhou, T., Jiang, D., Wang, R., Yang, H.** (2010). Light-splitting photovoltaic system utilizing two dual-junction solar cells. *Solar Energy*, 84, 1975-1978.
- [81] **Mitchell, B., Peharz, G., Siefer, G., Peters, M., Gandy, T., Goldschmidt, J. C., Benick, Jan., Glunz, S. W., Bett, A. W., Dimroth F.** (2011). Four-junction spectral beam-splitting photovoltaic receiver with high optical efficiency. *Prog. Photovoltaics Res. Appl.*,
- [82] **Mojiri, A., Taylor, R., Thomsen, E., Rosengarten, G.** (2013). Spectral beam splitting for efficient conversion of solar energy-A review. *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 28, 654-663.
- [83] **Farn, M. W.** (1992). Binary gratings with increased efficiency. *Appl. Opt.*, 31, 4453-4458.
- [84] **Lee, S. H., Grier, D. G.** (2005). Robustness of holographic optical traps against phase scaling errors. *Opt. Express*, 13, 7458-7465.

- [85] Wang, L., Kruk, S., Tang, H., Li, T., Kravchenko, I., Neshev, D. N., Kivshar, Y. S. (2016). Grayscale transparent metasurface holograms. *Optica*, 3, 1504-1505.
- [86] Yan, S., Li, M., Yao, B., Yu, X., Lei, M., Dan, D., Yang, Y., Min, J., Peng, T. (2015). Accelerating nondiffracting beams. *Phys. Lett. A*, 379, 983-987.
- [87] Zhao, J., Zhang, P., Deng, D., Liu, J., Gao, Y., Chremmos, I. D., Efremidis, N. K., Christodoulides, D. N., Chen, Z. (2013). Observation of self-accelerating Bessel-like optical beams along arbitrary trajectories. *Opt. Lett.*, 38, 498-500.
- [88] Chremmos, I. D., Chen, Z., Christodoulides, D. N., Efremidis, N. K. (2012). Bessel-like optical beams with arbitrary trajectories. *Opt. Lett.*, 37, 5003-5005.
- [89] Zhao, J., Chremmos, I. D., Zhang, Z., Hu, Y., Song, D., Zhang, P., Efremidis, N. K., Chen, Z. (2015). Specially shaped Bessel-like self-accelerating beams along predesigned trajectories. *Sci. Bull.*, 60, 1157-1169.
- [90] Coni, P., Hourlier, S., Gueguen, A., Servantie, X., Laluque, L. (2016). 50-3: A Full Windshield Head-Up Display using Simulated Collimation. *SID Symp. Dig. Tech. Pap.*, 47, 684-687.
- [91] Coni, P., Hourlier, S., Servantie, X., Laluque, L., Gueguen, A. (2016). A 3D head up display with simulated collimation. *SAE Technical Paper*. 2016-01-1978.
- [92] Han, J., Liu, J., Yao, X., Wang, Y. (2018). Portable waveguide display system with a large field of view by integrating freeform elements and volume holograms. *Opt. Express*, 26, 26646-26662.
- [93] Pan, C., Liu, Z., Pang, Y., Zheng, X., Cai, H., Zhang, Y., Huang, Z. (2018). Holographic waveguide heads-up display for longitudinal image magnification and pupil expansion. *Appl. Opt.*, 57, 2007-2013.
- [94] Pan, C., Liu, Z., Pang, Y., Zheng, X., Cai, H., Zhang, Y., Huang, Z. (2018). Design of a high-performance in-coupling grating using differential evolution algorithm for waveguide display. *Opt. Express*, 23, 3534-3549.
- [95] Engineer the future of optics. <https://www.zemax.com/> , 10.04.2020



## ÖZGEÇMİŞ

**Ad-Soyad** : Nazmi Yılmaz  
**Uyruğu** : T.C.  
**Doğum Tarihi ve Yeri** : 19.10.1994 – DENİZLİ / TÜRKİYE  
**E-posta** : nyilmaz@etu.edu.tr

### ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2017, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği
- **Yüksek lisans** : 2020, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği

### MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

Yıl	Yer	Görev
2017-2020	TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi	Burslu Y. Lisans Öğrencisi

**YABANCI DİL:** İngilizce, Fransızca

### TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **N. Yılmaz**, A. Ozdemir, A. Ozer, H. Kurt, “Rotationally tunable polarization-insensitive single and multifocal metasurface”. Journal of Optics, 2019
- **N. Yılmaz**, A. Ozer, A. Ozdemir, H. Kurt, “Nanohole-based phase gradient metasurfaces for light manipulation”, Journal of Physics D, 2019
- **N. Yılmaz**, Fehim T. Bagci, A. Ozer, and H. Kurt, “Accelerating beam generation via all-dielectric metasurfaces”, SPIE Optic + Optoelectronics 2019 (Oral Presentation)

## **DİĞER YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:**

- A. Ozer, **N. Yilmaz**, H. Kocer, H. Kurt, “Broadband asymmetric light transmission based on all-dielectric metasurfaces in the visible spectrum”, Journal of Optics, 2019
- A. Ozer, **N. Yilmaz**, Fehim T. Bagci, H. Kocer, and H. Kurt, “Tunable and asymmetric transmission of light in visible spectrum”, SPIE Optic + Optoelectronics 2019 (Oral Presentation)
- **N. Yilmaz**, T. Yildirim, Fehim T. Bagci, and H. Kurt, “Reflection controlling metasurfaces and solar cell applications”, SPIE Optic + Optoelectronics 2019 (Poster)
- A. Ozer, **N. Yilmaz**, H. Kocer, H. Kurt, “Polarization-insensitive beam splitters using all-dielectric phase gradient metasurfaces at visible wavelengths”, Optics Letter, 2018
- A. Ozdemir, **N. Yilmaz**, S. Alboon, Y. Takashima, H. Kurt, “Analysis of the focusing crosstalk effects of broadband all-dielectric planar metasurface microlens arrays for ultra-compact optical device applications”, Osa Continuum, 2018
- A. Ozdemir, **N. Yilmaz**, Fehim T. Bagci, Y. Takashima, H. Kurt, "Broadband polarization-independent low-crosstalk metasurface lens array-based mid wave infrared focal plane arrays" arXiv preprint arXiv:1803.05637
- **N. Yilmaz**, A. Ozdemir, Fehim T. Bagci, Y. Takashima, H. Kurt, " All-dielectric metasurface lenses for focal plane arrays operating in mid-wave infrared spectrum ", SPIE Optics & Photonics Conference, 2018, San Diego, CA. (Oral Presentation)
- **N. Yilmaz**, A. Ozer, H. Kocer, H. Kurt, " Vortex beam generation using all dielectric metasurface", SPIE Optics & Photonics Conference, 2018, San Diego, CA. (Oral Presentation)
- **N. Yilmaz**, A. Ozer, Fehim T. Bagci, Osman O. Kilic, T. Yildirim, A. Ozdemir, H. Kocer, H. Kurt, "Optical Sensing Device through Monitoring Cut-off Wavelength of Asymmetric Transmission" International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), 2018 (Oral Presentation)
- **N. Yilmaz**, Fehim T. Bagci, A. Ozdemir, Ibrahim H. Giden, A. Ozer, Y. Takashima, H. Kurt, "Tunable metasurfaces with nematic liquid crystals" SPIE Photonics Europe 2018 (Poster)
- **N. Yilmaz**, Fehim T. Bagci, C Sumer, İbrahim H. Demircioglu, B. Yilmaz, H. Kurt, "Metasurface: Multi-Element Optical System Design" International Conference on Numerical Simulation of Optoelectronic Devices (NUSOD) 2017 (Poster)