

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

**PARÇACIK SÜRÜ OPTİMİZASYONU, HEDEF ÖNCELİKLİ ALGORİTMA  
VE DERİN ÖĞRENME İLE FOTONİK YAPILARDA TERSİNE TASARIM**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**İpek Anıl ATALAY**

**Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı**

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

**NİSAN 2021**



## 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.

İpek Anıl Atalay

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### PARÇACIK SÜRÜ OPTİMİZASYONU, HEDEF ÖNCELİKLİ ALGORİTMA VE DERİN ÖĞRENME İLE FOTONİK YAPILARDA TERSİNE TASARIM

İpek Anıl Atalay

TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Hamza Kurt

Tarih: Nisan 2021

Fotonik, ışık hüzmelerinin kullanılarak verilerin depolanmasını, iletilmesini ve işlenmesini gözeten bir grup yeni teknolojiye karşılık gelen bir kavramdır. Fotonik cihazlar ise ışığı oluşturmak, manipüle etmek veya algılamak için kullanılan bileşenlerdir. Fotonik cihazların işlevselliklerinin artırılmasıyla ışık algılama, telekomünikasyon, bilgi işleme, fotonik hesaplama, aydınlatma, metroloji, spektroskopi, holografî, tıp, biyofotonik, askeri teknoloji gibi birçok kullanım alanında daha etkili uygulamalar elde edilebilir. Bu nedenle mikrometre ve nanometre düzeyindeki yapılarla fotonların etkileşiminin incelenmesi önemlidir. Bu doğrultuda yapılacak ilk çalışma, fotonik ortamın tasarımını içermektedir.

Fotonik tasarıma yönelik geleneksel yaklaşım, uzun bir tasarım döngüsünden muzdariptir ve tasarım uzayından bütünüyle yararlanmamaktadır. Geniş bantta çalışan uygulamalara yönelik stratejinin olmaması, karmaşık tasarım problemlerinin üstesinden gelinememesi ve kısıtlı bir parametre uzayında yapıların tasarlanması geleneksel yaklaşımla tasarlanan cihazların performansını sınırlamaktadır. Tersine

tasarım yöntemi, bu problemlerin üstesinden gelmek için önerilmiştir. Elektromanyetik cevabı önceden belirlenen bir fotonik cihazın tasarımının mümkün olup olmadığı sorusundan yola çıkılarak kurgulanan bir yöntemdir. Yapının istenilen elektromanyetik cevabı vermesi için gerekli malzeme dağılımları tersine tasarım yöntemleri tarafından bulunur, yani belirlenen elektromanyetik cevabı veren en iyi yapı tespit edilir. Tersine tasarımda literatürde bulunan çeşitli optimizasyon algoritmaları ile geniş bir parametre havuzu taranır ve yüksek performanslı cihazlar elde edilebilir. Cihazın tasarım gereksinimlerine ve tanımlanan problemlere göre, optimuma yakın tasarımlar için uygun optimizasyon yöntemleri seçilmelidir. Bu tezde Parçacık Sürü Optimizasyonu, Hedef Öncelikli Algoritma ve Yapay Sinir Ağları ile çeşitli yapıların tersine tasarımı amaçlanmıştır. Bu kapsamda tezin ikinci bölümünde kullanılan yöntemlere ayrıntılı olarak yer verilmiştir.

Tezin üçüncü bölümde ise bu yöntemlerle tasarlanan yansıma önleyici katman, optik bölücü ve geniş bantlı akromatik lens tasarımlarına yer verilmiştir ve elde edilen sonuçlar üzerine yorumlar yapılmıştır. Tasarlanan yapıların başarımlarını ölçütü grafiklerine ayrıntılı olarak yer verilmiştir ve literatürdeki yapılar ile karşılaştırılmışlardır. Ek olarak, PLA malzemesi kullanılarak 3D baskı ile üretilen düşük kırılma indisli lens yapısının mikrodalga frekanslarında deneyi yapılmıştır ve nümerik hesaplamalar ile uyumlu sonuçları paylaşılmıştır. Tezde elde edilen sonuçlar ile kullanılan algoritmaların sınırları görülmüştür ve genişletilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Parçacık Sürü Optimizasyonu, Çok Amaçlı Parçacık Sürü Optimizasyonu, Hedef Öncelikli Algoritma, Yapay Sinir Ağları, Tersine Tasarım

## **ABSTRACT**

Master of Science

INVERSE DESIGN OF PHOTONIC STRUCTURES WITH PARTICLE SWARM  
OPTIMIZATION, OBJECTIVE-FIRST ALGORITHM AND DEEP LEARNING

İpek Anıl Atalay

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 2021

Photonics is a term that refers to a group of emerging technologies that focus on the storage, transmission, and processing of data using light beams. Photonic devices are components used to create, manipulate, or perceive light. By increasing the functionality of photonic devices, more effective applications can be obtained in many areas of use such as light detection, telecommunications, information processing, photonic computing, lighting, metrology, spectroscopy, holography, medicine, biophotonics, and military technology. Therefore, it is important to examine the interaction of photons with micrometer and nanometer-scale structures. The design of the photonic environment is the first step to be handled in this direction.

The traditional design methods suffer from a long design cycle and do not take full advantage of the design space. The lack of a strategy for broadband applications, the inability to overcome complex design problems, and the design of structures in restricted parameter space, limit the performance of devices designed with traditional methods. The inverse design method is proposed to overcome these problems. It is a

method based on the question of whether it is possible to design a photonic device whose electromagnetic response is predetermined. Inverse design methods are used to determine the material distributions required for the structure to provide the desired electromagnetic response. In other words, the best structure that gives the predetermined electromagnetic response is generated. In inverse design, a large parameter space is scanned with various optimization algorithms and high-performance devices can be obtained. Convenient optimization methods should be selected for near-optimum designs according to the design requirements of the device and the defined problems. In this thesis, the inverse design of various structures with Particle Swarm Optimization, Objective-first Algorithm, and Artificial Neural Networks is presented. In this context, these methods are given in detail, in the second part of the thesis.

In the third part of the thesis, anti-reflective coatings, optical beam splitters, and broadband achromatic lens designs are optimized with the specified methods. The figure of merits for the designed structures are given in detail and compared with the structures in the literature. Besides, using PLA material, a low refractive index lens structure is fabricated with 3D printing and tested at microwave frequencies. The experimental results are agreed with the numerical results. The limits of the used algorithms are founded and expanded.

**Keywords:** Particle Swarm Optimization, Multi-Objective Particle Swarm Optimization, Objective-First Algorithm, Artificial Neural Networks, Inverse Design

## TEŞEKKÜR

Öncelikle, alıőmalarım boyunca beni yönlendiren, değerli vaktini ve emeğini esirgemeyen danıőmanım Prof. Dr. Hamza KURT'a saygılarımı ve teőekkürlerimi sunarım.

Hayatım boyunca her zaman yanımda olan, beni destekleyen ve bugünlere getiren canım ailem, annem Funda ATALAY, babam Selçuk ATALAY ve kardeőim Feza Bulut ATALAY'a en içten teőekkürlerimi sunarım. Stresli ve uzun çalışma dönemlerimde her zaman yanımda olan ve bana kesintisiz destek veren değerli arkadaőım Yunus APPAK'a ayrıca teşekkür etmek istiyorum. Hepiniz iyi ki varsınız.

Son olarak, yüksek lisansım sürecinde bana yardımcı olan ve desteğini hiç esirgemeyen Şu andaki ve geçmiőteki laboratuvar arkadaőlarıma ve sağladığı burs nedeniyle TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi'ne teşekkür ederim.



## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
<b>ÖZET</b> .....	<b>iv</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>vi</b>
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	<b>viii</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>ix</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b> .....	<b>x</b>
<b>ÇİZELGE LİSTESİ</b> .....	<b>xii</b>
<b>KISALTMALAR</b> .....	<b>xiii</b>
<b>SEMBOL LİSTESİ</b> .....	<b>xiv</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
1.1 Geleneksel Tasarım .....	1
1.2 Tersine Tasarım.....	2
<b>2. SAYISAL VE ALGORİTMA TABANLI YÖNTEMLER</b> .....	<b>5</b>
2.1 Parçacık Sürü Optimizasyonu .....	5
2.1.2 Çok amaçlı parçacık sürü optimizasyonunda lider seçimi .....	12
2.1.2.1 Baskın olmayan çözümlerin tutulması ve yayılması.....	13
2.1.2.2 Yeni çözümler oluştururken çeşitliliği artırma .....	15
Pozisyonların güncellenmesi.....	15
Mutasyon operatörü kullanımı .....	16
2.2 Hedef Öncelikli Algoritma .....	16
2.3 Yapay Sinir Ağları .....	20
2.3.1 Tamamen Bağlı Sinir Ağları .....	25
2.3.2 Geri Yayılım Algoritması .....	26
<b>3. FOTONİK CİHAZ TASARIMLARI</b> .....	<b>29</b>
3.1 Yansıma Önleyici Katman Tasarımları .....	29
3.1.1 Çok Katmanlı Yansıma Önleyici Tasarımları.....	30
3.1.2 Dikdörtgen Yapılı Tek Malzemeli Yansıma Önleyici Katman Tasarımı .	32
3.1.3 Piramit Yapılı Tek Malzemeli Yansıma Önleyici Katman Tasarımı.....	33
3.2 Optik Bölücü Tasarımları .....	41
3.2.1 Güç Bölücü Tasarımları .....	42
3.2.1.1 50:50 Güç Bölücü Tasarımı .....	42
3.2.1.2 25:25 Güç Bölücü Tasarımı .....	45
3.2.2 Işın Bölücü Tasarımı .....	46
3.3 Geniş Bantta Çalışan Akromatik Lens Tasarımları.....	48
3.3.1 Düşük Kırılma İndisli Geniş Bant, Akromatik ve Polarizasyona Duyarsız Lens Tasarımı.....	48
3.3.2 Yüksek Kırılma İndisli Geniş Bant, Akromatik ve Polarizasyona Duyarsız Lens Tasarımı.....	57
<b>4. SONUÇ VE ÖNERİLER</b> .....	<b>63</b>
<b>KAYNAKLAR</b> .....	<b>67</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ</b> .....	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.

## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 2.1 : Genel PSO algoritmasının sözde kodu. ....	8
Şekil 2.2 : $f_1$ ve $f_2$ fonksiyonları çizimi [14]. ....	8
Şekil 2.3 : İki hedef uzayında baskınlık ilişkisi [29]. ....	9
Şekil 2.4 : Genel bir MOPSO algoritmasının sözde kodu. ....	11
Şekil 2.5 : Kalabalık mesafe hesaplanması [23]. ....	12
Şekil 2.6 : Her bir parçacık için komşuluk tanımı [23]. ....	13
Şekil 2.7 : Baskınlık kavramı tanımı [23]. ....	14
Şekil 2.8 : Harici arşiv ve baskınlık gösterimi [23]. ....	15
Şekil 2.9 : Ağdaki tek bir nöronun gösterimi. ....	21
Şekil 2.10 : Çok katmanlı nöronların şematik gösterimi. ....	21
Şekil 2.11 : Bir nöronun öğrenme süreci. ....	22
Şekil 2.12 : Farklı YSA mimarileri [42]. ....	24
Şekil 2.13 : TBSA mimarisi. ....	26
Şekil 3.1 : Yansıma önleyici kaplama için optik davranışın şematik gösterimi. ....	31
Şekil 3.2 : Hedef öncelikli algoritma ile tasarlanan çok katmanlı yansıma önleyici yapı ve sonuçları. ....	31
Şekil 3.3 : Dikdörtgen yapılı katman tasarımı yaklaşımının şematik gösterimi ve sonuçları [59]. ....	33
Şekil 3.4 : Çift taraflı piramit yapılı katman tasarımı yaklaşımının şematik gösterimi [63]. ....	34
Şekil 3.5 : Tasarlanan yapıların absorpsiyon spektrumunu ve kısa devre akımları [63]. ....	35
Şekil 3.6 : Farklı kalınlıklar için tasarlanan çift taraflı yapının ve $Si_3N_4$ kaplı yapının emilim spektrumları ve kısa devre akımları [63]. ....	36
Şekil 3.7 : Geniş yükseklik kısıtları için elde edilen yapılar ve sonuçları [63]. ....	37
Şekil 3.8 : Toplam hücre genişliğinin arttırıldığı kısıtlar için elde edilen yapılar ve sonuçları [63]. ....	39
Şekil 3.9 : Toplam hücre genişliğinin azaltıldığı kısıtlar için elde edilen yapılar ve sonuçları [63]. ....	40
Şekil 3.10 : Tasarlanan 50:50 optik bölücüler [67]. ....	42
Şekil 3.11 : Hedef öncelikli algoritma ile ve etkili ortam teorisi ile tasarlanan 50:50 optik bölücülerin sonuçları [67]. ....	44
Şekil 3.12 : Tasarlanan 25:25 optik bölücüler [67]. ....	45
Şekil 3.13 : Hedef öncelikli algoritma ile ve etkili ortam teorisi ile tasarlanan 25:25 optik bölücülerin sonuçları [67]. ....	46
Şekil 3.14 : YSA ile tasarlanan ışın ayırıcı yapısı ve sonuçları. ....	48
Şekil 3.15 : Lens yapısının tasarım şematiği. ....	49

Şekil 3.16 : Lens yapısı ve başarıml ölçütü grafikleri.....	51
Şekil 3.17 : Bruggeman EMT uygulaması illüstrasyonu ve elde edilen lens yapıları. .....	52
Şekil 3.18 : Bruggeman EMT ile elde edilen lens yapısının başarıml ölçütü grafikleri. .....	53
Şekil 3.19 : Bruggeman EMT ile elde edilen lens yapısının başarıml ölçütü grafikleri. .....	55
Şekil 3.20 : Üretilen lens, deney düzeneğinin şematik görünümü ve sonuçlar. ....	57
Şekil 3.21 : Silikon bazlı lens yapısı ve başarıml ölçütü grafikleri.....	58
Şekil 3.22 : Bruggeman EMT ile elde edilen Silikon bazlı lens yapısı ve başarıml ölçütü grafikleri.....	60



## ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1 : PSO terimleri ve kuş sürüsü benzerlikleri. ....	7
Çizelge 3.1 : Tasarlanan yapı için piramit yüzeyi desen parametreleri.. ....	35
Çizelge 3.2 : Yükseklik aralığı arttırılmış parametre uzayında tasarlanan yapı için piramit yüzeyi desen parametreleri. ....	37
Çizelge 3.3 : Genişlik aralığı azaltılmış parametre uzayında tasarlanan yapı için piramit yüzeyi desen parametreleri. ....	38
Çizelge 3.4 : Genişlik aralığı arttırılmış parametre uzayında tasarlanan yapı için piramit yüzeyi desen parametreleri. ....	40
Çizelge 3.5 : Lensteki ilk 24 hücre için hesaplanan yarıçap değerleri (nm) .....	59

## KISALTMALAR

<b>2D</b>	: 2 boyutlu
<b>3D</b>	: 3 boyutlu
<b>CMOS</b>	: Tamamlayıcı Metal Oksit Yarı İletken (Complementary Metal Oxide Semiconductor)
<b>CVX</b>	: MATLAB Software for Disciplined Convex Programming
<b>DSA</b>	: Derin Sinir Ağları
<b>EMT</b>	: Etkili Ortam Teorisi (Effective Medium Theory)
<b>FDFD</b>	: Frekans Alanında Sonlu Fark (Finite-Difference Frequency-Domain)
<b>FDM</b>	: Kaynaşık Biriktirme Modellemesi (Fused Deposition Modeling )
<b>FDTD</b>	: Zaman-Alanında Sonlu-Fark (Finite-Difference Time-Domain)
<b>FWHM</b>	: Yarı Güçteki Bant Genişliği (Full Width Half Maximum)
<b>GA</b>	: Genetik Algoritmalar
<b>GRIN</b>	: Derecelendirilmiş İndis Profili (Gradient-index)
<b>IBM</b>	: International Business Machines
<b>MOPSO</b>	: Çok Amaçlı Parçacık Sürü Optimizasyonu
<b>NA</b>	: Sayısal Açıklık (Numerical Aperture)
<b>PLA</b>	: Polilaktik Asit
<b>PML</b>	: Mükemmel Uyumlu Katmanlar (Perfectly Matched Layers)
<b>PSO</b>	: Parçacık Sürü Optimizasyonu
<b>SGD</b>	: Stokastik Gradyan İnişi
<b>TBSA</b>	: Tamamen Bağlı Sinir Ağları
<b>TE</b>	: Enine Elektrik (Transverse Electric)
<b>TM</b>	: Enine Manyetik (Transverse Magnetic)
<b>VNA</b>	: Vektör Ağ Analizörü (Vector Network Analyzer)
<b>YSA</b>	: Yapay Sinir Ağları

## SEMBOL LİSTESİ

Bu çalışmada kullanılmış olan simgeler açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

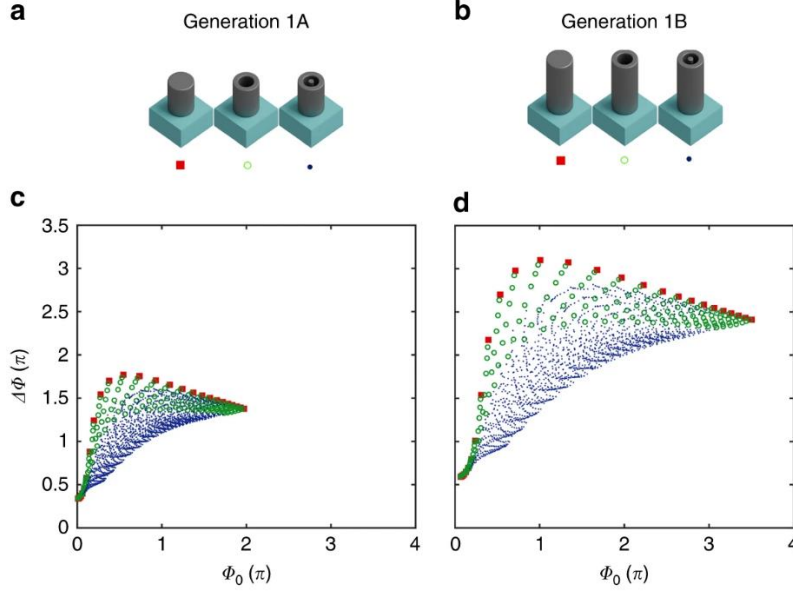
Simgeler	Açıklama
$W$	Eylemsizlik ağırlığı
$C_1$	Bilişsel öğrenme
$C_2$	Sosyal öğrenme
$\varepsilon$	Baskınlık
$\vec{E}$	Elektrik alan
$\vec{H}$	Manyetik alan
$\vec{S}$	Poynting vektörü
$\vec{J}$	Uyarma akımı yoğunluğu
$\varepsilon$	Dielektrik sabiti
$\sigma$	Sigmoid aktivasyon fonksiyonu
$C(.)$	Maaliyet fonksiyonu
$\delta$	Hata vektörü
$\odot$	Hardman çarpımı
$\eta$	Öğrenme oranı
$P_{abs}$	Absorbe edilen güç profili
$A_{Yablonovitch}$	Yablonovitch sınırı soğurma spektrumu
$J_{sc}$	Kısa devre akımı yoğunluğu
$\eta_i$	Hacim oranları
$a$	Örgü sabiti
$T_i$	Güç oranları
$\lambda$	Dalga boyu
$\omega$	Frekans
$\varphi$	Faz profili
$r$	Yarıçap

## 1. GİRİŞ

Fotonik, bilgiyi depolamak, aktarmak ve işlemek için ışık demetlerinin kullanımının çeşitli yönlerini ele alan bir dizi yeni teknolojiyi tanımlamak için kullanılan bir terimdir [1]. Fotonik cihazlar ise ışığı oluşturmak, manipüle etmek veya algılamak için kullanılan bileşenlerdir. Fotonik cihazların işlevselliklerinin artırılması ve taşınan enerjinin verimli bir şekilde elektrik enerjisine dönüştürülmesiyle, pratikte daha yaygın optik bilgi işleme ve enerji hasadı uygulamaları yapılabilir. Bu nedenle mikrometre ve nanometre düzeyindeki yapılarla foton etkileşiminin incelenmesi önemlidir. Bu doğrultuda yapılacak ilk çalışma, nanofotonik ortamın tasarımını içerir. Işığın bir dalga boyu veya küçük mertebedeki kırılma indisinde değişim gösteren yapılarla etkileşimi, daha önce gözlemlenemeyen çok sayıda zengin fiziksel kavramın varlığına neden olmuştur ve araştırmacıları bu alanda çalışmalar yapmaya yöneltmiştir. Örneğin metayüzeyler [2], negatif kırılma [3], yavaş ışık [4], yüksek optik kovuk faktörlü boşluklar [5], epsilon-sıfıra yakın ortam [6] ve fotonik kristaller [7] gibi konularda, nanofotonik yapıların tasarımı ve analizi ile ilgili çalışmalar yapılmaktadır. Nanofotonik yapılarla foton etkileşimi incelendiğinde tasarım yöntemleri çok önemli hale gelmektedir. Bu tasarım yöntemlerini geleneksel tasarım ve tersine tasarım olarak iki kategoriye ayırmak mümkündür.

### 1.1 Geleneksel Tasarım

Geleneksel yöntemlerle yeni bir cihaz tasarlamak için, önceden bilinen bir fiziksel ilke baz alınır. Optik etkiyi oluşturan karakteristik parametre setleri ayarlanarak belirli etkiler uygun bir başlangıç tasarımıyla eşleştirilir. Çoğunlukla geleneksel tasarımlar, bir parametre koleksiyonuyla tanımlanan yüksek simetrik şekillerin tekrarlayan karışımları ve kombinasyonlarıdır. Bu yaklaşım, uzun bir başarı geçmişine sahiptir ve yaygın olarak kullanılan bir şablon kitaplığına yol açmıştır. Örnek olarak Şekil 1.1'deki, ışık demeti şekillendirme, yüksek boyutlu holografik görüntüleme gibi uygulamalarda yaygın olarak kullanılan metayüzeylere dayalı düzlemsel lensler (metalensler) [8] düşünülebilir.



Şekil 1.1: Farklı geometrik kütüphaneler için elde edilen faz dağılımları [8].

Burada farklı faz profilleri, her bir birim elemandaki faz modülasyonunun analitik olarak ayarlanmasıyla geometrik fazdan yararlanılarak elde edilmiştir. Her bir kütüphanede sabit yükseklik değerleri ve dolu sütunlar (kırmızı kareler), halka şeklindeki sütunlar (yeşil daireler) ve eşmerkezli halkalar (mavi noktalar) olmak üzere değişim gösteren geometriler kullanılmıştır.

Bir metalensi tasarlamak için, tasarımcı tipik olarak mevcut tüm parametreleri tarayan geniş bir dizi optik simülasyon çalıştırır ve ardından en iyi simüle edilmiş performansı sergileyen parametre kombinasyonunu seçer. Bu sürecin doğası nedeniyle, tasarımcıya yalnızca birkaç derece serbestlik (2 - 6) sağlanır. Fotonik tasarıma yönelik geleneksel yaklaşım, uzun bir tasarım döngüsünden muzdariptir ve imal edilebilir cihazların mevcut tasarım alanından tam olarak yararlanmamaktadır. Ek olarak, sadece analiz yapıldıktan sonra yapının deneme yanılma yöntemine göre istenen fiziksel özellikleri gösterip göstermediği anlaşılabilir. Geniş bant uygulamaları için belirgin stratejilerin olmaması ve temel ilkelere dayanan ve bilinen bir parametre uzayında yapıların tasarlanması bu şekilde tasarlanan cihazların performansını sınırlamaktadır.

## 1.2 Tersine Tasarım

Tersine tasarım yöntemi, elektromanyetik cevabı önceden belirlenen bir fotonik cihazın tasarımının mümkün olup olmadığı sorusundan yola çıkılarak kurgulanmıştır. Burada yapının istenilen elektromanyetik cevabı vermesi için gerekli malzeme



dağılımları tersine tasarım yöntemleri tarafından bulunur, yani belirlenen elektromanyetik cevabı veren en iyi yapı tespit edilir.

Tersine tasarımda literatürde bulunan çeşitli optimizasyon algoritmaları ile, geleneksel tasarımın aksine daha geniş bir parametre havuzu taranır ve daha yüksek performanslı cihazlar elde edilebilir. Parametre havuzunun sistematik olarak taranması için popüler olarak genetik (evrimsel) algoritmalar veya gradyan tabanlı algoritmalar kullanılmaktadır [9,10].

Gradyan tabanlı yöntemler genel olarak daha doğru sonuçlar verir ve hesaplama maliyeti açısından verimli yöntemlerdir. Çoğu lokal optimizasyon algoritması gradyan tabanlıdır. Adlarından da anlaşılacağı gibi, gradyan tabanlı optimizasyon teknikleri, optimum çözümü bulmak için gradyan bilgisini kullanır. Çok sayıda tasarım değişkeniyle problemleri çözebilirler ve tipik olarak çok az probleme özel parametre ayarı gerektirirler. Bununla birlikte, yalnızca yerel bir optimumun yerini belirleyebilmeleri, ayrık optimizasyon problemlerini çözmede zorluk çekmeleri, verimli bir şekilde uygulanması zor olan karmaşık algoritmalar olması ve sayısal gürültüye duyarlı olmaları gibi birkaç dezavantajı da vardır.

Yerel optimaya yakınsama tuzaklarına daha az duyarlı olan Genetik Algoritmalar (GA) veya Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) algoritmaları gibi gradyan tabanlı olmayan metotlar, gradyan tabanlı optimizasyon tekniklerine iyi bir alternatif önerir. Bu algoritmalar popülasyon tabanlıdır ve her nesilde amaç fonksiyonu hesaplayan birçok tasarım birimi içerirler. Gradyan bilgisi herhangi bir alt programa dahil edilebile, algoritmayı deterministik olarak yönlendirmez. Bu değişiklik hem faydalar hem de dezavantajlar sunar. Karmaşık dışbükey olmayan amaç fonksiyonları için [12], gradyan bilgisine kolayca erişilemediğinde veya gradyan bilgisi güvenilmez olduğunda popülasyon tabanlı algoritmalar tercih edilebilir [13]. Bununla birlikte, bu algoritmalar düşük hesaplama verimliliğine sahiptirler. Benzer sayıda tasarım parametresi için amaç fonksiyonunun ölçülmesi bazen nümerik olarak çok pahalıdır. Bu durum son yirmi yıldır önemli ölçüde geliştirilmiş bilgisayar gücüne rağmen, tasarımlardaki parametre uzayının genişlemesiyle hala engelleyici olabilir. Ayrıca, amaç fonksiyonuna bağlı olarak, yerel optimum tasarımları gözden kaçırma olasılıkları daha yüksektir [14].

Bu algoritmalara ek olarak, makine öğrenmesi algoritmaları da son yıllarda fotonik cihaz tasarımlarında kullanılmaktadır. Diğer algoritmalarla karşılaştırıldıklarında, makine öğrenmesi algoritmaları evrensel ve etkilidir. Eğitildikten sonra daha az zaman (dolayısıyla daha az hesaplama maliyeti) alırlar ve daha optimum çözümleri bulma olasılıkları daha yüksektir. Ek olarak, derin öğrenme yöntemleri tersine tasarımı daha kolay gerçekleştirebilir. Yapay Sinir Ağları (YSA) birçok tipik yapıya ve güçlü bir fleksibiliteye sahiptir. Cihazın tasarım gereksinimlerine ve eğitim sürecindeki tanımlanan problemlere göre, optimuma yakın tasarımlar için uygun sinir ağları seçilebilir. Fakat eğitim setlerini hazırlamak ve sinir ağlarını eğitmek, özellikle karmaşık öğrenme görevleriyle uğraşırken çok fazla bilgi işlem ve zaman maliyeti gerektirir. YSA'nın öğrenme mekanizması kara kutu şeklinde çalıştığı için önceden eğitilmiş sinir ağlarını kullanarak farklı analizler yapmak zordur ve az sayıda eğitim örneği olması durumunda, genetik (evrimsel) algoritmalar veya gradyan tabanlı algoritmalar, derin öğrenme yöntemlerinden daha iyi performans gösterebilir [15].

Birçok pratik uygulamada, bahsedilen algoritmalar çeşitli zorlu problemlerle başa çıkmak için kullanışlı yöntemlerdir. Bu tezde tartışılan algoritmaların alt sınıflarıyla çeşitli yapıların tasarlanması amaçlanmıştır. Bu kapsamda tezin devamında görülebileceği üzere ikinci bölümde parçacık sürü optimizasyonu, hedef öncelikli algoritma ve yapay sinir ağlarına ayrıntılı olarak yer verilmiştir. Üçüncü bölümde ise bu yöntemlerle tasarlanan yansıma önleyici katman, optik bölücü ve geniş bantlı akromatik lens tasarımlarına yer verilmiştir ve elde edilen sonuçlar üzerine yorumlar yapılmıştır. Tezde elde edilen sonuçlar ile kullanılan algoritmaların sınırları görülmüştür ve genişletilmiştir.

## 2. SAYISAL VE ALGORİTMA TABANLI YÖNTEMLER

### 2.1 Parçacık Sürü Optimizasyonu

Parçacık sürü optimizasyon (PSO) algoritması karmaşık doğrusal olmayan optimizasyon problemlerine alternatif bir çözümdür (evrimsel bir algoritma olarak kabul edilir [16]). PSO, 1995 yılında Dr. Kennedy ve Dr. Eberhart tarafından tanıtılmıştır ve temel fikri kuş sürüsü, balık sürüsü gibi hayvanların sosyal davranışlarının bir simülasyonuna dayanmaktadır [17]. PSO, en iyi konumun nerede olduğunu bilmemelerine rağmen tüm kuşlar veya böceklerin yiyecek ararken veya göç ederken bireysel bilgilerini paylaştıkları grup iletişiminin doğal sürecine dayanır. Sosyal davranış doğası gereği, eğer herhangi bir sürü üyesi gitmek için geçerli bir yol bulabilirse, geri kalan üyeler de hızlı bir şekilde onu takip edecektir. PSO algoritması temel olarak buna dayanan hayvan aktivitelerinden veya davranışlarından çıkarılmıştır. Algoritmada amaç sürüdeki en iyi konuma sahip parçacığının yerinin tespit edilip diğer parçacıkların da o yöne hareketinin sağlanmasıdır. PSO ilk olarak sinir ağlarındaki ağırlıkları dengelemek için uygulanmış olmasına rağmen [18], özellikle karar değişkenlerinin gerçek sayılar olduğu problemlerde çok popüler bir optimizasyon haline gelmiştir [12, 19]. Popülerleşmesindeki kilit unsurlar:

1. PSO'nun temel algoritması nispeten basittir (birazdan açıklanacağı üzere yeni çözümler üretmek için yalnızca bir matematiksel operatör kullanır) ve dolayısıyla algoritmanın uygulanması kolaydır.
2. PSO, doğrusal olmayan, dışbükey olmayan, sürekli, ayrık veya tam sayı değişken tipli problemleri çok düşük bir hesaplama maliyetiyle çok iyi sonuçlar ile çözmek için uygundur [12,18].

Aşağıda ortak bir terminoloji oluşturmak için yaygın olarak kullanılan çeşitli teknik terimlerin tanımları bulunmaktadır:

Sürü: Algoritmanın popülasyonu.

Parçacık: Sürünün üyesi (bireysel). Her bir parçacık çözülmekte olan problem için potansiyel bir çözümü temsil eder. Bir parçacığın konumu, halihazırda temsil ettiği çözüm ile belirlenir.

$p_{best}$  (kişisel en iyi): Belirli bir parçacığın şimdiye kadar kişisel en iyi pozisyonudur. Yani, parçacığın en büyük başarıyı sağlayan konumudur.

$l_{best}$  (yerel en iyi): Bir komşuluk bölgesindeki en iyi parçacığın konumu.

$g_{best}$  (global en iyi): Tüm sürünün en iyi parçacığının konumu.

Lider: Başka bir parçacığı arama alanının daha iyi bölgelerine doğru yönlendirmek için kullanılan parçacık.

Hız (vektör): Bu vektör, optimizasyon işlemini yürütür, yani bir parçacığın mevcut konumunu iyileştirmek için “uçması” gereken yönü belirler.

Eylemsizlik ağırlığı:  $W$  ile ifade edilen eylemsizlik ağırlığı, belirli bir parçacığın önceki hız geçmişinin mevcut hızı üzerindeki etkisini kontrol etmek için kullanılır.

Öğrenme faktörü: Bir parçacığın kendi başarısına ya da komşularının başarısına olan çekimini gösterir.  $C1$  ve  $C2$  öğrenme faktörleri kullanılır.  $C1$  bilişsel öğrenme faktörüdür ve bir parçacığın kendi başarısına yönelik çekimini temsil eder.  $C2$  sosyal öğrenme faktörüdür ve bir parçacığın komşularının başarısına yönelik çekimini gösterir. Her ikisi de genellikle sabit olarak tanımlanır.

Komşuluk topolojisi: Belirli bir parçacığın  $l_{best}$  değerinin hesaplanmasına katkıda bulunan parçacık setini belirler. Genel olarak global komşuluk ve lokal komşuluk olmak üzere iki PSO modeli vardır. Global modelde bir parçacık kendisi ve tüm sürü hakkında bilgi sahibi olurken, lokal modelde bir parçacık kendisi ve en yakın komşuları hakkında bilgi sahibi olur. Global model lokal modelden daha fazla bilgi kullandığı için genelde daha hızlıdır.

Çizelge 2.1, bir kuş sürüsünün ve PSO terimlerinin benzerliklerini kısaca göstermektedir.

Çizelge 2.1: PSO terimleri ve kuş sürüsü benzerlikleri.

Kuş Sürüsünün Özellikleri	Optimizasyon Problemi
Parçacık (ya da birey)	Değişken
Sürü (ya da popülasyon)	Değişkenler kümesi
Komşuluk	Değişkenlerin alt kümesi
Parçacık pozisyonu	Değişken değeri
Parçacık hızı	Değişken artışı
Hedef arama	Amaç fonksiyonu

PSO’da, parçacıklar tüm olası çözümleri içinde barındıran çok boyutlu arama uzayında “uçar”. Arama uzayı içinde bulunan parçacıkların pozisyonundaki değişimler, bireylerin sosyal psikolojik eğilimlerinin diğer bireylerin başarısını taklit etmeye çalışmasına dayanır. Her parçacığın konumu, kendisinin ve komşularının deneyimlerine göre değişir.  $\vec{x}_i(t)$ ,  $t$  anında  $p_i$  parçacığının konumu olsun.  $p_i$  parçacığının pozisyonu, mevcut pozisyona  $\vec{v}_i(t)$  hızı eklenerek Denklem 2.1’deki gibi değiştirilir, yani:

$$\vec{x}_i(t) = \vec{x}_i(t-1) + \vec{v}_i(t) \quad (2.1)$$

Hız vektörü sosyal olarak değiştirilen bilgileri yansıtır ve genel olarak Denklem 2.2’deki şekilde tanımlanır:  $r_1, r_2 \in [0,1]$  rastgele değişkenler olmak üzere:

$$\vec{v}_i(t) = W\vec{v}_i(t) + c_1r_1(\vec{x}_{p_{eniyi_i}} - \vec{x}_i(t)) + c_2r_2(\vec{x}_{lider} - \vec{x}_i(t)) \quad (2.2)$$

Parçacıklar, komşuluklarındaki herhangi bir parçacığın başarısından etkilenme eğilimindedir. Bu komşuluklar, uzayda birbirine yakın olan parçacıklar değil, kümenin sosyal yapısını tanımlayan komşuluk topolojisine göre birbirlerine yakın olan parçacıklardır [12].

Şekil 2.1, PSO algoritmasının genel çalışma şeklini göstermektedir. İlk olarak sürüye pozisyon ve hız değerleri dahil olmak üzere başlangıç değerleri rastgele atanır. Her parçacığın karşılık gelen pbesti atanır ve lider yerleştirilir (genellikle en iyi çözüm lider olarak seçilir). Her bir parçacık konumunu (Denklem 2.1 ve 2.2 kullanılarak) ve pbestini güncelleyerek arama uzayı boyunca ilerler. Son olarak lider de güncellenir. Bu işlemler maksimum iterasyon sayısına ya da kullanıcı tarafından belirlenen durma şartına kadar tekrarlanır.

PSO’da amaç, bir  $f(x)$  fonksiyonun arama alanında maksimum veya minimum olacağı bir değer bulmaktır. Örneğin,  $f_1 = x_{12} + x_{22}$  ve  $f_2 = x_1 \sin(4\pi x_2) -$

$x_2 \sin(4\pi x_1 + \pi) + 1$  olsun. Şekil 2.2(a)'da  $f_1$  fonksiyonunun global minimumunun  $(x_1, x_2) = (0,0)$  olduğu açıktır. Bu, sadece bir minimumu olan tek tepeli bir fonksiyon olduğu anlamına gelir. Ancak, global optimumun bulunması birden fazla yerel minimuma sahip olan çoklu model fonksiyonlar için kolay değildir.

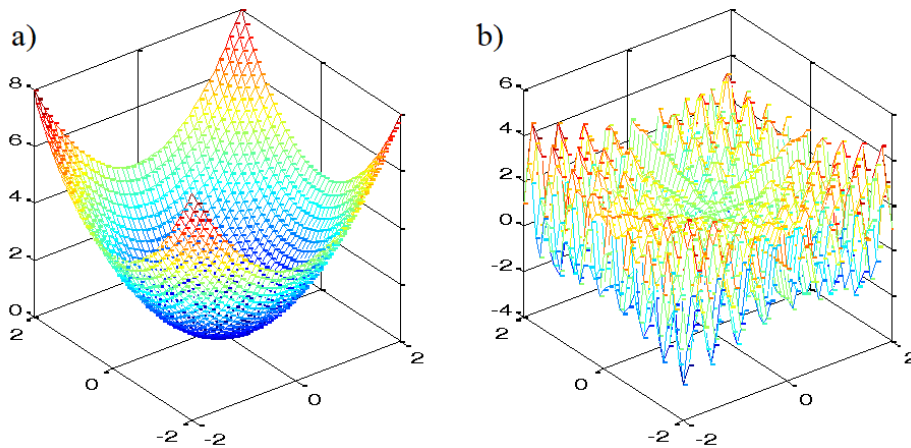
```

Başla
Sürüye başlangıç değerlerini ata
Lideri tespit et
g=0
While g<gmax
  For her parçacık
    Pozisyon güncelle
    Değerlendirme
    pbest güncelle
  end
  Lideri güncelle
  g++
end
end

```

Şekil 2.1 : Genel PSO algoritmasının sözde kodu.

Şekil 2.2(b), çoklu tepe noktaları olan inişli çıkışlı bir arama alanına sahip olan  $f_2$  fonksiyonunu göstermektedir. Bu yüzden parçacıkların farklı başlangıç noktalarından başlaması ve en az bir parçacığın global optimum pozisyona ulaşmasına kadar arama alanını keşfetmeye devam etmesi gerekmektedir. Bu süreç boyunca tüm parçacıklar kendi bilgilerini iletebilir ve aralarında paylaşabilirler [20]. Fakat problemin konvekslikten çıkması sonucu, iterasyon ve parçacık sayısına bağlı olarak PSO'nun global optimumu her zaman bulması mümkün olmayabilir.



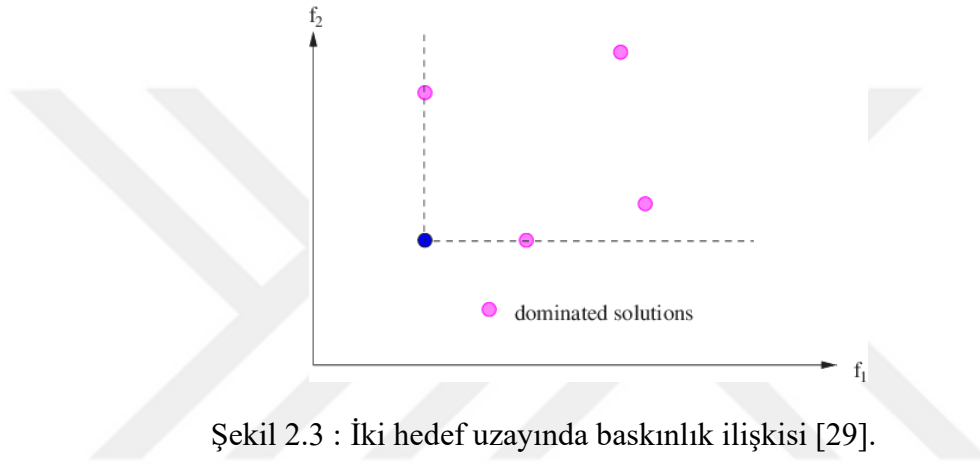
Şekil 2.2 :  $f_1$  ve  $f_2$  fonksiyonları çizimi [14].

PSO algoritması tek bir skaler değeri minimize ya da maksimize ettiğinden dolayı belirli bir dalga boyu aralığında yansımayı azaltmak için yani çok amaçlı problemler için MOPSO algoritması kullanılır.

### 2.1.1 Çok amaçlı parçacık sürü optimizasyonu

MOPSO konseptini tanımlamak için ilk olarak bazı tanımlamalar verilmiştir:

Baskınlık: Verilen iki vektör için  $\vec{x}, \vec{y} \in R^k$ ,  $\vec{x} \leq \vec{y}$ , eğer  $x_i < y_i$ ,  $i = 1, \dots, k$  ise  $\vec{x}$ ,  $\vec{y}$ 'den baskındır. Şekil 2.3'te iki hedef fonksiyonunun olduğu bir durum için baskınlık ilişkisi gösterilmektedir.



Şekil 2.3 : İki hedef uzayında baskınlık ilişkisi [29].

Baskın olmamak:  $\vec{x} \in X \subset R^k$  karar değişkeni vektörü kendinden baskın başka bir karar değişkeni varsa  $X$ 'e göre baskın değildir.

Pareto-optimal:  $\vec{x} \in X \subset R^k$  karar değişkeni vektörü eğer  $X$  göre baskın değilse  $\vec{x}$  Pareto-optimaldir.

Pareto-optimal küme:  $P^* = \{\vec{x} \in X \mid \vec{x} \text{ Pareto optimal ise}\}$  tanımlanır.

Pareto-optimal cephe:  $PX^* = \{\vec{f}(\vec{x}) \in R^k \mid \vec{x} \in P^*\}$  şeklinde tanımlanır.

Çok amaçlı optimizasyon problemlerinin çözümünde PSO stratejisini uygulamak için orijinal algoritmanın değiştirilmesi gerekmektedir çünkü çok amaçlı bir problemin çözümü tek bir çözümden oluşmamaktadır. Genellikle amaçlar skaler bir fonksiyonda toplanır ve sonuçta ortaya çıkan tek amaçlı optimizasyon problemi çözülür. Bunun için Pareto-optimal kümesi olarak adlandırılan bir takım optimal dengeleri bulmak gerekmektedir.

Çok amaçlı arama uzayı, iki rastgele çözümden birinin baskın olması ya da iki rastgele çözümün de baskın olmaması şeklinde düzenlenir. Pareto-optimal karar vektörleri bir

amaçta bozulmaya neden olmadan başka bir amacı iyileştiremez, terminolojide global optimum çözümleri temsil ederler. Bununla birlikte, tek amaçlı optimizasyon problemlerine benzer şekilde yerel optimumlara da sahip olabilirler. Hedef vektör kümesine “Pareto-optimal cephe” ifadesi karşılık gelir. Bu cephede herhangi bir nokta "Pareto optimal" olarak kabul edilir. Pareto-optimal cephe boyunca hareket edilirse amaçlardan biri iyileştirilebilir, ancak ikisi de aynı anda iyileştirilemez. Genel olarak, çok amaçlı bir problemi çözmek için üç hedef gözetilir [21]:

1. Bulunan Pareto optimal kümenin eleman sayısını maksimuma çıkarmak
2. Algoritmanın ürettiği Pareto cephesinin global Pareto cephesi ile farkını en aza indirmek
3. Bulunan çözümlerin yayılmasını maksimize etmek, böylece mümkün olduğunca sorunsuz ve düzgün bir vektör dağılımına sahip olmak

PSO'yu çok amaçlı optimizasyona genişletirken ise göz önünde bulundurulması gereken üç ana konu şunlardır [22]:

1. Baskın olmayan çözümlere baskın çözümleri tercih etmek için (lider olarak kullanılacak) parçacıklar nasıl seçilir?
2. Sadece mevcut çözüme göre değil, tüm geçmiş çözümlere göre arama sürecinde bulunan baskın olmayan çözümler nasıl hafızada tutulur? Ayrıca, bu çözümlerin Pareto cephesi boyunca iyi yayılması arzu edilir.
3. Sadece tek bir çözüme yaklaşmamak için sürüde çeşitlilik nasıl korunur?

Tek amaçlı optimizasyon problemlerinde her parçanın konumunu güncellemek için referans aldığı lider, komşuluk topolojisi kurulduktan sonra tamamen belirlenir. Çok amaçlı optimizasyon problemlerinde ise her bir parçacık konumunu güncellemek için sadece bir lider seçilmek üzere farklı liderler kümesine sahip olabilir. Bu tür liderler genellikle sürü liderinden farklı bir değişkende tutulur ve harici arşiv olarak adlandırılır: Şu ana kadar bulunan baskın olmayan çözümlerin depolandığı bir havuz olarak nitelendirilebilir. Harici arşivde yer alan çözümler, sürü parçacık konumlarının güncellenmesi gerektiğinde lider olarak kullanılır. Ayrıca, harici arşivin içeriği de genellikle algoritmanın son çıktısı olarak rapor edilir.

Şekil 2.4, genel bir Çok Amaçlı PSO (MOPSO) algoritmasının çalışma algoritmasını göstermektedir. Bu algoritmayı genel PSO algoritmasından farklı kılan süreçler italik olarak belirtilmiştir. İlk olarak, sürüye başlangıç değerleri atanır. Daha sonra, baskın olmayan parçacıklar ile liderlere başlangıç değerleri atanır. Daha önce de belirtildiği gibi, liderler kümesi genellikle harici bir arşivde saklanır. Sürünün her bir parçacığı için bir lider seçmek amacıyla, tüm liderler için bir tür kalite ölçüsü hesaplanır. Her



iterasyonda her parçacık için, bir lider seçilir ve pozisyon güncellenir. Mevcut MOPSO'ların çoğu, pozisyon güncellemeyi gerçekleştirdikten sonra bir çeşit mutasyon operatörü uygular. Daha sonra, parçacık değerlendirilir ve karşılık gelen  $p_{best}$  güncellenir. Her bir parçacığın  $p_{best}$ 'i domine edildiğinde  $p_{best}$ 'i değiştirilir. Tüm parçacıklar güncellendikten sonra, liderler kümesi de güncellenir. Son olarak, lider kümesinin kalite ölçüsü yeniden hesaplanır. Bu işlem belirli sayıda iterasyon için tekrarlanır.

```

Başla
Sürüye başlangıç değerlerini ata
Liderlere harici arşivde başlangıç değerlerini ata
Kalite (liderler)
g=0
While g<gmax
  For her parçacık
    Lideri seç
    Pozisyon güncelle
    Mutasyon
    Değerlendirme
    pbest güncelle
  end
  Harici arşivdeki liderleri güncelle
  Kalite (liderler)
  g++
end
Harici arşivdeki sonuçları rapor et
end

```

Şekil 2.4 : Genel bir MOPSO algoritmasının sözde kodu.

PSO algoritmasının özellikleri göz önüne alındığında, çoklu amaçlı problemlerle uğraşırken ortaya çıkan sorunlar iki ana algoritmik tasarım problemi ile ilişkilidir [21]:

1. Liderlerin seçimi ve güncellenmesi:

- Tamamı eşit derecede iyi olan baskın olmayan çözümlerden tek bir lider nasıl seçilir? Bu lider rastgele mi seçilmeli ya da ek kriterler mi kullanılmalı (örneğin çeşitliliği teşvik etmek için)?

- Harici arşivde kalması gereken parçacıklar bir iterasyondan diğerine nasıl seçilmeli?

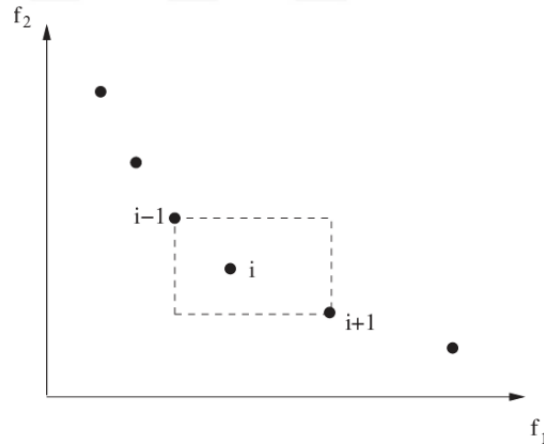
2. Yeni çözümlerin oluşturulması:

- Yeni çözümler üretmek için pozisyonların güncellenmesi (Denklemler 2.1 ve 2.2) ve mutasyon operatörü yoluyla çeşitliliğin sağlanması

### 2.1.2 Çok amaçlı parçacık sürü optimizasyonunda lider seçimi

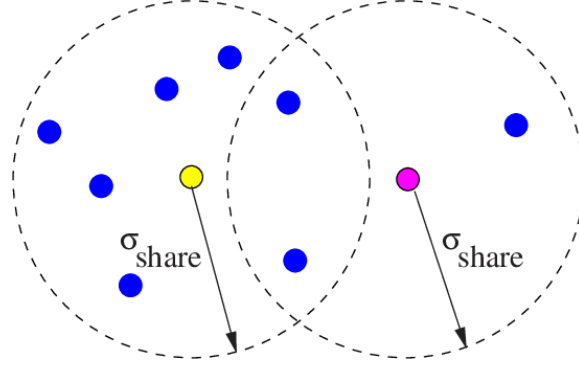
Çok amaçlı bir sorunun çözümünde bir dizi eşit derecede iyi çözümler olduğundan, PSO'da benimsenen lider kavramının değişmesi gerekir. En basit yaklaşım, baskın olmayan her çözümü yeni bir lider olarak görmek ve sonrasında bir lider seçmektir. Bu yaklaşımda, liderin ne kadar iyi olduğunu belirten kalite ölçüsü çok önemlidir. Bu kalite ölçüsünü tanımlamanın olası bir yolu yoğunluk ölçütleriyle ilgili olabilir. Sürünün içindeki parçacıkların yakınlığını gösteren bazı kalite ölçütlerine dayanan mekanizmalar vasıtasıyla çeşitlilik artırılabilir. Daha sonra anlatılacak olan belirli yaklaşımların anlaşılmasına yardımcı olmak için, burada çok amaçlı optimizasyon alanında kullanılan en önemli yoğunluk ölçümlerinden ikisi sunulmaktadır.

En yakın komşu yoğunluk tahmini [17]: Bize belirli bir parçacığın en yakın komşularının ne kadar kalabalık olduğu hakkında bir fikir verir. En yakın komşuları köşeler olarak kullanarak oluşturduğu küboidin çevresinin bir tahmin olarak kullanır (kalabalık mesafe olarak adlandırılır). Şekil 2.5'te,  $i$  çözümünün önündeki kalabalık mesafe (dolu daireler ile işaretlenmiştir), küboidin ortalama yan uzunluğudur (kesikli kutu ile gösterilmiştir). Dolgulu dairelerde işaretlenmiş noktalar, aynı baskın olmayan cephenin çözümleridir [23].



Şekil 2.5 : Kalabalık mesafe hesaplanması [23].

Çekirdek yoğunluk tahmini [24, 25]: Bir parçacık kaynağını başka parçacıklarla paylaşırsa parçacığın başarısı belirli bir çevrede onu çevreleyen parçacıkların sayısı ve yakınlığı ile orantılı olarak düşer. Parçacığın komşuluk yarıçapı  $\sigma_{pay}$  parametresi ile belirlenir. Her bir parçacık için komşuluk tanımı Şekil 2.6'da gösterilmiştir. Burada Komşulukları daha az kalabalık olan parçacıklar tercih edilir.



Şekil 2.6 : Her bir parçacık için komşuluk tanımı [23].

### 2.1.2.1 Baskın olmayan çözümlerin tutulması ve yayılması

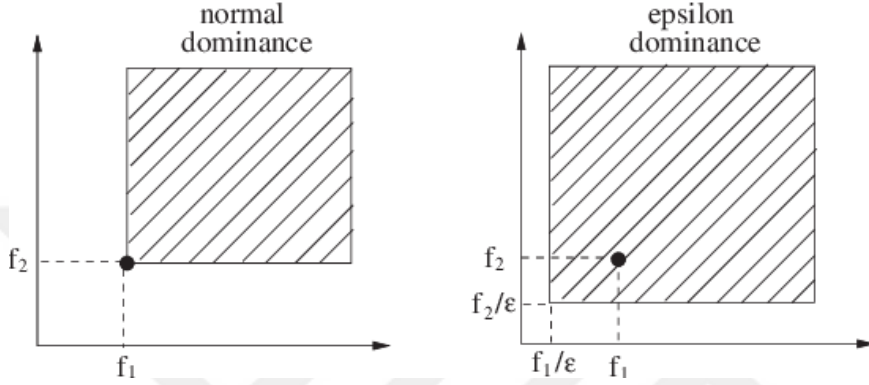
Daha önce de belirtildiği gibi, tüm arama süreci boyunca bulunan baskın olmayan çözümlerin tutulması önemlidir, böylece tüm iterasyonlardaki baskın olmayan çözümler elde edilebilir. Önceki tüm sürülere göre baskın olmayan çözümleri elde etmenin en basit yolu, harici bir arşiv kullanmaktır. Böyle bir arşiv bir çözümün girişine ancak aşağıdaki durumlarda izin verecektir:

- Arşivin içeriğine göre tanımlanmışsa
- Arşivdeki çözümlerin herhangi birinden baskınsa (Bu durumda, baskın çözümler arşivden silinmek zorundadır).

Arşiv her iterasyonda güncellendiğinden dolayı arşivin boyutu çok hızlı bir şekilde artabilir. Dolayısıyla, bu güncelleme sayısal olarak çok masraflı olabilir. En kötü durum sürünün tüm üyelerinin her iterasyonda arşive girmesidir. Dolayısıyla her iterasyona karşılık gelen güncelleme işlemi,  $N$  sürünün büyüklüğü ve  $k$  amaç sayısı olmak üzere  $O(kN^2)$  karmaşıklığına sahip olur.  $M$  iterasyon sayısı olmak üzere tüm güncelleme işleminin karmaşıklığı  $O(kMN^2)$ 'dir. Bu nedenle arşivler sınırlanma eğilimindedir [26], bu da arşiv dolduğunda hangi baskın olmayan çözümlerin tutulacağına karar vermek için ek bir kriter kullanılmasını gerekli kılar. En iyi global değer, en iyi kişisel değer ve en iyi yerel değerın depolanması için üç arşivin kullanılması gerekir. Ancak uygulamada, az sayıda yazar MOPSO'larında birden fazla arşivin kullanıldığını bildirmiştir.

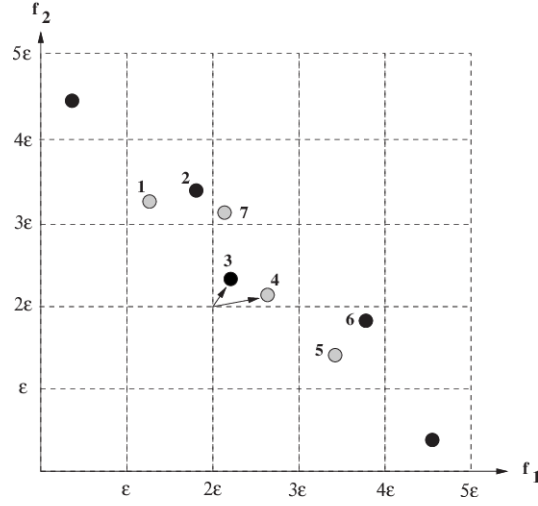
Başka bir çözüm olarak harici arşivin yanı sıra, ebeveynlerin çocuklarıyla rekabet ettiği ve gelecek nesil için baskın olmayanların seçildiği bir artı seçim kullanmak da mümkündür. Bir artı seçimde iki ardışık sürünün birleşiminden seçim yapılır. Diğer araştırmacılar ise rahat baskınlık biçimlerinin kullanılmasını önermişlerdir. PSO'da

benimsenen temel husus, Şekil 2.7'de gösterilen  $\varepsilon$  baskınlığı olmuştur [27]. Bu konseptin MOPSO'da temel kullanımı harici arşivdeki çözümleri filtrelemektir.  $\varepsilon$  baskınlığını kullanarak,  $\varepsilon$  büyüklüğünde bir dizi kutu tanımlanır ve her bir kutu için yalnızca bir baskın olmayan çözüm korunur. (Örneğin, sol alt köşeye en yakın olan). Burada, solda belli bir çözümün baskın olduğu alan görülebilir. Sağda,  $\varepsilon$  baskınlık kavramını grafiksel olarak tasvir edilmiştir. Bu durumda, baskın olan alan (kullanıcı tarafından tanımlanan)  $\varepsilon$  parametresiyle orantılı bir değerle genişletilmiştir.



Şekil 2.7 : Baskınlık kavramı tanımı [23].

Şekil 2.8'te iki amaçlı bir problem için örneklendirilme yapılmıştır. Tutulan çözümlerin tüm çözümlere baskın olmadığını garanti eder. Harici arşivin boyutu, kullanıcı tanımlı bir parametre olan  $\varepsilon$  değerine bağlıdır [27]. Harici bir arşivde  $\varepsilon$  baskınlığının kullanılmasına bir örnektir. Sol alt köşeye en yakın olan çözüm baskın çözüm olarak seçilmiştir. Çözüm 1, Çözüm 2'yi domine eder, bu nedenle Çözüm 1 tercih edilir. 3. ve 4. çözümler karşılaştırılmaz. Bununla birlikte, 3. çözüm 4. çözüm yerine tercih edilir, çünkü 4. çözüm nokta  $(2\varepsilon, 2\varepsilon)$  ile gösterilen sol alt köşeye daha yakındır. Çözüm 5, çözüm 6'yı domine eder, bu nedenle çözüm 5 tercih edilir. Çözüm 7,  $(2\varepsilon, 3\varepsilon)$  ile gösterilen kutusunun  $(2\varepsilon, 2\varepsilon)$  kutusu tarafından domine edilmesinden dolayı kabul edilmez.



Şekil 2.8 : Harici arşiv ve baskınlık gösterimi [23].

### 2.1.2.2 Yeni çözümler oluştururken çeşitliliği artırma

PSO algoritmasının en önemli özelliklerinden biri hızlı yakınsamadır. Erken yakınsama olmadıkça (yani, yerel bir optimum duruma yakınsama) bu durum olumlu olarak değerlendirilir. Erken yakınsama sürünün içindeki hızlı çeşitlilik kaybından kaynaklanır. Bu nedenle, PSO'da çeşitliliğin artırılması yaklaşmayı kontrol etmek için çok önemli bir konudur. Daha önce belirttiğimiz gibi liderlerin seçimi yoluyla çeşitliliği arttırmak mümkündür. Aynı zamanda aşağıdaki iki ana mekanizma aracılığıyla da arttırılabilir:

#### Pozisyonların güncellenmesi

Farklı komşuluk topolojilerinin kullanımı, bilginin sürü içinde aktarımının hızını etkiler (Komşuluk lider partikülün kim olduğunu belirlediği için, Denklem 2.2). Sürüden daha küçük olan komşulukları tanımlayan topolojiler çeşitliliği daha uzun süre koruyabilir. Alternatif olarak, eylemsizlik ağırlığı (Denklem 2.2'de  $W$ ) ile çeşitlilik arttırılabilir. Eylemsizlik ağırlığı, önceki hız geçmişinin mevcut hız üzerindeki etkisini kontrol etmek için kullanılır. Bu nedenle eylemsizlik ağırlığı global ve yerel (yakın) keşif kabiliyetleri arasındaki dengeyi etkilemektedir [28]. Daha büyük eylemsizlik ağırlığı global araştırmayı kolaylaştırır (yeni alanlar arar), daha küçük bir eylemsizlik ağırlığı mevcut arama alanını hassas şekilde tarar, yerel araştırmayı kolaylaştırır. Eylemsizlik ağırlığının değeri optimizasyon işlemi sırasında değişebilir. Eylemsizlik ağırlığı optimizasyon boyunca nispeten büyük bir değerden küçük bir değere lineer olarak düşürüldüğünde başlangıçtan daha fazla global arama kabiliyeti ve daha fazla yerel arama kabiliyeti gözlenmiştir [29]. Öte yandan bazı çalışmalarda

global veya yerel arama kabiliyetinin küçük eylemsizlik ağırlığı ile ilişkili olduğu ve büyük eylemsizlik ağırlığının algoritmayı stabilize etme şansını arttırdığı savunulmuştur. PSO'da artan bir eylemsizlik ağırlığı kullanılması önerilmiştir [30].

### **Mutasyon operatörü kullanımı**

Bir sonraki pozisyonu oluşturmak için mevcut pozisyona hızın eklenmesi evrimsel algoritmalarındaki mutasyon operatörüne benzer. PSO'da farklı olarak “mutasyon” parçacık ve komşularının tecrübesi tarafından yönlendirilir. Başka bir deyişle, PSO “bilinç” ile “mutasyon” yapar [28]. Bununla birlikte, bazen PSO'nun [17] orijinal önerisinde Kennedy ve Eberhart'ın söylediği gibi bir bilinçsizlik veya “çılgınlık” gereklidir. Türbülans olarak da adlandırılan çılgınlık, bir partikülün pozisyonunun kontrolsüz değişimini yansıtır [30]. Genel olarak, bir sürü durduğunda, yani parçacıkların hızları neredeyse sıfır olduğunda, PSO sürüyü bu durumdan çıkarabilecek yeni çözümler üretemez hale gelir. Bu davranış, sürünün yerel optimumda sıkışmasına neden olabilir. Global optimum, sürünün tüm üyelerini çektiğinden dolayı eğer mutasyona uğramış partikül yeni global optimuma gelirse, tek bir parçacık mutasyona uğrayarak sürüyü lokal optimumdan kurtarmış olur [30]. Mutasyona uğratmak için bir çözüm seçildiğinde, her bir bileşen kesin olmayan bir olasılıkla mutasyona uğrar ya da mutasyona uğratılmaz. İyi bir mutasyon operatörü seçimi, performans üzerinde önemli bir etkisi olan zor bir iştir.

## **2.2 Hedef Öncelikli Algoritma**

Hedef ilk tersine tasarım yöntemi, mümkün olan en büyük parametre alanını tarayabilir. İstenilen performans özelliklerinin önceden belirlenmesi ve algoritmaya uyarlanması neticesinde herhangi bir manuel ayar gerektirmeden yüksek performanslı nanofotonik yapı tasarımı sağlar. Böylelikle daha önce kullanılan diğer arama algoritmalarında bulunmayan birçok üstün özellik içermektedir. Bu yöntemle, tüm yararlı nanofotonik cihazları tasarlamak mümkündür. Ek olarak, bu yöntem kompakt, yüksek verimli, birden fazla mod geçişine izin veren ve dalga boyu ve sıcaklık kaymalarıyla ilgili üretim hatalarına daha az duyarlı olan cihaz tasarımları için çok uygundur.

Hedef ilk tersine tasarım yöntemi, elektromanyetik tepkisini daha önce belirlediğimiz fotonik cihazın tasarımının yapıyı oluşturan malzemeleri ve dağılımını verip vermediği sorusuna göre tasarlanmıştır. Elektrik alan ( $\vec{E}$ ), manyetik alan ( $\vec{H}$ ), ve poynting vektörü ( $\vec{S}$ ), gibi hedef performans parametreleri ilk durum olarak tanımlanır ve elde edilmek

istenilen nanofotonik yapının dielektrik dağılımı ( $\epsilon$ ) iteratif olarak elde edilir [31]. Yapının dielektrik değerine ve manyetik alanına göre Maxwell denklemlerini doğrusal olarak yeniden yazmak mümkündür. Matematiksel ayrıklaştırma süreçlerinde, problem  $\vec{H}$ , ve  $\epsilon$ 'ye göre bikonveks olarak yazılır ve global optimum güvenilir bir şekilde hesaplanabilir. Literatürdeki çalışmalar, algoritmanın birçok lineer fotonik cihaza başarıyla uygulanabileceğini göstermiştir [32-37].

Durağan dalga denkleminin Maxwell denklemlerinden objektif-birinci algoritmaya geçişini adım adım göstermek için elektromanyetik dalga denklemi Denklem 2.3'deki gibi yazılır.

$$\nabla_x \epsilon^{-1} \nabla_x \vec{H} - \mu_0 \omega^2 \vec{H} = \nabla_x \epsilon^{-1} \mathbf{J} \quad (2.3)$$

Burada Yee hücre yöntemi işlemi ayırmak için kullanılabilir ( $\nabla_x$ ). Denklemdaki işlem ( $\nabla_x$ ) manyetik alana ve dielektrik dağılıma ( $\epsilon$ ) doğrusal olarak bağlı olduğundan Dalga denklemi Denklem 2.4'deki gibi yazılabilir.

$$A(p)x = b(p) \quad (2.4)$$

Burada  $A(p) = \nabla_x \epsilon^{-1} \nabla_x$ ,  $x = \vec{H}$ ,  $b(p) = \nabla_x \epsilon^{-1} \mathbf{J}$  ve  $p = \epsilon^{-1}$ 'dir. Burada  $A$  ve  $b$  yerine  $A(p)$  ve  $b(p)$  terimlerinin kullanılması, her iki ifadenin de  $p = \epsilon^{-1}$  fonksiyonu olduğunu göstermek için önemlidir. Yee hücre yöntemini kullanmanın bir başka nedeni, yapının dikdörtgen hücreler olarak ele alınmasıdır. Simülasyon alanının sınır koşullarında istenmeyen yansımaları önlemek için mükemmel uyumlu katmanlar (PML) kullanılır. Problem ikinci dereceden olduğundan dolayı, sabit dalga denkleminin manyetik alana göre çözümü standart lineer cebir çözücülerle mümkündür. Ayrıca yapının manyetik cevabı standart simülasyon araçlarıyla hesaplanabilir. Algoritmada çözücü olarak frekans alanında sonlu fark (FDFD) yöntemi kullanılmıştır. Yapının dielektrik malzeme dağılımını hedeflenen manyetik alan dağılımına göre hesaplamak için durağan dalga denklemleri şu şekilde yeniden düzenlenir:

$$\epsilon^{-1}(\nabla_x \vec{H}) = (\nabla_x \vec{H}) \epsilon^{-1} \text{ ve } \epsilon^{-1} \mathbf{J} = \mathbf{J} \epsilon^{-1} \quad (2.5)$$

$$\nabla_x (\nabla_x \vec{H}) \epsilon^{-1} - \nabla_x \mathbf{J} \epsilon^{-1} = \mu_0 \omega^2 \vec{H} \quad (2.6)$$

Dalga denklemini  $\vec{H}$ 'a göre doğrusal olarak ifade ederek ve denklemden basit bir değişiklik yaparak, hedeflenen bir manyetik alan çıktısına göre oluşacak yapının dielektrik dağılımını hesaplamak mümkündür. Bu ifadenin matematiksel karşılığı şöyledir:

$$B(x)p = d(x) \quad (2.7)$$

Burada  $B(x) = \nabla_x(\nabla_x \vec{H}) - \nabla_x J$  ve  $d(x) = \mu_0 \omega^2 \vec{H}$ 'tir. Böylece, Maxwell'in harmonik dalga denklemi  $\vec{H}(x)$  değerinin bir  $\varepsilon^{-1}(p)$  için sabit olduğu ve  $\varepsilon^{-1}(p)$ 'nin  $\vec{H}(x)$  için sabit olduğu art arda adımlarla çözülebilir. Dalga denkleminin  $\vec{x}$  ve  $p$ 'ye göre çift doğrusal biçimde olması algoritmanın temelini oluşturur. Başka bir deyişle,  $\vec{x}$  sabitlendiğinde denklem  $p$ 'ye göre çözülebilir veya  $p$  sabitlendiğinde denklem  $\vec{x}$  'e göre çözülebilir. Bu iki alt problem birlikte ele alındığımda, bu iki değişkenli problemin doğrusal olmadığı unutulmamalıdır. Denklem (2.8) görülebileceği üzere, Denklem (2.5), Denklem (2.6) ve Denklem (2.7) dalga denklemlerinin farklı ifadelerinden oluşur.

$$A(p)\vec{x} - b = B(\vec{x})p - d(\vec{x}) \quad (2.8)$$

Manyetik ve dielektrik sabiti ile ilgili iki alt problem belirlendikten sonra, algoritmanın oluşturulmasında diğer matematiksel işlemler kullanılır. Oluşturulan problem dışbükey ise, problemin tek bir optimal noktaya sahip olduğu ve bu noktanın da global optimal olduğu anlamına gelir. Bu tür problemlerin avantajı, dışbükey olmayan sorunlara göre çeşitli sayısal çözücülerle daha verimli ve güvenilir bir şekilde çözülebilmeleridir. Dışbükey alt problemler için MATLAB'da kullanılmak üzere yazılmış etkili, güvenilir ve hızlı bir dışbükey optimizasyon paketi olan CVX kullanılmaktadır [38].

Algoritmada,  $f(\vec{x})$  hedef fonksiyon olarak tanımlanır ve mümkün olan en düşük değerlere ulaşması istenir. Tipik bir tersine tasarım algoritmasında,  $f(\vec{x})$  değerini olabildiğince azaltmak için, Denklem 2.9'da gösterildiği gibi  $\vec{x}$  ve  $p$  değişkenleri ardışık olarak değiştirilir. Burada tanımlanan kısıt fonksiyonu Denklem 2.10 ile ifade edilir ve tasarımdan kaynaklanan fiziksel yapının dalga denklemini sağlama ölçütünü ifade eder.

$$\min_{\vec{x}, p} f(\vec{x}) \quad (2.9)$$

$$A(p)\vec{x} - b = 0 \quad (2.10)$$

Hedef öncelikli algoritma, hedef ve kısıtlama fonksiyonlarını şu şekilde değiştirerek problemi ele alır:

$$\min_{\vec{x}, p} \|A(p)\vec{x} - b(p)\|^2 \quad (2.11)$$

$$f(\vec{x}) = f_{ideal} \quad (2.12)$$



Bu değişiklik, oluşturulan yapının dalga denklemine tam olarak uyma zorunluluğunu ortadan kaldırır ve bunun yerine algoritma dalga denklemine mümkün olduğu kadar yakınlaşır. Bu durum  $A(p)\vec{x} - b \neq 0$  eşitsizliğine izin verildiği ve daha az fiziksel değişken,  $\vec{x}$  ve  $p$  olduğu anlamına gelmektedir. Bu aşamada, yapının dalga denklemine ne kadar uyduğunu belirlemek için fiziksel artıklık adı verilen yeni bir parametre tanımlanmıştır. Bu parametrenin eklenmesiyle kısıtlama fonksiyonu doğrudan dalga denklemine uymak yerine fiziksel artıklığın olabildiğince düşük olmasını hedefler.

Hedef öncelikli algoritma, yüksek performanslı yapıların tasarlanabilmesi için  $\vec{x}$  ve  $p$  'yi yinelemeli olarak değiştirerek fiziksel artıklığı sıfıra yaklaştırmaya çalışır ve bu duruma ek bir kısıtlama ekleyerek, yapı için izin verilen bir  $p$  aralığı tanımlar. Böylece hedef öncelikli algoritmanın genel formu elde edilir:

$$\min_{\vec{x}, p} \|A(p)\vec{x} - b(p)\|^2 \quad (2.13)$$

$$f(\vec{x}) = f_{ideal} \quad (2.14)$$

$$p_0 \leq p \leq p_1 \quad (2.15)$$

Olabilecek en düşük fiziksel artıklık değerini elde etmek için, Denklem (2.13), Denklem (2.14) ve Denklem (2.15) bir döngü olarak tekrar eder.  $\vec{x}$  ve  $p$  için bu alternatif hesaplama yöntemi aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\min_{\vec{x}} \|A(p)\vec{x} - b(p)\|^2 \quad (2.16)$$

$$f(\vec{x}) = f_{ideal} \quad (2.17)$$

$$\min_p \|B(\vec{x})p - d(\vec{x})\|^2 \quad (2.18)$$

$$p_0 \leq p \leq p_1 \quad (2.19)$$

Bu yöntem sayesinde tasarlanacak yapının her adımda hedef fonksiyonunu minimize etmesi garanti edilmektedir.

Hedeflenen herhangi bir tasarım için, sadece oluşturulacak yapının sınırlarında alınması istenen değerler tanımlanır. Bu değerler dışında herhangi bir amaç belirlenmez. Algoritma sayesinde oluşturulacak olan yapı bu sınırdaki hedeflemelere uyacak şekilde tasarlanır. Yapı içerisinde yer alan bölgelerde manyetik alan ( $\vec{H}$ ) değerlerine ilişkin bir amaç belirtilmesine gerek yoktur. İstenen amaç için bilinmesi gereken değerler,  $\vec{H}$ 'nın sınırdaki birinci dereceden türevidir ( $\frac{\partial \vec{H}_z}{\partial n}$ ). Alternatif olarak, sınırdaki iki katman için  $\vec{H}_z$  değerlerini hesaplamak da yeterlidir.

## 2.3 Yapay Sinir Ağları

Yapay Sinir Ağları (YSA), nöronlar veya algılayıcılar adı verilen çok sayıda basit birimden oluşan denetimli bir öğrenme sistemidir [39]. Her nöron basit kararlar alabilir ve bu kararları birbiriyle bağlantılı katmanlar halinde organize edilmiş diğer nöronlara aktarır. Sinir ağları yeterli eğitim örneği ve hesaplama gücü verildiğinde hemen hemen her soruyu yanıtlayabilir. "Sığ" bir sinir ağında yalnızca üç katman nöron vardır:

- Modelin bağımsız değişkenlerini veya girdilerini kabul eden bir girdi katmanı
- Bir gizli katman
- Tahminler üreten bir çıktı katmanı

Derin Sinir Ağları (DSA) benzer bir yapıya sahiptir, sadece yapılarında girdileri işleyen iki veya daha fazla gizli nöron katmanı bulunur. Goodfellow, Bengio ve Courville, DSA'nın daha doğru sonuçlara ulaştığını ve daha fazla nöron katmanı eklendikçe doğrulukta iyileştiğini göstermişlerdir. Günümüzde çoğu sinir ağı modeli ve uygulaması 3-10 nöron katmanından oluşan DSA kullanmaktadır [40].

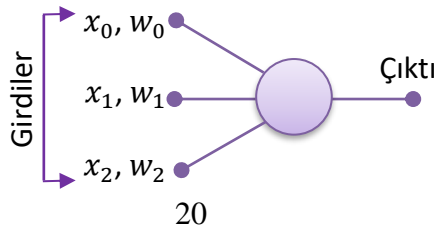
Yapay Sinir Ağı konseptini tanımlamak için aşağıda bazı tanımlamalar verilmiştir:

**Girdi:** Veriler hakkında bir karar veya öngöründe bulunmak amacıyla sinir ağına verilen kaynak verileridir. Her değer, giriş katmanındaki nöronlardan birine gönderilir.

**Eğitim Seti:** Doğru çıktılarının bilindiği, sinir ağını eğitmek için kullanılan bir dizi girdidir.

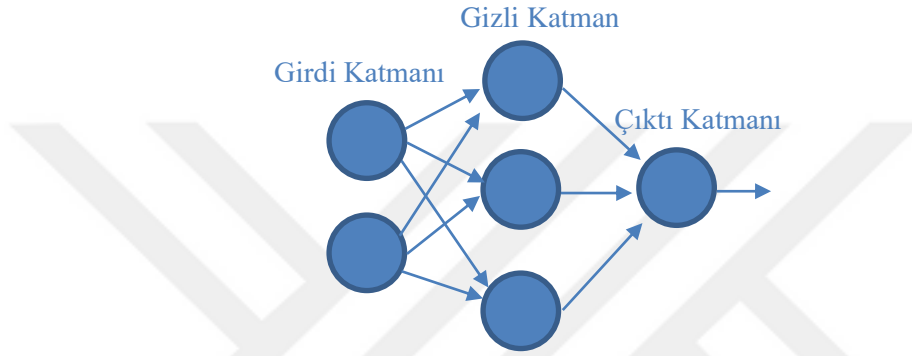
**Çıktı:** Sinir ağları, tahminlerini bir dizi gerçek değer veya mantıksal kararlar şeklinde üretmektedir. Çıktı katmanındaki nöronların her biri tarafından üretilen değere çıktı denir.

**Nöron/Algılayıcı:** Sinir ağının temel birimidirler. Bir girdiyi kabul eder ve buna göre bir tahmin oluştururlar. Her nöron, girdinin bir bölümünü kabul eder ve onu aktivasyon fonksiyonundan geçirir. Yaygın olarak kullanılan aktivasyon fonksiyonları sigmoid, TanH ve ReLu'dur. Aktivasyon fonksiyonları, kabul edilebilir bir aralıkta çıktı oluşturmaya yardımcı olur.



Şekil 2.9 : Ağdaki tek bir nöronun gösterimi.

Çok Katmanlı Nöron /Algılayıcı: Çok katmanlı nöronlar, birden çok katman halinde organize edilmiş karmaşık soruları doğru bir şekilde yanıtlayabilen bir nöron grubudur. Şekil 2.10'da görüldüğü üzere birinci katmandaki her nöron (solda), ikinci katmandaki tüm nöronlara sinyaller gönderir ve bu gönderim katmanın devamındaki nöronlar arasında devam eder. Çok katmanlı nöronlar bir girdi katmanı, en az bir gizli katman ve bir çıktı katmanı içerir.



Şekil 2.10 : Çok katmanlı nöronların şematik gösterimi.

**Ağırlık Uzayı:** Her nörona sayısal bir ağırlık verilir. Aktivasyon fonksiyonu ile ağırlıklar her bir nöronun çıktısını tanımlar. Sinir ağları, en doğru tahmine ulaşmak için hassas derecede değişen ağırlıklarla eğitilir.

**Doğrudan Geçiş:** Girdiler alınır ve oluşturulan ağ üzerindeki her nöronun girdinin bir kısmına tepki vermesine izin verilir. Nöronlar çıktılarını üretir ve tüm ağ bir çıktı oluşturana kadar katmanlar arası aktarım devam eder.

**Hata Fonksiyonu:** Oluşturulan modelin çıktısının doğru çıktıdan ne kadar uzakta olduğunu tanımlar. Modeli eğitirken amaç, hata fonksiyonunu en aza indirmek ve çıktıyı mümkün olduğunca doğru değere yaklaştırmaktır.

**Geri Yayılım:** Nöronlar için en uygun ağırlıkları bulmak için, ağın tahmininden bu tahmini oluşturan nöronlara doğru geriye doğru bir geçiş gerçekleştirilir. Buna geri yayılım denir. Geri yayılım, kayıp fonksiyonunu en aza indiren ve en iyi tahmini oluşturacak ağırlıkları bulmak için her ardışık nörondaki aktivasyon fonksiyonlarının türevlerini (gradyan inişi) izler.

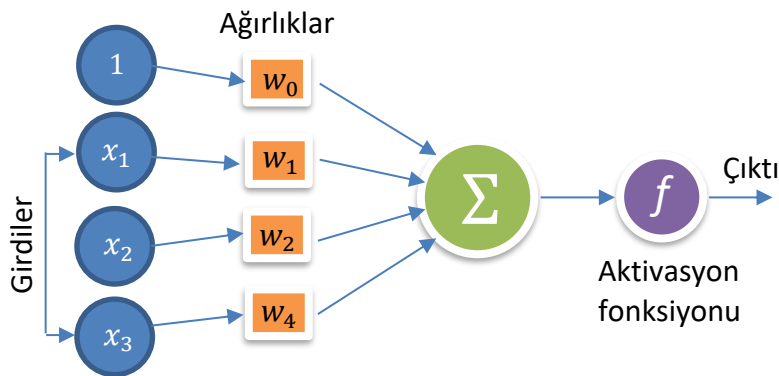
**Yanlılık ve Varyans:** Diğer makine öğrenimi tekniklerinde olduğu gibi sinir ağlarını eğitirken, yanlılık ve varyans arasında denge kurmaya çalışılır. Yanlılık, modelin

eğitim setine ne kadar iyi uyduğunu, yani eğitim örneklerinin bilinen çıktılara ne kadar yaklaştığını ler. Varyans, modelin eğitim sırasında mevcut olmayan ve bilinmeyen girdilerle ne kadar iyi çalıştığını ler. Yanlılık ek olarak, sinir ağının her katmanında kullanılan bir yanlılık nöronu için kullanılır. Yanlılık nöronu 1 sayısını tutar ve aktivasyon fonksiyonunu sayı grafiğinde yukarı, aşağı, sola ve sağa hareket ettirmeyi mümkün kılar.

Hiperparametreler: Hiperparametre, sinir ağının yapısını veya işleyişini etkileyen bir ayardır. Derin ğrenme projelerinde, hiperparametrelerin ayarlanması belirli bir problem için doğru tahminler sağlayan bir ağ oluşturmada çok önemlidir. Yaygın hiperparametreler arasında gizli katmanların sayısı, aktivasyon fonksiyonu ve eğitimin kaç kez tekrarlanması (epok) gerektiği yer alır.

Verilen tanımlamalarla birlikte bir nöronun öğrenme süreci aşağıdaki gibi düşünülebilir:

Verilen girdiler alınır, bu girdilerin her biri ağırlık ile çarpılır ve toplam hesaplanır. Ağırlıklar her bir girdinin çıktıdaki önemini derecelendirmesini sağlar. Sinir ağı algoritmaları daha iyi ağırlıklar bularak problemi daha iyi tahmin etmeye çalışır. Ek olarak, yanlılık ağırlığı da 1 sayısı ile çarpılır ve bu toplama eklenir. Yanlılık ağırlığı sayesinde nöronun sayısal çıktısının ince ayarı yapılabilir. Elde edilen toplam, aktivasyon fonksiyonuna girdi olarak verilir ve sonuçta çıktı elde edilir. Bu durum Şekil 2.11'de Şematik olarak verilmiştir.

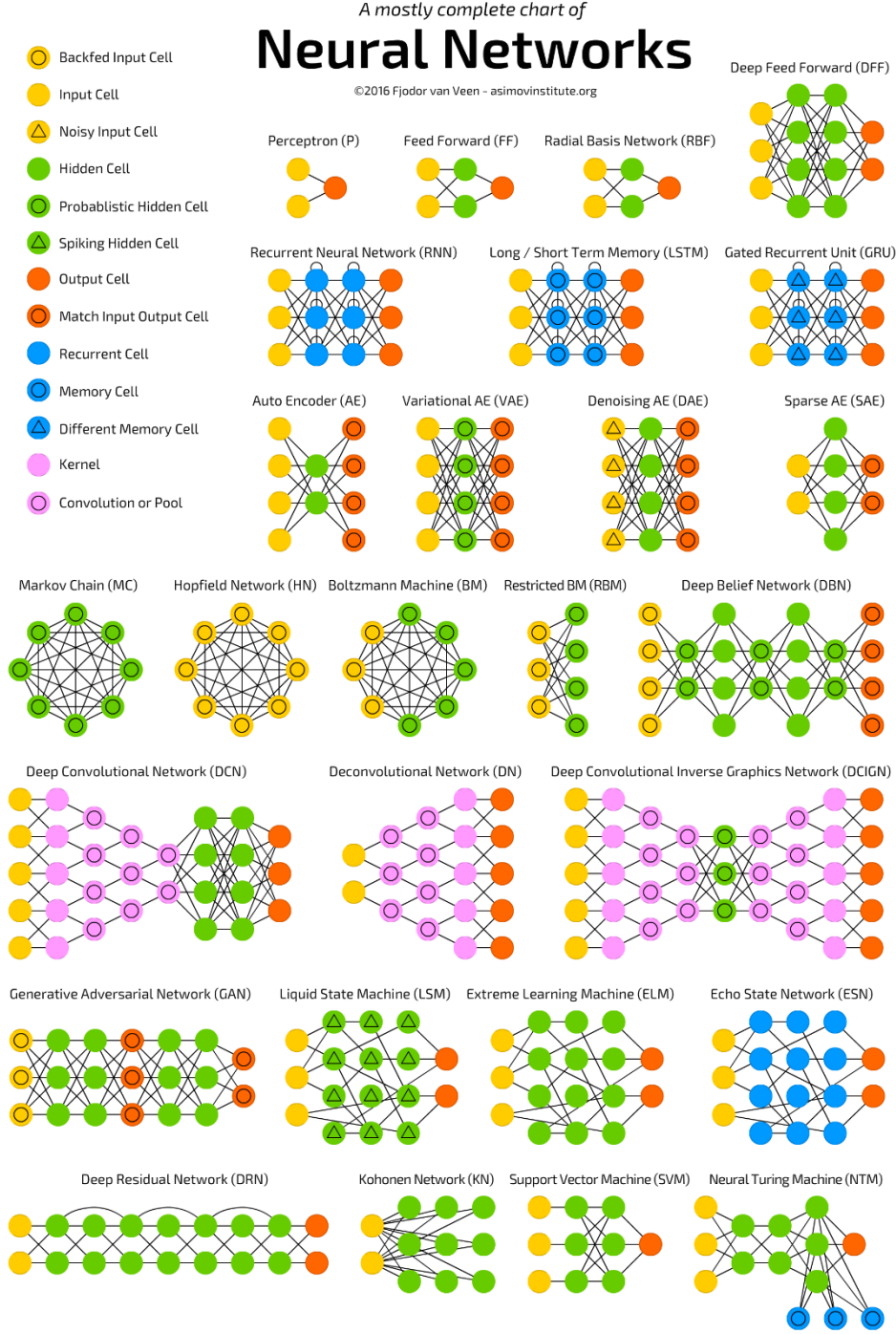


Şekil 2.11 : Bir nöronun öğrenme süreci.

Çok katmanlı nöronlar ve sinir ağları aslında temelde aynı yapılardan oluşur, fakat aralarında birkaç bileşen farkı vardır. Geri yayılım, hiperparametreler ve ağ yapısı

kavramlarıdır. Bu bileşenlerin kullanılmasıyla birlikte sinir ağı konsepti tanımlanmış olur. Modeli oluştururken kullanılan verilerin az olması, direkt olarak kullanılmaya uygun olmayan verilerin ön işlemden geçirilmemesi YSA'nın başarısını önemli ölçüde etkilemektedir. Bu yüzden YSA konsepti için birçok farklı ağ yapısı geliştirilmiştir ve geliştirilmeye devam edilmektedir [41]. Şekil 2.12'de bu sinir ağlarından bazıları gösterilmiştir. Genel olarak tanımlanan probleme göre farklı ağ yapıları oluşturulmaya devam edilmektedir ve oluşturulan yeni ağların performansı problemlere göre değişmektedir.





Şekil 2.12 : Farklı YSA mimarileri [42].

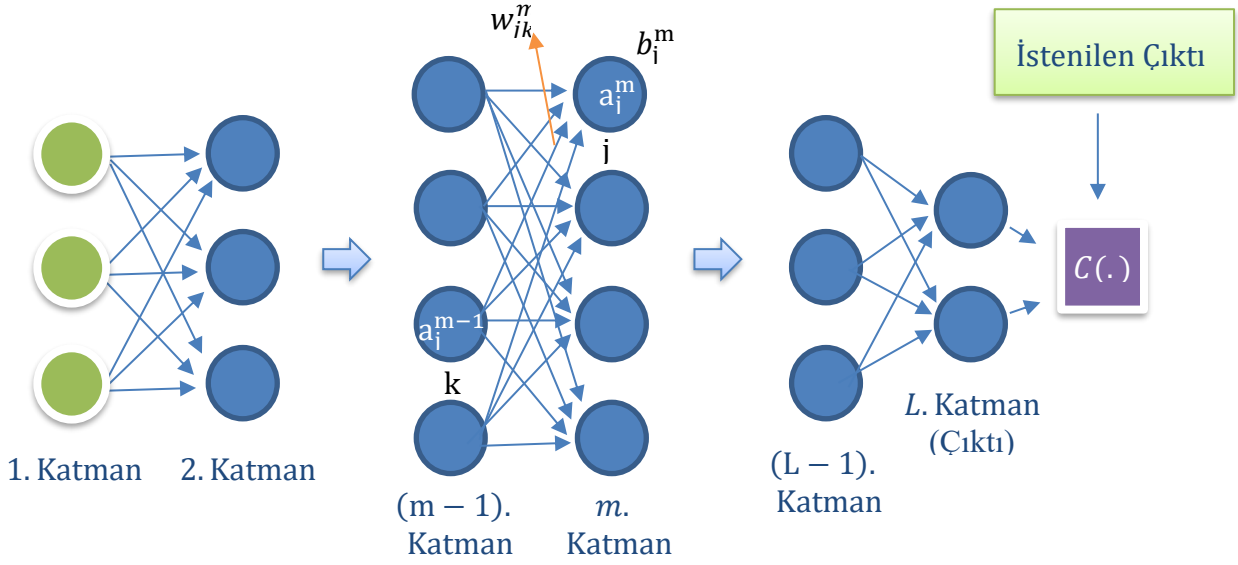
Bu tez kapsamında literatüre katkıda bulunmak için derin öğrenme ile fotonik cihaz tasarımları düşünülmüştür. Bunun için Tamamen Bağlı Sinir Ağları mimarisi üzerinde durulmuştur.

### 2.3.1 Tamamen Bağlı Sinir Ağları

L katmanlı bir Tamamen Bağlı Sinir Ağı (TBSA), bir giriş katmanı, bir çıkış katmanı ve  $(L - 2)$  adet gizli katmandan oluşur. Belirli bir katmandaki her nöron, bir sonraki katmandaki her nörona bağlanır, ancak ara katman bağlantıları bulunmaz. Nöronlar giriş verilerini, öğrenilebilir parametrelerle katman katman işler. Örneğin,  $(m - 1)$ . layerda bulunan  $k$ . bir nöronun,  $m$ . layerda bulunan  $j$ . bir nörona kadar olan ağırlıklar  $w_{jk}^m$ , ve  $m$ . layerda bulunan  $j$ . bir nöron için yanlılık  $b_j^m$ ,  $m$ . layerda bulunan  $j$ . nöronun çıktısı  $a_j^m$  olarak gösterilsin.  $a_j^m$  değeri bir önceki  $z_j^m$  katmanından elde edilen çıktılarının ağırlıklı toplamı ve doğrusal olmayan bir aktivasyon fonksiyonu  $\sigma$  (sigmoid) kullanılarak Denklem 2.20'de gösterildiği gibi hesaplanabilir [43].

$$a_j^m = \sigma \left( \sum_k w_{jk}^m a_k^{m-1} + b_j^m \right) = \sigma(w^m a^{m-1} + b^m) = \sigma(z_j^m) \quad (2.20)$$

Aktivasyon fonksiyonu  $\sigma$ , sinir ağını basit bir doğrusal haritalamaya indirgemek yerine son derece karmaşık verilerin anlamlandırılmasını sağlar. Popüler aktivasyon fonksiyonları arasında sigmoid, hiperbolik tanjantlar veya rektifiye edilmiş lineer birimler bulunur. Sinir ağının performansını tahmin etmek için, yani elde edilen modelin çıktısı ile istenen çıktı arasındaki farkı ölçmek için bir maliyet fonksiyonu  $C(\cdot)$  tanımlanır. Maliyet fonksiyonu, son katmanın çıktılarını ve bilinen sonuçları girdi olarak alır ve skaler bir değer döndürür. TBSA model parametrelerini doğru bir şekilde ayarlamak için, her ağırlık ve yanlılık değerine göre maliyet fonksiyonunun gradyanını hesaplar ve model parametreleri çok küçük bir miktar artırılırsa hatanın ne kadar artacağını veya azalacağını belirtir. Daha sonra her parametre, gradyanının tersi yönünde ayarlanır. Bu durum Şekil 2.13'te şematik olarak verilmiştir.



Şekil 2.13 : TBSA mimarisi.

### 2.3.2 Geri Yayılım Algoritması

Geri yayılım algoritması çok değişkenli bir fonksiyonun türevleri için kullanılan zincir kuralının pratik bir uygulamasıdır. Bu algoritmanın kullanımıyla çıktı katmanından giriş katmanına sadece bir geriye doğru geçişle bir sinir ağı eğitilebilir [43]. Geri yayılım işlemini daha iyi açıklamak için,  $l$  katmanındaki ağırlıklara göre maliyet  $C$ 'nin türevini temsil eden bir hata vektörü Denklem (2.21)'de verilmiştir (son katman dışındaki katmanlar için).

$$\delta^l = \left( \frac{\partial C}{\partial z_1^l}, \frac{\partial C}{\partial z_2^l}, \frac{\partial C}{\partial z_3^l}, \dots \right) \quad (2.21)$$

Buradan da son katmandaki ( $L$  katmanı) hata vektörü Denklem (2.22)'deki gibi elde edilir.

$$\delta^L = (\nabla_a C) \odot \sigma'(z^L) \quad (2.22)$$

Bu denklemde Hadamard çarpımı ( $\odot$ ) iki vektörün elementel çarpımını belirtir. Hem maliyet fonksiyonu  $C(a^L)$  hem de aktivasyon fonksiyonu  $\sigma(z^L)$  analitik bir biçime sahiptir, bu nedenle son katmandaki hata değeri  $\delta^L$  doğrudan elde edilebilir. Benzer şekilde, kısmi türevlerin zincir kuralı uygulanarak,  $l$  katmanının hata vektörü  $\delta^l$  bir sonraki katmanın hata vektörü ( $\delta^{l+1}$ ) kullanılarak, Denklem (2.23)'te verildiği gibi hesaplanabilir.

$$\delta^l = [(w^{l+1})^T \delta^{l+1}] \odot \sigma'(z^l) \quad (2.23)$$



Denklem (2.22) ve (2.23) geri yayılım işleminin ana fikrini temsil etmektedir. Başlangıçta elde edilen ağ çıktısı ile hedef çıktı arasındaki tutarsızlıktan kaynaklanan maliyet, son katmandan ilk katmana geri akar ve her katmanın ara hatası korunur. Daha sonra  $\frac{\partial C}{\partial w_{jk}^l}$  ve  $\frac{\partial C}{\partial b_j^l}$ , Denklem (2.24) ve (2.25)'teki gibi bu maliyetlerle ilişkilendirilir.

$$\frac{\partial C}{\partial w_{jk}^l} = a_k^{l-1} \delta_j^l \quad (2.24)$$

$$\frac{\partial C}{\partial b_j^l} = \delta_j^l \quad (2.25)$$

Maliyet fonksiyonu  $C$ 'nin sinir ağındaki tüm öğrenilebilir parametrelere göre türevleriyle, yani tüm katmanlar için ağırlık matrisleri  $w^l$  ve yanlılık vektörleri  $b^l$  ( $l = 1, 2, \dots, L$ ) ile, model Stokastik Gradyan İnişi (SGD) ile eğitilebilir. SGD algoritmasında, eğitim verileri rastgele karıştırılır ve ardından birkaç gruba bölünür. Eğitim adımı, ağı oluşturulan bir grup veri ile beslemeyi, çıktıları ve hataları hesaplamayı, bu grup için ortalama gradyanı hesaplamayı (geri yayılım) ve ağırlıkları ve önyargıları hesaplanan verilere göre ayarlamayı içerir. Bir gruptaki hesaplanan maliyete göre parametrelerin gradyanlarının ne kadar değiştirildiğini kontrol etmek için öğrenme oranı ( $\eta$ ) olarak adlandırılan bir hiperparametre tanımlanır. Denklem (2.24) ve (2.25)'e göre  $M$  eğitim verisi içeren bir grup için, ağırlıklar ve yanlılık Denklem (2.26) ve (2.27)'deki gibi hesaplanır.

$$w^l \rightarrow w^l - \frac{\eta}{M} \sum_x \delta^{x,l} (a^{x,l-1})^T v \quad (2.26)$$

$$b^l \rightarrow b^l - \frac{\eta}{M} \sum_x \delta^{x,l} \quad (2.27)$$

Eğitim adımı, maliyetin değeri düşmeyi bırakana kadar birçok kez tekrarlanır. Eğitimden sonra modelin performansı, modelin genelleme yeteneğini test etmek için eğitim sırasında model tarafından görülmeyen örnekleri içeren farklı test verileriyle değerlendirilir.



### 3. FOTONİK CİHAZ TASARIMLARI

#### 3.1 Yansıma Önleyici Katman Tasarımları

Tüketici elektroniğinden uzay araştırmalarına kadar çeşitli alanlarda optik ve opto-elektronik ekipmana yönelik artan talep, ışık hasadı verimliliğini en üst düzeye çıkarmanın yollarının araştırılmasına yol açmıştır [44]. Yansıma önleyici kaplamalar, bir veya daha fazla dalga boyunun yansımısını en aza indirir ve daha az ışık kaybedilmesini sağlar. Bu tür kaplamaların uygulanmasına ilişkin örnekler, gözlükler, kamera objektifleri gibi optik sistemler, optik pencereler, ekranlar ve güneş hücreleridir.

Bir güneş panelinin gelen ışığın üçte birini yansıttığı ve güneş ışığının yalnızca %25'ini absorbe ettiği bilinmektedir. Bu nedenle, daha iyi performans ve düşük maliyete ulaşmak için güneş pilleri üzerinde çok sayıda araştırma yapılmıştır. İnce film fotovoltaik hücre tasarımı teknolojisi, daha az silikon (Si) kullanımıyla birlikte daha yüksek bir performans / maliyet oranı potansiyelini öne çıkarmaktadır. Fakat, ince kalınlıklarda ( $\leq 3\mu m$ ) oldukları için güneş spektrumunu tamamen absorbe edememektedirler. İnce filmlili fotovoltaik hücrelerde yüksek performans elde etmek için, etkili ışık tuzaklaması yapılması ve hücre ile güneş ışığının yeterli derecede etkileşimde bulunması gereklidir. Başka bir deyişle, emilim performansını artırmak için yüzey tasarımı veya nanoplazmonik kullanımı gibi ek özelliklere ihtiyaç vardır. İnce filmlerin performansının artırılmasına yönelik birçok çalışma yapılmıştır ve bu çalışmaların çoğu geleneksel tasarım metodları kullanımını içermektedir [45-51]. Fakat hem yansımayı önleme hem de ışığı hapsedmeye yönelik uygun bir yapı bulmak bir zorluk olarak kalmıştır.

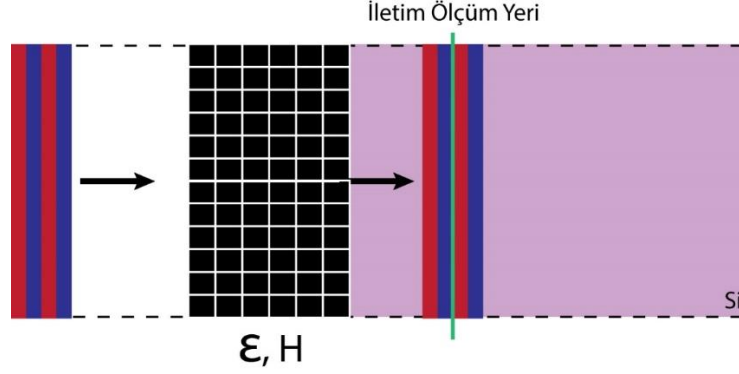
Parametre uzayını tam olarak aramak, daha iyi performans gösterecek bir yansıma önleyici katman tasarımı için gerekli bir adımdır. Bu nedenle bu tezde MOPSO ve Hedef Öncelikli Algoritma kullanılarak yansıma önleyici katman tasarımları yapılmıştır.

### 3.1.1 Çok Katmanlı Yansıma Önleyici Tasarımları

Önceki çalışmalarda, silikon üzerine yansıma önleyici kaplama tabakaları biriktirilerek güneş pillerindeki optik kayıpların en aza indirilebileceği teorik ve deneysel olarak bildirilmiştir [52,53]. Ek olarak,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{ZnS}$ ,  $\text{MgF}_2$  ve  $\text{SiN}_x$ : H,  $\text{SiO}_x\text{N}_y$ ,  $\text{SiO}_x$  gibi farklı malzeme türleri kullanılarak çift katmanlı yansıma önleyici kaplamalar ve çok katmanlı yansıma önleyici kaplamaları keşfetmek için birçok çaba harcanmıştır [53-56]. Bununla birlikte, yansımayı %20'nin altına indirmede daha önce hiçbir çalışma başarılı olmamıştır, bu da silikon güneş pillerindeki optik kaybı azaltmak için hala yüksektir. Bu nedenle, güneş pillerinden daha yüksek performans elde etmek için çok katmanlı yansıma önleyici kaplama yapılarının tasarlanması gerekmektedir. Bu kısımda çok katmanlı yansıma önleyici kaplama tasarlamak için Hedef Öncelikli Algoritma kullanılmıştır.

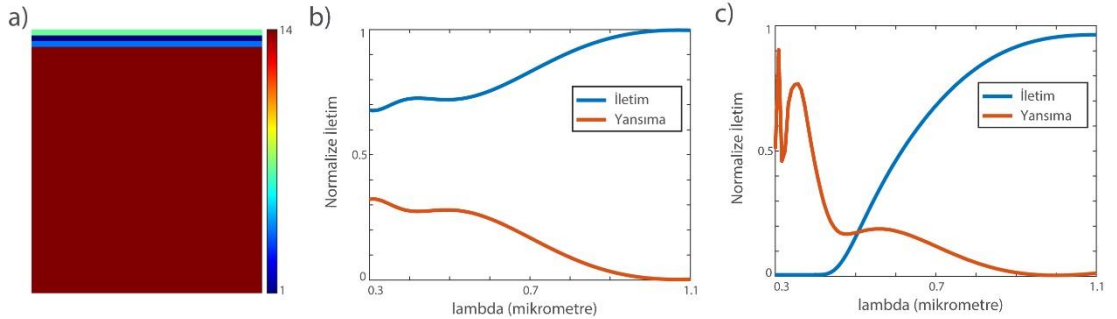
Genel yansımayı en aza indirmek için Hedef Öncelikli Algoritmaya 300 nm ve 1100 nm arasındaki gelen ışığın hücre içindeki iletimini maksimize etmesi amaç fonksiyonu olarak verilmiştir. Tasarımın başarısı yansıma ve iletim parametrelerine göre değerlendirilmiştir. Simülasyonlarda yansıma ve iletim değerleri tasarlanan yansıma önleyici katmandan 700 nm önce ve sonra ölçülmüştür. Amaç, gelen ışığın Şekil 3.1'de gösterildiği gibi yansız olarak güneş hücresine iletilmesidir. Burada yansıma önleyici katmanın arkasındaki silikon tabakasının yansımaya etkisini gözlemlemek için optimizasyonda silikon tabakasının kalınlığı 2000 nm alınmıştır ve algoritmanın yapının silikon hücresi kısmına müdahale etmesine izin verilmemiştir. Gelen ışığın bir enine elektrik (TE) polarize düzlem dalgası olduğu varsayılarak iki boyutlu bir alanda simülasyonlar yapılmıştır. Bu nedenle, manyetik alan H simülasyon yüzeyine diktir. Tasarım alanının, yani yansıma önleyici katmanın, geçirgenlik değerleri  $\epsilon_{min} = 1$  (hava) ve  $\epsilon_{max} = 14.28$  (silikon (700 nm)) arasında değişecek şekilde ayarlanmıştır. Ayrıca, cihazın performansını (iletim) değerlendirmek için 300 nm ve 1100 nm dalgaboyları arasında FDFD simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Katmanın kalınlığı 150 nm ve her bir yapı biriminin karşılık geldiği alan (çözünürlük) 50 nm olarak seçilmiştir. Algoritma, tasarım alanındaki her bir yapı biriminin dielektrik sabiti silikon olduğu bir başlangıç durumu ile başlatılmıştır. Algoritma, belirtilen parametrelerle 100 iterasyon için çalıştırılmıştır. Simülasyonlar, tasarlanan yapının iletim özelliklerini değerlendirmek için 2D olarak Lumerical FDTD'de

gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, simülasyon alanı x ekseninde mükemmel uyumlu katmanlar (PML), y ekseninde periyodik sınır koşulları seçilmiştir.



Şekil 3.1 : Yansıma önleyici kaplama için optik davranışın şematik gösterimi.

Elde edilen optimal yapı, ideal yansıma önleyici kaplamaya çok yakın bir performans sağlamıştır. Dikkat çekici bir şekilde, bu performans sadece üç tabaka ile elde edilmiştir. Bu tabakaların kırılma indisleri algoritma tarafından sırasıyla 2.65, 1.5, 2.14 olarak seçilmiştir. Tasarlanan yansıma önleyici kaplamanın yapısı ve sonuçları Şekil 3.2'de gösterilmektedir. Yansıma önleyici davranışının geniş bir dalga boyu spektrumunu kapsadığı görülmektedir. Doğadan bu kırılma indislerine yakın kırılma indislerine sahip olan ZnO, PLA ve SiC malzemeleri seçilip, oluşturulan yapı bu malzemelerle Lumerical'da modellendiğinde yapının performansı Şekil 3.2 (c)'de görüldüğü üzere yüksek ölçüde düşmüştür. Bu durumun nedeni malzemelerin yansıma indisi dışındaki emilim katsayısı gibi özelliklerinin de yapının performansına etki etmesidir. Bundan dolayı tezin devamında birden fazla dalga boyunda çalışan tek malzemeli yansıma önleyici katmanlar MOPSO ile tasarlanmıştır.



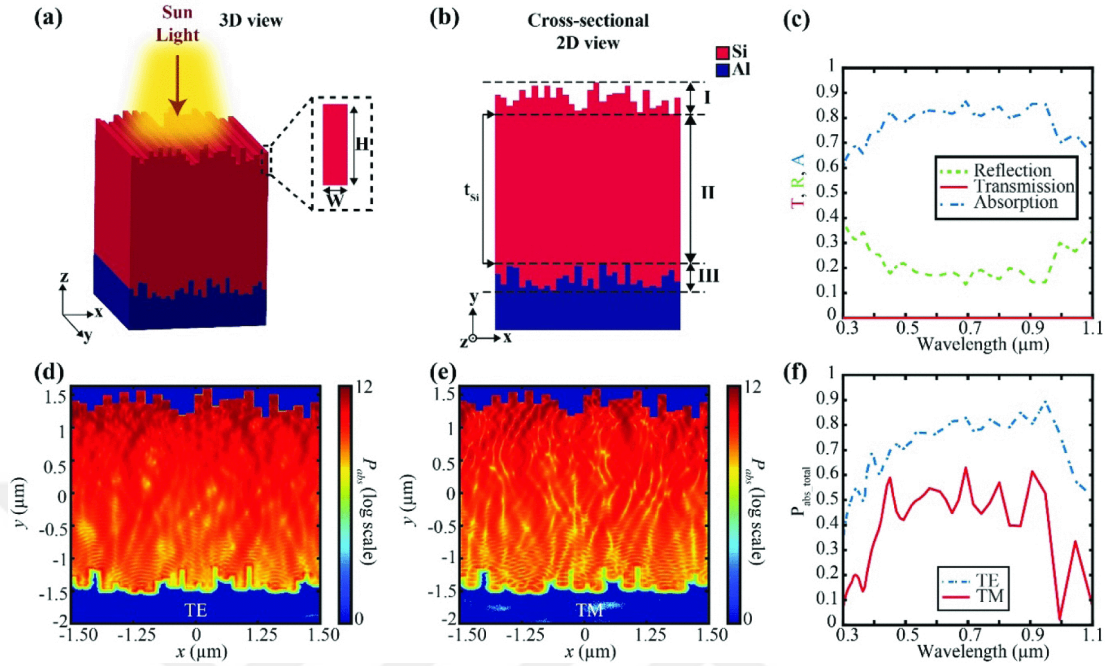
Şekil 3.2 : Hedef öncelikli algoritma ile tasarlanan çok katmanlı yansıma önleyici yapı ve sonuçları.

### 3.1.2 Dikdörtgen Yapılı Tek Malzemeli Yansıma Önleyici Katman Tasarımı

Dikdörtgen yapısının üretim kolaylığı nedeniyle ilk olarak MOPSO ile dikdörtgen yapılı bir yansıma önleyici tasarımı üzerinde çalışılmıştır. Dikdörtgen desenli ızgara yapısının tasarım şematiği, Şekil 3.3 (a) ve 3.3 (b)'de görülmektedir. Burada yapı, yansımayı önleyen ön bölge, soğurma katmanı ve ışığı hapseden arka yüzey olmak üzere üç farklı bölgeden oluşmaktadır. Soğurma katmanının kalınlığı 2000 nm olarak seçilmiştir ve güneş hücresinin genişliği 3000 nm'dir. İlk olarak, üstteki dikdörtgen yüzey deseni (Bölge-I), gelen güneş ışınımının yansımalarını en aza indirmek için 300 nm ve 11000 nm dalgaboyu aralığı spektrumunda MOPSO ile optimize edilmiştir. Burada MOPSO, minimum yansıma için üst katmandaki dikdörtgenlerin yükseklik ve genişlik değerlerini belirlemiştir. Optimizasyon için, 100 ila 500 nm aralığında rastgele yüksekliklere (H) ve 100 ila 300 nm arasında değişen genişliğe (W) sahip dikdörtgenler seçilmiştir ve 20 iterasyon ve 20 parçacık ile kullanılmıştır. Sonuç olarak, MOPSO 3000 nm'lik toplam hücre genişliğinde her dikdörtgen parça için 100 nm'lik bir genişlik değeri bulmuştur ve her dikdörtgen parça için farklı yükseklik değerleri bulmuştur. Yükseklikler 210 ile 710  $\mu\text{m}$  arasında değişmektedir. Bir sonraki adım olarak, alt dikdörtgen yüzey katmanının (Bölge-III) optimizasyonu için, iletilen ışık tasarlanan yapıdan sonra ölçülmüştür. Alt katman tasarımı sonucu olarak, algoritma her dikdörtgen parça için 110 nm'lik bir genişlik değeri ve 170 ile 540 nm arasında değişen yükseklik değerleri bulmuştur.

Polarize olmayan güneş spektrumunda sonuçta elde edilen yapı için; elde edilen soğurma, yansıma ve iletim değerleri, Şekil 3.3 (c)'de açıkça gözlemlenebilir. Burada sıfır iletim ve %20 ortalama yansıma gözlemlenebilir. Yapı sırasıyla enine elektrik (TE) ve enine manyetik (TM) polarize ışıklarla uyarılmıştır ve yansıyan ışık iki boyutlu (2D) FDTD analizleri ile ölçülmüştür. Ek olarak, TE ve TM polarizasyonları için ideal kısa devre akımının sırasıyla 19.07 ve 15.60  $\frac{\text{mA}}{\text{cm}^2}$  olduğu bulunmuştur. Bunları bir araya getirerek polarize olmayan güneş ışığı için ideal kısa devre akımını polarize olmayan güneş spektrumunda 34.67  $\frac{\text{mA}}{\text{cm}^2}$  olarak elde ederiz. 2000 nm kalınlığa sahip Si bir güneş hücresi için de bu kısa devre akım değeri Yablonovitch sınırına oldukça [57,58] yakındır. TE ve TM polarizasyonları için absorbe edilen güç profili ( $P_{abs}$ ), toplam absorbe edilen güç ve frekansın bir fonksiyonu olarak toplam

absorpsiyon için tüm değerler 0,50 faktörü ile ölçeklenmiştir. Böylece polarize olmayan güneş spektrumu için Şekil 3.3'teki sonuçlar elde edilmiştir.

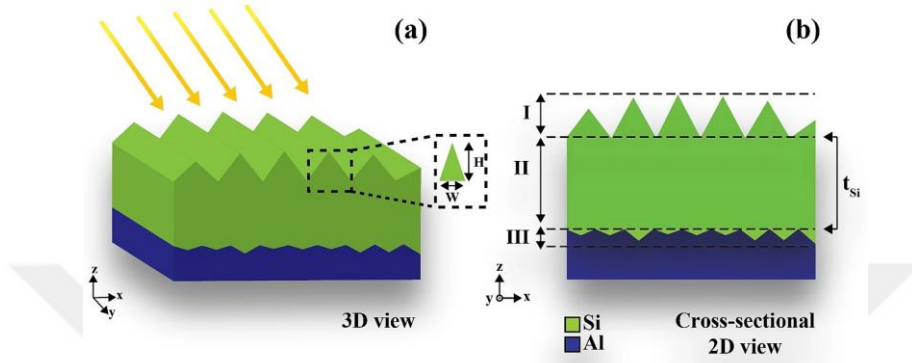


Şekil 3.3 : Dikdörtgen yapıli katman tasarımı yaklaşımının şematik gösterimi ve sonuçları [59].

### 3.1.3 Piramit Yapılı Tek Malzemeli Yansıma Önleyici Katman Tasarımı

IR'ye yakın bölgedeki dalga boyları için foton absorpsiyonunu arttırmak için, standart yaklaşım, güneş hücresi içindeki ışığı yakalamak için genellikle birkaç mikron veya daha fazla boyutta olan bir silikon yüzey üzerinde piramit yapıları kullanılmaktadır [60]. Genel olarak, bir nanopiramidin yüzey alanı, nanotel ve nanosilindir gibi diğer nano yapılarla nispeten daha küçüktür. Katmanlar incelendiğinde gelen ışığa iyi uyum sağlamaktadırlar. Bundan dolayı piramit yapısının geometrik şekli yansımayı azaltmada için üst yüzeyde kullanım için elverişlidir. Ayrıca, piramit yapısının çift taraflı kullanımıyla da, ön tarafta yansıma önleyici görevi ve arka tarafta ışık hapsedici görevi başarılabilir. Literatürde buna benzer kullanım örnekleri bulunmaktadır. Wang vd. [61], c-Si güneş pillerinde çift taraflı bir katman tasarımı geliştirmişlerdir ve 2000 nm kalınlığında bir güneş hücresi için  $34.6 \frac{mA}{cm^2}$ 'lik bir kısa devre akımı elde etmişlerdir. Zhang vd. [62], c-Si güneş pillerinde optimize edilmiş çift taraflı bir delikli nano koni yapısı önermiştir ve 1000 nm'lik kalınlık için  $31.9 \frac{mA}{cm^2}$ 'lik bir kısa devre akımı elde etmişlerdir.

Tasarımda, ışığı hapsedmek ve yansımaları önlemek için alt ve üst kısımlarda iki ayrı katman tasarımı yapılmıştır. Güneş hücresi kalınlığı 1000 nm olarak seçilmiştir ve güneş hücresinin genişliği 3000 nm'dir. Piramit desenli ızgaralı yapı tasarımı, Şekil 3.4 (a) ve (b)'de şematik olarak gösterilmiştir. Burada yapı, üç farklı bölgeden oluşmaktadır: yansıma önleyici ön katman, soğurma tabakası ve ışığı hapseden arka katman.



Şekil 3.4 : Çift taraflı piramit yapı katman tasarımı yaklaşımının şematik gösterimi [63].

İlk olarak, gelen güneş radyasyonunun yansımalarını en aza indirmek için, üst piramit katmanı (Bölge-I) MOPSO ile optimize edilmiştir. Piramit yükseklikleri (H) 30 nm ile 500 nm arasında ve genişlik (W) de 100 nm ile 3000 nm arasında sınırlandırılmıştır ve MOPSO 10 iterasyon ve 10 partikül ile kullanılmıştır. Algoritma, her bir piramit parçası için 540 nm'lik bir genişlik değeri ve 150 nm ile 430 nm arasında değişen farklı yükseklik değerleri elde etmiştir.

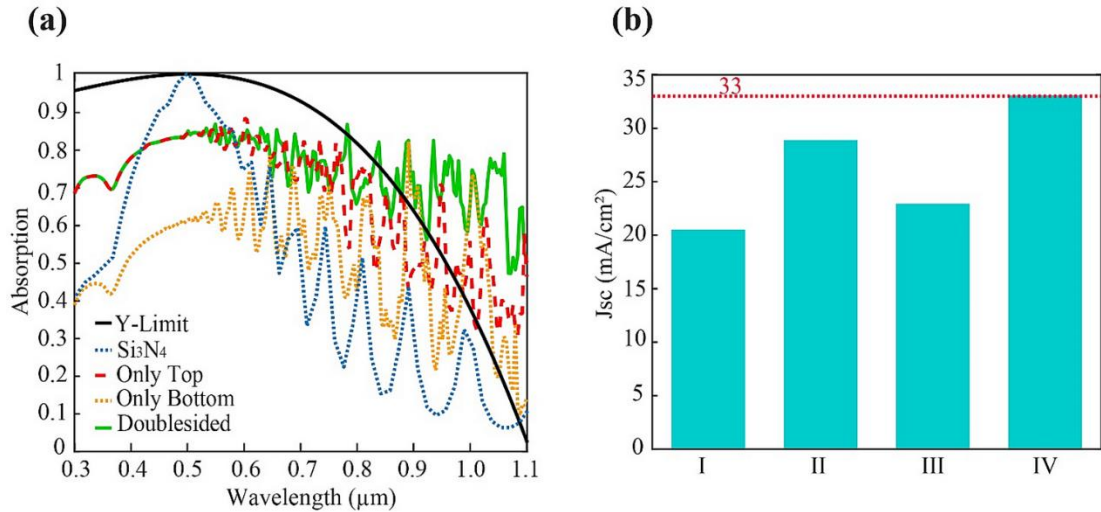
Alt piramit katmanının optimizasyonu için (Bölge-III olarak temsil edilir), iletilen ışık tasarlanan yapıdan sonra ölçülmüştür. Sonuç olarak, algoritma her bir piramit parçası için 350 nm'lik bir genişlik değeri ve 50 nm ile 120 nm arasında değişen yükseklik değerleri bulmuştur. Hücre genişliği sabit ve 3000 nm olduğundan dolayı, tasarlanan toplam piramit sayısı sırasıyla üst ve alt yüzeylerde 6 ve 9 olmuştur. Tasarlanan yapı için elde edilen parametreler Çizelge 3.1'de görülebilir.



Çizelge 3.1: Tasarlanan yapı için piramit yüzeyi desen parametreleri [63].

Hücre No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Üst	Yükseklik( $\mu\text{m}$ )	0.29	0.4	0.43	0.415	0.37	0.15	-	-	-
	Genişlik ( $\mu\text{m}$ )	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54	0.3	-	-	-
Alt	Yükseklik( $\mu\text{m}$ )	0.06	0.06	0.11	0.05	0.06	0.06	0.11	0.11	0.12
	Genişlik ( $\mu\text{m}$ )	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.2

Yapı sırasıyla enine elektrik (TE) ve enine manyetik (TM) polarize ışıklarla analiz edilmiştir ve yansıyan ışık iki boyutlu (2D) FDTD analizi ile ölçülmüştür. Şekil 3.5'te polarize olmayan güneş spektrumu için tasarlanan yapının sonuçları görülmektedir. Burada yapının performansı endüstriyel olarak kullanılan 68 nm kalınlığında  $Si_3N_4$  ile kaplı bir güneş hücresi ile karşılaştırılmıştır. Böyle bir kaplama 550 nm'de bir yansıma minimizasyonu sağlamaktadır ve görünür spektrumdaki ortalama yansımayı azaltmaktadır [57].



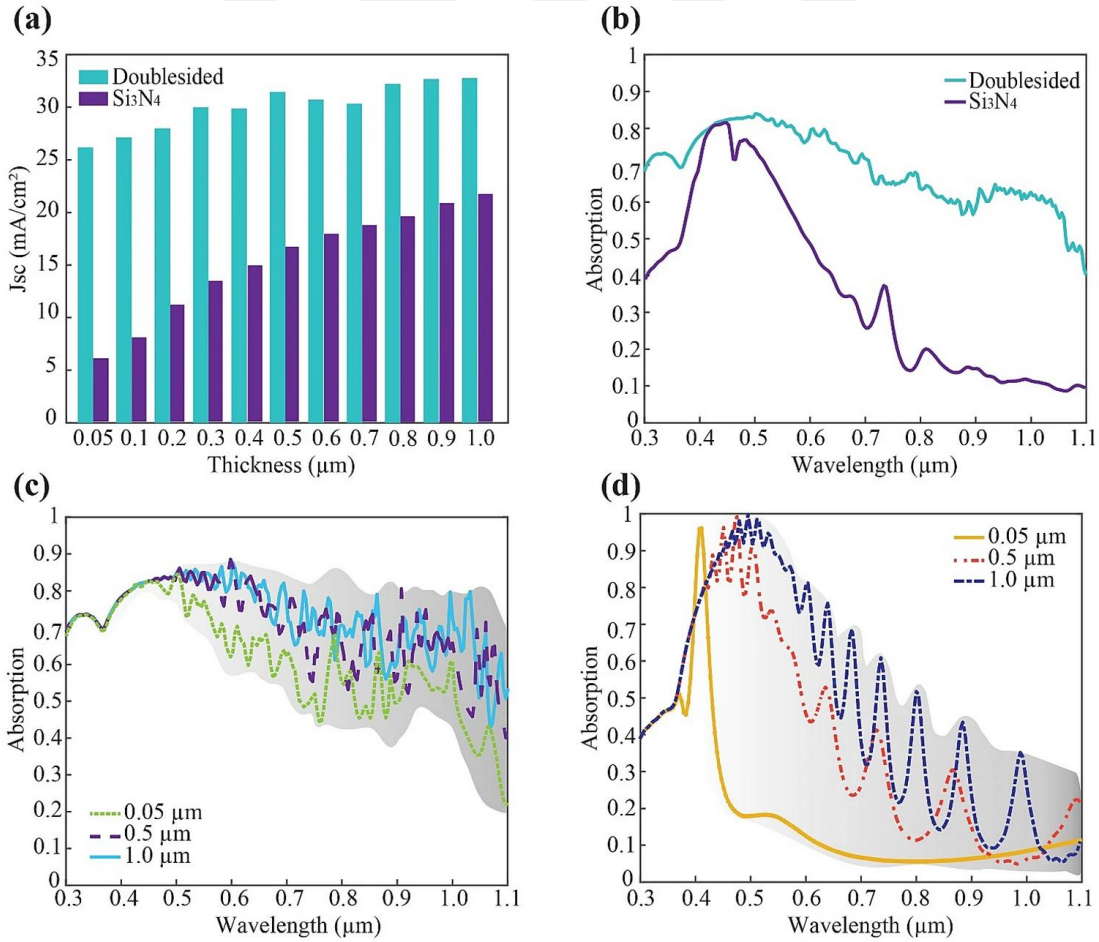
Şekil 3.5 : Tasarlanan yapıların absorpsiyon spektrumunu ve kısa devre akımları [63].

Şekil 3.5 (a) ve (b)'de sırasıyla  $Si_3N_4$  katmanı, üst piramit katmanı, alt piramit katmanı ve çift taraflı piramit katmanlarının emilim spektrumları ve kısa devre akımları sonuçları görülmektedir. Çift taraflı optimize edilmiş tasarımda yapının soğurma spektrumu, Denklem 3.1'de verilen Yablonovitch-sınırı spektrumundan uzun dalga boylarında çok daha yüksektir.  $d$  kalınlığındaki ince film bir güneş hücresi için mükemmel yansıma önleme ve mükemmel ışık hapsedme varsayıldığında, Yablonovitch sınırı soğurma spektrumu (Şekil 3.5 (a)'daki siyah eğri) [58, 64] şu şekilde tanımlanır:

$$A_{Yablonovitch} = 1 - \frac{1}{1+4n^2ad} \quad (3.1)$$

Aynı zamanda yapının  $32.78 \frac{mA}{cm^2}$ 'lik kısa devre akımı, 1000 nm güneş hücresi kalınlığındaki Yablonovitch kısa devre akımı sınırı olan  $33 \frac{mA}{cm^2}$ 'ye çok yakındır.

Piramit desenli yapının soğurma ve kısa devre akımı artışındaki başarısını değerlendirmek için, farklı soğurma tabakası kalınlıkları için emilim spektrumları Şekil 3.6 (a)'da sunulmuştur. Üst ve alt kısımlar için MOPSO ile optimize edilmiş katmanlar ile sabitlenmiştir.  $Si_3N_4$  kaplı ve çift taraflı yapı için ortalama absorpsiyonu karşılaştırdığımızda, 50 nm ile 1000 nm arasında değişen yüzey kalınlıkları için çift taraflı yapının tüm güneş spektrumu boyunca absorpsiyonu önemli ölçüde arttırdığı görülmektedir. Ayrıca, kısa devre akımı artışı da çok ince soğurma tabakası kalınlıkları için umut vericidir. Şekil 3.6 (c) ve (d)'de, farklı soğurma tabakası kalınlıkları için emilim spektrumu sırasıyla  $Si_3N_4$  kaplı ve çift taraflı yapı için görülebilir.



Şekil 3.6 : Farklı kalınlıklar için tasarlanan çift taraflı yapının ve  $Si_3N_4$  kaplı yapının emilim spektrumları ve kısa devre akımları [63].

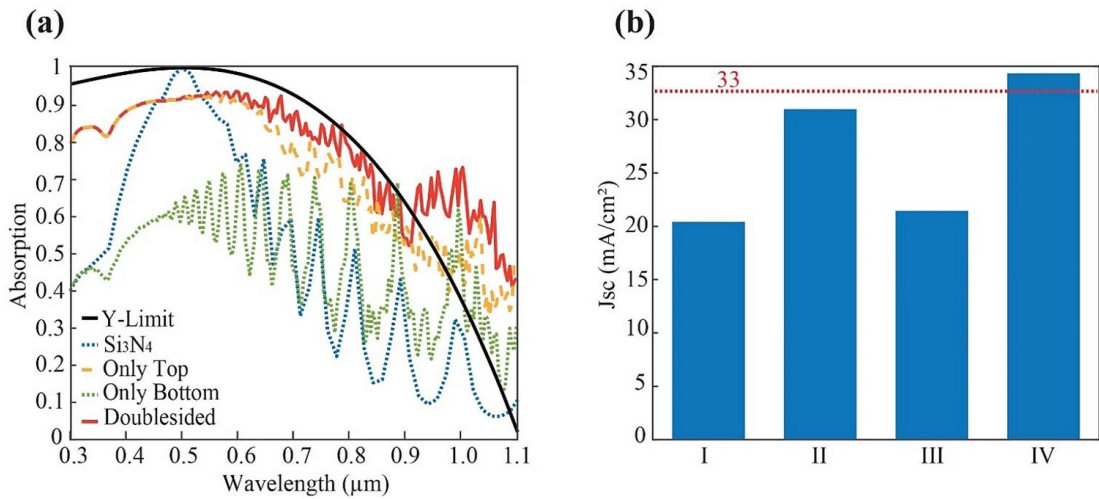
Bildirilen sonuçlar, MOPSO tabanlı yaklaşımla tasarlanan çift taraflı yapının geleneksel  $Si_3N_4$  kaplı yapıya karşı üstün bir performans sergilediğini göstermektedir. Ek olarak, sadece üst kısımdaki piramit yapıyla katman ile de yansıma önleyiciğin ve ışık hapsedilmenin elde edildiği görülmüştür.

Yapının performansı ve kompaktlığı arasındaki en iyi dengeyi bulmak için belirlenen yapı kısıtları değiştirilmiştir. Yükseklik parametresinin sonuçlar üzerindeki etkisini görmek için yükseklik aralığını artırılmıştır. Piramit yükseklikleri 30 nm ve 1000 nm aralığında, genişlikleri ise 100 nm ile 3000 nm aralığında değiştirilmiştir ve 10 iterasyon ve 10 parçacık ile kullanılmıştır.

MOPSO, üst katmandaki her bir piramit için genişlik değerini 670 nm yükseklik aralığını ise 300 nm ile 800 nm olarak bulmuştur. Alt katmandaki her bir piramit için ise genişlik değerini 1500 nm yükseklik aralığını ise 30 nm ile 260 nm olarak bulmuştur. Tasarlanan yapı için bulunan parametreler Çizelge 3.2'de görülebilir.

Çizelge 3.2: Yükseklik aralığı artırılmış parametre uzayında tasarlanan yapı için piramit yüzeyi desen parametreleri.

	Hücre No	1	2	3	4	5
Üst	Yükseklik ( $\mu\text{m}$ )	0.3	0.88	0.77	0.7	0.85
	Genişlik ( $\mu\text{m}$ )	0.67	0.67	0.67	0.67	0.32
Alt	Yükseklik ( $\mu\text{m}$ )	0.03	0.26	-	-	-
	Genişlik ( $\mu\text{m}$ )	1.5	1.5	-	-	-



Şekil 3.7 : Geniş yükseklik kısıtları için elde edilen yapılar ve sonuçları [63].

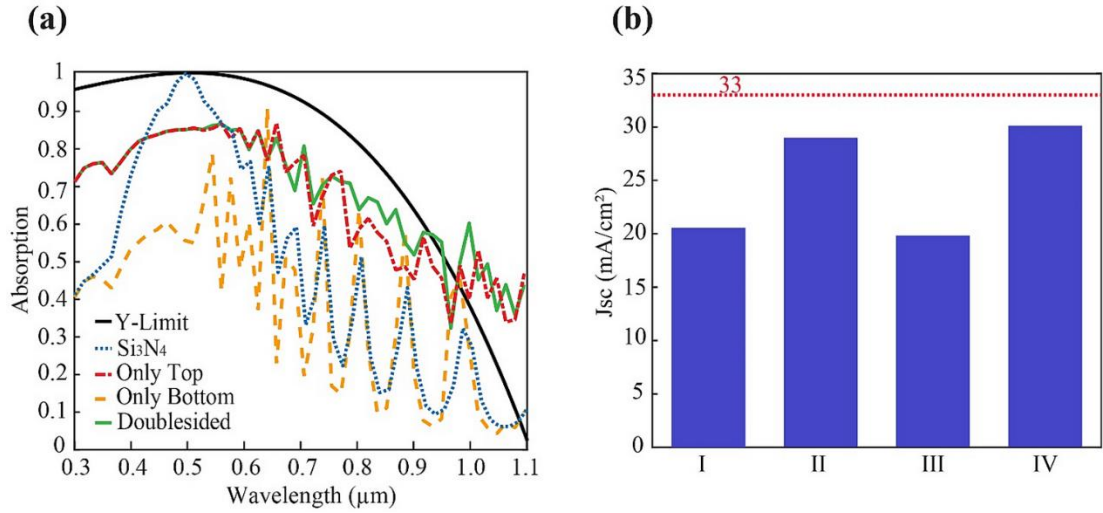
Şekil 3.7 (a)'da, tasarlanan yapının performansı geleneksel 68 nm  $Si_3N_4$  kaplamalı silikon ince film ile karşılaştırmıştır. Çift taraflı optimize edilmiş yapımızın emilim spektrumu, kısa dalga boylarında Yablonovitch-limit spektrumuna çok yakın ve uzun dalga boylarında Yablonovitch limitinden daha fazladır. Optimize edilmiş tasarımdaki  $34.23 \frac{mA}{cm^2}$ 'lik kısa devre akımı, 1000 nm güneş hücresi kalınlığındaki Yablonovitch kısa devre akımı sınırı olan  $33 \frac{mA}{cm^2}$ 'den daha fazladır. Sonuç olarak, daha geniş aralıktaki yükseklik kısıtları için algoritma daha iyi sonuçlar vermiştir.

Toplam hücre genişliği parametresinin sonuçlar ve algoritma üzerindeki etkisini görmek için hücrenin toplam genişliği ilk yapıdan 1.5 kat daha geniş ve dar olacak şekilde değiştirilmiştir ve yapılar bu parametrelerle optimize edilmiştir. Her iki yapı için, yükseklikler (H) 30 nm ve 500 nm arasında ve genişlik (W) ise 100 nm ve  $\frac{\text{Toplam hücre genişliği}}{10}$  arasında sınırlandırılmıştır. MOPSO 10 iterasyon ve 10 parçacıkla kullanılmıştır.

1.5 kat daha geniş yapının üst tarafı için MOPSO, her bir piramit için 710 nm'lik bir genişlik değeri ve 300 nm ile 500 nm arasında değişen farklı yükseklik değerleri bulmuştur. Üst taraf için ise algoritma her piramit parçası için 400 nm'lik bir genişlik değeri ve 30 nm ve 40 nm arasında değişen yükseklik değerleri bulmuştur. Bulunan parametreler Çizelge 3.3'te gösterilmiştir.

Çizelge 3.3: Genişlik aralığı arttırılmış parametre uzayında tasarlanan yapı için piramit yüzeyi desen parametreleri [63].

	Hücre No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Üst	Yükseklik ( $\mu\text{m}$ )	0.29	0.11	0.47	0.5	0.1	0.5	0.2	0.5	0.5	-	-
	Genişlik ( $\mu\text{m}$ )	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	-	-
Alt	Yükseklik ( $\mu\text{m}$ )	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	0.03
	Genişlik ( $\mu\text{m}$ )	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41



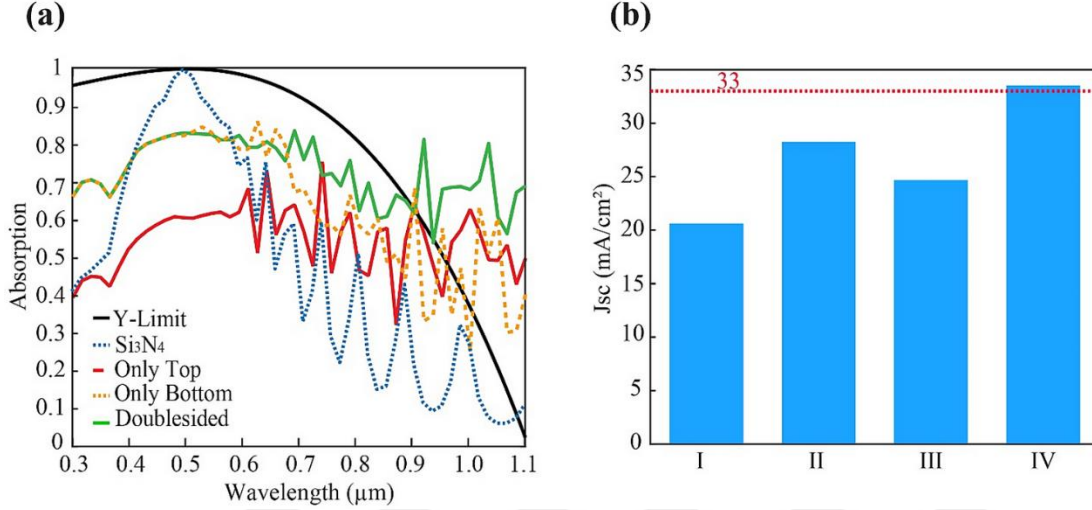
Şekil 3.8 : Toplam hücre genişliğinin arttırıldığı kısıtlar için elde edilen yapılar ve sonuçları [63].

Şekil 3.8 (a)'da, tasarlanan yapının performansı geleneksel 68 nm  $Si_3N_4$  kaplamalı silikon ince film ile karşılaştırmıştır. Çift taraflı optimize edilmiş yapının emilim spektrumu, kısa dalga boylarında Yablonovitch-limiti spektrumuna yakın ve uzun dalga boylarında Yablonovitch limitinden daha fazladır. Optimize edilmiş tasarımdaki  $30.07 \frac{mA}{cm^2}$ 'lik kısa devre akımı, 1000 nm güneş hücresi kalınlığındaki Yablonovitch kısa devre akımı sınırı olan  $33 \frac{mA}{cm^2}$ 'den daha düşüktür. Daha geniş bir toplam hücre genişliği için, algoritma Yablonovitch sınırına yaklaşamamıştır. Sonuç olarak, daha geniş yapı, ilk tasarlanan yapı ile karşılaştırıldığında performansın düştüğü görülmektedir.

1.5 kat daha dar yapı için MOPSO, üst katmandaki her piramit için 550 nm'lik bir genişlik değeri ve 160 nm ve 410 nm arasında değişen farklı yükseklik değerleri bulmuştur. Alt katman için, algoritma 350 nm'lik bir genişlik değeri ve 130 nm ve 460 nm arasında değişen yükseklik değerleri bulmuştur. Tasarlanan yapının değerler Çizelge 3.4'te görülebilir.

Çizelge 3.4: Genişlik aralığı azaltılmış parametre uzayında tasarlanan yapı için piramit yüzeyi desen parametreleri.

	Hücre No	1	2	3	4	5	6
Üst	Yükseklik ( $\mu\text{m}$ )	0.40	0.16	0.41	0.21	-	-
	Genişlik ( $\mu\text{m}$ )	0.55	0.55	0.55	0.35	-	-
Alt	Yükseklik ( $\mu\text{m}$ )	0.42	0.42	0.46	0.14	0.30	0.13
	Genişlik ( $\mu\text{m}$ )	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.25



Şekil 3.9 : Toplam hücre genişliğinin azaltıldığı kısıtlar için elde edilen yapılar ve sonuçları [63].

Şekil 3.9 (a)'da, tasarlanan yapının performansı geleneksel 68 nm  $\text{Si}_3\text{N}_4$  kaplamalı silikon ince film ile karşılaştırmıştır. Çift taraflı optimize edilmiş yapının emilim spektrumu, kısa dalga boylarında Yablonovitch-limit spektrumuna yakın ve uzun dalga boylarında Yablonovitch limitinden daha fazladır. Optimize edilmiş tasarımdaki  $33.52 \frac{\text{mA}}{\text{cm}^2}$ 'lik kısa devre akımı, 1000 nm güneş hücresi kalınlığındaki Yablonovitch kısa devre akımı sınırı olan  $33 \frac{\text{mA}}{\text{cm}^2}$ 'den daha yüksektir. Daha dar bir toplam hücre genişliği için, algoritma Yablonovitch sınırını geçmiştir. Sonuç olarak, daha dar yapı, ilk tasarlanan yapı ile karşılaştırıldığında performansın arttığı görülmektedir.

Algoritmada yapı parametrelerinin sınır değerleri değiştirildiğinde, algoritma daha geniş bir yükseklik aralığı ve daha dar bir toplam hücre genişliği ile daha iyi sonuçlar vermiştir. Algoritmanın daha dar toplam hücre genişliği ile daha iyi sonuçlar vermesinin nedeni, daha dar bir tasarım alanında aynı sayıda yineleme ile daha detaylı çözümlere ulaşabilmesidir. Bu nedenle dar yapının ilk yapıya göre daha başarılı olduğu görülmüştür. Yükseklik arttırıldığında daha iyi sonuçlar elde edilmiştir çünkü

algoritma daha serbest davranabilmiştir. Ancak üretim limitleri göz önüne alındığında tasarlanan ilk yapının daha uygun olduğu görülmüştür.

Açısal bağımlılığı görmek için, geliş açısına bağlı olarak hem  $Si_3N_4$  kaplı hem de çift taraflı güneş pillerinin emilim spektrumları Şekil 3.10'da gösterilmiştir. Gönderilen polarize olmayan ışığın geliş açısı  $-45^\circ$  ve  $45^\circ$  arasında değişmektedir.  $Si_3N_4$  kaplı yapı için, toplam emilim %39,9'u aşmaktadır. Çift taraflı yapı için ise toplam emilim %66,5'i aşmaktadır. Ayrıca, ortalama emilim,  $-15^\circ$  ve  $15^\circ$  arasındaki açı aralığında %70'den fazladır. Genel olarak, ortalama emilim miktarı  $Si_3N_4$  kaplı yapıya kıyasla üstün performans göstermiştir. Ek olarak, çift taraflı güneş pili için hesaplanan kısa devre akım yoğunluğuna ( $J_{sc}$ ) karşı geliş açısı grafiği, fotovoltaik uygulamalardaki potansiyeli değerlendirmek amacıyla Şekil 3.10'da gösterilmiştir.  $Si_3N_4$  kaplı yapı için, kısa devre akımı yoğunluğu  $\pm 45^\circ$ 'e kadar olan geliş açıları için  $21 \frac{mA}{cm^2}$ 'nin üzerinde kalmıştır. Çift taraflı tasarım için ise kısa devre akımı yoğunluğu  $\pm 45^\circ$ 'e kadar olan olay açıları için  $30 \frac{mA}{cm^2}$ 'nin üzerinde kalmıştır.  $-30^\circ$  ve  $30^\circ$  arasındaki açılar için  $J_{sc}$  değeri normal geliş açısındaki değerlerden daha büyük olarak elde edilmiştir. Bu durum ilginç ancak beklenen bir durumdur çünkü birim hacim başına soğurulan foton sayısı açılar değiştikçe değişmektedir. Elde edilen simülasyon sonuçlarına göre  $-30^\circ$  ve  $30^\circ$  arasındaki açılar için üretilen elektron deliği çiftlerinin sayısı artmıştır. Ayrıca yapı merkeze göre asimetrik olduğundan dolayı korugasyonlar periyodik değildir. Kısaca, çift taraflı yapının  $J_{sc}$  değeri  $Si_3N_4$  kaplı yapıdan yüksek çıkmıştır ve  $\pm 45^\circ$  e kadar olan geliş açıları için  $J_{sc}$  değerleri Yablonovitch sınırına yakındır, bu da güneş pili uygulamaları için tasarlanan yapının avantajlı olduğunu göstermektedir.

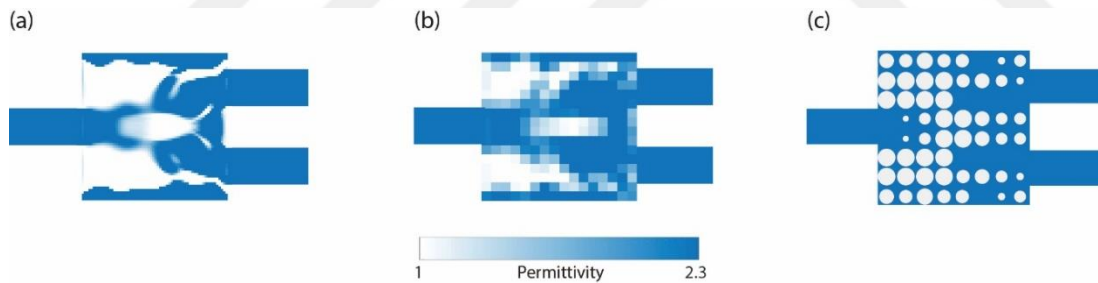
### 3.2 Optik Bölücü Tasarımları

Bir optik bölücü gelen bir ışık demetini (örneğin bir lazer ışını) aynı optik güce sahip olan veya olmayan iki (veya bazen daha fazla) ışık demetine bölebilen optik bir cihazdır. Optik bölücüler birçok alanda kullanılmaktadırlar. Örneğin, çeşitli interferometreler, otokorelatörler, fotoğraf kameraları, projektörler ve lazer sistemleri için optik bölücüler gereklidir. Geniş uygulama yelpazeleri, farklı tipteki ayırıcıları tasarlamının önemini gösterir.

### 3.2.1 Güç Bölücü Tasarımları

#### 3.2.1.1 50:50 Güç Bölücü Tasarımı

Tezde ilk olarak hedef öncelikli algoritma ile 50:50 optik güç bölücü tasarlanmıştır. Güç bölücüyü tasarlamak için algoritmada giriş dalga kılavuzunun temel enine-elektrik (TE) modundaki gücün, iki çıkış dalga kılavuzundaki temel TE moduna eşit olarak bölünmesi gerektiği hedef fonksiyonu olarak verilmiştir. Tasarım, optik haberleşme bandı dikkate alınarak 1.55  $\mu\text{m}$  dalga boyunda optimize edilmiştir. Tasarım alanının geçirgenlik değerleri 3D (3 boyutlu) üretim teknolojiyle yapının üretilebilmesi için  $\epsilon_{min} = 1$  (hava) ve  $\epsilon_{max} = 2.30$  (PLA) arasında değişecek şekilde ayarlanmıştır. 2.51  $\mu\text{m} \times 2.51 \mu\text{m}$  boyutunda bir tasarım alanı tanımlanmış ve 550 nm genişliğinde giriş ve çıkış dalga kılavuzları güç bölücüye eklenmiştir. Algoritma ile elde edilen yapı Şekil 3.10 (a) 'da gösterilmektedir. Oluşan yapının rastgele ve sürekli bir dağılıma sahip olması üretimde ortaya çıkabilecek sorunları göz önüne sermiştir. Sayısal olarak tasarlanmış yapıların çoğunda endüstri standardı optik litografi ile üretilmesi zor özellikler vardır [35,65,66]. Bu zorlukların üstesinden gelmek için, tasarım aşamasında ek kısıtlamalar dikkate alınmalıdır.



Şekil 3.10 : Tasarlanan 50:50 optik bölücüler [67].

Keyfi ve rastgele değişen bir dielektrik profili, homojen olmayan bir fotonik ortama karşılık gelir. Derecelendirilmiş indis profili (GRIN), kırılma indisi varyasyonunun genellikle uzunlamasına veya radyal yönler boyunca meydana geldiği bu tür ortamın özel bir şeklidir. GRIN ortamını sürekli bir halden ayrık bir profile dönüştürmek için fotonik kristaller kullanılabilir. Fotonik ortamın bu şekilde yapay olarak modellenmesinde sürekli dielektrik profilini, ayrık bir profile dönüştürmek için iki malzeme (hava ve dielektrik gibi), modelde düzenli olarak yerleştirilir. Literatürde bu modellemeyi yapmak için dielektrik çubukların ve deliklerin yarıçaplarını düzenlemek, dielektrik çubuklar arasındaki uzamsal mesafeleri ayarlamak ve farklı



kırılma indisleri ile oluşturulan hava deliklerine sızmak gibi çeşitli yöntemler kullanılmıştır [68]. Bu yöntemlerin çoğu etkili ortam teorisine (EMT) dayanmaktadır ve ortak amaçları istenen kırılma indisi profiline sahip homojen olmayan bir ortam tasarlamaktır. Tezin bu çalışmasında, Hedef Öncelikli algoritma ile tasarlanan sürekli bir kırılma indisi profilini modellemek için Bruggeman EMT kullanılmıştır.

Sürekli GRIN ortamını fotonik kristal yapılarına dönüştürmek için, ilk olarak oluşturulan yapı hücrelere bölünmüştür. Genelleştirilmiş Bruggeman EMT yardımıyla, her bir hücrenin efektif dielektrik değeri hesaplanmıştır. Bu teori ile modellenen yapı Şekil 3.10 (b) 'de gösterilmektedir. Genelleştirilmiş Bruggeman EMT ile [69], dielektrik sabitleri  $\varepsilon_1$  ve  $\varepsilon_2$  ve hacim oranları  $\eta_1$  ve  $\eta_2$  olan bir ikili sistem düşünüldüğünde, efektif dielektrik ortam hesabı denkleminin aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\varepsilon_{eff} = \frac{1}{4} (\beta + \sqrt{\beta^2 + 8\varepsilon_1\varepsilon_2}) \quad (3.2)$$

Denkleminde  $\beta = (3\eta_1 - 1)\varepsilon_1 + (3\eta_2 - 1)\varepsilon_2$  olarak hesaplanır. Daha sonra efektif dielektrik değeri hesaplanan her hücrede içi hava ile dolu silindirik delikler açılmıştır. Hava deliklerinin yarıçaplarının değişimi aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır:

$$r_{TE} = a \sqrt{\frac{[\varepsilon_{host} - n(x,y)^2](\varepsilon_{host} + \varepsilon_{air})}{\pi[\varepsilon_{host} + n(x,y)^2](\varepsilon_{host} - \varepsilon_{air})}} \quad (3.3)$$

burada  $\varepsilon_{host}$  tasarlanan ana yapının dielektrik sabiti,  $\varepsilon_{air}$  hava deliklerinin dielektrik sabiti,  $a$  örgü sabiti ve  $n(x,y)$  seçilen her bir hücrenin etkili ortam teorisine hesaplanmış kırıcılık indisi değeridir. 50:50 optik güç bölücü tasarımında  $\varepsilon_{host}$  PLA olarak seçilmiştir ve 2.30 değerine eşittir ve  $a$  296 nm olarak alınmıştır. Denklem 3.2 ve Denklem 3.3 Hedef Öncelikli algoritma ile tasarlanan yapıya uygulandığında yapı Şekil 3.10 (c)'de görülebileceği üzere fotonik kristallerden oluşan bir yapı haline gelmiştir. Oluşan yapıda hava deliklerinin yarıçapı 40 nm ile 140 nm arasında değişmektedir.

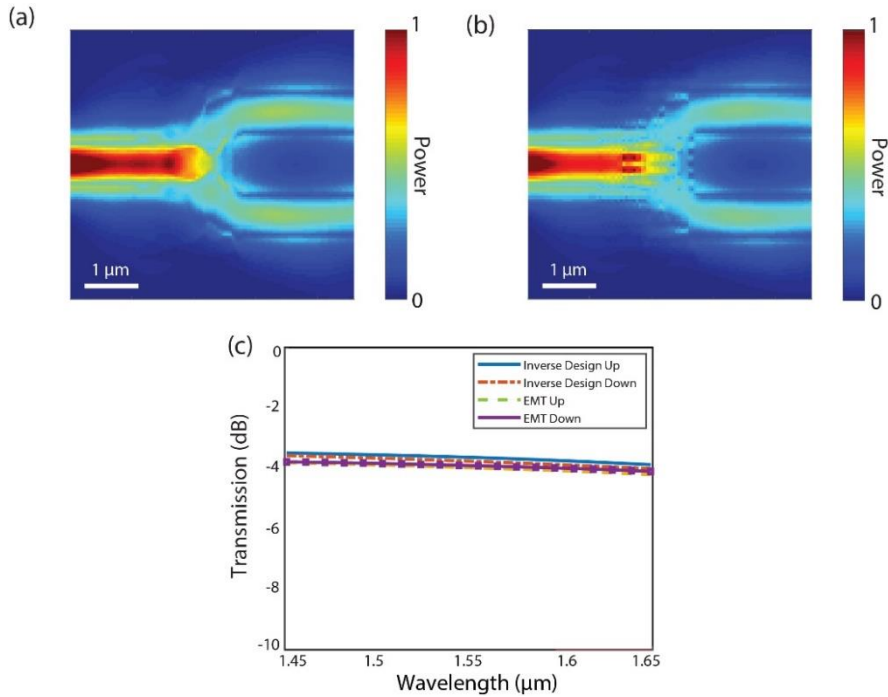
Elde edilen yapıların simülasyonları, tasarlanan güç ayırıcının iletim özelliklerini değerlendirmek için 2D FDTD yöntemi kullanılarak Lumerical'da gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, istenmeyen yansımaları önlemek için simülasyon alanı mükemmel uyumlu katmanlarla (PML) çevrelenmiştir.

Güç bölücüler için iki önemli kriter, düşük ekleme kaybı ve çıkış kanallarında mükemmel güç homojenliğidir. Giriş dalga kılavuzundaki ve her çıkış dalga kılavuzundaki iletim, ekleme kaybını ve çıkış gücünü hesaplamak için sayısal olarak

hesaplanmıştır. Optik bölücünün güç homojenliği, tüm çıkış portlarındaki maksimum ve minimum çıkış gücü arasındaki oran olarak hesaplanırken, ekleme kaybı ise giriş gücü ile ayırıcı bölgede yayılan dalganın gücü arasındaki fark olarak hesaplanır.

Hedef öncelikli algoritma ile tasarlanan 50:50 güç bölücü, üst çıkış dalga kılavuzunda 0.763 dB ekleme kaybı ve alt çıkış dalga kılavuzunda 0.831 dB ekleme kaybı performansı sergilemiş ve güç homojenliği 0.067 dB olarak hesaplanmıştır. Şekil 3.11 (a), Şekil 3.10 (a) 'da tasarlanan yapı için hesaplanan mod yayılımını göstermektedir. Şekil 3.11 (a) 'de kolayca görülebileceği gibi çıkış dalga kılavuzlarındaki dalga yayılımı, temel TE modu olarak gerçekleşmiştir ve güç bölme amacı başarıyla gerçekleştirilmiştir.

Bruggeman EMT ile modellenen 50:50 güç bölücü, üst çıkış dalga kılavuzunda 0.608 dB ekleme kaybı ve alt çıkış dalga kılavuzunda 0.733 dB ekleme kaybı ile performansı sergilemiş ve güç homojenliği 0.126 dB olarak hesaplanmıştır. Bu değerlerden de görülebileceği gibi, Bruggeman EMT ile elde edilen yapı performansta herhangi bir düşüş göstermemiştir, aksine yapı ekleme kaybı parametrelerine göre daha iyi bir sonuç elde etmiştir. Ayrıca tersine tasarım ve Bruggeman EMT ile tasarlanan yapıların iletim özellikleri Şekil 3.11 (c)'deki gibi karşılaştırıldığında iki yapının performansının yaklaşık olarak aynı olduğu görülmektedir.

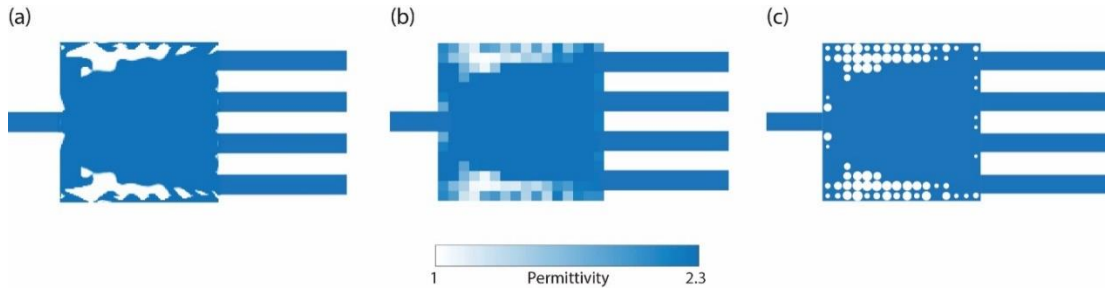


Şekil 3.11 : Hedef öncelikli algoritma ile ve etkili ortam teorisi ile tasarlanan 50:50 optik bölücülerin sonuçları [67].

### 3.2.1.2 25:25 Güç Bölücü Tasarımı

Bu kısımda hedef öncelikli algoritma ile 25:25 optik güç bölücü tasarlanmıştır. Güç bölücüyü tasarlamak için algoritmada giriş dalga kılavuzunun temel enine-elektrik (TE) modundaki gücün, dört çıkış dalga kılavuzundaki temel TE moduna eşit olarak bölünmesi gerektiği hedef fonksiyonu olarak verilmiştir. Tasarım, optik haberleşme bandı dikkate alınarak 1.55  $\mu\text{m}$  dalga boyunda optimize edilmiştir. Tasarım alanının geçirgenlik değerleri 3D üretim teknolojiyle yapının üretilebilmesi için  $\epsilon_{min} = 1$  (hava) ve  $\epsilon_{max} = 2.30$  (PLA) arasında değişecek şekilde ayarlanmıştır. 4.9  $\mu\text{m} \times 4.9 \mu\text{m}$  boyutunda bir tasarım alanı tanımlanmış ve 550 nm genişliğinde giriş ve çıkış dalga kılavuzları güç bölücüye eklenmiştir. Algoritma ile elde edilen yapı Şekil 3.12 (a)'da gösterilmektedir. Burada algoritma tarafından üretilen yapının, kademeli konik güç ayırıcı yapısına benzediği görülebilir [70].

Sürekli GRIN ortamını fotonik kristal yapılarına dönüştürmek için, üretilen yapı, 50:50 optik güç bölücü tasarımında olduğu gibi hücrelere bölünmüştür. Genelleştirilmiş Bruggeman EMT yardımıyla, efektif dielektrik sabiti değeri hesaplanan her hücrede, hesaplanan değerlere göre silindirik delikler açılmıştır. 25:25 optik güç bölücü tasarımında  $\epsilon_{host}$  PLA olarak seçilmiştir ve 2.30 değerine eşittir ve  $a$  296 nm olarak alınmıştır. Denklem 3.2 ve Denklem 3.3 Hedef Öncelikli algoritma ile tasarlanan yapıya uygulandığında yapı Şekil 3.12 (c)'de görülebileceği üzere fotonik kristallerden oluşan bir yapı haline gelmiştir. Oluşan yapıda hava deliklerinin yarıçapı 40 nm ile 140 nm arasında değişmektedir.

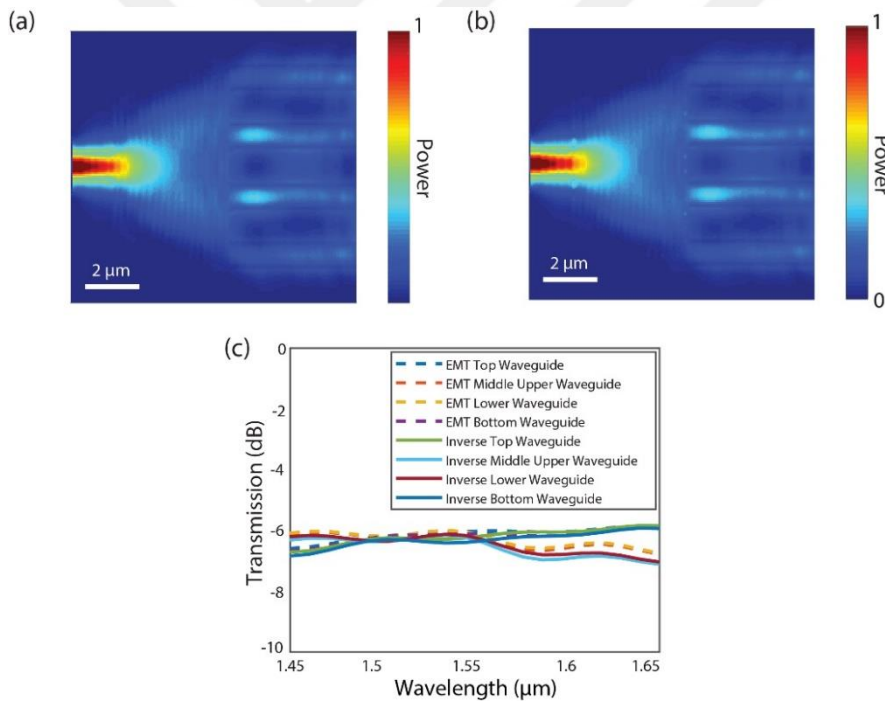


Şekil 3.12 : Tasarlanan 25:25 optik bölücüler [67].

Yapıların performansını sayısal olarak analiz etmek için 2D FDTD yöntemi kullanılmış ve yapının güç dağılımları Şekil 3.13'te sunulmuştur. Hedef öncelikli algoritma ile tasarlanan 25:25 optik güç bölücü üst çıkış dalga kılavuzundan alt çıkış dalga kılavuzuna doğru sırasıyla 0.2 dB, 0.038 dB, 0.022 dB, 0.047 dB ekleme kaybı performansı sergilemiştir. Ek olarak, güç homojenliği 0,22 dB olarak hesaplanmıştır.

Şekil 3.13 (a), Şekil 3.12 (a) 'da tasarlanan yapı için hesaplanan mod yayılımını gösterir. Şekil 3.13 (a) 'da kolayca görülebileceği gibi, çıkış dalga kılavuzlarındaki dalga yayılımı, temel TE modu olarak gerçekleşmiştir ve güç bölümünün amacı başarıyla gerçekleştirilmiştir.

Bruggeman EMT ile modellenen 25:25 güç bölücü, sırasıyla üst çıkış dalga kılavuzundan alt çıkış dalga kılavuzuna 0.182 dB, 0.20 dB, 0.234 dB, 0.10 dB ekleme kaybı performansı sergilemiştir. Ek olarak, güç homojenliği 0,134 dB olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan değerlerden de görülebileceği gibi, Bruggeman etkili ortam teorisi ile elde edilen yapı, ekleme kaybı parametresi için sadece küçük bir performans düşüşü göstermiştir ve güç homojenliği parametresi için iyi bir sonuca ulaşmıştır. Ayrıca Hedef Öncelikli algoritma ve Bruggeman EMT ile elde edilen yapıların iletim özellikleri Şekil 3.13(c) 'deki gibi karşılaştırıldığında yapıların yakın iletim özelliklerine sahip olduğu görülmüştür.



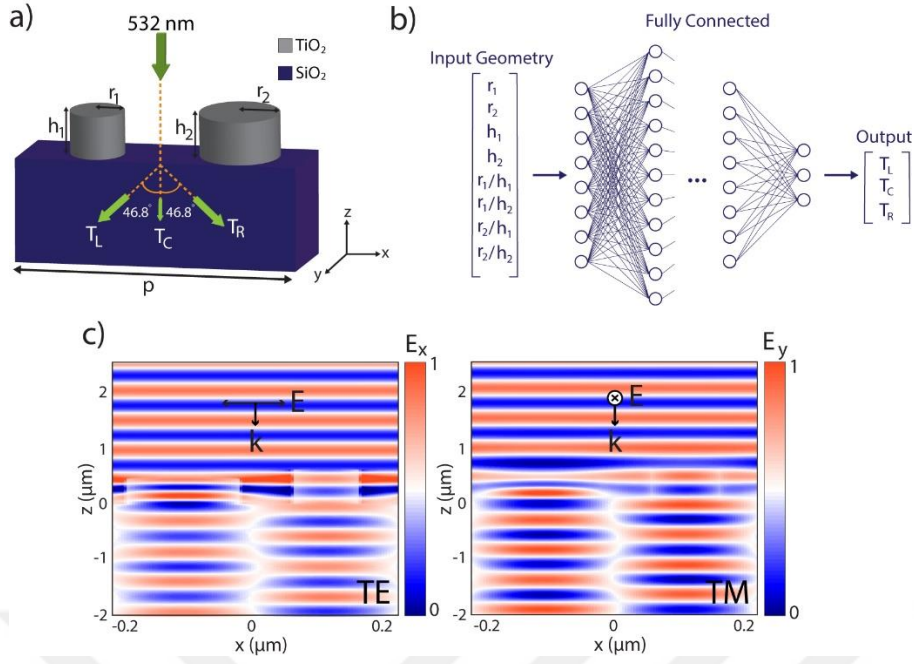
Şekil 3.13 : Hedef öncelikli algoritma ile ve etkili ortam teorisi ile tasarlanan 25:25 optik bölücülerin sonuçları [67].

### 3.2.2 Işın Bölücü Tasarımı

Tezin bu bölümünde Yapay Sinir Ağları (YSA) ile polarize olmayan ışığı belirli bir oranda bölen bir ışın ayırıcı tasarlanmıştır. Oluşturulan yapının 532 nm dalga boyunda gelen ışığı  $-46,8^\circ$  ve  $46,8^\circ$  açılarında yönlendirmesi hedeflenmiştir. Şekil 3.14 (a) 'da gösterildiği üzere gelen ışık sol ( $T_L$ ), merkez ( $T_C$ ) ve sağ ( $T_R$ ) güç oranları ile üç yöne

ayrılmaktadır. Tasarımda x eksenini yönünde 500 nm ve y eksenini yönünde 250 nm sabit periyodiklik ile 1.50 kırılma indisine sahip  $SiO_2$  substratı üzerinde kırılma indisi 2.43 olan  $TiO_2$  nano sütunlardan oluşan sabit bir süper hücre kullanılmıştır. Şekil 3.14 (b), bu çalışmada uygulanan genel YSA ağının illüstrasyonunu göstermektedir. YSA'ya süper hücredeki  $TiO_2$  nano sütunlarının yarıçapları, yükseklikleri ve bu parametrelerin oranları girdi olarak verilmiştir ve yapının bu parametrelere karşılık gelen iletim performansı çıktı olarak alınmıştır. Tüm olası durumların % 0,0022'si olan 13767 adet veri simülasyonundan rastgele 11014'ü YSA'nın eğitilmesi için kullanılmıştır. Kalan simülasyonlar ise YSA ile oluşturulan modelin testi için kullanılmıştır. Oluşturulan model test edildiğinde yalnızca  $6.51 \times 10^{-5}$  düzeyinde ortalama bir ortalama kare hatası elde ettiği görülmüştür. Bu hataya göre optimum güç oranlarında istenen bir geometriye ulaşmak için 6.255 milyon olası geometrinin analiz edilmesi gerektiği görülmüştür.

$T_L$  ve  $T_R$ 'nin 0.5 ve  $T_C$ 'nin 0 olduğu en yakın güç oranları seçildiğinde  $r_1$ ,  $r_2$ ,  $h_1$ ,  $h_2$  parametreleri için elde edilen model sırasıyla 0.1  $\mu m$ , 0.06  $\mu m$ , 0,44  $\mu m$ , 0,6  $\mu m$  yapı parametrelerini önermiştir. Modelin önerdiği parametrelerle yapı Lumerical'da oluşturulup 3D FDTD ile sayısal olarak incelendiğinde  $T_L$ ,  $T_R$  ve  $T_C$  için sırasıyla 0.487, 0.487 ve 0.0 değerleri hesaplanmıştır. Şekil 3.14 (c), TE ve TM polarizasyonlarında normalize edilmiş elektrik alan genliğinin haritalarını göstermektedir. Sağa ve sola bölünmüş ışık arasındaki girişim modelinin her iki polarizasyonda da benzer şekilde meydana geldiği gözlemlenmiştir. Yapının istenen özellikleri sağladığı ve YSA'nın doğrusal olmayan ve oldukça karmaşık problemleri anlamak için verimli bir yöntem olduğunu doğrulamıştır.



Şekil 3.14 : YSA ile tasarlanan ışın ayırıcı yapısı ve sonuçları.

### 3.3 Geniş Bantta Çalışan Akromatik Lens Tasarımları

#### 3.3.1 Düşük Kırılma İndisli Geniş Bant, Akromatik ve Polarizasyona Duyarsız Lens Tasarımı

Tezin bu kısmında Hedef Öncelikli algoritma kullanılarak 1300-1750 nm dalgaboyu aralığında Enine Elektrik (TE) ve Enine Manyetik (TM) polarizasyonları odaklayabilen akromatik lensler tasarlanmıştır ve incelenmiştir. Geniş bantta çalışan bir yapı elde etmek için, tasarım beş dalga boyu için optimize edilmiştir ve tasarım dalga boyları 100 nm artan adımlarla 1300 ile 1700 nm arasında değiştirilmiştir. Tasarım alanının boyutu x yönünde  $3.2 \mu\text{m}$  ve y yönünde  $16 \mu\text{m}$  olarak seçilmiştir ve tasarım alanı yerel dielektrik sabiti değerlerine sahip  $0.2 \mu\text{m} \times 0.2 \mu\text{m}$  büyüklüğünde kare piksellere bölünmüştür. Odak uzaklığı (f)  $11,4 \mu\text{m}$  olarak belirtilmiştir. Simülasyonlar, tasarlanan lenslerin optik özelliklerini değerlendirmek için bu çalışma için Lumerical FDTD ticari yazılımında gerçekleştirilmiştir ve simülasyon alanı, mükemmel uyumlu katmanlarla (PML) çevrelenmiştir. Geniş bant odaklamayı optimize etmek için belirtilen bant genişliği boyunca her dalga boyu için makul bir odaklanma başarısı elde etmek algoritmaya hedef olarak verilmiştir. Geniş bantta akromatik lens tasarımı için optimizasyon problemi şu şekilde güncellenmiştir:

Döngü:

$$\min_{\vec{H}_i} \left\| \nabla \times \varepsilon^{-1} \nabla \times \vec{H}_i - \mu_0 \omega_i^2 \vec{H}_i - \nabla \times \varepsilon^{-1} \vec{J}_i \right\|^2$$

$$\text{subject to } g(\vec{H}_i) = \vec{H}_i^{\text{ideal}}, i = 1, 2, 3, 4, 5 \quad (3.4)$$

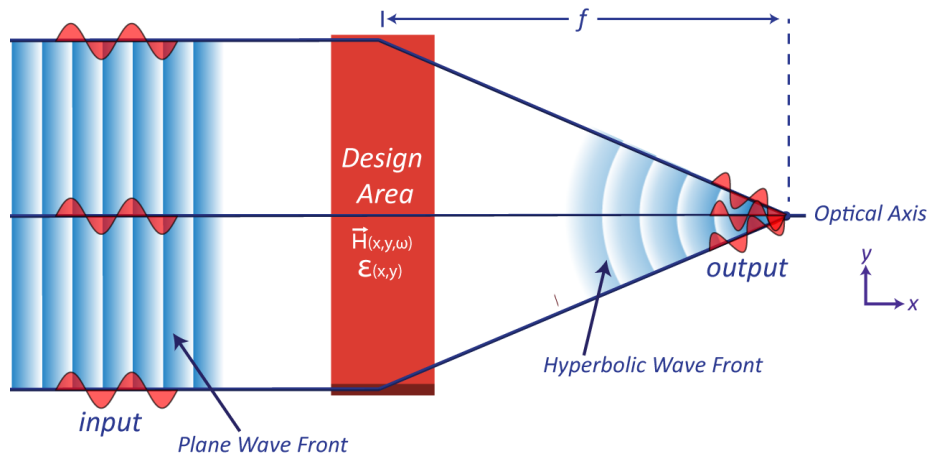
$$\min_{\varepsilon^{-1}} \sum \left\| \nabla \times (\nabla \times \vec{H}_i) \varepsilon^{-1} - \nabla \times \varepsilon^{-1} \vec{J}_i - \mu_0 \omega_i^2 \vec{H}_i \right\|^2$$

$$\text{subject to } \varepsilon_0^{-1} \leq \varepsilon^{-1} \leq \varepsilon_1^{-1}, i = 1, 2, 3, 4, 5 \quad (3.5)$$

Burada  $\mu_0$  vakum geçirgenliğidir,  $\omega_i$  i'nci dalga boyundaki frekansı temsil eder ve  $\vec{H}_i$  ve  $\vec{J}_i$  sırasıyla manyetik alan ve  $\omega_i$ 'deki uyarma akımı yoğunluğudur. 3D baskı teknolojisiyle üretim yapılabilmesi için dielektrik sabitinin alabileceği değerler olan  $\varepsilon_0, \varepsilon_1$  sırasıyla hava (1) ve PLA (2.4025) olarak ayarlanmıştır. Nicolson-Ross ve Weir yöntemi göz önünde bulundurularak PLA'nın dielektrik sabiti  $\varepsilon_{PLA} = 2.4025$  olarak alınmıştır [71]. ideal,  $\vec{H}_i^{\text{ideal}}$ , i'nci dalga boyu için istenen elektromanyetik yanıt. Odaklanma performansı için istenen elektromanyetik yanıt Hedef Öncelikli algoritmada tanımlanan fotonik sistemin sınırlarında bulunan manyetik alanlardan elde edilir. Bir TE polarizasyonlu düzlem dalga fotonik sisteme girdi olarak verilmiştir ve sistemin çıktısı Denklem (3.6)'da tanımlanan hiperbolik faz profiline sahip bir dalga olarak tanımlanmıştır.

$$\varphi_i(y) = \frac{2\pi}{\lambda_i} [f - \sqrt{y^2 + f^2}] \pmod{2\pi} \quad (3.6)$$

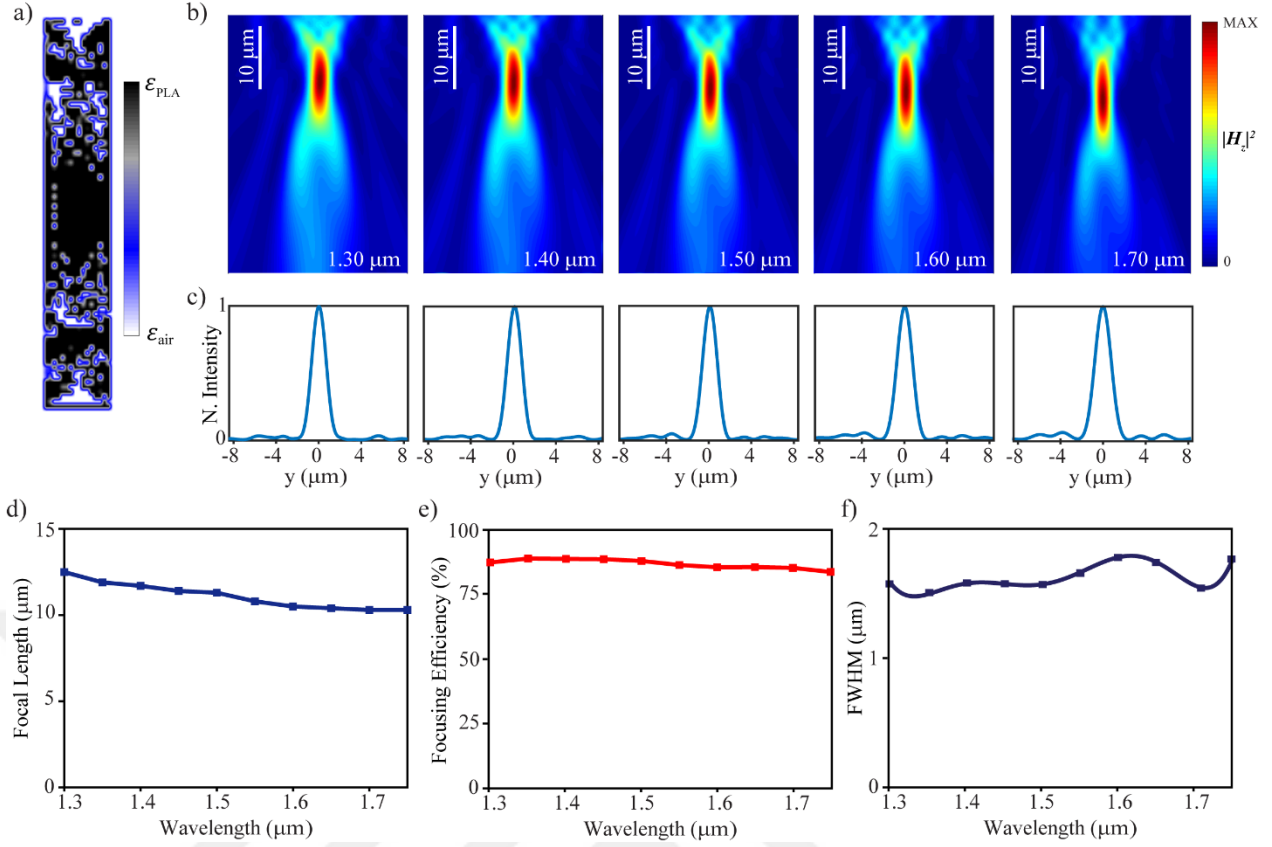
Burada  $\varphi_i$ , i'nci dalga boyu ( $\lambda_i$ ) için faz profilidir ve f odak uzaklığıdır (=11,4  $\mu\text{m}$ ). Fotonik sistemin tasarımının illüstrasyonu Şekil 3.15'te verilmiştir. Tanımlanan kısıtlamalarla, Hedef Öncelikli algoritma 10000 iterasyon için çalıştırılmıştır. Elde edilen yapı Şekil 3.16 (a) 'da sunulmuştur.



Şekil 3.15 : Lens yapısının tasarım şematığı.

İlk olarak, sayısal açıklık (NA), bant genişliği ve odaklanma verimliliği parametreleri kapsamlı bir şekilde keşfedilmek istendiği için tasarımın 2D simulasyon sonuçları elde edilmiştir. Şekil 3.16'da odak uzaklığı, odaklanma verimliliği ve hesaplanan alan şiddeti dağılımları gibi temel lens performansı ölçütleri sunulmuştur. Farklı dalga boyları için XY düzleminde hesaplanan manyetik alan yoğunlukları Şekil 3.16 (b) 'de çizilmiştir. Hedeflenen dalga boyu aralığı için odaklar dikkate alındığında, dalga boyuna bağlı sapmanın tüm bant genişliği boyunca önemli ölçüde az olduğu görülmektedir. Şekil 3.16 (c), seçilen dalga boylarında odak düzlemindeki yoğunluk profillerini göstermektedir. Bu profillere bakıldığında tüm dalga boylarındaki odak düzlemlerinde kırınımına bağlı bir bozulma olmadığı görülmektedir. Şekil 3.16 (d)'de 1300 nm ve 1750 nm dalgaboyu aralığında elde edilen lensin dalgaboyuna bağlı odak uzaklığı grafiği gösterilmiştir. Odak uzaklığı, hedeflenen dalga boyu aralığında neredeyse sabit kalmıştır. Tüm spektrumdaki maksimum fark% 9.65'tir. Odaklanma verimliliği lens üzerindeki toplam gücün bir fonksiyonu olarak değerlendirilmiştir. Hedef odak noktasının (=11,4  $\mu\text{m}$ ) yarı güçteki bant genişliği (FWHM) değerinin altı katına eşit genişlikte ve lensten f kadar uzakta bulunan bir açıklıktan ölçülmüştür [72]. Şekil 3.16 (e)'de gösterildiği gibi, odaklanma verimlilikleri dalgaboyu değişimiyle zayıf bir şekilde değişmektedir ve %80'in üzerindedir. Cihazın istenilen dalga boyu aralığında optimizasyonu sayesinde, yüksek NA için kullanılan küçük ve periyodik birim hücreler ile ilişkili verimlilik kayıpları ve tek işlevsellik sınırlamaları azaltılmıştır. Her bir dalgaboyu için FWHM odak noktasında hesaplanmıştır ve teorik sınırla ( $\frac{\lambda}{2NA}$ ) karşılaştırılmıştır. Elde edilen lenste NA 0.7 olarak hesaplanmıştır. FWHM değerleri Şekil 3.16 (f) 'de verilmiştir ve çalışma dalga boyu aralığında teorik sınırdan daha büyük olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlara dayanarak, tasarlanan lens akromatik lens tasarımları üzerine yapılan son çalışmalarla karşılaştırıldığında önemli ölçüde daha yüksek NA değeri, odaklanma verimliliği, karşılaştırılabilir bant genişliği ve odak uzunluğu sabitliğine sahiptir [73,74,75]. Bundan dolayı tasarımın başarılı, umut verici olduğu ve yüksek bir verimlilikle geniş bir frekans bandında çalışabileceği gözlenmiştir.

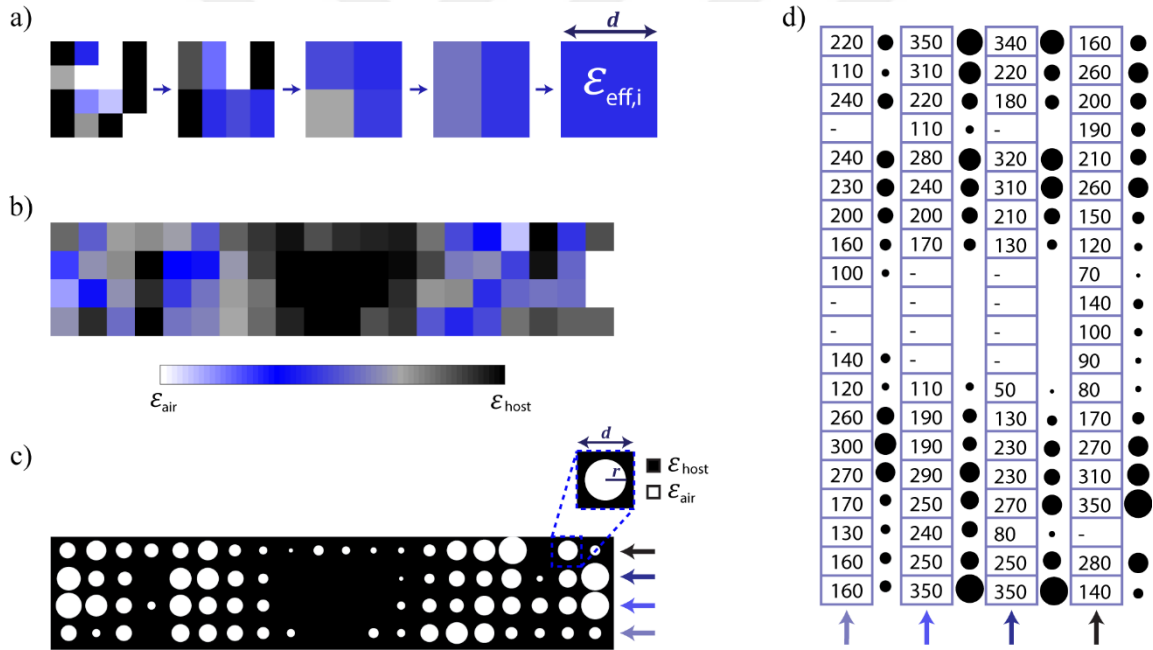




Şekil 3.16 : Lens yapısı ve başarımlı ölçütü grafikleri.

Optik eksene göre kırılma indisi dağılımı açısından herhangi bir kısıtlama olmamasına rağmen, algoritma biraz asimetrik yapı oluşturmuştur. Lensin merkez kısmı daha yüksek indisli tek tip malzemeden oluşurken, düşük indis değerleri düzensiz olarak yapının kenarlarına doğru dağıtılmıştır. Lensin karmaşık ve sürekli indis dağılımını üretilebilir hale getirmek için, elde edilen yapıya genelleştirilmiş Bruggeman EMT uygulanmıştır. Şekil 3.17 (a) 'da gösterildiği gibi, Hedef Öncelikli algoritma ile tasarlanmış sürekli lens, Genelleştirilmiş Bruggeman EMT kullanılarak sadece iki kırılma indisi değerinden oluşan bir yapı haline getirilmiştir. Bunun için ilk olarak sürekli lens, her bir hücredeki efektif dielektrik sabiti değerinin belirleneceği küçük kare hücrelere bölünmüştür. Burada üretim koşulları dikkate alınarak kare hücrenin boyutu 800 nm x 800 nm olarak seçilmiştir. Başka bir deyişle, her hücre sürekli lens yapısının 16 dielektrik sabiti değerinden oluşmaktadır. Her hücrede, sol üst köşeden başlayıp aşağıya ve ardından sağa bitişik iki dielektrik sabiti değeri seçilerek, Denklem 3.2'de verilen Bruggeman EMT ile efektif dielektrik sabiti değerleri hesaplanmıştır. Hücrenin efektif dielektrik sabiti değeri ( $\epsilon_{eff}$ ) hücredeki 16 dielektrik sabiti değerinden elde edilmiştir. Bu işlem Şekil 3.17 (a) 'da gösterilmektedir ve sonuçta ortaya çıkan lens yapısı Şekil 3.17 (b)'de gösterilmiştir.  $\epsilon_{eff}$  elde edildikten sonra, her bir hücrede

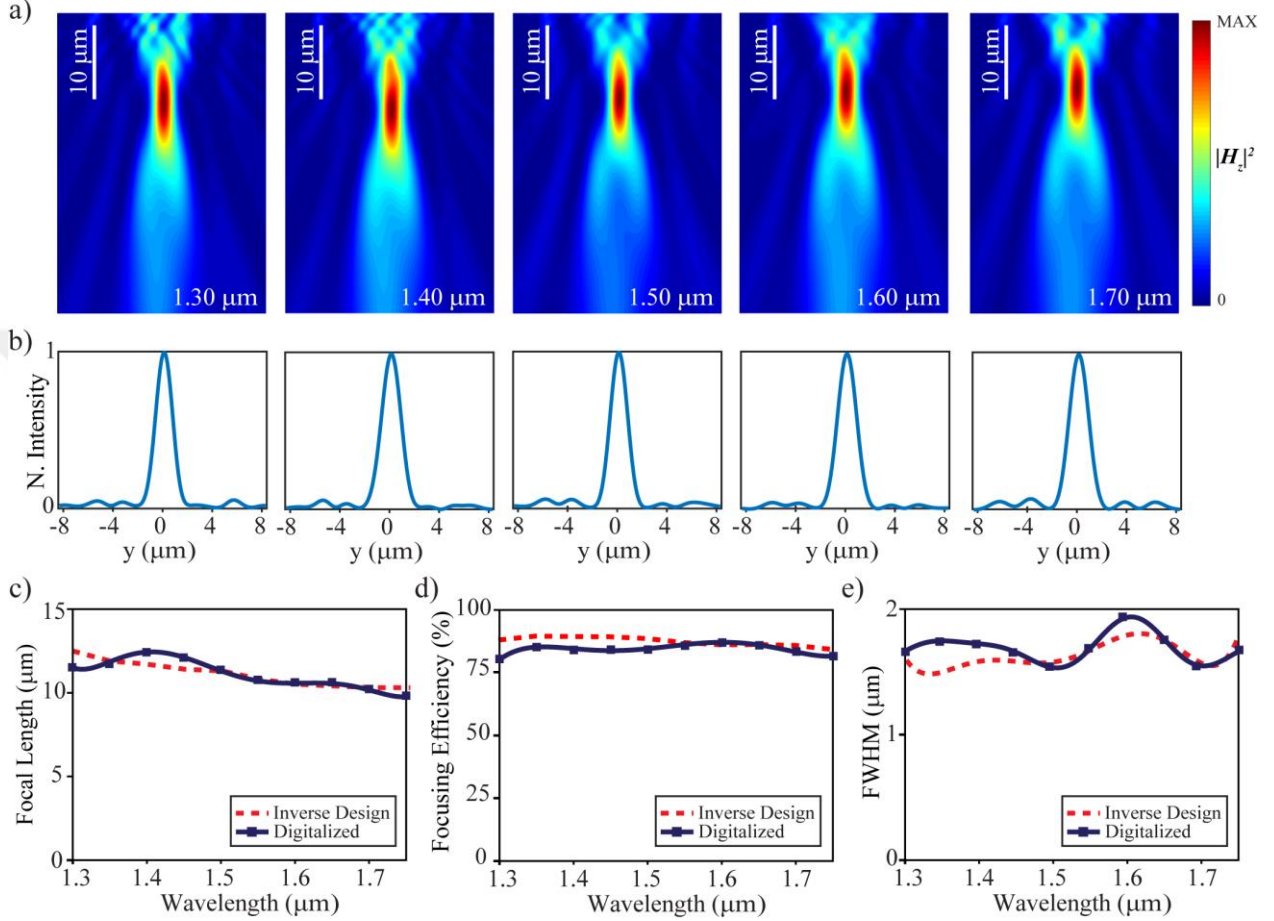
elde edilen malzemeleri taklit etmek için seçilen bir alttaş malzemesinin (PLA) merkezinde silindirik hava delikleri oluşturulmuştur. Bu delikleri oluştururken Denklem 3.3 kullanılmıştır. Ayrıca, denklemde kullanılan yapısal parametreler Şekil 3.17 (c) 'de verilmiştir. Tasarlanan iki indisli lens Şekil 3.17 (c) 'de gösterilmektedir ve her hücre için hava deliklerinin yarıçapı Şekil 3.17 (d)'de sunulmaktadır. Hava deliklerinin yarıçapı ( $r_i$ ), Şekil 3.17 (d)'de gösterildiği gibi  $\epsilon_{eff}$  dağılımı açısından değişiklik göstermektedir. Görüldüğü gibi, dielektrik sütunlardan oluşan bir yapı yaklaşımından ziyade, farklı hava hacimlerine sahip nanohollü bir yapı oluşturulmuştur. Ortaya çıkan yapıda üst üste binen hiçbir dış parça olmadığından, böyle bir yapı gerçek düz optik yapısı olarak önerilebilir. Ayrıca malzeme doldurma oranları (malzeme hacmi / birim hücre oranı) maksimum 0,6 ve minimum 0,01 olarak hesaplanmıştır.  $\epsilon_{eff}$  varyasyonunun az olması az dielektrik malzeme kullanılması dalgaboyuna bağlı odak sapmasının azalmasına yardımcı olmuştur [76].



Şekil 3.17 : Bruggeman EMT uygulaması illüstrasyonu ve elde edilen lens yapıları.

Kırılma indisi profili Şekil 3.16 (a) ve 3.17 (c)'de her bir hücrede değişiklik göstermiştir fakat buna rağmen enine yön boyunca yerel bir tekdüzelik olduğunu görülmektedir. Örneğin lensin orta bölümündeki dielektrik malzeme dağılımı gelen ışık için faz gecikmesine neden olmaktadır. Dış bölgelerdeki diğer bölümler, hava ve dielektrik malzemeleri etkin bir şekilde kümelemiştir. Dalga ön yüzü modüle

edilmiştir ve bu sayede hedeflenen odak noktasında toplanma sağlanmıştır. Işığın kırılma ve zayıf kırınım fenomenleri sayesinde lenste verimli ışık odaklaması başarılmıştır. Daha önce belirtildiği gibi, tasarımda optik eksene göre bir asimetri mevcuttur, fakat sonuç olarak lensin odak düzlemindeki yoğunluk profilleri neredeyse simetrik alan dağılımlarına sahiptir.

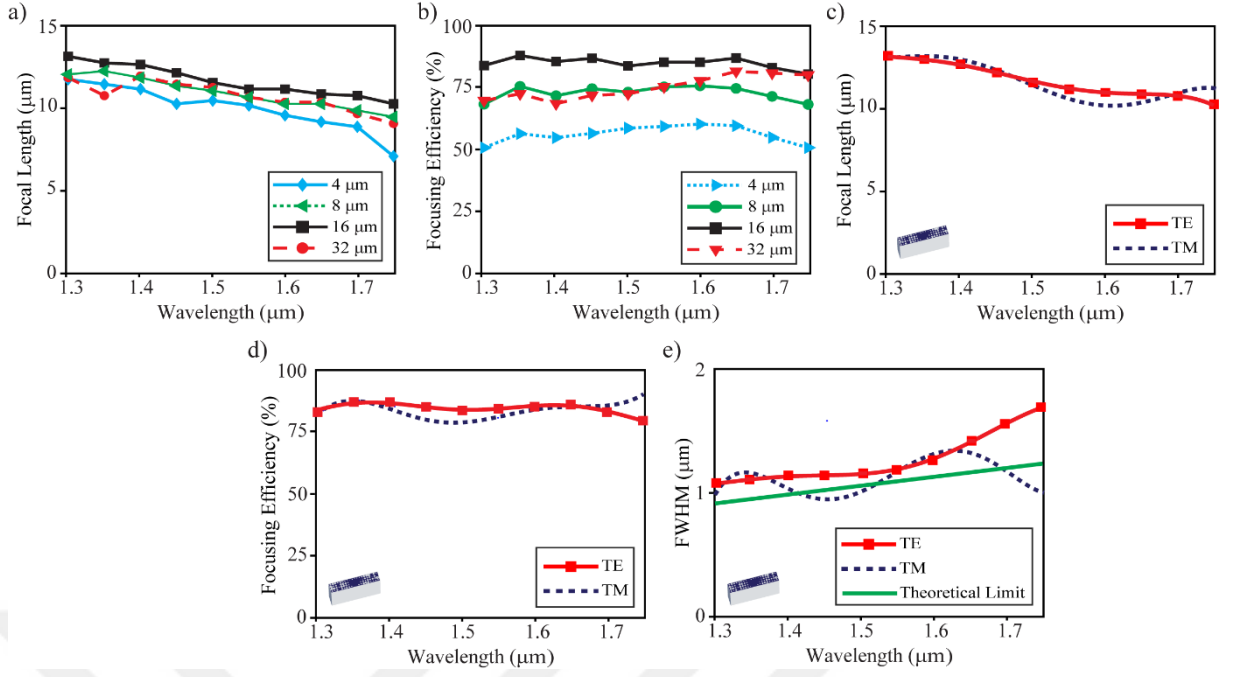


Şekil 3.18 : Bruggeman EMT ile elde edilen lens yapısının başarımlı ölçütü grafikleri.

Şekil 3.18, NA, bant genişliği ve odaklanma verimliliği parametrelerini Bruggeman EMT ile elde edilen lens için göstermektedir. Farklı dalga boyları için XY düzleminde hesaplanan manyetik alan yoğunlukları Şekil 3.18 (a) 'da çizilmiştir. Hedef öncelikli algoritma ile tasarlanmış lense karşılaştırıldığında, hedef dalga boyu aralığı için odak noktalarının çalışma bant genişliği boyunca neredeyse eşit olduğu görülebilir. Şekil 3.18 (b), odak noktasının farklı dalga boylarındaki yoğunluk profillerini göstermektedir ve buradan odak düzleminde kırınımına bağlı bir bozulma olmadığı görülmektedir. Şekil 3.18 (c), tasarım bant genişliğinden örneklenen dalga boylarında Bruggeman EMT ile elde edilen lensin odak uzunluklarını göstermektedir. Odak

uzaklığındaki sapma çok az miktardadır. Şekil 3.18 (d), hesaplanan odaklanma verimliliğinin dalga boyuna göre zayıf bir şekilde değiştiğini ve her zaman %80'in üzerinde olduğunu göstermektedir. Yani Hedef Öncelikli algoritma ile tasarlanan yapıya göre verimlilikte bir azalma olmamıştır. FWHM için sonuçlar Şekil 3.18 (e) 'de çizilmiştir. Bruggeman EMT ile elde edilen lensin FWHM değerlerinin Hedef Öncelikli algoritma ile tasarlanan lensin FWHM değerlerine çok yakın olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak, tasarlanan lenslerin performans açısından önemli ölçüde farklılık göstermediği ve Hedef Öncelikli algoritma ile tasarlanan yapının Bruggeman EMT ile başarılı bir şekilde taklit edildiği görülmüştür.

2D optimize edilen tasarımın gösterildiği üzere başarılı olmasından dolayı tasarımı 3D yapmak için sadece kalınlık optimizasyonu yapılmıştır. Lensin geniş bant performansını odak uzaklığı sabitliği ve odaklanma verimliliği olmak üzere belirleyen iki temel parametre vardır. Bu nedenle yapının kalınlık değeri 10 farklı değer için 0,25 ile 32  $\mu\text{m}$  arasında değiştirilmiştir ve odaklanma verimliliği ve sabit odak uzaklığı parametreleri ile 3 boyutlu yapının performansı değerlendirilmiştir. Dört farklı kalınlık değeri için yapının performansı Şekil 3.19'da görülebilir. 16  $\mu\text{m}$  kalınlık için, odaklama verimliliği dalga boyu değişikliği ile zayıf bir şekilde değişmiştir ve 2D performansa benzer şekilde %80'in üzerinde odaklanma verimliliği gözlenmiştir. Ayrıca odak uzaklığı değişimi, 2D lens ile benzer performans göstermiştir. Bu nedenle 16  $\mu\text{m}$  kalınlık için 2D ve 3D lenslerin performansının yaklaşık olarak aynı olduğu sonucuna varılabilir Bruggeman EMT ile elde edilen lensin geometrisi, farklı çapta hava deliklerine sahip hücrelerden oluşmuştur. Birim hücredeki deliklerin yatay ve dikey simetrisi, yapının polarizasyona karşı duyarsız olmasını sağlamıştır [77-79]. Birim hücrelerin (ve dolayısıyla oluşan lensin) küresel simetrisinin doğrudan bir sonucu olarak, polarizasyon bağımsızlığı elde edilmiştir. Şekil 3.19 (c) 'den görüldüğü gibi, odak uzaklığı hem TE hem de TM polarizasyonu için tasarım dalga boyu etrafında sabit kalmıştır ve maksimum odak kayması 1.1  $\mu\text{m}$  olarak hesaplanmıştır. Odaklanma verimliliği her zaman %75'in üzerindedir ve mutlak verimlilik %84'tür. FWHM için sonuçlar, çalışma dalga boyu aralığında hem TE hem de TM polarizasyonu için kırınım limitine yakın olarak hesaplanmıştır. Sonuç olarak, önerilen 3D lens polarizasyona duyarsız bir yapı olarak işlev gördüğü doğrulanmıştır.

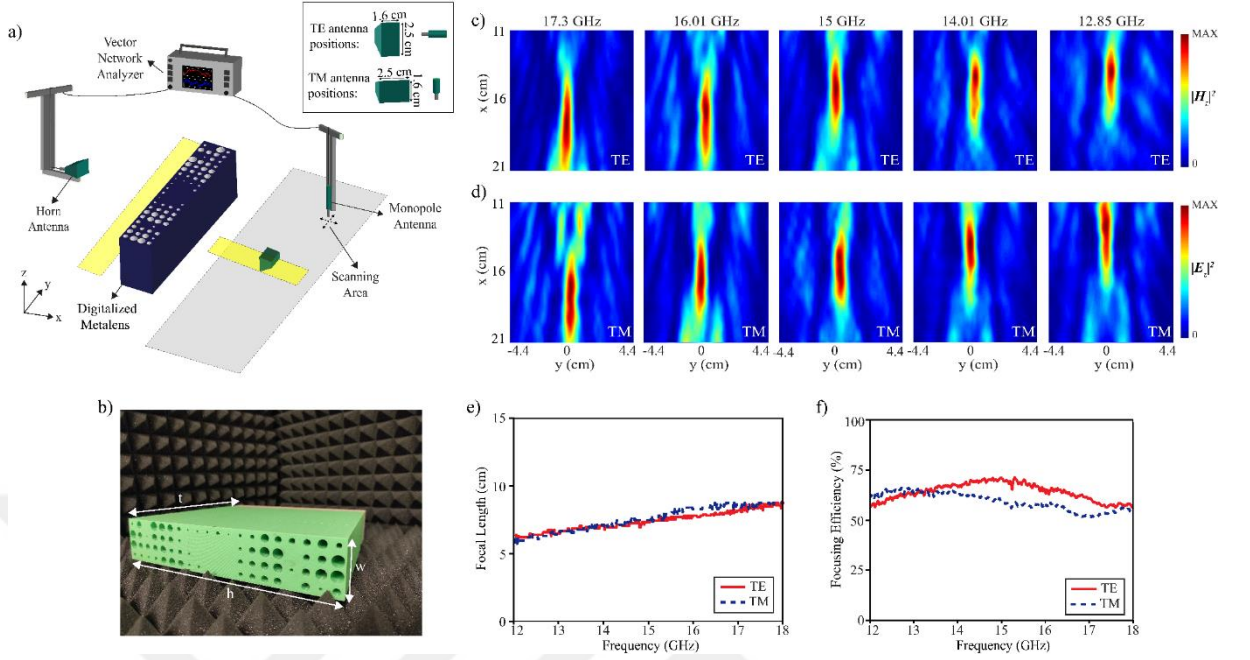


Şekil 3.19 : Bruggeman EMT ile elde edilen lens yapısının başarımlarını gösteren grafikleri.

Elde edilen sayısal sonuçları doğrulamak ve polarizasyondan bağımsız akromatik odaklanma etkisini göstermek için 12-18 GHz frekans aralığında mikrodalga deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deney düzeneğinin şematik gösterimi Şekil 3.20 (a) 'da gösterilmektedir ve bir vektör ağ analizörü (VNA), bir motorlu stand, standart kazançlı huni antenler ve bir koaksiyel tek kutuplu antenden oluşmaktadır. Agilent E5071C vektör ağ analizörü, deneyde mikrodalga jeneratör ve ölçüm cihazı olarak kullanılmıştır. Gelen dalga, açıklık boyutu 2.5 cm ve 1.6 cm olan huni anten ile elde edilmiştir. Huni anten, Gauss profilli dalganın yarı düzlemler halinde gelmesi için yapının önünden 30 cm uzağa konumlandırılmıştır. Alıcı tek kutuplu anten, elektrik ve manyetik alan dağılımlarını ölçmek için kullanılmıştır ve motorlu standda yerleştirilmiştir. Yapının arkasındaki tek kutuplu anten, z yönündeki yapısal yüksekliğin merkezi boyunca Şekil 3.20 (a) 'da gösterilen gri tarama alanını x yönü ve y yönü boyunca 2 mm ve 5 mm adımlarla taramıştır. Şekil 3.20 (a)'da gösterildiği gibi, TM polarizasyon uyumu için, huni antenin x yönündeki genişliği 2.5 cm'dir ve tek kutuplu anten Z eksenine dik şekilde tutulmuştur. TE polarizasyon uyumu için, huni antenin x yönündeki genişliği 1.6 cm'dir ve tek kutuplu anten Z eksenine paralel şekilde tutulmuştur. Verici huni anteniyle aynı olan başka bir huni anten, optik gücü ölçmek için bir alıcı olarak kullanılmıştır. Giriş gücü, Şekil 3.20 (a) 'da sarı alan ile gösterildiği gibi, sırasıyla x ve y yönlerinde 5 mm çözünürlük ve huni anten

genişliğiyle yapının önünde elde edilmiştir. Çıkış güçleri, yapının arkasındaki optik ekseninde 11 ile 21 cm arasında doğrusal aralıklı 20 noktada ölçölmüştür. Tasarlanan 3D lens, filament olarak "ESUN PLA + Silver" polilaktit (PLA) termoplastik polyester malzeme ile kaynaşık biriktirme modelleme (FDM) ile "Creality Ender 3 Pro" 3D yazıcı kullanarak üretilmiştir. PLA malzemesinin homojen dağılımını gerçekteştirmek için doğrusal dolgu deseni ve %100 dolgu yoğunluğu kullanılmıştır. PLA malzemesinin kırılma indisi, 12-18 GHz frekans aralıklarında yaklaşık 1.55'tir. Maxwell denklemlerinin ölçeklenebilirliğinden dolayı tasarımlar istenilen spektrumda gerekli düzenlemeler ile çalışabilir. Bu çalışmada deneysel yapının merkezi çalışma frekansı 15 GHz (13.330 kat büyütölmüş) olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak deneydeki yapının boyutları x, y ve z yönlerinde sırasıyla 21,4 cm, 4,3 cm ve 21,4 cm (h, w, t, sırasıyla) olarak elde edilmiştir. Üretilen yapı ve karşılık gelen yapısal parametreler şekil 3.20 (b)'de gösterilmektedir. 12–18 GHz frekans aralığındaki deneysel sonuçlar şekil 3.20'de gösterilmektedir. Odak noktası etrafında ölçölen alan yoğunluğu dağılımları, şekil 3.20 (c) ve şekil 3.20 (d)'de TE ve TM polarizasyonları için sırasıyla verilmiştir. Odak uzunluğundaki değişim şekil 3.20 (e) 'de görölebilir. Mikrodalga bölgesinde odak uzunluğundaki maksimum değişim yaklaşık olarak 5 cm'ye eşitir. Bu değişim 3D sayısal sonuçları göz önünde bulundurularak mikrodalga bölgesi için hesaplandığında 4.26 cm'dir. İki değerin birbirine yakın olması nedeniyle renk sapması düzeltme bağlamında deneysel sonuçları kabul edilebilir bir başarıya ulaşmıştır. Deneyde TE ve TM polazarizasyonlarına bağlı odak ölçüm değerlerinde elde edilen maksimum fark 16.4 GHz için %4'tür. Bu farkın nedeni de tek kutuplu antenin hafif yanlış hizalanmasıyla ilgili olabilecek durumlardan kaynaklanabilir. 15 GHz tasarım frekansındaki odak mesafesi TE için 15 cm ve TM polarizasyonu için 15,5 cm olarak ölçölmüştür. Deneysel olarak ölçölen NA değerlerinin TE ve TM polarizasyonları için sırasıyla 0.71 ve 0.69'a eşit olduğu dikkat çekmiştir. Kısaca sayısal sonuçlar ve deneysel ölçömler birbiriyle uyumlu olarak elde edilmiştir. Ölçölen odaklanma verimliliği değerleri şekil 3.20 (f)'de görölebilir. Verimlilik, yapının arkasındaki optik ekseninde x yönünde huni antenin 11 ile 21 cm arasında hareket ettirilmesi ve ölçölen çıkış gücü değerlerinin ortalamasının, ortalama giriş gücü değerlerine bölünmesi ile hesaplanmıştır. TE polarizasyonu için minimum verimlilik %58 ve maksimum verimlilik %74, TM polarizasyonu için minimum verimlilik %53 ve maksimum verimlilik %66 ve ortalama odaklanma verimliliği %62 olarak hesaplanmıştır. Ek olarak, tasarlanan lenste fabrikasyon uyumluluğu için nispeten

büyük minimum yapı boyutları (mikrodalga rejiminde 0,67 mm) uygulanmıştır. Daha hassas üretim ve yapı boyutları ile de verimlilik artırılabilir.



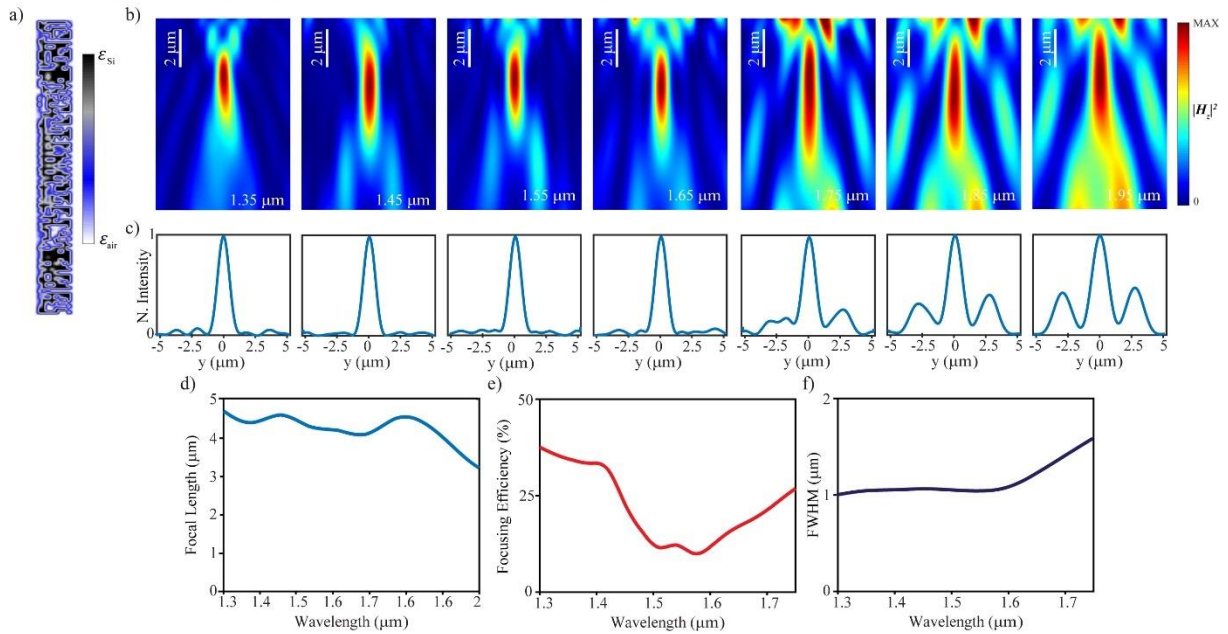
Şekil 3.20 : Üretilen lens, deney düzeneğinin şematik görünümü ve sonuçlar.

### 3.3.2 Yüksek Kırılma İndisli Geniş Bant, Akromatik ve Polarizasyona Duyarsız Lens Tasarımı

Tezin bu bölümünde Silikon malzemesi baz alınarak lens tasarımı üzerinde çalışılmıştır. Silikon malzemesinin baz alınmasının nedeni, Silikon ile oluşturulan fotonik cihazların üretiminin mevcut yarı iletken üretim teknikleri kullanılarak yapılabilmesidir. Çoğu entegre devre için alt tabaka olarak silikon kullanıldığı için optik ve elektronik bileşenlerin tek bir cihaza entegre edildiği hibrit cihazlar oluşturmayı da mümkün kılar [80]. IBM ve Intel dahil birçok elektronik üreticisi ve akademik araştırma grupları tarafından aktif olarak araştırılmaktadır [81,82].

Hedef Öncelikli algoritma kullanılarak 1300-2000 nm dalgaboyu aralığında Enine Elektrik (TE) ve Enine Manyetik (TM) polarizasyonları odaklayabilen akromatik lensler tasarlanmıştır ve incelenmiştir. Geniş bantta çalışan bir yapı elde etmek için, tasarım yedi dalga boyu için optimize edilmiştir ve tasarım dalga boyları 100 nm artan adımlarla 1300 ile 2000 nm arasında değiştirilmiştir. Tasarım alanının boyutu x yönünde 0.8  $\mu\text{m}$  ve y yönünde 9.6  $\mu\text{m}$  olarak seçilmiştir ve tasarım alanı yerel dielektrik sabiti değerlerine sahip 0.1  $\mu\text{m}$  x 0.1  $\mu\text{m}$  büyüklüğünde kare piksellere

bölünmüştür. Odak uzaklığı ( $f$ )  $4.4 \mu\text{m}$  olarak belirtilmiştir. Simülasyonlar, tasarlanan lenslerin optik özelliklerini değerlendirmek için bu çalışma için Lumerical FDTD ticari yazılımında 3 boyutlu olarak gerçekleştirilmiştir ve simülasyon alanı, PML ile çevrelenmiştir. Geniş bant odaklamayı optimize etmek için belirtilen bant genişliği boyunca her dalga boyu için makul bir odaklanma başarısı elde etmek algoritmaya hedef olarak verilmiştir. Geniş bantta akromatik lens tasarımı için optimizasyon problem Denklem (3.4) ve Denklem (3.5)'teki gibi kullanılmıştır. Bir TE polarizasyonlu düzlem dalga fotonik sisteme girdi olarak verilmiştir ve sistemin çıktısı Denklem (3.6)'da tanımlanan hiperbolik faz profiline sahip bir dalga olarak tanımlanmıştır. Tanımlanan kısıtlamalarla, Hedef Öncelikli algoritma 10000 iterasyon için çalıştırılmıştır. Elde edilen yapı Şekil 3.21 (a) 'da sunulmuştur.



Şekil 3.21 : Silikon bazlı lens yapısı ve başarımlar ölçütü grafikleri.

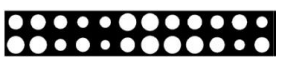
Tasarımın 3D simülasyon sonuçları ve başarımlar ölçütü grafikleri Şekil 3.21'de verilmiştir. Simülasyonlarda tasarımın kalınlığı optik litografide standart bir kalınlık olan  $220 \text{ nm}$  olarak seçilmiştir. Farklı dalga boyları için XY düzleminde hesaplanan manyetik alan yoğunlukları Şekil 3.21 (b)'de çizilmiştir. Şekil 3.21 (c), seçilen dalga boylarında odak düzlemindeki yoğunluk profillerini göstermektedir. Bu profillere bakıldığında uzun dalga boyları için odak düzlemlerinde kırınımına bağlı bir bozulma olduğu görülmektedir. Şekil 3.21 (d)'de  $1300 \text{ nm}$  ve  $2000 \text{ nm}$  dalgaboyu aralığında elde edilen lensin dalgaboyuna bağlı odak uzaklığı grafiği gösterilmiştir. Hedeflenen dalga boyu aralığında maksimum odak uzaklığı farkı  $0.9 \mu\text{m}$ 'dir. Şekil 3.21 (e)'de

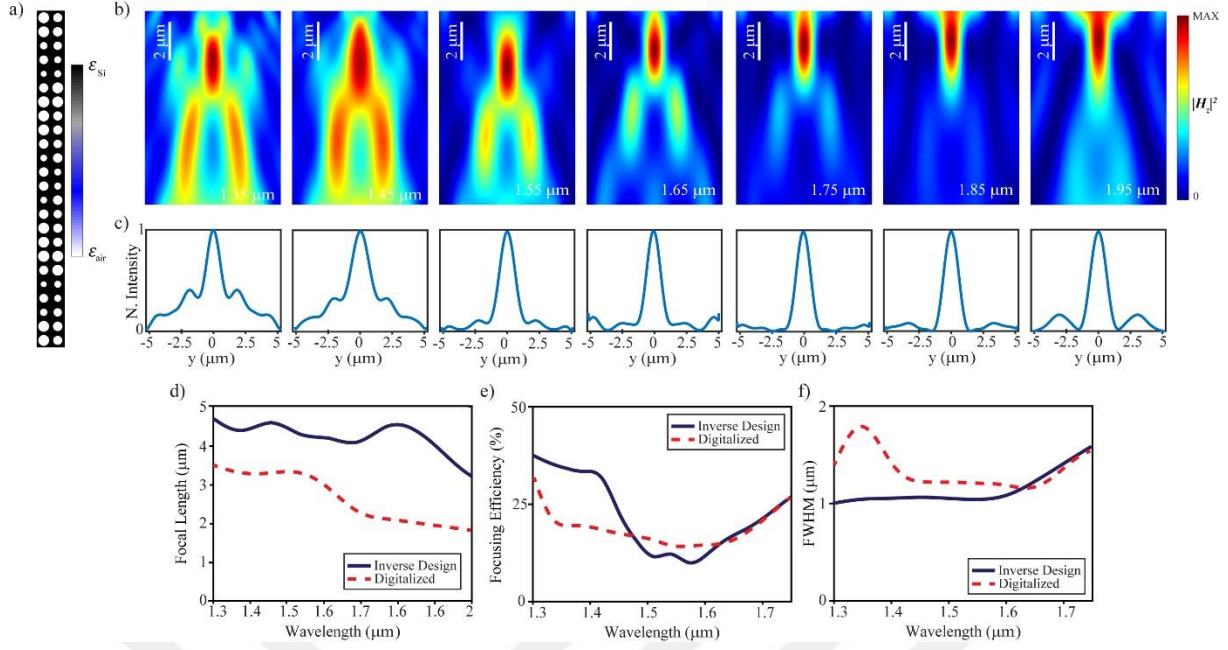


gösterildiği gibi, odaklanma verimlilikleri dalgaboyu değişimiyle değişmektedir ve ortalama %22.5'tur. Elde edilen lenste NA 1.09 olarak hesaplanmıştır. Silikonun yüksek kırılma indisi sayesinde yüksek bir NA'ya sahip lens elde edilmiştir. FWHM değerleri Şekil 3.16 (f)'de çizilmiştir ve çalışma dalga boyu aralığında teorik sınırdan ortalama 0.04  $\mu\text{m}$  daha büyük olarak hesaplanmıştır. Tasarlanan lens akromatik lens tasarımları üzerine yapılan son çalışmalarla karşılaştırıldığında önemli ölçüde daha yüksek NA değeri, yüksek bant genişliği ve odak uzunluğu sabitliğine sahiptir [73-75]. Bundan dolayı tasarımın başarılı, umut verici olduğu ve geniş bir frekans bandında çalışabileceği gözlenmiştir.

Lensin karmaşık ve sürekli indis dağılımını üretilebilir hale getirmek için, elde edilen yapıya genelleştirilmiş Bruggeman EMT uygulanmıştır. Bu teorinin yapıya nasıl uygulandığı tezin 3.2.1.2 ve 3.3.1'inci kısımlarında ayrıntılı olarak verilmiştir. Her bir kare hücrenin boyutu 400 nm x 400 nm olarak seçilmiştir. Teori uygulandıktan sonra her bir hücrede elde edilen malzemeleri taklit etmek için seçilen bir alttaş malzemesinin (Si) merkezinde silindirik hava delikleri oluşturulmuştur. Bu delikleri oluştururken Denklem 3.3 kullanılmıştır. Yapılan denemeler sonucunda yapının merkezinden x eksenine göre ayna simetrisi alındığında daha iyi odaklama performansı elde edilmiştir. Bundan dolayı yapı ayna simetrisi ile oluşturulmuştur. Sonuçta ortaya çıkan lens yapısı Şekil 3.22 (a)'da gösterilmiştir ve yapının merkezinin üstünde kalan kısımdaki her hücre için hava deliklerinin yarıçapı Çizelge 3.4'te sunulmaktadır. Ayrıca malzeme doldurma oranları (malzeme hacmi / birim hücre oranı) maksimum 0,93 ve minimum 0,47 olarak hesaplanmıştır. Ek olarak, hava deliklerinin yarıçapları 60-165 nm arasında değiştiğinden ve yapının kalınlığı 220 nm olduğundan dolayı, elde edilen lensin üretimi endüstri standardı optik litografi ile yapılabilir [83].

Çizelge 3.5: Lensteki ilk 24 hücre için hesaplanan yarıçap değerleri (nm).

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



Şekil 3.22 : Bruggeman EMT ile elde edilen Silikon bazlı lens yapısı ve başarımlı ölçütü grafikleri.

Şekil 3.22, başarımlı ölçütü parametrelerini Bruggeman EMT ile elde edilen yüksek kırılma indisli lens için göstermektedir. Farklı dalga boyları için XY düzleminde hesaplanan manyetik alan yoğunlukları Şekil 3.22 (b)'de çizilmiştir. Hedef öncelikli algoritma ile tasarlanmış lensle karşılaştırma yapıldığında, hedef dalga boyu aralığı için odak noktalarının öne kaydığı görülebilir. Bu durumda Şekil 3.22 (d)'deki dalga boyuna bağlı odak uzaklığı grafiğine bakıldığında lensin odağının  $2.6 \mu m$ 'ye kaydığı görülebilir. Hedef öncelikli algoritma ile elde edilen yapıya göre odağın kaymasının nedeni  $0-12.25$  arasındaki dielektrik sabiti değerlerine Bruggeman EMT ile yaklaşık olarak ulaşılabilmektedir. Kısım 3.3.1'de verilen düşük kırılma indisli yapıda  $0-2.4025$  arasındaki dielektrik sabiti değerleri için Bruggeman EMT uygulanmış, dielektrik sabiti uzayı daha küçük olduğu için bu teori ile Hedef öncelikli algoritma ile tasarlanan yapıya daha yakın performansta bir yapı elde edilmiştir.

Elde edilen yeni lenste NA  $1.85$  olarak hesaplanmıştır. Literatürdeki çalışmalara bakıldığında ise hesaplanan NA değeri bilinen en yüksek NA değerlerine göre %25 daha fazladır [84,85]. Elde edilen yeni lenste maksimum odak uzaklığı farkı  $1.2 \mu m$ 'dir. Şekil 3.22 (c), odak noktasının farklı dalga boylarındaki yoğunluk profillerini göstermektedir. Bu profillere bakıldığında Hedef Öncelikli algoritma ile yapılan tasarımın aksine kısa dalga boyları için odak düzlemlerinde kırınımına bağlı bir bozulma olduğu görülmektedir. Bruggeman EMT ile oluşturulan lensin yüzeyinin yapısındaki

silikon hava geçişinin keskin olması nedeniyle yüzey sonlandırması oluşur. Yüzey sonlandırmasının görüntü özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu literatürde açıklanmıştır [86-89]. Yüzey sonlandırması etkisinden dolayı iki yapının fotonik bant yapısı birbirinden farklıdır, bu da alan profillerinde farklı sonuçlara neden olmuştur. Şekil 3.22 (e), hesaplanan odaklanma verimliliğinin dalga boyuna göre zayıf bir şekilde değiştiğini göstermektedir ve hesaplanan odaklanma verimliliği ortalama %18.3'tür. Yani Hedef Öncelikli algoritma ile tasarlanan yapıya göre verimlilikte %4.2 oranında bir azalma olmuştur. FWHM için sonuçlar Şekil 3.22 (f)'de çizilmiştir. Bruggeman EMT ile elde edilen lensin FWHM değerlerinin Hedef Öncelikli algoritma ile tasarlanan lensin FWHM değerlerine çok yakın olduğunu göstermektedir. Fakat NA değeri çok yüksek olduğu için teorik sınırdan ortalama 0.9  $\mu\text{m}$  daha büyük olarak hesaplanmıştır. Sonuç olarak, tasarlanan lensler performans açısından odak uzaklığı ve NA değeri için farklılıklar göstermiştir. Lenslerde dalgaboyuna bağlı maksimum odak uzaklığı farkları 0.9  $\mu\text{m}$  ve 1.2  $\mu\text{m}$ 'dir. Odak kaymış olsa da toplamdaki odak değişiminin iki lens için birbirine yakın olduğu görülmektedir. Tasarımdaki amaç dalgaboyuna bağlı olarak odak değişimini azaltmak olduğu için tasarlanan lenslerin birbirini akromatiklik başarısı ölçütüyle taklit ettiği görülebilir. Ek olarak elde edilen lensin NA değerinin çok yüksek olması da tarama ve görüntüleme için geleneksel lenslere kıyasla rekabetçi bir şekilde performans gösterebilir ve Silikondan oluştuğu için CMOS uyumludur.



#### 4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tezde farklı amaçlara yönelik fotonik cihazların tersine tasarımı için Parçacık Sürü Optimizasyonu, Hedef Öncelikli algoritma ve Yapay Sinir Ağları kullanılmıştır. Hesaplama tabanlı yaklaşımlarla yapılan tersine tasarımlar son yıllarda oldukça popülerdir ve bu alanın gittikçe popülerleşmesi de beklenmektedir.

Bu tezin birinci bölümünde geleneksel tasarım ve tersine tasarım kavramları anlatılmış, tersine tasarımın önemi ve avantajları konusu özetlenmiştir.

İkinci bölümde ise tersine tasarımda kullanılan algoritmalar detaylı bir şekilde anlatılmıştır.

Tezin üçüncü bölümünde sunulan algoritmalarla tasarlanan yapılar anlatılmıştır. Bu yapılar yansıma önleyici katman tasarımları, optik bölücü tasarımları ve geniş bantta çalışan akromatik lens tasarımları olmak üzere üç ana başlıkta toplanmışlardır. Tasarlanan yapıların başarımlarını ölçtü grafiklerine ayrıntılı olarak yer verilmiştir ve literatürdeki yapılar ile karşılaştırılmışlardır. Ek olarak, PLA malzemesi kullanılarak 3D baskı ile üretilen lens yapısının mikrodalga frekanslarında deneyi yapılmıştır ve sonuçları paylaşılmıştır.

Sonuç olarak, tersine tasarım için üç farklı algoritma kullanılmıştır ve bu algoritmalarla farklı amaçlar için fotonik cihazlar tasarlanmıştır. Tersine tasarım yönteminin izlenmesi daha kompleks ve birden fazla amacı hedefleyen yapılarda geleneksel yöntemle tasarlanan yapılara göre daha iyi performans sağlamıştır. Örneğin Çok Amaçlı PSO ile tasarlanan piramit yapıları yansıma önleyici katman ile 300 nm ve 1100 nm arasında literatürdeki geleneksel tasarımlı katmanlara göre daha yüksek bir kısa devre akımı ( $33.52 \frac{mA}{cm^2}$ ) elde edilmiştir. Ek olarak, Hedef Öncelikli algoritma ile tasarlanan yüksek kırılma indisli Si lenste ise 1300 nm ve 2000 nm arasında akromatik odaklanma başarılmış ve literatürdeki en yüksek NA değeri (1.85) elde edilmiştir. Son olarak, YSA kullanılarak belirlenen açıda hem TE hem TM polarizasyon için ışın ayırma hedefi başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir.

Yeni algoritmaların keşfedilmesi ve fotonik yapıların tasarımında kullanılması ile beraber yüksek performanslı ve daha küçük boyutlu fotonik cihaz tasarımlarının

literature kazandırılması sağlanmaktadır. Her geçen gün bu konularda yapılan çalışmalar artmaktadır ve gelişmektedir. Çok fazla algoritma arasından seçim yapmak zor olduğunda, yapılan çalışmalardaki benzer problemler referans olarak alınabilir.

Genetik algoritmalar belirli bir sağlamlığa ve güçlü evrim veya arama yeteneğine sahiptir. PSO, sistemin parametrelerini etkin bir şekilde optimize edebilen optimum çözüme yaklaşma konusunda hızlı bir hıza sahiptir ve yapılan işlem basit ve anlaşılması kolaydır. PSO'nun avantajı, sürekli problemlere uygulanabilmesidir. Bu yöntemin dezavantajı, yüksek parametreler gerektirmesidir. Parametre hassasiyeti, dikkat edilmesi gereken bir sorundur çünkü yanlış seçim, sonraki hesaplamaların zaman maliyetini ve karmaşıklığını artırır. Parametreler doğru ayarlanmadıysa, çözüm hızı çok yavaş ve çözümün kalitesi zayıf olur. Bu durumda uzun bir arama süresi ve büyük miktarda hesaplama gerektirir, bu da genel çözüm için uzun bir süreye yol açar. Karmaşık çoklu optimal değer arama problemleriyle uğraşırken erken yakınsama üretmek kolaydır ve yerel optimizasyon yeteneği zayıftır. PSO, temel olarak arama alanındaki çeşitlilik kaybından kaynaklanan yerel minimuma düşer. Diğer algoritmalarla birleştirilerek veya mutasyon işlemleri eklenerek geliştirilmesi mümkündür. PSO, nanoyapıları optimize etmek ve nanofotonik cihazları tasarlamak için literatürde çok fazla kullanılmıştır. Çok amaçlı problemleri optimize etmek için kullanılabilir.

Hedef-öncelikli algoritma tabanlı tersine tasarım yöntemi, nanofotonik cihazları otomatik olarak tasarlayabilir ve yalnızca kullanıcının yüksek seviyeli parametreleri girmesini gerektirir. Bu yöntem, üretilebilir cihazların tam alan parametrelerini kullanarak büyük parametre alanı sağlayabilir ve cihazlar tasarlayabilir, bu da genellikle verimsel algortimalardan daha az simülasyon gerektirir, çünkü minimumlarını bulmak için parametrik taramaya veya rastgele bozulmalara güvenmezler. Bu yöntem, herhangi bir pasif, doğrusal fotonik cihazı tasarlamak için kullanılabilir. Bununla birlikte, uygulanan tasarım genellikle sürekli bir arazi sunar ve tersine tasarım süreci sırasında bazı çok küçük yapısal bileşenler oluşturulabilir, bu da üretimde zorluk çıkarır. Ek olarak, hedef-öncelikli algoritma tabanlı tersine tasarım yöntemi genellikle yalnızca yerel optimal çözümler üretir ve gerçek global optimal çözümü gerçekleştirmez.

Geleneksel tasarım yöntemiyle karşılaştırıldığında, akıllı algoritma evrensel ve etkilidir. Örneğin, derin öğrenmenin avantajları, eğitildikten sonra geleneksel algoritmalarından daha az zaman alması (yani daha az hesaplama maliyeti) ve daha iyi optimizasyon çözümleri bulma olasılığının daha yüksek olmasıdır. Ek olarak, geleneksel algoritmalarla karşılaştırıldığında, derin öğrenme yöntemi tersine tasarımı daha kolay gerçekleştirebilir. YSA birçok tipik yapıya ve güçlü bir esnekliğe sahiptir. Problemin tasarım gereksinimlerine ve eğitim sürecindeki birçok soruna göre, optimum tasarım için uygun sinir ağı seçilebilir. YSA'nın dezavantajlarından birincisi, nanofotonik cihazların tasarımı konveks değildir ve tasarlanan cihazların optimal olduğunun garantisi yoktur. İkincisi, eğitim setlerini hazırlamak ve sinir ağlarını eğitmek, özellikle karmaşık öğrenme görevleriyle uğraşırken çok fazla bilgi işlem ve zaman maliyeti gerektirir. Üçüncüsü, YSA'nın öğrenme mekanizmaları kara kutular olarak çalıştığı için eğitilmiş sinir ağlarını kullanarak daha fazla analiz yapmak zordur. Dördüncüsü, değişen durumlarla başa çıkmak için daha güçlü bir öğrenme kapasitesi gereklidir. Son olarak, az eğitim örneği olması durumunda, geleneksel yöntemler derin öğrenme yöntemlerinden daha iyi performans gösterebilir.

Tersine tasarımda kullanılacak algoritma seçiminde hesaplama maliyeti ve buna bağlı olarak da süre problemleri ortaya çıkmaktadır. Farklı cihazların tersine tasarımı için birçok algoritma ve teknik mevcuttur. Sürekli artan hesaplama gücü seviyeleri ve üretim tekniklerindeki gelişmeler nedeniyle yüksek performanslı cihazlar tasarlanabilmektedir. Yerel, küresel, tek veya çok amaçlı algoritmaların tümü nanofotonik tersine tasarım problemlerine fayda sağlayabilir. En uygun algoritmanın seçimi için hesaplama maliyeti ve nanofotonik problemin karmaşıklığı göz önünde bulundurulmalıdır.





## KAYNAKLAR

- [1] **K.,Lee, M.,Samoc, P.N.,Prasad,** *Comprehensive Polymer Science and Supplements*, Polymers for Photonic Applications (Sf. 407-447), Amsterdam, Pergamon, (1989).
- [2] **Li, A., Singh, S., Sievenpiper, D.,** (2018). Metasurfaces and their applications, *Nanophotonics*, 7(6), 989-1011.
- [3] **Lezec, H.J., Dionne, J.A., Atwater, H.A.,** (2007). Negative refraction at visible frequencies, *science*, 316(5823), 430-432.
- [4] **Krauss, T.F.** (2008). Why do we need slow light?, *Nature photonics*, 2(8), 448-450.
- [5] **Chen, J., Zhang, Q., Peng, C., Tang, C., Shen, X., Deng, L., Park, G.S.,** (2018). Optical cavity-enhanced localized surface plasmon resonance for high-quality sensing, *IEEE Photonics Technology Letters*, 30(8), 728-731.
- [6] **Fleury, R., Alu, A.,** (2013). Enhanced superradiance in epsilon-near-zero plasmonic channels, *Physical Review B*, 87(20), 201101.
- [7] **Dong, J.W., Chen, X.D., Zhu, H., Wang, Y., Zhang, X.,** (2017). Valley photonic crystals for control of spin and topology, *Nature materials*, 16(3), 298-302.
- [8] **Shrestha, S., Overvig, A.C., Lu, M., Stein, A., Yu, N.,** (2018). Broadband achromatic dielectric metalenses, *Light: Science & Applications*, 7(1), 1-11.
- [9] **Back T., Hammel, U., Schwefel, H.P.,** (1997) Evolutionary computation: comments on the history and current state, *IEEE Trans. Evol. Comput.*, 1(1):3–17.
- [10] **Fu, M.C., Glover, F.W., April, J.,** (2005). Simulation optimization: a review, new developments, and applications, *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, December 4, Orlando, FL, USA.
- [11] **Back T., Hammel, U., Schwefel, H.P.,** (1997) Evolutionary computation: comments on the history and current state, *IEEE Trans. Evol. Comput.*, 1(1):3–17.
- [12] **J.,Kennedy, R.C.,Eberhart,** *Swarm Intelligence*, 1st Edition, San Francisco, Morgan Kaufmann Publishers, (2001).
- [13] **Back T., Hammel, U., Schwefel, H.P.,** (1997) Evolutionary computation: comments on the history and current state, *IEEE Trans. Evol. Comput.*, 1(1):3–17.
- [14] **Talukder, S. (2011).** *Mathematical Modelling and Applications of Particle Swarm Optimization* (yüksek lisans tezi). Adres: <https://www.semanticscholar.org/paper/Mathematical-Modelling-and-Applications-of-Particle-Talukder/9f42fc95242171d6b919013a9711f5881dee356c/>
- [15] **Ma, L., Li, J., Liu, Z., Zhang, Y., Zhang, N., Zheng, S., Lu, C.,** (2021). Intelligent algorithms: new avenues for designing nanophotonic devices, *Chinese Optics Letters*, 19(1), 011301.

- [16] **Eberhart, R. C., Shi, Y.**, (1998) Comparison between genetic algorithms and particle swarm optimization, *International conference on evolutionary programming* (pp. 611-616), Berlin, Heidelberg, Mart.
- [17] **Kennedy, J., Eberhart, R.C.**, (1995) Particle swarm optimization, *Proceedings of the 1995 IEEE International Conference on Neural Networks* (pp. 1942–1948), Piscataway, New Jersey.
- [18] **R.C.,Eberhart, R.,Dobbins, P.K.,Simpson**, *Computational Intelligence PC Tools*, San Francisco, Academic Press Professional Inc., (1996).
- [19] **A.P.,Engelbrecht**, *Computational intelligence: an introduction*, San Francisco, John Wiley & Sons, (2007).
- [20] **Y.,Liu, A.,Sun, H.T.,Loh, W.F.,Lu, E.P.Lim**, *Advances of computational intelligence in industrial systems*, Vol.116, Springer, (2008).
- [21] **Toscano, G.** (2005). *On the use of self-adaptation and elitism for multiobjective particle swarm optimization* (doktora tezi).
- [22] **Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., Meyarivan, T. A. M. T.**, (2002) A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE transactions on evolutionary computation*, 6(2), 182-197.
- [23] **Reyes-Sierra, M., & Coello, C. C.**, (2006) Multi-objective particle swarm optimizers: A survey of the state-of-the-art. *International journal of computational intelligence research*, 2(3), 287-308.
- [24] **Deb, K., Goldberg, D.E.**, (1989) An investigation of niche and species formation in genetic function optimization., *Proceedings of the third international conference on Genetic algorithms* (pp. 42-50), December.
- [25] **Goldberg, D.E., Richardson, J.**, (1987) Genetic algorithms with sharing for multimodal function optimization., *Genetic algorithms and their applications: Proceedings of the Second International Conference on Genetic Algorithms* (pp. 41-49), Hillsdale, NJ, July.
- [26] **C.A.C.,Coello, G.B.,Lamont, D.A.,Van Veldhuizen**, *Evolutionary algorithms for solving multi-objective problems*, Vol. 5, (Sf. 79-104), New York, Springer, (2007).
- [27] **Laumanns, M., Thiele, L., Deb, K., Zitzler, E.**, (2002) ). Combining convergence and diversity in evolutionary multiobjective optimization. *Evolutionary computation*, 10(3), 263-282.
- [28] **Shi, Y., Eberhart, R.C.**, (1998) Parameter selection in particle swarm optimization., *International conference on evolutionary programming* (pp. 591-600), Berlin, Heidelberg, Mart.
- [29] **Shi, Y., Eberhart, R.C.**, (1999) Empirical study of particle swarm optimization., *Proceedings of the 1999 congress on evolutionary computation-CEC99* (pp. 1945-1950), Washington, USA, 6-9 Temmuz.
- [30] **Zheng, Y.L., Ma, L.H., Zhang, L.Y., Qian, J.X.**, (2003) On the convergence analysis and parameter selection in particle swarm optimization, *Proceedings of the 2003 International Conference on Machine Learning and Cybernetics (IEEE Cat. No. 03EX693)* (Vol. 3, pp. 1802-1807). IEEE, Xi'an, China, 5 Kasım.

- [31] **Lu, J., Vučković, J.,** (2013) Nanophotonic computational design, *Optics express*, 21(11), 13351-13367.
- [32] **Lu, J., Vučković, J.,** (2012) Objective-first design of high-efficiency, small-footprint couplers between arbitrary nanophotonic waveguide modes, *Optics express*, 20(7), 7221-7236.
- [33] **Callewaert, F., Butun, S., Li, Z., Aydin, K.,** (2016) Inverse design of an ultra-compact broadband optical diode based on asymmetric spatial mode conversion, *Scientific reports*, 6(1), 1-10.
- [34] **Callewaert, F., Velez, V., Jiang, S., Sahakian, A.V., Kumar, P., Aydin, K.,** (2018) Inverse-designed stretchable metalens with tunable focal distance. *Applied Physics Letters*, 112(9), 091102.
- [35] **Piggott, A.Y., Lu, J., Lagoudakis, K.G., Petykiewicz, J., Babinec, T.M., Vučković, J.,** (2015) Inverse design and demonstration of a compact and broadband on-chip wavelength demultiplexer, *Nature Photonics*, 9(6), 374-377.
- [36] **Piggott, A.Y., Lu, J., Babinec, T.M., Lagoudakis, K.G., Petykiewicz, J., Vučković, J.,** (2014) Inverse design and implementation of a wavelength demultiplexing grating coupler, *Scientific reports*, 4(1), 1-5.
- [37] **Molesky, S., Lin, Z., Piggott, A.Y., Jin, W., Vucković, J., Rodriguez, A.W.,** (2018) Inverse design in nanophotonics, *Nature Photonics*, 12(11), 659-670.
- [38] **Grant, M., Boyd, S.,** (2014) CVX: Matlab software for disciplined convex programming, version 2.1.
- [39] **Hawkes, P. W.,** *Advances in imaging and electron physics*, Vol. 216, (Sf. 45-70), Elsevier, (2004).
- [40] **Minar, M. R., Naher, J.,** (2018) Recent advances in deep learning: An overview, arXiv preprint arXiv:1807.08169.
- [41] **Pasini, A.,** (2015) Artificial neural networks for small dataset analysis, *Journal of thoracic disease*, 7(5), 953.
- [42] **Van Veen, F., Leijnen, S.,** (2019) The Neural Network Zoo, Retrieved from <https://www.asimovinstitute.org/neural-network-zoo>
- [43] **Ma, W., Liu, Z., Kudyshev, Z.A., Boltasseva, A., Cai, W., Liu, Y.,** (2020) Deep learning for the design of photonic structures, *Nature Photonics*, 1-14.
- [44] **Hussain, I., Tran, H.P., Jaksik, J., Moore, J., Islam, N., Uddin, M.J.,** (2018) Functional materials, device architecture, and flexibility of perovskite solar cell, *Emergent Materials*, 1(3), 133-154.
- [45] **Wang, K.X., Yu, Z., Liu, V., Cui, Y., Fan S.,** (2012) Absorption enhancement in ultrathin crystalline silicon solar cells with antireflection and light trapping nanocone gratings, *Nano letters* 12, 1616–1619.
- [46] **Shi, Y., Wang, X., Liu, W., Yang, T., Ma, J., Yang, F.,** (2014) Nanopyramids and rear-located ag nanoparticles for broad spectrum absorption enhancement in thin-film solar cells, *Opt. express* 22, 20473–20480.

- [47] **Zhang, X., Yu, Y., Xi, J., Wang, Y., Sun, X.H.**, (2015) Absorption enhancement in double-sided nanocone hole arrays for solar cells, *Journal of Optics*, 17(7), 075901.
- [48] **Zhang, S., Liu, M., Liu, W., Liu, Y., Li, Z., Wang, X., Yang, F.**, (2018) Absorption enhancement in thin film solar cells with bilayer silver nanoparticle arrays, *Journal of Physics Communications*, 2(5), 055032.
- [49] **Wu, J.** (2018) Absorption enhancement in thin-film solar cells based on periodically chirped structure, *Solar Energy*, 165, 85-89.
- [50] **Guan, L., Shen, G., Liang, Y., Tan, F., Xu, X., Tan, X., Li, X.**, (2019) Double-sided pyramid texturing design to reduce the light escape of ultrathin crystalline silicon solar cells, *Optics & Laser Technology*, 120, 105700.
- [51] **Lu, H., Guo, X., Zhang, J., Zhang, X., Li, S., Yang, C.**, (2019) Asymmetric metasurface structures for light absorption enhancement in thin film silicon solar cell. *Journal of Optics*, 21(4), 045901.
- [52] **Zhao, J., Green, M. A.**, (1991) Optimized antireflection coatings for high-efficiency silicon solar cells, *IEEE Transactions on electron devices*, 38(8), 1925-1934.
- [53] **Wright, D.N., Marstein, E.S., Holt, A.**, (2005) Double Layer Anti-reflective Coatings for Silicon Solar Cells, *Thirty-first IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, Florida, USA, 3-7 Ocak.
- [54] **Sahouane, N., Zerga, A.**, (2014) Optimization of antireflection multilayer for industrial crystalline silicon solar cells, *Energy Procedia*, 44, 118-125.
- [55] **Lennie, A., Abdullah, H., Shila, Z.M., Hannan, M.A.** (2010) Modeling and Simulation of SiO<sub>2</sub>/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> as Anti-reflecting Coating for Silicon Solar cell by using Silvaco Software, *World Applied Sciences Journal*, 11, 786-790.
- [56] **Jung, S.M., Kim, Y.H., Kim, S.I., Yoo, S.I.**, (2011) Design and fabrication of multi-layer antireflection coating for III-V solar cell, *Current Applied Physics*, 11(3), 538-541.
- [57] **Yablonovitch, E.**, (1982) Statistical ray optics, *JOSA*, 72(7), 899-907.
- [58] **Green, M. A.**, (2002) Lambertian light trapping in textured solar cells and light-emitting diodes: analytical solutions, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 10(4), 235-241.
- [59] **Atalay, İ.A., Babayiğit, C., Alpkiliç, A.M., Yilmaz, Y.A., Kurt, H.**, (2019) Surface texturing with multi-objective particle swarm optimization for absorption enhancement in silicon photovoltaics, *21st International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, Angers, Fransa, Temmuz.
- [60] **Campbell, P., Green, M.A.**, (1987) Light trapping properties of pyramidally textured surfaces, *Journal of Applied Physics*, 62(1), 243-249.
- [61] **Wang, K.X., Yu, Z., Liu, V., Cui, Y., Fan, S.**, (2012) Absorption enhancement in ultrathin crystalline silicon solar cells with antireflection and light-trapping nanocone gratings, *Nano letters*, 12(3), 1616-1619.

- [62] **Zhang, X., Yu, Y., Xi, J., Wang, Y., Sun, X.H.,** (2015) Absorption enhancement in double-sided nanocone hole arrays for solar cells, *Journal of Optics*, 17(7), 075901.
- [63] **Atalay, I.A., Gunes, H.A., Alpkilic, A.M., Kurt, H.,** (2020) Multi-objective particle swarm optimization on ultra-thin silicon solar cells, *Journal of Optics*, 49(4), 446-454.
- [64] **Yablonovitch, E., Cody, G.D.,** (1982) Intensity enhancement in textured optical sheets for solar cells, *IEEE Transactions on electron devices*, 29(2), 300-305.
- [64] **Yablonovitch, E., Cody, G.D.,** (1982) Intensity enhancement in textured optical sheets for solar cells, *IEEE Transactions on electron devices*, 29(2), 300-305.
- [65] **Jensen, J. S., Sigmund, O.,** (2011) Topology optimization for nano-photonics, *Laser & Photonics Reviews*, 5(2), 308-321.
- [66] **Frellsen, L.F., Ding, Y., Sigmund, O., Frandsen, L.H.,** (2016) Topology optimized mode multiplexing in silicon-on-insulator photonic wire waveguides, *Optics express*, 24(15), 16866-16873.
- [67] **Atalay, I.A., Kurt, H.,** (2020) Implementing of inverse designed power splitters by using effective medium theory, *Nanoengineering: Fabrication, Properties, Optics, Thin Films, and Devices XVII*, San Diego, USA, August.
- [68] **Khosravi, S., Rostami, A., Rostami, G., Dolatyari, M.,** (2015) Midinfrared invisibility cloak design using composite optical materials, *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 22(1), 134-139.
- [69] **T.C., Choy,** *Effective medium theory: principles and applications*, Vol. 165, New York, USA, Oxford University Press, (2015).
- [70] **Waldron, R. A.,** (1966) Theory of reflections in a tapered waveguide, *Radio and Electronic Engineer*, 32(4), 245-254.
- [71] **Weir, W.B.,** (1974) Automatic measurement of complex dielectric constant and permeability at microwave frequencies, *Proceedings of the IEEE*, 62(1), 33-36.
- [72] **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.
- [73] **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.
- [74] **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.
- [75] **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.

- [76] **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.
- [77] **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.
- [78] **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.
- [79] **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.
- [80] **Lipson, M.,** (2005) Guiding, modulating, and emitting light on silicon-challenges and opportunities, *Journal of Lightwave Technology*, 23(12), 4222.
- [81] **Vlasov, Y.A.,** *Silicon integrated nanophotonics: from fundamental science to manufacturable technology*, Proc. SPIE 9367, Silicon Photonics X, 93671X (2015).
- [82] **Jalali, B., Fathpour, S.,** (2006) Silicon photonics, *Journal of lightwave technology*, 24(12), 4600-4615.
- [83] **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.
- [84] **Hail, C.U., Poulikakos, 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.
- [85] **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.
- [86] **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.
- [87] **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.
- [88] **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.
- [89] **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.



