

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

**YAPAY ZEKA İLE METAMALZEME VE METAYÜZEY YAPILARININ**  
**TASARIMI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Fırat Cem SAVAŞ**

**Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı**

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

**MAYIS 2022**



## 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.

Fırat Cem SAVAŞ



## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

YAPAY ZEKA İLE METAMALZEME VE METAYÜZEY YAPILARININ

TASARIMI

Fırat Cem SAVAŞ

TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Hamza KURT

Tarih: Nisan 2022

Metamalzemeler, doğal yollarla oluşturulamayacak, negatif veya sıfır kırılma indisi, görünmezlik ve perdeleme gibi yeni optik niteliklere sahip malzemelere erişme imkanı sağlayabilmektedir. Metamalzemelere bu özellikleri kazandırabilmek için gerekli Maxwell denklemlerinin çözümü ve süreç optimizasyonunun deneme-yanılma sistemine bağımlı olması insan faktörünün yeteneklerinin kısıtıyla birleşince yeni optik özellikli metamalzemelerin gelişimi yavaş ilerlemekteydi. Son on yılda kripto para evreninin güdümüyle gelişen ekran kartları yapay zeka ve derin öğrenme evrenini geliştirmiştir. Bu gelişim sonlu eleman modelleme, sonlu fark zaman alanı yöntemleri ile geliştirilen algoritmaların derin öğrenme ve yapay zeka uygulamalarıyla hızlandırılmasına ve yeni metamalzeme keşfetme sürecinin hızlanmasına yardımcı olmuştur.

Yüksek odaklama verimliliğine sahip geniş bant, düşük indisli lens tasarımına yönelik hedef öncelikli algoritma kullanılarak 3.2um-16um tasarım alanında 10.000 iterasyon yapılarak 1300-1700nm dalga boylarında akromatik lens Lumerical programı ile %80

verimlilik ve 0.7 açıklık ile başarılmıştır. Nano yapının üretim imkansızlığını gidermek için Bruggeman uygulaması yapılarak yine %80 verimlilik ve 0.7 açıklık ile başarılmıştır. Simulasyon verileri 13.300 kat büyütülerek üretilerek test edilmiş ve %65 verimlilik 0.71 Enine Elektrik ve 0.69 Enine Manyetik polarizasyonda başarılmıştır. Yine yüksek indisli lens tasarımı hedef öncelikli algoritma ile yapılmış ve 0.8 $\mu$ m-9.6 $\mu$ m tasarım alanında 1.2 $\mu$ m odak uzaklığı mesafesinde 1.86 açıklık değeri ile tasarlanmış ve tasarım parametrelerinden yalnızca %4 verim farkı ile üretilip denenmiştir. SiO<sub>2</sub> yüzey üzerine TiO<sub>2</sub> silindirler kullanılarak tasarlanmak istenen bir ışın bölücü için Lumerical programıyla 13767 simulasyon bir hafta gibi uzun bir sürede oluşturulmuştur. Bu verilerden 11014'ü derin öğrenme algoritmalarıyla çoğaltılarak Lumerical programında 60 yıl sürecek 6.2milyon veri 1 saat gibi bir sürede oluşturularak silindirik yapıların boyutları belirlenerek ışın bölücü tasarlanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Tersine tasarım, Hedef öncelikli algoritma, Metayüzey, Derin öğrenme, Yapay zeka.

## **ABSTRACT**

Master of Science

### **DESIGN WITH ARTIFICIAL INTELLIGENCE METASURFACE BASED STRUCTURE**

Fırat Cem SAVAŞ

TOBB University of Economics and Technology

Institute of Natural and Applied Sciences

Department of Electrical and Electronics Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Hamza KURT

Date: April 2022

Metamaterials can provide access to materials that cannot be formed naturally, with new optical properties such as negative or zero refractive index, invisibility, and shielding. The development of new optical metamaterials was progressing slowly, when the solution of Maxwell's equations required to provide these properties to metamaterials and the dependence of process optimization on the trial-and-error system were combined with the limitations of human factor capabilities. Graphic cards, which have developed under the guidance of the crypto money universe in the last ten years, have developed the artificial intelligence and deep learning universe. This development has helped to accelerate the algorithms developed with finite element modeling, finite difference time domain methods with deep learning and artificial intelligence applications, and accelerate the process of discovering new metamaterials.

By using the target priority algorithm for high focusing efficiency wideband, low index lens design, 10,000 iterations were made in the 3.2 $\mu$ m-16 $\mu$ m design area, and the

achromatic lens at 1300-1700nm wavelengths was achieved with the Lumerical program with 80% efficiency and 0.7 aperture. In order to eliminate the impossibility of production of the nanostructure, Bruggeman application was performed, again with 80% efficiency and 0.7 aperture. The simulation data was produced at 13,300 times magnification and tested, and 65% efficiency was achieved at 0.71 Transverse Electric and 0.69 Transverse Magnetic polarization. Again, high index lens design was made with target priority algorithm and designed with 1.86 aperture value at 1.2um focal length in 0.8um-9.6um design area and produced and tested with only 4% efficiency difference from design parameters. For a beam splitter to be designed using TiO<sub>2</sub> cylinders on a SiO<sub>2</sub> surface, 13767 simulations were created in a long period of one week with the Lumerical program. By multiplying 11014 of these data with deep learning algorithms, 6.2 million data that will take 60 years in the Lumerical program were created in 1 hour, and the dimensions of the cylindrical structures were determined and the beam splitter was designed.

**Keywords:** Inverse design, Objective-First algorithm, Metasurface, Deep learning, Artificial intelligence



## TEŞEKKÜR

İlk olarak, yüksek lisans sürecim boyunca bana yol gösteren, değerli vaktilerini, desteklerini ve emeklerini esirgemeyen hocalarım Prof. Dr. Hamza KURT'a teőekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Beni bugüne kadar hep destekleyen aileme teşekkür ederim. Bu süreçte bana hep yardımcı olan labaratuvar arkadaşım Berkay Neőeli ve ev arkadaşım Abdullah Eyidoğan başta olmak üzere İpek Anıl Atalay, Hasan Alper Güneő, Nazmi Yılmaz, Ahmet Nazım Bulal, Murat őahin, Abdulaziz Yusuf Yılmaz ve diğer tüm TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Nanofotonik Araştırma Grubu üyelerine teşekkür ederim.

Son olarak, yüksek lisansım sürecinde bana sağladığı burs nedeniyle TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi'ne teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
<b>ÖZET</b> .....	v
<b>ABSTRACT</b> .....	vii
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	ix
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	x
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b> .....	xii
<b>ÇİZELGE LİSTESİ</b> .....	xiii
<b>KISALTMALAR</b> .....	xiv
<b>SEMBOL LİSTESİ</b> .....	xv
<b>1. GİRİŞ</b> .....	1
1.1 Metayüzeyler .....	1
1.2 Metayüzey Tasarımına Yapay Zekanın Uygulanması .....	3
<b>2.KULLANILAN TASARIM YÖNTEMLERİ</b> .....	7
2.1 Yapay Sinir Ağları.....	7
2.1.1 Yapay sinir ağları yapısı.....	7
2.1.2 Aktivasyon fonksiyonları .....	8
2.1.3 Hiperparametreler.....	10
2.1.3.1 Öğrenme hızı .....	10
2.1.3.2 Katman sayısı ve katman boyutu .....	11
2.1.3.3 Veri Boyutu .....	11
2.1.4 Sinir Ağları Tipleri .....	12
2.1.4.1 Tam bağlı sinir ağları .....	13
2.1.4.2 Evrimsel sinir ağları.....	13
2.1.5 Eğitim Yöntemleri .....	14
2.1.5.1 Aktarım öğrenimi .....	14
2.1.5.2 Toplu normalleştirme .....	14
2.1.5.3 Seyreltme.....	14
2.2 Hedef Öncelikli Algoritma .....	15
<b>3. YÜKSEK ODAKLAMA VERİMLİLİĞİNE SAHİP GENİŞ BANT, POLARİZASYON BAĞIMSIZ AKROMATİK DÜŞÜK İNDİSLİ LENS TASARIMI</b> .....	19
<b>4. YÜKSEK ODAKLAMA VERİMLİLİĞİNE SAHİP GENİŞ BANT, POLARİZASYON BAĞIMSIZ AKROMATİK YÜKSEK İNDİSLİ LENS TASARIMI</b> .....	29
<b>5. DERİN ÖĞRENME YARDIMIYLA METAYÜZEY TABANLI POLARİZASYON BAĞIMSIZ IŞIN BÖLÜCÜ TASARIMI</b> .....	35
5.1 Işın Bölücüler .....	35
5.2 Tasarım Aşaması ve Teorik Açıklaması.....	36
<b>5. SONUÇ VE ÖNERİLER</b> .....	41
<b>KAYNAKLAR</b> .....	43
<b>ÖZGEÇMİŞ</b> .....	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.



## ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1 : Yapay zekanın fotonik alanına uygulamaları. ....	4
Şekil 2.1 : Sinir ağı yapısı örnek şematiği.....	6
Şekil 2.2 : Sigmoid Aktivasyon Fonksiyonu.....	7
Şekil 2.3 : Tanh Aktivasyon Fonksiyonu .....	7
Şekil 2.4 : Relu Aktivasyon Fonksiyonu.....	8
Şekil 2.5 : Leaky ReLU Aktivasyon Fonksiyonu .....	8
Şekil 2.6 : Farklı sinir ağı yapıları.....	11
Şekil 3.1 : Tasarlanacak lens yapısının tasarım şematiği.....	18
Şekil 3.2 : a) Lens yapısı b,c) Odaklama ve yoğunluk grafiği d) Odak uzaklığı, odaklama verimliliği ve FWHM ölçütü grafikleri.....	19
Şekil 3.3 : a,b,c) Bruggeman EMT uygulaması illüstrasyonu, d) EMT sonucu lens yapıları .....	21
Şekil 3.4 : Bruggeman EMT ile elde edilen lens yapısının a) Odaklama gücü b) Yoğunluk Grafikleri c) Odak uzaklığı d) Odaklama Verimliliği e) FWHM grafiği.....	22
Şekil 3.5 : Bruggeman EMT ile elde edilen lens yapısının farklı kalınlıklardaki a) Odak Uzaklığı b) Odaklama Verimliliği c) TE ve TM için Odak uzunluğu grafiği d) TE ve TM için Odaklama Verimliliği e) FWHM grafiği. ....	24
Şekil 3.6 : Deneyin şematik görünümü, Üretilen lens ve deney sonuçları.....	25
Şekil 4.1 : a) Silikon bazlı lens yapısı b,c) Odak Gücü ve Yoğunluk Grafiği d) Odak Uzaklığının Dalga Boyuna göre değişimi e) Odaklama verimliliği f) FWHM grafiği.....	28
Şekil 4.2 : Bruggeman EMT ile elde edilen a) Silikon bazlı lens yapısı b,c) Odak Gücü ve Yoğunluk Grafiği d) Odak Uzaklığının Dalga Boyuna göre değişimi e) Odaklama verimliliği f) FWHM grafiği.....	29
Şekil 5.1 : Yapay Sinir ağı yardımıyla tasarlanacak yapı ve parametreleri .....	34
Şekil 5.2 : Yapay Sinir Ağı yapısı.....	35
Şekil 5.3 : Tersine tasarım için kullanılacak tandem yapısı şematiği .....	36
Şekil 5.4 : Derin öğrenme yardımıyla tasarlanan ışın bölücünün simulasyon sonucu .....	37

## ÇİZELGE LİSTESİ

### Sayfa

- Çizelge 5.1 : Lenstekteki ilk 24 hücre için hesaplanan yarıçap değerleri (nm).. ..... 30  
Çizelge 5.2 : Yapay sinir ağı katmanları, nöron sayıları ve aktivasyon fonksiyonları... 35



## KISALTMALAR

<b>2D</b>	: İki Boyutlu
<b>3D</b>	: Üç Boyutlu
<b>CMOS</b>	: Tamamlayıcı Metal Oksit Yarı İletken (Complementary Metal Oxide Semiconductor)
<b>DNN</b>	: Derin Sinir Ağları (Deep Neural Network)
<b>EMT</b>	: Etkili Ortam Teorisi (Effective Medium Theory)
<b>FDM</b>	: Eriyik Yığıma Modellemesi (Fused Deposition Modeling )
<b>FDTD</b>	: Sonlu Fark Zaman Boyutu (Finite Difference Time Domain)
<b>FWHM</b>	: Yarı Güçteki Bant Genişliği (Full Width Half Maximum)
<b>GRIN</b>	: Derecelendirilmiş Indis Profili (Gradient-index)
<b>NA</b>	: Sayısal Açıklık (Numerical Aperture)
<b>OB-1</b>	: Hedef Öncelikli Algoritma (Objective-First Algorithm)
<b>PLA</b>	: Polilaktik Asit (Polylactic Acid)
<b>PML</b>	: Mükemmel Eşlenmiş Katmanlar (Perfectly Matched Layers)
<b>TE</b>	: Enine Elektrik (Transverse Electric)
<b>TM</b>	: Enine Manyetik (Transverse Magnetic)
<b>VNA</b>	: Vektör Ağ Analizörü (Vector Network Analyzer)

## SEMBOL LİSTESİ

Bu çalışmada kullanılmış olan simgeler açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
$j$	Parametrelere ait indis
$H$	Manyetik alan
$E$	Elektrik alan
$\lambda$	Dalga Boyu
$\mu\text{m}$	Mikrometre
$\tau$	İletimin azalma hızı
$\omega_0$	Rezonans frekansı
$\varphi$	Faz gecikmesi
$h_0$	Faz faktörü
$\Psi$	İlerleyen dalga
$\theta$	Eğrilik açısı
$T$	İletim verimliliği
$\mu_0$	Vakum Geçirgenliği





# 1. GİRİŞ

## 1.1 Metayüzeyler

Doğal optik cihazlar, polarizasyon, faz ve genlik modifikasyonu yoluyla ışığın dalga cephesini kontrol etmek için kullanılır. Klasik optikte, doğal olarak oluşan malzemeler kullanılarak, ışığın davranışı ortamı oluşturan alt dalga boyu yapılanması (yani atomlar veya moleküller) tarafından belirlenir. Faz, polarizasyon ve yayılma yönlülüğünün ortamın kırılma indisi tarafından kontrol edilebildiği kırılma, yansıma ve kırınım dahil birçok etki ortaya çıkabilir. Bununla birlikte, doğal olarak oluşan malzemelerin özellikleri, tipik olarak, bu tür optik manipülasyonlarda küçük sapmalarla sınırlıdır.

Metamalzemeler doğal olarak oluşan ortamlara benzer şekilde davranmak ve ışığın dalga cephesini (veya genel olarak herhangi bir dalga benzeri fenomeni) kullanıcı tanımlı kurucu 'atomlar' aracılığıyla kontrol etmek için kullanılan insan yapımı cihazlardır. Bir 'atom' veya meta-atom, elementin ilgilenilen dalga boyundan daha küçük olduğunda, ortalama bir etkiyle karşılaşılır ve ışık meta-atom yapısındaki küçük sapmaları görmez; bu tür dalgaların saçılması ve girişimi daha sonra homojen bir şekilde uygulanır ve sonuçta ortaya çıkan etkili bir dalga elde edilir. Bu tür çalışmalar, doğal olarak oluşan malzemelerin optik özelliklerini kullanarak elde edilmesi imkansız olan negatif kırılma indisi malzemeleri[1], sıfır indeks[2], görünmezlik perdesi[3] ve alt kırınım görüntülemenin geliştirilmesine yol açmıştır. Bununla birlikte, bu tür metamalzemeler tarafından sağlanan büyüleyici ve yeni fiziksel fenomenlerden bağımsız olarak, yararlı cihazlar yapmak için doğrudan kullanılabilirliği engelleyen birçok imalat zorluğuna sahiptir.

Daha yakın yıllarda, 2D düzlemsel metamalzemelere, yani meta-yüzeyle, metamalzemelere benzer fenomenler sağlayabilmeleri nedeniyle, ancak dalga boyunun sadece bir kısmı ince olmaları dışında, imal edilmesi çok daha kolay olduğundan, büyük bir ilgi olmuştur. Teorik olarak gerçekleştirilmesi daha kolaydır ve ilgili kayıplar ihmal edilebilir düzeydedir. Çoğu optik cihaz, çoğu ışığın dalga

cephesini tasarlamak için ani faz değişimlerini kullanan metayüzeyler kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

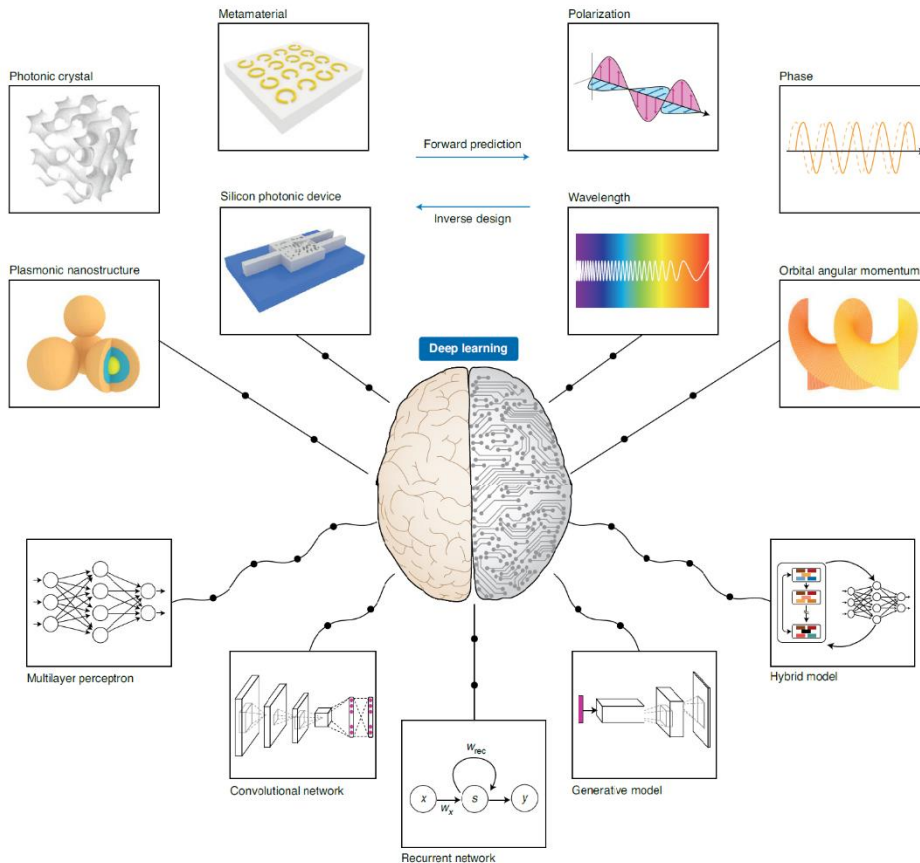
En ilgi çekici araştırma parçalarından biri, yalnızca Poincare küresi üzerinde katedilen polarizasyon durumlarına bağlı olarak iletilen bir dalğanın dalga boyuna duyarsız faz değişikliği olan Geometrik faz kavramını kullanarak Hasman tarafından gerçekleştirilen araştırmaydı. Bu çalışmalar, bu durumda dalga boyu altı ızgaralar olan düzlemsel optik elemanların basit bir döndürülmesi yoluyla gelen ışığın uzamsal olarak değişen bir faz değişikliğini üretmek için çalıştı. Geometrik faz kullanarak uzamsal olarak değişken faz kontrolünü kullanmaları, geometrik fazın önceki kullanımlarının zamana göre değişken (ve uzamsal olarak değişmeyen, yani yanal olarak izotropik ortam) olduğu, bir döngü tamamlandıktan sonra ışığın fazının değiştirildiği çığır açıcı bir çalışmaydı. optik cihazlar (polarizörler) aracılığıyla yayılma yoluyla Poincaré küresi etrafındaki yol. Bu çalışma, şimdi metayüzeyler olarak adlandırdığımız şeyin geliştirilmesine yönelik merdivende önemli bir adımdı. Birkaç yıl sonra, metayüzeyleri kullanan yanal olarak ani faz değişimleri kavramı, Capasso tarafından [4] gerçekleştirilen bir faz gradyan terimini dahil ederek Snell yasasının genelleştirilmesine izin verdi. Bu çalışma, geometrik olarak değişen V-şekilli antenler kullandı, öyle ki her birinin ayrı fazı periyodik olarak küçük bir miktar artıyordu. Bu, daha önce yalnızca metalmazemeler kullanılarak gerçekleştirilen bir çalışma olan bir arayüzde ışığın negatif kırılmasıyla sonuçlandı. Bu çalışmayı takiben ve anten geometrisinden ziyade geometrik fazın işlevselliğini ve faz-gradyan meta yüzeylerini birleştiren Chen tarafından görünür spektrumda çalışan bir plazmonik düz mercek gerçekleştirildi. Bu, Poincare küresi üzerindeki kutuplar arası yayları izleyen dairesel polarizasyon dönüşümünü kullandı ve hem içbükey hem de dışbükey mercek işlevselliği elde etmek için dalga cephesinde bir faz değişikliği ile sonuçlandı. Dielektrik ortamın ihmal edilebilir absorpsiyon kayıplarına sahip olduğu bilinmektedir; Bu amaçla ve metal nanoyapılar kullanılarak geometrik faz kontrollü lensler üzerinde gerçekleştirilen çalışmanın ardından, Crozier tarafından, gelen dairesel polarize ışığın yönünü kırınım yoluyla ayırt etmenin bir yolu olarak bir silikon nanofin faz gradyanı önerildi. sol ve sağ dairesel polarize ışığın faz-gradyanlı bir metayüzey ile etkileşime girdikten sonra eşit ve zıt geometrik faz birikimlerine maruz kalması gerçeğinden yararlanan farklı açılara zıt yönler. Bunu yaparken, yüksek verimli meta yüzeylerin gerçekleştirilebileceği ve rezonans metal yapılar kullanılarak

gösterilenlere benzer şekilde davranabileceği fark edildi. Bu çalışmalardan, işlevselliğin birleştirilmesiyle anlaşılmaktadır. Metalik antenler ve dielektrik yapılarla birlikte geometrik faz, arzu edilen birçok optik fenomeni elde etmenin derin bir yoludur ve lensleme, ışın yönlendirme, ışın şekillendirme ve holografinin potansiyel gerçek dünya uygulamalarıyla sonuçlanmıştır; bu, silikon geometrik-faz yapılarının, faz gradyan metalik antenlerin ve yüksek verimli geniş bant holografi cihazlarının gerçekleştirildiği bu tezin temelini oluşturur.

## 1.2 Metayüzey Tasarımına Yapay Zekanın Uygulanması

Geçen yüzyılın sonlarına doğru, nano ölçekteki ışık-madde etkileşimlerindeki keşifler, ışığın dalga boyu altı ölçeklerle sınırlandırılmasına yardımcı olacak optik fenomenlerin kilidini açarak yeni bir optik tasarım çağına açılan bir kapı açtı. Bu yeni nanofotonik cihaz ailesinin bir üyesi olan meta malzeme, ışığın davranışını klasik olmayan bir şekilde tahmin edilen bir şekilde manipüle etmek için periyodik dipoller üretebilir. Bu nedenle, iyi tasarlanmış bir meta malzeme, herhangi bir dalga boyu spektrumu üzerinde elektromanyetik dalgaların geçirgenliğini ve faz gecikmesini uyarlayabilir[7,8]. Bu malzemelerin gerçekleştirilmesi, mükemmel absorpsiyon[9], süper çözünürlüklü görüntüleme[10,11], ışın yönlendirme[12,13] ve doğrusal olmayan optik üretimde[14,15] çok sayıda uygulamaya yol açmıştır. Bu nano yapı malzemeler emek yoğun üretim gerektirdiğinden, optik spektrumun doğru bir tahmini ve öngörülen meta malzemenin yapısı önceden belirtilmelidir. Bununla birlikte, nano ölçekte bu ışık-madde etkileşimlerini tanımlayan karmaşık fiziksel mekanizmalar, geliştirilmiş teori ile çözülemez ve bu nedenle, bir malzemenin optik özelliklerinin ve yaklaşık yapısının tahmini, Sonlu Eleman Modelleme (FEM) tarafından elde edilen ileri yinelemeli hesaplamalara dayanır veya Sonlu Fark Zaman Alanı (FDTD) yöntemleri. Ayrıca, bu geleneksel metayüzey tasarım süreci, insan güdümlü hata nedeniyle doğuştan kusurludur. İlk tasarım yalnızca fiziksel kavrayışlara ve sezgisel akıl yürütmeye dayalı olarak gerçekleştirilmekle kalmaz, nihai geometrik ve malzeme parametreleri de nihayetinde bir deneme-yanılma yoluyla elde edilir. Bu tür optik sistemlerin tasarımı, çok boyutlu parametre alanlarını tarayan yinelemeli simülasyonları yönetmek için çalışan bir optik bilgi tabanı gerektirir.

Yapay zekadaki hızlı gelişmeler sayesinde, klasik olarak insan algısı veya karmaşık mekanizmalar gerektiren bazı bilimsel problemler son zamanlarda yapay zeka tarafından çözülmüştür[16,17,18]. Bu tür yöntemler, fotonik cihazların tasarımını hızlandırmak için optimizasyon yöntemleri[19,20] ve evrimsel algoritmalar[21] kullanarak optik alanına çevrildi. Maxwell denklemlerinin kapsamlı hesaplaması (sayısal veya analitik) olmadan tasarım sürecini hızlandırmak için, veriye dayalı yöntemler, özellikle derin sinir ağları, mikrodalga ve nanofotonik cihazların tasarımına kademeli olarak dahil edilmiştir[22,23,24]. Daha spesifik olmak gerekirse, derin öğrenme, daha önce verilen verilere dayanarak temel ilkeleri çıkarmak için ilham verici bir platform sağlar; bu nedenle, verilen başka bir girdi için makineler otomatik olarak mantıklı kararlar verebilir. Derin öğrenmenin sürekli artan evrimi ve sinyal işleme ve fizik bilimi gibi önemli zorlukların üstesinden gelme potansiyel kapasitesi ile artık bunların elektromanyetik sorunlara uygulamalarına ve Şekil 1.1’de görüldüğü gibi derin öğrenmeyi fotonik alanının pek çok yerinde kullanılmasına tanık oluyoruz.



Şekil 1.1 Yapay zekanın fotonik alanına uygulamaları[5].

Daha az hesaplama kaynağı, daha fazla doğruluk, daha az tasarım süresi ve daha fazla esneklik sağlama konusundaki dikkate değer potansiyeli nedeniyle, derin öğrenme elektromanyetik uyumluluk, anten optimizasyonu ve tasarımı, metayüzeyler, optik ve fotonik yapılar gibi çeşitli dalga etkileşimi olaylarına girmiştir.





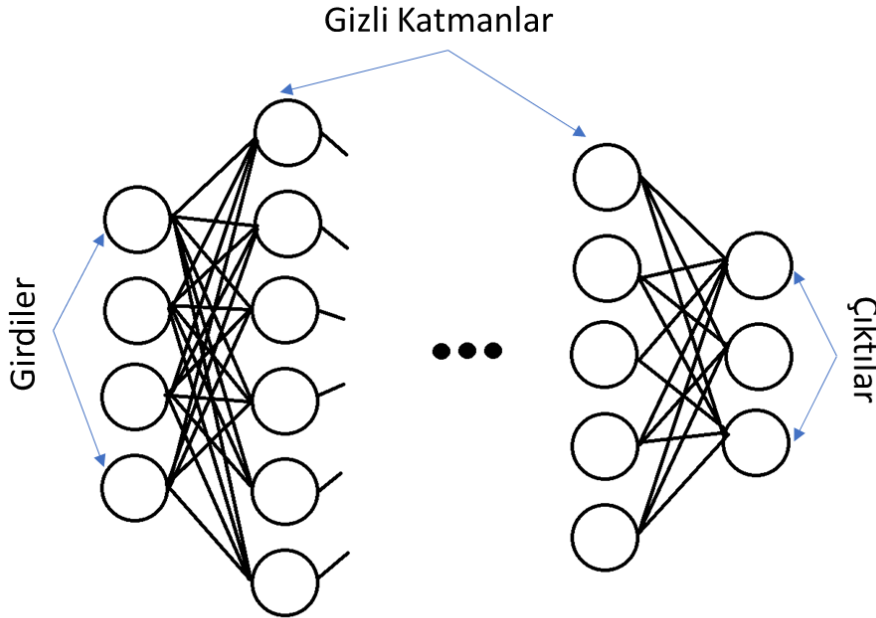
## 2.KULLANILAN TASARIM YÖNTEMLERİ

### 2.1 Yapay Sinir Ağları

#### 2.1.1 Yapay Sinir Ağları Yapısı

Sinir ağları, bir düğüm ve bağlantı sistemidir. Bu bağlantılar genellikle Şekil 2.1’de gösterildiği gibi solda gösterilen girdi katmanından sağda gösterilen çıktı katmanına yönlendirilir. Bu bağlantıların yapılandırılmasının farklı yolları ve bu bağlantıların bir düğümün değerine tepki vermesinin farklı yolları vardır.

Genel olarak, sinir ağı girdi katmanı girdi verilerinden gelen değerlerle doldurulur, daha sonra çıktı katmanı doldurulana kadar sinir ağının ardışık gizli katmanlarını doldurmak için bu girdi katmanının kombinasyonlarını gerçekleştirmek için çeşitli aktivasyon fonksiyonları kullanılır. Sinir ağının yapısı, sinir ağı eğitiminin omurgası olan geriye dönük hesaplamalara da olanak tan

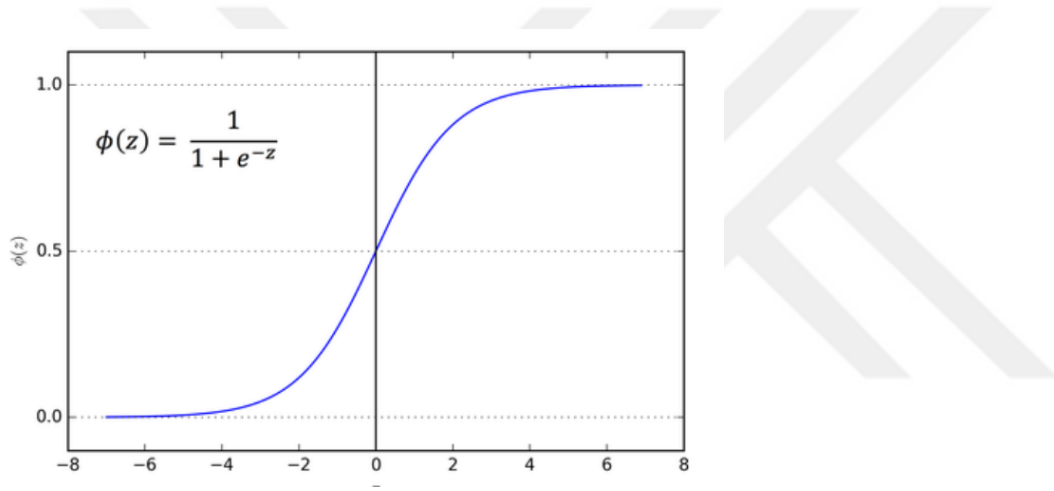


Şekil 2.1 Sinir ağı yapısı örnek şematığı

Şekil 2.1, tamamen bağlı bir sinir ağının yapısını göstermektedir. Girdiler düğümlere beslenir, ardından düğüm katmanları, çıktılara ulaşana kadar aktivasyon fonksiyonu aracılığıyla bağlanır.

### 2.1.2 Aktivasyon Fonksiyonları

Sinir ağlarının doğrusal olmayan modelleme yeteneği, doğrusal olmayan bir aktivasyon fonksiyonunun seçiminden gelir. İlk belirgin doğrusal olmayan aktivasyon fonksiyonu, Şekil 2.2'de gösterilen sigmoid fonksiyonuydu. Bu basit doğrusal olmayan fonksiyonların birçoğunun birleşimi, sinir ağının bir bütün olarak çok karmaşık, doğrusal olmayan fonksiyonları modellemesini sağlar.



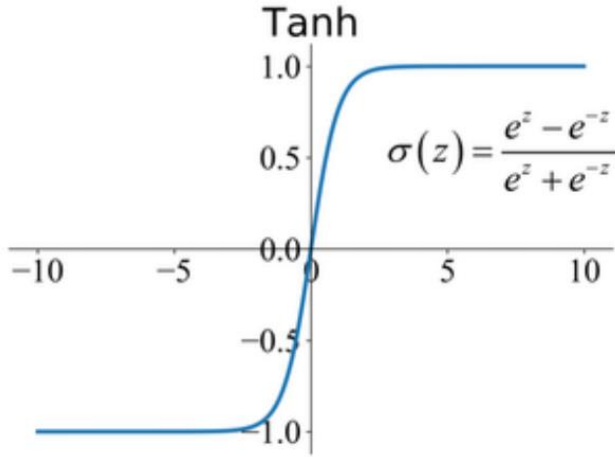
Şekil 2.2 Sigmoid Aktivasyon Fonksiyonu

Sigmoid aktivasyon fonksiyonuna lojistik fonksiyon da denir. Lojistik regresyon sınıflandırma algoritmasında kullanılan işlevin aynısıdır. Sigmoid fonksiyonu herhangi bir değeri 0 ile 1 değerleri arasında bir değere dönüştürür. Fonksiyona giriş değeri büyüdükçe fonksiyon çıktısı 1 değerine yakınsar. Girdi değeri azaldıkça çıktı değeri 0 değerine yakınsar. Bundan dolayı bu fonksiyon genelde çıktı katmanında kullanılır. Sigmoid fonksiyonunun bir eksisi gradyan ölümünü gerçekleştirdiği ve diğer eksikliklerinden dolayı daha sonraları Şekil 2.2, Şekil 2.3 ve Şekil 2.4'te gösterilen tanh, relu ve leaky relu fonksiyonları kullanılmaya başlanmıştır.

Hiperbolik tanjant aktivasyon fonksiyonu aynı zamanda basitçe Tanh fonksiyonu olarak da adlandırılır. Sigmoid aktivasyon fonksiyonuna çok benzer ve hatta aynı S şekline sahiptir. İşlev, herhangi bir gerçek değeri girdi olarak alır ve -1 ile 1 aralığındaki değerleri çıkarır. Tanh fonksiyonu herhangi bir değeri -1 ile 1 değerleri

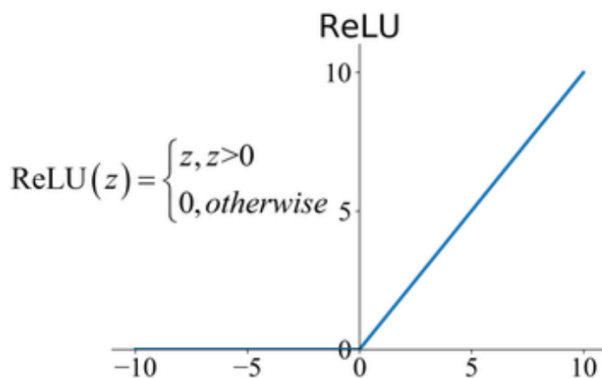


arasında bir değere dönüştürür. Fonksiyona giriş değeri büyüdükçe fonksiyon çıktısı 1 değerine yakınsar. Girdi değeri azaldıkça çıktı değeri 1 değerine yakınsar. Bu nedenle bu aktivasyon fonksiyonu genellikle çıktı katmanında kullanılır.



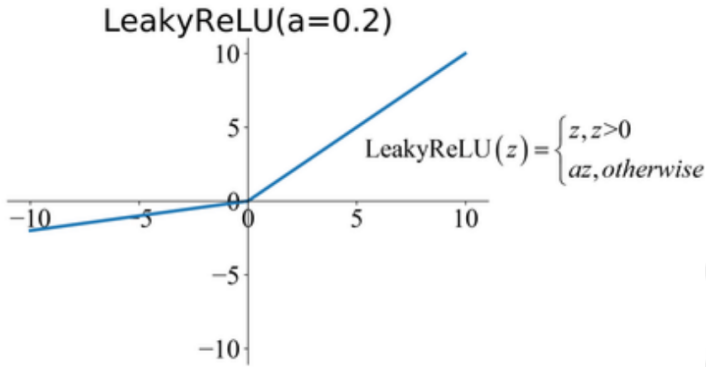
Şekil 2.3 Tanh Aktivasyon Fonksiyonu

Düzeltilmiş doğrusal aktivasyon fonksiyonu veya ReLU aktivasyon fonksiyonu, gizli katmanlarda kullanılan en popüler aktivasyon fonksiyonudur. Sigmoid ve Tanh gibi daha önce popüler olan aktivasyon fonksiyonlarının sınırlamalarının üstesinden gelmede hem uygulanması basit hem de etkili olduğu için yaygındır. Spesifik olarak, doymuş(ölü) nöronlar gibi diğer sorunlardan sıkıntı çekse, kaybolan gradyanlara daha az duyarlı olmasından dolayı derin modellerin eğitilmesinin önünde olan en büyük engellerden birini aşar. ReLU işlevinde giriş değeri (x) negatifse, 0.0 değeri döndürülür, aksi takdirde değer döndürülür.



Şekil 2.4 Relu Aktivasyon Fonksiyonu

Sızdıran düzeltilmiş doğrusal aktivasyon fonksiyonu veya Sızdıran ReLU, ReLU'ya dayalı bir tür etkinleştirme işlevidir, ancak düz bir eğim yerine negatif değerler için küçük bir eğime sahiptir. Eğim katsayısı eğitimden önce belirlenir yani eğitim sırasında öğrenilmez. Bu tür etkinleştirme işlevi, örneğin üretken hasım ağlarını eğitmek (generative adversarial networks) gibi seyrek gradyanlardan muzdarip olabileceğimiz görevlerde popülerdir.



Şekil 2.5 Leaky ReLU Aktivasyon Fonksiyonu

### 2.1.3 Hiperparametreler

Bir sinir ağının hiper parametreleri, sinir ağlarının mimarisini ve eğitimini etkileyen tüm buluşsal olarak belirlenmiş tasarım kararlarıdır. Pek çok farklı makine öğrenimi yöntemi, sinir ağının eğitim yöntemini ve yapısını açıklamak için birçok farklı olası hiperparametreye sahiptir. Sinir ağlarının eğitimindeki yaygın hiperparametreler, öğrenme hızı, ağın derinliği ve bir ağın katmanlarının genişliğidir. Genellikle, hesaplama hızı ile iyileştirilmiş eğitim olasılığı arasında bir değiş tokuş vardır.

#### 2.1.3.1 Öğrenme hızı

Sinir ağı eğitiminin öğrenme oranı, ağı parametrelerini fiilen ayarlamak için geri yayılım sırasında hata gradyanlarına verilen çarpımsal faktörü ifade eder. Genel olarak, sadece hata gradyanlarını gerçek değerler olarak almak, model parametrelerinde çok dik bir ayarlama neden olur, bu nedenle daha iyi ağı parametrelerine daha düzgün bir yakınsama sunmak için genellikle öğrenme oranı 1'den çok daha azdır.

Öğrenme oranı, özellikle sinir ağı eğitiminin hızını arttırma isteğinin pratikliği nedeniyle, sinir ağı eğitimi için kararsız bir hiper parametre olabilir. Çok yüksek bir öğrenme oranına sahip olmak, geri yayılım algoritmasının bir sinir ağının doğruluğunu kötüleştirmesine ve yakınsamayı önlemesine neden olabilir. Çok küçük bir öğrenme oranına sahip olmak, eğitimin son derece uzun sürmesine neden olacaktır. Yaygın bir uzlaşma, ayarlanabilir bir öğrenme oranına sahip olmaktır. Sezgi, eğitimin bir sinir ağında yakalanan daha geniş ilişkileri hızlı bir şekilde eğitmek için büyük bir öğrenme oranıyla başlayabilmesidir ve eğitim ilerledikçe, daha küçük bir öğrenme oranı, daha ince detayları modellemek için gradyan inişinin ekstrema yakınsamasına izin verir.

Doğru öğrenme oranını seçmek için birçok önemli husus vardır, ancak belirli bir problem için iyi öğrenme oranları bulmak için gerçekten yalnızca sezgisel yöntemler vardır. Örneğin, kedilerin görüntülerini tanımlamak için evrişimli bir sinir ağının eğitilmesi için öğrenme hızının, meta malzeme öğelerini modellemek için tam bağlantılı bir sinir ağını eğitmek için iyi bir öğrenme oranı için açık bir anlamı yoktur. Ancak, benzer yayınlanmış uygulamalardan öğrenme oranlarının seçilmesi genellikle mevcut en iyi başlangıç noktasıdır.

### **2.1.3.2 Katman sayısı ve katman boyutu**

Öğrenme hızına benzer şekilde, bir sinir ağındaki katman sayısı ve katman boyutu, buluşsal olarak belirlenir. Kesintisiz kurallar yoktur ve makine öğrenimindeki birçok ünlü gelişme, katman sayısı ve boyutunun yeni kombinasyonlarından gelir. Genel olarak, daha fazla katman ve daha büyük katmanlar daha büyük bir modelleme kapasitesine izin verir, ancak kesinlikle sinir ağı eğitiminin daha büyük ağlara genişletilemediği kritik bir nokta vardır. Daha büyük ağlar daha yavaş eğitimi garanti eder, ancak ağın öğrenmesini de engelleyebilirler. Bu çalışma alanı, “derin öğrenme”ye “derin”i koyan şeydir. Bazı mimariler, daha derine inme sorunlarına az ya da çok duyarlıdır.

### **2.1.3.3 Veri boyutu**

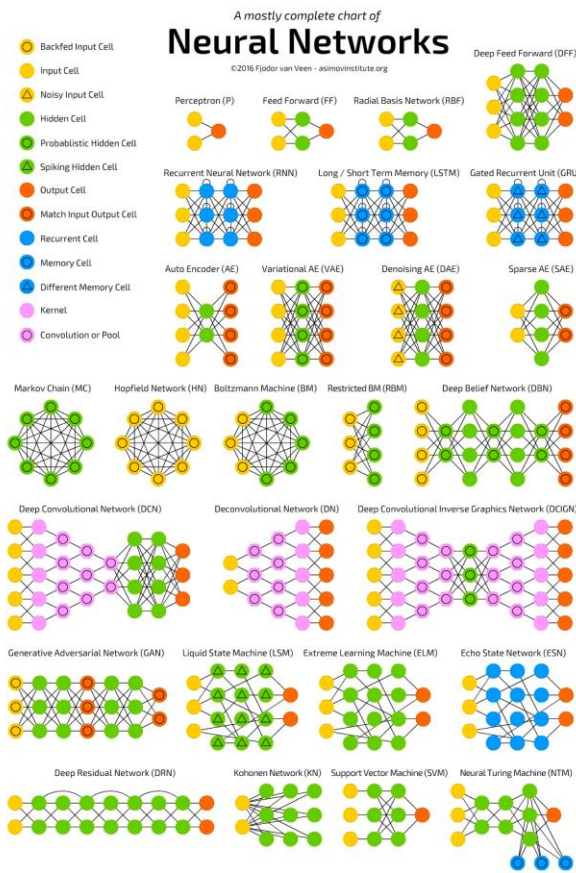
Her zaman bir hiper parametre olarak kabul edilmese de, veri kümesinin boyutu, bir sinir ağının eğitim verilerinin ötesine genellenmesini sağlamak için kritik bir husustur. Genel olarak, yeterli bir veri kümesi boyutunu tahmin etmek için titiz yöntemler vardır. Tavanı veya ihtiyaç duyulacak maksimumu tahmin etmenin yolları vardır, ancak

bunlar genellikle pratikten daha büyük büyüklük sıralarıdır ve çoğu tahmin, ihtiyaç duyulandan daha büyük büyüklük sıralarıdır.

Verinin nasıl üretildiğine bağlı olarak, yeterli bir veri kümesi boyutunu belirlemenin en basit yöntemi, daha fazla veri artık sinir ağının doğruluğunu artırmaya yardımcı olmadığı görülene kadar veri üretmeye devam etmektir. Başka bir olası yöntem, yeterli veri kümesi boyutlarını açıklayan benzer yayınlanmış çalışmaları basitçe gözden geçirmektir.

## 2.1.4 Sinir ağları tipleri

Birçok yapay sinir ağı (YSA) türü ve bu türlerin melezleri vardır, bu nedenle aşağıda yalnızca en popüler türlerden bahsedilecektir. Ayrıca, bu sinir ağları denetimli öğrenme bağlamında tartışılacaktır, ancak bunların tümü denetimsiz ve pekiştirmeli öğrenme yöntemleri için de kullanılabilir. Şekil 2.6'daki gibi daha fazla ağ yapıları mevcuttur.



Şekil 2.6 Farklı sinir ağı yapıları[6].

#### 2.1.4.1 Tam bağlı sinir ağları

Tamamen bağlı veya ileri beslemeli sinir ağı, orijinal ve birçok yönden en basit sinir açıdır. Tamamen bağlı bir sinir ağının belirli bir katmanındaki her düğüm, bir sonraki katmandaki her düğüme bağlanır. Yukarıda genel sinir ağı mimarisi bölümünde aıklanđıęı gibi, tamamen bağlı bir ağ, dğmleri sigmoid veya ReLU (dzeltiymiş doğrusal birim) gibi basit bir doğrusal olmayan etkinleştirme işleviyle birbirine bağlar.

Tamamen bağlı sinir ağları, genellikle yeni bir makine öğrenimi problemi için iyi bir başlangıç noktasıdır çünkü problemi modellemenin karmaşıklığına dair erken kavrayışlar sunabilirler. Tamamen bağlı bir sinir ağı için değiştirilecek daha az hiperparametre vardır, bu nedenle bir hiperparametre taraması daha hızlı gerçekleştirilebilir. İdeal olarak, nispeten basit, tam bağlantılı bir ağ, iyi bir performans sunacaktır ve belki de bu, belirli bir uygulama için yeterlidir. Ancak tam bağlı ağ yeterli değilse, en azından hangi ağ mimarisine ihtiyaç duyulacağını önerebilir.

#### 2.1.4.2 Evrişimsel sinir ağları

Evrişimli sinir ağları (CNN'ler), veriler içindeki hiyerarşik kalıpları öğrenmek için evrişim kullanan bir yapay sinir ağı sınıfıdır. CNN'ler, veriler arasındaki uzamsal ilişkileri korur ve farklı uzamsal ölçeklerde genelleştirir, böylece herhangi bir boyutta görüntü verisi için iyi bir Şekilde pozlanırlar.

CNN'ler, bir ağın dğmleri arasındaki bağlantıları belirlemek için çekirdekleri kullanır. Çekirdekler verilerle birlikte verilerin geometrik temsillerine dönüştürülür. CNN'ler, çekirdeklerin ağırlıklarına gradyan inişini yinelemeli olarak uygulamak için geri yayılımı kullanır. Bir CNN aracılığıyla geri yayılma denklemleri, tamamen bağlı basit ağdan daha karmaşıktır, ancak yine de bir GPU'daki hesaplamanın hesaplama hızlarını kullanmak için vektrleştirilebilir ve paralelleştirilebilirler.

Derin ğrenme özel bir ilgi alanıdır. Çok büyük ve derin ağların etkin bir Şekilde eğitilmesini sağlamak için yöntemler geliştirilmektedir[25]. Evrişimli sinir ağlarının, çok derin ağları eğitmede özellikle iyi olduğu deneysel olarak gösterilmiştir[26].

## **2.1.5 Eğitim yöntemleri**

### **2.1.5.1 Aktarım öğrenimi**

Transfer öğrenme, önceden eğitilmiş bir sinir ağını almak ve yeni bir problem üzerinde yeni bir ağı için başlangıç olarak bağlantılar için bazı ağırlıklarını kullanmak için bir yöntemdir [27]. Aktarım öğrenimi, bu yeni sorun orijinal ağı sorunuyla yakından ilişkili olduğunda en iyi sonucu verir. Transfer öğrenimi, yeni bir problemde iyi bir doğruluk elde etmek için gereken hesaplama süresini önemli ölçüde azaltabilir. Bu, özellikle yüzlerce katmana sahip çok derin ağlar için geçerlidir. Bir araştırmacı, örneğin görüntülerdeki kedileri tanımlamak için tamamen yeni bir evrimsel sinir ağını yeniden eğitmek yerine, benzer görüntü sınıflandırma problemlerinde birçok açık kaynaklı önceden eğitilmiş sinir ağından birini kullanabilir.

### **2.1.5.2 Toplu normalleştirme**

Toplu Normalleştirme, sinir ağlarının eğitim süresini ve doğruluğunu iyileştirmeye yönelik bir yöntemdir. Toplu Normalleştirme, sinir ağı eğitiminin ileri geçişi ve geri yayılması sırasında bağlantıların aktivasyonlarını yeniden ölçeklendirerek ve normalleştirerek çalışır [28]. Bu, küçük bir düğüm alt kümesinin öğrenmeye hükmetmesine izin vermek ve ağı genelleştirilebilirliğini ve modelleme kapasitesini azaltmak yerine, sinir ağlarının öğrenmesinin tüm düğümler arasında yayılmasına yardımcı olur. Ampirik olarak doğruluğu ve hesaplama süresini iyileştirdiği gösterilmiştir.

### **2.1.5.3 Seyreltme**

Bırakma, herhangi bir düğüme bağımlılığı azaltmak için eğitim sırasında bir sinir ağındaki düğümleri rastgele devre dışı bırakma yöntemidir [29]. Belirli bir katmandaki bu düğüm yüzdesini kaldırmak için eğitim sırasında belirli bir bırakma oranı tanımlanacaktır. Bunun, ağı genelleştirilmesine ve aşırı uyumdan kaçınmasına yardımcı olduğu deneysel olarak gösterilmiştir.

## 2.2 Hedef öncelikli algoritma

Nanofotonik, ışığın dalga boyu altı yapılarla etkileşime girdiği için davranışının incelenmesidir. Yıllarca süren bilimsel araştırmalar, çok kompakt cihaz tasarımlarında son derece mükemmel başarılar sağlamıştır. Ancak geleneksel tasarım yöntemlerinin uzun zaman alması, verimsiz olması ve günümüz teknolojisinin öngördüğünden daha büyük boyutlu yapılar üretmesi nedeniyle yeni bir tasarım yöntemi ortaya çıkmıştır: belirli algoritmalar kullanılarak tersine tasarlanmış yapılar. Tersine tasarlanmış cihazlar, geliştirme sürecinde çok çeşitli tasarım alternatifleri sundukları için daha kompakt ve yüksek performanslı cihazların oluşturulmasına izin verir[30,31].

Tersine tasarımda kullanılan hesaplamalardan biri de hedef öncelik hesaplaması olan OB-1'dir. OB-1'in hesaplama veriminin temel nedeni, belirli bir elektromanyetik alan girişi ve verimi verilen nanofotonik yapılar oluşturabilen bir çözücü yapmaktır [32]. Maxwell koşulunu karşılayan girişte belirlenen elektrik veya çeken alan girişini bilen OB-1, sonucu belirtilen yürütme parametrelerine en yakın olan yapının dielektrik dağılımını verir.

Maxwell denklemlerinden OB-1 algoritmasına geçişi daha iyi anlaşılması için elektromanyetik dalga denklemi Denklem 2.1 ile ifade edilmiştir.

$$\nabla \times \varepsilon^{-1} \nabla \times \vec{H} - \mu_0 \omega^2 \vec{H} = \nabla \times \varepsilon^{-1} \vec{J} \quad (2.1)$$

$$A(p)x = b(p) \quad (2.2)$$

Burada  $A(p) = \nabla \times \varepsilon^{-1} \nabla \times$ ,  $b(p) = \nabla \times \varepsilon^{-1} \vec{J}$ ,  $x = \vec{H}$ ,  $p = \varepsilon^{-1}$  dir.  $\varepsilon$  dielektrik sabiti olup  $\vec{J}$  akım yoğunluğunu ifade eder. Similasyon koşullarında istenmeyen yansımaları önlemek için sınır koşullarında mükemmel uyumlu katmanlar(PML) kullanılmıştır. PML sayesinde rotasyonel işlemlerinin doğrusallığı korunur ve değiştirilebilir. Denklemde her iki tarafı  $\varepsilon^{-1}$  parantezine aldığımızda:

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{H}) \varepsilon^{-1} - \nabla \times \vec{J} \varepsilon^{-1} = \mu_0 \omega^2 \vec{H} \quad (2.3)$$

Denklem 2.3 elde edilir ve bunu çözümlersek ve şimdiye kadarki denklemleri toplarsak:

$$B(x)p = d(x) \quad (2.4)$$

$$B(x) = \nabla \times (\nabla \times \vec{H}) - \nabla \times \vec{J} \quad (2.5)$$

$$d(x) = \mu_0 \omega^2 \vec{H} \quad (2.6)$$

$$A(p)x - b = B(x)p - d(x) \quad (2.7)$$

Denklemleri elde edilir. Böylece bu denklem her iki yönde de lineer olmuş olur. Bu sayede herhangi bir değişkeni sabit tutup, sabit tutulmayan değişkeni değiştirerek çözüme ulaşılabilir. OB-1 algoritmasının esası bu çifte lineeriteye dayanır. Böylelikle alansal ve yapısal çözümler temeli bu formüllerle verilmiş oldu. Alansal ve yapısal çözümlerin yanında tasarım hedefi ve fiziksel kalıntı gibi tanımlarıda algoritmada açıklanması gerekir.

Tasarım amacını belirlemek için hedef fonksiyon  $f(x)$  olarak tanımlanırken algoritma  $f(x)$  fonksiyonunu tasarımı tamamlamak için minimize etmeye çalışır.  $f(x)$  fonksiyonunun probemden probleme değişkenlik gösterir. Bir rezonatör tasarımında düşük kayıplı olması isteniyorsa,  $f(x)$  fonksiyonu rezonatörden sızan güç olur ve güç kaçağı istenmediği için algoritma en aza indirmeye çalışır. Bir hedefi  $f(x)$  fonksiyonu birden fazla olabilir.  $f(x)$  istenilen modda iletilen negatif güç veya yüksek iletim yapabilen bir cihaz tasarımı için diğer modlara giden güç olarak tanımlanabilir. Asıl mesele, istenilen verimi elde etmek için istenmeyen ve azaltılabilecek fonksiyonların belirlenmesidir. Ancak bu formülasyonlar oluşturulurken  $f(x)$ 'in karmaşıklığı ve bunun sonucunda çözüm süresindeki artış göz önünde bulundurulmalıdır.

Tasarım zorluğu matematiksel olarak açıklanmadan önce dışbükey ve dışbükey olmayan problemler arasındaki ayırım tanımlanmalıdır [33]. Dışbükey olmayan sorunların birden fazla ideal durumu vardır, oysa dışbükey sorunların yalnızca bir tane vardır. Sonuç olarak, mevcut sayısal çözümler sürekli olarak dışbükey sorunları çözebilirken, dışbükey olmayan sorunların üstesinden gelmek son derece zordur. Dışbükey problemler için en iyi çözüm durumuna her zaman ulaşılabilecektir. Konveks yapılar bu nedenle çözüm kolaylığı sağlar. Tasarım probleminin teorik olarak ifadesi Denklem 2.8 te ifade edilmiştir.

$$\text{minimize}_{x,p} f(x) \quad (2.8)$$

$$A(p)x - b(p) = 0 \quad (2.9)$$

Bu matematiksel ifadede  $f(x)$  içerisindeki  $x$  ve  $p$  aynı anda değiştirilirken dalga denkleminin sağlanması hedeflenirken Denklem 2.9 bu olayı konvekslikten çıkarır. Bu çözümü zorlaştırdığından istenilen bir durum değildir. Bundan dolayı dalga denklemi ve tasarım hedefi değiştirilerek denklem 2.10 elde edilmiştir.



$$\min_{x,p} \|A(p)x - b(p)\|^2 \quad (2.10)$$

$$f(x) = f_{ideal} \quad (2.11)$$

Denklem (2.20)'deki en önemli değişiklik, elektromanyetik dalga denkleminde sıfır olmayan bir kalıntının dahil edilmesidir.  $A(p)x-b(p)=0$  formülü artık geçerli olduğundan,  $p$  ve  $x$ 'in fiziksel olmayan değerlerine artık izin verilmektedir. Buna "fiziksel kalıntı" denir. Denklem (2.11) ayrıca çözümün her zaman istenen sonuca ulaşmasını sağlar. Fiziksel kalıntının sıfır olmamasına izin verildiğinden, sonuç her zaman optimum performansa yakın olacaktır. OB-1 yaklaşımının en önemli avantajı, sorun dışbükey olmasa bile belirtilen sorunu iki alt dışbükey soruna indirgeyebilmesidir. Ayrıca OB-1 algoritmasında  $p$ 'nin alabileceği değerleri için bir limit belirlenmiştir. Bu durumda nihai OB-1 formülasyonu Denklem (2.12) olacaktır;

$$\min_{x,p} \|A(p)x - b(p)\|^2 \quad (2.12)$$

$$kısıt f(x) = f_{ideal} \quad (2.13)$$

Bu ifadede Alan alt probleminde  $p$  değişkeni sabit tutulurken  $x$ 'in değiştirilmesinin optimize edilişi;

$$\min_x \|A(p)x - b(p)\|^2 \quad (2.14)$$

$$kısıt f(x) = f_{ideal} \quad (2.15)$$

Yapı alt probleminde ise  $x$  değişkeni sabit tutulurken  $p$ 'nin değiştirilmesi optimize edilir.

$$\min_p \|B(\vec{x})p - d(\vec{x})\|^2 \quad (2.16)$$

$$p_0 \leq p \leq p_1 \quad (2.17)$$

Bu iki alt problemin çözümü sonucunda fiziksel kalıntı sıfır olmayacaktır bundan dolayı iterasyon yardımı ile bu iki denklem çözüme kavuşturulur. Fiziksel kalıntı istenilen seviyeye geldiğinde iterasyon döngü bitirilir.

Döngü;

$$\min_x \|A(p)x - b(p)\|^2 \quad (2.18)$$

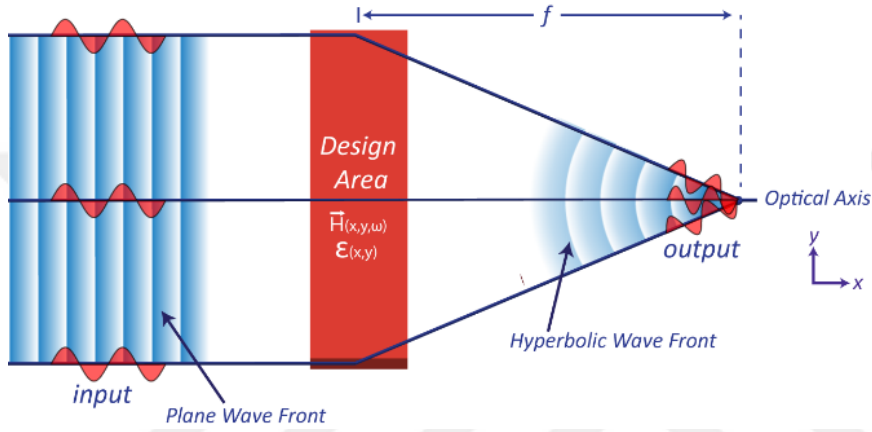
$$f(x) = f_{ideal} \quad (2.19)$$

$$\min_p \|B(x)p - d(x)\|^2 \quad (2.20)$$

$$p_0 \leq p \leq p_1 \quad (2.21)$$



### 3. YÜKSEK ODAKLAMA VERİMLİLİĞİNE SAHİP GENİŞ BANT, POLARİZASYON BAĞIMSIZ AKROMATİK DÜŞÜK İNDİSLİ LENS TASARIMI



Şekil 3.1 Tasarlanacak lens yapısının şematığı[86].

Bu bölümde, Hedef Öncelikli algoritma kullanılacak ve 1300-1750 nm dalgaboyları arasında Enine Manyetik (TM) ve Enine Elektrik (TE) polarizasyon odaklanması becerisine sahip olarak tasarlanan akromatik lensler incelenecektir. Tasarım, beş dalga boyunda en iyi hale getirilerek geniş bantta işlerliği olması amaçlanmıştır. İlgili dalgaboyları 100 nm artacak şekilde 1300 ila 1700 nm aralığında çeşitlendirilmiştir. X yönü 3.2  $\mu\text{m}$  ve Y yönü 16  $\mu\text{m}$  değerlerinde belirlenen tasarım alanı boyutu kare piksellere ayrılmıştır. Bu pikseller, yerel dielektrik sabiti değerlerinde olup 0.2  $\mu\text{m}$  x 0.2  $\mu\text{m}$  büyüklüğündedirler. Odak uzaklığı (f) ise 11,4  $\mu\text{m}$  değerinde belirlenmiştir. Simülasyonların, Lumerical 3D FDTD yazılımında gerçekleştirilmesinin amacı, çalışmada tasarlanacak olan lenslere ait optik özelliklerin değerlendirilmesidir. Simülasyon alanı Mükemmel Uyumlu Katmanlar (PML) ile çevrilmiştir. Algoritmaya verilen hedef, belirlenen bant genişliği üzerinde her dalga boyunda kabul edilebilir bir odaklama başarısı sağlamaktır. Geniş bant akromatik lens tasarımında yaşanan optimizasyon sorunu aşağıdaki şekilde değiştirilmiştir:

Döngü:

$$\min_{\vec{H}_i} \left\| \nabla \times \varepsilon^{-1} \nabla \times \vec{H}_i - \mu_0 \omega_i^2 \vec{H}_i - \nabla \times \varepsilon^{-1} \vec{J}_i \right\|^2 \text{ subject to } g(\vec{H}_i) = \vec{H}_{i_{ideal}}, i = 1,2,3,4 \quad (3.1)$$

$$\min_{\varepsilon^{-1}} \Sigma \left\| \nabla \times (\nabla \times \vec{H}_i) \varepsilon^{-1} - \nabla \times \varepsilon^{-1} \vec{J}_i - \mu_0 \omega_i^2 \vec{H}_i \right\|^2 \text{ subject to } \varepsilon_0^{-1} \leq \varepsilon^{-1} \leq \varepsilon_1^{-1}, i = 1,2,3,4 \quad (3.2)$$

Formüldeki  $\mu_0$ , vakum geçirgenliğini;  $\omega_i$  i'nci dalga boyunda olan frekansı gösterir.

$\vec{H}_i$  ve  $\vec{J}_i$  sırasıyla manyetik alanı ve  $\omega_i$ 'deki uyarma akımı yoğunluğunu ifade eder.

Üretimin, 3D baskı teknolojisinden yararlanılarak gerçekleştirilebilmesi adına bağlı geçirgenlik aralığı sınırları  $\varepsilon_0$  havanın dielektrik katasayıdır ve değeri 1 dir.  $\varepsilon_1$  ise

PLA'nın dielektrik katasayıdır ve değeri 2.4025 olarak düzenlenmiştir[34].  $\vec{H}_i$ , i'nci

dalga boyu için elde edilmesi arzulanan elektromanyetik yansıtır. Odaklanma eylemi

bakımından arzulanan elektromanyetik yanıt, Hedef Öncelikli algoritmada

tanımlanmış fotonik sistemin sınırlarında yer alan manyetik alanlardan sağlanır.

Fotonik sisteme girdi olarak bir TE polarizasyonlu düzlem dalga işlenmiştir ve çıktı olarak ise Denklem (3.3)'da verilen hiperbolik faz profilinde bir dalga seçilmiştir.

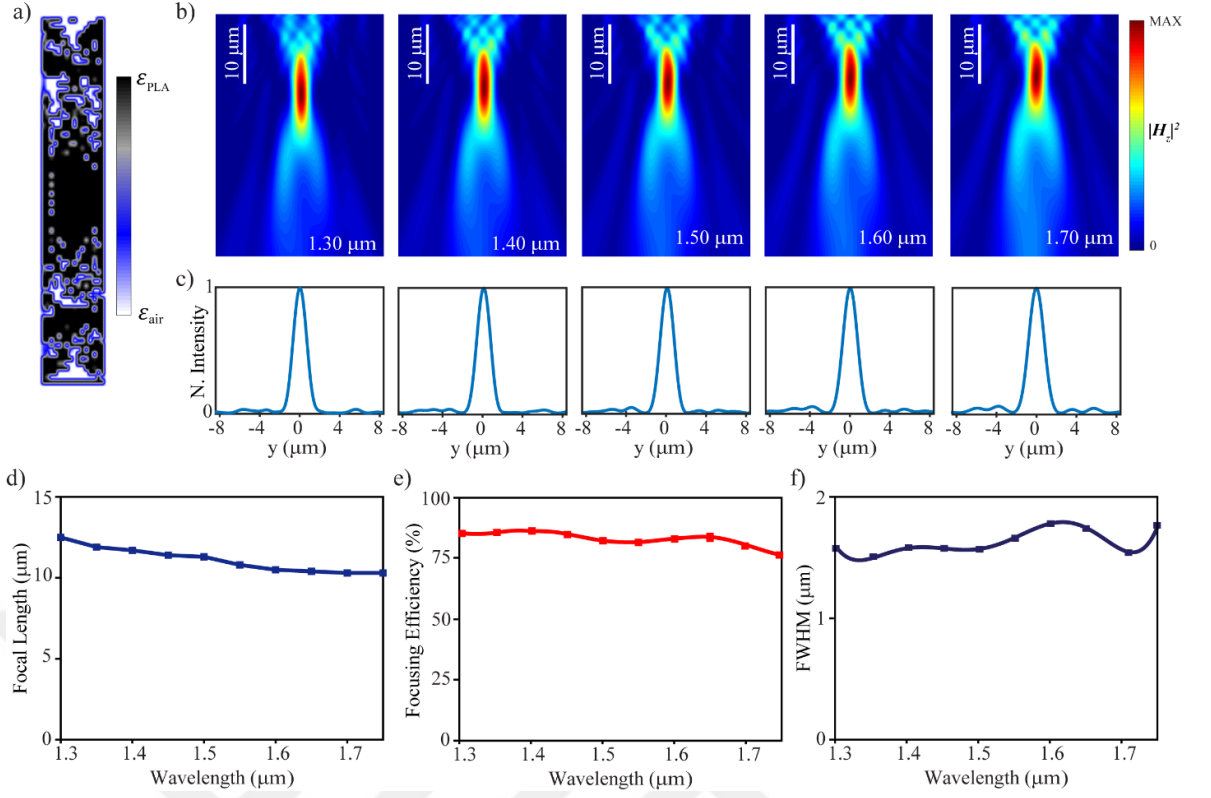
$$\varphi_i(y) = \frac{2\pi}{\lambda_i} [\sqrt{y^2 + f^2} - f] (\text{modulo } 2\pi) \quad (3.3)$$

Yukarıda,  $\varphi_i$ , i'nci dalga boyu ( $\lambda_i$ ) için faz profilini ifade eder ve f ise odak uzaklığını

(=11,4  $\mu\text{m}$ ) simgeler. Fotonik sistem tasarımına ait illüstrasyon Şekil 3.1'te

incelenebilir. Belirtilen kısıtlamalarla, 10000 iterasyon yapılmıştır. Ulaşılan yapı Şekil

3.2 (a) 'da verilmiştir.



Şekil 3.2 a) Lens yapısı b,c) Odaklama ve yoğunluk grafiği d) Odak uzaklığı, odaklama verimliliği ve FWHM ölçütü grafikleri[86].

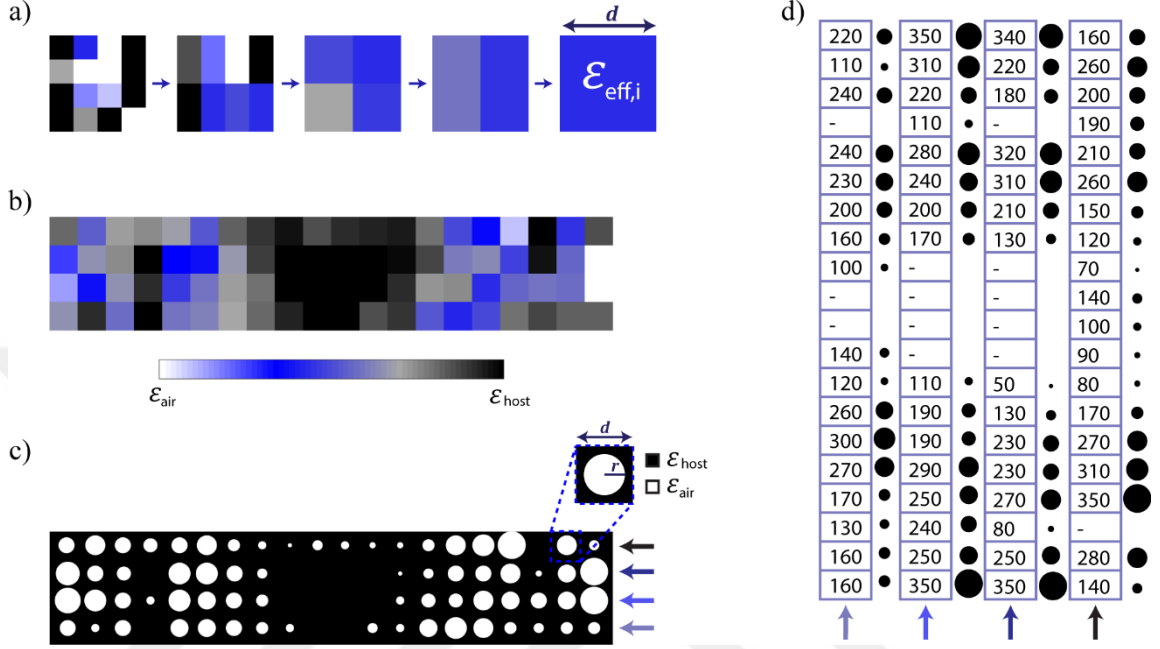
Açıklık (NA), bant genişliği ve odaklanma verimliliği parametrelerinin ayrıntılı olarak ortaya çıkarılması 2D simülasyon sonuçlarının elde edilmesinin amacıdır. Şekil 3.2’de sunulan ölçütler temel lens performansı ölçütleridir. Bu ölçütleri kısaca odak uzaklığı, hesaplanan alan şiddeti dağılımları, odaklanma verimliliği olarak sıralanabilir. XY düzlemindeki manyetik alan yoğunlukları çeşitli dalga boyları için Şekil 3.2 (b) 'de çizim olarak gösterilmiştir. Hedef dalga boyu aralığı için odaklar hesaba katıldığında, dalga boyu sebebiyle sapmanın bütün bant genişliği boyunca mühim seviyede az olduğu gözlenmektedir. Belirlenen dalga boylarında izlenmiş odak düzlemindeki yoğunluk profilleri Şekil 3.2 (c)’de sunulmuştur. İlgili profiller incelendiğinde bütün dalga boylarında izlenen odak düzlemlerinde kırınım nedenli bir bozulma oluşmadığı gözlenmektedir. Şekil 3.2 (d)’da ise 1300 nm ila 1750 nm dalga boyu arasında sağlanan lensin dalga boyuna bağlı odak uzaklığına ait grafik sunulmuştur. Odak uzaklığının, hedef dalga boyu aralığında oldukça sabit kaldığı gözlenmiştir. Bütün spektrumdaki maksimum fark % 9.65 olarak tespit edilmiştir. Odaklama verimliliği lensteki güç tarafından belirlenir ve bundan dolayı güç fonksiyonur. Amaçlanan odak

noktasının ( $=11,4 \mu\text{m}$ ) yarı güçteki bant genişliğinin (FWHM) altı katı genişliğe ulaştığı bilgisi lensten  $f$  değeri dışında konumlandırılmış bir açıklıktan ölçülerek elde edilmiştir [35]. Şekil 3.2 (e)'de verildiği üzere, odaklanma verimlilikleri %80'in üstünde olup dalgaboyu değişiminden çok az etkilenmektedir. Cihazın seçilen dalga boyu aralığı sınırlarında optimize edilmesiyle, yüksek NA ulaşabilmek adına kullanılan küçük ve aynı zamanda periyodik birim hücrelerle ilgili verimlilik kayıplarının yanı sıra salt işlevsellik sınırlamalarında da azalma sağlanmıştır. FWHM, her bir dalga boyu için odak noktasında hesaplanmış ve teorik sınırla mukayese edilmiştir. Üretilen lenste NA 0.7 değerinde hesaplanmıştır.

Şekil 3.2 (f) 'da verilen FWHM değerleri, çalışma dalga boyu aralığında teorik sınırdan daha geniş olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlar ışığında, tasarlanan lensin verileri akromatik lens tasarımları hakkında gerçekleştirilen yakın zamanlı çalışmalarla mukayese edilmiş ve kayda değer seviyede NA değerinin daha yüksek olduğu, odaklanma verimliliğinin arttığı, karşılaştırılabilir bant genişliğinin arttığı ve odak uzunluğunun sabit olduğu gözlemlenmiştir [36,37,38]. Dolayısıyla tasarımın olumlu sonuç verdiği ve gelecek vaad ettiği çıkarımına ek olarak geniş bir frekans bandında yüksek bir verimlilikle işlev görebileceği gözlemlenmiştir.

Her ne kadar optik eksen açısından kırılma indisi dağılımı ile ilgili herhangi bir kısıtlama olmasa da, algoritma hafif asimetric bir yapı ortaya çıkarmıştır. Lens yapısının merkezi esasen daha yüksek indisli tek tip malzemeyle, düşük indis değerleri ise düzensiz ve kenarlarına doğru dağıtılmış halde oluşturulmuştur. Lensin sürekli ve karmaşık indis dağılımının üretilebilir kılınması adına, bu yapıda genelleştirilmiş Bruggeman EMT kullanılmıştır. Şekil 3.3 (a) 'da sunulduğu üzere, Hedef Öncelikli algoritma kullanılarak tasarlanan sürekli lens üzerinde Genelleştirilmiş Bruggeman EMT uygulanmış ve ortaya çıkan yapı sadece iki kırılma indisi değerine sahip olarak oluşmuştur. Bunu sağlamak için önce sürekli lens her hücrede efektif dielektrik sabitinin tanımlanabileceği ve üretim koşulları da göz önünde bulundurularak boyutu  $800 \text{ nm} \times 800 \text{ nm}$  olarak seçilen küçük kare hücrelere ayrılmıştır. Kısacası, sürekli lens yapısının 16 dielektrik katsayı değeri her bir hücre değerine atanmaktadır. Her hücre için, sol üst noktadan aşağıya ve ardından da sağ yanındaki iki dielektrik katsayı değeri seçilmiş ve Denklem 3.2'deki denklem kullanılarak efektif dielektrik katsayıları bulunmuştur. 16 dielektrik sabiti kullanılarak, Bu değerlerin oluşturduğu alanda efektif

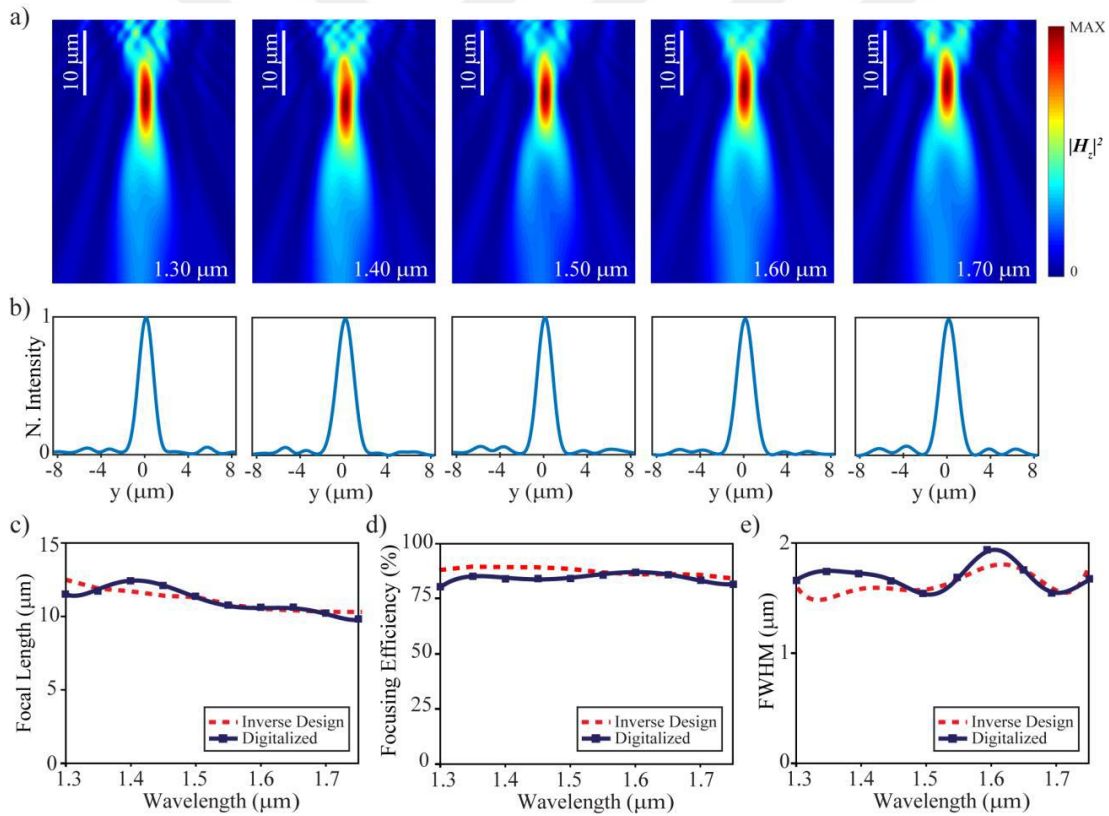
dielerektrik sabiti hesaplanmıştır. 3.3 (a) 'da verilen bu işlem sonucu ortaya çıkan lens yapısı ise Şekil 3.3 (b)'de verilmiştir.  $\epsilon_{eff}$  değerinin elde edilmesini takiben, her bir hücrede elde edilen malzemelerin benzerlerini elde etme amacıyla silindirik hava kanalları tespit edilmiş olan bir alttaş malzemesinin (PLA) merkezinde açılmıştır.



Şekil 3.3 a,b,c) Bruggeman EMT uygulaması illüstrasyonu, d)EMT sonucu lens yapıları[86].

Hava kanalları açılırken Denklem 3.3'den faydalanılmıştır. Denklemde yer alan parametreler Şekil 3.3 (c) 'de görülmektedir. iki indise sahip lens tasarımı gerçekleştirilen Şekil 3.3 (c) 'de verilmiştir. Her bir hücre için hava kanal yarıçapları Şekil 3.3 (d)'dedir. Hava kanallarına ait yarıçap ( $r$ ) değerleri, Şekil 3.3 (d)'de izlenebileceği üzere  $\epsilon$  dağılımı bakımından  $i_{eff}$  farklılığına sahiptir. Burada, dielektrik malzemedan oluşan sütunlardan değil, farklı delik yarıçaplarına sahip olan nanohollü bir yapı ortaya çıkarılmıştır. Bu yapıda birbirinin üstünde duran bir dış parçalar olmadığı nedeniyle düz optik yapısı olarak nitelendirilebilir. Malzeme doldurma oranı, malzeme hacmi/ birim hücre oranı olarak hesaplanabilir ve bu durumda bu değerler maksimum 0,6 ve minimum 0,01 değerindedir.  $\epsilon_{eff}$  az dağılımlı olması, dielektrik malzeme kullanılması dalga boyuna bağlı odak sapmasının azalmasını desteklemiştir[39].

Şekil 3.2 (a) ve 3.3 (c)'de görüldüğü üzere, kırılma indisi profili her bir hücrede farklılık göstermiş olsa da enine yönlenme boyunca yerel bir tekdüzelik göze çarpmaktadır. Örnek olarak, lensin orta kısmındaki dielektrik malzeme dağılımı gelen ışık açısından faz gecikmesine sebebiyet vermektedir. Dış taraftaki diğer kısımlarda, hava ve dielektrik materyalleri etkili bir şekilde bir arada toplanmışlardır. Dalga ön yüzünün modüle edilmesiyle istenilen odak noktasında kümelenme elde edilmiştir. Işığın kırılma fonksiyonu sayesinde lensteki ışık odaklaması iyileştirilmiştir bunun yanı sıra zayıf kırınım fonksiyonu da bu odaklama iyileştirmesine pozitif yönde katkı sağlamıştır. Yukarıda yazıldığı üzere, tasarlanan yapı optik eksene göre asimetrik bir yapı olmasına karşın, odak çevresine bakıldığında simetrik bir şekilde dağılım gözlemlenmiştir. Şekil 3.4'de Bruggeman EMT kullanılarak üretilen lens için NA, bant genişliği ve odaklanma verimliliği parametreleri görülmektedir.

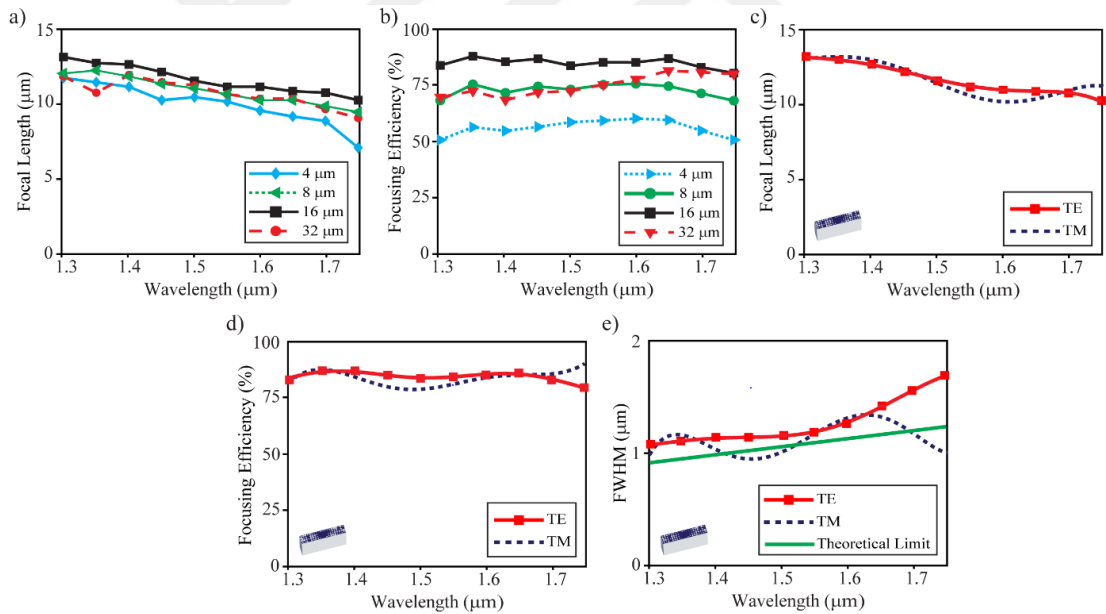


Şekil 3.4 Bruggeman EMT ile elde edilen lens yapısının a) Odaklama gücü b) Yoğunluk Grafikleri c) Odak uzaklığı d) Odaklama Verimliliği e) FWHM grafiği[86].

Şekil 3.4 (a) 'da çeşitli dalga boyları için XY düzleminde hesaplanmış manyetik alan yoğunlukları yer almaktadır. Hedef öncelikli algoritma kullanılarak tasarlanan lensle mukayese edildiğinde, hedef dalga boyu aralığı açısından odak noktalarının çalışma



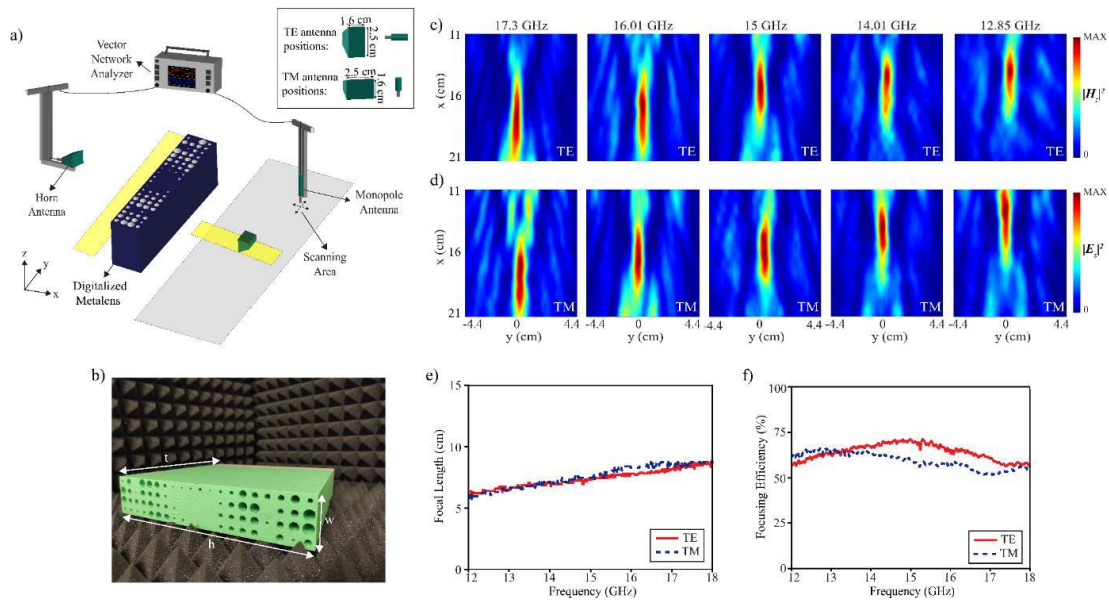
bant genişliği boyunca anlamlı derecede eşit oldukları gözlenmektedir. Çeşitli dalga boylarındaki odak noktasına ait yoğunluk profillerini gösteren Şekil 3.4 (b)'den hareketle; odak düzlemlerinde kırınım nedenli bir bozulma olmadığı anlaşılmaktadır. Tasarım bant genişliğinden örneklenen dalga boylarında Bruggeman EMT uygulanarak üretilen lensin odak uzunlukları Şekil 3.4 (c)'de görülmektedir. Odak uzaklığındaki sapma anlamlı miktarda değildir. Şekil 3.4 (d)'ye göre, odaklanma verimliliği daima %80'in üzerinde bir değere sahiptir. Bu, Hedef Öncelikli algoritma kullanılarak tasarlanmış yapıya kıyasla verimliliğe dair bir düşüş olmadığı anlamına gelir. Şekil 3.4 (e) 'de FWHM ile ilgili sonuçlar verilmiştir. Bruggeman EMT uygulanarak üretilen lense ait FWHM değerlerinin, Hedef Öncelikli algoritma kullanılarak üretilen lense ait FWHM değerlerine oldukça yakın olduğu görülmektedir. Neticede, üretilen lensler performans bakımından anlamlı bir farklılık göstermemiş ve Hedef Öncelikli algoritma kullanılarak oluşturulan yapının Bruggeman EMT kullanılarak başarıyla taklit edilmiştir.



Şekil 3.5 Bruggeman EMT ile elde edilen lens yapısının farklı kalınlıklardaki a) Odak Uzaklığı b) Odaklama Verimliliği c) TE ve TM için Odak uzunluğu grafiği d) TE ve TM için Odaklama Verimliliği e) FWHM grafiği[86].

2D olarak en iyi haline getirilmiş olan tasarımın etkin sonuç vermesinden ötürü 3D versiyonunu gerçekleştirmek için kalınlık optimizasyonu ile yetinilmiştir. Lensin geniş bant performansını belirleyen iki esas parametre vardır. Bunlar, odak uzaklığı sabitliği ile odaklanma verimliliğidir. Dolayısıyla, 10 farklı değer için yapının kalınlık değeri

minimum 0,25  $\mu\text{m}$ , maksimum 32  $\mu\text{m}$  olarak çeşitlendirilmiştir. 3D yapının verdiği performans parametrelili odaklama verimliliği ve odak uzaklığı olarak belirlenip ölçülmüştür. Bu performans farklı kalınlıklar için ölçülmüştür ve Şekil 3.5'da verilmiştir. Kalınlık 16  $\mu\text{m}$  olarak kullanıldığında dalga boyun bağlı olarak odaklama verimliliği çok az değişmiş; 2D performansla benzerlik göstererek %80'in üzerinde odaklanma verimliliği sergilenmiştir. Bunun yanı sıra; odak uzaklığı değişimi için de 2D lens ile benzerlik gözlemlenmiştir. Bu sebeple 2D ve 3D lenslerin performansının 16  $\mu\text{m}$  kalınlık kullanıldığında anlamlı derecede benzer olduğu sonucu çıkarılabilir. Bruggeman EMT kullanılarak üretilen lensin geometrisinde değişik çaplarda hava delikleri olan hücreler bulunmaktadır. Yapının polarizasyona karşı duyarsızlığı birim hücredeki deliklerin yatay ve dikey simetrisi ile sağlanmıştır [40,41,42]. Polarizasyon bağımsızlığının elde edilmesi, birim hücrelerin (ve üretilen lensin) küresel simetrisinin direkt bir sonucudur. Şekil 3.6 (c) 'den de anlaşılacağı üzere, odak uzaklığı TE ve TM polarizasyonlarının her ikisi için de tasarım dalga boyu çevresinde sabit kalmış; maksimum odak kayması değeri 1.1  $\mu\text{m}$  bulunmuştur. Odaklanma verimliliği daima %75'in üzerinde olup mutlak verimlilik %84 olarak ölçülmüştür. FWHM açısından sonuçlar, çalışma dalga boyu aralığında TE ve TM polarizasyonlarının her ikisi için de kırınım limitine yakın bulunmuştur. Bu bilgiler ışığında, sunulan 3D lensin polarizasyona karşı duyarsız bir yapı olarak çalıştığı teyit edilmiştir.



Şekil 3.6 Deneyin şematik görünümü, Üretilen lens ve deney sonuçları[86].

Bulunan sayısal sonuçların doğrulanması ve polarizasyon duyarsız ve akromatik odaklanma etkisinin gösterilmesi adına 12-18 GHz frekans aralığında bir dizi mikrodalga deneyi yapılmıştır. Şekil 3.6 (a)'da görüldüğü üzere deney düzeneğinde, bir vektör ağ analizörü (VNA) ve ölçüm cihazı ve mikrodalga oluşturmak için kullanılmıştır. Bunun yanında bir motorlu stand kullanılmıştır ve bu motorlu stand sayesinde tek kutuplu antenlerle manyetik ve elektrik alanlarını sabit uzaklıklık değişimlerinde ölçümü yapılabilmektedir. Bu ölçümler Şekil 3.6 (a)'da görülen gri alanda tarama yapmıştır. Bu tarama X yönünde 2mm, Y yönünde 5mm dir. Standart kazançlı huni antenlerden birinin açıklık uzaklığı 2.5cm diğerininki ise 1.6cm dir ve yapıya 30cm uzaklığa yerleştirilmiştir. Çünkü Gauss profilli dalganın yarı düzlemler bir dalgaya dönüşmesi amaçlanmaktadır. TM polarizasyonu uyumunu sağlamak adına, antenin X yönü genişliği 2.5 cm olarak belirlenmiş ve Z eksenine dik olarak tek kutuplu anten sabitlenmiştir. TE polarizasyonu uyumunu sağlamak adına, antenin genişliği X yönünde 1.6 cm olarak belirlenmiştir. Şekil 3.6(a)'da yapının ön tarafında gösterilen sarı alan giriş gücü olarak verilmiştir ve bu güç 5mm çözünürlükteki antenlerle sağlanmıştır. Yapının arka tarafında bulunan optik eksen üzerinde tirmi nokadan ölçüm alınmıştır. Bu ölçümlerin başlangıç noktası olarak yapıdan 11cm uzaklık seçilmiştir ve 5mm aralıklarla 21cm uzaklığa kadar ölçümler yapılmıştır. Tasarımı gerçekleştirilen lens üç boyutlu yazıcı ile basılmıştır. Üç boyutlu Eriyik Yığılma Modellemesi(FDM) ile PLA malzemesi kullanılarak üretilmiştir. Maxwell denklemlerinin istenilen ölçeğe uyarlanabilmesi sayesinde tasarımlar belirlenen dalga boyu aralığında çalıştırılabilir. Bunun için yapıda bir takım değişiklikler yapılması gerekmektedir. Bundan dolayı merkezi çalışma frekansını 15 GHz (13.330 kat büyütülmüş) değerine ulaştırmak için yapı parametreleri 13.330 kat arttırılmıştır. Sonuçta, deneyde üretilen yapıya ait boyutlar X yönünde 21,4 cm (h), , Y yönünde 4,3 cm (w) ve Z yönünde 21,4 cm (t) olarak bulunmuştur. Şekil 3.6 (b)'de bu yapı ve denk gelen parametreler incelenebilir. Şekil 3.20'de 12–18 GHz frekansları arasında elde edilen deney sonuçları verilmiştir. Odak noktası çevresinde ölçülmüş olan alan yoğunluğu dağılımları, TE ve TM polarizasyonları Şekil 3.6 (c) ve Şekil 3.6 (d)'de gösterilmiştir. Odak uzunluğu değişimi Şekil 3.6 (e) 'de gösterilmiştir. Mikrodalga bölgesindeki odak uzunluğuna ait maksimum sapma yaklaşık 5 cm'dir. İlgili sapma 3D sayısal sonuçları gözetilerek mikrodalga rejimi için 4.26 cm olarak hesaplanmaktadır. İki değer yaklaşımı sebebiyle renk sapması düzeltme bağlamında deney sonuçları anlamlı bir başarı yakalamıştır. Deneyde TE ve TM polazarizasyonları

nedeniyle odak ölçümünde tespit edilen maksimum fark 16.4 GHz için %4 değerindedir. Söz konusu fark, tek kutuplu antenin kısmen yanlış hizalandırılmasıyla ilgili durumlar sebebiyle ortaya çıkabilir. 15 GHz tasarım frekansı olarak seçilmiştir. Bu çalışma frekansına bağlı olarak odak mesafesi TE ve TM polarizasyonları için sırasıyla 15 cm ve 15,5 cm olarak gözlemlenmiştir. NA değerleri deneysel olarak ölçülmüştür ve bu değerler TE polarizasyonu için 0.71'e ve TM polarizasyonu için 0.69'a eşit olması ilgi çekicidir. Sonuçta, sayısal sonuçlar ile deneysel ölçümler arasında uyum bulunmaktadır. Şekil 3.6 (f)'de ilgili odaklanma verimliliği değerleri incelenebilir. Bu çalışmada verimlilik, ortalama çıkış gücünün, ortalama giriş gücü değerlerine bölünmesi ile hesaplanmıştır. Minimum verimlilik TE polarizasyonunda %58, TM polarizasyonunda %53 olarak hesaplanırken, maksimum verimlilik TE polarizasyonu için %74, TM polarizasyonu için %66 olarak hesaplanmıştır. Ortalama odaklanma verimliliği %62 değerinde tespit edilmiştir. Ayrıca, üretilen lenste fabrikasyon uyumluluğunun sağlanması adına minimum yapı boyutları modifiye edilmiştir. Bu yapı boyutları mikrodalga bölgesinde 0,67 mm olarak kullanılmıştır. Daha hassas yapılar ile verimlilik artışı sağlanabilir.

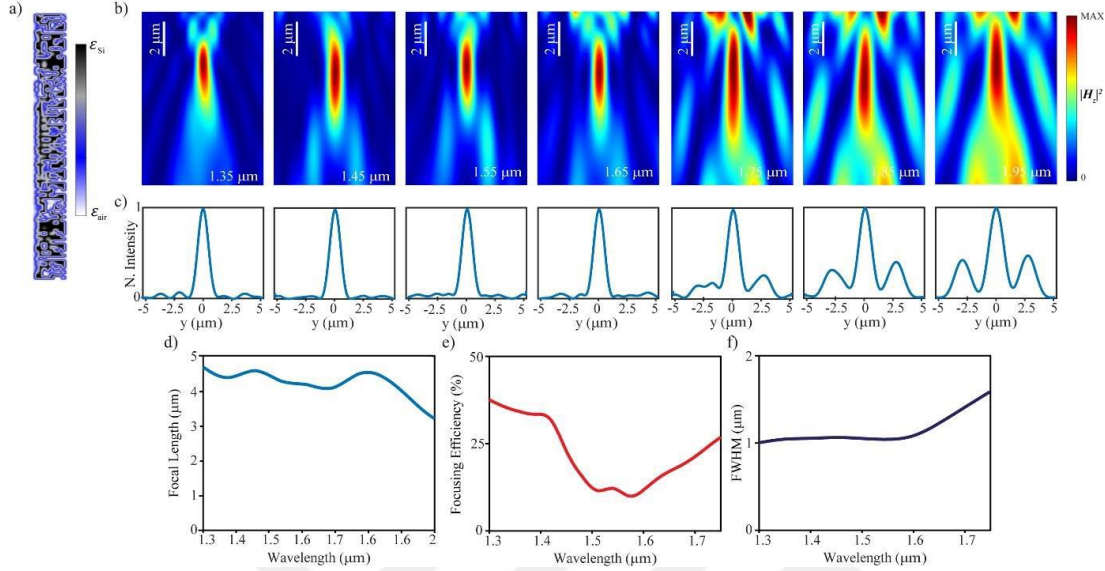
#### **4. YÜKSEK ODAKLAMA VERİMLİLİĞİNE SAHİP GENİŞ BANT, POLARİZASYON BAĞIMSIZ AKROMATİK YÜKSEK İNDİSLİ LENS TASARIMI**

Tezin bu kısmında, baz olarak Silikon malzemesinin alındığı lens tasarımı üzerine çalışmalar yapılmıştır. Baz olarak Silikon malzemesinin kullanılmasının sebebi, Silikon ile yapılan fotonik cihazların üretimlerinin halihazırda kullanılmakta olan yarı iletken üretim teknikleri ile gerçekleştirilebilmesidir. Birçok entegre devrede alt tabakanın silikon kullanılması, optik ve elektronik bileşenlerin tek bir gövdede birleştirildiği hibrit cihazlar üretmeye de olanak sağlar[43]. İçlerinde IBM ve Intel'in bulunduğu çoğu elektronik üreticisinin yanı sıra akademik gruplar tarafından da güncel araştırmalar yürütülmektedir[44,45].

Bu bölümde, Hedef Öncelikli algoritma kullanılacak ve 1300-2000 nm dalgaboyları arasında Enine Manyetik (TM) ve Enine Elektrik (TE) polarizasyon odaklanması becerisine sahip olarak tasarlanan akromatik lensler incelenecektir. Tasarım, yedi dalga boyunda en iyi hale getirilerek geniş bantta işlerliği olması amaçlanmıştır. İlgili dalgaboyları 100 nm artacak şekilde 1300 ila 2000 nm aralığında çeşitlendirilmiştir. X ve Y yönlerinde sırasıyla 0.8  $\mu\text{m}$  ve 9.6  $\mu\text{m}$  değerlerinde belirlenen kare piksellere ayrılmıştır. Bu pikseller, dielektrik sabiti değerlerinde olup 0.1  $\mu\text{m}$  x 0.1  $\mu\text{m}$  büyüklüğündedirler. Odak uzaklığı (f) ise 4.4  $\mu\text{m}$  değerinde belirlenmiştir.

Bu çalışma için simülasyonlar, tasarımı yapılan lenslere ait optik özelliklerinin değerlendirilmesi adına Lumerical FDTD yazılımında 3D olarak uygulanmıştır. Simulasyon alanı Mükemmel Uyumlu Katmanlar (PML) ile çevrilmiştir. Algoritmaya verilen hedef, belirlenen bant genişliği üzerinde her dalga boyunda kabul edilebilir bir odaklama başarısı sağlamaktır. Lens tasarımında yaşanandaki iyileştirme problemi Denklem (3.4) ve Denlem (3.5)'teki haliyle uygulanmıştır. Sistem girdisi olarak bir TE polarizasyonlu düzlem dalga fotonik verilmiştir ve sistem çıktısı ise Denklem (3.6)'da belirtilen hiperbolik faz denklemine sahip bir dalga olarak belirlenmiştir. OB-

1 belirlenen kısıtlamalarla 10000 iterasyon için gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.1(a)'da gösterilen yapıya erişilmiştir. Tasarıma ait 3D yapının simulasyon çıktıları ve odak uzaklığı odak verimliliği ve FWHM grafikleri Şekil 4.1'de sunulmuştur.

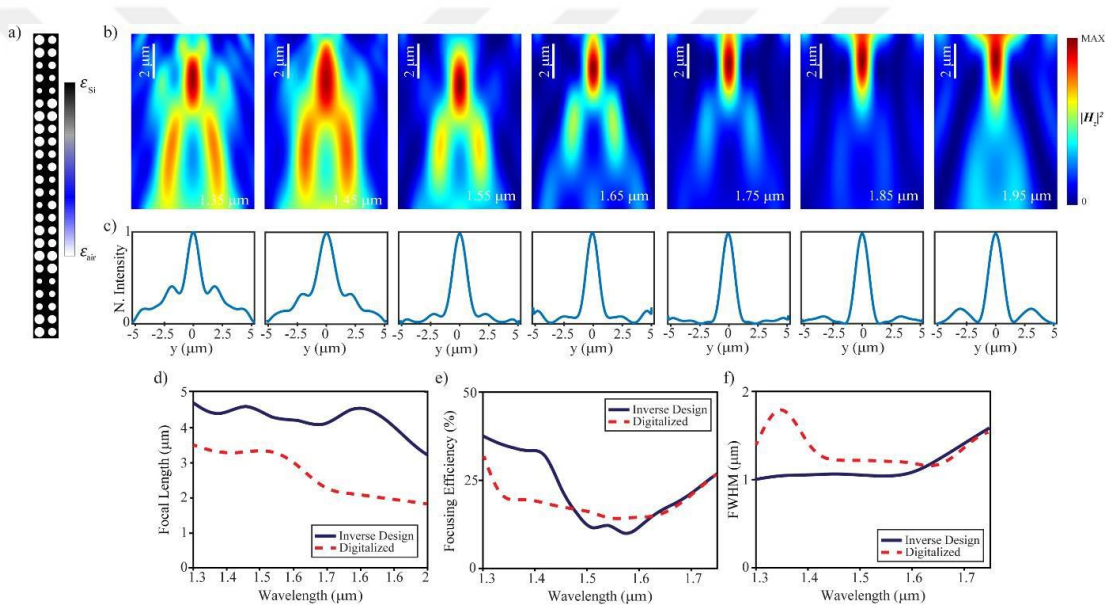


Şekil 4.1 a) Silikon bazlı lens yapısı b,c) Odak Gücü ve Yoğunluk Grafiği d) Odak Uzaklığının Dalga Boyuna göre değişimi e) Odaklama verimliliği f) FWHM grafiği[86].

Yapı kalınlığı simulasyonlarda 220 nm olarak seçilmiştir çünkü bu kalınlık optik litografide standart olarak kabul edilmektedir. Değişik dalga boyları için manyetik alan yoğunlukları Şekil 4.1 (b)'de gösterilmiştir. Seçilen farklı dalga boylarında odakta oluşan yoğunluk profilleri Şekil 4.1 (c)'de görülmektedir. Söz konusu profiller incelendiğinde, yüksek dalga boyunda odakta kırınım sebepli bir bozulma olduğu gözlemlenmektedir. 1300-2000nm dalga boyu arasında lensin odak uzaklığı performansı Şekil 4.1 (d)'de verilmiştir. Hedef dalga boyu aralığındaki odak uzaklığı farkının maksimum değeri 0.9  $\mu\text{m}$ 'dir. Şekil 4.1 (e)'de sunulduğu üzere, odak verimliliği dalga boyunun farklılaşmasına bağlı olarak değişmekte olup ortalama %22.5 değeri saptanmıştır. NA değeri tasarlanmış lenste 1.09 değerinde bulunmuştur. NA değerinin yüksek olmasını sağlayan temel etken silikonun kırılma indisi değerinin yüksek olmasıdır. Şekil 3.5(f)'te gösterildiği gibi FWHM değerleri çizilmiştir ve ortalama olarak çalışma dalga boyunun teorik sınırından 0.04  $\mu\text{m}$  daha yüksek tespit edilmiştir. Çalışmada tasarımı yapılmış olan lens, akromatik lens tasarımları hakkındaki yakın zamanlı çalışmalarla mukayese edildiğinde, anlamlı bir şekilde daha yüksek NA değeri, yüksek bant genişliği ve odak uzunluğu sabitliği sergilemiştir.

Dolayısıyla, tasarımın olumlu sonuç verdiği ve gelecek vaad ettiği çıkarımına ek olarak geniş bir frekans bandında işlev görebileceği gözlemlenmiştir.

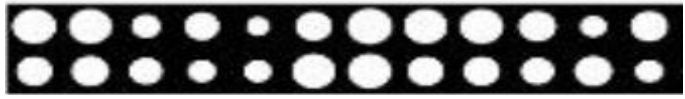
Lensin sürekli ve karmaşık indis dağılımının üretilebilir kılınması adına, bu yapıda genelleştirilmiş Bruggeman EMT kullanılmıştır. Teorinin uygulanmasını takiben, boyutu 400 nm x 400 nm olarak seçilen her bir kare hücrede elde edilen malzemelerin benzerlerini elde etme amacıyla seçilmiş olan Silisyum malzemesinin merkezinde silindirik hava kanalları Denklem 3.3 kullanılarak açılmıştır. Sonuç olarak meydana gelen lens yapısı Şekil 4.2 (a)'da gösterilmektedir ve yapı merkezinin üzerinde kalan kısımda her bir hücre için açılan hava deliklerine ait yarıçap değerleri Çizelge 4.1 verilmiştir.



Şekil 4.2 Bruggeman EMT ile elde edilen a)Silikon bazlı lens yapısı b,c) Odak Gücü ve Yoğunluk Grafiği d) Odak Uzaklığının Dalga Boyuna göre değişimi e) Odaklama verimliliği f) FWHM grafiği [86].

Bunun yanı sıra, malzeme doldurma maksimum 0,93 ve minimum 0,47 değerinde bulunmuştur. Ayrıca, hava deliklerine ait yarıçap değerleri 60 ile 165 nm arasında değiştiği ve 220 nm yapı kalınlığına sahip olduğu için, ortaya çıkan lensin üretimi endüstri standardı olarak kullanılan optik litografiyle gerçekleştirilebilir[46].

Çizelge 4.1: Lensteki ilk 24 hücre için hesaplanan yarıçap değerleri (nm).



150	140	105	140	60	145	165	145	145	160	140	125
105	145	125	140	80	155	150	145	120	110	100	105

Bruggeman EMT ile üretilen yüksek kırılma indisli lens için başarımlı ölçütü parametreleri Şekil 4.2'de gösterilmektedir. XY düzleminde değişik dalga boyları için hesaplanmış olan manyetik alan yoğunlukları Şekil 4.2 (b)'de izlenebilir. OB-1 kullanılarak tasarlanan lensle mukayese edildiğinde, hedeflenen dalga boyu aralığında odak noktalarının öne doğru hareket ettiği görülmektedir. Şekil 4.2 (d) dalga boyu nedeniyle odak uzaklığı grafiği incelendiğinde lens odağının 2.6  $\mu\text{m}$  öne hareket ettiği gözlemlenebilir. Hedef öncelikli algoritma kullanılarak oluşturulan yapıya nazaran odağın kayması, Bruggeman EMT yöntemiyle hesaplanan dielektrik sabitleri değerlerinden dolayıdır. Bu yöntemle yaklaşık değer hesaplanabilmektedir.

Üretilen yeni lenste NA 1.85 değerinde bulunmuştur. Alanyazın çalışmaları tarandığında ise bulunan NA değerinin çalışmalarda yer alan en yüksek NA değerlerine göre %25 daha fazla olduğu tespit edilmektedir[47,48]. Üretilen yeni lensin maksimum odak uzaklığı farkı 1.2  $\mu\text{m}$  değerindedir. Odak noktasına ait farklı dalga boylarındaki yoğunluk profilleri Şekil 4.2 (c)'de gösterilmektedir. İlgili profiller incelendiğinde Hedef Öncelikli algoritma kullanılarak elde edilen tasarımın aksine kısa dalga boylarının odak düzlemlerinde kırınım nedeniyle bir bozulma izlenmektedir. Bruggeman EMT kullanılarak üretilen lensin yüzey yapısında yer alan silikon hava geçişinin keskin olması, yüzey sonlandırmasının oluşmasına neden olur. Alanyazında, yüzey sonlandırmasının görüntü özellikleri açısından belirgin bir etki yarattığı raporlanmıştır [49-52]. İki yapıya ait fotonik bant yapısı yüzey sonlandırmasının etkisinden dolayı birbirinden farklı olduğu için alan profillerinde farklı sonuçlar yaratmıştır. Şekil 3.22 (e)'ye göre tespit edilen odaklanma verimliliği dalga boyuna bağlı olarak zayıf bir şekilde değişmiştir ve tespit edilen odaklanma verimliliğinin ortalama değeri %18.3'tür. Kısacası, OB-1 kullanılarak tasarlanmış olan yapıya nazaran verimlilik %4.2'lik bir azalma gerçekleşmiştir. Şekil 3.22 (f)'de FWHM açısından sonuçlar çizim olarak verilmiştir. Bruggeman EMT kullanılarak üretilen



lense ait FWHM değerlerinin Hedef Öncelikli algoritma kullanılarak tasarlanmış lense ait FWHM değerlerine oldukça yakın olduğu tespit edilmiş ancak NA değeri çok büyük olduğundan dolayı teorik sınırdan ortalama  $0.9\mu\text{m}$  daha yüksek hesaplanmıştır. Sonuçta, tasarımı yapılmış olan lensler performansı değerlendirildiğinde, NA değeri ve odak uzaklığı açısından farklılıklara sahiptir. Lenslere ait dalga boyuna göre odak uzaklığının farkları maksimum  $0.9\mu\text{m}$  ve  $1.2\mu\text{m}$  olarak hesaplanmıştır. Odağın sapmış olmasına rağmen lenslerin toplam odak değişiminin birbirlerine yakın oldukları gözlemlenmektedir. Tasarımdaki amacın dalga boyuna bağlı olarak odak değişiminin azaltılması olduğu düşünülürse, tasarımı yapılmış olan lenslerin birbirlerine akromatiklik başarısı ölçütüyle çok benzedikleri farkedilebilir. İlaveten, üretilen lensin çok yüksek NA değerine sahip olması da tarama ve görüntülemeledeki uygulamalar açısından geleneksel lenslere nazaran daha etkin bir şekilde performans gösterebileceğini göstermektedir. Ayrıca ana maddesi silikon olduğu için CMOS uyumluluğu bulunmaktadır.



## 5. DERİN ÖĞRENME YARDIMIYLA METAYÜZEY TABANLI POLARİZASYON BAĞIMSIZ IŞIN BÖLÜCÜ TASARIMI

### 5.1 Işın Bölücüler

Fotonik entegrasyon sistemlerinin takibi, mevcut entegre fotonik çalışmasını yönlendirir. Nano işleme teknolojisinin artan olgunluğu ile, giderek daha karmaşık ve karmaşık optik sistemlerin küçük boyutta inşa edilmesini mümkün kılar ve bileşenlerinin minyatürleştirilmesini ve çok işlevli hale getirilmesini gerektirir. Bir ışın bölücü (BS), birçok optik sistemde ışın yollarını dağıtmak ve birleştirmek için kritik bir bileşendir. Normal optik sistemlerde, en yaygın BS küpü, gelen ışını dikey olarak iki eşit ışına bölmek için tipik olarak iki dik açılı prizma kullanılarak oluşturulur[53]. İki farklı ışını tek bir kirişte birleştirmek için ters olarak da kullanılabilir. Ayrıca, dalga kılavuzu sistemlerinde MZM, bölme ve birleştirme için silikon ışın bölücüler kullanılır [54-56]. Bununla birlikte, bölme etkisi, ağır ve katı cam konstrüksiyonun çift kırılmasına dayanır. Normal BS'nin kompakt optik sistemlere entegre edilmesini zorlaştırır. Plaka BS[57], ızgara BS[58] ve dikroik BS[59] gibi bazı düz tip BS'ler daha önce gösterilmiştir. Boyutları küp BS'den önemli ölçüde daha küçük olmasına rağmen, bu BS'ler sabit ayırıcı oranları, farklı uzunluklardaki giriş yolları ve pahalı malzemeleri nedeniyle entegrasyon için hala uygun değildir.

Işığın dalga boyundan daha küçük olan yapay mikro yapının periyodik bir düzenlemesinden oluşan metasurface, mikro yapıları ayarlayarak elektromanyetik dalgaları faz, genlik ve polarizasyon gibi çoklu fiziksel boyutlarda manipüle edebilir[60-63]. Metasurface'in ortaya çıkışı, birçok uygulamada yeni fırsatlar sunmaktadır. Şimdiye kadar, metayüzeyler dalga cephesi şekillendirme[64-67], holografi[68-70], polarizasyon modülasyonu[71-73], optik iletişim[74-76], sensörler[77-79] ve bunun gibi alanlarda uygulanmaktadır. Genel olarak metayüzeyler, kullanılan malzemelerin birincil sınıfına göre metalik metayüzeyler ve dielektrik metayüzeyler olmak üzere iki ana kategoriye ayrılabilir. İlki, yüzey plazmon

salınımlarından yararlanır; ikincisi Mie rezonansına dayanır. Her iki tür meta yüzey de, geçtiğimiz yıllarda uzamsal kontrolden frekans karıştırmaya kadar meta-optiğe önemli katkılarda bulunmuştur. Metalik metayüzeyler ile karşılaştırıldığında, dielektrik metayüzeyler sadece görünür ve yakın kızıl ötesi frekansta yüksek iletim verimliliği sunmakla kalmaz, aynı zamanda geometriye ve yüksek giriş gücü eşliğine bağımlılığı nedeniyle kolayca ayarlanabilen bir saçılıma sahiptir[80,81]. Ayrıca, birincil malzemelerin düşük maliyetleri ve son teknoloji yarı iletken prosesle uyumluluk, dielektrik meta yüzeyleri fotonik entegrasyon sistemlerinde BS tasarımları için iyi bir seçim haline getirir. Daha önceki literatürde birçok metasurface bazlı BS sunulmuştur[82-85]. Bu BS'ler, gelen ışının orijinal polarizasyonuna veya frekans farkına dayanır. Ne yazık ki, polarize ışık durumunu kullanan uygulamalar için, hem polarizasyondan bağımsız hem de ayarlanabilir güç dağılımına sahip bir tasarım eksikliği vardır. Ayarlanabilir bölme oranı ile isteğe bağlı polarizasyonda çalışan BS'ler talep görmektedir.

## 5.2 Tasarım Aşaması ve Teorik Açıklaması

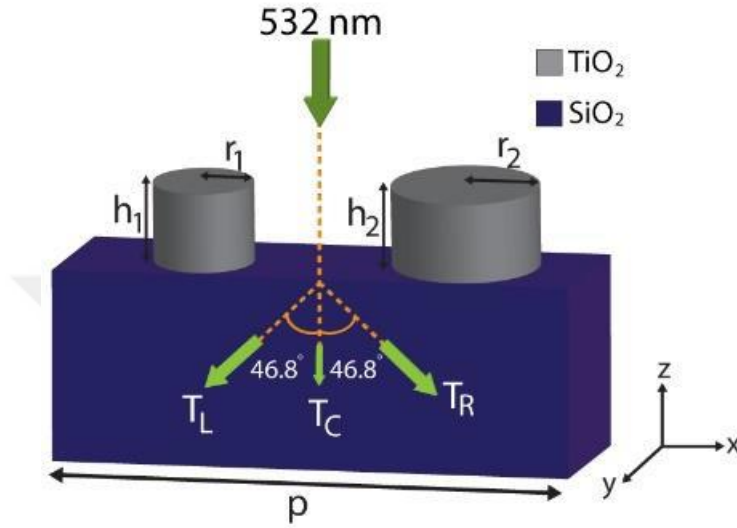
Meta yüzeyleri tasarlamamanın temel ilkesi, yansıyan veya kırılan ışınların dalga cephelerini kontrol edebilen birimin geometri şeklini uzamsal olarak tasarlayarak ve düzenleyerek arayüz boyunca alan süreksizliği tanıtmaktır. Şekil 1, tamamen dielektrik meta yüzey tabanlı BS'nin şematik diyagramını göstermektedir. Gelen ışık alanı Si nano-halka alanından geçtiğinde, optik yolun etkin uzunluğunu büyük ölçüde değiştirecek ve farklı faz gecikmelerine yol açacak olan Fabry-Perot rezonansının etkisine neden olacaktır. Gelen ışının dalga cephesi, O merkez noktasından iki parçaya bölünmüştür. Genelleştirilmiş Snell yasasına göre, sol ve sağ ışınlar üzerindeki  $\theta_1$  ve  $\theta_2$  çıkış açıları sırasıyla aşağıdaki denklemlerle ifade edilebilir:

$$n_t \sin(\theta_1) = n_i \sin(\theta_i) - \frac{\lambda}{2\pi} \frac{d\phi_1}{dx} \quad (5.1)$$

$$n_t \sin(\theta_2) = n_i \sin(\theta_i) + \frac{\lambda}{2\pi} \frac{d\phi_2}{dx} \quad (5.2)$$

burada  $\theta_i$  gelen açıdır ve  $n_i$  ve  $n_t$  sırasıyla gelen ve kırılma ortamının kırılma indisidir.  $d\phi_1$  ve  $d\phi_2$  sırasıyla sol ve sağ taraflardaki faz değişimleridir.

Tezin bu aşamasında ışın bölücü metayüzey tasarımını derin öğrenme ile oluşturmayı amaçlamıştır. Çalışma dalga boyu olarak 532 nm seçilmiştir ve gelen ışını  $-46.8^\circ, 0, 46.8^\circ$  açılarıyla kırması amaçlanmıştır. Şekil 5.1 te görüldüğü gibi kırılan bu ışınlardan sola doğru kırılanı  $T_L$ , kırılmadan devam edeni  $T_C$ , sağa doğru kırılan ışını ise  $T_R$  temsil etmektedir.

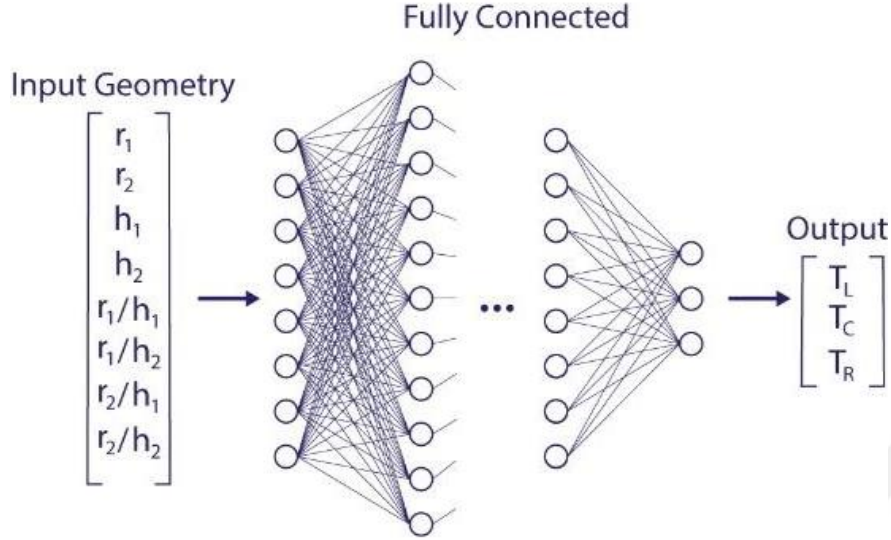


Şekil 5.1 Yapay Sinir ağı yardımıyla tasarlanacak yapı ve parametreleri[86]

Metayüzey yapısı  $SiO_2$  altaşı üzerine iki tane  $TiO_2$  nano silindirik çubuklardan oluşmaktadır. Burada  $SiO_2$  kırılma indeksi 1.50,  $TiO_2$  kırılma indisi ise 2.43 tür. Süper hücrenin periyodik boyurları ise x ekseninde 500nm, y ekseninde 250nm dir. Şekil 15'te belirtildiği gibi  $h_1$  ve  $r_1$  ilk nano silindirik çubuun yükseklik ve yarıçap parametresidir olup  $h_2$  ve  $r_2$  ilk nano silindirik çubuun yükseklik ve yarıçap parametresidir. Etkili simülasyon ayarlarını kurduktan sonra, farklı yapı parametrelerine( $h_1, r_1, h_2, r_2$ ) karşılık gelen iletim değerlerini elde etmek için Lumerical FDTD programını kullanarak veri setini topladık. Elde edilen veri setinde yapı-iletim çifti olarak 13767 adet simülasyon sonucu vardır. Bu sayı kullanılan periyod için üretilebilecek anlamlı tüm olası yapıların(yaklaşık 6.255 milyon) sadece %0,022'si ne denk gelmektedir. 13767 adet simülasyonun 11014'ü derin öğrenme için eğitim veri setinde kullanılırken, kalan simülasyonlar ise test verisi olarak kullanıldı.

Sinir ağı yapısının tasarımında girdi olarak yapı parametreleri ve bunların birbirlerine oranları( $h_1, r_1, h_2, r_2, \frac{r_1}{h_1}, \frac{r_1}{h_2}, \frac{r_2}{h_1}, \frac{r_2}{h_2}$ ) kullanıldı. Temel yapı parametrelerinin

kullanılmasının yanı sıra birbirlerine oranlarının kullanılmasının birbirleri ile ilintili örüntü ile sinir ağının daha kolay öğrenmesidir. Şekil 5.2’da sinir ağı yapısının şematik görüntüsü verilmiştir.



Şekil 5.2 Yapay Sinir Ağı yapısı[86]

Veri setinde ön işlem olarak standard ölçeklendirme kullanıldı. Standard ölçekleme Denklem xx teki gibidir.

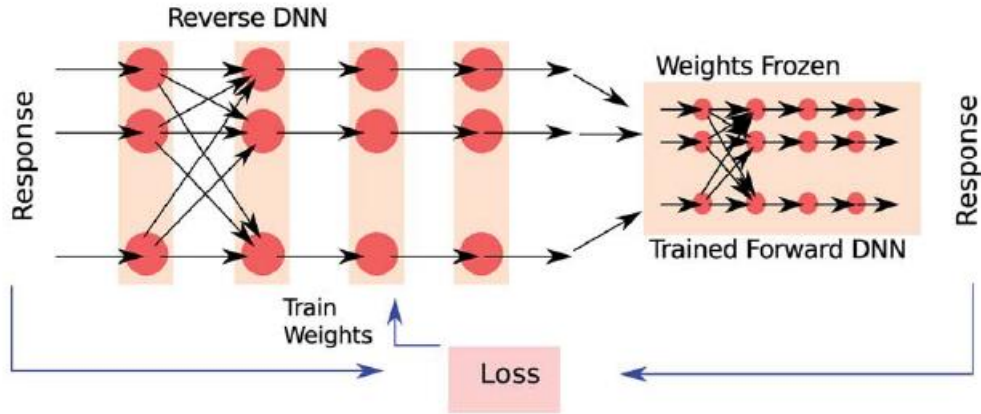
$$y = \frac{(x - \text{ortalama})}{\text{standard sapma}} \quad (5.3)$$

Çizelge 5.1: Yapay sinir ağı katmanları, nöron sayıları ve aktivasyon fonksiyonları

Katman ADI	Nöron Sayısı	Aktivasyon Fonksiyonu
Girdi Katmanı	8	Elu
Katman 1	9	Elu
Katman 2	11	Elu
Katman 3	13	Elu
Katman 4	15	Elu
Katman 5	15	Elu
Katman 6	13	Elu
Katman 7	11	Elu
Katman 8	9	Elu
Katman 9	6	Elu
Çıktı Katmanı	3	Elu

Sinir ağı yapısının parametreleri Çizelgede gösterilmiştir. Bu sinir ağında Çıktı Katmanında aktivasyon fonksiyonu olarak sigmoid yerine elu kullanılmasının nedeni

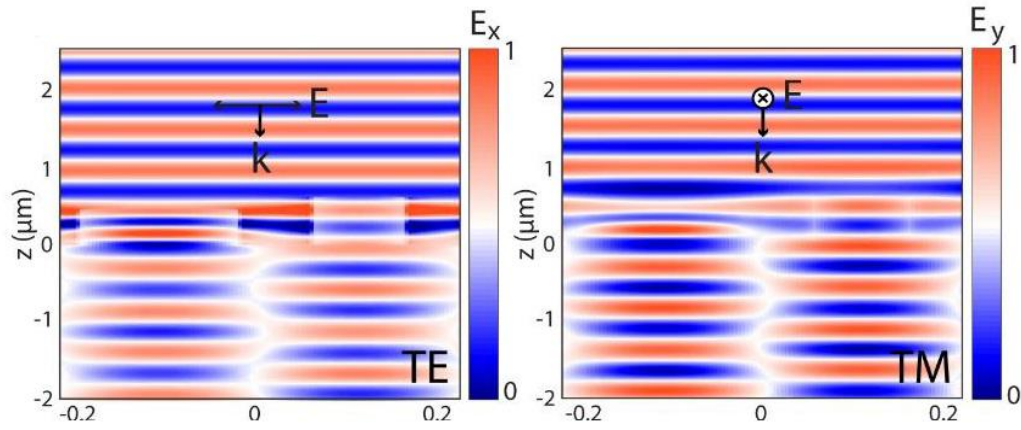
herhangi bir sınıflandırma yapmaktan ziyade bir iletim değeri arayışında olmamızdır. Sinir ağında optimizer olarak ADAM algoritması kullanılmıştır ve loss fonksiyonu ortalama kare hatası(MSE) kullanılmıştır. Sinir ağı bu ayarlarda eğitimini tamamladıktan sonra test sonuçlarında MSE nin  $6.51 \times 10^5$  olduğu görülmüştür. Böylelikle model, model\_foward olarak kaydedilmiştir. İletim değerlerinden yapı parametrelerini elde etmek için ilk aşamada elde ettiğimiz model\_forward'ın ağırlıklarını dondurup başına girdi katmanı 3, çıktı katmanı ise model\_forward ile eşleşecek 8 nöron yerleştirildi. Nöron sayıları sırasıyla 15, 20, 20, 30, 30, 50, 40, 30, 20 olacak şekilde 9 tane gizli katman daha oluşturuldu. Yapının daha iyi anlaşılması için Şekil 5.3 incelenebilir.



Şekil 5.3 Tersine tasarım için kullanılacak tandem yapısı şematiği[87]

Ancak bu yapı ile işlem yapıldığında bir iletim değerine karşılık birden fazla yapı parametresi olabileceğinden dolayı sinir ağı bunu öğrenememiştir ve hatalı sonuçlar vermektedir. Bu sorunu çözmek için model\_forward kullanılarak bir içlerinde yapı parametrelerine karşılık geleceken iletim değerlerinin bulunduğu bir veri seti oluşturuldu. Bu veri setinde yaklaşık 6.2 milyon veriyi 1 saat gibi kısa bir sürede verdi. Buna karşılık 13767 adet veriyi toplamak için Lumerical FDTD programıyla 7 günlük bir çalışma gerekiyordu. Derin öğrenmenin hızından faydalanarak oluşturulan veri setinde bir sözlük araması algoritması yazıldı. Buna göre iletim değerlerini  $T_L=0.5$  ,  $T_c=0$  ,  $T_R=0.5$  olacak şekilde seçilip veri setinde arama yapıldığında  $r_1$  ,  $r_2$  ,  $h_1$  ,  $h_2$  yapı parametrelerinin en yakın değerlerinin sırasıyla  $0.1 \mu\text{m}$  ,  $0.06 \mu\text{m}$  ,  $0,44 \mu\text{m}$  ,  $0,6 \mu\text{m}$  olduğu görülmüştür. Bu değerler Lumerical FDTD simülasyon programında test edildiğinde  $T_L=0.487$  ,  $T_c=0$  ,  $T_R=0.487$  olduğu gözlemlenmiştir. Bu test sonucu hem TE hem de TM de haritanlandırılmış olarak Şekil 5.4'te gösterilmiştir. Bunun sonucu olarak derin

öğrenmenin lineer olmayan kompleks problemlerin çözümünde kullanılmasının daha verimli olduğu gösterilmiştir.



Şekil 5.4 Derin öğrenme yardımıyla tasarlanan ışın bölücünün simulasyon sonucu[86]



## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez içerisinde derin öğrenme ve algoritma yardımıyla metayüzey ve lens tasarımı sunulmuştur. Bu yapıların tasarımında geleneksel Yapay Sinir Ağları ve Hedef Öncelikli Algoritma kullanılmıştır.

Tezin ilk bölümünde metayüzeylerin tarihçesinden, kullanım alanlarından ve bu alanlara getirdiği yeniliklerden ve faydalarından bahsedilmiştir. Ayrıca bu bölümde derin öğrenme yardımıyla metayüzeylerin nasıl kullanılıp geliştirilebileceğinden, hangi alanlarda kullanılacağından bahsedilmiştir.

Tezin ikinci bölümünde ise yapay sinir ağları yapısından, aktivasyon fonksiyonlarından, hiperparametrelerden ve bu parametrelerin yapıyı nasıl etkilediklerinden, sinir ağları tiplerinin kısaca tanımlarından bahsedilmiştir. Bunun yanında eğitim sürecini hızlandırmak ya da daha verimli hale getirmek için geliştirilen Aktarım öğrenimi, toplu normalleştirme, seyreltme gibi kavramlardan bahsedilmiştir. Ayrıca bu bölümde hedef öncelikli algoritmanın temelinden ve matematiksel açıklamasından bahsedilmiştir.

Tezin üçüncü ve dördüncü kısımlarında geniş açılı polarizasyondan bağımsız akromatik lens tasarımlarının adımları ve üretim sürecinden bahsedilmiştir. Süreçte ilk olarak tasarımın nasıl yapıldığı hakkında bilgiler verilmiştir daha sonra bu tasarımın simulasyon sonuçları ve üretim sonucundaki deneysel sonucu da tez kapsamında belirtilmiştir.

Tezin beşinci kısmında derin öğrenme yardımıyla ışın bölücü yapılarının tasarımından bahsedilmiştir. İlk olarak ışın bölücüler hakkında kısa bilgi verildikten sonra veri üretim aşaması, veri ön işleme, yapay sinir ağının oluşturulması ve parametreleri ve sonuçları işlenmiştir.

Sonuç olarak, iki farklı tasarım yöntemi olan hedef öncelikli algoritma ve yapay sinir ağları ile iki farklı alanda kullanılacak olan biri lens diğeri ışın bölücü tasarlandı. Bu sonuçlara bakarak bu yöntemlerin optik ve fotonik alanında alternatif veya yardımcı yöntem olabilecekleri gösterildi. Böylelikle üretimi daha zor olan yapılardan ziyade

daha kolay üretilebilen yapılara evrilmesi, daha yavaş çalışan cihazlardan ziyade çok daha hızlı cihazlara geçilmesinin önü açıldı.



## KAYNAKLAR

- [1] **Shalaev, V. M.** (2007). Optical negative-index metamaterials. *Nature photonics*, 1(1), 41-48.
- [2] **Moitra, P., Yang, Y., Anderson, Z., Kravchenko, I. I., Briggs, D. P., & Valentine, J.** (2013). Realization of an all-dielectric zero-index optical metamaterial. *Nature Photonics*, 7(10), 791-795.
- [3] **Alitalo, P., & Tretyakov, S.** (2009). Electromagnetic cloaking with metamaterials. *Materials today*, 12(3), 22-29.
- [4] **Wong, K. M., Capasso, A., & Eckhardt, S. G.** (2016). The changing landscape of phase I trials in oncology. *Nature reviews Clinical oncology*, 13(2), 106-117.
- [5] **Ma, W., Liu, Z., Kudyshev, Z. A., Boltasseva, A., Cai, W., & Liu, Y.** (2021). Deep learning for the design of photonic structures. *Nature Photonics*, 15(2), 77-90.
- [6] **Van Veen, F., Leijnen, S.,** (2019) The Neural Network Zoo, Retrieved from <https://www.asimovinstitute.org/neural-network-zoo>
- [7] **Yu, N. & Capasso, A.** (2014). Flat optics with designer metasurfaces. *Nature Materials* 13, 139.
- [8] **Kildishev, A. V., Boltasseva, A. & Shalaev, V. M.,** (2013). Planar photonics with metasurfaces. *Science* 339, 1232009.
- [9] **Landy, N. I., Sajuyigbe, S., Mock, J., Smith, D. & Padilla, N. I.** (2008). Perfect metamaterial absorber. *Physical Review Letters* 100, 207402.
- [10] **Zhang, X. & Liu, Z.,** (2008) Superlenses to overcome the diffraction limit. *Nature Materials* 7, 435.

- [11] **Larouche, S., Tsai, Y.-J., Tyler, T., Jokerst, N. M. & Smith, D. R.,** (2012) Infrared metamaterial phase holograms. *Nature Materials* 11, 450.
- [12] **Pfeiffer, C. & Grbic, A.,** (2013) Metamaterial Huygens' surfaces: tailoring wave fronts with reflectionless sheets. *Physical Review Letters* 110, 197401.
- [13] **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. *Nature Nanotechnology* 10, 937-943.
- [14] **Butet, J., Brevet, P.-F. & Martin, O. J.,** (2015) Optical second harmonic generation in plasmonic nanostructures: From fundamental principles to advanced applications. *Acs Nano* 9, 10545-10562.
- [15] **Li, G. et al.,** (2015) Continuous control of the nonlinearity phase for harmonic generations. *Nature Materials* 14, 607.
- [16] **Carrasquilla, J. & Melko, R. G.,** (2017) Machine learning phases of matter. *Nature Physics* 13, 43.
- [17] **Chen, Y., Lin, Z., Zhao, X., Wang, G. & Gu, Y.,** (2014) Deep learning-based classification of hyperspectral data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 7, 2094-2107.
- [18] **Segler, M. H., Preuss, M. & Waller, M. P.,** (2018) Planning chemical syntheses with deep neural networks and symbolic AI. *Nature* 555, 604.
- [19] **Lu, J. & Vučković, J.,** (2013) Nanophotonic computational design. *Optics Express* 21, 13351-13367.
- [20] **Piggott, A. Y. et al.,** (2015) Inverse design and demonstration of a compact and broadband on-chip wavelength demultiplexer. *Nature Photonics* 9, 374-377.
- [21] **Wiecha, P. R. et al.,** (2017) Evolutionary multi-objective optimization of colour pixels based on dielectric nanoantennas. *Nature Nanotechnology* 12, 163.

- [22] **Hoole, S. R. H.**, (1993) Artificial neural networks in the solution of inverse electromagnetic field problems. *IEEE Transactions on Magnetics* 29, 1931-1934.
- [23] **Kabir, H., Wang, Y., Yu, M. & Zhang, Q.-J.**, (2008) Neural network inverse modeling and applications to microwave filter design. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* 56, 867-879.
- [24] **Liu, D., Tan, Y., Khoram, E. & Yu, Z.**, (2017) Training deep neural networks for the inverse design of nanophotonic structures. *ACS Photonics* 5, 1365-1369.
- [25] **A. Krizhevsky, I. Sutskever, and G. E. Hinton**, (2012) “ImageNet Classification with Deep Convolutional Neural Networks,” in *Advances in Neural Information Processing Systems 25*, F. Pereira, C. J. C. Burges, L. Bottou, and K. Q. Weinberger, Eds. Curran Associates, Inc., pp. 1097–1105.
- [26] **M. Nielsen**, (2015) “Neural Networks and Deep Learning,” *Determ. Press*.
- [27] **J. Yosinski, J. Clune, Y. Bengio, and H. Lipson**, (2014) “How transferable are features in deep neural networks?,” in *Advances in Neural Information Processing Systems 27*, Z. Ghahramani, M. Welling, C. Cortes, N. D. Lawrence, and K. Q. Weinberger, Eds. Curran Associates, Inc., pp. 3320–3328.
- [28] **Ioffe, S., & Szegedy, C.** (2015). Batch normalization: Accelerating deep network training by reducing internal covariate shift. In International conference on machine learning (pp. 448-456). PMLR.
- [29] **Srivastava, N., Hinton, G., Krizhevsky, A., Sutskever, I., & Salakhutdinov, R.** (2014). Dropout: a simple way to prevent neural networks from overfitting. *The journal of machine learning research*, 15(1), 1929-1958.
- [30] **Sapra, N. V., Yang, K. Y., Vercruyssen, D., Leedle, K. J., Black, D. S., England, R. J., ... & Vučković, J.** (2020). On-chip integrated laser-driven particle accelerator. *Science*, 367(6473), 79-83.
- [31] **Huang, J., Yang, J., Chen, D., He, X., Han, Y., Zhang, J., Zhang, Z.**, (2018). Ultra-compact broadband polarization beam splitter with strong expansibility. *Photonics Research*, 6(6), 574-578.

- [32] **Lu, J., Vuckovic, J.,** (2013). Objective-First Nanophotonic Design. *Numerical Methods for Metamaterial Design*, 147-173.
- [33] **Boyd, S., Boyd, S. P., & Vandenberghe, L.** (2004). Convex optimization. *Cambridge University Press*.
- [34] **Weir, W.B.,** (1974) Automatic measurement of complex dielectric constant and permeability at microwave frequencies, *Proceedings of the IEEE*, 62(1), 33-36.
- [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, *Nature communications*, 6(1), 1-6.
- [36] **Wang, S., Wu, P.C., Su, V.C., Lai, Y.C., Chu, C.H., Chen, J.W., Tsai, D.P.,** (2017) Broadband achromatic optical metasurface devices, *Nature communications*, 8(1), 1-9.
- [37] **Zhou, Y., Kravchenko, I.I., Wang, H., Nolen, J.R., Gu, G., Valentine, J.,** (2018) Multilayer noninteracting dielectric metasurfaces for multiwavelength metaoptics, *Nano letters*, 18(12), 7529-7537.
- [38] **Wang, S., Wu, P.C., Su, V.C., Lai, Y.C., Chen, M.K., Kuo, H.Y., Tsai, D.P.,** (2018) A broadband achromatic metalens in the visible, *Nature nanotechnology*, 13(3), 227-232.
- [39] **Hu, T., Tseng, C.K., Fu, Y.H., Xu, Z., Dong, Y., Wang, S., Gu, Y.,** (2018) Demonstration of color display metasurfaces via immersion lithography on a 12-inch silicon wafer, *Optics express*, 26(15), 19548-19554.
- [40] **Lee, D.H., Ling, K., Lim, S., Baek, C.W.,** (2015) Fabrication of polarization-insensitive, multi-resonant metamaterial absorber using wafer bonding of glass dielectric substrate, *Microelectronic Engineering*, 136, 42-47.
- [41] **Hu, F., Wang, L., Quan, B., Xu, X., Li, Z., Wu, Z., Pan, X.,** (2013) Design of a polarization insensitive multiband terahertz metamaterial absorber, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 46(19), 195103.

- [42] **Lee, D., Hwang, J.G., Lim, D., Hara, T., Lim, S.,** (2016) Incident angle-and polarization-insensitive metamaterial absorber using circular sectors, *Scientific reports*, 6(1), 1-8.
- [43] **Lipson, M.,** (2005) Guiding, modulating, and emitting light on silicon-challenges and opportunities, *Journal of Lightwave Technology*, 23(12), 4222.
- [44] **Vlasov, Y.A.,** *Silicon integrated nanophotonics: from fundamental science to manufacturable technology*, Proc. SPIE 9367, Silicon Photonics X, 93671X (2015).
- [45] **Jalali, B., Fathpour, S.,** (2006) Silicon photonics, *Journal of lightwave technology*, 24(12), 4600-4615.
- [46] **Yilmaz, N., Ozer, A., Ozdemir, A., Kurt, H.,** (2019) Nanohole-based phase gradient metasurfaces for light manipulation, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 52(20), 205102.
- [47] **Hail, C.U., Poulidakos, D., Eghlidi, H.,** (2018) High-Efficiency, Extreme-Numerical-Aperture Metasurfaces Based on Partial Control of the Phase of Light, *Advanced Optical Materials*, 6(22), 1800852.
- [48] **Liang, H., Lin, Q., Xie, X., Sun, Q., Wang, Y., Zhou, L., Li, J.,** (2018) Ultrahigh numerical aperture metalens at visible wavelengths, *Nano letters*, 18(7), 4460-4466.
- [49] **Safavi, S., Ghayour, R., Ekman, J.,** (2012) Physical specifications of photonic crystal slab lenses and their effects on image quality, *JOSA B*, 29(7), 1829-1834.
- [50] **Fang, N., Liu, Z., Yen, T.J., Zhang, X.,** (2005) Experimental study of transmission enhancement of evanescent waves through silver films assisted by surface plasmon excitation, *Applied Physics A*, 80(6), 1315-1325.
- [51] **Moreno, E., Garcia-Vidal, F.J., Martín-Moreno, L.,** (2004) Enhanced transmission and beaming of light via photonic crystal surface modes, *Physical Review B*, 69(12), 121402.

- [52] **Moussa, R., Koschny, T., Soukoulis, C. M.**, (2006) Excitation of surface waves in a photonic crystal with negative refraction: The role of surface termination, *Physical Review B*, 74(11), 115111.
- [53] **de Angelis, M., Tino, G.M.**, (2005) Optical Instruments. In *Encyclopedia of Condensed Matter Physics*; Bassani, F., Liedl, G.L., Wyder, P., Eds.; Elsevier: Oxford, UK; pp. 159–175.
- [54] **Malka, D., Danan, Y., Ramon, Y., & Zalevsky, Z.** (2016). A Photonic  $1 \times 4$  power splitter based on multimode interference in silicon–gallium-nitride slot waveguide structures. *Materials*, 9(7), 516.
- [55] **Samoi, E., Benezra, Y., & Malka, D.** (2020). An ultracompact  $3 \times 1$  MMI power-combiner based on Si slot-waveguide structures. *Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications*, 39, 100780.
- [56] **Moshaev, V., Leibin, Y., & Malka, D.** (2021). Optimizations of Si PIN diode phase-shifter for controlling MZM quadrature bias point using SOI rib waveguide technology. *Optics & Laser Technology*, 138, 106844.
- [57] **Rizea, A.** (2012). Design technique for all-dielectric non-polarizing beam splitter plate. *Opto-Electronics Review*, 20(1), 96-99.
- [58] **Feng, J., & Zhou, Z.** (2007). Polarization beam splitter using a binary blazed grating coupler. *Optics letters*, 32(12), 1662-1664.
- [59] **Karar, V., & Sharma, A. L.** (2021). Design and fabrication of multilayer dichroic beam splitter. *Advanced Materials Proceedings*, 2(6), 398-401.
- [60] **Lin, D., Fan, P., Hasman, E., & Brongersma, M. L.** (2014). Dielectric gradient metasurface optical elements. *science*, 345(6194), 298-302.
- [61] **Yu, N., & Capasso, F.** (2014). Flat optics with designer metasurfaces. *Nature materials*, 13(2), 139-150.
- [62] **Zhao, Y., Liu, X. X., & Alù, A.** (2014). Recent advances on optical metasurfaces. *Journal of Optics*, 16(12), 123001.
- [63] **Chen, S., Zhou, X., Luo, Y., Guo, Q., & Ye, H.** (2019). Two-Dimensional Material and Metasurface Based Optoelectronics. *Advances in Condensed Matter Physics*, 2019.



- [64] **Wei, Q., Huang, L., Zentgraf, T., & Wang, Y.** (2020). Optical wavefront shaping based on functional metasurfaces. *Nanophotonics*, 9(5), 987-1002.
- [65] **Yang, B., He, Y., Xie, Z., Liu, J., Ye, H., Xiao, J., ... & Chen, S.** (2021). Dielectric metasurface based polarization and orbital angular momentum demultiplexer. *Results in Physics*, 20, 103706.
- [66] **Huang, L., Song, X., Reineke, B., Li, T., Li, X., Liu, J., ... & Zentgraf, T.** (2017). Volumetric generation of optical vortices with metasurfaces. *Acs Photonics*, 4(2), 338-346.
- [67] **He, Y., Xie, Z., Yang, B., Chen, X., Liu, J., Ye, H., ... & Fan, D.** (2020). Controllable photonic spin Hall effect with phase function construction. *Photonics Research*, 8(6), 963-971.
- [68] **Genevet, P., & Capasso, F.** (2015). Holographic optical metasurfaces: a review of current progress. *Reports on Progress in Physics*, 78(2), 024401.
- [69] **Zhi-Qiang, X., Yan-Liang, H., Pei-Pei, W., Ming-Yang, S., Xue-Yu, C., Bo, Y., ... & Dian-Yuan, F.** (2020). Two-dimensional optical edge detection based on Pancharatnam-Berry phase metasurface. *Acta Physica Sinica*, 69(1), 20191181.
- [70] **Lee, G. Y., Sung, J., & Lee, B.** (2019). Recent advances in metasurface hologram technologies. *ETRI Journal*, 41(1), 10-22.
- [71] **Teng, S., Zhang, Q., Wang, H., Liu, L., & Lv, H.** (2019). Conversion between polarization states based on a metasurface. *Photonics Research*, 7(3), 246-250.
- [72] **Mueller, J. B., Rubin, N. A., Devlin, R. C., Groever, B., & Capasso, F.** (2017). Metasurface polarization optics: independent phase control of arbitrary orthogonal states of polarization. *Physical review letters*, 118(11), 113901.
- [73] **Zhang, Y., Yang, L., Li, X. K., Wang, Y. L., & Huang, C. P.** (2020). Dual functionality of a single-layer metasurface: polarization rotator and polarizer. *Journal of Optics*, 22(3), 035101.

- [74] **Wang, C., Yang, B., Cheng, M., Cheng, S., Liu, J., Xiao, J., ... & Chen, S.** (2020). Cylindrical vector beam multiplexing for radio-over-fiber communication with dielectric metasurfaces. *Optics Express*, 28(26), 38666-38681.
- [75] **Huang, J., Li, C., Lei, Y., Yang, L., Xiang, Y., Curto, A. G., ... & Koonen, A. M. J.** (2021). A 20-Gbps Beam-Steered Infrared Wireless Link Enabled by a Passively Field-Programmable Metasurface. *Laser & Photonics Reviews*, 15(1), 2000266.
- [76] **Tang, W., Chen, M. Z., Dai, J. Y., Zeng, Y., Zhao, X., Jin, S., ... & Cui, T. J.** (2020). Wireless communications with programmable metasurface: New paradigms, opportunities, and challenges on transceiver design. *IEEE Wireless Communications*, 27(2), 180-187.
- [77] **Chen, H., Xiong, L., Hu, F., Xiang, Y., Dai, X., & Li, G.** (2021). Ultrasensitive and tunable sensor based on plasmon-induced transparency in a black phosphorus metasurface. *Plasmonics*, 16(4), 1071-1077.
- [78] **Gorodkiewicz, E., & Lukaszewski, Z.** (2018). Recent progress in surface plasmon resonance biosensors (2016 to mid-2018). *Biosensors*, 8(4), 132.
- [79] **Beruete, M., & Jáuregui-López, I.** (2020). Terahertz sensing based on metasurfaces. *Advanced Optical Materials*, 8(3), 1900721.
- [80] **Choudhury, S. M., Wang, D., Chaudhuri, K., DeVault, C., Kildishev, A. V., Boltasseva, A., & Shalaev, V. M.** (2018). Material platforms for optical metasurfaces. *Nanophotonics*, 7(6), 959-987.
- [81] **Khorasaninejad, M., & Capasso, F.** (2017). Metalenses: Versatile multifunctional photonic components. *Science*, 358(6367), eaam8100.
- [82] **Khorasaninejad, M., Zhu, W., & Crozier, K. B.** (2015). Efficient polarization beam splitter pixels based on a dielectric metasurface. *Optica*, 2(4), 376-382.
- [83] **Khorasaninejad, M., & Crozier, K. B.** (2014). Silicon nanofin grating as a miniature chirality-distinguishing beam-splitter. *Nature communications*, 5(1), 1-6.

- [84] **Hasani, H., Tamagnone, M., Capdevila, S., Moldovan, C. F., Maoddi, P., Ionescu, A. M., ... & Perruisseau-Carrier, J.** (2016). Tri-band, polarization-independent reflectarray at terahertz frequencies: Design, fabrication, and measurement. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 6(2), 268-277.
- [85] **Li, Z., Palacios, E., Butun, S., & Aydin, K.** (2015). Visible-frequency metasurfaces for broadband anomalous reflection and high-efficiency spectrum splitting. *Nano letters*, 15(3), 1615-1621.
- [86] **Atalay, I. A., Yilmaz, Y. A., Savas, F. C., & Kurt, H.** (2021). A Broad-Band Achromatic Polarization-Insensitive In-Plane Lens with High Focusing Efficiency. *ACS Photonics*, 8(8), 2481-2488.
- [87] **Ma, W., Liu, Z., Kudyshev, Z. A., Boltasseva, A., Cai, W., & Liu, Y.** (2021). Deep learning for the design of photonic structures. *Nature Photonics*, 15(2), 77-90.