

TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FONKSİYONEL OPTİK ELEMANLAR İÇİN KOMPOZİT METAYÜZEYLER



YÜKSEK LİSANS TEZİ

Fehim Taha BAĞCI

Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Hamza KURT

Ağustos 2018

Fen Bilimleri Enstitüsü Onayı

.....
Prof. Dr. Osman EROĞUL
Müdür

Bu tezin Yüksek Lisans derecesinin tüm gereksinimlerini sağladığımı onaylarım.

.....
Prof. Dr. Tolga GİRİCİ
Anabilim dalı Başkanı

TOBB ETÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 151211025 numaralı Yüksek Lisans / Doktora Öğrencisi **Fehim Taha BAĞCI** 'nın ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "**FONKSİYONEL OPTİK ELEMANLAR İÇİN KOMPOZİT METAYÜZEYLER**" başlıklı tezi **08/08/2018** tarihinde aşağıda imzaları olan jüri tarafından kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Hamza KURT**
TOBB Ekonomive Teknoloji Üniversitesi

Eş Danışman : **Prof.Dr. Adı SOYADI**
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Hamza KURT**
TOBB Ekonomive Teknoloji Üniversitesi

Doç. Dr. Ali BOZBEY
TOBB Ekonomive Teknoloji Üniversitesi

Yard. Doç. Mirbek TURDUEV(Başkan)
TED Üniversitesi

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.

Fehim Taha BAĞCI

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

FONKSİYONEL OPTİK ELEMANLAR İÇİN KOMPOZİT METAYÜZEYLER

Fehim Taha BAĞCI

TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Hamza KURT

Tarih: Ağustos 2018

Işığın dalga cephesi manipülasyonu ile genliğinin, polarizasyonunun ve davranışının kontrol edilebileceği bilinmektedir. Günümüzde bu manipülasyonu yapabilen optik elemanlar bulunmaktadır. Bu optik elemanlar geleneksel optik elemanlar olan lensler, aynalar ve optik filtreler gibi optik malzemelerdir. Hacimli ve düz olmayan yapıları itibariyle ışığı yüzey formları sayesinde manipüle ederler. Bu manipülasyon optik malzemelerin yüzey formlarının şekillendirilmesi, kalınlıklarının değiştirilmesi veya yüzeylerine yarıklar açılması ile gerçekleştirilir. Bunun yanında genel olarak ışığın yapı içinde ilerlediği yolun uzunluğu, sistemin çalışma dalga boyundan oldukça fazladır. Bu da kullanılabilir malzemeleri ve üretim süreçlerini limitlemektedir. Üretim süreçleri kesme, taşlama ve parlatma gibi işlemleri içermektedir. Geleneksel optik elemanların sistem haline getirmek için ise sıkı toleranslar ile hizalanması ve tutulması gerekmektedir. Bununla birlikte gelişen giyilebilir, taşınabilir, mobil elektronik ve medikal cihazlar, yer kaplamayan, ucuz ve yüksek performanslı optik sistemlere olan talebi hızla artırmıştır. Yüksek performanslı optik sistemlere olan ihtiyaç ve geleneksel optikteki bu gibi üretim, hacim ve malzeme sorunları yakın geçmişte bu alandaki

araştırmaların hızlanmasını ve metayüzeylerin geliştirilmesini tetiklemiştir. Metayüzeyler üzerlerinde bulunan, belirli bir geometrik yapı ve dizilim örgüsüne sahip birim hücre dizisi sayesinde ışığa faz gecikmesi verebilen düz optik yüzeylerdir. Bu tez kapsamında metayüzeylerin farklı tasarım yaklaşımları anlatılarak, çeşitli metayüzey tasarım topolojileri karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma ile en verimli olan topoloji belirlenmiştir. Ayrıca metayüzeyler kullanılarak çeşitli uygulamaya yönelik tasarımlar önerilmiştir. Bunlardan biri üç odaklı bir optik sistemdir. 600nm dalga boyunda çalışan bu optik sistem ile metalenslerin birbirine olan mesafeleri değiştirilerek üç farklı odak uzaklığı elde edilmiştir. Son olarak orta kızıl ötesi spektrumda çalışan bir odak düzlemi dizisi metayüzeyler kullanılarak gerçeklenmiştir. Bu alışma ile polarizasyon bağımsız olarak geniş dalga spektrumunda çalışan ve üstün optical crosstalka sahip bir odak düzlemi dizisi sunulmuştur. Bu odak düzlemi dizisinin verimliliği 0.85 üzerinde elde edilmiştir. Bu tasarımda, odak performansını 0.85'in üzerinde tutulurken, optical crosstalk %2.8'in altında kalmıştır. Bu alışma metayüzey lens dizisi hassaslığı ve sinyal gürültü oranını artırmak için büyük potansiyele sahip olduğunu göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Metayüzeyler, Metalensler, Odak düzlemi dizileri.

ABSTRACT

Master of Science

COMPOSITE METASURFACES FOR FUNCTIONAL OPTICAL ELEMENTS

Fehim Taha BAĞCI

TOBB University of Economics and Technology

Institute of Natural and Applied Sciences

Electrical and Electronical Engineering Science Programme

Supervisor: Title. Prof. Dr. Hamza KURT

Date: August 2018

It is known that the amplitude, polarization and behavior of the light can be controlled through wavefront manipulation. Currently, there are optical elements that can achieve such a manipulation. These optical elements are conventional optical components such as lenses, mirrors and optical filters. Due to their bulky and uneven structures, they manipulate light with their surface forms. This manipulation is accomplished by shaping the surface forms of the optical materials, changing their thickness or opening slits on their surfaces. However, in general, the length of the path the light travels in the structure is considerably larger than the operating wavelength of the system. This severely limits the range of materials that can be employed and also complicates the fabrication processes, which include cutting, grinding and polishing. In addition, conventional optical elements need to be aligned and retained with tight tolerances. Together with this, wearable, portable, mobile electronic and medical devices have rapidly increased demand for low-cost, high-performance optical systems that are compact in size. The need for high-performance optical systems and such production, volume and material problems in traditional optics has recently triggered the acceleration of research in this area and the development of metasurfaces. The metasurfaces are flat optic surfaces that can control the phase of the light by their nano-

pillar array with a certain array of patterns. In this thesis, different design approaches of metasurface are explained and various metasurface design topologies are compared. With this comparison, the most efficient topology has been identified. In addition, various application designs are proposed by using metasurfaces. One of these is a three-focus optical system. With this optical system operating at a wavelength of 600nm, the distances between the metalenses are changed to achieve three different focal lengths. Finally, a focal plane array operating in the mid-infrared spectrum is implemented using metasurfaces. This paper presents a polarization independent focal plane array operating in wideband spectrum with superior optical crosstalk. The efficiency of this focal plane array was obtained above 0.85. In this design, focusing efficiency is above 85% while optical crosstalk is below 2.8%. This study has shown that meta-lens array has great potential to increase the sensitivity and the signal-to-noise ratio.

Keywords: Metasurfaces, Metalenses, Focal plane arrays

TEŞEKKÜR

Çalıőmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren hocam Hamza KURT'a, kıymetli tecrübelerinden faydalandığım TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerine ve destekleriyle her zaman yanımda olan aileme ve arkadaşlarıma çok teşekkür ederim. Ayrıca öğretim sürecim boyunca araştırma bursu sağladığı için TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi'ne teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
TEZ BİLDİRİMİ	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİL LİSTESİ	x
ÇİZELGE LİSTESİ	xii
KISALTMALAR	xiii
SEMBOL LİSTESİ	xiv
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı	2
1.2 Literatür Araştırması	2
1.3 Teorik Çalışmalar	6
2. METAYÜZEYLERİN TASARIM METODLARI VE ANALİTİK YAKLAŞIMLAR	9
2.1 Amaç	9
2.2 Faz Profiline Dayalı FDTD Tabanlı Metalens Tasarım Yaklaşımı	9
2.3 Işın Analizi ve FDTD Tabanlı Metalens Tasarım Yaklaşımı	17
2.4 Sonuç	22
3. METALENS UYGULAMA ALANLARINA YÖNELİK TASARIMLAR	23
3.1 Metayüzey: Çok Elemanlı Optik Sistem Tasarımı	23
3.1.1 Giriş.....	23
3.1.2 Tasarım yaklaşımı	23
3.1.3 Sonuç	27
3.2 Geniş Bant Polarizasyon Bağımsız Düşük Gürültülü Metayüzey Lens Dizisi KOS ODD	27
3.2.1 Giriş.....	27
3.2.2 Tasarım yaklaşımı	30
3.2.3 Gelecek çalışmalar	32
3.2.4 Sonuç	34
4. SONUÇ VE ÖNERİLER	35
KAYNAKLAR	37
ÖZGEÇMİŞ	43

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

- Şekil 1.1 : (a) İlerleyen düzlem dalga üzerinde görülen noktasal ışık kaynakları (b) Metayüzey ara yüzüne çarpan düzlem dalganın içindeki noktasal ışık kaynaklarına, metayüzey sayesinde faz gecikmesi verilmiştir..... 4
- Şekil 1.2 : Çeşitli Metayüzey Topolojileri: (a)-(c) Rezonans tabanlı metayüzeyler, (d)-(g) sırasında gösterilen metayüzey topolojileri, PB tabanlı metayüzeyler, (h)-(k) hem rezonans, hem PB tabanlı metayüzeyler gösterilmiştir..... 6
- Şekil 2.1 : (a) Nano kule çapı ve dalga boyu değişimine göre faz profili grafiği; (b) Nano kule çapı ve dalga boyu değişimine göre geçirgenlik grafiği. 11
- Şekil 2.2 : Karesel, Dairesel ve Hekzagonal örgü ile dizilmiş metayüzey şematik görseli; 12
- Şekil 2.3 : Karesel, dairesele ve hekzagonal örgülerin farklı dalga boylarındaki odaklanma sonuçları sırasıyla kırmızı ($\lambda=466\text{nm}$) renk dalga boyu için (a) karesel örgü, (b) dairesele örgü ve (c) hekzagonal örgü; yeşil ($\lambda=566\text{nm}$) renk dalga boyu için (d) karesel örgü, (e) dairesele örgü ve (f) hekzagonal örgü; mavi ($\lambda=666\text{nm}$) renk dalga boyu için (g) karesel örgü, (h) dairesele örgü ve (i) hekzagonal örgü..... 13
- Şekil 2.4 : Karesel, dairesele ve hekzagonal örgülerin farklı dalga boylarındaki odaklanmalarının X-Ekseni üzerindeki kesit görüntüsü ve YDG grafikleri (a) kırmızı (466nm) dalga boyu için karesel, dairesele ve hekzagonal örgülerin odaklanma grafikleri; (b) yeşil (566nm) dalga boyu için karesel, dairesele ve hekzagonal örgülerin odaklanma grafikleri; (c) mavi(666nm) dalga boyu için karesel, dairesele ve hekzagonal örgülerin odaklanma grafikleri 14
- Şekil 2.5 : Karesel, dairesele ve hekzagonal örgülerin farklı dalga boylarındaki odaklanmalarının Z-Ekseni üzerindeki kesit görüntüsü, f ve OD değerleri (a) Karesel örgü için 466nm, 566nm ve 666nm için odak uzaklığı ve odak derinliği; (b) Dairesel örgü için 466nm, 566nm ve 666nm için odak uzaklığı ve odak derinliği; (c) Hekzagonal örgü için 466nm, 566nm ve 666nm için odak uzaklığı ve odak derinliği grafikleri..... 15
- Şekil 2.6 : Karesel, dairesele ve hekzagonal örgülerin dalga boyuna göre odak verimlilikleri ($\lambda_d = 600\text{nm}$) :..... 16
- Şekil 2.7 : Zemax’da tasarlanan 2 yüzeyi düz kırınımdayıcı olan optik layout görseli 19
- Şekil 2.8 : Zemax’da optimize edilmiş çift yüzeyi KOE olan tasarım Spot Diyagramı 19
- Şekil 2.9 : Zemax’da optimize edilmiş çift yüzeyi KOE olan tasarım MTF grafiği.. 20
- Şekil 2.10 : Tek bir nano kuleye sahip nano hücreye ait geçirgenlik ve faz kapsaması grafiği..... 21
- Şekil 2.11 : Lumerical Spot diyagram..... 21

Şekil 3.1 : Zemax Zoom Üç Konfigürasyon	25
Şekil 3.2 : Üç farklı metalensin faz profilleri	25
Şekil 3.3 : Meta Zoom Lens şematik görünüm	26
Şekil 3.4 : Lens Hareketlerine göre farklı konfigürasyonlar ve onlara ait spot diyagramları a) $f=20 \mu\text{m}$, b) $f=25 \mu\text{m}$, c) $f=25 \mu\text{m}$	26
Şekil 3.5 : (a) Küresel kırılma tipli mikro lens dizisi şematığı [58], (b) KOE kullanılarak tasarlanmış InSb KOS ODD şematığı [59] (c) Mesa izolasyon yöntemi ile tasarlanmış bir lens dizisi [57].	29
Şekil 3.6 : (a) Safir alt taşın üzerine kare örgü yapısı ile yerleştirilmiş ($H=1.92 \mu\text{m}$, $P=1.50 \mu\text{m}$) silikon dizisi ile MY'in yapısı. (b) İletim yoğunluğu ve (c) faz, periyod ve Si postların çapına göre (d) $\lambda=3.2 \mu\text{m}$ dalgaboyu ve $P=1.50$ μm periyoda karşılık farklı çaplarda Si postların faz ve iletim grafiği	31
Şekil 3.7 : 3x3 metalens dizisini odak düzlemleri (a) $3.2 \mu\text{m}$ ve (b) $4 \mu\text{m}$ dalga boyu ile tasarlanmış dizinin odak düzlemleri (c) ve (d) odak düzlemlerinin üsten ve 3D görüşü	31
Şekil 3.8 : 8x8 Metalens Dizisi	33
Şekil 3.9 : (a) ve (b) odak düzlemlerinin üsten ve 3B görünüşü (c) $3.2 \mu\text{m}$ dalga boyu ile tasarlanmış dizinin odak düzlemleri	33

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Faz Profiline Dayalı FDTD Tabanlı Metalens Tasarım Yaklaşımı için Metalens optik gereklilikleri.....	9
Çizelge 2.2 : Işın Analizi ve FDTD Tabanlı Metalens Tasarım Yaklaşımı için Metalens optik gereklilikleri.....	18
Çizelge 2.3 : Kırınımlayıcı yüzey katsayıları.....	20
Çizelge 3.1 : Zoom Triplet Metalens Optik Gereklilikleri.....	24



KISALTMALAR

AKB	: Atomik Katman Birikimi
BÖ	: Başarım Ölçüsü
CMOS	: Complimentary Metal-Oxide Semiconductor
FDTD	: Finite Difference Time Domain
KOE	: Kırınımlayıcı Optik Eleman
KOS	: Kızılötesi Spektrum
MY	: Metayüzey
NA	: Nümerik Açıklık
OA	: Optik Açıklık
OD	: Odak Derinliği
ODD	: Odak Düzlemi Dizileri
ÖK	: Örgü Katsayısı
PB	: Pancharatnam Berry
PSF	: Point Spread Function
TiO₂	: Titanyum Dioksit
SiO₂	: Silikon Dioksit
YDG	: Yarı Doruk Genişliği

SEMBOL LİSTESİ

Bu çalışmada kullanılmış olan simgeler açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
θ_t	Arayüzden iletilen dalga vektörünün x-y düzlemi üzerindeki izdüşümü ile arasındaki açı
θ_i	Arayüze gelen dalga vektörünün x-y düzlemi üzerindeki izdüşümü ile arasındaki açı
θ_r	Arayüzden yansıyan dalga vektörünün x-y düzlemi üzerindeki izdüşümü ile arasındaki açı
φ_t	İletilen dalga vektörünün x-y düzlemi üzerindeki izdüşümü ile y eksenindeki açı
φ_r	Yansıyan dalga vektörünün x-y düzlemi üzerindeki izdüşümü ile y eksenindeki açı
n_t	Işığın kırıldığı ortamın kırılma indisi
n_i	Işığın geldiği ortamın kırılma indisi
λ	Işığın dalgaboyu
λ_0	Belirli bir ortamdaki ışığın dalgaboyu
ϕ	Faz gecikmesi
π	Pi sayısı
x	x koordinat eksenini
y	y koordinat eksenini
z	z koordinat eksenini
ρ	radial koordinat eksenini
R	Metayüzey çapı
n	Kırınımlayıcı yüzey katsayıları miktarı
a_n	Kırınımlayıcı yüzey katsayıları
$\varphi(x,y)$	x,y bağımlı faz profili
f	Odak uzaklığı

1. GİRİŞ

Işığın(ışının) havada ilerleyişi ve davranışı dalga cephesi (ön yüzü) manipülasyonu ile kontrol edilebilmektedir. Işığın dalga ön yüzüne müdahale ederek kontrol edebilen optik cihazların ise yüksek geçirgen veya yansıtıcı özelliğine sahip olması gerekmektedir. Optik cihazlarda bu kontrolün gerçekleşmesi için gelen ışığa göre yansıyan veya iletilen ışının en az $0 - \pi$ 'lik bir faz kaymasını kapsaması gerekir. Geleneksel optik elemanlar, lensler, filtreler ve ışık modülatörleri, yapıları itibariyle hacimlidir ve faz kaymasını yüzey formları sayesinde gerçekleştirirler. Diğer bir deyişle, geleneksel dalga önyüzü manipülasyonu optik elemanın yüzey şekli ve kalınlığının değiştirilmesi ile sağlanır. Bunun yanında genel olarak ışığın yapı içinde ilerlediği yolun uzunluğu, sistemin çalışma dalga boyundan oldukça fazladır. Bu da kullanılabilir malzemeleri ve üretim süreçlerini limitlemektedir. Bu gibi optik sistemlerde optik elemanlar kesme taşıma ve parlatma gibi geleneksel metotlarla üretilir. Optik sistem hacmine sığdırılması gereken elemanların sıkı toleranslar ile hizalanması ve tutulması gerekmektedir. Bununla birlikte gelişen giyilebilir, taşınabilir, mobil elektronik ve medikal cihazlar, yer kaplamayan, ucuz ve yüksek performanslı optik sistemlere olan talebi hızla artırmıştır. Yüksek performanslı optik sistemlere olan ihtiyaç ve geleneksel optikteki bu gibi üretim, hacim ve malzeme sorunları yakın geçmişte bu alandaki araştırmaların hızlanmasını ve metayüzeylerin geliştirilmesini tetiklemiştir. Metayüzeyler üzerlerinde bulunan, belirli bir dizilim örgüsüne sahip nano kule dizisi sayesinde ışığa faz gecikmesi verebilen düz optik yüzeylerdir. Son zamanlardaki ilerlemeler ile metayüzeylerin kolay üretim süreçlerine sahip olmaları, düşük kayıplı olmaları ve düşük footprinte sahip olmaları sebebiyle, geleneksel optiğe ve kırınımlayıcı optik yapılara alternatif olarak kullanılabildiği gösterilmiştir [1].

Metalensler düz yüzeye sahip ve çok ince yapılı optik elemanlar olmasına rağmen, ışığın fazını, yoğunluğunu ve polarizasyonunu manipüle etme konusunda oldukça iyidirler. Bu nedenle, geleneksel optik ile yapılan hologramlar, ışın doğrultucular ve polarizörler gibi çoğu optik senaryo metayüzeyler ile de gerçekleştirilebilmektedir.

Metayüzeylerin bilinen en basit modellemesi olan faz kontrolü ve dalga önyüzü manipülasyonu, metayüzeylerin içinde bulunan nano saçıcıların periyotlarının ve geometrik boyutlarının ayarlanması ile gerçekleşir.

1.1 Tezin Amacı

Bu tez, metayüzeylerin ne tür yapılar olduğu konusunu, çalışma prensiplerini, tasarım süreçlerini, hangi nümerik metotların kullanıldığını ve çeşitli uygulama alanlarını içermektedir.

1.2 Literatür Araştırması

Metayüzeyler elektro-manyetik dalgaların fazını çeşitli yöntemler ile kontrol edebilmektedir. Bunlardan biri dinamik faz kontrolü diğeri geometrik faz kontrolü olarak bilinir. Dinamik faz kontrolü, metayüzeylerin üzerine işlenen nano kuleler ile gerçekleştirilir. Burada nano kulelerin yüksekliği, genişliği ve geometrik yapısı değiştirilerek faz kontrolü sağlanır. Dinamik faz kontrollü metayüzeyler dairesel polarizasyon hassasiyeti gereken uygulamalarda kullanılamaz. Polarizasyon hassasiyeti olmayan uygulamalar için daha uygundur. Bunun nedeni nano saçıcıların tüm konumlarda aynı yapıya sahip olmalarıdır. Bunun yanında polarizasyon hassasiyeti olması istenilen uygulamalarda geometrik faz kontrollü metayüzeyler kullanılmalıdır. Geometrik fazlı metayüzeylerde bulunan nano saçıcılar her konumda aynı kalınlık ve yükseklikindedir. Buna karşın polarizasyon hassasiyeti sağlamak için konuma göre birbirlerine göre açıları değişiklik göstermektedir. Bu sayede nano saçıcıların konuma bağlı değişen açı değerleri ile faz gecikmesi aynı zamanda polarizasyon hassasiyeti sağlanır. Bu tekniğe aynı zamanda Pancharatnam-Berry (PB) faz manipülasyonu da denir. [2-4]

Metayüzeyler üzerine yapılan çalışmaların artmasıyla, dalga önyüzü manipülasyonu alanında birçok yeni araştırma konusu da gelişmeye başlamıştır. Bu alanda yapılan araştırmalar ilk olarak metal dielektrik yapılar (plazmonik metayüzeyler) üzerine odaklanmıştır. Plazmonik metayüzeyler, yapıları gereği ışınım yapmayan Ohmik kayıpları sebebiyle geçirgen modunda bile düşük kazanç sahiptirler. [5,6]. Bunun yanında dalga önyüzü manipülasyonunda yüksek kazanç sağlamak için metal-yalıtkan kombinasyonu denenmesine rağmen bu yapılar sadece yansıtıcı modunda yüksek kazanç gösterebilmiştir [7,8]. Metalik yapıların bu dezavantajları nedeniyle,

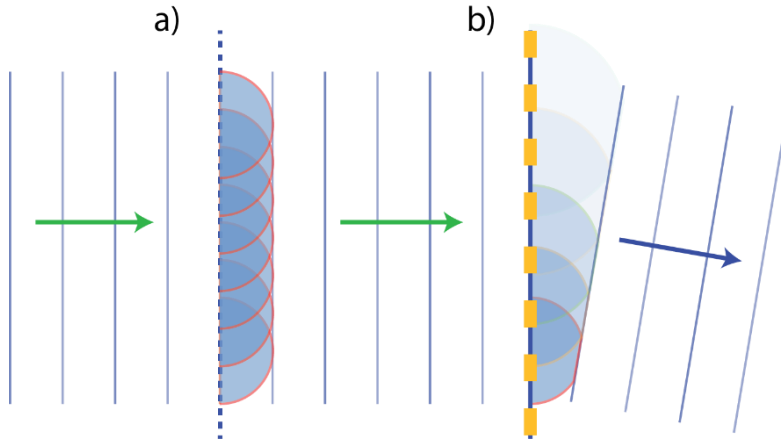
araştırmacılar tamamı dielektrik olan yapılar üzerine çalışmaya ağırlık vermişlerdir. Birçok dielektrik yapının optik frekanslarda dūřuk kayıplara sahip olması da bu yönelimi tetiklemiştir. Geçirgen modunda empedans eşlemesine izin verdiği için dielektrik metayüzeyler yüksek verim göstermektedir. İlk başlarda çalışılan dielektrik metayüzeyler genellikle yüksek kırıcılık indisli malzemeler ile gerçekleştirilmiştir. Bu yüksek kırılma indisli malzemeler metayüzeylerin güçlü bir Mie-Type saçılımlı yapmasına sebep olmuştur. Elektrik ve manyetik dipollerin bu saılımlarının toplamıyla, dūřuk en-boy oranlı silikon nano kuleler sayesinde araştırmacılar polarizasyon bağımlılığı olmayan, $0-2\pi$ faz kapsamasını gerçekleştiren ve yüksek geçirgenlik verimi olan tasarımlar ortaya koymuştur [9-12]. Mie-tipi saçılımlı ile elde edilen bu başarının yanı sıra, bu mekanizmaya bağlı metayüzeylerin geniş bantta çalışmadığı gözlemlenmiştir. Geniř bantta da yüksek verim elde edilmesi için dielektrik metayzeylerde dalga kılavuzu tabanlı yüksek en-boy oranlı nano kuleler kullanılmıştır[13,14]. Yapılan bu araştırmalar neticesinde yakın kızılötesi dalgaboyu bölgesinde, $0-2\pi$ 'lik faz kapsaması ve geniş bantta yüksek geçirgenlik elde edilen yapıların dalga kılavuzu tabanlı dielektrik metayüzeyler olduğu ortaya konulmuştur. Bu yapıların görünür dalga boyunda da çalışması için araştırmacılar titanyum dioksit, silikon nitrat (Si_3N_4) and kristal silikon (c-silikon) malzemeli kuleler kullanmıştır ve güzel sonuçlar elde etmişlerdir[15].

Geleneksel optik elemanlarda ışık, kırıcılığa sahip malzemelerin içerisinden geçirilerek, kademeli faz geciktirmesi ile kontrol edilir [16,17]. Kırınımlayıcı Optik elemanlarda (KOE) ışığın kontrolü ise, kademeli faz geciktirmesinin yanında dalgaboyu altı boyutlarda optik antenler yardımıyla yerel faz kaydırması ile yapılır. KOE ve sonrasında aynı prensiple geliştirilen düz yüzeyli optik elemanlar, öncelikle, dalgaboyu altı metalik parçalar ile yerel olarak ışığın faz hızının yavaşlatılmasıyla; takiben ışığın dalga boyundan küçük ızgara yapılar ile faz manipülasyonu yapılarak gerçeklenmiştir [18,19]. Daha sonra yüksek kontrastlı dielektrik yapılar, ultra-ince optik eleman geliştirme çalışmalarına öncülük etmiştir. Yapıların içerisinde bulunan ızgara veya kule yapıların sıklıkları ve malzeme kombinasyonları ile oynanarak, alışılmadık özellikte optik yapılar elde edildiği grlmştir. Bu tarz dalgaboyu altı ölçekte kırınımlayıcı özelliği olan bir yapı tasarlamak için nano yapıların uzaysal düzlemde dağılımını ayarlamak gerekmektedir. Bu yöntemle yüksek kırınımlayıcı açılarda ve yakın kızılötesi bölgede %80 den fazla verimlilik elde eden çalışmalar vardır [20,21]. Dielektrik dizilerin, görünür dalgaboyunda sunduğu avantajların

paralelinde, metalik dalgaboyu altı yansıtıcı ve geçirgen yapılar ile mikrodalga uygulamalarında da önemli gelişmeler kat edilmiştir [22-25].

Bu gelişmelerin ardından optik dalga boylarında çalışan ultra ince optik ara yüzeyler geliştirilmiştir. [26-37]. Metayüzeyler olarak adlandırılan bu optik elemanlar, belli desen ve dizilime sahip saçıcı özellikte olan, dalgaboyu altı ölçekteki birimsaçıcılar ile ışığın fazını, polarizasyonunu, genliğini ve dispersiyonunu kontrol edebilmektedir. Tasarım ve üretim süreçlerinin geleneksel yöntemlere göre kolay olması ve yüksek verimliliğe sahip olmaları nedeniyle metayüzey tasarımlar geçtiğimiz yıllarda hızla yaygınlaşmıştır.

Klasik Huygens yapısına göre dalga cephesi üzerindeki her nokta, ikincil dalga cephesini oluşturan noktasal ışık kaynağı gibi davranır [38]. Yeni dalga cephesi önceki dalga cephesinin noktasal kaynaklarının tepe noktalarının ikincil dalgacık ile kesiştiği yerlerin birleşmesiyle bulunur (Şekil 1.1 a)[39]. Metayüzeylerde de ikincil dalgalar bu yol ile istenilen dalga cephesine ve faza göre bulunur. Metayüzeyleri şekil 1.1 (b) de görüldüğü gibi ara yüzeye kontrol edilebilir açıda tasarlamak mümkündür. Arayüzeyden iletilen dalgaların faz eğimini Fermat prensibinin genelleştirilmiş iletim denklemlerine göre hesap etmek mümkündür (Denklem 1.1) [39]. Aynı şekilde yansıyan ışınlar içinde formülü genellemek mümkündür (Denklem 1.2) [39].

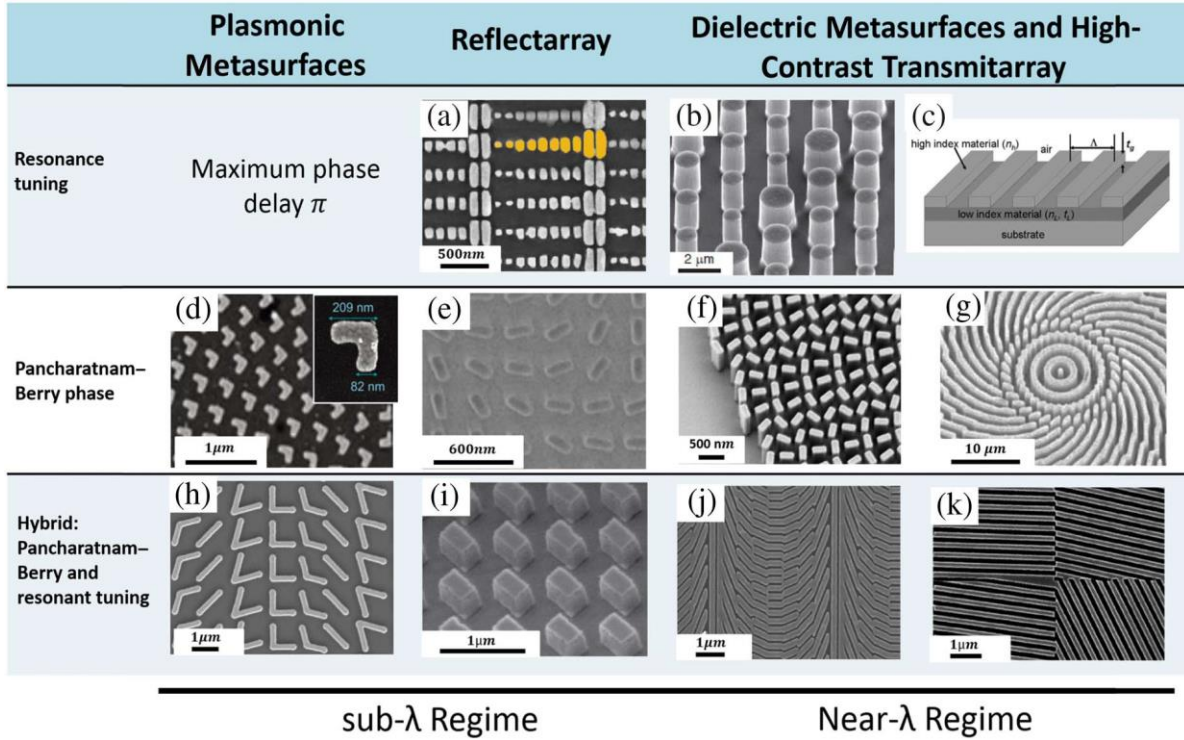


Şekil 1.1 : (a) İlerleyen düzlem dalga üzerinde görülen noktasal ışık kaynakları (b) Metayüzey ara yüzüne çarpan düzlem dalganın içindeki noktasal ışık kaynaklarına, metayüzey sayesinde faz gecikmesi verilmiştir.

$$\begin{cases} \cos \theta_t \sin \varphi_t = \frac{\lambda_0}{2\pi \cdot n_i} \frac{\partial \phi}{\partial x} , \\ n_t \sin \theta_t - n_i \sin \theta_i = \frac{\lambda_0}{2\pi} \frac{\partial \phi}{\partial z} , \end{cases} \quad (1.1)$$

$$\begin{cases} \cos \theta_r \sin \varphi_r = \frac{\lambda_0}{2\pi \cdot n_i} \frac{\partial \phi}{\partial x} , \\ \sin \theta_r - \sin \theta_i = \frac{\lambda_0}{2\pi \cdot n_i} \frac{\partial \phi}{\partial z} , \end{cases} \quad (1.2)$$

Burada n_i ve n_t sırasıyla ışığın geldiği ve kırıldığı ortamın kırılma indislerini, λ_0 ışığın ortamdaki dalga boyunu, $\theta_{r,t}$ yansıyan/kırılan dalga vektörünün x-y düzlemindeki izdüşümü ile yaptığı açığı, $\varphi_{r,t}$ yansıyan/kırılan dalga vektörünün x-y düzlemi üzerindeki izdüşümü ile y ekseninde yaptığı açığı göstermektedir. Denklemlerde görüleceği gibi faz katsayısı 0 olduğunda ara yüze giren dalga ve iletine dalga birbirlerine paralel olmaktadır ($\frac{\partial \phi}{\partial x}, \frac{\partial \phi}{\partial z} = 0$). Faz katsayısı 0'dan farklı olduğu takdirde ise rayüze giren dalga ve iletine dalga birbirlerine paralel olmamaktadır ($\frac{\partial \phi}{\partial x}, \frac{\partial \phi}{\partial z} \neq 0$). Buda denklemdaki arayüzey faz katsayısının değiştirilmesi ile ışığa istenilen manipülasyonun verilebileceğini göstermektedir. Bu denklemler kullanılarak metayüzeylerin istenilen açıda faz eğilimi vermesi sağlanabilir. Bu genelleştirilmiş dalga denklemleri prensipleri ile çeşitli amaçlara yönelik metayüzey tasarımları geçtiğimiz yıllarda ortaya konulmuştur. Bunlardan bazıları Şekil 1.2'de gösterilmiştir[39]. Şekil 1.2 de çeşitli metayüzey mekanizmaları sınıflandırılmıştır. Şekil 1.2 de gösterilen farklı metayüzey tasarım çözümleri kullanılarak istenilen faz ve polarizasyonda optik eleman tasarlamak mümkündür. Şekil 1.2 ye göre (a)-(c) sırasında sunulan nano yapılar, her bir rezonatörün geometrisinin değiştirilmesi ile elde edilmiştir. Rezonans tabanlı metayüzeyler, TE ve TM modlarını kullanarak 2π 'lik faz kavramasını başarabilmektedir. Burada faz gecikmesi dielektrik malzemenin ayarlanması ile sağlanır (a) [32], (b) [40], (c) [41]. (d)-(g) sırasında gösterilen metayüzey topolojileri, PB tabanlı metayüzeyler olup, geçirgen ve yansıtıcı olarak oldukça yüksek saçılma verimliliğine sahiptir. Bunun yanında, bu metayüzey topolojileri dairesel ve eliptik polarizasyona duyarlı olacak şekilde adreslenmelidir (d) [7], (e) [42], (f) [43], (g) [28]. (h)-(k) hem rezonans, hem PB tabanlı metayüzeyler de gösterilmiştir (h) [2], (i) [8], (j) [44], (k) [34].



Şekil 1.2 : Çeşitli Metayüzey Topolojileri: (a)-(c) Rezonans tabanlı metayüzeyler, (d)-(g) sırasında gösterilen metayüzey topolojileri, PB tabanlı metayüzeyler, (h)-(k) hem rezonans, hem PB tabanlı metayüzeyler gösterilmiştir.

Burada önemli olan istenilen optik elemanın fonksiyona göre doğru metayüzey topolojisini seçmektir. Geleneksel optikte kullanılan çoğu optik eleman metayüzeyler ile de gerçekleştirilebilmektedir

1.3 Teorik Çalışmalar

Geleneksel optikte lensler neredeyse her optik sistemde yaygın olarak kullanılan elemanlardır. Yüksek nümerik açıklığa sahip lensler, yüksek kalitede ve dalgaboyu altı görüntü çözünürlüğü görüntü sunabilmektedir. Bunların yanında bu lensler pahalı ve hacimsel olarak büyüktür. Bu dezavantajları yüksek verimlilikte düz lenslerin geliştirilmesini motive etmiştir. Geliştirilen bu düz lenslere metalens adı verilmiştir. Metalensler, metayüzeylerden oluşan yapılar olduğu için doğası gereği dalgaboyu altı saçılım mekanizması ile çalışmaktadır. Düz lensleri gerçeklemek için, metayüzeylerin, düz gelen dalgaları küresel hale getirecek bir faz profiline ihtiyaçları vardır. Bu sayede f odak uzaklığına sahip kırıcı bir optik eleman haline gelecektir. Bu faz profili x,y

konumuna bağı olarak ayarlanacağı için Denklem 1.3' deki formül ile faz değeri hesap edilebilir.

$$\varphi(x, y) = \frac{2\pi}{\lambda} (f - \sqrt{x^2 + y^2 + f^2}) \quad (1.3)$$

Burada f lensin odak uzaklığını, λ çalışma dalgaboyunu, x ve y de konum bilgisini vermektedir. Hesap edilen f odak uzaklıklı faz profili birim hücre dizilerinin sağladığı faz gecikmesi ile elde edilir. Yapılan tasarımlarda tüm dielektrik metayüzey yapısı kullanılarak birim hücre faz gecikmeleri kulelerin yükseklikleri sabit tutulup çaplarının değiştirilmesiyle sağlandı. Kulelerin kalınlıkları ilgili x,y koordinatına göre hesaplanan fazı sağlayacak şekilde seçilir. Kulelerin yükseklik, materyal gibi diğer parametreleri de yüksek verimlilik ve 0-2 π faz geçişini sağlayacak şekilde ayarlanır. Tüm dielektrik metalens yapılarında genel olarak kulelerin yüksekliği çeşitlendiğinde üretimi çok zorlaştığı için sabit tutulur.

Metalens tasarımlarında önemli parametrelerden biri de alt taş ve nano kule malzeme seçimidir. Malzeme seçimi çalışma dalgaboyunu etkilemektedir. Genelde yüksek verimlilik sağlayan metalens tasarımlarının çalışma dalga boyu IR bölgede sınırlı kalmaktadır [40,41]. Metalenslerin görünür dalgaboyunda çalışması için yeni malzeme ve üretim tekniklerinin geliştirilmesi gerekmiştir. Bunun üzerine yakın zamanda, atomik katman birikimi (AKB, Atomic Layer Deposition ALD) yöntemi ile büyütülen titanyum dioksit TiO₂ malzemesi kullanılarak görünür dalgaboyunda da yüksek verimlilik elde edilen çalışmalar ortaya konulmuştur [43]. TiO₂ malzemesi görünür dalgaboyunda yüksek kırılma indisine ve düşük emilime sahip olması sebebiyle bu çalışmalarda tercih edilmiştir. AKB ile üretilen TiO₂ malzemesi aynı zamanda düşük yüzey pürüzlülüğüne sahip olması başka bir avantajıdır. Bu karakteristik özelliklerinden dolayı kullanılan TiO₂ tabanlı metalens yapılarının görünür dalgaboyu aralığında yüksek verime sahip olduğu görülmüştür.

Bu tez kapsamında yüksek geçirgenlik ve verimliliği olan metayüzeyler ile metalens tasarımı ve uygulamaları gerçekleştirilmiştir.



2. METAYÜZEYLERİN TASARIM METODLARI VE ANALİTİK YAKLAŞIMLAR

2.1 Amaç

Literatürde metayüzey tasarım süreçleri, farklı metayüzey topolojileri ve uygulama alanlarına yönelik tasarım çalışmaları ile ilgili çalışmalar vardır. Bu çalışmaların çoğunda tasarım adımları ile ilgili detaylar verilmemektedir. Ayrıca literatürde çeşitli uygulama alanlarına yönelik tasarımlar için henüz ortaya konulmamış birçok sistem modeli mevcuttur, ör; metalens objektif tasarımları ve metayüzey lens dizisi. Bu tezde, metayüzeylerin çeşitli tasarım metotları detaylandırılarak farklı metayüzey topolojilerinin karşılaştırılması, çeşitli uygulama alanlarına yönelik sistemlerin tasarım süreçlerinin aktarılması ve değerlendirilmesi amaçlanmıştır.

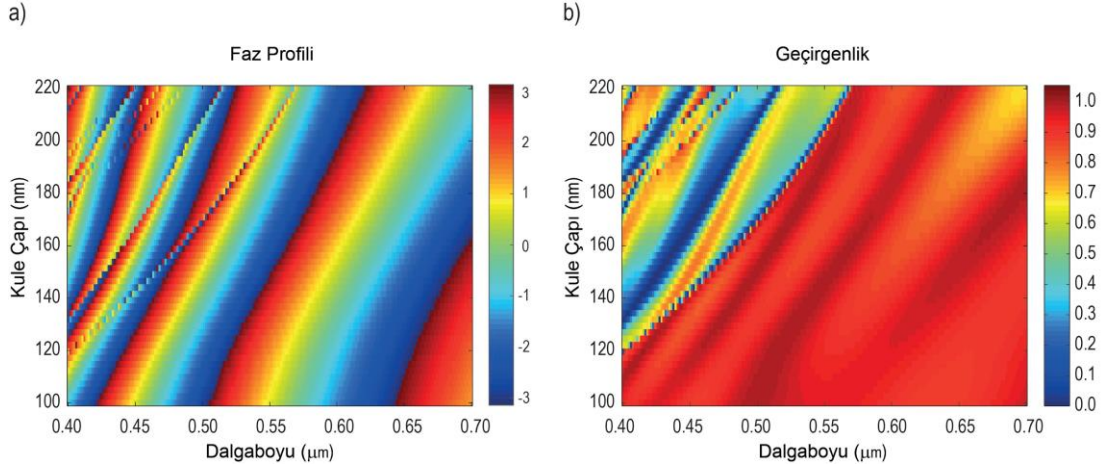
2.2 Faz Profiline Dayalı FDTD Tabanlı Metalens Tasarım Yaklaşımı

Bu yaklaşım ile metayüzey tasarımına başlarken optik gerekliliklerin tasarıma başlamadan önce belirlenmesi önem arz etmektedir. Tasarıma başlamadan önce f odak uzaklığı, optik açıklık, çalışma dalgaboyu ve polarizasyon bağımlılığı gibi parametreler belirlenir. Optik parametreleri Çizelge 2.1'deki gibi olan bir metalens tasarımının tasarım süreçleri bu tezde anlatılmıştır.

Çizelge 2.1: Faz Profiline Dayalı FDTD Tabanlı Metalens Tasarım Yaklaşımı için Metalens optik gereklilikleri.

Odak Uzaklığı (f)	4 μm
Optik Açıklık (OA)	10 μm
F Numarası ($f\# = f/\text{Optik Açıklık}$)	0.4
Nümerik Açıklık (NA)	0.85
Çalışma Dalgaboyu (λ)	400 nm – 700 nm
Tasarım Dalgaboyu(λ_d)	600nm
Örgü Katsayısı (ÖK)	250 nm

Faz profiline dayalı metalens tasarımlarında temel yaklaşım istenilen faz gecikmesini nano antenler ile sağlamaktır. Faz profili Denklem 1.3'de verilen formüle göre çıkarılır. FDTD Tabanlı Lumerical [45] yazılımı yardımı ile metalens tasarımı yapılır. Öncelikle tek bir nano kule Lumerical yazılımında modellenip geçirgenlik ve gerekli faz gecikmesinin sağlandığı doğrulanır. Metalens tasarımı gerçekleştirilirken önemli parametrelerden biri de çalışma dalgaboyuna göre malzeme seçimidir. Bu parametre doğrudan dalgaboyu ile ilişkilidir. Alt taşın ve nano kulelerin malzemesi çalışma dalgaboyunda iyi geçirgen malzemelerden seçilmelidir. Buna göre iyi geçirgen malzemeler kullanılarak sadece tek bir nano kule için geçirgenlik değerinin ölçülmesi ve fazın hesaplanması gerekmektedir. Bu bölümdeki çalışmada değerlendirilen tasarımlarda alt taş malzemesi kırılma indisi 1.5 olan SiO_2 , nano kule malzemesi kırılma indisi yaklaşık olarak 2.61 olan TiO_2 malzemeleri seçilmiştir. Bu şekilde seçilmesinin sebebi SiO_2 ve TiO_2 malzemesinin görünür spektrumda iyi geçirgen olmasıdır. Aynı zamanda bu malzemeler üretilebilirlik açısından daha elverişli ve bulunması kolay malzemelerdir. Üretim senaryosu da göz önünde bulundurulacak olursa erişimi kolay malzemeler kullanmak daha verimli olacaktır. Malzeme belirlendikten sonra bu malzemeler ile tek bir nano kule tasarımı yapılır. Bu tasarımda nano kule kalınlığı ve dalgaboyu parametreleri değiştirilerek her bir kalınlıkta ve farklı dalgaboyunda geçirgenlik değerleri ve faz profili çıkarılır. Bu sayede kullanılan dalgaboyu ve kalınlık aralığının istenilen aralıkta faz verip vermediği ve iyi geçirgen olup olmadığı belirlenir. Bu tasarımda nano kule kalınlık aralığı 100nm ile 220nm arası karesel örgü üzerinde değişmektedir. Görünür dalgaboyunda belli aralıkta kalınlık artırılarak her bir adımda geçirgenlik ve faz gecikmesine bakılır. En ince nano kule $-\pi$ radyan kadar faz gecikmesi sağlarken en kalın kule π 'lik bir faz gecikmesi sağlar. Dalgaboyu ve kalınlık değişimine göre geçirgenlik ve faz grafikleri Şekil 2.1'de gösterilmiştir. Birim hücre tasarımı yapılırken, tasarlanacak metalensin hangi örgüye göre dizilimi olacaksa o örgüye göre birim hücre tasarımı yapılmalıdır. Bu çalışmada örgü seçilimine göre birim hücre tasarımı yapılmamıştır. Karesel örgü için tasarlanan birim hücrenin diğer örgülerdeki davranışı analiz edilmiş ve sonuçları karşılaştırılarak verilmiştir. Ayrıca bu tasarım için polarizasyon bağımlılığı söz konusu olmadığı için nano kuleler yapısal ve açıl konum olarak birbirlerinden farklı değildirler.

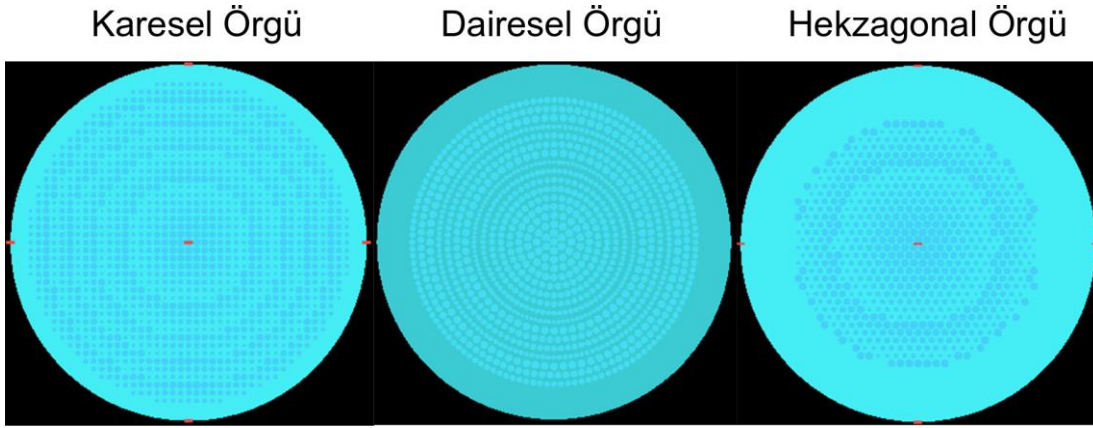


Şekil 2.1 : (a) Nano kule çapı ve dalga boyu değişimine göre faz profili grafiği; (b) Nano kule çapı ve dalga boyu değişimine göre geçirgenlik grafiği.

İstenilen odak uzaklığına ait faz profili kullanılarak, nano kuleler konuma göre ne kadarlık bir faz gecikmesi vermesi gerekiyorsa, o faz gecikmesini verecek nano kule kalınlığı ile o konumda alt taş üzerine dizilmelidir. Bununla birlikte nano kuleler arası mesafe yani nano kulelerin periyodu Nyquist örnekleme kriterine göre belirlenmelidir ($U < \lambda_d/2NA$). Bu örnekleme kriterinde tasarım dalga boyu (λ_d) 600nm kullanılmıştır.

Nano kulelerin dizilim örgüsünün şekli de verimliliği etkileyen parametrelerden biridir. Bu tez kapsamında 3 adet dizilim örgüsü tasarımı yapılarak incelenmiştir. Bu tasarımlarda nanokule kalınlıkları, örnekleme sıklığı ve bunlara bağlı olarak faz profili tasarım dalga boyu olan 600nm için belirlenmiştir. Tez kapsamında sunulan dizilim örgülerinden birincisi karesel örgü, ikincisi dairesel örgü ve üçüncüsü ise hegzagonal örgüdür. Bu örgülerin farklılık göstermesi ile metalensin verimliliğinin de farklılık gösterdiği gözlemlenmiştir. Şekil 2.2’de 3 farklı dizilim örgüsünün görünümü sırasıyla verilmiştir. Bu dizilim örgülerinin analizi için tüm ortam parametreleri sabit tutularak aynı ışık kaynağı karşısındaki sonuçları elde edilmiştir. Kullanılan ışık kaynağı geniş dalgaboyunda olup 400-700nm’lik bir spektrumu kapsamaktadır. Yapılan simülasyon sonuçları Şekil 2.3’de gösterilmiştir. Analizler tüm dalga boyları için yapılmış olup belirli dalga boylarının (kırmızı, yeşil, mavi) odaklanma sonuçları Şekil 2.3’de verilmiştir. Sırasıyla kırmızı ($\lambda=466\text{nm}$) renk dalga boyu için (a) karesel örgü, (b) dairesel örgü ve (c) hegzagonal örgü; yeşil ($\lambda=566\text{nm}$) renk dalga boyu için (d) karesel örgü, (e) dairesel örgü ve (f) hegzagonal örgü; mavi ($\lambda=666\text{nm}$) renk dalga boyu için (g) karesel örgü, (h) dairesel örgü ve (i) hegzagonal örgü. Geniş dalgaboyu aralığında çalışan bu yapıların belirli dalga boylarındaki çıktıları incelenmiştir ve

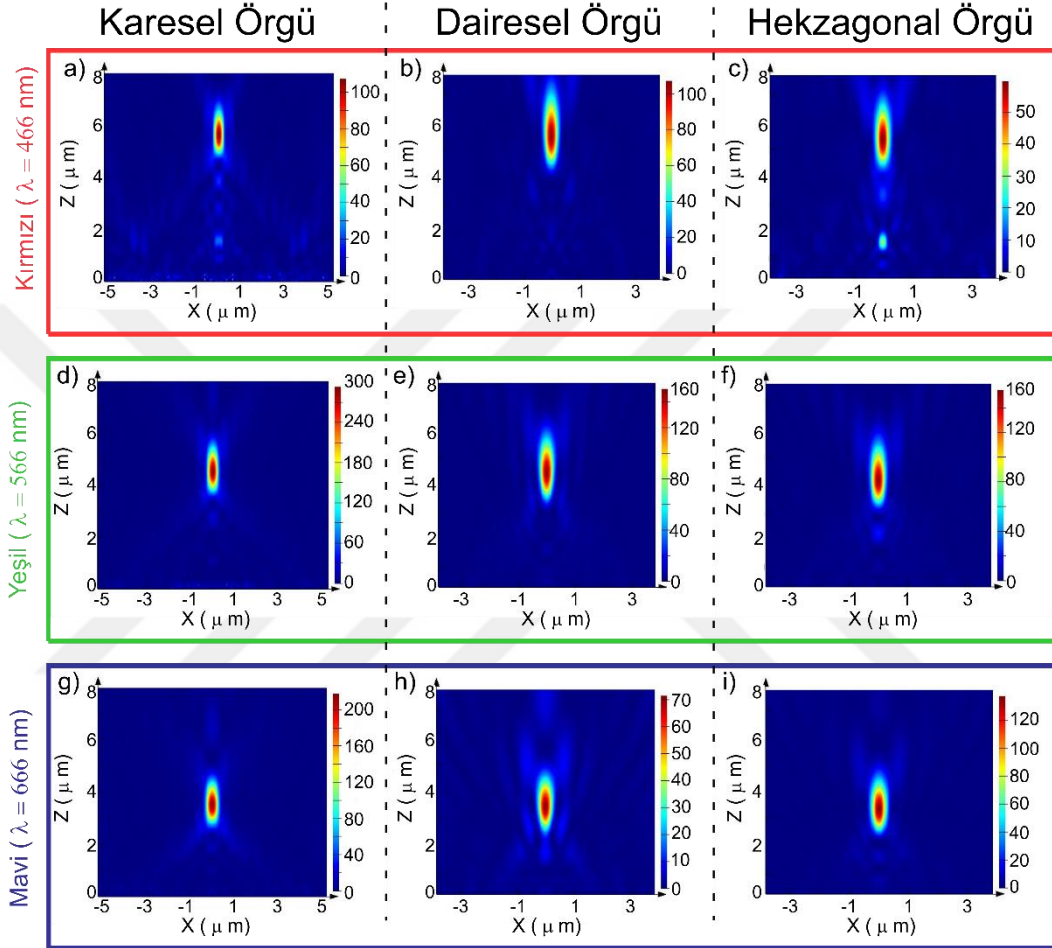
karşılaştırılmıştır. Şekil 2.3’de farklı dalga boylarındaki odaklanma sonuçları görülmektedir. Bu sayede seçilecek örgüye göre birim hücre tasarımının hangi örgüde analiz edilmesinin ne kadar önemli olduğu gösterilmiştir. Her bir tasarımın odak verimliliği birbirinden farklı olmaktadır. Normalde hekzagonal örgü fazı daha sıkı paketlediği için odak verimliliğinin karesel örgüden yüksek yada hemen hemen aynı olması beklenir. Bu odaklanma grafiklerine ait Yarı Doruk Genişliği (YDG) grafikleri Şekil 2.4’de verilmiştir. Şekil 2.4’e göre (a) kırmızı (466nm) dalga boyu için karesel, dairesel ve hekzagonal örgülerin odaklanma grafikleri; (b) yeşil (566nm) dalga boyu için karesel, dairesel ve hekzagonal örgülerin odaklanma grafikleri; (c) mavi(666nm) dalga boyu için karesel, dairesel ve hekzagonal örgülerin odaklanma grafikleri.



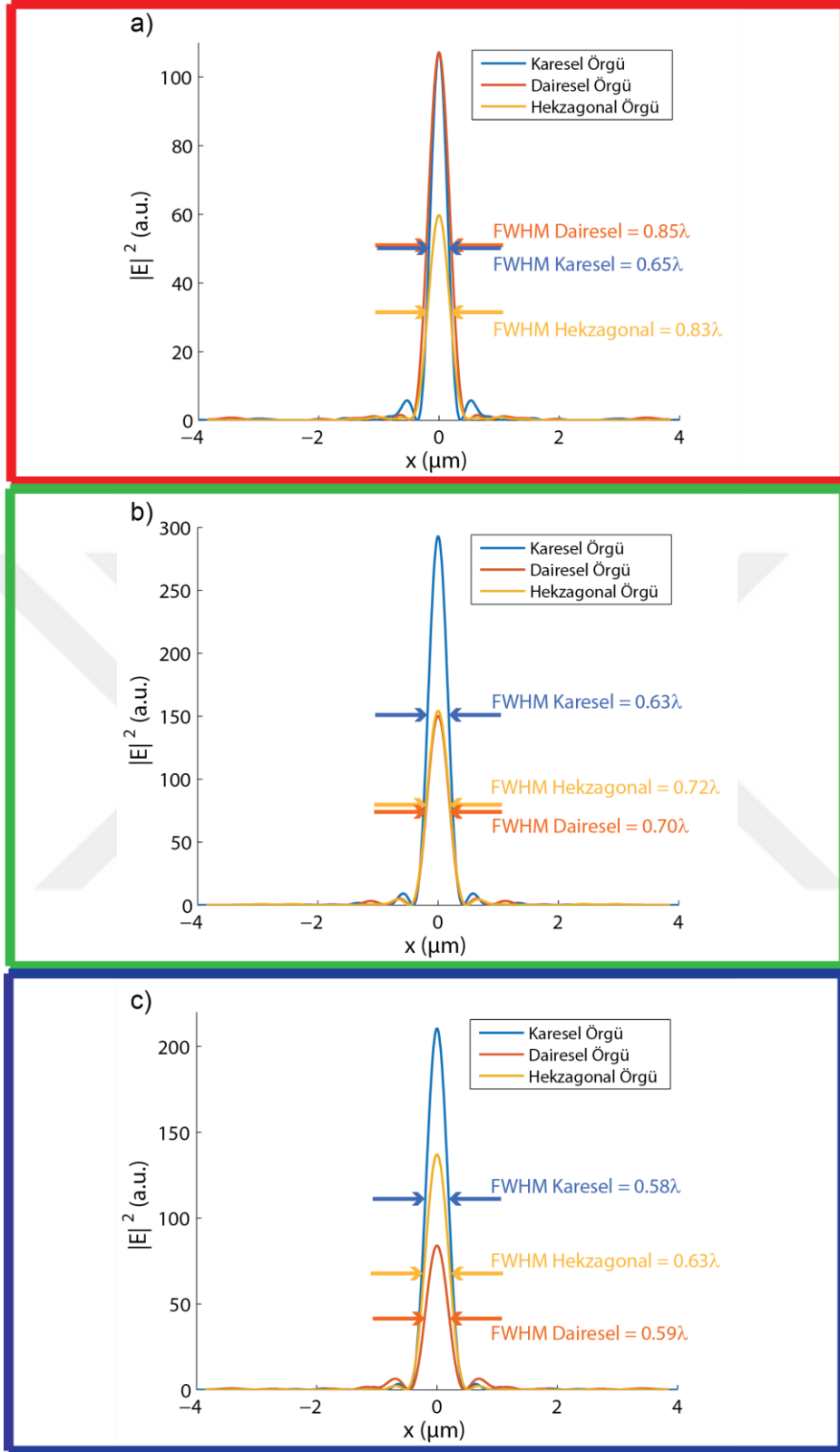
Şekil 2.2 : Karesel, Dairesel ve Hekzagonal örgü ile dizilmiş metayüzey şematik görseli;

Her bir dizilimin ayrı dalga boylarındaki odak uzaklıkları (f) ve Odak derinliği (OD) değerleri grafikleri Şekil 2.5’de görülmektedir. Şekil 2.5’de (a) Karesel örgü için 466nm, 566nm ve 666nm için odak uzaklığı ve odak derinliği; (b) Dairesel örgü için 466nm, 566nm ve 666nm için odak uzaklığı ve odak derinliği; (c) Hekzagonal örgü için 466nm, 566nm ve 666nm için odak uzaklığı ve odak derinliği grafikleri görülmektedir. Sonuçlardan anlaşılacağı üzere 3 topoloji içinde gelen ışık odak uzaklıkları ilgili dalgaboyunda birbirleri içerisinde tutarlı uzaklıklarda bulunmaktadır. Bu da yapılan metalens tasarımlarının doğruluğunu kanıtlar niteliktedir. Herhangi bir nanokule diziliminde istenilen odak uzaklığında iki tarafı düz kırıcılığı olan bir lens yapılabilir. Şekil 2.3’de görüldüğü üzere üç metalens örgüsünde geniş dalgaboyu aralığında iyi verimde çalışmaktadır. Dalgaboyu değişimine göre odak kayması bu lensin bir akromatik lens olmadığını göstermektedir. Bu lensi akromatik yapmak için daha farklı yaklaşımlara ihtiyaç vardır. Örneğin nano kule yükseklik

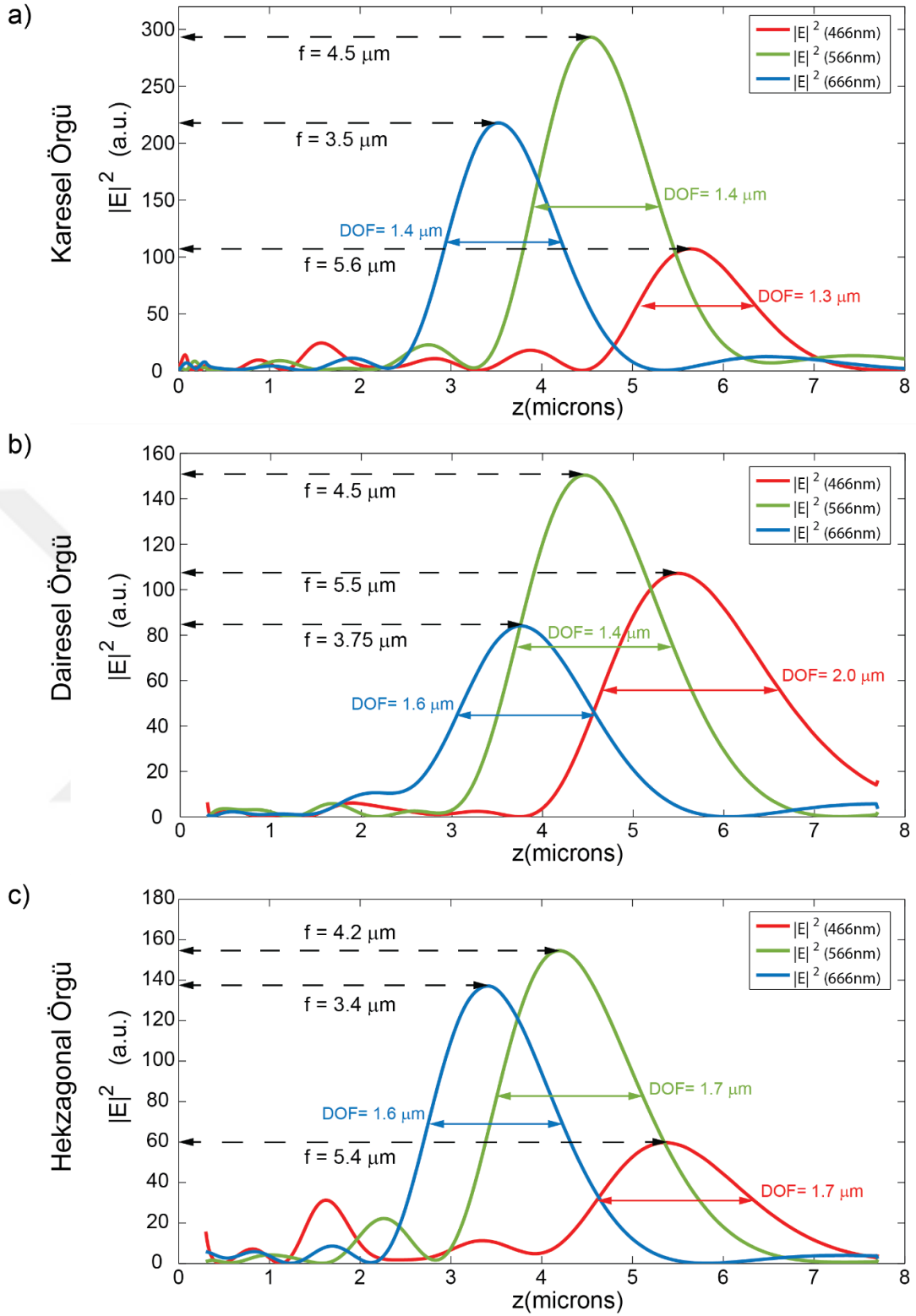
değerlerinin faza göre değişmesi veya bu metalens sistemi ile geleneksel optik sistemlerin kombine edilmiş sistem senaryoları gibi[46]. Şekil 2.3'den anlaşılacağı üzere karesel örgü tüm dalgaboyu aralığımca diğer örgülere göre yüksek yoğunlukta odaklama yapmıştır. Şekil 2.4'de bu odak noktalarından alınan kesitler üst üste çizilerek gösterilmiştir.



Şekil 2.3 : Karesel, dairesel ve hekzagonal örgülerin farklı dalga boylarındaki odaklanma sonuçları sırasıyla kırmızı ($\lambda=466\text{nm}$) renk dalga boyu için (a) karesel örgü, (b) dairesel örgü ve (c) hekzagonal örgü; yeşil ($\lambda=566\text{nm}$) renk dalga boyu için (d) karesel örgü, (e) dairesel örgü ve (f) hekzagonal örgü; mavi ($\lambda=666\text{nm}$) renk dalga boyu için (g) karesel örgü, (h) dairesel örgü ve (i) hekzagonal örgü

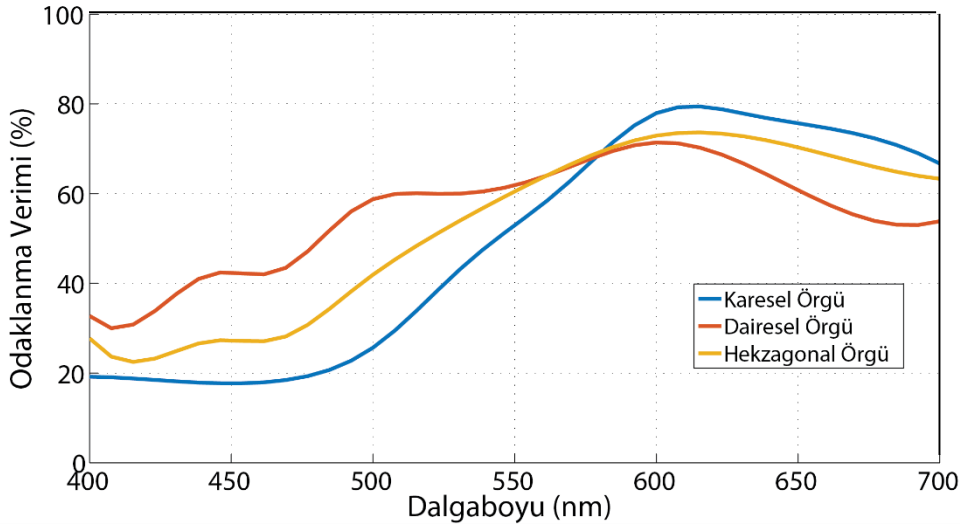


Şekil 2.4 : Karesel, dairesel ve hekzagonal örgülerin farklı dalga boylarındaki odaklanmalarının X-Ekseni üzerindeki kesit görüntüsü ve YDG grafikleri (a) kırmızı (466nm) dalga boyu için karesel, dairesel ve hekzagonal örgülerin odaklanma grafikleri; (b) yeşil (566nm) dalga boyu için karesel, dairesel ve hekzagonal örgülerin odaklanma grafikleri; (c) mavi(666nm) dalga boyu için karesel, dairesel ve hekzagonal örgülerin odaklanma grafikleri



Şekil 2.5 : Karesel, dairesel ve hekzagonal örgülerin farklı dalga boylarındaki odaklanmalarının Z-Ekseni üzerindeki kesit görüntüsü, f ve OD değerleri (a) Karesel örgü için 466nm, 566nm ve 666nm için odak uzaklığı ve odak derinliği; (b) Dairesel örgü için 466nm, 566nm ve 666nm için odak uzaklığı ve odak derinliği; (c) Hekzagonal örgü için 466nm, 566nm ve 666nm için odak uzaklığı ve odak derinliği grafikleri

Bu grafiklerden anlaşılacağı üzere karesel örgü ile dairesel örgü 466nm(kırmızı) dalgaboyunda neredeyse aynı odak yoğunluğunda odaklanmıştır. 466nm’de hekzagonal örgü karesel ve dairesele göre daha düşük odak yoğunluğuna sahiptir. 566nm (yeşil) dalgaboyunda karesel örgü diğer örgülerden daha yüksek odak yoğunluğuna sahiptir. 666nm (mavi) dalgaboyunda yine karesel örgü en yüksek odak yoğunluğuna sahip örgüdür. Bunun yanında 666nm de hekzagonal örgü dairesel örgüye göre daha fazla odak yoğunluğuna sahiptir. Bunların yanında 466nm’de sırayla karesel, dairesel ve hekzagonal örgülerin YDG değerleri 0.65λ , 0.85λ ve 0.83λ olarak hesap edilmiştir. 566nm’de sırayla karesel, dairesel ve hekzagonal örgülerin YDG değerleri 0.63λ , 0.70λ ve 0.72λ olarak hesap edilmiştir. 666nm’de sırayla karesel, dairesel ve hekzagonal örgülerin YDG değerleri 0.58λ , 0.59λ ve 0.63λ olarak hesap edilmiştir. Şekil 2.4’de metalens örgülerine ait odak uzaklıkları ve odak derinlikleri (OD) verilmiştir. Bu grafiklerden görüldüğü üzere örgüler, farklı dalga boylarında farklı odak uzaklıklarına ve OD değerlerine sahiptir. Örgülerin farklı dalga boylarında odaklama yapması geniş bantta çalışabilme yeteneği olduğunu göstermektedir. Fakat farklı odak uzaklıklarına sahip olması bir kromatik aberasyon göstergesidir. Bu aberasyon ise metalenslerde olağan bir durumdur. Nano kulelerin yükseklik değerleri konuma ve faza göre değişken yapılırsa bu aberasyonun önüne geçilebilir.



Şekil 2.6 : Karesel, dairesel ve hekzagonal örgülerin dalga boyuna göre odak verimlilikleri ($\lambda_d = 600\text{nm}$) :

Farklı örgülerin karşılaştırılmasında hedef metriklerden biri de metalenslerin geçirgenlik değerleri yani odaklama verimlilikleridir. Metalensin verimliliği odak noktasındaki ışığın gücünün, girişteki ışığın gücüne oranından elde edilir. Tasarımı yapılan bu üç metalensin odak verimlilikleri Şekil 2.6'da verilmiştir. Dalgaboyuna bağımlı odak verimliliği grafiği tasarım dalga boyunun ($\lambda_d = 600\text{nm}$) odak noktasında ölçülmüştür. Odaklanma verimlilikleri 600nm'de tepe yaptığı görülmüştür. Bunun sebebi tasarım dalga boyunun 600nm olmasıdır. Tasarım dalgaboyunda (600nm) odaklanma verimlilikleri sırasıyla karesel, dairesel ve hegzagonal örgü: %79.42, %71.42 ve %73.64. Buradan görüldüğü üzere en verimli dizilimin karesel örgü olduğu görülmektedir.

Yapılan bu çalışma ile metalens tasarım yöntemlerinden biri gösterilerek farklı topolojiler karşılaştırılmıştır ve örgü seçimine göre birim hücre analizlerinin önemi gösterilmiştir. Bu sayede uygulama alanlarında en verimli topolojinin hangisi olacağı gösterilmiştir. Aynı zamanda metalenslerin geleneksel optiğe bir alternatif olduğu görülmüştür. Odak verimliliği ve geçirgenliği yüksek olması, üretim süreçlerinin kısa ve kolay olması ve hacimsel anlamda etkili olması sayesinde metalensler geleneksel optiğe göre avantaj sağlamaktadır.

2.3 Işın Analizi ve FDTD Tabanlı Metalens Tasarım Yaklaşımı

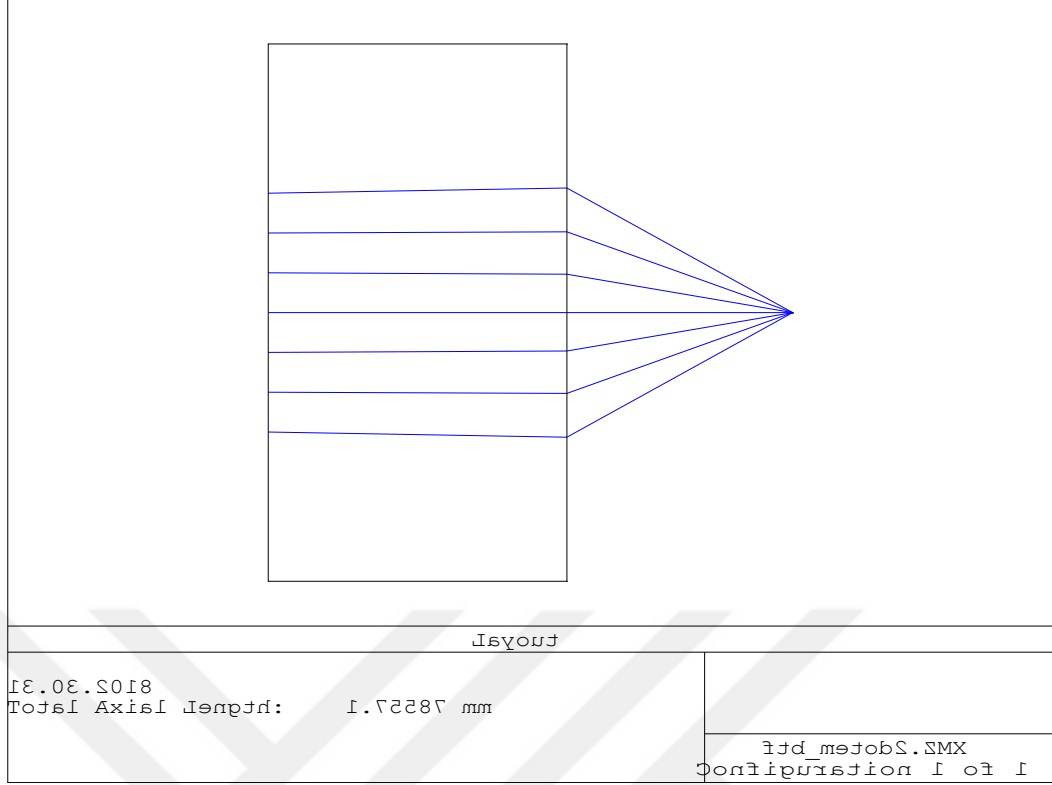
Metayüzey tasarımları faz denklemi ve dizilim örgüsü kullanılarak yapılmasının yanında KOE yardımıyla da yapılabilmektedir. [47]. Bu tez kapsamında değerlendirmesi amaçlanan ikinci tasarım metodu ise KOE'dan yararlanılarak gerçekleştirilen meta yüzey tasarımlarıdır.

Bu yöntemde lumerical yazılımına ek olarak Zemax Optic Studio[48] yazılımından yardım alınmıştır. Zemax Optic Studio[48] yazılımı, Lumericaldan farklı olarak ışığın parçacık hareketini temel alarak ışın analizi yapabilmektedir. Bu sayede tasarlanacak optik elemanın ışın analizi kullanılarak karakteristiğini belirlemek için optimize edilebilir. Bu nedenle bu tasarım metodunda diğerinde olduğu gibi ilk olarak sistem gereklilik tanımlaması yapılmalıdır. Tasarlanacak sisteme ait gereklilikler Çizelge 2.2'de görülmektedir. Bu tasarım yönteminde öncelikle yapılacak metalensin 2 yüzeyinin de metayüzeye sahip olacağı kararı verilmiştir. Bunun sebebi çift taraflı kırınımlayıcı yüzeyin tek tarafa göre daha iyi sonuç vermesi olmuştur.

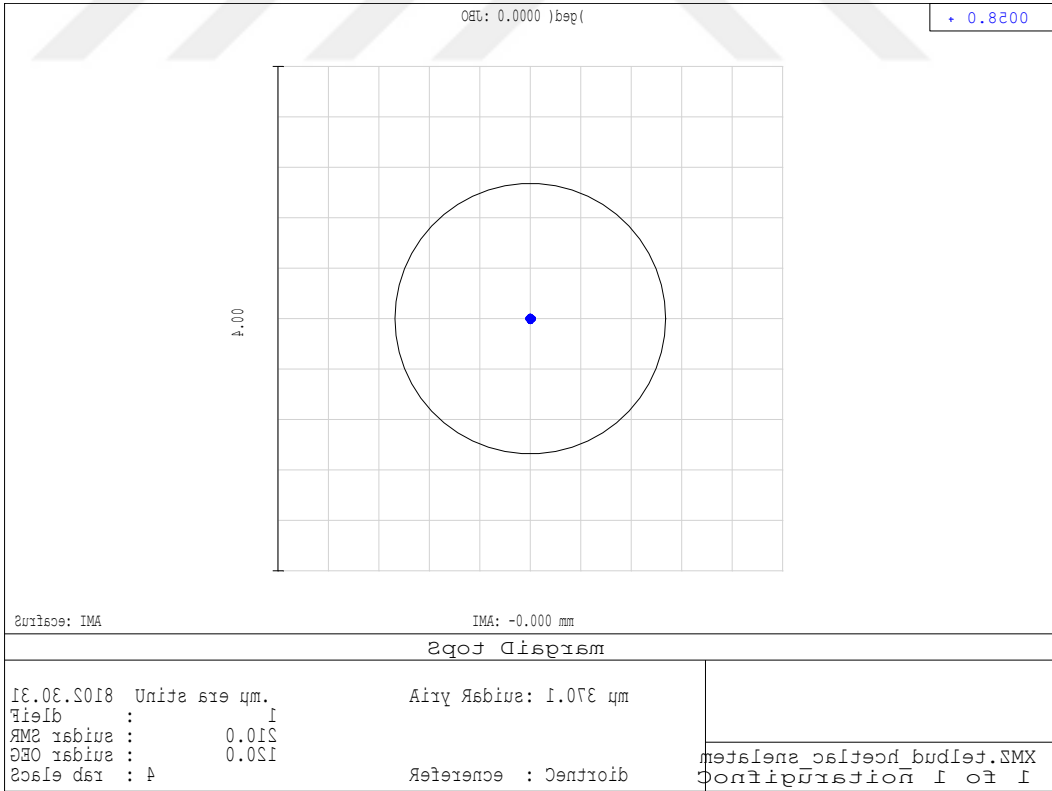
Çizelge 2.2: Işın Analizi ve FDTD Tabanlı Metalens Tasarım Yaklaşımı için Metalens optik gereklilikleri.

Odak Uzaklığı (f)	8 μm
Optik Açıklık (OA)	8 μm
F Numarası ($f\# = f/\text{Optik Açıklık}$)	1
Nümerik Açıklık ($NA = 1/(2*f\#)$)	0.5
Çalışma Dalgaboyu (λ)	850nm
Örgü Katsayısı (ÖK)	450 nm
Polarizasyon	Bağımsız

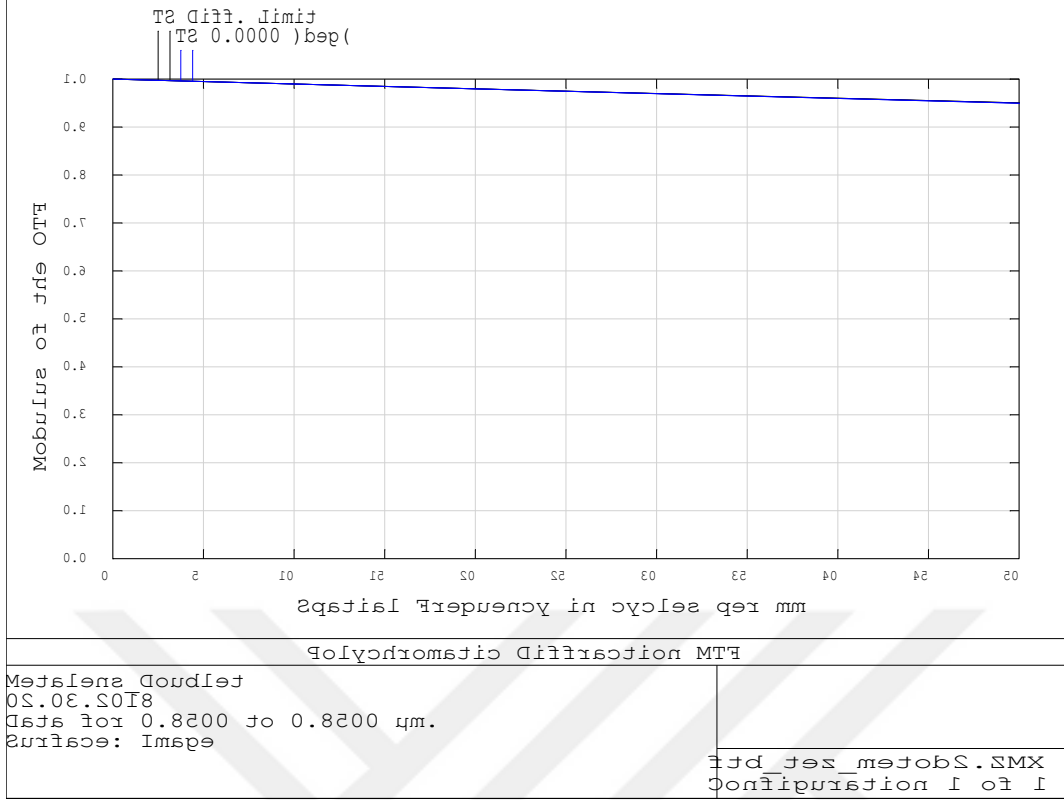
İlk kırınımlayıcı yüzey doğrulayıcı ikincisi ise odaklayıcı kırınımlayıcı yüzey olarak alt taş yüzeylerine eklenecektir. Kırınımlayıcı optik yüzeyler Zemax'da performans gerekliliklerini sağlayacak düzeye gelinceye kadar optimize edilir. Bu tasarımda lensin arka ve ön yüzeyi de kırınımlayıcı optik yüzey olarak tanımlanmıştır. Bu sayede daha yüksek geçirgenlik ve verim elde edilmesi hedeflenmiştir. Kırınımlayıcı yüzeylerin optimizasyon ile elde edilen katsayıları Çizelge 2.2 de görülmektedir. Bu tasarımda alt taş malzeme olarak 1mm kalınlığında kırılma indisi 1.5 olan SiO₂, nano kule malzemesi kırılma indisi~2.61 olan TiO₂ malzemeler kullanılmıştır. Bunun sebebi seçilen malzemeler ile iletkenlik ve verimin artırılmasıdır. Şekil 2.7'de, Çizelge 2.1'deki gereklilikleri sağlayan Zemax tasarım görselleri görülmektedir. Görüldüğü gibi ilgili odak uzaklığı, dalgaboyu vb. istenilenleri sağlayacak şekilde sadece kırınımlayıcı yüzeylere ait katsayılar ve odak düzlemine olan uzaklık optimize edilmiştir. Bu sayede lense ait yüzeylerin faz profilleri bu katsayılar yardımı ile çıkarılacaktır. Zemax'da mikron ve nanometre seviyesinde analizler gerçekçi olmayacağından, analizler milimetre seviyesinde yapılmış daha sonra Lumerical'a aktarılırken ölçeklendirme yapılmıştır.



Şekil 2.7 : Zemax'da tasarlanan 2 yüzeyi düz kırınımlayıcı olan optik layout görseli



Şekil 2.8 : Zemax'da optimize edilmiş çift yüzeyi KOE olan tasarım Spot Diyagramı



Şekil 2.9 : Zemax’da optimize edilmiş çift yüzeyi KOE olan tasarım MTF grafiği

Çizelge 2.3: Kırınımlayıcı yüzey katsayıları

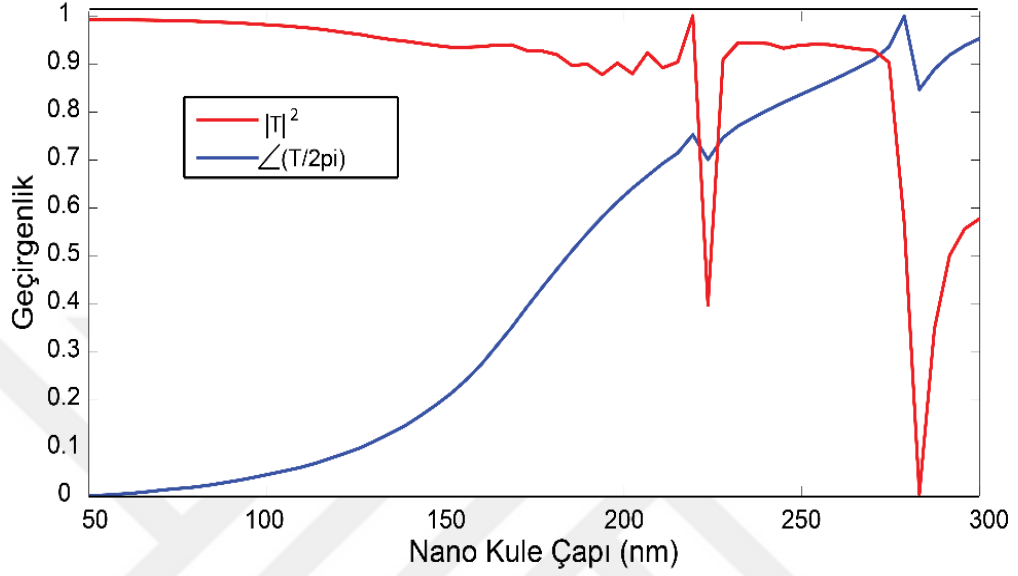
Metayüzey	R(um)	a1	a2	a3	a4	a5
Doğrulayıcı MY	4	-47.16E-3	72.69E-3	28.10E-3	-80.62E-3	35.46E-3
Odaklayıcı MY	8	-2.928	-657.71E-3	1.655	4.834	-12.89

Zemax yazılımından alınan katsayılar kullanılarak yeni bir faz profili çıkarılır. Faz profili Denklem 2.1’e göre çıkarılmaktadır:

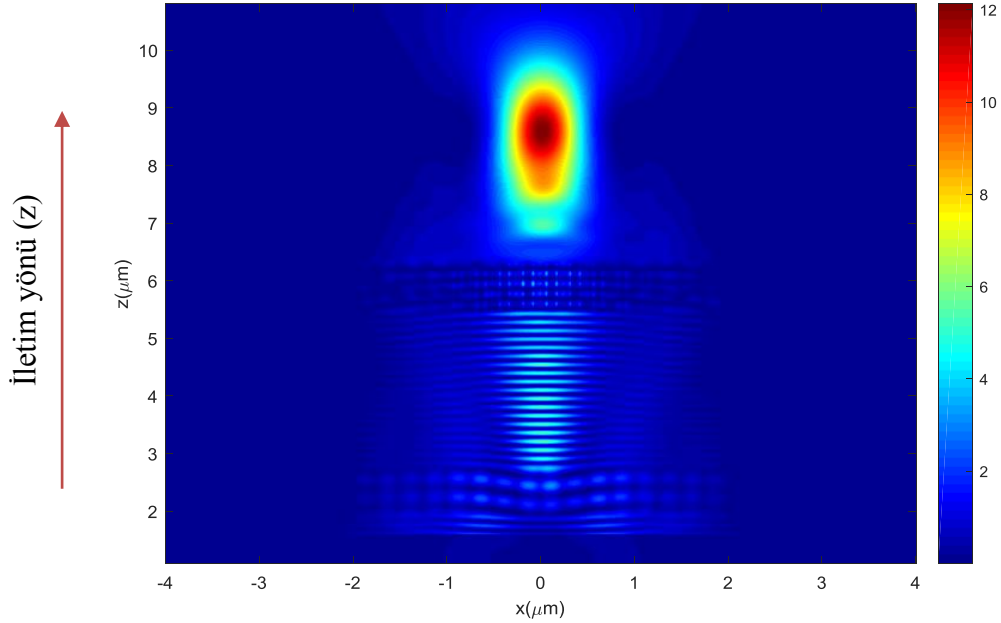
$$\phi(\rho) = \sum_{n=1}^5 a_n \left(\frac{\rho}{R}\right)^{2n} \quad (2.1)$$

Bu denklemde R metalensin yarıçapını, a_n Zemax yazılımında optimize edilen katsayıları ρ ise radyal koordinatları göstermektedir. Faz profili bu denkleme göre çıkarıldıktan sonra tasarım yöntemi bir önceki ile benzerdir. Tek bir nano hücreni faz ve geçirgenlik değerleri daha önceki yöntemde olduğu gibi Lumerical yardımıyla

ayarlanır. Lumerical’da analizi yapılan tek bir nano kulenin geçirgenlik ve 2π ’lik faz kapsaması Şekil 2.10 da görülmektedir. Bu değerler doğrultusunda istenilen dizilimde ilgili koordinata gerekli fazı verecek nano kuleler alt taş üzerine hegzagonal örgü ile dizilerek metalens tasarımı sonlandırılır. Bu tasarıma ait spot diyagram sonucu Şekil 2.11’de görülmektedir. Verimlilik değeri: %85.2 olarak elde edilmiştir.



Şekil 2.10 : Tek bir nano kuleye sahip nano hücreye ait geçirgenlik ve faz kapsaması grafiği.



Şekil 2.11 : Lumerical Spot diyagram

KOE tasarımları temel alınarak yapılan bu yöntemin avantajı çoklu optik elemana sahip sistemlerinde tasarlanabilmesidir. Zemax yazılımı ile çoklu elemanların odak uzaklıkları ve birbirlerine göre olan konumları kolayca optimize edilebildiği için, zoom lensler gibi karmaşık tasarımların metalensler ile gerçekleştirilebilmesi için gereken bilgi rahatça elde edilir.

2.4 Sonuç

Tezin bu bölümünde metalens tasarım yaklaşımları ve metotları ile ilgili teorik ve deneysel bilgilere yer verilmiştir. Bu sayede metalens tasarım süreçlerinin aşamaları detaylandırılmış olup, yüksek verimlilikte metalens tasarımları elde edilmiştir. Ayrıca farklı metalens tasarım topolojilerinin detaylı analizleri verilerek, birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucunda en uygun metalens topolojisi belirlenmiştir. Ayrıca ışın analiz programı ve FDTD birleştirilerek de metalens tasarımı yapılmıştır. Bu sayede daha büyük çapta metalenslerin tasarlanabileceği gösterilmiştir. Böylelikle geleneksel optik ile yapılan sistemlerin metalensler ile yapılmasında bir araç olarak kullanılabilmesi gösterilmiştir.

3. METALENS UYGULAMA ALANLARINA YÖNELİK TASARIMLAR

Tezin bu bölümünde bir önceki bölümde verilen tasarım yöntemleri kullanılarak deneysel simülasyon çalışmaları yapılan birkaç uygulama alanına yönelik metalens sistem tasarımları anlatılmaktadır. Literatürde dielektrik metayüzey ve metalens tasarımlarının faydaları, verimlilikleri ve çalışma prensiplerine oldukça fazla yer verilmektedir. Bunun yanı sıra metalenslerin geleneksel optik elemanların yerini alacağı birçok çalışmada vurgulanmasına rağmen, uygulama alanlarına yönelik optik sistem tasarımlarına fazla yer verilmemektedir. Bu tez kapsamında metalensler kullanılarak, çok elemanlı optik sistem tasarımı ve kızılötesi optik spektrum (KOS) odak düzlemi dizileri (ODD) için lens dizisi tasarımlarına yer verilmiştir.

3.1 Metayüzey: Çok Elemanlı Optik Sistem Tasarımı

3.1.1 Giriş

Metayüzeyler bilindiği gibi, ışığın genliğini, fazını ve polarizasyonunu kontrol eden oldukça ince ve iki boyutlu örgü yapısında nano saçıcılara sahip optik elemanlardır. Son zamanlarda elektronik ve optik sistemlerin oldukça küçülmesiyle, küçük optik elemanlara ihtiyaçta artmıştır. Geleneksel optiğe göre metalensler, modern optik sistemleri için oldukça ucuz ve etkili bir çözüm haline gelmiştir. Bu sayede metalenslerin, mikroskoplar, optik büyüteçler ve kameralar gibi birçok optik sistemde kullanılabileceği daha önce vurgulanmıştı. Tezin bu bölümünde üç farklı metalens kullanılarak yapılan üç odaklı bir optik sistem tasarımı anlatılacaktır. 600nm dalgaboyunda çalışmakta olup, lenslerin birbirine olan mesafeleri değiştirilerek 3 farklı f numarasına sahip bir optik sistem tasarımı yapılmıştır. Sistemin odak uzaklığı ve f numarası sırasıyla 20um, 25um ve 30um ile 1, 1.25 ve 1.5 olarak değişmektedir. Tezin bu bölümünde tek boyutlu metayüzey yapıları kullanılarak yapılan bu optik sistem ile geleneksel optik yaklaşımı ile yapılan kamera objektiflerinin metayüzeyler ile gerçekleştirilebileceğinin gösterilmesi amaçlanmıştır.

3.1.2 Tasarım yaklaşımı

Geleneksel optik sistemlerde, zoom lensler optik elemanların birbirine göre uzaklıklarının değiştirilmesi ile gerçekleştirilir. Geleneksel optik sistemlerdeki bu tasarım

metodu metalensler kullanılarak da gerçekleştirilebilir. Öncelikle tasarım istekleri belirlenmiştir. Çizelge 3.1. de yapılan tasarıma ait optik gereklilikler görülmektedir.

Çizelge 3.1: Zoom Triplet Metalens Optik Gereklilikleri

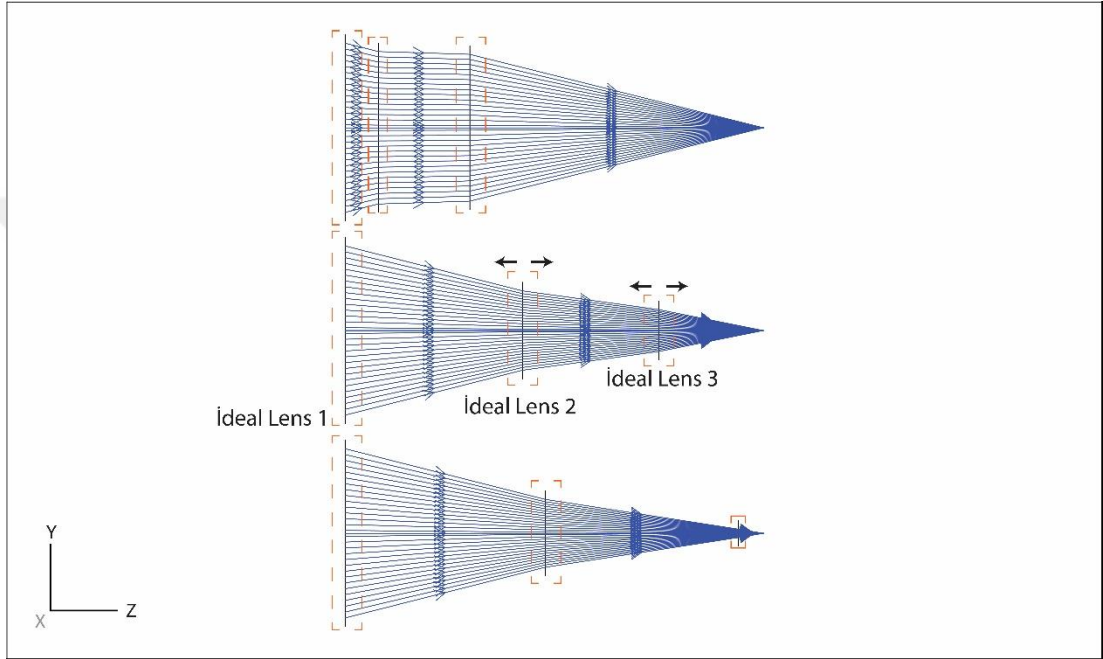
Çoklu Odak Uzaklığı (f)	20 µm, 25 µm, 30 µm
Optik Açıklık (OA)	20 µm
F Numarası (f# = f/Optik Açıklık)	1, 1.25, 1.5
Nümerik Açıklık (NA = 1/(2*f#))	0.5, 0.4, 0.33
Çalışma Dalgaboyu (λ)	600nm
Örgü Katsayısı (ÖK)	450 nm
Polarizasyon	Bağımsız

Belirlenen bu istekleri sağlayacak zoom lensi tasarlamak için ilk olarak Zemax Optic Studio yazılımı kullanılmıştır. Zemax yazılımında üç adet paraxial (ideal) lens aynı optik düzlem üzerine yerleştirilmiştir. Daha sonra bu lenslerin odak uzaklıkları ve birbirlerine olan mesafeleri optimize edilmiştir. Bu sayede istenilen gereklilikleri sağlayan optik sistem Zemax’da gerçekleştirilmiş olmuştur. Zemax yazılımının kullanım amacı üç farklı odak uzaklığına sahip lenslerin birbirine olan konumları ve odak uzaklık değerlerinin belirlenmesidir. Böylelikle, Lumerical yazılıma verilecek giriş bilgileri elde edilmiş olur. Şekil 3.1. de zemax yazılımında elde edilen optik dizilim görülmektedir. Şekil 3.1.’de yukarıdan aşağı sırasıyla odak uzaklıkları; 20µm, 25µm ve 30µm’dir. Görüldüğü gibi arkadaki iki lensin hareketi ile odak uzaklığı değişmektedir. Buradaki odak uzaklıkları ve mesafe bilgileri daha sonra Lumerical ‘da kullanılmıştır. Optik metayüzeyler, içerisindeki belli dizilimdeki nano parçacıklar sayesinde faz kaydırıcı olarak davranan düz yüzeyli optik elemanlardır. Nano parçacıkların dizilimi istenilen fazı vermektedir. Bu nedenle, nano parçacıkların

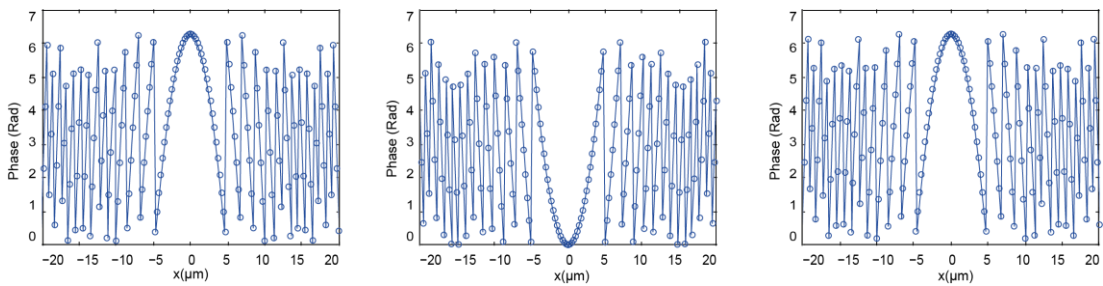
dizilim örgüsü belirli bir formulasyona göre yapılmalıdır. Denklem 3.1’de tek boyuta bağlı bu eşitlik verilmiştir.

$$\phi(x) = \frac{2\pi}{\lambda} \left(f - \sqrt{x^2 - f^2} \right) \quad (3.1)$$

Bu eşitliğe göre f odak uzaklığı, λ dalgaboyu ve x de konum bilgisidir. Bu eşitlik kullanılarak her bir metalensin faz profilleri ayrı ayrı oluşturulmuştur. Şekil 3.2. de lenslerin her birinin faz profilleri verilmiştir.



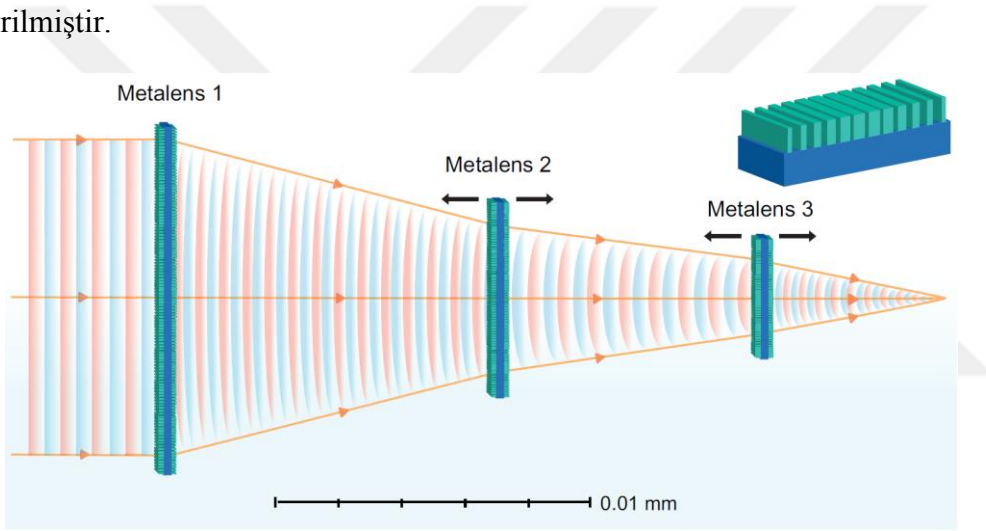
Şekil 3.1 : Zemax Zoom Üç Konfigurasyon



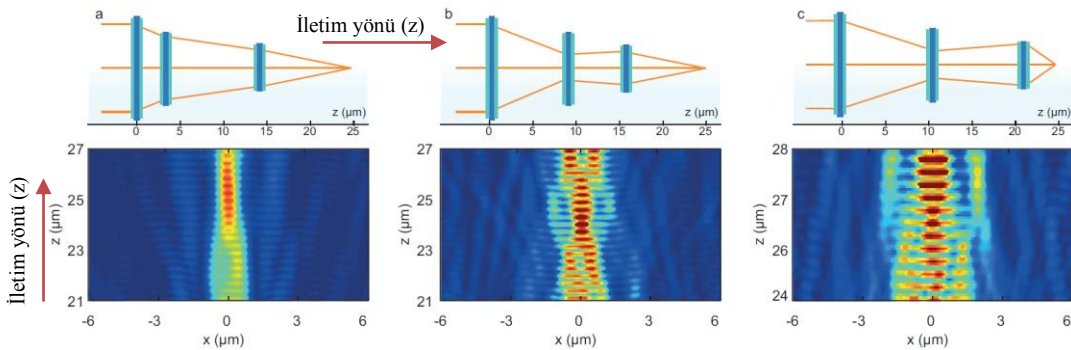
Şekil 3.2 : Üç farklı metalensin faz profilleri

Lenslere ait bu faz profilleri nano kulelerin konuma göre dizilimi ve kalınlıkları ayarlanarak sağlanmıştır. Nano kulelerin, yükseklik ve periyot gibi diğer parametreleri sabit olup en iyi geçirgenliği ve 2π 'lik faz kapsamasını verecek şekilde seçilmiştir. Buna göre nano kule yüksekliği 600nm olarak belirlenmiştir. Nano kulelerin

kalınlıkları 100nm ile 220 nm arası değişmektedir. Her bir nano kulenin kalınlığı faz profiline göre uygun konuma gelecek şekilde belirlenmiştir. Genelde metalens tasarımları cam alt taş üzerine TiO₂ kuleler dizilerek modellenmektedir. Bu nedenle bu tasarım için de bu malzemeler kullanılmıştır. ($n_{TiO_2} \sim 2.61$, $n_{Cam} = 1.46$ at 600nm) Geçirgenlik ve verimliliği artırmak için nano kuleler, cam alt taşın iki yüzeyine de birbirlerine simetrik olacak şekilde dizilmiştir. Bu bilgiler doğrudusunda metalensler Lumerical'da tasarlanarak aynı optik eksen üzerine Zemax'dan alınan konum bilgilerine göre dizilmiştir. Tüm konfigürasyonlar tamamlandıktan sonra Lumerical'da odaklama performanslarına bakılmıştır. Şekil 3.3.'de metalens optik sistemi tek bir metayüzeyin detaylı şematik görseli verilmiştir. Şekil 3.4'de farklı kombinasyonlara ait şematik görseller ve o konfigürasyona ait odaklama çıktısı altında gösterilmiştir.



Şekil 3.3 : Meta Zoom Lens şematik görünüm



Şekil 3.4 : Lens Hareketlerine göre farklı konfigürasyonlar ve onlara ait spot diyagramları a) $f=20 \mu\text{m}$, b) $f=25 \mu\text{m}$, c) $f=25 \mu\text{m}$.

Bu sonuçlara göre odak düzlemindeki ışık gücünün girişteki ışık kaynağının gücüne oranı bize odaklanma verimliliğini vermiştir. Her konfigürasyonun sırasıyla verimlilikleri: %61.2, %53.1 ve %69.8 dir. Tüm konfigürasyonlarda odaklanma spot büyüklüğü 2 mikronun altındadır. Bu da günümüzdeki görüntüleme sistemlerinde kullanılan detektörlerin bir pikselinin oldukça altındadır.

3.1.3 Sonuç

Tezin bu bölümündeki çalışma ile bir zoom optik sistemi tasarımı metalensler kullanılarak yapılabileceği gösterilmiştir. Sunulan bu sistemde üç farklı metalens kullanılmıştır. Üç metalensin birbirlerine olan mesafeleri değiştirilerek farklı odak uzaklıkları elde edileceği gösterilmiştir.

3.2 Geniş Bant Polarizasyon Bağımsız Düşük Gürültülü Metayüzey Lens Dizisi KOS ODD

Yüksek çözünürlüklü, düzlemsel, küçük boyutlu odak düzlemi dizilerini elde etmek için piksel boyutunun küçülmesi şarttır; bununla birlikte, optik karışmada ortaya çıkan artış ciddi dezavantaja yol açmaktadır. Günümüzde orta kızıl ötesi spektrumunda (KOS) yapılan odak düzlemi dizileri (ODD) düşük etkiye sahip olup dar dalga boyunda çalışmaktadır. Bu tez kapsamında sunulan çalışmada tasarım polarizasyon bağımsız olarak geniş dalga spektrumunda çalışmaktadır. Tasarım, üstün optical crosstalk ile 0.85 üzerinde odak etkisi göstermiştir. Bu tasarımda, odak performansını 0.85' in üzerinde tutulurken, optical crosstalk %2.8in altında tutulması başarılmıştır. Elektro-optik cihaz performansını her $f\#$ 'daki optical crosstalk için odak etkisini gösteren figüre of merit kullanılarak gösterilmiştir. Bu çalışma metayüzey lens dizisi hassaslığı ve sinyal gürültü oranını artırmak için büyük potansiyele sahip olduğunu göstermiştir.

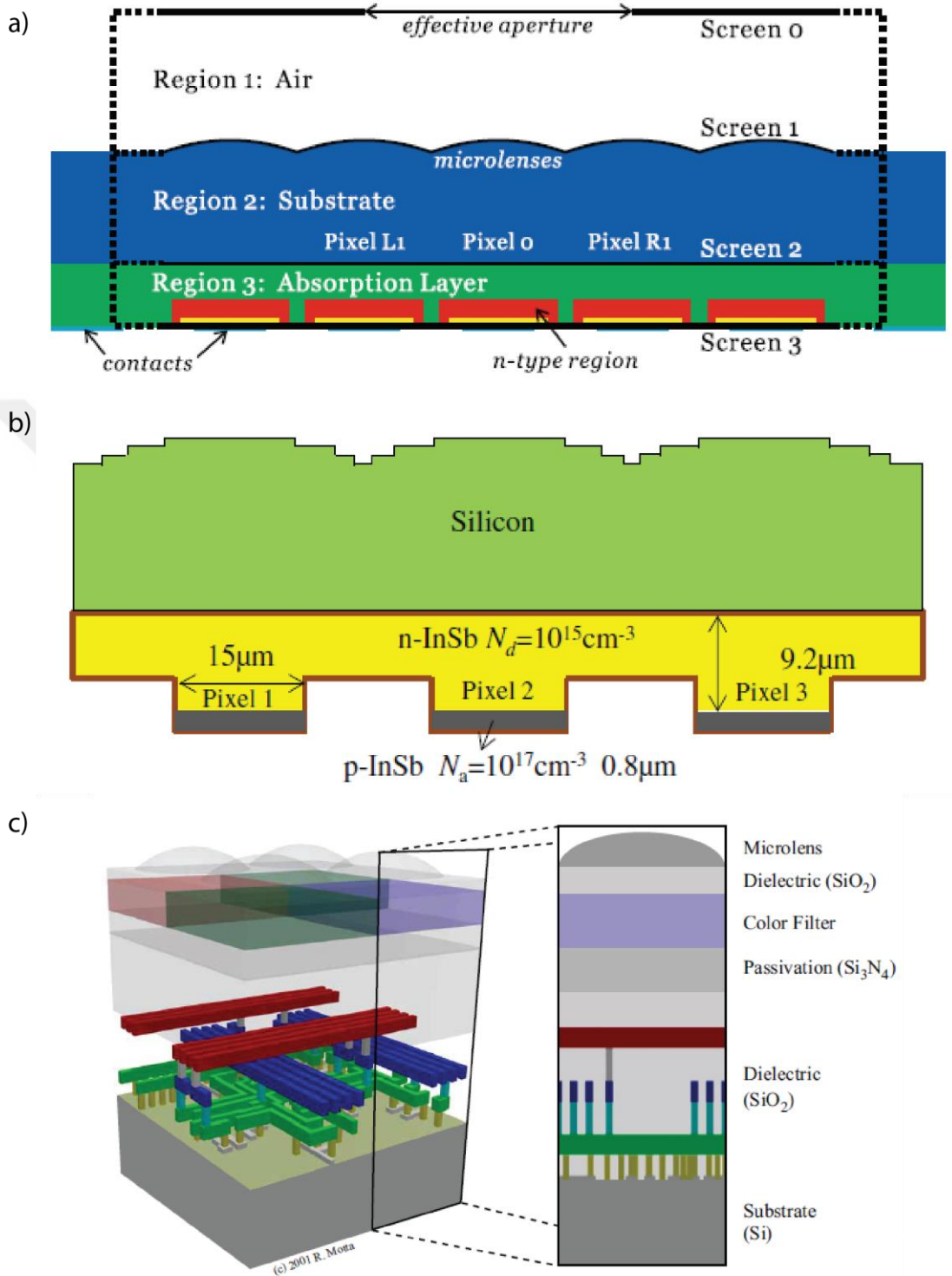
3.2.1 Giriş

Dalga boyu altı saçıcı yapıların iki boyutlu dizilimi ile oluşan metayüzeyler, genlik, polarizasyon ve fazın istenildiği gibi yönlendirilebilmesi sebebiyle modern optik sistemlere büyük fayda sağlayacaktır. Literatürde metayüzey tabanlı lens[49-51]

hologram[52-54] ve vorteks ışın üretici[55] yapıları yüksek optik etkileriyle sunulmuştur.

Kızıl ötesi spektrumunda (KOS) yapılan odak düzlemi dizileri (ODD) sivil ve askeri uygulamalarda önemli yere sahiptir. Yüksek çözünürlüklü ve kompakt boyutlar için yüksek doluluk oranıyla küçük piksel boyutları gereklidir. Ancak yüksek doluluk oranıyla piksel boyutlar küçülürken komşu pikseller arasında optical crosstalk artmaktadır. Bu nedenle geleneksel KOS ODD'lerde aberasyonların azaltılmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu durum f-number'ın küçülmesine sebebiyet verirken optical crosstalk'ın artmasına neden olmuştur[56]. Piksel boyutunun azalırken getirdiği dezavantajları ortadan kaldırmak için KOS ODD'lerle birlikte mesa-isolation metot gibi farklı yöntemler kullanılmıştır. Mesa-isolation metot piksellerin fiziksel olarak ayrılmasına dayanır. Birkaç piksele ciddi şekilde zarar veren bir aşındırma işlemi gerektirir. Mesa-izolasyon yönteminin bir örneği olarak, complementary metal oxide semiconductors (CMOS) performansının iyileştirilmesi ile ilgili daha önceki çalışmalar, ışık kılavuzlarının piksellerin içine yerleştirilmesine dayanmaktadır.[57] Bu durum, optik verimi artırarak her piksel içindeki ışığın hapsedilmesini artırır ve optical crosstalk'u azaltarak diğer piksellere sızmasını önler. Diğer yandan, metal dielektrik ara yüzündeki yansımalara dayalı ışık kılavuzu tasarımları, optik karışımların azaltılmasında başarılı bir performans sergilerken, metallerin doğal kaybı nedeniyle daha düşük optik verime sahip olmaktadır. Ayrıca, dikey olarak yönlendirilmiş metal kaplama ara yüzünün üretimi standart CMOS işlemi ile mümkün değildir ve bu nedenle yeni imalat metotlarına ihtiyaç duyulmaktadır. KOS ODD'ler için genel yaklaşımların şematik görselleri Şekil 3.5'de verilmiştir. Mikro lens dizileri ise ODD ve CMOS görüntü sensörü piksellerinin fill factor'ü arttırmak için kullanılır. Mikro lens dizileri piksel dizisinin ışığa duyarlı olmayan alanlarına düşmesine izin vermek yerine ışığı piksel bölgelerine yoğunlaştırmaya ve odaklamaya yararlar. KOS ODD'ler için farklı tiplerde mikro lens dizilerinin tasarımı şu ana kadar yapılmış birkaç çalışmada bildirilmiştir [58,60,56]. Küresel kırılma tipli mikro lens dizileri spot büyüklüğünü veya Airy diski azaltmış olsalar bile, komşu piksellerin merkezlerindeki birinci dereceden kırınım spotlarının ortaya çıkmasından dolayı zorluk yaşamaları sebebiyle optical crosstalk iyileştirilememiştir [58]. Bir diğer çalışmada, metalik MY lens dizilerinin % 1'den daha az bir optical crosstalk elde ettiği gösterilmiştir, ancak odaklanmış ışık gücünün gelen ışık gücüne oranı olarak tanımlanan odaklama verimi

çok düşüktür ($< 11\%$)[60]. Çünkü metalik metayüzey yapılarının ohmik kaybı ve polarizasyon bağımlı çalışmaları verimin düşmesine neden olmaktadır.



Şekil 3.5 : (a) Küresel kırılma tipli mikro lens dizisi şematığı [58], (b) KOE kullanılarak tasarlanmış InSb KOS ODD şematığı [59] (c) Mesa izolasyon yöntemi ile tasarlanmış bir lens dizisi [57].

Tezin bu bölümünde, KOS'da çalışan daha etkin, geniş bantlı, polarizasyon bağımsız dielektrik MY lens dizisi tabanlı ODD'lerin tasarım ve analizi sunulmuştur. Bu çalışmada, metalik metayüzeyler ve Huygens metayüzey yapılarına kıyasla, yüksek endeksli kontrast silikon kulelere dayanan çok daha yüksek iletim değerlerine sahip olan dielektrik metayüzey platformu kullanılması tercih edilmiştir. Böylelikle, düşük f# değeriyle bile yüksek odaklama verimliliği elde edilebilen bu yapılar ile tasarlanan lens dizilerini KOS ODD'lara entegre ederek, yüksek odaklama verimliliği elde edilmiştir. Fazı daha iyi örnekleyen ve optical crosstalk performansı daha iyi bir yapı tasarlanmıştır.

3.2.2 Tasarım yaklaşımı

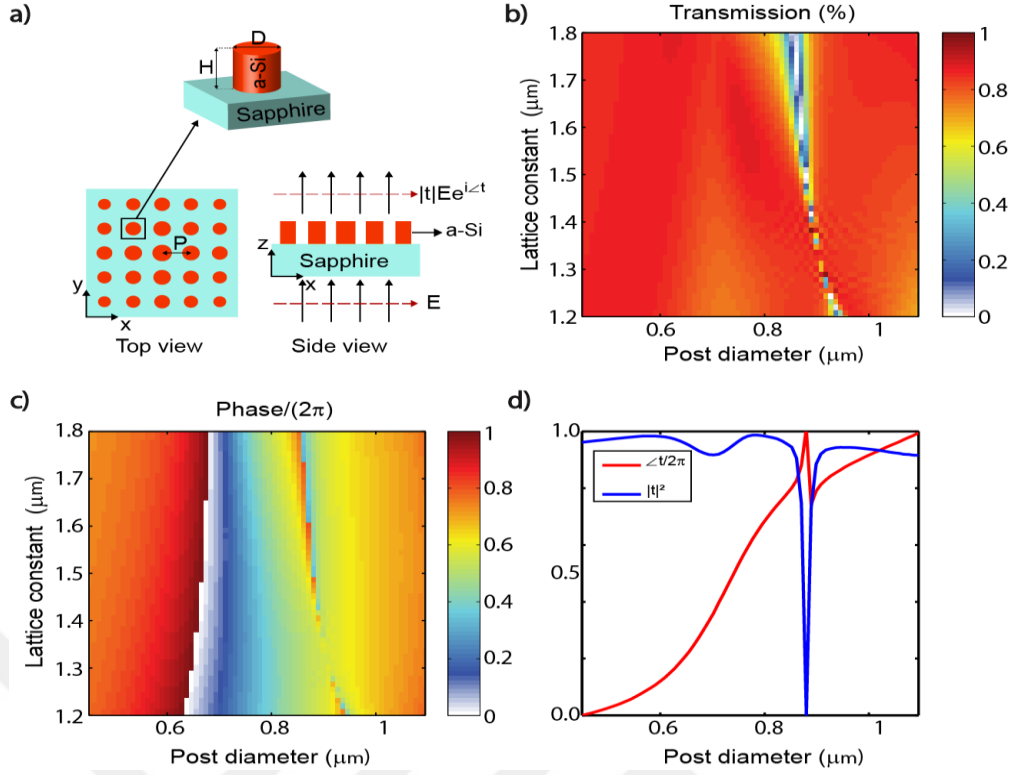
Metalens dışının tasarımı için Si post iletkenlik ve rezonans karakteristiği analiz edilmiştir. Si post ların farklı çaplarının oluşturduğu yapı safir alt taş üzerine kare örgü yapısı ile Şekil 3.5' de de görüldüğü gibi yerleştirilmiştir. Her bir post düşük nitelik faktörlü Fabry-Pérot rezonanslarını destekleyen dairesel kesit ile bir tepesi kesikli dalga kılavuzu gibi hareket eder.

Silikon Postların simülasyonu ve modellenmesi için FDTD hesaplatıcısı kullanılmıştır. KOS ODD tasarımı için 3.2 µm dalga boyunda post yüksekliği 1.92 µm ve periyodu 1.5 µm düşünülmüştür. A-Si refractive index bilgisi Palik[61] datadan 3.435 olarak alınmıştır. Safir alt taşının indisi 1.70 olarak alınmıştır. Post çaplarının değişimi yüksek iletimde tutulurken post yüksekliği de 0-2π faz aralığını sağlayacak şekilde tutulmalıdır.

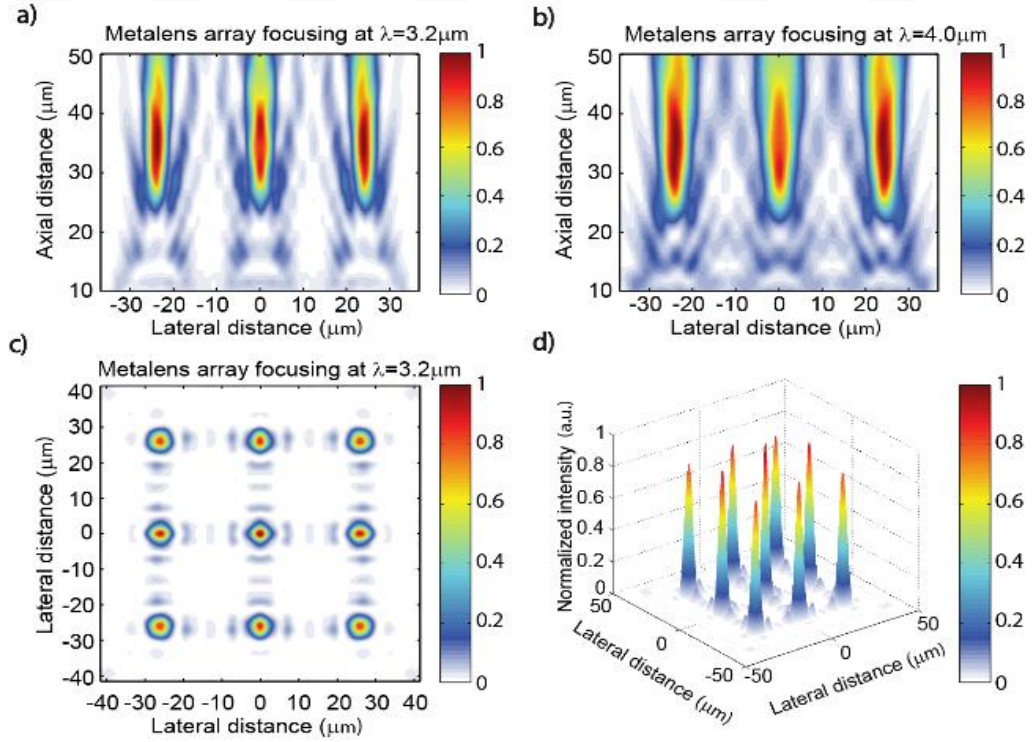
Metalensin faz profili denklem 3.2 ye göre çıkarılmıştır;

$$\varphi(x, y) = \frac{2\pi}{\lambda} \left(f - \sqrt{f^2 + x^2 + y^2} \right). \quad (3.2)$$

Tasarımdaki önemli noktalardan birisi, optical crosstalku azaltmak için f-number yüksek tutulmaya çalışılırken (örneğin 1.5), metalens tasarımıdaki fazın merkezden köşesine kadar en az π radian fark oluşturmasıdır. Bu nedenle tasarımda odak uzaklığı 30 µm dan 90 µm 'eye kadar çeşitlenirken açıklık 20 µm den 30 µm a kadar yapılmıştır.



Şekil 3.6 : (a) Safir alt taşın üzerine kare örgü yapısı ile yerleştirilmiş ($H=1.92 \mu\text{m}$, $P=1.50 \mu\text{m}$) silikon dizisi ile MY'in yapısı. (b) İletim yoğunluğu ve (c) faz, periyod ve Si postların çapına göre (d) $\lambda=3.2 \mu\text{m}$ dalgaboyu ve $P=1.50 \mu\text{m}$ periyoda karşılık farklı çaplarda Si postların faz ve iletim grafiği



Şekil 3.7 : 3×3 metalens dizisini odak düzlemleri (a) $3.2 \mu\text{m}$ ve (b) $4 \mu\text{m}$ dalga boyu ile tasarlanmış dizinin odak düzlemleri (c) ve (d) odak düzlemlerinin üstten ve 3D görüşü

3x3 metaller dizisi için Şekil 2 odaklanmış ışık yoğunluğunun ve odaklanmış ışık yoğunluğunun 3D görüntüsünün kesitini göstermektedir. Tepe yoğunluğu değerleri dizi düzleminde eşit olarak dağıldığı görünmektedir. ODD' nın optik çapraz-karışımı, point-spread-function (PSF) ile ilgilidir [58]. Böylece, önerilen dizilerin optical crosstalk analizi, komşu ve merkez pikselleri içindeki PSF dağılımlarının oranının hesaplanmasıyla gerçekleştirilebilir. Bu denklem aşağıda verilmiştir (Denklem 3.3).

$$Optical\ Crosstalk = 100 \times \frac{\iint_{A_{neighbour}} PSF(x,y) dx dy}{\iint_{A_{central}} PSF(x,y) dx dy} \quad (3.3).$$

Odaklama verimi sonuçları karşılaştırıldığında, yüksek kontrastlı dielektrik MY ($\geq\%$ 85), Mie-tipi dielektrik MY'den ($\geq\%$ 80) ve metalik MY'den ($\leq\%$ 11) daha iyi performans göstermiştir. Bu nedenle MY lens dizileri için daha pratik bir uygulama sunmuştur. Geliştirilmiş odaklama verimi, polarizasyon hassasiyetinin yokluğuna ve metalik yapıların içsel emilim kaybının ortadan kaldırılmasına bağlanabilir.[56,60]

Tüm etkiler düşünüldüğünde BÖ (Başarım Ölçüsü) aşağıdaki denklem ile hesaplanabilir (Denklem 3.4):

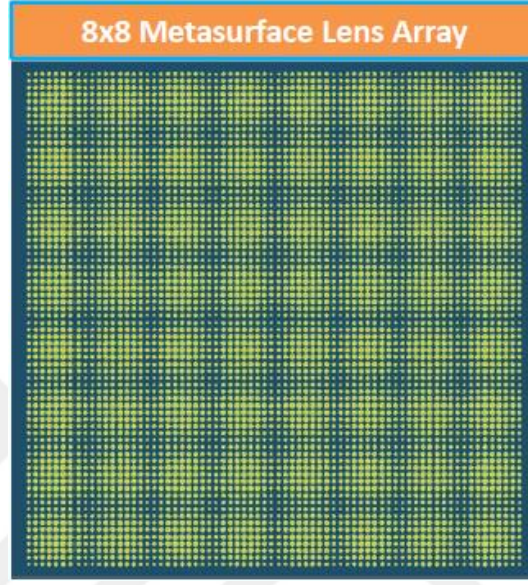
$$BÖ = \left[\frac{f/\#}{Optical\ Crosstalk} \right] \times \xi_{efficiency}. \quad (3.4)$$

Tasarım Denklem (3.4) tarafından verilen bu BÖ'nün maksimuma ulaşma hedefiyle tasarlanmış ve optimize edilmiştir. Metalik metayüzeyler optical crosstalku önemli ölçüde azaltmış olsalar bile, metalik MYler KOS ODD'lar çok zayıf odaklama veriminden dolayı en kötü BÖ'ne sahiptirler. Önerilen yüksek indeksli kontrast dielektrik MY, daha yüksek f-numarasına sahip düşük optical crosstalk değerlerine bağlı olarak en yüksek BÖ değerine sahiptir, bu da kırılma mikro lens dizisi ve geleneksel KOS ODD'ları ile mümkün değildir. Dikkat çekici bir şekilde, f-numarasının artması, görüntüleme sisteminin basit ve hafif yapılabileceği anlamına gelir. Aynı şekilde, metalik MY'e kıyasla önemli bir odaklama verimliliği iyileştirmesi, önerilen tasarımın da üstün olmasını sağlamaktadır.

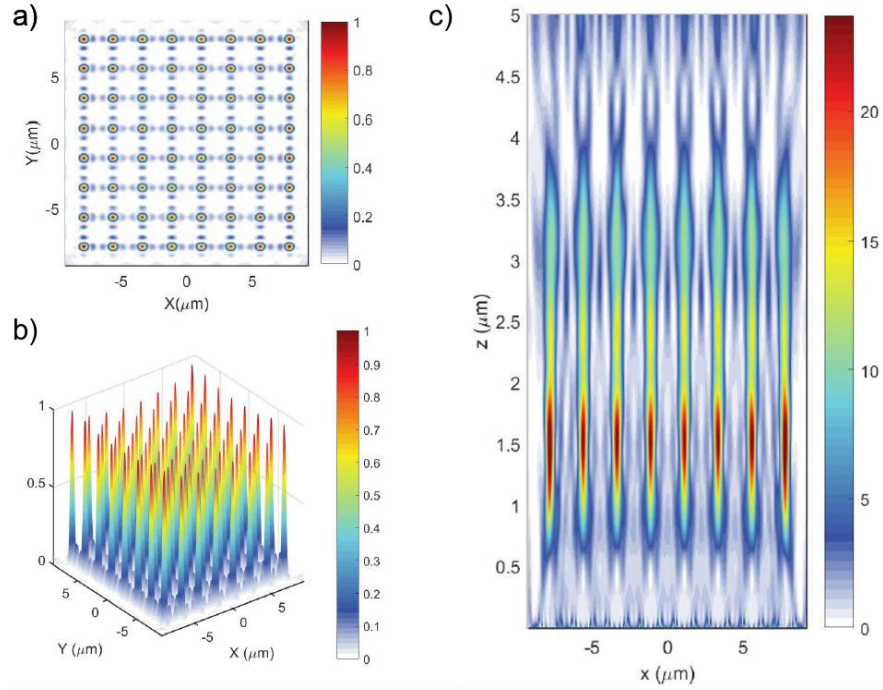
3.2.3 Gelecek çalışmalar

Yapılan bu çalışmayı genişletmek adına aynı metalens dizisi 8x8 olacak şekilde tekrar modellenmiştir. Bu sayede, sadece 3x3'lük lens dizilerinde değil daha geniş lens dizilerinde de sistemin çalıştığı gösterilmek istenmiştir. Şekil 3.8'de metalens dizisinin genel görünümü görülmektedir.

Tasarım yaklaşımı bir önceki bölümde yapılan 3x3'lük lens dizisi ile aynıdır. Sadece daha fazla metalens yan yana getirilerek 8x8'lik bir lens dizisi elde edilmiştir ve sonuçları analiz edilmiştir. Burada dizi içerisindeki bir metalensin boyutu 2 μm dir. Bu da CCD ve CMOS sensörlerinin piksel boyutuna yakındır. Metalenslerin odak uzaklıkları 1.8 μm dir. Bu metalens dizisine ait odaklanma grafikleri Şekil 3.9'da görülmektedir.



Şekil 3.8 : 8x8 Metalens Dizisi



Şekil 3.9 : (a) ve (b) odak düzlemlerinin üstten ve 3B görünüşü (c) 3.2 μm dalga boyu ile tasarlanmış dizinin odak düzlemleri

3.2.4 Sonuç

Sonuç olarak bu çalışma ile geniş bantta, yüksek verimlilikte, düşük crosstalk sahibi metalens dizisi önerilmiş ve numerik olarak gösterilmiştir. Tasarımların odaklama verimliliği ve optical crosstalk performansları, numerik yöntem ile hesaplatıcı kullanılarak analiz edilmiş ve elde edilen sonuçlar, metalik MYler, Huygens MY, kırılma mikro lensleri ve geleneksel ODD'lara dayanan metalens dizilerinin performansları ile karşılaştırılmıştır. Önerilen tasarımın optical crosstalk oranı % 2.8 seviyesinde tutulurken diğer tüm KOS ODD tiplerinin B değerinden daha iyi performans göstermiş ve yüksek odaklama verimliliği (\geq % 85) elde edilmiştir.



4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez kapsamında, meta malzemeler, metayüzey ve metalensler ile ilgili literatür taramasına yer verilerek, günümüzde metalens optik sistemlerinin ne aşamada olduğu vurgulanmıştır. Literatürde detaylı tasarım aşamalarına yer verilmediği tespit edilerek çeşitli metalens tasarım metotları bu tez kapsamında aktarılmıştır. Ayrıca farklı metalens topolojilerinden hangisinin daha verimli olduğuna dair bilginin literatürde eksikliği de fark edilmiştir. Bu nedenle bu tez kapsamında farklı metalens topolojileri tasarlanarak karşılaştırma yapılmıştır. Işın analizi ve FDTD birleştirilerek yeni bir metalens tasarım aracı olarak kullanılabileceği önerilmiştir.

Bu tez kapsamında, iki farklı uygulama alanı için metalensler ile çözümler sunulmuştur. İlk olarak günümüzde geleneksel optik tasarım yöntemleri ile üretilen zoom lenslerin metalensler ile gerçekleştirilmesi tasarım ortamında gerçekleştirilmiştir. İkinci olarak ise kızılötesi spektrumda çalışan detektörler için metalens dizileri önerilmiştir. Bu iki farklı uygulama alanı için önerilen metalens çözümlerinin verimliliklerinin oldukça yüksek olduğu gösterilmiştir. Metalensler ile yapılan zoom lens tasarımında geleneksel optikte olduğu gibi lenslerin konumlarının değişmesi ile farklı odak noktaları elde edilmiştir. Her bir odak uzaklığı için sistemin verimlilikleri sırasıyla %61.2, %53.1 ve %69.8 olarak elde edilmiştir. Metalens dizisi çözümünde odaklama verimliliği ve optical crosstalk performansları, nümerik yöntemler ile analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar metalik MY'ler, Hyugen MY, kırılma mikro lensleri ve geleneksel ODD'ler ile karşılaştırılmıştır. Önerilen tasarım ile optical crosstalk oranı %2.8 seviyesinde tutulmuş ve yüksek odak verimliliği (\geq % 85) elde edilmiştir.



KAYNAKLAR

- [1] **N. Yu, F. Capasso**, (2014). Flat optics with designer metasurfaces, *Nat. Mater.* 13 139–150.
- [2] **W.T. Chen, M. Khorasaninejad, A.Y. Zhu, J. Oh, R. Devlin, F. Capasso**, (2016). Generation of wavelength-independent and sub-wavelength Bessel beams by meta-axicons, *1*, 7–8.
- [3] **M. Khorasaninejad, W.T. Chen, A.Y. Zhu, J. Oh, R.C. Devlin, C. Roques-Carmes, I. Mishra, F. Capasso**, (2016). Visible Wavelength Planar Metalenses based on Titanium Dioxide, *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* 1–1.
- [4] **X. Ding, F. Monticone, K. Zhang, L. Zhang, D. Gao, S. Nawaz Burokur, A. De Lustrac, Q. Wu, C.W. Qiu, A. Alù**, (2015). Ultrathin pancharatnam-berry metasurface with maximal cross-polarization efficiency, *Adv. Mater.* 27, 1195–1200.
- [5] **F.C. F. Aieta, P. Genevet, M.A. Kats, N. Yu, R. Blanchard, Z. Gaburro**, (2012). Aberration-Free Ultrathin Flat Lenses and Axicons at Telecom Wavelengths Based on Plasmonic Metasurfaces, *Nano Lett.* 12, 4932.
- [6] **A. Forouzmmand, S. Tao, S. Jafar-Zanjani, J. Cheng, M.M. Salary, H. Mosallaei**, (2016). Double split-loop resonators as building blocks of metasurfaces for light manipulation: bending, focusing, and flat-top generation, *J. Opt. Soc. Am. B.* 33, 1411.
- [7] **A. Pors, O. Albrechtsen, I.P. Radko, S.I. Bozhevolnyi**, (2013). Gap plasmon-based metasurfaces for total control of reflected light., *Sci. Rep.* 3, 2155.
- [8] **W.T. Chen, K.Y. Yang, C.M. Wang, Y.W. Huang, G. Sun, I. Da Chiang, C.Y. Liao, W.L. Hsu, H.T. Lin, S. Sun, L. Zhou, A.Q. Liu, D.P. Tsai**, (2014). High-efficiency broadband meta-hologram with polarization-controlled dual images, *Nano Lett.* 14, 225–230.
- [9] **J. Cheng, D. Ansari-Oghol-Beig, H. Mosallaei**, (2014). Wave manipulation with designer dielectric metasurfaces, *Opt Lett.* 39, 6285–6288.
- [10] **M. Decker, I. Staude, M. Falkner, J. Dominguez, D.N. Neshev, I. Brener, T. Pertsch, Y.S. Kivshar**, (2015). High-Efficiency Dielectric Huygens' Surfaces, *Adv. Opt. Mater.* 3, 813–820.
- [11] **A. Özdemir, Z. Hayran, Y. Takashima, H. Kurt**, (2017). Polarization independent high transmission large numerical aperture laser beam focusing and deflection by dielectric Huygens' metasurfaces, (n.d.).
- [12] **I. Staude, A.E. Miroshnichenko, M. Decker, N.T. Fofang, S. Liu, E. Gonzales, J. Dominguez, T.S. Luk, D.N. Neshev, I. Brener, Y. Kivshar**, (2013). Tailoring directional scattering through magnetic and electric

resonances in subwavelength silicon nanodisks, *ACS Nano*. 7, 7824–7832.

- [13] **M. Khorasaninejad, A.Y. Zhu, C. Roques-Carmes, W.T. Chen, J. Oh, I. Mishra, R.C. Devlin, F. Capasso**, (2016). Polarization-Insensitive Metalenses at Visible Wavelengths, *Nano Lett.* 16, 7229–7234. doi:10.1021/acs.nanolett.6b03626.
- [14] **A. Arbabi, Y. Horie, A.J. Ball, M. Bagheri, A. Faraon**, (2015). Subwavelength-thick Lenses with High Numerical Apertures and Large Efficiency Based on High Contrast Transmitarrays, *Nat. Commun.* 6, 1–10. doi:10.1038/ncomms8069.
- [15] **Zhenpeng Zhou, Juntao Li, Rongbin Su, Beimeng Yao, Hanlin Fang, Kezheng Li, Lidan Zhou, Jin Liu, Daan Stellinga, Christopher P. Reardon, Thomas F. Krauss, and Xuehua Wang**, (2017). Efficient Silicon Metasurfaces for Visible Light *ACS Photonics* 2017 4 (3), 544–551 DOI: 10.1021/acsp Photonics.6b00740
- [16] **M. Born and E. Wolf**, (1980). *Principles of Optics* (Pergamon).
- [17] **D. Jackson**, (1999). *Classical Electrodynamics*, 3rd ed. (Wiley).
- [18] **W. Stork, N. Streibl, H. Haidner, and P. Kipfer**, (1991). “Artificial distributed index media fabricated by zero-order gratings,” *Opt. Lett.* 16, 1921.
- [19] **M. W. Farn**, (1992). “Binary gratings with increased efficiency,” *Appl. Opt.* 31, 4453–4458.
- [20] **P. Lalanne**, (1999). “Waveguiding in blazed-binary diffractive elements,” *J. Opt. Soc. Am. A* 16, 2517–2520.
- [21] **P. Lalanne, S. Astilean, P. Chavel, E. Cambril, and H. Launois**, (1999). “Design and fabrication of blazed binary diffractive elements with sampling periods smaller than the structural cutoff,” *J. Opt. Soc. Am. A* 16, 1143–1156.
- [22] **D. Berry, R. Malech, and W. Kennedy**, (2001). “The reflectarray antenna,” *IEEE Trans. Antennas Propag.* 11, 645–651 (1963). **J. A. Encinar**, “Design of two-layer printed reflectarrays using patches of variable size,” *IEEE Trans. Antennas Propag.* 49, 1403–1410.
- [23] **D. M. Pozar and T. A. Metzler**, (1993). “Analysis of a reflectarray antenna using microstrip patches of variable size,” *Electron. Lett.* 29, 657–658.
- [24] **J. Huang**, (2005). *Reflectarray Antenna* (Wiley).
- [25] **J. A. Encinar**, (2001). “Design of two-layer printed reflectarrays using patches of variable size,” *IEEE Trans. Antennas Propag.* 49, 1403–1410.
- [26] **N. Yu, P. Genevet, M. A. Kats, F. Aieta, J.-P. Tetienne, F. Capasso, and Z. Gaburro**, (2011). “Light propagation with phase discontinuities: generalized laws of reflection and refraction,” *Science* 334, 333–337.
- [27] **E. H. Khoo, E. P. Li, and K. B. Crozier**, (2011). “Plasmonic wave plate based on subwavelength nanoslits,” *Opt. Lett.* 36, 2498–2500.

- [28] **Y. Zhao and A. Alù**, (2011). “Manipulating light polarization with ultrathin plasmonic metasurfaces,” *Phys. Rev. B* 84, 205428.
- [29] **F. Aieta, P. Genevet, N. F. Yu, M. A. Kats, Z. Gaburro, and F. Capasso**, (2012). “Out-of-plane reflection and refraction of light by anisotropic optical antenna metasurfaces with phase discontinuities,” *Nano Lett.* 12, 1702–1706.
- [30] **P. Genevet, N. Yu, F. Aieta, J. Lin, M. A. Kats, R. Blanchard, M. O. Scully, Z. Gaburro, and F. Capasso**, (2012). “Ultra-thin plasmonic optical vortex plate based on phase discontinuities,” *Appl. Phys. Lett.* 100, 013101.
- [31] **E. Karimi, S. A. Schulz, I. De Leon, H. Qassim, J. Upham, and R. W. Boyd**, (2014). “Generating optical orbital angular momentum at visible wavelengths using a plasmonic metasurface,” *Light Sci. Appl.* 3, E167.
- [32] **Y. Yang, W. Wang, P. Moitra, I. I. Kravchenko, D. P. Briggs, and J. Valentine**, (2014). “Dielectric meta-reflectarray for broadband linear polarization conversion and optical vortex generation,” *Nano Lett.* 14, 1394–1399.
- [33] **A. Pors, M. G. Nielsen, R. L. Eriksen, and S. I. Bozhevolnyi**, (2013). “Broadband focusing flat mirrors based on plasmonic gradient metasurfaces,” *Nano Lett.* 13, 829–834.
- [34] **A. V. Kildishev, A. Boltasseva, and V. M. Shalaev**, (2013). “Planar photonics with metasurfaces,” *Science* 339, 1232009.
- [35] **N. Yu, P. Genevet, F. Aieta, M. Kats, R. Blanchard, G. Aoust, J.-P. Tetienne, Z. Gaburro, and F. Capasso**, (2013). “Flat optics: controlling wavefronts with optical antenna metasurfaces,” *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* 19, 4700423.
- [36] **H. Liu, M. Q. Mehmood, K. Huang, L. Ke, H. Ye, P. Genevet, M. Zhang, A. Danner, S. P. Yeo, C.-W. Qiu, and J. Teng**, (2014). “Twisted focusing of optical vortices with broadband flat spiral zone plates,” *Adv. Opt. Mater.* 2, 1193–1198.
- [37] **M. A. Kats, P. Genevet, G. Aoust, N. Yu, R. Blanchard, F. Aieta, Z. Gaburro, and F. Capasso**, (2012). “Giant birefringence in optical antenna arrays with widely tailorable optical anisotropy,” *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 109, 12364–12368.
- [38] **C. Huygens**, 1690. *Traite De La Lumiere* (Van Der Aa).
- [39] **P. Genevet, F. Capasso, F. Aieta, M. Khorasaninejad, and R. Devlin**, (2017). “Recent advances in planar optics: from plasmonic to dielectric metasurfaces,” *Optica* 4, 139-152.
- [40] **A. Arbabi, R. M. Briggs, Y. Horie, M. Bagheri, and A. Faraon**, (2015). “Efficient dielectric metasurface collimating lenses for mid-infrared quantum cascade lasers,” *Opt. Express* 23, 33310–33317.
- [41] **C. F. R. Mateus, M. C. Y. Huang, L. Chen, C. J. Chang-Hasnain, and Y. Suzuki**, (2004). “Broad-band mirror (1.12–1.62 μm) using a subwavelength grating,” *IEEE Photon. Technol. Lett.* 16, 1676–1678.

- [42] **G. Zheng, H. Mühlenbernd, M. Kenney, G. Li, T. Zentgraf, and S. Zhang**, (2015). “Metasurface holograms reaching 80% efficiency,” *Nat. Nanotechnol.* 10, 308–312.
- [43] **M. Khorasaninejad, W. T. Chen, R. C. Devlin, J. Oh, A. Y. Zhu, and F. Capasso**, (2016). “Metalenses at visible wavelengths: diffraction-limited focusing and subwavelength resolution imaging,” *Science* 352, 1190–1194.
- [44] **D. Lin, P. Fan, E. Hasman, and M. Brongersma**, (2014). “Dielectric gradient metasurface optical elements,” *Science* 345, 298–302.
- [45] **Lumerical Inc.**, <http://www.lumerical.com/tcad-products/fdtd/>
- [46] **P. Wang, N. Mohammad, and R. Menon**, (2016). “Chromatic-aberration corrected diffractive lenses for ultra-broadband focusing,” *Sci. Rep.* 6, 21545.
- [47] **A. Arbabi, E. Arbabi, S. M. Kamali, Y. Horie, S. Han, and A. Faraon**, (2016). “Miniature optical planar camera based on a wide-angle metasurface doublet corrected for monochromatic aberrations,” *Nat. Commun.* 7, 13682.
- [48] **Zemax LLC**, Zemax OpticStudio
- [49] **M. Khorasaninejad, A. Y. Zhu, C. Roques-Carmes, W. T. Chen, J. Oh, I. Mishra, R. C. Devlin, F. Capasso**, “Polarization insensitive metalens at visible wavelengths.” *Nano Lett.* 2016, 16, 7229.
- [50] **M. Khorasaninejad, W. T. Chen, R. C. Devlin, J. Oh, A. Y. Zhu, and F. Capasso**, (2016). “Metalenses at visible wavelengths: Diffraction-limited focusing and subwavelength resolution imaging,” *Science* (80-.). 352, 1190–1194.
- [51] **A. Arbabi, Y. Horie, A. J. Ball, M. Bagheri, and A. Faraon**, (2015). “Sub wavelength thick lenses with high numerical apertures and large efficiency based on high-contrast transmitarrays,” *Nat. Commun.* 6, 7069.
- [52] **D. Wintz, P. Genevet, A. Ambrosio, A. Woolf, F. Capasso**, *Nano Lett.* 2015, 15, 3585.
- [53] **W. Zhao, H. Jiang, B. Liu, J. Song, Y. Jiang, C. Tang, J. Li**, *Sci. Rep.* 2016, 6, 30613.
- [54] **G. Zheng, H. Mühlenbernd, M. Kenney, G. Li, T. Zentgraf, and S. Zhang**, (2015). “Metasurface holograms reaching 80% efficiency,” *Nat. Nanotechnol.* 10, 308–312.
- [55] **X. Cai, J. Wang, M. J. Strain, B. Johnson-Morris, J. Zhu, M. Sorel, J. L. O’Brien, M. G. Thompson, S. Yu**, *Science* (80-.). 2012, 338, 363.
- [56] **O. Akin and H. V. Demir**, (2017). “High-efficiency low-crosstalk dielectric metasurfaces of mid-wave infrared focal plane arrays,” *Appl. Phys. Lett.* 110, 143106.
- [57] **C. C. Fesenmaier, Y. Huo, and P. B. Catrysse**, “**Fesenmaier, Christian C., Yijie Huo, and Peter B. Catrysse**, (2008).”Optical confinement

methods for continued scaling of CMOS image sensor pixels,” Opt. Express 16, 20457.

- [58] **Y. Li, Z. H. Ye, W. Da Hu, W. Lei, Y. L. Gao, K. He, H. Hua, P. Zhang, Y. Y. Chen, C. Lin, X. N. Hu, R. J. Ding, and L. He**, (2014). "Numerical simulation of refractive-microlensed HgCdTe infrared focal plane arrays operating in optical systems,” J. Electron. Mater. 43, 2879–2887.
- [59] **Bai, J., Hu, W., Guo, N., et al.** (2014) Journal of Elec Materi (2014) 43: 2795.
- [60] **O. Akın and H. V. Demir**, (2015). "Mid-wave infrared metasurface microlensed focal plane array for optical crosstalk suppression," Opt. Express 23, 27020.
- [61]. **E. Palik**, Handbook of Optical Constants of Solids, 1997.





ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Fehim Taha BAĞCI
Uyruğu : T.C.
Doğum Tarihi ve Yeri : 23.10.1992 ANKARA
E-posta : bagcitaha@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2015, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği
- **Yükseklisans** : 2018, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

Yıl	Yer	Görev
2015-Günümüz	ASELSAN A.Ş.	Optik Tasarım Mühendisi

YABANCI DİL: İngilizce, Almanca

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **N. Yılmaz, F. T. Bağcı, A. Özdemir, Y. Takashima and H. Kurt**, (2018) “All-dielectric metasurface lenses for focal plane arrays operating in mid-wave infrared spectrum”, SPIE Optics + Photonics
- **N. Yılmaz, F. T. Bağcı, C. Sümer, I. H. Demircioğlu, B. Yılmaz and H. Kurt**, (2017) “Metasurface: Multi-Element Optical System Design”, NUSOD