

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

**ENTEĞRE FOTONİK CİHAZLARIN TASARIMINA YÖNELİK HESAPLAMA  
TABANLI YAKLAŞIMLAR**



**DOKTORA TEZİ**

**Emre BOR**

**Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı**

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

**EKİM 2020**



## TEZ BİLDİRİMİ

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

Emre Bor



## ÖZET

Doktora Tezi

### ENTEĞRE FOTONİK CİHAZLARIN TASARIMINA YÖNELİK HESAPLAMA TABANLI YAKLAŞIMLAR

Emre Bor

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

Danışman: Prof. Dr. Hamza Kurt

Tarih: Ekim 2020

Nanofotonik, ışığın hareketinin dalga boyu mertebesinde veya daha küçük boyutlardaki yapılarda incelenmesidir. Fotonik cihazların tasarımı fiziksel bilgilere ve tahminlere dayalı olarak gelişmiştir. Bu sayede, geçmişten günümüze çok sayıda fotonik cihaz sunulmuştur. Yeni bir fotonik cihazın tasarlanması için bilinen bir fiziksel olgudan yararlanılır ve sonrasında fotonik cihaz üzerindeki az sayıda karakteristik parametre elle ayarlanarak istenilen optik özellik elde edilmeye çalışılır. Sonuç olarak, morötesinden orta-kızılötesine kadar farklı dalga boyu aralıklarında çalışan çeşitli fotonik cihazlar tasarlanmıştır.

Nanofotoniğin gelişimi fotonik cihazların yoğun bir şekilde entegrasyonunu sağlamak ve çalışma bant aralıklarını genişletmek üzerine devam etmektedir. Öte yandan, fotonik cihazların karmaşıklığı arttıkça tasarım süreçlerinde zorluklar yaşanmaktadır. Örneğin; bir optik niteliği etkileyen çok sayıda karakteristik parametre olduğu durumlarda bu parametrelerin aynı anda ayarlanması gerekmektedir. Ancak, bilinen fotonik cihazlar üzerinde elle parametre ayarlamak istenilen optik özelliği elde edebilmek için yeterli olmamaktadır. Bu noktada şöyle bir yorum yapılabilir; belirtilen tasarım yaklaşımları nanofotoniğin geleceği için yeterli değildir.

Karmaşık tasarım problemlerinin üstesinden gelebilmek için nanofotonikte tersine tasarım yöntemleri önerilmiştir. Tersine tasarım yöntemleri ile belirlenen bir tasarım alanı içerisinde istenilen optik özelliği veren bir fotonik cihaz tasarlanabilir. Bunun için bilinen bir fiziksel olgu kullanmak gerekmemektedir ve çok sayıda karakteristik parametre aynı anda eniyilenebilir. Karmaşık tasarımlarda, çeşitli eniyileme algoritmaları ve son yıllarda da makine öğrenmesi yöntemleri kullanılmaktadır. İstenilen optik özellikler maliyet fonksiyonu içerisinde tanımlanır ve algoritma bu maliyet fonksiyonunun değerini azaltacak şekilde karakteristik parametreleri belirler. Maliyet fonksiyonunun değerlerini hesaplamak için elektromanyetik alanları ve dalgaları modelleyen çeşitli nümerik yöntemler kullanılır. Çeşitli nümerik yöntemlerin ve algoritmaların birleştirilmesi sonucunda ise hesaplama tabanlı yaklaşımlar elde edilir.

Tezin ilk bölümünde, nanofotonikte tersine tasarım yöntemlerinin tarihsel arkaplanı özetlenmiştir. İlk yapılan çalışmalardan günümüzde yapılan çalışmalara kadar sunulan önemli çalışmalar detaylıca sunulmuştur. Tezin ikinci bölümünde, tercih edilen algoritmalar ve nümerik yöntem detaylıca anlatılmıştır. Entegre fotonik cihazların tasarımında için evrimsel algoritmalar ve pekiştirmeli öğrenme algoritmaları kullanılmıştır. Evrimsel algoritmalar olarak Diferansiyel Evrim ve Genetik Algoritma kullanılmıştır. Ayrıca, pekiştirmeli öğrenme algoritmaları olarak toplamsal pekiştirmeli öğrenme algoritması ve çekici seçim algoritması kullanılmıştır. Nümerik yöntem olarak ise sonlu-fark zaman-boyutu yöntemi kullanılmıştır.

Tezin üçüncü bölümünde, optik gizleyici, küçük boyutlu lens, optik bağlayıcılar, mod merteye çevirici ve çok düzeyli difraktif lens gibi hüzmeye şekillendirici fotonik cihazlar sunulmuştur. Tezin dördüncü bölümünde, fotonik yasaklı bant yapıları, yani fotonik kristaller (FK'ler), üzerinde eniyileme algoritmaları uygulanmıştır. Sonuç olarak, mod merteye çevirici FK dalga kılavuzu ve asimetric ışık iletici FK tasarlanmıştır. Tezin beşinci bölümünde, asimetric ışık iletici (Aİİ), dalga boyu ayırıcılar, polarizasyon ayırıcı, dalga kılavuzu geçiş aracı, optik güç zayıflatıcı ve yansıtıcı yapıları sunulmuştur ki bu yapılar optik nitelik ayırıcı olarak sınıflandırılabilirler. Tezin altıncı bölümünde ise tez kapsamında yapılan çalışmalar özetlenmiştir ve nanofotonikte tersine tasarım yöntemlerine dair son sözler paylaşılmıştır. Özetle, tezdeki çalışmalar sonucunda, hüzmeye şekillendirici fotonik cihazlar, fotonik yasaklı bant tabanlı yapılar ve optik nitelik ayırıcı entegre fotonik cihazlar tasarlanmıştır. Elde edilen sonuçlar nanofotonik için geleceği için umut vericidir.

**Anahtar Kelimeler:** Nanofotonik, Fotonik cihazlar, Tersine tasarım, Eniyileme algoritmaları, Makine öğrenmesi.

## **ABSTRACT**

Doctor of Philosophy

### **INTEGRATED PHOTONIC DEVICE DESIGNS BASED ON COMPUTATIONAL APPROACHES**

Emre Bor

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

Supervisor: Prof. Dr. Hamza Kurt

Date: October 2020

Nanophotonics is a field of science which investigates the behavior of light at the scale of wavelength or smaller dimensions. The design of photonic devices have been developed based on physical knowledge and intuition. Thus, many photonic devices have been introduced from past to present. In order to design a new photonic devices, a known physical phenomena is utilized which is followed by tuning small number of characteristic parameters on it. As a result, ranging from ultraviolet to mid-infrared, various photonic devices have been designed to operate at different wavelength regimes.

The development of nanophotonics is being pursued by dense integration of photonic devices and increasing their bandwidth. However, as the complexity of photonic devices increase, problems have been faced in design processes. For example, when an optical property depends on large number of characteristic parameters, it is required to optimize these parameters simultaneously. In this case, manual adjustment of parameters is not a decent approach to obtain desired optical properties in photonic devices. It can be concluded that these design approaches are not efficient enough for the future of nanophotonics.

In order to overcome these design problems, in nanophotonics, inverse design approaches have been introduced. A photonic device with desired optical property can be designed in a defined design space by using inverse design approaches. Here, a known physical phenomena is not required; and large number of characteristic parameters can be optimized simultaneously. In these designs, various optimization algorithms and, recently, machine learning methods have been applied. The desired optical properties are defined as a cost function and algorithms adjust characteristic parameters by minimizing the value of cost function. In order to calculate cost function values, several numerical methods are utilized which simulate electromagnetic fields and waves. The computational approaches are obtained by combining numerical methods with algorithms.

In the first part of this thesis, the historical background of inverse design approaches in nanophotonics are summarized. From very first studies to recently introduced ones, the most important studies are briefly presented. In the second part of this thesis, the selected algorithms and numerical method is explained in details. In this dissertation, evolutionary algorithms and reinforcement learning algorithms are applied to design integrated photonic devices. As evolutionary algorithms, Differential Evolution and Genetic Algorithm are applied. Also, as reinforcement learning algorithms, additive reinforcement learning algorithm and attractor selection algorithm are utilized. In addition, as a numerical method, finite-difference time-domain method is utilized.

In the third part of this thesis, beam shaping photonic devices such as an optical cloak, a lens, optical couplers, a mode order converter and a multilevel diffractive lens are presented. In the fourth part of this thesis, optimization algorithms are applied on photonic bandgap structures, namely photonic crystals (PCs). As a result, a mode order converter PC waveguide and an asymmetric light transmitter (ALT) PC are designed. In the fifth part of this thesis, an ALT, wavelength demultiplexers, a polarization beamsplitter, a waveguide crossing, an optical attenuator are introduced which can be classified as optical splitters. In the sixth part of this thesis, the studies in this thesis are summarized and concluding remarks on inverse design in nanophotonics are shared.

To conclude, As a result of the studies in this dissertation, beam shaping photonic devices, photonic bandgap structures and integrated optical splitter photonic devices are designed. The obtained results are promising for the future of nanophotonics.

**Keywords:** Nanophotonics, Photonic devices, Inverse design, Optimization algorithms, Machine learning.



## TEŞEKKÜR

Çalışmalarında yardımlarını esirgemeyen ve bilimsel katkıları ile bana yol gösteren değerli hocalarım Prof. Dr. Hamza Kurt'a ve Doç. Dr. Mirbek Turduev'e sonsuz teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Tez çalışmalarımı ilgi ile takip eden ve değerli görüşlerini benimle paylaşan tez izleme komitesi üyeleri Dr. Öğr. Üyesi Çiçek Boztuğ Yerci'ye ve Dr. Öğr. Üyesi Rohat Melik'e, tez savunma jürimde yer alan Dr. Öğr. Üyesi Aydan Yeltik'e ve Dr. Öğr. Üyesi İlyas Evrim Çolak'a teşekkürü bir borç bilirim.

Doktora eğitimim süresince araştırma bursu kapsamında bana destek olan TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi'ne teşekkür ederim. Bu tezde yapılan çalışmaları bünyesindeki 116F182 nolu proje kapsamında finansal olarak destekleyen TÜBİTAK'a teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Tez çalışmalarında tecrübelerinden faydalandığım ve birlikte çalışma fırsatı bulduğum değerli hocalarım Dr. Öğr. Üyesi Yusuf Sinan Hanay, Dr. Öğr. Üyesi, Çağrı Latifoğlu, Dr. Onur Alparslan ve Prof. Dr. Kestutis Staliunas'a teşekkür ederim. Ayrıca, değerli fikirlerini benimle paylaşan, yardımlarını ve zamanını esirgemeyen Dr. Öğr. Üyesi Selçuk Yerci'ye teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Yardımları ve dostlukları için Nanofotonik Lab üyeleri Mediha Tutgun, Tolga Yıldırım, Utku Görkem Yasa, Ahmet Mesut Alpkılıç, Ceren Babayığit, Zeki Hayran, Yusuf Abdülaziz Yılmaz, Takiyettin Oytun Kılınç, Nazmi Yılmaz, Ahmet Özer, Döne Yılmaz, Abdullah Bera İçli ve Hasan Alper Güneş'e teşekkür ederim.

Araştırma görevlisi olarak çalıştığım TED Üniversitesi'ndeki değerli çalışma arkadaşlarım Selman Fatih Avşar, Merve Armağan, Sefa Şimşek, Parisa Naghinazhadahmadi, Seyedehtasim Seyedpour Esmailzad, Abdullah Akaydın, Zeynep Sıdıka Seven, Gülce Turhan, Hamid Ahmadlouei, Ali Koç, Ömer Can Pamuk ve Onur Doğan'a dostlukları ve yardımları için sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, Prof. Dr. Erdem Yazgan, Dr. Öğr. Üyesi Hüseyin Uğur Yıldız ve Bumin Kağan Yıldırım'a yardımları için teşekkür ederim.

Son olarak, çalışmalarım boyunca beni her zaman destekleyen ve yardımlarını esirgemeyen aileme ve arkadaşlarıma teşekkürü bir borç bilirim.



## İÇİNDEKİLER

	Sayfa
<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>xi</b>
<b>KISALTMALAR</b> .....	<b>xvi</b>
<b>SEMBOL LİSTESİ</b> .....	<b>xvii</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
<b>2. SAYISAL VE ALGORİTMA TABANLI YAKLAŞIMLAR</b> .....	<b>11</b>
2.1 Sonlu-Fark Zaman-Boyutu-Yöntemi .....	11
2.2 Evrimsel Algoritmalar .....	12
2.2.1 Evrimsel algoritmalarda çaprazlama ve mutasyon mekanizmaları.....	13
2.2.2 Evrimsel algoritmalarda seçim mekanizması ve elitizm kavramı .....	14
2.2.3 Evrimsel algoritmalarda maliyet değeri .....	16
2.3 Diferansiyel Evrim Algoritması.....	18
2.3.1 Başlangıç popülasyonu .....	19
2.3.2 Mutasyon .....	20
2.3.3 Çaprazlama .....	21
2.3.4 Seçim .....	22
2.3.5 Sonlandırma .....	23
2.3.6 Diferansiyel Evrim algoritmasının kullanımı .....	23
2.4 Genetik Algoritma.....	24
2.4.1 Başlangıç popülasyonu .....	25
2.4.2 Çaprazlama .....	26
2.4.3 Mutasyon .....	28
2.4.4 Seçim .....	30
2.4.5 Sonlandırma .....	30
2.5 Makine Öğrenmesi .....	30
2.5.1 Toplamsal pekiştirmeli öğrenme algoritması .....	33
2.5.2 Çekici Seçim algoritması.....	35
2.5 Algoritmaların Kodlanması ve Nümerik Simülasyonlarda Kullanımı.....	37
<b>3. HÜZME ŞEKİLLENDİRİCİ FOTONİK CİHAZ TASARIMLARI</b> .....	<b>41</b>
3.1 Optik Gizleyici Tasarımı .....	41
3.2 Küçük Boyutlu Lens ve Optik Bağlayıcı Tasarımı .....	49
3.3 Optik Bağlayıcı Tasarımı.....	59
3.4 Mod Mertebe Çevirici Fotonik Kristal Tasarımı .....	63
3.5 Çok Düzeyli Difraktif Lens Tasarımı.....	68
<b>4. FOTONİK YASAKLI BANT TABANLI YAPI TASARIMLARI</b> .....	<b>75</b>
4.1 Fotonik Kristal Dalga Kılavuzu Tabanlı Mod Mertebe Çevirici Tasarımı .....	76
4.2 Epsilon-Mu-Sıfıra-Yakın Birim Hücreli Asimetrik Işık İletici Fotonik Kristal Tasarımı.....	82

<b>5. OPTİK NİTELİK AYIRICI ENTEGRE FOTONİK CİHAZ TASARIMLARI</b> .....	<b>91</b>
5.1 Asimetrik Işık İletici Entegre Fotonik Cihaz Tasarımı .....	92
5.2 Dalga Boyu Ayırıcı Entegre Fotonik Cihaz Tasarımları.....	96
5.3 Polarizasyon Ayırıcı Entegre Fotonik Cihaz Tasarımı .....	99
5.4 Dalga Kılavuzu Geçiş Aracı, Optik Güç Zayıflatıcı ve Yansıtıcı Entegre Fotonik Cihaz Tasarımları .....	101
<b>6. SONUÇLAR ve ÖNERİLER</b> .....	<b>105</b>
<b>KAYNAKLAR</b> .....	<b>107</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ</b> .....	<b>115</b>



## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 1.1 : Tersine tasarım algoritması ile tasarlanan dalga boyu ayırıcı entegre fotonik cihaz.....	6
Şekil 1.2 : Doğrudan ikili arama algoritması ile tasarlanan polarizasyon ayırıcı entegre fotonik cihaz .....	6
Şekil 1.3 : Farklı simetrliler için tasarlanan optik gizleyiciler .....	8
Şekil 1.4 : Fotonik cihaz kütüphanesinin oluşturulması ve tersine tasarlanan cihazlar ile gelişmesi .....	8
Şekil 1.5 : Fotonik tasarımlarında kullanılan yaklaşımların sınıflandırılması .....	9
Şekil 2.1 : Nümerik yöntem ile (a) eniyileme algoritmasının ve (b) makine öğrenmesinin birleştirilmesi ile elde edilen hesaplama tabanlı yaklaşımların çalışma mantığının şematığı.....	12
Şekil 2.2 : DE algoritmasının akış şeması.....	19
Şekil 2.3 : Binom çaprazlama şeması .....	22
Şekil 2.4 : GA'nın akış şeması .....	25
Şekil 2.5 : GA'da çaprazlama işlemi .....	28
Şekil 2.6 : GA'da mutasyon işlemi.....	29
Şekil 2.7 : (a) Klasik makine öğrenmesi ve (b) yapay sinir ağları gösterimleri.....	32
Şekil 2.8 : Pekiştirmeli öğrenme algoritmalarının çalışma şematığı .....	32
Şekil 2.9 : TPÖA'nın nümerik yöntem ile üretilen veri kümesi ile çalışmasının temsili gösterimi.....	33
Şekil 2.10 : TPÖA'nın akış şeması.....	34
Şekil 2.11 : ÇS algoritmasının nümerik yöntem ile çalışmasının temsili gösterimi .	36
Şekil 2.12 : Algoritmaların birleştirildikleri SFZB yazılımları.....	38
Şekil 3.1 : Hüzme şekillendirici fotonik cihaz tasarım şematığı.....	41
Şekil 3.2 : (a) Tasarım yaklaşımının şematik olarak gösterimi (b) tasarlanan yapının 3B ve (c) kuş bakışı görüntülerinin yapısal parametrelerle birlikte gösterimi .....	44
Şekil 3.3 : Sayısal olarak hesaplanmış (a) manyetik alan ve (b) faz dağılımları ve (c) giriş ve çıkış konumlarındaki kesit profilleri. (d) Üç farklı durum için hesaplanan iletim verimleri.....	45
Şekil 3.4 : (a) Deney düzeneğinin şematik gösterimi. (b) Üç boyutlu yazıcı ile üretilen yapı ve saklamak için kullanılan silindirik pirinç nesnenin fotoğrafı. Üstte ilindir pirinç nesneye bağlı olarak oluşan saçılmaların ve altta tasarlanan yapı ile elde edilen (c) manyetik alan ve (d) faz dağılımları. (e) Kesit genlik ve faz profilleri. (f) Tasarlanan gizleme yapısının deneysel olarak ölçülen iletim verimliliği .....	47
Şekil 3.5 : TPÖA tabanlı dalga boyu altında odaklama tasarımının akış şeması.....	50
Şekil 3.6 : Tasarlanan fotonik lens yapısının (a) üç boyutlu ve (b) üstten görünümü (c) Yapıya ait $z=0$ düzlemindeki elektrik alan şiddet dağılımı. (d) Fotonik lens yapısının odak noktasından alınmış olan yanal kesit elektrik alan şiddet dağılımı.....	52

Şekil 3.7 : (a) 280 nm sabit kalınlıkta enine kesit elektrik alan şiddet dağılımı haritası. (b) Farklı kalınlıklarda tasarlanmış lensler için hesaplanmış YMTG değerlerinin haritası. (c) 280 nm sabit kalınlık için YMTG değerleri. (d) 1550 nm dalga boyunda, kalınlık ile değişen YMTG değerleri.....	53
Şekil 3.8 : Farklı dalga boyları ve kalınlıkları için sunul odak noktasındaki şiddet dağılımları ve şiddet kesit profilleri. Kalınlığı 280 nm olan (a) 1500 nm ve (b) 1600 nm dalga boylarındaki yapıların şiddet dağılımları. 1550 nm dalga boyunda, katman kalınlığı (c) 270 nm ve (d) 290 nm olan yapıların şiddet dağılımları. Seçilen yapıların odak noktalarındaki şiddet kesit profilleri sırasıyla (e), (f), (g) ve (h)'de verilmiştir.....	54
Şekil 3.9 : (a) Solda: En yüksek puanlama değerine sahip olan fotonik yapı; Merkezde: 1550 nm çalışma dalga boyu için şiddet dağılımı; Sağda: Yapının temsili ters uzay karşılığı. (b) Solda: En düşük puanlama değerine sahip rastgele oluşturulmuş simetrik yapı; Merkezde: 1550 nm çalışma dalga boyu için şiddet dağılımı; Sağda: Yapının temsili ters uzay karşılığı (c) Solda: rastgele oluşturulmuş asimetrik fotonik yapı; Merkezde: 1550 nm çalışma dalga boyu için şiddet dağılımı; Sağda: Yapının temsili ters uzay karşılığı.....	56
Şekil 3.10 : Tasarlanan optik bağlayıcı yapısını (a) üç boyutlu ve (b) üstten görünümü verilmiştir. (c) Tasarlanmış olan verimli bağlayıcı yapısının normalize edilmiş iletim grafiği.....	57
Şekil 3.11 : (a) 1550 nm, (b) 1322 nm ve (c) 1419 nm dalga boylarında elektrik alan dağılımları. Elektrik alan şiddet dağılımları ise sırasıyla (d), (e) ve (f)'de verilmiştir.....	58
Şekil 3.12 : (a) Optik bağlayıcı yapısının 3B ve üstten görünüşü (b) Normalize iletim verimi. (c) Manyetik alan ve (d) şiddet kesitleri. (e) Yapının girişinde (havada) ve nano dalga kılavuzu üzerinde şiddet profilleri. Nano dalga kılavuzu üzerinde (f) manyetik alan ve (g) şiddet dağılımları.....	61
Şekil 3.13 : 3B SFZB uzayında $z=0$ düzleminde $\lambda=1500$ nm dalga boyu için hesaplanan (a) manyetik alan, (b) şiddet ve (c) faz dağılımları gösterilmiştir. 3B SFZB uzayında $z=0$ düzleminde $\lambda=1600$ nm dalga boyu için hesaplanan (d) manyetik alan, (e) şiddet ve (f) faz dağılımları gösterilmiştir.....	62
Şekil 3.14 : (a) Optik bağlayıcı yapısının 3B şematiği üzerinde iletim, yansıma ve düzlem dışı kayıpları hesaplamak için yerleştirilen optik güç monitörlerinin pozisyonları gösterilmiştir. (b) İletim, yansıma ve düzlem dışı kayıp verimleri verilmiştir, gölgelendirilmiş bölge çalışma bant aralığını göstermektedir.....	63
Şekil 3.15 : Boş uzayda mod mertebe çevrimi için FK tasarlama işlemi.....	64
Şekil 3.16 : Boş uzay için FK mod mertebe çevirici yapısının (a) 3B ve (b) üstten görünüşü	65
Şekil 3.17 : Boş uzayda mod mertebe çevirici FK yapısına ait nümerik olarak hesaplanan (a) elektrik alan ve (b) faz dağılımı. Elektrik alan kesitleri ise (c) ve (d) grafiklerinde verilmiştir.....	66
Şekil 3.18 : (a) Boş uzayda mod mertebe çeviren FK yapısının deneyi için kullanılan mikrodalga deney düzeneğinin şematiği. Bu yapıya ait deneysel olarak ölçülen (b) elektrik alan ve (c) faz dağılımı. Elektrik alan kesitleri ise (d) ve (e) grafiklerinde verilmiştir.....	67
Şekil 3.19 : (a) Tasarım yaklaşımının şematiği. (b) Tasarlanan lensin üstten ve kesit görünüşü ile yapısal parametreleri (c) Lensin perspektif görüntüsü.....	70
Şekil 3.20 : (a) 10 GHz için hesaplanmış elektrik alan şiddeti ( $ E_z ^2$ ) dağılımı. (b) optik eksen üzerinde normalize kesit profili, (c) odak noktasının görüntüsü ve (d) normalize enine kesit profili. (e) 10 GHz için hesaplanmış manyetik alan şiddeti ( $ H_z ^2$ ) dağılımı. (f) optik eksen üzerinde normalize kesit profili, (g) odak noktasının görüntüsü ve (h) normalize enine kesit profili.....	70

- Şekil 3.21 : Seçilen frekans aralığında (a) EM ve (c) EE polarizasyonlar için optik eksen üzerinden alınmış uzunlamasına kesit profillerinin haritaları. Bu frekans aralığında (b) EM ve (d) EE polarizasyonları için odak noktaları üzerinden alınan enine kesit profillerinin haritaları. EM ve EE polarizasyonları için (e) Odaklama verimi ile nümerik açıklık grafikleri ve (f) normalize iletim grafiği verilmiştir ..... 72
- Şekil 3.22 : (a) Elektrik alan şiddeti ve manyetik alan şiddeti dağılımlarını incelemek için kurulan mikrodalga deney düzeneğinin şematik gösterimi ve (b) bu deney düzeneğinin fotoğrafı. (d) Elektrik alan şiddeti ( $|E_z|^2$ ) ve (g) manyetik alan şiddeti ( $|H_z|^2$ ) dağılımı. (c) odak noktasının görüntüsünü almak için kurulan mikrodalga deney düzeneğinin şematik gösterimi ve bunun sonucunda bulunan (e) EM polarizasyonda ve (h) EE polarizasyonda odak noktasının görüntüsü. (f) EM ve (i) EE polarizasyonları için odak noktasından alınan normalize enine kesitler . 73
- Şekil 4.1 : 1B, 2B ve 3B boyutlu FK şematikleri ve bant diyagramında FYBA'nın temsili gösterimi. Oklar ışığın ilerleme yönü göstermektedir ..... 75
- Şekil 4.2 : FK dalga kılavuzuna ait bant diyagramı ve süper-hücre modlarının görüntüsü ..... 76
- Şekil 4.3 : FK dalga kılavuzu içerisinde mod mertebesi çevrimi için tasarım işlemi.. 77
- Şekil 4.4 : FK dalga kılavuzuna ait bant diyagramı ve süper-hücre modlarının görüntüsü ..... 78
- Şekil 4.5 : Mod mertebesi çevirici FK dalga kılavuzu yapısının (a) 3B ve (b) üstten görünüşü ..... 79
- Şekil 4.6 : Mod mertebesi çevirici FK dalga kılavuzu yapısına ait nümerik olarak hesaplanan (a) elektrik alan ve (b) faz dağılımı. Elektrik alan kesitleri ise (c) ve (d) grafiklerinde verilmiştir..... 79
- Şekil 4.7 : (a) Mod mertebesi çevirici FK dalga kılavuzu yapısının ileri ve geri yönde  $EM_0$  modu ile uyarılması sonucu hesaplanan iletim verimliliği grafiği. (b) İleri yönde ve (c) geri yönde  $a/\lambda=0.4025$  normalize frekansında temel mod ile yapılan uyarım için hesaplanan elektrik alan dağılımı ..... 80
- Şekil 4.8 : Mod mertebesi çevirici FK dalga kılavuzu yapısına ait mikrodalga deney düzeneğinin şematiği ..... 81
- Şekil 4.9 : (a) Giriş ve (b) çıkış dalga kılavuzlarında deneysel olarak ölçülen elektrik alan dağılımı. (c) Giriş ve (d) çıkış dalga kılavuzlarında deneysel olarak ölçülen faz dağılımı. Çıkış dalga kılavuzunda ölçülen elektrik alan dağılımının (e) sol ve (f) sağ konumdaki kesitlerinin grafikleri ..... 82
- Şekil 4.10 : (a) YDK dispersiyonuna sahip FK yapısının 3B şematik görüntüsü. (b) İlgili birim hücrenin fotonik bant diyagramı ve EMSY etkisini gösteren  $\Gamma$  noktasının yakınlaştırılmış hali. (c) YDK etkisi gösteren FK yapısının iletiminin gelen dalganın açısına bağlı değişim grafiği. (d) YDK FK yapısı boyunca ilerleyen dalganın elektrik alan profili ..... 85
- Şekil 4.11 : (a) Eniyileme için temel olarak seçilen FK yapısının üç boyutlu gösterimi. Önceden seçilmiş sabit EMNZ bölgesi ve eniyileme bölgesi sırasıyla siyah ve kırmızı kesik çizgilerle çevrelenmiştir. (b) Eniyilenmiş FK yapısı verilir ve sabit EMNZ bölgesi ve Eniyilenmiş bölge sırasıyla siyah ve kırmızı kesik çizgilerle çevrelenir. Eniyilenmiş FK yapısının ileri ve geri uyarımları sırasıyla gölgeli mavi ve gölgeli kırmızı oklarla gösterilmiştir ..... 86

Şekil 4.12 : (a) Eniyilenmiş FK yapısının ileri ( $T_{ileri}$ ) ve geri ( $T_{geri}$ ) uyarımları için normalize edilmiş iletim verimlilikleri (b) Eniyilenmiş YDK FK yapısının ileri ( $AO_{ileri}$ ) ve geri ( $AO_{geri}$ ) yönde uyarımları için sönüm oranı değerleri. (c) ve (d) sırasıyla eniyilenen AİI yapısının ileri ve geri uyarımlar için SFZB metodu $a/\lambda=0.457$ ile hesaplanmış elektrik alan profilleri.....	87
Şekil 4.13 : (a) Eniyilenmiş bölgenin sütunlarının asimetrik iletme olan etkisi (b) EMSY bölgesinin sütunlarının asimetrik iletme olan etkisi .....	88
Şekil 4.14 : (a) Tasarlanmış FK yapısının ileri ve geri yönde iletim ölçmek için kullanılan mikrodalga deney düzeneğinin temsili görüntüsü. (b) Tasarlanan ALT FK cihazının fotoğrafı. (c) İleri (mavi çizgi) ve geri (kırmızı kesikli çizgi) yönde ölçülen iletim değerleri.....	88
Şekil 4.15 : (a) FK yapısının çıkış bölgesindeki elektrik alan dağılımının ölçümünde kullanılan mikrodalga deney düzeneğinin temsili görüntüsü. Tasarlanan FK yapısının ileri ve geri yönde uyarılma doğrultuları ve tarama alanları. İleri yönde hesaplanan ve ölçülen (b) elektrik alan ve (c) büyüklük dağılımları. Geri yönde hesaplanan ve ölçülen (d) elektrik alan ve (e) büyüklük dağılımları.....	89
Şekil 5.1 : Optik nitelik ayırıcı entegre fotonik cihaz tasarım şematiği.....	92
Şekil 5.2 : Tasarlanan AİI entegre fotonik cihazının (a) 3B ve (b) üstten görüntüsü ile yapısal boyutları verilmiştir. (c) İleri ve geri yön için iletim, yansıma ve düzlem dışı kayıpların hesaplandığı monitörlerin konumları gösterilmiştir. (d) İleri yönde iletim ( $T_{ileri}$ ), yansıma ( $R_{ileri}$ ), düzlem dışı kayıplar ( $L_{ileri}$ ) ve geri yönde iletim ( $T_{geri}$ ), yansıma ( $R_{geri}$ ), düzlem dışı kayıplar ( $L_{geri}$ ) verilmiştir.....	94
Şekil 5.3 : İleri yönde iletim için $z=0$ düzleminde $\lambda=1550$ nm dalga boyunda hesaplanan (a) manyetik alan ve (b) şiddet kesitleri verilmiştir. İleri yönde ilerim için $x=2$ $\mu\text{m}$ düzleminde nano dalga kılavuzu üzerinde hesaplanan (c) manyetik alan ve (d) şiddet kesitleri verilmiştir. Geri yönde iletim için $z=0$ düzleminde $\lambda=1550$ nm dalga boyunda hesaplanan (e) manyetik alan ve (f) şiddet kesitleri verilmiştir. Geri yönde ilerim için $x=2$ $\mu\text{m}$ düzleminde nano dalga kılavuzu üzerinde hesaplanan (g) manyetik alan ve (h) şiddet kesitleri verilmiştir .....	95
Şekil 5.4 : (a) Tasarlanan yapının 3B görünüşü. (b) Üç farklı çıkış dalga kılavuzlarındaki normalize iletim değerlerinin dalga boylarına göre grafikleri.....	98
Şekil 5.5 : Tasarlanan dalga boyu ayırıcı cihazın (a) 1300 nm, (b) 1550 nm ve (c) 1800 nm dalga boylarındaki manyetik alan şiddeti dağılımları.....	98
Şekil 5.6 : (a) Tasarlanan yapının 3B görünüşü. (b) Üç farklı çıkış dalga kılavuzlarındaki normalize iletim değerlerinin dalga boylarına göre grafikleri.....	99
Şekil 5.7 : (a) 1500 nm, (b) 1550 nm ve (c) 1600 nm dalga boylarındaki ışığın tasarlanan cihaz içerisindeki manyetik alan şiddeti dağılımları.....	99
Şekil 5.8 : (a) Tasarlanan yapının 3B görünüşü. (b) İki farklı çıkış dalga kılavuzlarındaki normalize iletim değerlerinin polarizasyonlara göre grafikleri .....	100
Şekil 5.9 : (a) EE ve (b) EM polarizasyonlara sahip 1550 nm dalga boyundaki ışık şiddetinin cihaz içerisindeki dağılımları.....	101
Şekil 5.10 : (a) Tasarlanan dalga kılavuzu geçişi alanının yapısal özelliklerinin de belirtilerek verilen şematiği. (b) Tasarlanan yapının iletim verimliliği grafiği. 1550 nm dalga boyunda (c) x-yönünde ve (d) y-yönünde dalga kılavuzunda ilerleyen elektrik-alanın dağılımları gösterilmiştir.....	102
Şekil 5.11 : (a) Tasarlanan optik güç zayıflatıcının 3B perspektif gösterimi ve yapısal parametrelerinin şematiği. (b) Tasarlanan cihazın iletim verimliliği grafiği. (c) 1550 nm dalga boyunda çalışan optik güç zayıflatıcı içerisindeki elektrik alan dağılımı.....	103



Şekil 5.12 : Tasarlanan yansıtıcı ve yapısal parametrelerinin şematik gösterimi. (b) Cihazın iletim verimliliği grafiği. (c) 1550 nm dalga boyunda cihaz içerisindeki elektrik alan dağılımı.....104





## KISALTMALAR

<b>GA</b>	: Genetik Algoritma
<b>2B</b>	: İki boyutlu
<b>DDA</b>	: Düzlem dalga açılımı
<b>3B</b>	: Üç boyutlu
<b>FK</b>	: Fotonik kristal
<b>SFZB</b>	: Sonlu-fark zaman-boyutu
<b>SEY</b>	: Sonlu eleman yöntemi
<b>DE</b>	: Diferansiyel Evrim
<b>3B</b>	: Üç boyutlu
<b>YSA</b>	: Yapay sinir ağları
<b>TPÖA</b>	: Toplamsal pekiştirmeli öğrenme algoritması
<b>ÇS</b>	: Çekici Seçim
<b>DO</b>	: Dönüşüm optiği
<b>PLA</b>	: Polilaktik asit
<b>EE</b>	: Enine elektrik
<b>EMİ</b>	: Elektriksel mükemmel iletken
<b>YMTG</b>	: Yarı maksimumda tüm genişlik
<b>MYKS</b>	: Maksimum yan kulakçık seviyesi
<b>EM</b>	: Enine manyetik
<b>YÜS</b>	: Yalıtkan üstünde silikon
<b>AFD</b>	: Ayrık Fourier dönüşümü
<b>NA</b>	: Nümerik açıklık
<b>1B</b>	: Bir boyutlu
<b>FYBA</b>	: Fotonik yasaklı bant aralığı
<b>DBK</b>	: Dirac-benzeri konik
<b>EMSY</b>	: Epsilon-mu-sıfıra-yakın
<b>ESY</b>	: Epsilon-sıfıra-yakın
<b>MSY</b>	: Mu-sıfıra-yakın
<b>YDK</b>	: Yarım-Dirac konik
<b>AIİ</b>	: Asimetrik ışık iletici
<b>TMOY</b>	: Tümler-metal-oksit-yarıiletken
<b>TİY</b>	: Toplam iç yansımaya
<b>AO</b>	: Ayrışım oranı



## SEMBOL LİSTESİ

Bu çalışmada kullanılmış olan simgeler açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
$a$	Örgü sabiti
$\lambda$	Dalga boyu
$N_p$	Popülasyondaki birey sayısı
$D$	Bireydeki parametre sayısı
$x$	Evrimsel algoritmalarda birey, ÇS'de ifade seviyesi
$v$	DE'de mutant vektör
$u$	DE'de deneme vektörü, GA'da çocuk birey
$b_j^L$	Birey parametresine ait alt limit
$b_j^U$	Birey parametresine ait üst limit
$F$	DE mutasyon faktörü
$Cr$	DE çaprazlama faktörü
$M$	GA mutasyon faktörü
$X$	GA çaprazlama faktörü
$E$	Elektrik alan, ÇS'de hata oranı
$H$	Manyetik alan
$n$	Kırıcılık indisi
$r$	Yarıçap
$\varphi$	Faz
$T$	İletim verimi
$R$	Yansıma
$L$	Düzlem dışı kayıp
$a/\lambda$	Normalize frekans
$Si$	Silikon
$SiO_2$	Silikon dioksit
$Al_2O_3$	Alumina
$\alpha$	Büyüme oranı, ışığın optik eksen ile yaptığı açı
$\eta$	Gauss gürültü terimi
$\mu$	Manyetik geçirgenlik, ÇS'de kazanç
$\delta$	Gradyan
$\zeta$	Eşik hata oranı
$k$	Dalga vektörü
$\varepsilon$	Elektriksel geçirgenlik
$\theta$	Dalğanın geliş açısı
$\Delta x$	Çubukların merkezleri arasındaki x-yönünde mesafe
$\Delta y$	Çubukların merkezleri arasındaki y-yönünde mesafe
$\Gamma$	Brillouin bölgesinin merkezi
$w$	Ağırlıklandırma katsayısı



## 1. GİRİŞ

Nanofotonik, elektromanyetik dalganın dalga boyunun ölçülerinde veya altında büyüklüğe sahip yapılardaki ışığın incelendiği bir bilim dalıdır [1]. Nanofotonikteki cihazların gelişimi tarihsel olarak tahmin tabanlı yöntemlere dayanır. Yeni bir cihaz tasarlama isteği önceden bilinen fiziksel etkiden yola çıkılarak geliştirilir ve sonrasında az sayıda karakteristik parametre elle ayarlanarak uygulamalar için belli özelliklere sahip yapılar elde edilir. Bu yaklaşım uzun bir başarı geçmişine sahip olmakla beraber tasarım kütüphanesini oldukça genişletmiştir. İndis tabanlı dalganın kılavuz edilmesi, yasaklı bant mühendisliği ve malzeme rezonansları birleştirilerek elde edilen bu tasarımlar ile morötesinden (ultraviyole) orta-kızılötesine kadar farklı frekans bantlarında ışığın olağanüstü manipülasyonu gerçekleştirilebilmektedir: ışığın hızının yüz kat yavaşlatılması, ışığın boş-uzaydaki dalga boyundan binlerce kat küçük hacime hapsedilmesi [2,3].

Hâlâ nanofotonik, geniş bant aralığı veya çoklu-frekans uygulamaları, doğrusal olmayan olaylar ve yapıların yoğun entegrasyonunu kapsayacak şekilde gelişmektedir ve karmaşıklık arttıkça prototip yaklaşımlar sorunla karşılaşmaktadırlar. Örneğin; doğrusal olmayan etkileşimlerin artırıldığı dalga boyu seviyesinde bir yapının tasarımı düşünülebilir [4]. En basit durumda bile birkaç bağımsız karakteristiğin aynı anda eniyilenmesi gerekmektedir; bu karakteristiklerden bazıları ise her dalga boyundaki geniş kalite faktörü ve doğrusal olmayan üst üste gelmelerdir ki bunların olabilecek en küçük hacimde olması şarttır. Bu gibi bir durumda, standart fotonik tasarım kütüphanesi ilerlenebilecek açık bir yol sunamamaktadır. En uygun tasarımın geleneksel tasarlarda bulunmasını veya bu tasarımın zorunlu olarak yer almasını beklemek için geçerli bir sebep yoktur. Dahası, verilen cihazın performansı büyük ölçüde problem karakteristiklerine bağlı olacaktır ve fonksiyonelliğe duyulan ihtiyaç daha fazla olacaktır; bu durumda bu cihazların eski cihazlar gibi geniş bir kullanıma sahip olup olmayacağına yönelik şüpheler artmaktadır. Geniş bir alanda uygulamak için olan stratejilerin eksikliği standart tasarımlardaki yapıların boşluğuna dikkat çekmektedir. Çoğunlukla, geleneksel

tasarımlar düşük sayıda tasarım parametresine sahip yüksek simetrik şekillerin art arda karışımından ve kombinasyonlarından oluşmaktadır. Tahmin tabanlı eniyilemeler temel prensipler üzerinde bilinen kısıtlamalar akılda tutularak bu parametreler üzerinden ilerlediği için bir cihazın performans sınırlarına ne kadar yakın olduğu veya değiştirilmiş tasarım olasılıkları ile nasıl karşılaştırılacağına dair çok az bilgi bilinmektedir [5-7].

Doğrusal olmayan ve geniş bantta işlemlerde kullanılacak yeni cihaz platformlarını üretme ve değerlendirme yeteneği nanofotonun geleceğine tarafsızca etki edecektir. Eğer, verilen bir problem için bütün tasarım uzayının performansı kısmen karakterize edilebilirse oldukça büyük oranda araştırma çabasıyla kurtulabilir ve nanofotonik cihazların temel limitlerini incelemeye yönelik yeni bir yaklaşım ortaya çıkarılabilir.

Nanofotonik bağlamında, tersine-problem formülasyonları oldukça yenidir [8]. Nanofotonik eniyilemesi 90'lı yılların sonunda Spühler ile arkadaşlarının ve Cox ile Dobson'ın çalışmaları ile başlamıştır [9,10]. İlk makalede Spühler ile arkadaşları SiO<sub>2</sub>/SiON telekom-fiberden çıkıntı-dalga kılavuzuna bağlayıcı yapısını tasarladılar ve ürettiler. Genetik algoritma (GA) kullanarak SiON merkezin genişliği 183 µm uzunluk boyunca 3 µm adımlarla belirlenmiştir; doğrudan bağlamaya kıyasla verimlilikte 2 dB artış elde edilmiştir. İkinci makalede ise Cox ile Dobson bant genişliği problemine gradyan-arama algoritması uygulamışlardır: iki malzemeden oluşan iki boyutlu (2B) periyodik yapıdan başlayarak dielektrik bileşim simetrik olarak değiştirilerek bant genişliği artırılmıştır ve bunun sonucunda bant genişliğinde %34 artış elde edilmiştir. Fotonik tersine tasarımın bu iki erken uygulamasında yapısal eniyilemede kullanılan yöntemler; genetik (evrimsel) veya gradyan tabanlı yaklaşımlar, sınıflandırmanın ilk örnekleri olarak kabul edilmektedirler [11,12]. Kritik olarak, GA'larda, hedefin bireysel tasarım parametrelerine olan hassasiyetini (amaç fonksiyonunun türevsel bilgisi) belirlemek zorunlu değildir. Üstelik, gradyan bilgisi herhangi bir alt yolda kullanılsa bile, deterministik olarak algoritmayı yönetmemektedir. Bu değişiklik hem faydalar hem de eksiklikler ortaya çıkarmaktadır. Karmaşık konveks-olmayan hedef fonksiyonları [13] için GA'lar gradyan bilgisine ulaşmak mümkün olmadığında ve güvenilemediğinde tercih edilebilirler [14]. Ancak, bazı problemlerde aynı sayıda tasarım parametresi için GA'lar hesaplamalı olarak pahalı olmaktadır ve yerel optimum tasarımlarını kaçırmaktadırlar.



Bu başlangıç incelemelerini takip eden beş yıllık dönemde, kayda değer genişletmeler ve katkılar yapılmıştır. Bunlar arasında, Doosje ve arkadaşları düzlem-dalga açılımı (DDA) ile birleştirilerek üç-boyutlu (3B) önyüz-merkezli-kübik fotonik kristal (FK) yapılarının tersine hesaplanabileceğini gösterdiler [15]; Cox ile Dobson düzlem içerisindeki elektrik alanları da içerecek şekilde orijinal çalışmalarını başarılı olarak genişlettiler [16]; Felici ile Engl kaba ve hassas taneli parametreleştirmelerin birleştirildiği art arda algoritmaları kullanarak fiber bağlayıcılardan adyabatik sivrimli yapılara kadar en uygun tasarımları sunmuşlardır [17]; Geremia ile arkadaşları istenilen optik karakteristiklerden oluşan amaç fonksiyonunu kullanarak FK kavitelerinin tasarımını Langrangian maksimizasyon problemi olarak formüleştirdiler [18]; Jiang ile arkadaşları FK ile fiber dalga kılavuzları arasında mod eşleştirme elde etmek için GA kullandılar [19]; ve Kızıltaş ile arkadaşları radyofrekans yama antenlerin tasarımını geliştirmek için eniyileme tekniklerini uyguladılar [20]. Birkaç istisna dışında, bu işlerin çoğu iki çeşit problemler üzerine odaklanmıştır; FK'lerde yasaklı bant eniyilemesi veya dalga kılavuzu geometrilerinde mod bağlama [17,21]. Bu problemler ortak olarak yüksek simetriye sahiptirler ve karakteristik olarak önceden belirlenen periyodik tasarım ailesindeki az sayıda seçilen parametreleri eniyilemek için gradyan arama yöntemleri kullanmışlardır. Geniş-ölçekli eniyileme yöntemleri hassasiyet analizleri ile ilgili daha yakın alanlarında aynı anda takip edilmeye başlanmalarına rağmen fotonik cihazlarda pürüzlülük ve kusurların etkilerinin karakterizasyonlarında önemli bir hızlanma göstermişlerdir [22,23].

Tersine tasarım yöntemleri tasarımları farklı bir şekilde gerçekleştirmektedir [24]. Başlangıç tahmini için fiziksel prensiplere gereksinim duyulmadan, istenilen fotonik özellikler tasarım uzayı içerisinde eniyileme işlemi sonucu elde edilir ki burada eniyileme işlemi gelişmiş algoritmalar ve simülasyonların birleştirilmesinden oluşur ve hedefin tanımlandığı amaç fonksiyonunu sağlayacak çözümler arar. Bir problemi doğrudan çözmek ile kıyaslandığında eniyileme yöntemleri için daha fazla hesaplama gücü ve zaman gerekir. Ancak, bu yöntemler ile bütün parametre uzayında arama yapma imkanı sağlanır ve iyi performansa sahip tahmin edilemeyecek tasarımlar bulunur.

Hesaplama bakımından bir fotonik tasarım problemini doğrudan veya tersine çözmek için farklı yollar bulunmaktadır; oysa tasarım stratejisinin temeli verilen yapının

optik özelliğinin yeterli tutarlılık ile modellenebilmesidir. Bu amaçla çeşitli hesaplama yöntemleri geliştirilmiştir; sonlu-fark zaman-boyutu (SFZB) yöntemi, sonlu eleman yöntemi (SEY) [25,26]. Her birinin farklı uygulamalardaki uyumlulukları bakımından avantajları ve dezavantajları olsa da, bu yaklaşımlar ışık dalgası ile ilgili denklemleri yani Maxwell denklemlerini çözmektedirler. Simüle edilen sonuçlar tasarımcı veya bir eniyileme algoritması tarafından değerlendirilir, belirlenen performansa ulaşıncaya kadar güncellenen yapı nümerik yöntemle tekrar gönderilir ve simülasyon ile eniyilemenin bir sonraki döngüsü gerçekleştirilir.

2003 ve 2005 yılları arasında yapılan çalışmalar bu gelişmeleri açıkça şekillendirmiştir [27-36]. İlk olarak, tersine tasarım yöntemleri teknolojik olarak ilgili olan çeşitli uygulamaları kapsayacak şekilde genişlemiştir; bu çalışmalar arasında PC %1'den daha düşük iletim kaybına sahip ve geniş frekans bant aralığında çalışan FK dalga kılavuzu köşe yapısı [28], birkaç dalga boyu kalınlığına sahip frekans ayrıştırıcı cihazlar [33,34] ve geniş yasaklı bant aralığına sahip çeşitli FK yapıları yer almaktadır [30,36]. İkinci olarak ise, katımlı yoğunluk [27,28,33], seviye-dizi topoloji eniyilemesi [30,31,37] tersine tasarımın yaygınlığını ve hesaplama verimini oldukça genişletmiştir.

Fotonikteki bu ilk geniş-ölçekli eniyilime yöntemleri atılımının devamında araştırmaların yoğunlaştığı konular karmaşıklığın arttığı yapı ve uygulamaların incelenmesidir ki bunun içerisine güneş enerjisi toplamanın ilk çalışmaları [38-40]; dağılım mühendisliği [41], dalga boyu altı odaklama [42], topoloji eniyilemesi ile tasarlanan yapıların litografik yöntemler ile nano boyutta basılması [43] ve doğrusal olmayan anahtarlama [44] dahil edilmektedir. Aynı zamanda, eklemeli teknikler sayesinde sağlanan hesaplama gücündeki artış doğal olarak gerçekçi sınırlamaların eniyilemeye dahil edilmesi, hesaplamalı olarak çalışılabilecek daha geniş tasarım boyutlarına çıkılması ile ilgili soruların sorulmasına sebep olmuştur. Esas olarak, genelleştirmenin artırılması cihaz performanslarını oldukça artırırken bu kazanımlar yine de bazı yeni zorluklar ortaya çıkarmıştır. Kısıtlamalar olmadan, seviye-dizi veya yoğunluk topoloji eniyileme yöntemleri ile üretilen yapısal boyutlar sadece seçilen alanın boyutları ile kısıtlıdır.

Yoğunluk topoloji eniyilemesi yaklaşımında, gradyanları kullanabilmek için dielektrik sabiti sürekli olarak değişmektedir. Malzeme kısıtlamalarının dahil edilme biçimine göre, ara seviyede 'gri' yapılar ortaya çıkabilmektedir; burada ikili veya

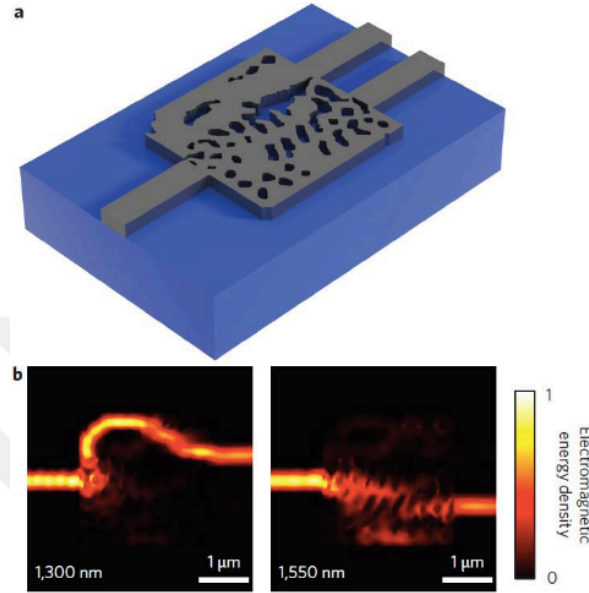
parçalı sabit yapılar elde etmek için hassas ayar tasarımlarının ve dereceli indis özelliklerinin kullanıldığı bir çok iterasyon gerçekleştirilir. Bu sorunlar ile uğraşmak tasarım uzayındaki doğru denge noktasına ulaşmayı sağlar. Son on yılda elde edilen gelişmeler bu denge noktalarına nasıl ulaşıldığının ve ceza filtrelerinin kullanımının hedef veya cihaz performansı üzerindeki özgürlüklerde nasıl etkili olduğunun anlaşılmasını sağlamıştır.

2004 yılından itibaren tersine yöntemlerin pratikte uygulanabilirliğini göstermek için bir çok tasarım deneysel olarak sunulmuştur. FK köşe yapıları ve ayrıcılardan [27,45] silikon fotonik devreler için pasif elemanlara [46-50] ve metayüzeyle [51,52] kadar tersine tasarımın uygulandığı fotonığın en önemli alanlarında işlevsel cihazlar bulunmaktadır. Ancak, günümüze kadar bu yapıların hiç biri geniş bir endüstriyel uygulamaya sahip olamamıştır. Bu uyumsuzluğun asıl sebebi oldukça basittir: tersine algoritmaların doğası gereği neredeyse tüm cihazlar küçük boyutlara sahip olduklarından elektron hüzme litografisi kullanılarak üretilmiştir. Endüstriyel uygulamalar için, üretim zamanını kısıtlamak ve böylece maliyeti düşürmek için fotolitografi ile uyumlu olmak gerekmektedir; en küçük boyutlar ile zorlanan belirgin kısıtlamalar bir boyutlu daha basit tasarımlarda uygulansa bile [53] yüksek boyutta bu yaklaşımlar oldukça zordur.

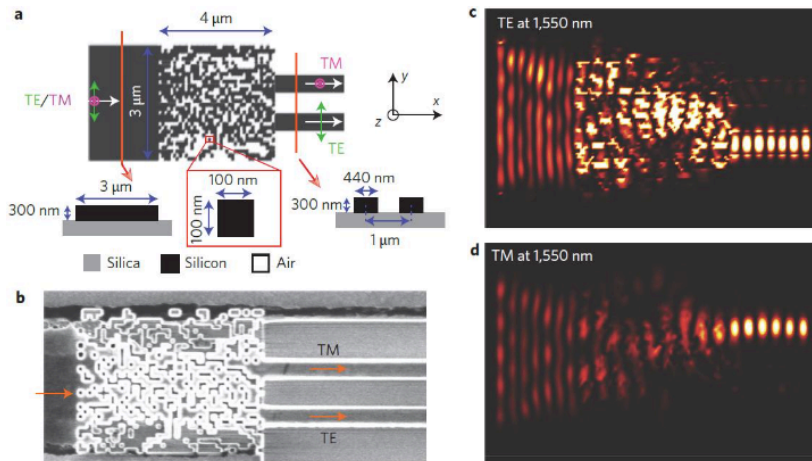
Günümüzde, tersine tasarım için kullanılan en popüler algoritmalar iki kategoriye ayrılabilir: GA gibi evrimsel yöntemler [54, 55] ve topoloji optimizasyonu [8], en dik iniş gibi gradyan tabanlı yöntemler. Geleneksel fizikten esinlenilmiş yöntemlere kıyasla bu teknikleri kullanmanın asıl avantajı tüm parametre uzayının incelenmesi ve istenilen performansı veren çok sayıda tahmin edilemeyen tasarımların elde edilebilmesidir.

2015 yılında yayınlanan iki çalışma oldukça ilgi görmüştür. Bu çalışmalardan birincisi; Şekil 1.1'den de görülebileceği üzere, Piggott ile arkadaşlarının sunmuş olduğu dalga boyu ayırıcı yapısıdır [48]. Bu çalışmada iki aşamalı eniyileme işlemi gerçekleştirilmiştir. Öncelikle hedef ilk yaklaşımı ile yapı tasarlanmaktadır; sonrasında ise en dik iniş algoritması ile tasarlanan yapı üzerinde hassas değişiklikler yapılmaktadır. İkinci çalışma ise Bing ile arkadaşlarının tasarladığı polarizasyon ayırıcı entegre fotonik cihazdır [56]. Bu çalışmada doğrudan ikili arama algoritması kullanılmıştır ve tasarlanan yapı Şekil 1.2'den görülebilir. Bahsedilen bu iki çalışmanın yayınlanmasından sonra bu alana olan ilgi ve bu alanda çalışan

araştırmacıların sayısı artmaya başlamıştır. Günümüzde, daha küçük boyutlarda daha yüksek performansa sahip entegre fotonik cihazların tasarlanması yanında şimdiye kadar hiç tasarlanamamış yeni cihazların tasarımı ve alternatif tersine tasarım yöntemleri olarak daha gelişmiş algoritmaların kullanımına yönelik çalışmalar yapılmaktadır.



Şekil 1.1 : Tersine tasarım algoritması ile tasarlanan dalga boyu ayırıcı entegre fotonik cihaz [48].



Şekil 1.2 : Doğrudan ikili arama algoritması ile tasarlanan polarizasyon ayırıcı entegre fotonik cihaz [56].

Bu alanda yapılan diğer önemli çalışmalardan kısaca bahsetmek gerekmektedir. 2013 yılında Lu ile Vučković, entegre fotonik cihaz tasarlamak için kendi geliştirdikleri ve “inverse design” adını verdiklerini hesaplama tabanlı yaklaşımı sundular [57]. Bu yaklaşım, Maxwell denklemlerini çözerken gradyan tabanlı bir yaklaşım olan gradyan iniş yöntemini ve bununla beraber konveks eniyileme yöntemini

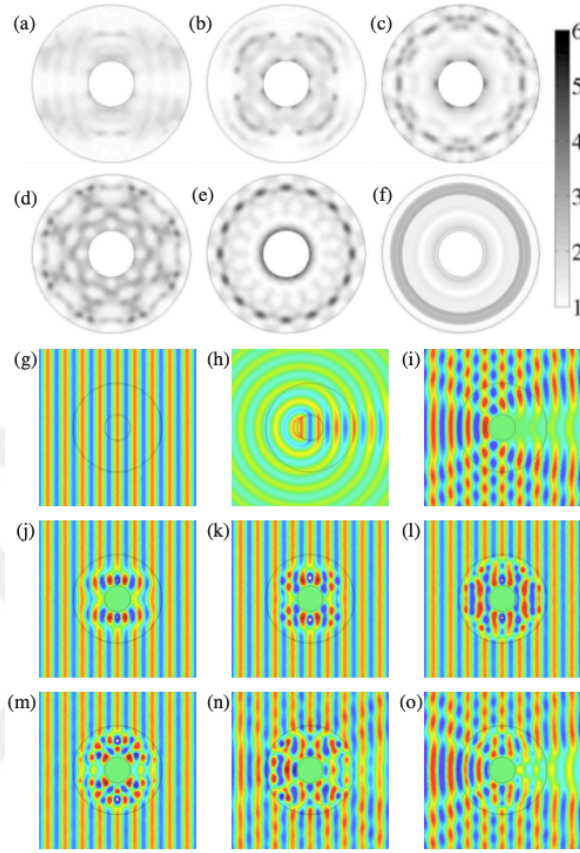
kullanmaktadır. Sunulan bu yöntem ile tasarlanan bir diğer çalışmada ise fabrikasyon kısıtlamalarını tasarım sürecine dahil ederek optik güç bölücü, uzaysal mod ayırıcı, dalga boyu ayırıcı ve yönlü bağlayıcı yapılarını tasarlamışlardır [58]. Bir başka çalışmada ise ızgara dalga boyu ayırıcı yapısı sunulmuştur [59]. Ayrıca, ızgara şeklinde bağlayıcı yapısı da sunulmuşlardır [60]. İlgili yöntemin kullanıldığı bir diğer çalışmada ise üç dalga boyunun ayrıldığı bir entegre fotonik cihaz sunulmuştur [61].

Bahsedilen bu tersine tasarım yönteminin yanı sıra doğrudan ikili arama yöntemi kullanılarak da önemli çalışmalar yapılmıştır. Menon ile arkadaşları bu algoritma ile SFZB yöntemini birleştirerek entegre fotonik cihazların yanı sıra metayüzeyler ve difraktif lenslerin tasarımında da eniyileme algoritması kullanmışlardır. Bir çalışmada çoklu dalga boyunda çalışabilen difraktif optik elemanlar tasarlamışlardır [62]. Bunun yanı sıra polarizasyonsuz ışıktan doğrusal polarizasyonu ayırıcı bir metamateriyal yüzey tasarlanmıştır [63]. Ayrıca, geniş bantta görüntüleme yapabilen düzlem difraktif lens yapısı da sunulmuştur [64]. Bunlara ek olarak, ışığın geniş bantta asimetric iletilmesini sağlayan metayüzey tasarlanmıştır [65]. Entegre fotonik cihaz tasarımları olarak ise polarizasyon çevirici [66], bağlayıcı [67] ve entegre devrelerde cihazlar arasında yalıtım sağlayacak gizleyici bölge [68] tasarlamışlardır.

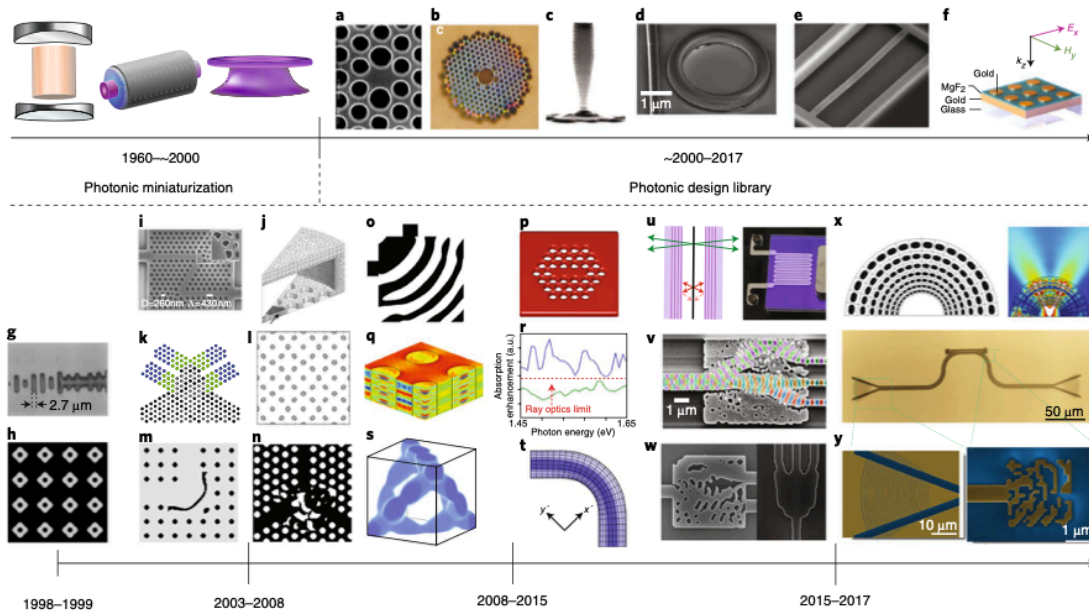
Bir diğer hesaplama tabanlı yaklaşım SEY ile topoloji eniyilemesinin birleştirilmesi ile oluşturulmuştur. Sigmund ile ekibi optik görünmezlik ve gizleyici tasarlamak için saçılımların azaltıldığı bir yöntemi kullanmışlardır [69,70]. Farklı simetrikler için tasarladıkları optik gizleyicilerin [69] görüntüsü Şekil 1.3'te verilmiştir. Bir diğer çalışmada ise topoloji eniyilemesi kullanarak FK dalga kılavuzu içerisinde mod mertebesi çevirici bölge tasarlamışlardır [71]. Bunlara ek olarak evrimsel algoritmaların kullanıldığı fotonik cihaz tasarımları da literatüre kazandırılmıştır. Bunlar arasında dalga boyu altında odaklayıcı lensler [72,73], optik gizleyici [74], mod mertebesi çevirici [75], dalga boyu ayırıcı [76], çok düzeyli difraktif lens [77] ve çeşitli entegre fotonik devre elemanları [78] bulunmaktadır.

Yakın zamanda, eniyileme algoritmalarına ek olarak, makine öğrenmesi algoritmaları da fotonik cihaz tasarımlarında kullanılmaya başlanmıştır. Odaklama, optik bağlama ve ışığın asimetric iletimini sağlayan fotonik cihazlar pekiştirmeli öğrenme ile tasarlanmıştır [79,80]. Başka bir çalışmada ise derin sinir ağları eğitilerek nanofotonik cihazların tersine tasarlanabileceği önerilmiştir [81]. Bunların

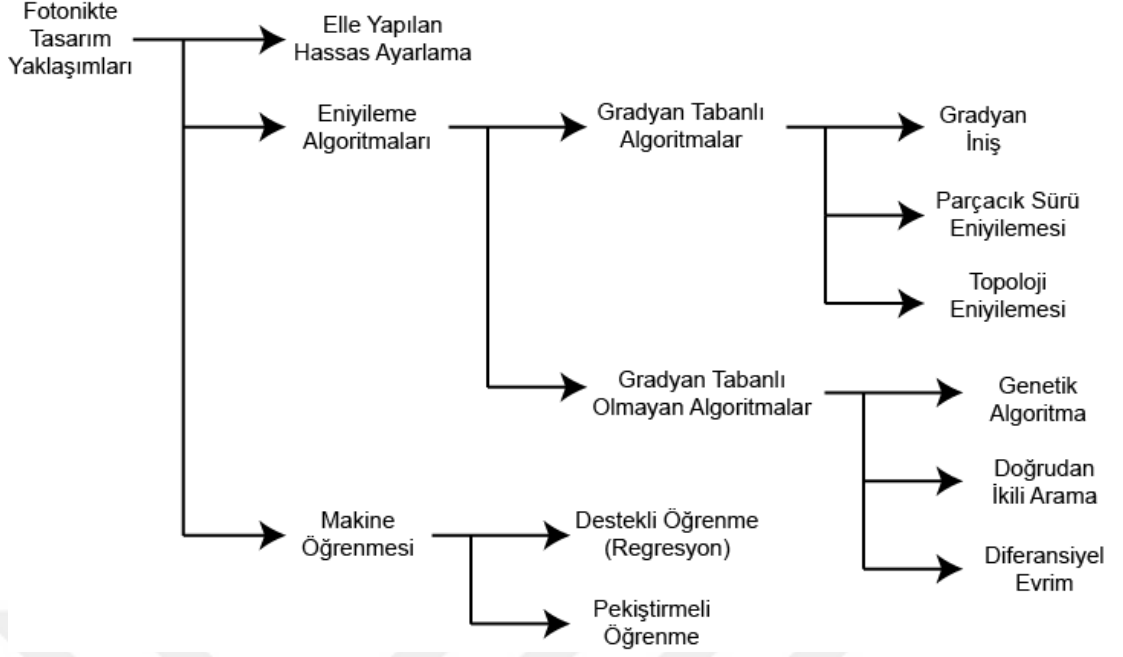
dışında nanofotonik cihazların tasarımında çok farklı yöntemler de bulunmaktadır [82]. Fotonik alanında geliştirilen cihazlar ve bu alanda uygulanan tersine tasarım yöntemleri ile tasarlanan cihazların kronolojik sırası Şekil 1.4'te verilmiştir.



Şekil 1.3 : Farklı simetrisi için tasarlanan optik gizleyiciler [69].



Şekil 1.4 : Fotonik cihaz kütüphanesinin oluşturulması ve tersine tasarlanan cihazlar ile gelişmesi [24].



Şekil 1.5 : Fotonik tasarımlarında kullanılan yaklaşımların sınıflandırılması.

Geçmişten günümüze fotonik alanında bir çok farklı tasarım yöntemi ve bunun sonucunda çeşitli algoritmalar kullanılmıştır. Bu yöntemlerin en yaygın olanları ve kendi içlerinde sınıflandırılmaları Şekil 1.5'te verilmiştir. En basit yöntem bir fotonik yapıdaki karakteristik bir parametrenin elle hassas bir şekilde ayarlanmasıdır. Bunun dışında eniyileme algoritmaları kullanılarak aynı anda daha fazla karakteristik parametrenin ayarlanması sağlanmıştır. Bu eniyileme algoritmaları gradyan tabanlı olmalarına veya olmamalarına göre temelde ikiye ayrılmaktadırlar. Gradyan tabanlı algoritmalar arasında fotonik alanında en yaygın kullanılanları gradyan iniş, parçacık sürü eniyilemesi ve topoloji eniyilemesidir. Bu algoritmalar kullanılırken türevi alınabilen bir maliyet fonksiyonuna gerek duyulmaktadır. Ancak, her problem için türevi alınabilen bir maliyet fonksiyonu yazmak mümkün olmamaktadır. Bu nedenle, gradyan tabanlı olmayan genetik algoritma, doğrudan ikili arama ve diferansiyel evrim algoritmaları kullanılmaktadır. Bu algoritmalar arasında genetik algoritma ve diferansiyel evrim algoritmaları evrimsel algoritmalar sınıfında yer almaktadırlar. Yakın zamanda eniyileme algoritmalarına ek olarak makine öğrenmesi algoritmaları da fotonik alanında kullanılmaya başlamıştır. Yapılan çalışmalarda bir çeşit destekli öğrenme algoritması olan regresyon yöntemi ve çeşitli pekiştirmeli öğrenme algoritmaları kullanılmıştır.

Bu tezin ikinci bölümünde tez kapsamında yapılan çalışmalarda kullanılan nümerik yöntemler ve algoritmalarından bahsedilecektir. Üçüncü bölüm hüzme şekillendirici fotonik cihazlara ayrılırken, dördüncü bölümde yasaklı bant tabanlı yani FK'lerden oluşan yapılar sunulmuştur. Dördüncü bölüm ise optik nitelik ayırıcı fotonik cihazların tasarımını kapsamaktadır. Tezin beşinci bölümünde ise elde edilen sonuçlar üzerine yorumlar yapılmıştır ve gelecekte yapılabilecek çalışmalar hakkında öneriler yer almaktadır.





## 2. SAYISAL VE ALGORİTMA TABANLI YAKLAŞIMLAR

Bu tez kapsamında fotonik cihazları tasarlamak için kullanılan hesaplama tabanlı yaklaşımları elde etmek için SFZB metodu ile eniyileme algoritmaları ve makine öğrenmesi birleştirilmiştir.

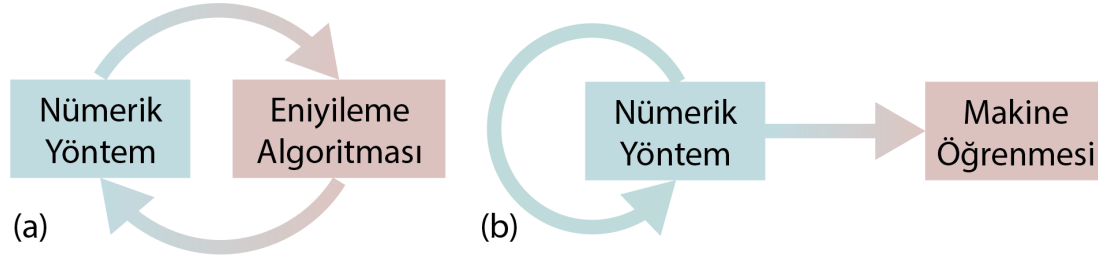
### 2.1 Sonlu-Fark Zaman-Boyutu Yöntemi

Elektromanyetik optikte ışık bir elektromanyetik dalga olarak kabul edilir ve ışığın madde ile etkileşimi incelenir. Bir elektromanyetik dalga elektrik alan ve manyetik alan bileşenlerinden oluşmaktadır. Bu bileşenler uzaysal düzlemde zamana bağlı olarak değişmektedir ve bu durum dalganın ilerleyişini temsil etmektedir. Fotonik cihazlar ise gelen ışığı manipüle ederek ışığın ilerleyişini etkilemektedir. Bir başka deyişle, ışığın yansınması, kırılması, kırınımı gibi optik olaylar gerçekleşmektedir. Bu nedenle, fotonik cihazların performansını incelerken zaman boyutunda inceleme yapmak gerekmektedir. Bu incelemeleri yapmak için nümerik bir yöntem olan SFZB metodundan faydalanılmaktadır [25]. Bu tez kapsamındaki çalışmalarda SFZB metodu, farklı algoritmalara entegre edilerek fotonik cihazlar tasarlanmıştır. SFZB metodu için yaygın olarak kullanılan yazılımlar tercih edilmiştir. Bu yazılımlar Lumerical FDTD Solutions ve MEEP yazılımlarıdır [83,84].

SFZB yöntemi, bir diğer ismi ile Yee yöntemi, hesaplamalı elektromanyetikte kullanılan bir nümerik analiz tekniğidir. Zaman boyutunda çalıştığı için bir simülasyon ile geniş bir frekans aralığı için hesaplama yapmak mümkün olmaktadır. SFZB yöntemi, genel olarak ızgara tabanlı diferansiyel nümerik modelleme yöntemleri (sonlu fark yöntemleri) sınıfında yer almaktadır. Zamana bağlı Maxwell Denklemleri, merkez fark yaklaşımları kullanılarak uzay ve zaman kısmi türevleri elde edilecek şekilde kesiklendirilmiştir. Elde edilen sonlu-fark eşitlikleri birbiri ardına bir yazılım sayesinde çözülmektedir. Yani, uzaydaki elektrik alan vektör bileşenleri belirli bir zaman adımında çözülürken, bir sonraki zaman adımında manyetik alan vektör bileşenleri çözülmektedir. Bu iki işlem, durgun-durum

elektromanyetik alan karakteristiği elde edilinceye kadar birbirini takip edecek şekilde devam etmektedir.

Bahsedilen bu işlem SFZB yönteminin temelini oluşturmaktadır. Bir nümerik yöntem olan SFZB yönteminin eniyileme algoritmaları ve makine öğrenmesi ile birlikte çalışmasının temsili şematığı Şekil 2.1’de gösterilmiştir.



Şekil 2.1 : Nümerik yöntem ile (a) eniyileme algoritmasının ve (b) makine öğrenmesinin birleştirilmesi ile elde edilen hesaplama tabanlı yaklaşımların çalışma mantığının şematığı.

## 2.2 Evrimsel Algoritmalar

Bilgisayar biliminde, yöneylem araştırmasında ve matematikte hedefe uygun çözümler arasından en iyi çözümü seçme işlemi eniyileme olarak tanımlanır. Mühendislikte ise eniyileme, bir sistemin tasarımında amaçlanan özellikleri elde etme işlemidir. Eniyileme algoritmalarının kullanım amacı bir problem için en iyi çözümün bilinmediği yerlerde istenilen hedefe uygun olası iyi çözümlerin bulunmasıdır. Eniyileme işlemi sonucunda bulunan çözüm için en iyi çözüm denilmesi doğru değildir. Çünkü, eniyileme algoritmaları arama yaparken çözüm uzayının tamamını keşfetmezler. Global en iyi sonucu bulabilmek için tüm çözüm uzayının bilinmesi gerekmektedir. Bu nedenle, bir eniyileme algoritmasının bulacağı sonuç için mümkün olan en iyi sonuçtur denilemez ama amaca uygun iyi sonuçtur denilebilir.

Evrimsel algoritmalar, eniyileme algoritmaları arasında en yaygın kullanılan algoritma sınıfıdır. Evrimsel algoritmalar, evrim teorisi ilham alınarak tasarlanmıştır. Evrim teorisinde bulunan biyolojik süreçler evrimsel algoritmaların temel mekanizmalarını oluştururlar. Bu mekanizmalar üreme, mutasyon, rekombinasyon, seleksiyon gibi biyolojik evrimde de bulunan süreçlerdir. Bu süreçler aslında birer sezgisel yöntemdir ve eniyileme algoritmaları birden fazla sezgisellerin bir araya gelmesi ile oluşan daha karmaşık algoritmalar oldukları için meta-sezgisel olarak sınıflandırılırlar. Yani, evrimsel algoritmalar birer meta-sezgisel yöntemlerdir.

Evrimsel algoritmalar, popülasyon yani nesil (jenerasyon) tabanlıdır ve iterasyonlar üzerinden (iteratif) çalışırlar. Her iterasyondaki popülasyon bir nesle karşılık gelmektedir ve her nesil bireylerden oluşur. Burada bireyler tasarım problemi için önerilen olası çözümlere karşılık gelmektedir. Bu olası çözümler, iteratif olarak iyileştirilir yani evrimleştirilir. Bunun sonucunda, hedefe yönelik çözümler elde edilmeye çalışılır. Başlangıçta bireyler arama uzayında genellikle rastgele dağıtılır. Yani, rastgele bir başlangıç popülasyonu oluşturulur. İlerleyen adımlarda, popülasyon içerisinde çaprazlama mekanizmasına göre bir veya birden çok birey seçilir ve yeni bireyler oluşturulur. Eldeki popülasyondaki bireylere ebeveyn, ebeveynlerden oluşturulan bireylere ise çocuk denilmektedir. Burada, bir sonraki iterasyona aktarılacak bireyler için bir seçim mekanizması kullanılmalıdır. Bu mekanizmada ebeveynler ve çocuklar arasından bireyler seçilir ve bir sonraki iterasyona aktarılır. Bir sonraki iterasyonun popülasyonu yeni nesil olarak adlandırılır. Bu yeni nesil artık yeni ebeveyn bireyleri oluşturmaktadır. Bu şekilde çaprazlama ve seçim işlemleri birbirini takip ederek algoritmanın iteratif çalışması gerçekleştirilir.

Bu tezde evrimsel algoritmalar olarak Diferansiyel Evrim (DE) algoritması ve GA tercih edilmiştir. Bu algoritmaların çalışma mekanizmalarına dair detaylı bilgiler sunulmuştur.

### **2.2.1 Evrimsel algoritmalarda çaprazlama ve mutasyon mekanizmaları**

Evrimsel algoritmalarda çaprazlama işlemi çeşitliliği sağlamak ve arama uzayında farklı noktalara yayılmak için kullanılır. Farklı çaprazlama mekanizmaları tanımlanabilir. Örneğin; çaprazlama ile yeni (çocuk) bireyler oluşturulurken eldeki (ebeveyn) bireylerden en iyi olanlar tercih edilebilir veya bu bireyler arasından rastgele bireyler de seçilebilir. Çaprazlama işleminde en az iki birey kullanılmaktadır. İki'den fazla bireyin kullanıldığı karmaşık çaprazlama işlemleri de tanımlanabilir. Çaprazlama işleminin bir diğer önemi ise algoritmayı yerel optimumlardan kurtarabilmesidir. Bir algoritma çalışırken yerel optimumlara yönelebilir. Bunun sonucunda algoritma arama uzayının belirli bir bölgesine yani yerel optimumun olduğu yere doğru yönelir ve burada hapsolabilir. Bir diğer deyişle, yeni bireyler yerel optimum civarında oluşur. Bu durum algoritmanın istenilen hedefe ulaşmasına engel olmaktadır. Burada çaprazlama işleminin önemi anlaşılmaktadır. Eğer çaprazlama mekanizması algoritmanın son geldiği noktadan

daha uzaklara ulaşabilmesini yani tarama uzayının çok daha farklı bölgelerinde birey oluşturmayı başarabiliyorsa algoritma yerel optimumdan kurtulacaktır. Bunun için çaprazlama işlemi önemlidir ancak her zaman yerel optimumdan kaçma konusunda yeterli olmayabilir. Bu sebeple algoritmalarda çaprazlama işleminden önce veya sonra mutasyon işlemi kullanılabilir. Mutasyon işlemi, kullanılması zorunlu olan bir mekanizma değildir. Ancak, algoritma çalışırken oluşturulan bireyler üzerinde yapılacak ufak değişiklikler (mutasyon) arama uzayında farklı noktalara yayılmayı sağlayabilir. Mutasyonu biyolojik olarak tanımlayacak olursak çaprazlanan genler üzerinde çok düşük olasılıkla oluşabilecek değişikliklerdir. Burada gen ile bahsedilen kavram, bireylerin taşıdığı bilgiler olmaktadır. Evrimsel algoritmalarda mutasyon işlemini kullanırken dikkat edilmesi gereken bir durum bulunmaktadır. Eğer çaprazlama ile elde edilen yeni (çocuk) bireyler üzerinde yüksek oranda mutasyon gerçekleşirse, çaprazlama işleminin etkisi azalacaktır. Bu durum, algoritmanın çalışmasını rastgele bir hale getirecektir ve algoritmanın istenilen hedefe yakınsaması zorlaşacaktır.

### **2.2.2 Evrimsel algoritmalarda seçim mekanizması ve elitizm kavramı**

Seçim mekanizması, evrimsel algoritmalarda çaprazlama mekanizmasından sonra rol alan önemli bir işlemdir. Doğada çevreye en iyi uyum sağlayan canlının hayatta kalması modellenerek seçim işlemi gerçekleştirilmektedir. Yani, doğal seleksiyon ile güçlü olan bireyler hayatta kalır ve şartlara uyum sağlarken, zayıf bireyler ise neslini devam ettiremez ve soyları tükenir. Bu şekilde hayatta kalan bireyler gittikçe güçlenir ve çevreye uyum sağlayan bireyler olacak şekilde evrim geçirirler. Benzer mantıkla, evrimsel algoritmalarda da seçim işlemi yapılabilmektedir. Ancak, evrimsel algoritmalarda çeşitli seçim mekanizmaları kullanılabilir. Örneğin, bireylerin yaşına göre seçim yapılabilir. Ebeveyn bireylerden çaprazlama sonucu ortaya çıkan çocuk bireylerin tamamı bir sonraki nesle aktarılır ve ebeveyn bireylerin hiçbirisi bir sonraki nesle aktarılmaz. Bir sonraki nesle aktarılan çocuk bireyler gelecek nesildeki ebeveynleri oluştururlar ve bu seçim işlemi her iterasyonda gerçekleşir. Bu tür seçim işleminin dezavantajı, çocuk bireylerden daha güçlü ebeveynlerin elenmesi durumudur. Bunun sonucunda algoritma o zamana (iterasyona) kadar bulduğu iyi sonucu kaybedebilir ve bu durumda algoritmanın istenilen amaca yakınsaması olumsuz yönde etkilenir.

Bir diğere seçim mekanizması ise amaca yönelik seçimdir. Bu seçim mekanizmasında ebeveynlerin ve çocukların hepsi ortak bir birey havuzunda karıştırılır. Havuzdaki bu bireyler iyiden kötüye doğru sıralanırlar. Bu sıralamada iyi olanlar bir sonraki nesle aktarılırken, kötü olanlar elenir. Bu seçim mekanizmasının dezavantajı ise algoritmayı hızlı bir şekilde yerel optimuma götürmek ve oradan kurtulmasını engellemek olacaktır. Görüldüğü üzere sadece yaşa veya sadece amaca göre seçim yapmak algoritmanın yakınsamasını olumsuz etkilemektedir. Burada şöyle bir yorumda bulunmak doğru olacaktır: her zaman sadece en iyi bireyleri aktarmak, algoritmanın global optimuma ulaşması için doğru bir seçenek değildir. Ancak, iyi bireyleri bir sonraki nesle aktarmamak da global optimuma ulaşmak için doğru bir yöntem değildir. Bu durumda, bir sonraki nesle aktarılacak bireyler arasında hem iyi hem de kötü bireylerin olması gerekmektedir. Bunu sağlayabilmek için daha gelişmiş bir seçim mekanizması kullanılmalıdır.

Seçim mekanizmasında bahsedilmesi gereken önemli bir kavram ise elitizmdir. Eğer bir algoritmada, o zamana (iterasyona) kadar bulunan en iyi birey her zaman bir sonraki nesle aktarılıyorsa, yani eldeki en iyi bireyin elenme ihtimali bulunmuyorsa, bu algoritma için elitisttir denir. Elitist olmayan bir algoritmanın hedefe yaklaşma yeteneği kötüdür, bazen hedefe ulaşması hiç mümkün olmayabilir. Ancak, her elitist algoritmanın da iyi olduğu söylenemez. Örneğin; yaşa göre seçim yapılan bir evrimsel algoritma elitist değildir ve yakınsama hızı düşüktür. Amaca göre seçim yapılan bir evrimsel algoritma elitisttir, fakat bu algoritmanın yerel optimumda takılı kalması muhtemeldir. Bu nedenle, bir evrimsel algoritmada bulunan seçim işleminin elitist olması ve bir sonraki nesle iyi bireylerin yanında kötü bireyleri de aktarması bir çözüm olabilir. Buna çözüm olarak ebeveynler ile çocuklar birebir karşılaştırılır ve iyi olan bir sonraki nesle aktarılır. Dikkat edilmesi gereken durum, her bir ebeveyn birey sadece bir çocuk birey ile karşılaştırılır. Benzer şekilde her bir çocuk birey sadece bir ebeveyn birey ile karşılaştırılır. Ayrıca, ebeveynler veya çocuklar kendi arasında karşılaştırılmaz. Bu durumda tüm ebeveyn ve çocuk bireyler sadece bir defa karşılaştırılma işleminde kullanılmış olurlar. Bu şekilde bir karşılaştırma işleminde en iyi birey her zaman hayatta kalır ve elitizm şartı sağlanmış olur. Bunun yanında iki iyi birey karşılaştırılır ve bir tanesi elenirken, diğeri bir sonraki nesle aktarılır. Benzer şekilde iki kötü birey de karşılaşılabilmektedir ve bunun sonucunda bir kötü birey elenirken diğeri bir sonraki nesle aktarılmaktadır. Bu açıdan

bakıldığında bir karşılaştırmada elenen bir birey, diğer bir karşılaştırma sonucu bir sonraki nesle aktarılan bireyden daha iyi olabilir. Yani, bu tür bir seçim mekanizmasında iyi bireylerin elenmesi ve kötü bireylerin bir sonraki nesle aktarılması ihtimali de bulunmaktadır. Bu durum algoritmanın hem yakınsama hızını düşürmeyecektir hem de yerel optimumdan kurtulabilmesini sağlayacaktır. Bu tez kapsamındaki çalışmalarda kullanılan evrimsel algoritmalarda bu tür bir seçim işlemi tercih edilmiştir.

### **2.2.3 Evrimsel algoritmalarda maliyet değeri**

Evrimsel algoritmaların çalışması ile ilgili bazı önemli durumlar söz konusudur. Bunların arasında algoritma parametreleri, başlangıç popülasyonun oluşturulması, maliyet fonksiyonunun belirlenmesi ve algoritmanın sonlandırılması yer almaktadır. Evrimsel algoritmalar genellikle rastgele üretilen, yani arama uzayında rastgele dağıtılan bireyler ile çalışmaya başlarlar. Eğer istenilen amaca yönelik bilinen bir çözüm kümesi varsa, bu çözümler algoritmaya başlangıç olarak verilebilir. Aksi halde, algoritma yerel optimuma takılı kalabilir. Bu yüzden, rastgele üretilen bireyler ile bir evrimsel algoritmayı başlatmak arama uzayında çok farklı yerlere dağılabilmeyi sağlar. Bu sayede bireyler arasındaki çeşitlilik artmış olur.

Bir diğer önemli konu ise bir iterasyondaki birey sayısıdır. Birey sayısının fazla olması, arama uzayında daha fazla alana yayılmayı sağlayabilir. Ancak, birey sayısının fazla olması algoritmanın çalışma süresini arttıracaktır. Özellikle pahalı (uzun süren) hesaplamalar gerektiren maliyet fonksiyonu hesaplamalarının olduğu bir algortmada birey sayısının fazla olması algoritmanın hızını büyük ölçüde yavaşlatacaktır.

Bireyler, kendi içlerinde parametre bilgilerini barındırırlar. Bir birey içerisinde bulunan parametreler aslında sistemde tasarlanması istenilen parametrelerdir. Algoritmanın çalışmasını etkileyen diğer etkenler ise algoritmanın mekanizmalarından kaynaklanan katsayı değerleri olabilmektedir. Bu tür evrimsel algoritmalarda rastgelelik söz konusu olduğu için bu rastgeleliği bir düzene oturtmak adına bazı katsayılar kullanılır. Örneğin; mutasyon katsayısı, bir bireydeki bir parametrenin mutasyona uğrama olasılığını belirleyen eşik değeridir.

Algoritmalarda her bir bireye karşılık bir maliyet değeri bulunmaktadır. Bireylerin maliyet değerleri kullanıcı tarafından belirlenen maliyet fonksiyonuna göre

hesaplanır. Eniyileme algoritmaları genellikle azaltma (minimizasyon) işlemi için kullanıldığından dolayı literatürde bu fonksiyonlara maliyet fonksiyonu denilmektedir. Eğer algoritma artırma (maksimizasyon) için kullanılırsa bu tür bir fonksiyona amaç fonksiyonu adı verilmektedir. Maliyet ve amaç fonksiyonları aslında aynı kavramlardır. Burada tek fark, algoritmanın minimizasyon veya maksimizasyon işlemi yapmasıdır. Bu fonksiyonlardan bahsedilirken genellikle maliyet fonksiyonu olarak bahsedilir, benzer şeylerin amaç fonksiyonu için de geçerli olduğu unutulmamalıdır.

Bir algoritmada maliyet fonksiyonunun belirlenmesi oldukça önemlidir ve dikkat gerektirmektedir. Hatalı veya eksik tanımlanan bir maliyet fonksiyonu algoritmanın yakınsamasını engelleyecektir. Bazı durumlarda, kullanılan eniyileme algoritmasının çok amaçlı eniyileme yapması da istenilebilir. Burada birden fazla amacın etkisini tek bir maliyet fonksiyonu altında birleştirmek gerekmektedir. Bu nedenle, farklı hedeflerin ortak maliyet fonksiyonunu nasıl etkileyeceğini dikkatli kararlaştırmak gerekmektedir. Burada, ağırlıklandırma katsayılarından faydalanılır. Örneğin; çok amaçlı bir eniyileme işlemi için seçilen algoritmadaki maliyet fonksiyonu ( $f$ ) aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

$$f = w_1|x - x_d| + w_2|y - y_d| \quad (2.1)$$

Burada,  $x_d$  ve  $y_d$  hedeflerin sayısal değerleridir.  $x$  ve  $y$  ise, eldeki bireyin hesaplanan performans değerlerini göstermektedir. Hesaplanan değerler ile ulaşılması istenilen değerler arasındaki farkı azaltma işlemi bir minimizasyon işlemidir. Ancak, birden fazla hedef olduğu için bunların maliyet fonksiyonlarına olan etkilerini dengelemek gerekmektedir. Bunun için  $w_1$  ve  $w_2$  gibi ağırlıklandırma katsayıları kullanılmaktadır. Eğer bu ağırlıklandırma katsayıları kullanılmazsa, algoritma istemsizce iki hedeften kolay olanına yönelebilir ve sadece onu iyileştirmeye çalışabilir. Bir başka durum ise, ulaşılması istenilen hedeflerin sayısal değerlerden biri diğerinden görece çok büyük olabilir. Bu durumda da bir hedef için hesaplanan fark değeri küçük ise maliyet fonksiyonuna olan etkisi az olacaktır ve algoritma sayısal olarak küçük fark değerine sahip hedefi iyileştirmek yerine sadece sayısal olarak büyük fark değerine sahip hedefi iyileştirmeyi seçecektir. Bu durum algoritmanın çok amaçlı bir eniyileme yapmasını engelleyecektir. Bu nedenle maliyet fonksiyonunun ve ağırlıklarının dikkatli belirlenmesi algoritmanın yakınsaması için oldukça önemlidir.

Algoritmaya hedef olarak çok zor değer koymak algoritmanın asla iyi bir sonuca ulaşamamasına da neden olabilir. Çünkü eniyileme algoritmaları en iyi çözümün bilinmediği tasarım problemlerinde kullanılırlar. Maliyet fonksiyonu ile belirlenen hedef belki de teorik olarak gerçekleşmesi mümkün olmayan bir hedeftir. Bu nedenle, algoritmaya ulaşılması mümkün olmayan hedefler tanımlanmamalıdır. Aksi halde, algoritma hedeflerden sadece birini iyileştirmeyi seçebilir.

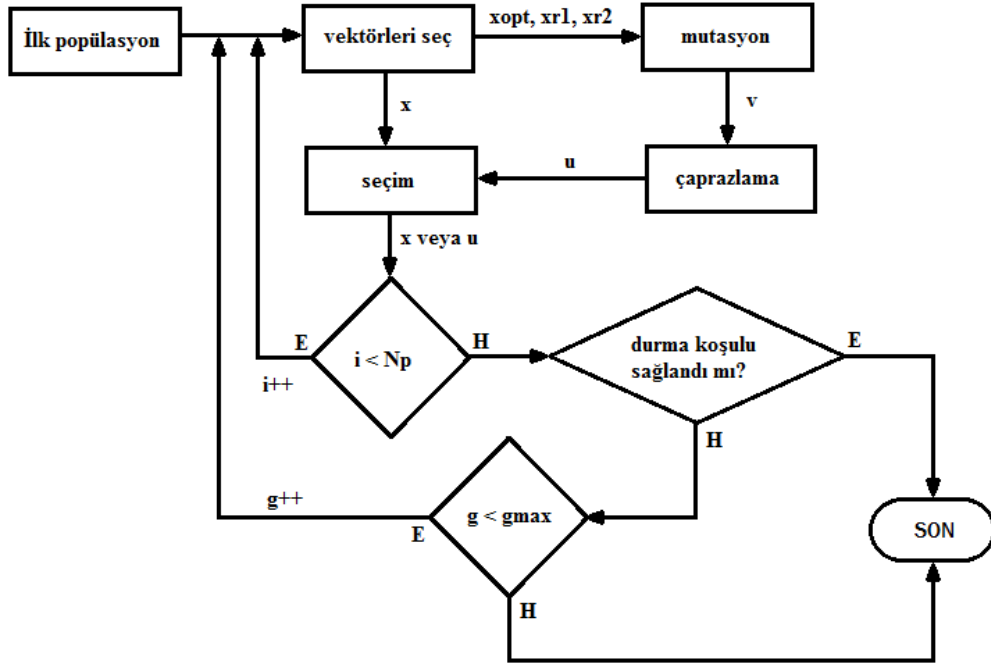
Bu noktada şöyle bir yöntem izlenebilir: yeteri kadar iyi olan ve ulaşılmasının kolay olacağı tahmin edilebilen bir hedef için maliyet fonksiyonu belirlenir ve algoritmanın çalışması takip edilir. Eğer algoritma istenilen hedefe ulaşabiliyorsa, bir sonraki adım olarak maliyet fonksiyonu değiştirilir ve algoritmaya daha zor bir hedef gösterilir, yani algoritmanın daha iyi bir sonuç bulması istenebilir. Burada algoritmanın nasıl çalıştığının da takip edilmesi önemlidir. Bu sebeple algoritmanın her iterasyona kadar bulduğu en iyi bireye ait maliyet fonksiyonu değerinin kaydedilmesi gerekir. Örneğin; minimizasyon işlemi yapılıyorsa maliyet fonksiyonu değerinin iterasyon sayısı arttıkça azalması beklenir. İlk iterasyonlarda maliyet fonksiyonunun değerinin azalma hızı yüksek olabilir ancak iterasyon sayısı arttıkça bu azalma hızının düşmesi beklenir. Aksi halde, sürekli hızlı bir şekilde azalan maliyet fonksiyonu değeri algoritmanın yerel optimuma gitmekte olduğunu gösterir. Ayrıca, eğer bir algoritmada uzun iterasyonlar boyunca maliyet fonksiyonu değeri sabit kalmışsa, bu durum algoritmanın yerel optimumda takılı kaldığını gösterir. Bu durumda çaprazlama veya seçim mekanizmasının veya maliyet fonksiyonunun değiştirilmesi gerekmektedir. Eğer bir algoritmanın maliyet fonksiyonu değeri uzun bir süre sabit kalmış ve sonrasında tekrar azalmaya başlamışsa bu algoritmanın yerel optimumdan kurtulabilme becerisinin olduğu anlaşılır ve bu iyi bir durumun göstergesidir.

### **2.3 Diferansiyel Evrim Algoritması**

DE meta-sezgisel bir yöntem olmakla beraber evrimsel algoritmalar sınıfına dahil edilmektedir. Önceki bölümlerde bahsedildiği üzere çaprazlama, mutasyon ve seçim gibi mekanizmalar DE algoritmasında da yer almaktadır [55]. DE, bazı klasik arama algoritmaları gibi gradyan tabanlı değildir ve problemin yani maliyet fonksiyonunun türevinin alınabilmesine gerek duyulmaz. DE, vektör tabanlı çalışan bir eniyileme algoritmasıdır. DE algoritması, sahip olduğu birey oluşturma ve çaprazlama mekanizmalarına göre farklı gösterimlere (notasyonlara) sahiptir. Örneğin



DE/rand/1/bin gösterimi klasik bir DE algoritmasıdır. Burada “rand” kısmı çaprazlama işlemindeki baz vektörün rastgele seçildiğini gösterir. “1” ifadesi ise çaprazlama işleminde bir adet vektör farkı kullanıldığını işaret eder. Son olarak “bin” ifadesi ise çaprazlama işleminin binom dağılımına göre yapıldığını gösterir.



Şekil 2.2 : DE algoritmasının akış şeması.

Bu tezde kullanılan DE algoritması ise “DE/best/1/bin” gösterimine sahiptir. Burada “best” ifadesi bireyler oluşturulurken kullanılan baz vektörün popülasyondaki en iyi birey olduğunu gösterir. Bu tezde kullanılan DE algoritmasının akış şeması Şekil 2.2’de verilmiştir.

### 2.3.1 Başlangıç popülasyonu

Genel olarak DE algoritmasında başlangıç popülasyonu  $N_P$  sayıda rastgele bireyden oluşur. Burada, rastgele ile bahsedilen durum bireylerin parametrelerinin oluşturulma yöntemidir. Öncelikle bireylerin parametrelerinin sahip olacağı alt ( $b_L$ ) ve üst ( $b_U$ ) limitler ayrı ayrı belirlenir. Birey parametrelerinin rastgele oluşturulması aşağıdaki denklem ile ifade edilebilir.

$$x_i = rand_i(0,1). (b_i^U - b_i^L) + b_i^L \quad (2.2)$$

Burada,  $x$  ifadesi  $D$  sayıda parametreden oluşan bir bireyi,  $i$  alt indisi ise bireydeki parametre sırasını gösterir:  $i=1, \dots, D$ . Her bir parametre için farklı alt ve üst sınırlar

belirlenebilir. Bu denklemdeki  $rand_i(0,1)$  ifadesi her parametre için birbirinden farklı  $[0,1]$  aralığından rastgele reel sayılar üretildiğini gösterir. Algoritma çalıştırılmadan önce birey parametreleri için alt ve üst limitlerin doğru belirlenmesi çok önemlidir. Çok geniş bir aralık belirlemek algoritmanın çalışma hızını düşürecektir. Yanlış bir aralık belirlenirse algoritma hiçbir zaman iyi bir sonuç bulamayacaktır.

### 2.3.2 Mutasyon

DE algoritmasında çaprazlama işlemi öncesinde ilk olarak mutasyon işlemi gerçekleştirilmektedir. Popülasyondaki bireyler kullanılarak önce mutant bireyler ( $v$ ) oluşturulur. Bu işlem için aşağıdaki ifade kullanılır.

$$v_i = x_{opt} + F(x_{r1} - x_{r2}) \quad (2.3)$$

Burada  $opt$  indisi baz vektör için popülasyondan seçilen en iyi (optimum) bireyi temsil etmektedir. Yani, bu tezde kullanılan “DE/best/1/bin” ifadesine göre  $opt$  indisli birey, popülasyondaki en iyi bireydir.  $r_1$  ve  $r_2$  indisleri ise popülasyondan rastgele seçilen diğer bireyleri temsil etmektedir.  $r_1$  ve  $r_2$  indisli bireyler kullanılarak bir adet vektör farkı işlemi kullanılmıştır. Bu vektör farkı,  $F$  ile gösterilen mutasyon katsayısı ile çarpılmıştır. Mutasyon katsayısı algoritma çalıştırılmadan önce  $[0,2]$  aralığından seçilerek kullanıcı tarafından belirlenir ve algoritma çalıştığı sürece değeri değiştirilmez. Mutasyon katsayısı ile çarpılan vektör farkı ile en iyi bireyin sahip olduğu değer toplanır ve mutant birey elde edilir. Burada özellikle  $r_1$  ve  $r_2$  vektörlerinin eşit olmaması istenmektedir. Eğer eşit olsalardı  $(x_{r1}-x_{r2})$  ifadesi sıfıra eşit olacaktır ve oluşan mutant vektör popülasyondaki en iyi bireye eşit olacaktır. Bunun sonucunda ise algoritmanın yakınsama hızı düşecektir. Mutasyon işlemi sonucunda popülasyondaki birey sayısı kadar mutant birey oluşturulur. “DE/best/1/bin” algoritmasına göre her mutant birey oluşturulurken  $r_1$  ve  $r_2$  bireyleri tekrardan ve rastgele seçilir. Bu sayede, oluşan mutant bireylerin birbirlerinden farklı olması sağlanır. Ayrıca, mutasyon sonucu oluşan bireylerin parametrelerinin alt ( $b_L$ ) ve üst ( $b_U$ ) sınırlar arasında bulunması gerekmektedir. Sınırların dışına çıkan parametreleri tekrar sınırlar arasına getirebilmek için bir ceza fonksiyonu tanımlanmalıdır. Aksi halde, iterasyonlar boyunca biriken hata sonucunda ilerleyen iterasyonlarda elde edilen bireylerin parametre değerleri sınırların dışında ve sınırlara oldukça uzak olacaktır. Mutasyon ile oluşturulan bireylerin parametrelerinin sınırlar

içerisinde değer almaması durumu algoritmanın gerçekçi olmayan hedef bulmasına veya hiçbir zaman hedefe ulaşamamasına neden olacaktır.

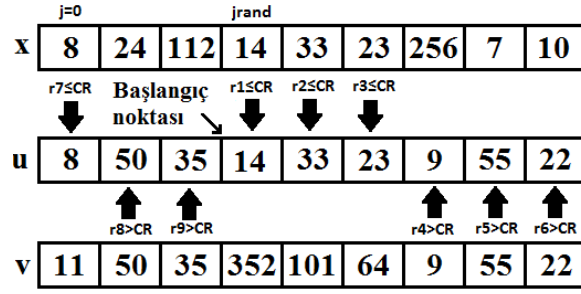
Mutasyon işlemi için önemli bir etken olan mutasyon faktörünün doğru belirlenmesi algoritmanın yakınsama hızı bakımından oldukça önemlidir. Genellikle, mutasyon faktörünün [0.5,1] aralığından seçilmesi önerilir. Ayrıca bireydeki parametre sayısı artırılırsa mutasyon faktörünün değerinin azaltılması algoritmanın daha hızlı yakınsama yapmasını sağlar. “DE/best/1/bin” gösterimindeki bir DE algoritması, “DE/rand/1/bin” gösterimindeki klasik DE algoritmasından daha hızlı yakınsama yapar. Ancak, parametre sayısının fazla olduğu durumlarda “DE/best/1/bin” yöntemi istenilen sonuca ulaşamayabilir.

### 2.3.3 Çaprazlama

DE algoritmasında popülasyondaki bireyler ( $x$ ) ve bu bireylerden oluşturulan mutant bireyler ( $v$ ) kullanılarak çaprazlama işlemi gerçekleştirilir. Bunun sonucunda deneme bireyleri ( $u$ ) elde edilir. Bu tezde kullanılan binom çaprazlama mekanizması aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$u_{j,i} = \begin{cases} v_{j,i} , & rand_j(0,1) \leq Cr \vee j = j_{rand} \\ x_{j,i} , & rand_j(0,1) > Cr \wedge j \neq j_{rand} \end{cases} \quad (2.4)$$

Burada,  $Cr$  çaprazlama faktörünü gösterir ve algoritma çalıştırılmadan önce kullanıcı tarafından belirlenir. Bu faktörün değeri algoritma çalışırken değişmemektedir.  $j$  indisi ve  $i$  indisi sırasıyla parametre ve birey sıralarını temsil eder;  $j=1, \dots, D$ ,  $i=1, \dots, N_P$ . Çaprazlama işlemi sonucunda elde edilecek bir deneme bireyinin hangi parametresinin popülasyondaki bireyden veya mutant bireyden geleceğini belirlemek için [0,1] aralığından rastgele sayılar üretilir. Bu üretilen sayılar her bir birey için farklıdır ve  $rand_j(0,1)$  ile ifade edilir. İlgili birey için üretilen bu rastgele sayı çaprazlama faktörü ile karşılaştırılır. Eğer çaprazlama vektörü bu rastgele sayıdan büyükse veya bu sayıya eşitse deneme bireyinin ilgili parametresi mutant vektörün parametresinden elde edilir. Aksi halde deneme bireyinin ilgili parametresi olarak popülasyondaki bireyin parametresi kullanılır.



Şekil 2.3 : Binom çaprazlama şeması.

Çaprazlama işlemi yapılırken popülasyondaki bir birey ve bir mutant birey çaprazlanır. Her bir popülasyon bireyi ve mutant birey yalnızca bir defa çaprazlama işleminde kullanılır. Popülasyondaki iki bireyin veya iki mutant bireyin çaprazlanması söz konusu değildir. Örnek olarak bir binom çaprazlama şeması Şekil 2.3'te verilmiştir.

### 2.3.4 Seçim

Bu tezde kullanılan DE algoritmasının seçim yöntemi önceden bahsedildiği üzere popülasyondaki bireyler ile çaprazlama sonucu oluşan deneme bireylerinin birbir karşılaştırılmasıdır. Karşılaştırma sonucu iyi olan bireyler bir sonraki nesle aktarılırken kötü bireyler algoritmadan elenir. Hiçbir birey birden fazla karşılaştırma işlemine girmez. Popülasyondaki bireyler kendi aralarında karşılaştırılmazlar. Benzer şekilde bir deneme bireyinin bir başka deneme bireyi ile karşılaştırılması da engellenmiştir. Burada, popülasyon bireyleri ebeveynleri, deneme bireyleri ise çocukları temsil etmektedir. Kullanılan seçim mekanizması matematiksel olarak aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$x_{i,g+1} = \begin{cases} u_{i,g}, & f(u_{i,g}) \leq f(x_{i,g}) \\ x_{i,g}, & f(u_{i,g}) > f(x_{i,g}) \end{cases} \quad (2.5)$$

Burada,  $f(u)$  ve  $f(x)$  ifadeleri sırasıyla bir deneme bireyinin ve bir popülasyon bireyinin hesaplanmış maliyet fonksiyonu değerlerine karşılık gelmektedir. Yine burada minimizasyon için kullanılan bir DE algoritmasına göre maliyet fonksiyonu daha düşük olan birey tercih edilmektedir ve bu birey bir sonraki nesle aktarılmaktadır. Bu denklemdeki  $g$  indisi o anki nesli (iterasyon numarasını),  $g+1$  indisi ise bir sonraki nesli temsil etmektedir.

### 2.3.5 Sonlandırma

Bu tezde kullanılan DE algoritmasının durdurma koşulu olarak maksimum iterasyon sayısına ulaşması veya maliyet fonksiyonu değerinin uzun iterasyonlar boyunca azalmaması durumları kullanılmıştır. Bu nedenle algoritma maksimum iterasyon sayısına ulaşmadan sonlanmaması için algoritmaya ulaşmasının görece zor olduğu bir hedef belirlenmiştir. Bu sayede algoritma istenilen hedefe ulaşamamakta ve maksimum iterasyon sayısına ulaştığında sonlanmaktadır. Bu yöntemin kullanılmasının bir diğer sebebi ise yanlış bir maliyet fonksiyonu belirlenmişse algoritma bu hedefe hızlıca ulaşabilir ve sonlandırılır. Bu durum bir bakıma maliyet fonksiyonunun hatalı olduğu durumda uyarı veren bir sistemdir. Bazen de algoritma maksimum iterasyon sayısına ulaşmadan görece iyi bir sonuç bulmakta ve uzun iterasyonlar boyunca bu sonucu iyileştirememektedir. Bu durumda da yine algoritma sonlandırılmıştır.

Bu tez kapsamında kullanılan “DE/best/1/bin” algoritması için akış şeması daha önce Şekil 2.2’de verilmiştir. Akış şemasından görüldüğü üzere başlangıçta rastgele olarak ilk popülasyon oluşturulur ve algoritmanın iteratif döngüsüne girilir. Döngü içerisinde mutasyon, çaprazlama ve seçim mekanizmaları gerçekleştirilerek yeni nesil oluşturulur. Maksimum iterasyon sayısına ulaşıldığında döngüden çıkılır ve algoritma sonlandırılır.

### 2.3.6 Diferansiyel Evrim algoritmasının kullanımı

DE algoritması çalışma mekanizması gereği reel sayılara ihtiyaç duymaktadır. Bunun sebebi mutasyon işlemi sırasında çıkarma işleminin yapılıyor olmasıdır. DE kullanılarak tasarlanan bir sistemde tasarım parametreleri belirlenen bir değer aralığından arasından seçilir. Bahsedilen çıkarma işlemi sonucunda yeni oluşacak parametreler de yine bu aralıktan oluşacaktır ve kendisini oluşturan sayılardan farklı olabilecektir. Bu durumun fotonik cihaz tasarımındaki etkisine bakacak olursak, dielektrik çubuklardan oluşan bir fotonik kristal (FK) yapısında çubukların pozisyonları ve yarıçapları birer tasarım parametresi olarak düşünülebilir. Bu parametrelerin istenilen aralıkta değerler almasını sağlamak için DE algoritması kullanılır. Ancak, tüm fotonik cihazlarda tasarım parametreleri bu şekilde olmayabilir. Örneğin; pozisyonları ve yarıçapları sabit olan dielektrik çubukların bazılarının yapıdan çıkarılması bazılarının yapıda mevcut olarak bulunması

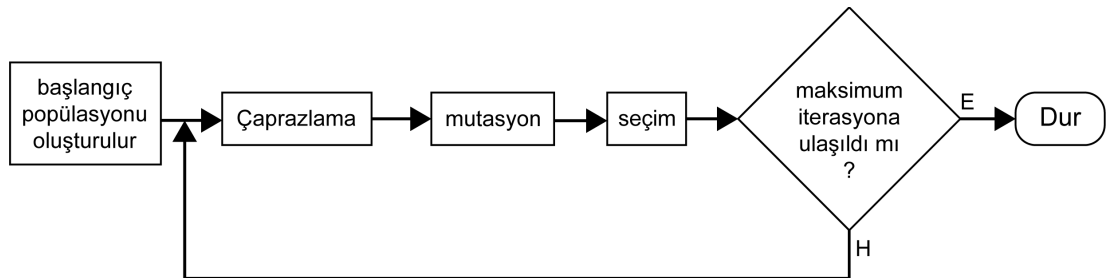
istenilebilir. Bu durumda tasarım parametreleri belirli bir aralıkta değer almaz, aksine iki farklı değer almaktadır. Bu iki farklı değerden kasıt ilgili çubuğun yapıda olması veya olmaması durumudur. Yani tasarım problemi 0 ve 1'e karşılık gelecek tasarım parametrelerine sahip olabilir. Burada 0 sayısı ile ilgili çubuğun yapıdan çıkarılması, 1 sayısı ile çubuğun yapıda bulunması modellenebilir. Bir çubuğun yapıda bulunması veya bulunmaması dışında farklı bir niteliğe sahip olması mümkün değildir. Bu gibi tasarım problemlerinde DE algoritması, mutasyon mekanizması sebebi ile yeterli sonuçlar verememektedir. Tasarım parametrelerinin 0 veya 1 olduğu durumlarda çıkarma işlemi yapılırsa elde edilecek sonuçlar da yine 0 veya 1 olacaktır. Bu durum, DE'deki mutasyon mekanizmasını etkisiz kılacaktır. Bunun sonucunda algoritmanın çalışması rastgele bir hale gelebilir ve algoritma istenilen sonuca ulaşamayabilir. Bu gibi durumlarda, yani tasarım parametrelerinin belirli bir aralıktan değer almak yerine 0 veya 1 gibi ifade edilebildiği problemlerde, doğrudan ikilik tabanlı sayılarla işlem yapabilecek bir algoritmanın kullanılması daha etkili olacaktır. Bu nedenle, GA gibi ikilik tabanlı sayılar ile çalışabilen bir algoritmanın kullanılması gerekmektedir. Tez kapsamında önerilen fotonik cihazların bazılarında konumsal ve boyutsal olarak eniyileme işlemi yapılmaktadır. Bu gibi tasarımlar için DE algoritması kullanılacaktır. Ancak, konum ve boyuttan bağımsız olarak ikilik tabanlı sayılar ile modellenebilecek bir tasarım problemi olduğunda GA'nın veya makine öğrenmesinin kullanılması gerekmektedir.

## **2.4 Genetik Algoritma**

GA bilinen en popüler ve en yaygın kullanılan evrimsel algoritmadır [54]. Kodlanması kolay ve mekanizmalarının çalışma mantığı sade olduğu için birçok disiplindeki araştırmacılar tarafından tercih edilmektedir. GA ile DE evrimsel algoritmalar oldukları için temelde benzerlikler gösterirler. Bu benzerlikler her iki algortmada da benzer mekanizmaların olmasıdır. Bu nedenle bir evrimsel algortmada kullanılan bir mekanizmanın benzeri bir diğer evrimsel algortmada da kullanılabilir. Ancak, GA ile DE arasında fark yaratan en önemli etken çalıştıkları tasarım parametreleridir. DE reel sayılar ile çalışabilirken GA sadece ikilik tabanlı (binary) sayılar ile çalışabilmektedir. GA ile reel sayılı parametreleri kullanarak tasarım yapmak istendiğinde "encoding" olarak bilinen işlemin uygulanması gerekmektedir. Bu işlem reel sayıları ikilik tabanlı sayılara çevirmektir. Burada

yapılan işlem aslında seçilen reel sayı aralığının sonlu sayıda küçük aralıklara bölünmesidir. Bu küçük aralıklar arasındaki noktalara yani reel sayılara karşılık ikilik tabanlı bir sayı bulunmaktadır. Bahsedilen encoding işlemi aslında seçilen reel sayı aralığının kesiklendirilmesidir. Bu çevirim işlemi yapıldıktan sonra GA'nın çaprazlama, seçim ve varsa mutasyon işlemleri gerçekleştirilir. Ancak, maliyet fonksiyonu değerlerinin hesaplanması için gerçek parametrelere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle encoding ile ikilik tabanlı sayılara çevrilen parametreler tersi bir işlemle, yani "decoding" ile, tekrar reel sayılara dönüştürülürler ve maliyet fonksiyonunun hesaplanmasında kullanılırlar. Bu tezde kullanılan GA sadece ikilik tabanlı parametrelere sahip tasarımlar için kullanılmıştır. Bu nedenle, kodlanan GA'da "encoding" ve "decoding" işlemleri bulunmamaktadır. Bunun nedeni, "encoding" ve "decoding" kullanıldığında kesiklendirmelerin arasında kalan reel değerler problemin çözümü için iyi sonuç veriyor olabilir ve GA kullanıldığında bu reel değerler göz ardı edilecektir. Bunun sonucunda da GA'nın istenilen iyi sonuca ulaşması mümkün olmayacaktır.

Bu tezde kullanılan GA'nın tüm mekanizmalarını detaylı olarak açıklayan akış şeması Şekil 2.4'te verilmiştir. Ayrıca, Şekil 2.4'teki sıralamaya göre algoritmanın adımları detaylı bir şekilde açıklanmıştır.



Şekil 2.4 : GA'nı akış şeması.

#### 2.4.1 Başlangıç popülasyonu

Evrimsel algoritmalarda olduğu gibi GA da başlangıçta rastgele oluşturulan bireylerden oluşan popülasyon ile çalışmaya başlar. Bahsedildiği üzere GA ikilik tabanlı parametrelere sahip olacağı için bireyleri oluşturan parametreler 0 veya 1 değerlerini almak zorundadır. Bu sebeple, başlangıç popülasyonundaki herhangi bir birey oluşturulurken aşağıdaki gibi ifade kullanılır.

$$x_i = \begin{cases} 1, & rand(0,1) \geq 0.5 \\ 0, & rand(0,1) < 0.5 \end{cases} \quad (2.6)$$

Burada  $i$  alt indisi  $D$  sayıda parametreye sahip bir bireydeki parametre sırasını gösterir:  $i=1, \dots, D$ . Burada yapılan işlem basit bir yuvarlama işlemidir.  $[0,1]$  aralığında rastgele üretilen sayılar  $0.5$ 'ten küçük ise  $0$  olarak güncellenir, değilse  $1$  olarak değiştirilir. Bu şekilde  $0$  ve  $1$ 'lerden oluşan parametrelere sahip rastgele bireyler elde edilir.

#### 2.4.2 Çaprazlama

Başlangıç popülasyonu oluşturulduktan sonra GA'nın döngüsüne girilir. Bu döngüde uygulanan ilk mekanizma çaprazlama işlemidir. GA'da çok farklı çaprazlama yöntemleri mevcuttur. Çaprazlama işleminde iki veya daha fazla birey kullanılabilir. Çaprazlama işlemi sonucunda da bir veya daha fazla birey oluşturulabilir. Örneğin; iki ebeveyn bireyin çaprazlandığı ve iki çocuk bireyin oluşturulduğu çaprazlamaya sahip bir GA kodlanabilir. Çaprazlama yapılırken iki ebeveyn bireyin bazı bölümleri, yani parametreleri, karşılıklı olarak yer değiştirir. Bu yer değiştirme işleminde parametrelerin ayrıldığı kısımlar bulunmalıdır. Bu kısımlar nokta (düğüm noktası) olarak adlandırılırlar ve çaprazlama yöntemleri genellikle nokta sayısına göre isimlendirilir. Örneğin; tek nokta çaprazlama da her iki ebeveyn birey kendi içlerinde bir noktadan ayrılırlar, yani iki parçaya ayrılmış olurlar. Bu iki parçadan biri diğer ebeveyn bireye verilirken, bu parça ile aynı sayıda parametreye sahip karşı ebeveyn bireydeki parça alınır. Bunun için dikkat edilmesi gereken kısım seçilen noktanın her iki ebeveyn birey için de aynı olmasıdır; yani seçilen noktanın her iki ebeveyn bireyi de karşılıklı eş sayıda parametrelere sahip parçalara ayırmasıdır. Bu örnek en basit şöyle anlatılabilir:  $D$  sayıda parametreye sahip iki ebeveyn birey de  $K$  ve  $D-K$  sayıda parametrelerde oluşan parçalara ayrılır. Çaprazlama sonucu oluşturulacak birinci çocuk bireyin  $K$  sayıda parametresi birinci ebeveynden,  $D-K$  sayıda parametresi ise ikinci ebeveynden gelir. İkinci çocuk birey de ise durum tam tersidir; ikinci ebeveyn bireyin  $K$  sayıda parametresi ikinci çocuk bireyin ilk kısmını, birinci ebeveyn bireyin  $D-K$  sayıda parametresi ise ikinci çocuk bireyin kalan kısmını oluşturur. Özetle; çaprazlama noktasına gelindiğinde ebeveyn bireylerin geri kalan parametreleri karşılıklı yer değiştirir. Daha fazla sayıda çaprazlama noktası olduğunda da bu durum kendisini tekrar ederek çocuk bireyler oluşturulur.



Bu tez kapsamında kullanılan GA'da kodlanan çaprazlama işlemi ise nokta sayısına göre çaprazlama işleminden daha farklıdır. Öncelikle, çaprazlama işlemi için iki birey kullanılır ve bu bireylerden bir tanesinin kesinlikle popülasyondaki en iyi birey olması şartı aranır. Yani, çaprazlama işlemindeki bir birey aslında en iyi ebeveyn bireydir. Çaprazlamada kullanılacak ikinci birey ise popülasyonda geriye kalan, yani en iyi birey hariç, diğer bireyler arasından rastgele seçilir. Eğer ikinci ebeveyn birey de en iyi birey olursa, yani ebeveyn birey kendisi ile çaprazlanırsa, oluşacak çocuk birey de ebeveyn bireyin aynısı olacaktır. Bu durumda aynı bireyin tekrar oluşturulması sonucunda popülasyondaki çeşitlilik azalacaktır.

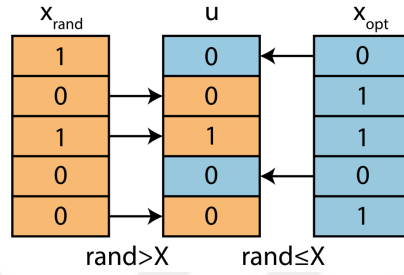
Bu tezde kullanılan çaprazlama işlemi için iki ebeveyn birey kullanılırken, çaprazlama sonucunda bir çocuk birey oluşturulur. Ebeveyn sayısı kadar çocuk birey oluşturuluncaya kadar çaprazlama işlemi tekrarlanır. Burada dikkat edilmesi gereken kısım en iyi bireyin her çaprazlama işleminde kullanılması, ancak çaprazlamada ikinci bireyin her defasında rastgele seçilmesidir. Bu sayede algoritmanın o iterasyona kadar bulduğu en iyi bireyden her defasında yararlanır ve popülasyondaki birey çeşitliliğinin artması sağlanır.

Çaprazlama işlemi için kullanıcı tarafından  $[0,1]$  aralığından bir sayı çaprazlama faktörü ( $X$ ) olarak seçilir ve algoritma çalıştığı sürece bu faktörün değeri değişmez. Çaprazlama işlemi yapılırken oluşturulacak bir çocuk bireyin ( $u$ ) hangi parametresinin en iyi ebeveyn bireyden ( $x_{opt}$ ) hangisinin rastgele seçilen ebeveyn bireyden ( $x_{rand}$ ) geleceğini kararlaştırmak için çaprazlama faktöründen faydalanılır. Öncelikle, çocuk bireyin her parametresi için  $[0,1]$  aralığında rastgele sayılar üretilir. Üretilen bu sayılar teker teker çaprazlama faktörü ile karşılaştırılır. Eğer çocuk bireyin bir parametresi için üretilen rastgele sayı çaprazlama faktöründen büyükse çocuk bireyin ilgili parametresi rastgele seçilen ebeveyn bireyden gelir. Aksi halde çocuk bireyin ilgili parametresi en iyi ebeveyn bireyden gelir. Bahsedilen çaprazlama işlemi matematiksel olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$u_i = \begin{cases} x_{opt,i}, & rand(0,1) \leq X \\ x_{rand,i}, & rand(0,1) > X \end{cases} \quad (2.7)$$

Burada  $i$  indisi parametre sırasını göstermektedir:  $i=1, \dots, D$ . Çaprazlama faktörü, algoritmanın yakınsamasına doğrudan etki etmektedir. Eğer çaprazlama katsayısı için küçük bir değer belirlenirse çocuk bireylerin parametrelerinin çoğunun rastgele

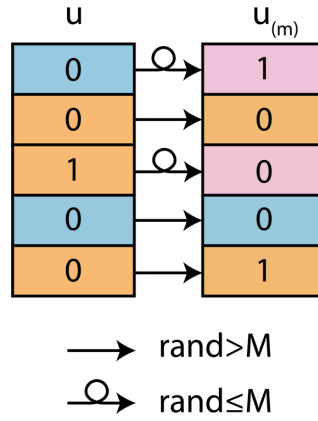
seçilen ebeveyn bireylerden gelme ihtimali artar, bu durum da algoritma rastgele çalışmaya başlar. Sonuç olarak algoritmanın yakınsama hızı azalacaktır. Eğer çaprazlama faktörünün değeri büyük olacak şekilde belirlenirse çocuk bireylerin parametrelerinin çoğu en iyi ebeveyn bireyden gelir. Sonuç olarak algoritma yerel optimuma yönelebilir. Bu sebeple, çaprazlama faktörünün değeri algoritmanın belirlenen hedefe ulaşması için oldukça önemlidir. Şekil 2.5'te GA'da kullanılan çaprazlama işlemi şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.5 : GA'da çaprazlama işlemi.

### 2.4.3 Mutasyon

Bu tezde kullanılan GA'da çaprazlama sonucu oluşan çocuk bireyler mutasyona uğratılmıştır. Bahsedildiği üzere çocuk bireylerin mutasyona uğrama ihtimallerinin artırılması algoritmanın rastgele çalışmasına, çaprazlama işleminin anlamını yitirmesine ve yakınsama hızının düşmesine neden olabilir. Mutasyon işleminin kullanılması zorunlu değildir. Ancak, düşük ihtimallerde gerçekleştirilecek mutasyonlar ile algoritmanın yerel optimumdan kurtulması sağlanabilir. Kullanılan mutasyon mekanizması bir bakıma çaprazlama işlemi ile benzerlik göstermektedir. Öncelikle  $[0,1]$  aralığından bir mutasyon katsayısı ( $M$ ) belirlenir ve çocuk bireyin her bir parametresi için  $[0,1]$  aralığından rastgele sayılar üretilir. Üretilen bu rastgele sayılar ile mutasyon katsayısı karşılaştırılır. Eğer üretilen rastgele sayı mutasyon katsayısından büyükse ilgili parametrede mutasyon olmaz. Aksi durumda ise mutasyon işlemi gerçekleştirilir. Mutasyon işlemi ile kastedilen durum çocuk bireyin parametresinin değiştirilmesidir.



Şekil 2.6 : GA’da mutasyon işlemi.

Önceden bahsedildiği üzere GA ikilik tabanlı sayılar ile çalışmaktadır ve bireylerin parametreleri 0 veya 1 olabilmektedir. Bu nedenle, mutasyona uğrayan çocuk bireyin bir parametresi eğer 0 ise değeri 1 olarak güncellenir. Benzer şekilde tam tersi durum da söz konusudur, yani çocuk bireyin bir parametresi 1 ise ve bu parametre mutasyona uğruyorsa değeri 0 olarak güncellenir. Bu mutasyon işlemi aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$u_i = \begin{cases} 1 - u_i, & rand(0,1) \leq M \\ u_i, & rand(0,1) > M \end{cases} \quad (2.8)$$

Mutasyon katsayısının seçimi oldukça önemlidir. Yukarıda da bahsedildiği üzere mutasyon katsayısının değeri algoritmanın çalışmasını olumsuz yönde etkileyebilir. Burada dikkat edilmesi gereken kısım mutasyon katsayısının çok küçük bir değere sahip olması gerekmektedir. Aslında bu durum bir bakıma doğal hayattaki mutasyonun da bir benzeridir. Biyolojide mutasyon, dış etkenler ile çok düşük ihtimalle ortaya çıkan gen bozukluklarıdır. Yukarıda bahsedildiği üzere biyolojideki gen kavramı evrimsel algoritmalarındaki birey parametrelerine denk gelmektedir. Buradan hareketle, doğal yaşamdaki gibi mutasyonun oluşma ihtimalinin çok düşük olarak belirlenmesi gerekmektedir. Aksi halde oluşacak çocuk bireylere ebeveynlerinden gelen anlamlı gen sayısı azalacaktır ve çocuklar ebeveynlerine benzemeyecektir. Bir başka deyişle, yüksek oranda gerçekleşen mutasyon mekanizması çaprazlama mekanizmasının anlamını yitirmesine neden olacaktır. Bu durum algoritma kısmında ise tarama uzayında bir yöne ilerleyememek ile benzerlik göstermektedir. Ayrıca, mutasyon işleminin GA’da zorunlu olmamasının bir sebebi de doğada sık rastlanan bir durum olmamasıdır. Şekil 2.6’da GA’da kullanılan çaprazlama işlemi şematik olarak gösterilmiştir.

#### **2.4.4 Seçim**

GA'da yaygın olarak kullanılan çok farklı seçim yöntemleri bulunmaktadır. Örneğin bunlardan biri rulet yöntemidir. Bu yöntemde bir sonraki nesle aktarılacak bireyler rastgele seçilir. Ancak, bu seçim işleminde tüm bireylerin seçilme ihtimali aynı değildir. Bireylerin seçilme ihtimalleri bireylerin maliyet fonksiyonu değerleri ile oranlanmıştır. Bu sayede iyi bireylerin seçilme ihtimalleri artarken, kötü bireylerin seçilme ihtimali azalmıştır. Ancak bu tür seçim işlemi her zaman başarılı olmamaktadır ve kodlanması karmaşıktır. Ayrıca, yukarıda bahsedildiği gibi yaşa veya amaca göre seçim yöntemleri de yine GA için kullanılabilir.

Bu tezde DE için kullanılan seçim işleminin aynısı GA için de kullanılmıştır. Bu seçim işlemi elitist olduğu için, yani her zaman en iyi bireyi bir sonraki nesle aktardığından dolayı, tercih edilmiştir. Çünkü GA'da çaprazlama işleminde en iyi birey mutlaka kullanıldığı için algoritmanın çalıştığı iterasyona kadar bulduğu en iyi bireyin elenmemesi önemlidir. Ayrıca, yeni nesle aktarılan bireyler arasında sadece iyi bireyler değil, kötü bireyler de bulunmaktadır. Bu sayede algoritma yerel optimumlardan kaçabilmektedir.

#### **2.4.5 Sonlandırma**

Bu tezde kullanılan GA'nın sonlandırılması da DE ile benzerlik göstermektedir. Algoritma belirlenen maksimum iterasyon sayısına ulaştığında veya uzun iterasyonlar boyunca maliyet fonksiyonu değeri azalmadığında algoritma sonlandırılır.

### **2.5 Makine Öğrenmesi**

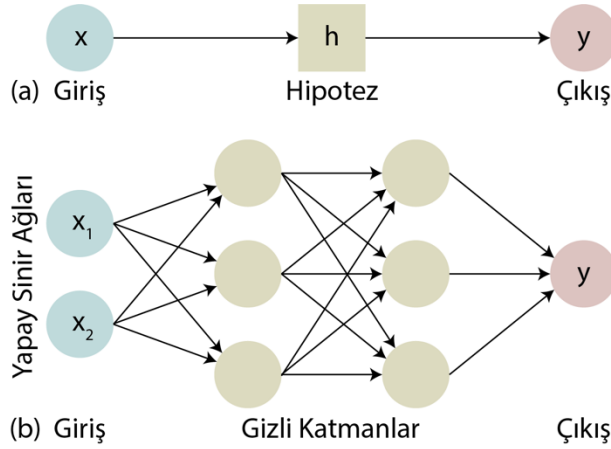
Evrimsel eniyileme algoritmalarına ek olarak bu tezde makine öğrenmesine dayalı hesaplama tabanlı yaklaşımlar da kullanılmıştır. Makine öğrenmesi son yıllarda birçok alanda kendine yer bulmuştur. Gerek akademik çalışmalarda gerekse endüstriyel uygulamalarda başarılı olarak popüler olmuştur. Ancak, literatüre baktığımızda makine öğrenmesi tabanlı tasarım yaklaşımının fotonik ve optik alanında çok az uygulandığı görülmüştür. Makine öğrenmesi algoritmaları ile yapılan işlem, eniyileme algoritmalarından farklı olarak, çözüm uzayını aramak yerine eldeki veriler ile çözüm uzayını modellemektir. Verilen tasarım parametreleri ile elde edilen çözüm arasındaki bağlantıyı bulmak problem gereği çok karmaşık olmaktadır.

Fotonik cihazların analitik çözümlerle tasarlanması zordur. Yüksek performansa sahip fotonik cihazların yapısal parametreleri oldukça karmaşık olup analizleri için nümerik yöntemler kullanılmaktadır. Tasarım parametreleri ile fotonik cihazın performansı arasındaki bu karmaşıklığı açıklamak mümkün olmadığı için eniyileme algoritmaları kullanılmaktadır. Ancak, fotonik cihazların nümerik analizi oldukça pahalı (uzun simülasyon süresi) olup tasarım sırasında algoritmanın çalışmasını zorlaştırmaktadır. Burada kullanılan eniyileme algoritmaları girişte verilen tasarım parametreleri ile performans arasındaki bağlantıyı bilmeden arama yapmaktadır. Buna karşılık makine öğrenmesi, giriş parametreleri ile performans arasındaki bağlantıyı tahmin etmeye ve öğrenmeye çalışmaktadır. Bu da tamamen farklı bir yaklaşım olup karmaşık fotonik cihazların tasarımında yeni ve etkili bir tasarım yöntemi olma potansiyeline sahiptir.

Genellikle makine öğrenmesi algoritmaları, Şekil 2.1(b)'de görüldüğü üzere nümerik yöntemler ile senkronize olarak çalışmamaktadırlar. Bir başka deyişle, makine öğrenme algoritmaları önceden üretilen bir veri kümesi üzerinde çalışırlar ve üretilen veri üzerinde bir etkileri yoktur. Yani, verinin üretimi sırasında bir etkide bulunmazlar. Makine öğrenmesi basitçe ikiye ayrılmaktadır: destekli ve desteklessiz öğrenme [85]. Destekli öğrenme ise kendi içerisinde temel olarak ikiye ayrılır: regresyon ve sınıflandırma. Örneğin; regresyon, eldeki veriler üzerine uyacak şekilde bir doğrusal grafik veya eğri/parabol yani bir fonksiyon bulmaktır; sınıflandırma ise verileri kullanıcı tarafından belirlenen bir özelliğe göre sınıflandırmaktır. Desteklessiz öğrenme ise herhangi bir özelliği bilinmeyen veriler arasında benzerliklere sahip olanların bir arada kümelenmesidir. Bunların yanı sıra yarı-destekli öğrenme ve pekiştirmeli öğrenme olarak bilinen makine öğrenmesinin ek alt dalları da bulunmaktadır.

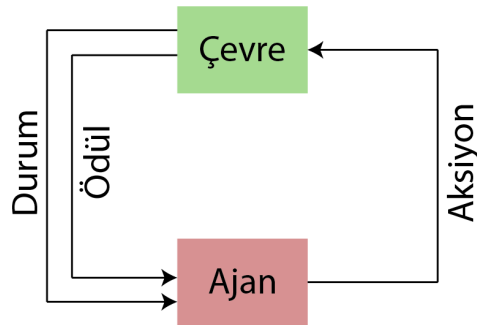
Yapay sinir ağlarıdır (YSA), makine öğrenmesi ile ilgili bahsedilmesi gereken önemli konulardan bir tanesidir. Klasik olarak makine öğrenmesi giriş ( $x$ ) ve çıkış ( $y$ ) parametreleri arasında bir bağıntı/hipotez ( $h$ ) kurmak için kullanılır. YSA ise makine öğrenmesinin bir alt dalı değildir; giriş ve çıkış parametreleri arasında bağlantı kurmanın daha verimli olduğu bir yöntemdir. Bu nedenle YSA da makine öğrenmesinin içerisinde yer almaktadır. YSA'da giriş ve çıkış parametrelerini birbirlerine bağlayan birden fazla sayıda katmanlar bulunmaktadır. Her bir katmana gizli katman denilir ve derin öğrenme kavramı aslında çok fazla sayıda gizli katmana

sahip YSA'nın kullanıldığı makine öğrenmesidir. Şekil 2.7'de klasik bir makine öğrenmesinin ve yapay sinir ağlarının şematığı verilmiştir.



Şekil 2.7 : (a) Klasik makine öğrenmesi ve (b) yapay sinir ağları gösterimleri.

Bu tez kapsamında literatüre katkıda bulunmak için makine öğrenmesi yöntemi ile fotonik cihaz tasarımları düşünülmüştür. Bunun için klasik makine öğrenmesi yöntemlerinden ziyade pekiştirmeli öğrenme algoritmaları kullanılmıştır. Pekiştirmeli öğrenme algoritmalarının önemli bir özelliği ise veri üretimi sırasında üretilen veriler üzerinde etkili olabilmeleridir. Pekiştirmeli öğrenmede bilinmeyen uzayda arama yapmak ve mevcut bilgiden yararlanmak arasında bir denge vardır. Örneğin; evdeki (çevre) bir bebek (ajan) televizyon kumandasını kontrol etmektedir. İlk olarak gözlem yapar ve kendisince çevre hakkında bir fikir (durum) oluşturur. Sonrasında televizyon kumandasını kullanır (aksiyon) ve televizyonda oluşan tepkiyi (sonraki durum) gözlemler. Televizyondaki değişikliği sevmediyse (negatif puan) televizyon kumandasında yaptığı bu değişikliği bundan sonra daha az yapacaktır (politika güncelleme). Televizyonda seveceği (pozitif ödül) bir tepki oluşuncaya kadar bu süreç devam eder. Şekil 2.8'de pekiştirmeli öğrenmenin akış şematığı verilmiştir.



Şekil 2.8 : Pekiştirmeli öğrenme algoritmalarının çalışma şematığı.

### 2.5.1 Toplamsal pekiştirmeli öğrenme algoritması

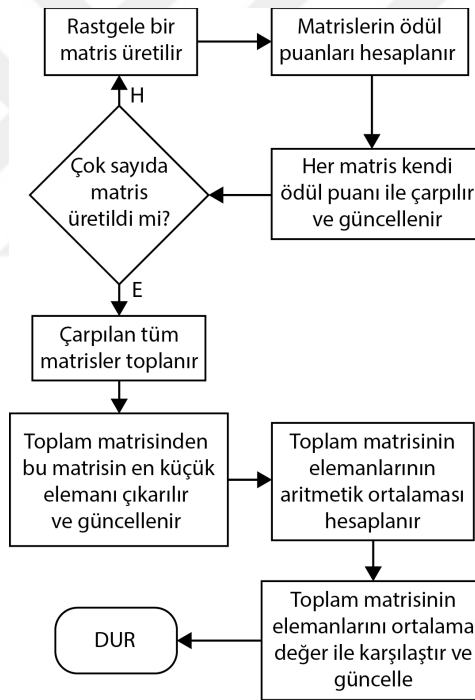
Bu tezde kullanılan makine öğrenmesi yöntemi toplamsal pekiştirmeli öğrenme algoritması (TPÖA) olarak adlandırılmaktadır. Bilinen pekiştirmeli öğrenme algoritmalarından farklı olarak TPÖA algoritmasının veri üretim sürecine bir etkisi bulunmamaktadır, yani önceden üretilen bir veri kümesi üzerinde çalışan bir pekiştirmeli öğrenme algoritması olarak tasarlanmıştır. TPÖA'nın nümerik yöntem ile çalışmasının temsili gösterimi Şekil 2.9'da gösterilmiştir.



Şekil 2.9 : TPÖA'nın nümerik yöntem ile üretilen veri kümesi ile çalışmasının temsili gösterimi.

TPÖA, ikilik tabanda sayılardan oluşan bir matris ile çalışmaktadır ve maksimizasyon için kullanılmaktadır [79]. Burada matris ile tasarlanan sistem temsil edilirken, matris elemanları ile sistemin parametreleri temsil edilmektedir. Matrisin istenilen hedefe ne kadar yaklaştığını belirlemek için bir amaç fonksiyonu tanımlanır. TPÖA, çok sayıda rastgele üretilmiş ve elemanları 0 ya da 1 olan matrisleri kullanır. Üretilen bu matrislerin amaç fonksiyonu değerleri hesaplanır ve buna ödül adı verilir. Her bir matris kendi ödül puanı ile çarpılır. Çarpım sonucu oluşan bu matrisler toplanır ve yeni bir toplam matrisi elde edilir. Bu toplam matrisini inceleyecek olursak matrisin bazı elemanlarının değeri çok büyük olacaktır. Bu durum, bu matris elemanının sistem tasarımında önemli olduğunu gösterir. Benzer şekilde toplam matrisinde düşük değerlere sahip matris elemanları ise sistem tasarımı için önemli değildir denilir. Ancak, burada hangi elemanın önemli hangisinin önemsiz olduğunu belirleme işlemi matristeki tüm elemanlar baz alındığı için görecelidir. Burada öncelikle bir karar verme işleminin yapılması gerekmektedir. TPÖA, toplam matristeki en küçük eleman değerini bulur ve tüm matris elemanlarından bu en küçük elemanın değerini çıkarır. Sonuç olarak; toplam matrisinin en küçük eleman değeri 0 olmaktadır. Sonrasında toplam matrisindeki tüm elemanların aritmetik ortalaması alınır. Bu ortalama değer sınır değeri olarak kabul edilir ve matris elemanlarının önemli/önemsiz olduğunu belirleme işleminde eşik değeri olarak kullanılır. Fark edileceği üzere toplam matrisindeki eleman değerleri 0 veya 1 olacak şekilde

dağılmamıştır. Ancak, TPÖA sonuç olarak 0 veya 1'lerden oluşan bir matris üretecektir. Bunun için toplam matrisindeki elemanlar, aritmetik ortalama ile hesaplanan eşik değeri ile karşılaştırılır. Eğer bir elemanın değeri eşik değerinden yüksek ise bu elemanın değeri 1 olarak güncellenir. Benzer şekilde eğer toplam matrisindeki bir elemanın değeri eşik değerinden küçük ise bu eleman 0 olarak güncellenir. Bu işlem sonucunda tasarlanacak sistem için önemli olan parametrelerin 1 değerini alarak sistemde bulunması, önemsiz olan parametrelerin 0 değerini alarak sistemden çıkarılması sağlanmıştır. TPÖA kullanılırken dikkat edilecek kısım başlangıçta oluşturulan rastgele matris sayısıdır. Eğer yeteri kadar matris üretilmezse, tüm klasik makine öğrenmesi algoritmalarında olduğu gibi TPÖA da öğrenme işlemini tam olarak gerçekleştiremez ve istenilen hedefe yönelik bir matris tasarlayamaz. Bu tezde kullanılan TPÖA yönteminin akış şeması Şekil 2.10'da verilmiştir.



Şekil 2.10 : TPÖA'nın akış şeması.

Bu algoritmanın fotonik cihaz tasarımı problemine uyarlanabilmesine örnek olarak, fotonik bir cihazın yüksek kırılma indisli silikon (Si) veya hava boşluğu piksellerinden oluşuyor olması düşünülebilir. Burada silikon pikseller 1 ile temsil edilirken hava boşlukları 0 ile temsil edilebilir. Bu durumda tasarlanacak yapı görsel olarak 1 veya 0'lardan oluşan bir matrise benzeyecektir. Sonrasında SFZB yöntemi

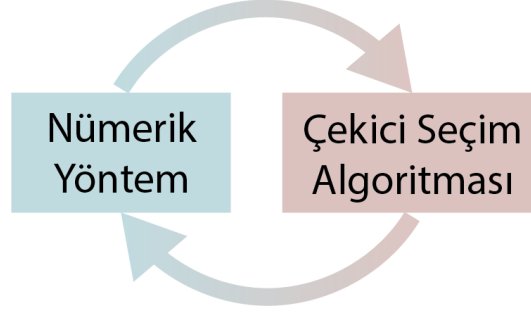


ve belirlenen amaç fonksiyonu ile bu matrise karşılık gelen ödül değeri hesaplanır. Bu işlem çok sayıda veri elde edilinceye kadar tekrarlanır.

### 2.5.2 Çekici Seçim algoritması

Çekici Seçim (ÇS) algoritması makine öğrenmesinin bir alt dalı olan pekiştirmeli öğrenme sınıfına dahil edilebilir. ÇS mekanizması biyolojik olarak esinlenilmiş bir modeldir ve bu nedenle biyolojik olarak karşılıklarının açıklanması faydalı olacaktır [86]. Biyolojik sistemlerde hücrenin büyümesi metabolik reaksiyon ağı ve gen düzenleme ağının etkileşimi ile kontrol edilir. Gen düzenleme ağı çevredeki besin ile reaksiyona girecek proteinleri üretir. Her bir genin protein üretimini kontrol eden ifade seviyesi bulunmaktadır. Metabolik reaksiyon ağında ise proteinler ile besinler küçük parçalara ayrılır ve bu parçalar da hücre büyümesi için gereklidir. Üretilen küçük parçaların miktarı ile gen düzenleme ağının aktivitesi kontrol edilir; bu durum bir geri besleme mekanizmasıdır. Yüksek miktarda parçaların bulunması tercih edilen bir durumdur. Hücre bu durumu çekici durum olarak kabul eder ve gen düzenleme ağının aynı ifade seviyeleri ile çalışmasını devam ettirir. Aksi halde ise eldeki ifade seviyelerinin o anki ortam için tercih edilemez olduğu anlamına gelir. Bu durumda gürültü baskın hale gelir ve ifade seviyeleri son çekici durumdan sapmaya başlar.

ÇS'de çekiciler aslında çözüm uzayındaki sistem şartlarının tercih edilebilir olduğu denge noktalarıdır. ÇS mekanizması temel olarak iki davranıştan oluşmaktadır; deterministik ve stokastik davranışlar. Eğer o anki sistem şartları çevre için uygunsa, yani sistem durumu çekicilere yakınsa, deterministik davranış sistemi çekiciye doğru götürür. Eğer bir noktada anlık sistemin şartları yetersiz ise stokastik davranış deterministik davranışa göre daha baskın olur. Sistem kontrolünde stokastik davranışın baskın olduğunda, sistem durumları gürültüden dolayı rastgele değişmeye başlar ve sistem yeni çekici bulmaya çalışır. Ne zaman sistem şartları tekrar iyileşirse deterministik davranış sistem kontrolünü tekrar ele geçirir. Bu iki davranış sistem şartlarındaki basit bir geri besleme ile kontrol edilir. Bu sayede, ÇS çevresel değişimlere uyum sağlar. ÇS algoritması, pekiştirmeli öğrenme algoritmaları gibi verilerin üretimi sırasında etkili olmaktadır. Bu algoritma SFZB gibi nümerik yöntemler ile beraber çalışmaktadır. Bu algoritmanın çalışması temsili olarak Şekil 2.11'de verilmiştir.



Şekil 2.11 : ÇS algoritmasının nümerik yöntem ile çalışmasının temsili gösterimi.

Fotonik cihaz tasarımlarında bir fotonik cihazı protein üretim seviyesi olarak düşünebiliriz ve ifade seviyeleri  $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  olarak temsil edilebilir. Burada ifade seviyesi  $x_i$   $[-1,1]$  aralığındadır ve fotonik cihazdaki sırası  $i$  olan pikselin silikon veya hava boşluğu olmasına karar verir. Eğer  $x_i < 0$  ise, piksel hava boşluğu olacaktır. Aksi halde, piksel silikon malzemesi ile doldurulacaktır. Burada  $x_i$  hesaplamak için analitik ifade aşağıdaki gibi yazılabilir [87]:

$$\frac{dx_i}{dt} = \alpha \cdot \left( f \left( \sum_j W_{ij} \cdot x_j - \theta \right) - x_i \right) + \eta \quad (2.9)$$

Bu denklemde  $\alpha$ , anlık fotonik cihazın bulunduğu ortamda tercih edilebilir olup olmadığını gösteren hatanın fonksiyonudur ve büyüme oranını göstermektedir.  $\eta$  ise Gauss gürültü terimidir ve stokastik davranışın etkisini temsil etmektedir. Anlık fotonik cihaz için hata oranı az olduğunda gürültü sistemde baskın gelir ve sistem rastgele değişerek yeni çekici durumlar aramaya başlar.

$$f(z) = \tanh(\mu z) \quad (2.10)$$

Burada,  $\mu$  kazanç parametresidir.  $W$  ise düzenleme matrisidir ve büyüme oranı yüksek olduğunda fotonik cihazı çekici bir duruma doğru yönlendirir.  $\theta$  ise ifade seviyeleri için eşik değeridir. Hata oranı  $E$  ise büyüme oranına çevrilir.

$$\alpha = \frac{1}{1 + e^{(\delta \cdot (E - \zeta))}} \quad (2.11)$$

Burada  $\delta$  gradyandır ve  $\zeta$  eşik hata oranıdır. Düzenleme matrisi  $W$  aslında bir Hopfield sinir ağıdır [88] ve dikey izdüşüme göre hesaplanan olası çekiciler dizisinden oluşur [89, 90]. Burada,  $X$  bir matristir, satırlarının bipolar kodlama ile

kodlanmış çekici değerlerinden oluştuğu düşünülür ve sözde-ters matris  $X^+$  hesaplanır. Sonrasında ise düzenleme matrisi hesaplanır:

$$W = X^+X \quad (2.12)$$

ÇS algoritması iteratif olarak çalışmaktadır ve kısaca üç aşamada özetlenebilir. İlk olarak SFZB yöntemi ile anlık fotonik cihazın hata değeri hesaplanır. Daha sonra hata değeri ile hesaplanan büyüme oranı ile gürültü seviyesi kullanılarak yeni ifade seviyeleri hesaplanır. Sonrasında fotonik cihazın pikselleri bu ifade seviyelerine göre güncellenir. Burada şuna dikkat edilmelidir: hata oranı uzun süre değişmediğinde algoritma kullanıcı tarafından elle sonlandırılır.

## 2.6 Algoritmaların Kodlanması ve Nümerik Simülasyonlarda Kullanımı

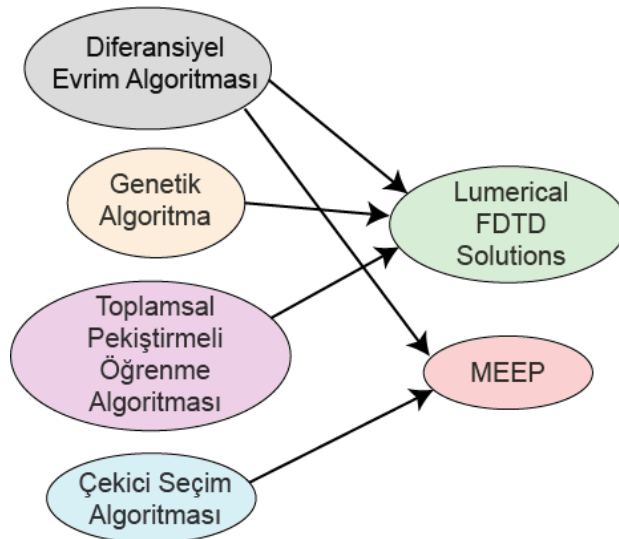
Algoritmaların kodlanmasında önemli olan kısım tercih edilen nümerik simülasyon programlarıdır. Fotonik cihazların elektromanyetik dalga ile etkileşiminin analizi için Maxwell denklemlerin çözülmesi gerekmektedir. Bu denklemlerin analitik çözümleri oldukça zor olduğundan, yaklaşımlar yaparak nümerik olarak çözümler elde edilmektedir. Bu tezde, iki farklı SFZB yazılımı tercih edilmiştir; Lumerical FDTD Solutions ve MEEP [83,84].

Lumerical FDTD Solutions yazılımının kendisine özel kodlama dili bulunmaktadır. Bu yazılım tercih edildiğinde kullanılacak algoritmanın da bu özel kodlama dili ile kodlanması gerekmektedir. Bu yazılımda simülasyon ortamının oluşturulması ve algoritma işlemleri aynı kodlama dili ile yapılabilmektedir. Burada nümerik yöntem ve algoritma arasındaki çalışma sırası şu şekildedir. Öncelikle algoritma tarafından tasarım parametreleri oluşturulur. Bu parametrelere göre fotonik cihaz yapısı tasarlanır ve simülasyon gerçekleştirilir. Elde edilen simülasyon sonuçları işlenerek maliyet fonksiyonu değeri hesaplanır. Sonrasında algoritma, bu maliyet fonksiyonu ve parametreleri kullanır. Bu sayede bir iterasyon tamamlanmış olur.

Öte yandan, MEEP yazılımı ise kendisine özel olan Scheme kodlama dilini kullanmaktadır. Scheme dili ile SFZB için simülasyon ortamı oluşturulur. Ancak, MEEP yazılımını MATLAB ile birleştirmek mümkün olmaktadır. Bu nedenle, MEEP tercih edildiğinde kullanılacak olan algoritmanın kodlanması MATLAB ortamında yapılmaktadır. Burada öncelikle MATLAB ortamında tasarım

parametrelerinin değerleri belirlenir. Bu değerlere göre Scheme diline uygun olacak Şekilde fotonik cihaz tasarımı için kod dizisi oluşturulur. Bu kod dizisi çalıŐtırılır ve elde edilen sonuç dosyaları MATLAB yazılımı ile okutulur. Bu dosyalardaki veriler işlenerek maliyet değeri hesaplanır. Sonrasında MATLAB ortamında kodlanmış olan algoritma, tasarım parametrelerini ve ilgili maliyet fonksiyonu değerini kullanır. Bu Şekilde bir iterasyon gerçekleŐtirilmiŐ olur.

Burada, SFZB yazılımından önce kullanılacak algoritmaya karar verilmesi gerekmektedir. Bunun sebebi ise tasarlanacak fotonik cihazın yapısal parametrelerinin alabileceği değerlerdir. Eğer bu parametre değerleri reel sayılar kümesinden kesikli değerler alıyorsa DE algoritmasının kullanılması gerekmektedir. Eğer fotonik cihazın eniyileme işlemine giren parametreleri kesikli ise, yani 0 veya 1 ile temsil edilebiliyorsa, kullanılması gereken algoritma GA, TPA veya S olacaktır. Burada algoritma seçildikten sonra algoritmaların kodlanması kısmında bir detay bulunmaktadır. Bu detay, kullanılacak SFZB yazılımından ziyade algoritmanın kodlanabilmesine olanak tanıyan kodlama dilidir. Örneğin; S algoritmasını Lumerical FDTD Solutions yazılımının kendi kodlama dilini kullanarak kodlamak mümkün değildir. Bu durumda S algoritması kullanılacaksa kodlama işlemi MATLAB ile yapılmaktadır. MATLAB kullanıldığından dolayı da SFZB yöntemi olarak MEEP yazılımı tercih edilmek durumundadır.



Şekil 2.12 : Algoritmaların birleştirildikleri SFZB yazılımları.

Algoritma seçimi yapıldıktan sonra kullanılacak SFZB yazılımına karar verilir. Bu noktada kullanılan yazılımların performansı önemli olmaktadır. MEEP yazılımı 2B SFZB simülasyonlarında hızlı çalışabilirken 3B simülasyonlarda yavaş

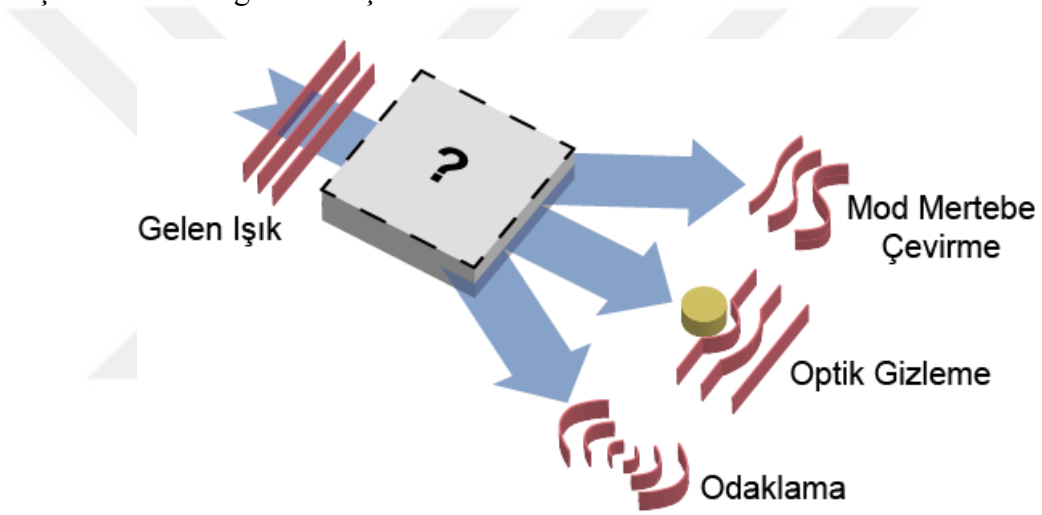
çalışmaktadır. Ayrıca, 3B simülasyonlar için MEEP yazılımının gerektirdiği bilgisayar donanımı oldukça yüksek olmaktadır. Öte yandan, Lumerical FDTD Solutions yazılımı ise hem 2B hem de 3B simülasyonlar için kullanılmaktadır. Özellikle 3B SFZB analizleri yapılırken Lumerical FDTD Solutions yazılımı çoğunlukla tercih edilmektedir. Şekil 2.12’de tez kapsamında kullanılan algoritmalara entegre edilen SFZB yazılımlarının eşleşimi gösterilmiştir.





### 3. HÜZME ŞEKİLLENDİRİCİ FOTONİK CİHAZ TASARIMLARI

Bu tez kapsamında yapılan çalışmaların bir kısmı hüzme şekillendirici fotonik cihazlar başlığı altında toplanabilir. Bu cihazlar gelen ışığı içerisinden geçiren ve bu geçiş sırasında hüzme şeklini değiştiren fotonik tasarımlardır. Bu yapılara örnek olarak lensler, mod merteye çeviriciler ve optik gizleyiciler gösterilebilir. Şekil 3.1’de hüzme şekillendirici fotonik cihazların farklı amaçlara yönelik tasarımlarına dair yaklaşım şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.1 : Hüzme şekillendirici fotonik cihaz tasarım şematiği.

#### 3.1 Optik Gizleyici Tasarımı\*

Optik olaylar arasında en etkileyici olanlardan biri de görünmezliktir. Bir başka deyişle bir bölgenin veya nesnenin belirli bir dalga boyu aralığında saklanmasıdır. Bu konuda yapılan ilk çalışmalarda, görünmezlik elde edebilmek için açı-korur gönderim yaklaşımı önerilmiştir. Bu yaklaşımda dönüşüm optiği (DO) uygulanmıştır [91,92]. DO kullanarak görünmezlik elde etmek için önerilen teorik yaklaşımlar on yıl kadar bir zaman önce ortaya atıldı ve bu çalışmalardaki malzemelerin anizotropik, negatif, uzayda değişen dielektrik sabitine ve geçirgenliğe sahip olmaları gerekmektedir.

---

\*Bu bölümün esas alındığı çalışma: Bor, E., Babayigit, C., Kurt, H., Staliunas, K., Turduev, M., (2018). Directional invisibility by genetic optimization, Opt. Lett., 43(23):5781–5784.

Ancak, bu tür malzemeler doğada bulunmamaktadırlar [93]. Dahası, DO ile tasarlanan görünmezlik yapıları dar bir çalışma bandına ve doğası gereği kayıplara sahiptirler. Bu durum optik spektrum aralığı için onları yetersiz kılmaktadır. Nesnelere saklamak için bir diğer yöntem ise örterek gizlemedir. Bu yaklaşımda nesnelere özel bir yansıtıcı katmanın altına yerleştirilirler [94,95]. Nesneden kaynaklanan saçılımları azaltmanın bir diğer yöntemi olarak Hilbert dönüşümü ve onun modifiye edilmesi durumu sunulmuştur [96-98]. Buna ek olarak, metamalzemeler kullanılarak koordinat dönüşümü tabanlı bir optik gizleyici yapısı tasarlanmıştır [98]. Dahası, asimetrik FK yapıları ile yaklaşık olarak optik gizleme elde edilmiştir [99]. Bir diğer yaklaşım ise gizleme yardımı olmaksızın metamalzemelerin optik yansızlığı tabanlı görünmezlik elde edilmesidir [100]. Son yıllarda ise topoloji eniyilemesi kullanılarak optik gizleyici yapıları tasarlanmıştır [69,101].

Optik gizleme, saçılıma neden olan yani saklamak istenilen nesneye gelen dalganın yönlendirilmesiyle elde edilebilir. Bu yönlendirme işlemi eniyileme algoritmaları ile tasarlanan yapılar sayesinde gerçekleştirilebilir. Bu çalışmada GA kullanılarak iletken bir cisim gelen düzlem dalga karşısında gizleyebilen bir yapı tasarlanmıştır. Fabrikasyon süreci de göz önünde bulundurularak sunulan optik gizleme yapısı düşük kırılma indisine sahip, az kayıplı, biyo-bozunur bir termoplastik polimer olan ve 3B yazıcı teknolojisinde de yaygın olarak tercih edilen polilaktik asit (PLA) malzemesi kullanılarak tasarlanmıştır. Elde edilen yapının nümerik analizleri mikrodalga frekanslarında yapılan deney ile doğrulanmıştır.

Optik gizlemenin temel işleyişi, Şekil 3.2(a)'da verilen şematik ile açıklanabilir. Boş uzayda x-ekseni boyunca ilerleyen enine elektrik (EE) polarizasyona sahip bir dalga düşünüldüğünde ortama bir cisim koyulduğu zaman bu cisim, ilerleyen dalgayı dağıtacaktır. Bu nedenle saklamak istenilen nesneyi çevreleyen ve gelen dalganın doğal yayılım özelliğini koruyan bir yapı tasarlanmalıdır. Optik gizlemeyi sağlayabilmek için tasarım yapılırken gelen dalganın saçılım özellikleri dikkate alınmalıdır. Bu çalışmadaki amaç, y-ekseni boyunca kesikli çizgilerle belirtilen giriş ve çıkış konumlarındaki saçılımı azaltmak ve aynı zamanda iletim verimliliğini arttırmaktır. Bu nedenle öncelikle giriş ve çıkış konumlarındaki manyetik alanın z-ekseni boyunca olan bileşeninde ( $H_z$ ) meydana gelen saçılımları azaltılmaya çalışılmıştır. Bunun için giriş ve çıkıştaki manyetik alan kesit profilleri ile kendi ortalama değerleri arasındaki fark hata olarak belirlenmiştir. GA kullanılarak ise bu



hata oranı azaltılmaya çalışılmıştır. Bu amaç için belirlenen maliyet fonksiyonu aşağıdaki gibidir.

$$H_{hata} = \sum_y (|H_z(x_{giris}, y) - \overline{H_z}(x_{giris}, y)| + |H_z(x_{cikis}, y) - \overline{H_z}(x_{cikis}, y)|) \quad (3.1)$$

Burada üzeri çizgi ile temsil edilen terimler profilin ortalama değeridir. Optik gizlemede dikkat edilen bir diğer konu ise saçılan dalganın fazının ( $\varphi$ ) bozulmasıdır. Faz dağılımı incelenerek dalga yüzeylelerinin bozulup bozulmadığı anlaşılabilir. Fazda meydana gelecek salınımlar ilerleyen dalganın düzlem dalga olmadığını gösterecektir. Yine burada da giriş ve çıkış pozisyonlarında faz dağılımının kesit profilleri göz önünde bulundurulmuştur. Bu faz profillerinin kendi içlerinde ortalamaları alınmış ve profiller ile bu ortalama değerler arasındaki hata değerinin azaltılması amaçlanmıştır. Bu nedenle tanımlanan maliyet fonksiyonu aşağıdaki gibidir.

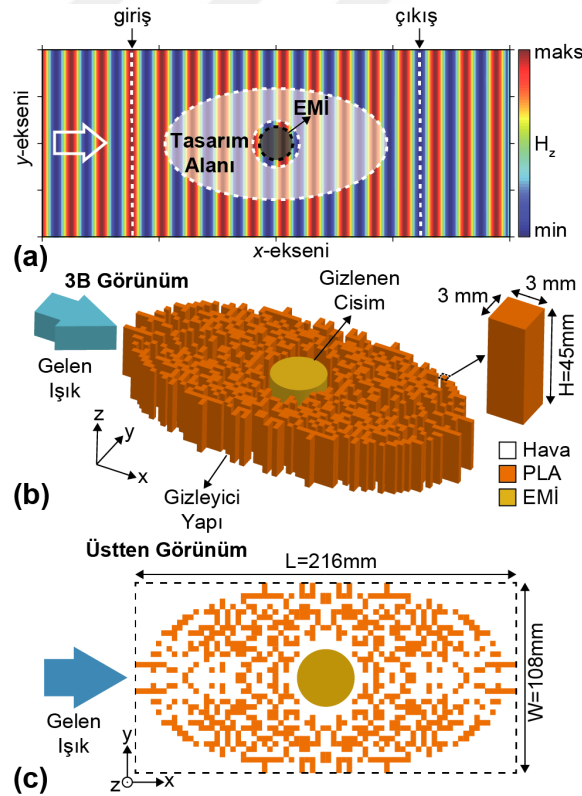
$$\varphi_{hata} = \sum_y (|\varphi_z(x_{giris}, y) - \overline{\varphi_z}(x_{giris}, y)| + |\varphi_z(x_{cikis}, y) - \overline{\varphi_z}(x_{cikis}, y)|) \quad (3.2)$$

Manyetik alanın ve fazın saçılımlarının düzeltilmesinin yanı sıra, daha gerçekçi bir optik gizleme elde etmek için iletilen ışık miktarının korunması önemlidir. Bu nedenle manyetik alan ve faz hatalarını azaltmanın yanında ışığın iletim veriminin ( $T$ ) de artırılması gerekmektedir. Ancak, algoritma minimizasyon için çalıştığından dolayı iletim değerinin maliyet fonksiyonuna çıkarma işlemi ile dahil edilmesi gerekmektedir. Bu durumda eniyileme işlemi için kullanılan maliyet fonksiyonu aşağıdaki gibidir.

$$f_{maliyet} = H_{hata} + \varphi_{hata} - T \quad (3.3)$$

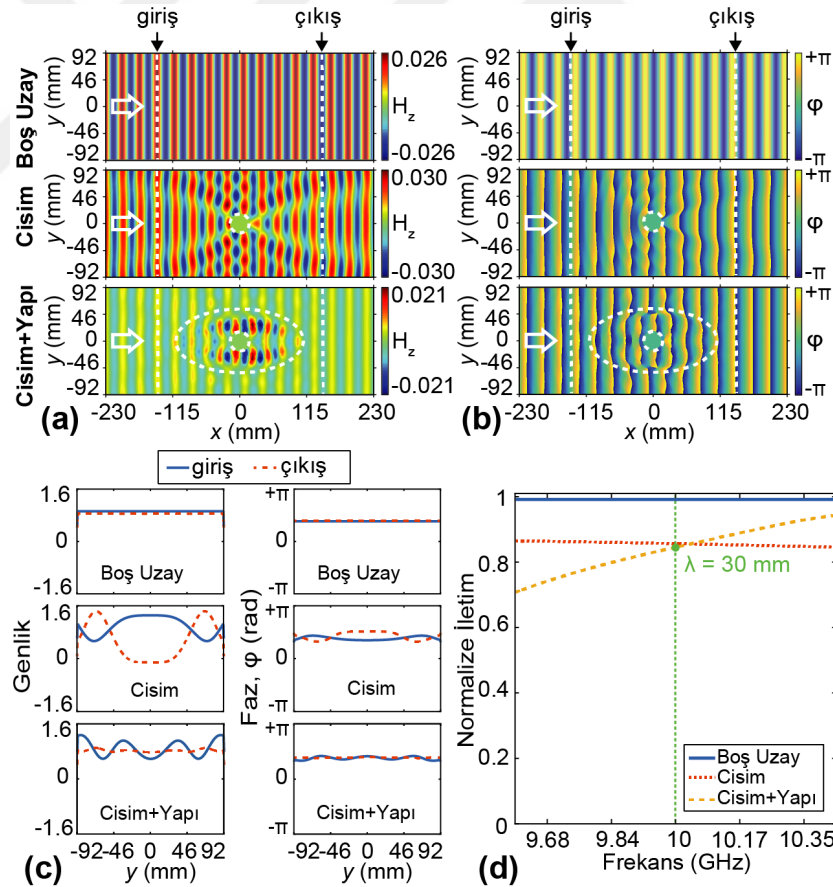
Verilen maliyet fonksiyonunu kullanarak elektriksel mükemmel iletken (EMİ) olan silindir şeklindeki nesneyi saklamak için elipsoidal bir yapı tasarımı sunulmuştur. Tasarım alanı kare şeklindeki piksellere bölünmüştür ve nesneyi gizlemek için gerekli olan piksel durumlarının belirlenmesi GA ile yapılmıştır. GA ikilik tabanda çalıştığı için her pikselin varlığı ya da yokluğu sırasıyla 1 veya 0 ile temsil edilmektedir.

Eniyileme sırasında maliyet fonksiyonunun değerini hesaplamak için gerekli olan nümerik analizler 3B SFZB kullanılarak yapılmıştır. Simülasyonlarda tasarlanan yapının boyutları ve optik özellikleri mikrodalga deneyi için uygun olacak şekilde seçilmiştir. Gelen düzlem dalganın çalışma dalga boyu yaklaşık olarak 10 GHz frekansına karşılık gelen  $\lambda=30$  mm olarak seçilmiştir. Ayrıca, 3 mm  $\times$  3 mm boyutlara ve H=45 mm yüksekliğe sahip pikseller için  $n_{PLA}=1.55$  kırılma indeksine sahip PLA malzemesi seçilmiştir. PLA'nın dielektrik malzeme olarak seçilmesinin nedeni, ticari olarak temin edilebilen 3B yazıcılar aracılığıyla yapıların üretilmesinde sağladığı kullanım kolaylığıdır. 3B baskı yöntemi, malzemeyi eriterek yapı katmanlarını tabakalar halinde oluşturmaya dayanır ve genellikle belirli metal veya polimerleri kullanarak yapılan bir üretim tekniğidir. Tasarlanmış gizleme yapısının 3B ve üstten görünüşü sırasıyla Şekil 3.2(b) ve Şekil 3.2(c)'de verilmiştir. Mavi oklar gelen dalganın yayılım yönünü göstermektedir. Görüldüğü üzere yapı dielektrik ve havadan meydana gelen piksellerden oluşmaktadır. Tasarımda saklamak için kullanılan silindirik nesnenin çapı 36.4 mm ve yüksekliği 45 mm'dir. Tasarlanan gizleme yapısının genişliği (W) ve uzunluğu (L) sırasıyla W=108 mm ve L=216 mm olarak hesaplanmıştır.



Şekil 3.2 : (a) Tasarım yaklaşımının şematik olarak gösterimi (b) tasarlanan yapının 3B ve (c) kuş bakışı görüntülerinin yapısal parametrelerle birlikte gösterimi.

Şekil 3.3(a) ve Şekil 3.3(b)'de farklı durumlar için hesaplanan manyetik alan ve faz dağılımları sunulmuştur. Bu durumlar sırasıyla, elektromanyetik dalganın boş uzayda ilerleyişi, nesneden saçılımı ve optik gizleyici ile çevrelenen nesne olduğunda yayılımıdır. İlgili manyetik alan ve faz dağılımları, 3B SFZB simülasyon bölgesinde  $z=0$  düzleminde hesaplanmıştır. Bu şekillerde, silindirik kesikli çizgiler saklanmak istenen nesneyi gösterirken, eliptik kesikli çizgiler tasarlanan optik gizleyici yapısının sınırlarını temsil ederler. Gelen düzlem dalganın yayılım yönü beyaz oklarla gösterilmiştir. Giriş ve çıkış konumlarında hesaplanan kesit profilleri ilgili manyetik alan ve faz dağılımları için Şekil 3.3(c)'de verilmiştir. Hesaplanan sonuçlardan da görülebileceği üzere nesne gelen düzlem dalgayı saçarak hem manyetik alan hem de faz dağılımlarından alınan kesitlerdeki dalgalanmalara yol açmaktadır. Bununla beraber, nesne tasarlanan yapı tarafından sarıldığı zaman kesit profillerinde istenmeyen dalgalanmaların bastırıldığı ve gelen dalganın karakteristiğinin yapının çıkışında başarılı bir şekilde yeniden oluşturulduğu gözlemlenmektedir.



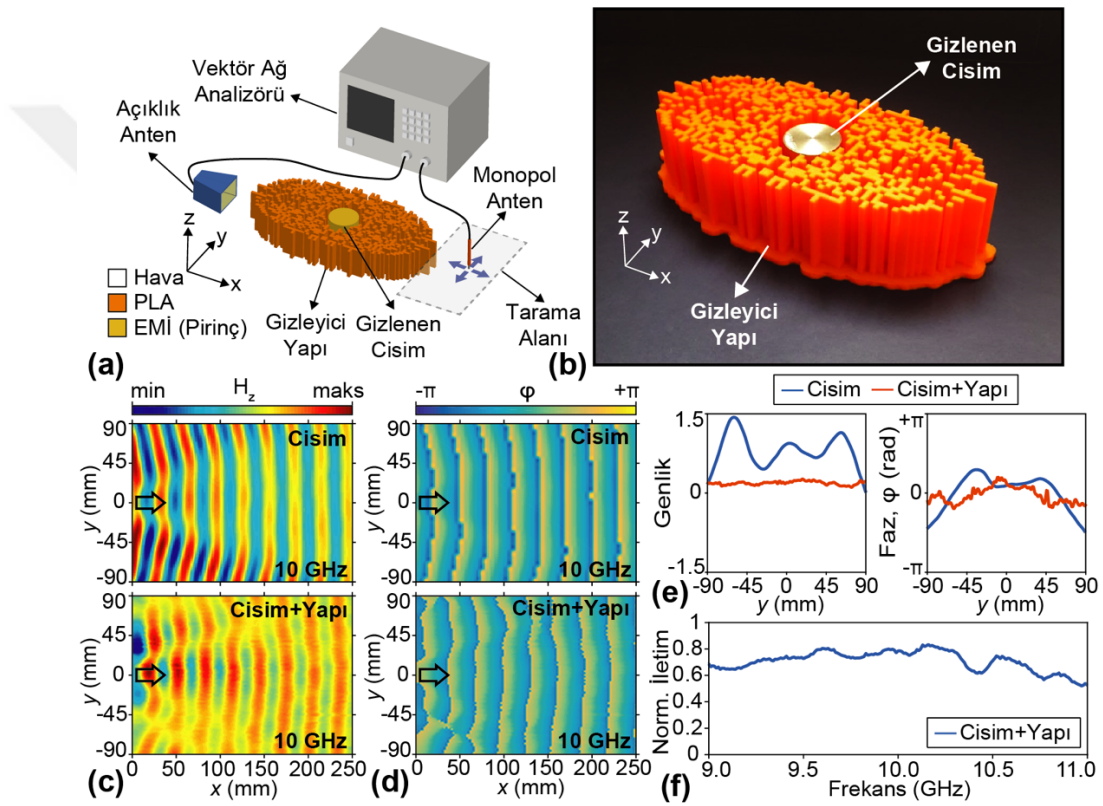
Şekil 3.3 : Sayısal olarak hesaplanmış (a) manyetik alan ve (b) faz dağılımları ve (c) giriş ve çıkış konumlarındaki kesit profilleri. (d) Üç farklı durum için hesaplanan iletim verimleri.

Gerçekçi bir optik gizleme için manyetik alan (veya elektrik alan) ve faz dağılımlarında saçılmadan kaynaklanan bozulmayı azaltmanın yanı sıra iletilen optik güç miktarını korumak da önemlidir. Bu bağlamda, incelenen üç farklı durum için iletim verimliliği Şekil 3.3(d)'deki gibi çizdirilmiştir. Bu sonuçlar incelendiğinde ortamda sadece nesnenin olduğu ve gizleme yapısının kullanıldığı her iki durum için gözlemlenen iletim verimliliğinin yaklaşık olarak birbirine eşit olduğu ve %85 oranında bir iletim elde edildiği görülmektedir. Tasarlanan gizleme yapısının gelen optik gücü kısmen koruyabildiği düşünülebilir. Sonuç olarak, GA için belirlenen maliyet fonksiyonunun nesnelere doğru bir şekilde gizleyebilen bir yapı tasarlamak için yeterli olduğu görülmektedir.

Nümerik analizlerden sonra, sunulan sonuçları doğrulamak için elde edilen yapının mikrodalga frekans rejiminde deneyi yapılmıştır. Bu amaçla tasarlanan gizleme yapısı 3B baskı tekniği kullanılarak üretilmiştir. Bakır ve çinkodan yapılmış metalik alaşım olan pirinçten yapılmış silindirik bir nesne ise gizlenecek cisim olarak kullanılmıştır. Pirinç 10 GHz civarındaki mikrodalga frekanslarında gelen elektromanyetik dalgayı oldukça yüksek oranda saçabilmektedir. Deneyde elektromanyetik dalga kaynağı olarak bir açıklık anten optik gizleyici yapısının önüne yerleştirilmiştir ve Agilent E5071C ENA vektör ağ analizörü kullanılarak gerekli ölçümler yapılmıştır. Açıklık anten küresel dalga yüzlerine sahip Gauss profilinde dalgalar oluşturduğu için antenin konumlandırılması yapılırken dalga yüzeylerinin düzlem dalgaya yaklaştığı yeteri kadar uzak bir mesafe seçilmiştir. Manyetik alan ve faz dağılımlarına ait ölçümleri almak için ise bir monopol anten kullanılmıştır. Monopol anten hem x-ekseni hem de y-ekseni boyunca 2 mm adımlarla hareket ettirilerek tarama alanındaki manyetik alan ve faz bileşenlerinin ölçümü yapılmıştır. Mikrodalga deney düzeneğinin şematiği Şekil 3.4(a)'da gösterilmiştir. Üretilen yapının ve saklamak için kullanılan silindirik pirinç nesnenin fotoğrafı Şekil 3.4(b)'de verilmiştir. Deneysel süreçte motorize düzeneğin fiziksel kısıtlamalarından dolayı sadece yapının arkasındaki bölgede ölçümler alınabilmektedir.

İlk olarak saklamak istenilen nesne deney düzeneğine yerleştirilmiştir ve nesneden kaynaklanan saçılımları gözlemlemek için arkasındaki alan taranmıştır. Daha sonra, tasarlanan yapı ile birlikte manyetik alan ve faz bileşenlerini ölçmek için yapının arkasından ölçüm alınmıştır. 10 GHz'lik mikrodalga frekansında, ilgili ölçüm durumları için manyetik alan ve faz dağılımları, Şekil 3.4(c) ve Şekil 3.4(d)'de

sırasıyla sunulmuştur. Gelen dalganın ilerleme yönü siyah oklarla gösterilmiştir. Şekil 3.4(c)'den görüleceği üzere silindirik pirinç nesne gelen dalgayı yüksek oranda saçarak iki bölüme ayırmıştır. Diğer yandan, tasarlanan gizleme yapısı saçılan manyetik alan bileşenlerini toplamakta ve bunları tarama alanında bir düzlem dalgası oluşturmak üzere nesnenin etrafından yönlendirmektedir. Buna ek olarak, her iki duruma karşılık gelen faz dağılımları Şekil 3.4(d)'de gösterilmiştir. Verilen faz dağılımlarından da görüldüğü üzere elde edilen düzlemsel faz cepheleri optik gizleyici yapısının gelen düzlem dalgayı yapının arkasında yeniden üretebildiğini göstermektedir.



Şekil 3.4 : (a) Deney düzeneğinin şematik gösterimi. (b) Üç boyutlu yazıcı ile üretilen yapı ve saklamak için kullanılan silindirik pirinç nesnenin fotoğrafı. Üstte ilindir pirinç nesneye bağlı olarak oluşan saçılmaların ve altta tasarlanan yapı ile elde edilen (c) manyetik alan ve (d) faz dağılımları. (e) Kesit genlik ve faz profilleri. (f) Tasarlanan gizleme yapısının deneysel olarak ölçülen iletim verimliliği.

Manyetik alan ve faz profillerinden alınan kesitler Şekil 3.4(e)'de çizdirilmiştir. Manyetik alanın genlik profilinde görülen ani dalgalanmalar silindirik pirinç nesnenin gelen dalgayı kuvvetli bir şekilde saçtığını kanıtlamaktadır. Tasarlanan yapıyla birlikte genlik profilindeki istenmeyen bu dalgalanmaların bastırıldığı ve faz profilinin kısmen düzeltildiği görülmüştür. Son olarak, monopollü anten kaynak olarak kullanılan anten ile

özdeş olan bir başka açıklık antenle değiştirilerek iletim verimliliği ölçülmüş ve Şekil 3.4(f)'de sunulmuştur. Ölçülen iletim verimliliği 10 GHz'de yaklaşık %75'tir, bu da nümerik olarak hesaplanan iletim verimliliğinden biraz daha düşük ancak yine de yüksek bir değerdir.

Şekil 3.3(a)'da gösterilen manyetik alan dağılımı incelenerek, elde edilen optik gizleme yapısının fiziksel mekanizması hakkında yorum yapılabilir. Bu şekilden görüldüğü üzere gelen düzlem dalga iki bölüme ayrılır ve optik gizleyicinin içindeki nesnenin etrafından dolaşır. Bu noktada, düzlem dalga için homojen olmayan bir ortam olan yapı içerisinde optik yol uzunluğunun arttığı sonucuna varılabilir. Öte yandan, optik gizleyicinin içinde ve etrafında ilerleyen dalga yapının çıkışında da tıpkı gelen dalga gibi düzlem şeklini alır.

Sunulan optik gizleme etkisinin iki farklı fiziksel mekanizmadan oluştuğu düşünülebilir. Öncelikle, nesnenin etrafında tasarlanan optik gizleyici yapısının kesikli karakteristiğinin sağladığı ortalama alan etkisi kullanılarak DO ve açı-korur dönüşüm metodu vasıtasıyla kısmi bir gizleme gözlemlenebilir. Önceden belirtildiği üzere gelen düzlem dalga açı-korunur dönüşümde de görüldüğü gibi nesnenin etrafında bükülüp ilerlemektedir. Ancak, kırılma indekslerini gerçekçi değerlerle sınırlandırdığımız için, tasarlanan yapı hiçbir zaman bir nesnenin %100 gizlenmesini sağlamamaktadır. GA birinci mekanizmayı kullanarak nesneden kaynaklanan saçılımları telafi etmek için kırılma indislerinin dağılımını belirlemiştir. İkinci mekanizma, uygun bir optik yol içinde ışığın hareket etmesi için homojen olmayan bir ortam oluşturarak saçılmaların ortadan kaldırılması olarak düşünülebilir. Bu iki gizleme mekanizması arasındaki etkileşim, elektrik geçirgenliklerin ve manyetik geçirgenliklerin gerçekçi değerleri ile elde edilen nesnenin %100 gizlenmesi şeklinde sonuçlanır. Tasarımın kısmen gizlenecek nesnenin geometrisine bağlı olduğu da unutulmamalıdır.

Sonuç olarak, bu çalışmada 3B SFZB yöntemiyle entegre edilen GA kullanılarak bir optik gizleyici tasarlanmıştır. Nümerik olarak hesaplanan manyetik alan ve faz dağılımları, tasarlanan gizleme yapısının nesneden kaynaklanan saçılımlarını gelen düzlem dalgayı yapının çıkışında da elde edebilmek için bastırıldığını göstermektedir. Sunulan optik gizleme yapısı PLA maddesi kullanılarak 3B baskı tekniği ile üretilmiş, saklamak için ise mikrodalga frekanslarında gelen dalga ile etkileşime girdiğinde saçılım meydana getiren pirinçten yapılmış silindir şeklinde bir nesne seçilmiştir. Böylece, optik gizleme deneysel olarak 10 GHz dolaylarındaki mikrodalga

frekanslarında doğrulanmıştır. Nümerik ve deneysel sonuçlar karşılaştırıldığında tutarlılık görülmektedir. Sunulan yapı, optik gizleme uygulamalarının yanı sıra elektromanyetik ve ses dalgalarının kullanıldığı gizleme senaryolarında da kullanılabilir.

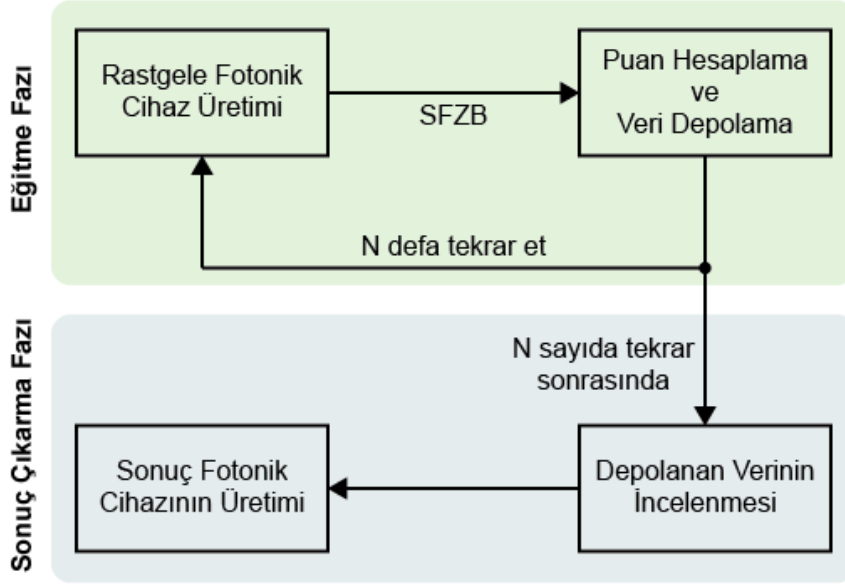
### 3.2 Küçük Boyutlu Lens ve Optik Bağlayıcı Tasarımı\*

Bu çalışmanın hedefi gelen ışık hüzmesini dalga boyu altında odaklayan, verimli ve aynı zamanda oldukça küçük boyutlu bir fotonik cihaz tasarlamaktır. Dalga boyu altında odaklama için gereken bir diğer kriter ise odaklanan ışık hüzmesinin genişliğinin, yani yarım maksimumda tüm genişlik (YMTG) değerinin, hava ortamında  $0.5\lambda$ 'dan küçük olmasıdır; burada  $\lambda$  ışığın dalga boyudur. Tasarım süreci boyunca, yalnızca ışığın kuvvetli odaklanmasına önem verilmemeli, bunun yanı sıra yan kulakçıkların ortaya çıkışı da göz önünde bulundurulmalıdır. Ana ortam ve yapının kesiştiği ortak yüzeyde oluşan kuvvetli ışık kırılımından dolayı odaklanan hüzmenin ana kulakçığına genellikle belirgin derecede yan kulakçıklar eşlik etmektedir. Bu durumda yan kulakçıklara aktarılan enerji istenmeyen bir radyasyon modeline sebebiyet verebilmekle birlikte odak noktasında gözlemlenen enerjinin azalmasına da sebep olabilir. Başka bir deyişle, bir odak noktasının yan kulakçıkları azaltılırsa, odaklanan ışık hüzmesinin üç boyutlu büyüklüğünde artış gözlemlenebilir. Sonuç olarak, ışığın kuvvetli odaklanması ve yan kulakçıkların seviyelerinin kontrolü arasında bir feragat etme durumu söz konusudur. Bu durumu dengelemek için ise çok amaçlı bir tasarım hayata geçirilmelidir.

Bu çalışmada, dalga boyu altında odaklama etkisi elde etme amacı ile perseptron benzeri bir algoritma olan TPÖA kullanılmıştır [79]. Bu algoritma, perseptron algoritmasının [102] toplanır güncelleme özelliği ile destekli öğrenmesinin ana fikri olan puanlandırma özelliğinin birleşiminden oluşmaktadır [103]. Algoritmanın akım şeması Şekil 3.5'te görülmektedir. Şekilden de görüldüğü üzere, toplamsal destekli öğrenme algoritması iki fazdan oluşmaktadır; eğitim ve sonuç çıkarma.

---

\*Bu bölümün esas alındığı çalışma: Turduev, M., Bor, E., Latifoglu, C., Giden, I. H., Hanay, Y. S., Kurt, H., (2018). Ultracompact photonic structure design for strong light confinement and coupling into nanowaveguide, J. Lightwave Technol, 36(14):2812–2819.



Şekil 3.5 : TPÖA tabanlı dalga boyu altında odaklama tasarımının akış şeması.

Elde edilen bir rastgele fotonik yapı, yüksek kırılma indisli silikon (Si) piksellerinden “1” ve hava boşluğu piksellerinden “0” oluşan  $20 \times 10$  boyutlarında ikilik tabanlı sayılar matrisi olarak da düşünülebilir. Bu algoritmayı uygulamadan önce tasarlanacak yapıların ikilik tabanlı sayılar matrisleri şeklinde olması ve matrislerin elemanlarının yapıda  $100 \text{ nm} \times 100 \text{ nm}$  boyutlarında kalınlığı  $280 \text{ nm}$  olan piksellere karşılık geleceği düşünülmüştür. Yapıda kullanılan silikon malzemesinin kırıcılık indisi ise  $n_{\text{Si}}=3.46$  olacak şekilde belirlenmiştir. Böylelikle, elde edilen tamamlanmış fotonik yapının boyutu  $2 \text{ } \mu\text{m} \times 1 \text{ } \mu\text{m} \times 0.28 \text{ } \mu\text{m}$  olarak hesaplanmıştır. Dikkat edilmesi gereken bir diğer konu ise uygulanabilirlik kısıtlamalarının üretim teknolojisi göz önünde bulundurularak seçilmiştir. Eğitime fazının bir aşaması ise SFZB yöntemi kullanılarak optik haberleşme dalga boyu olan  $\lambda=1.55 \text{ } \mu\text{m}$ 'de daha önceden oluşturulmuş olan fotonik yapının zaman düzleminde tepkisini analiz etmektir. Özellikle yapının zaman düzlemindeki tepkilerinde YMTG ve maksimum yan kulakçık seviyesi (MYKS) değerlerine ilişkin bilgiler ortaya çıkarılmıştır. YMTG ve MYKS değerleri rastgele oluşturulmuş  $i$ . sıradaki fotonik yapının puanını hesaplamada ( $R_i$ ) girdi olarak kullanılmıştır. Bu işlem aşağıdaki puanlama fonksiyonu gibidir.

$$R_i = R_{maks} - (\beta_1 \times YMTG_i + \beta_2 \times MYKS_i) \quad (3.4)$$

Bu ifadede,  $YMTG_i$  ve  $MYKS_i$  sırasıyla her oluşturulmuş olan her fotonik yapının YMTG ve MYKS değerlerini belirtmektedir. Yukarıda verilen bu fonksiyondan da görüldüğü üzere YMTG ve MKYS değerleri arasındaki feragat etme durumu  $\beta_1$  ve  $\beta_2$



ağırlıklandırma katsayıları tarafından dengelenmiştir. Öte yandan tasarım amacının düşük YMTG ve MKYS değerlerine sahip bir fotonik yapı elde etmek olduğunu düşünürsek puanlama fonksiyonunda  $R_i$ ,  $R_{max}$ 'a yaklaşım yapmaktadır. Bu sebepten ötürü, sabit bir değere sahip olan  $R_{max}$  aşağıdaki koşula göre gelişigüzel seçilmiştir.

$$R_{max} > (\beta_1 \times YMTG_i + \beta_2 \times MYKS_i) \quad (3.5)$$

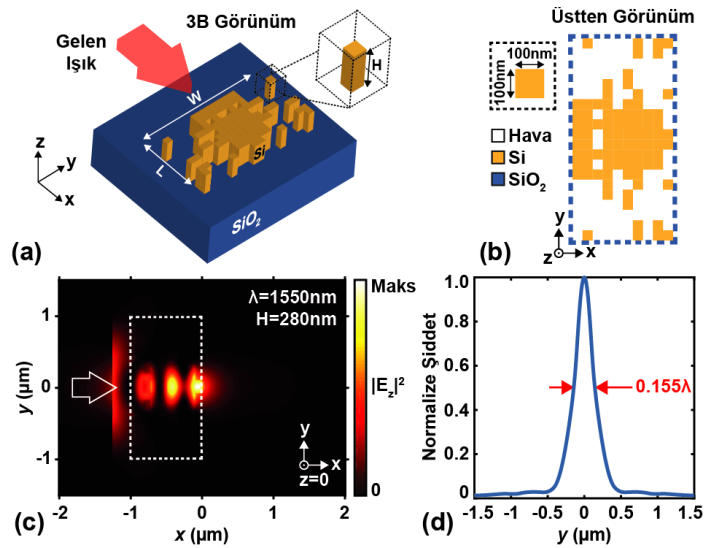
Eğitime fazı N defa fotonik cihaz üretilinceye kadar devam eder. Daha sonra ikinci faz olan sonuç çıkarma fazı başlar. Sonuç çıkarma fazında ise algoritma, eğitimde elde ettiği sonuçlardan bir toplam puanlama matrisi elde etmektedir ve veri kümesindeki fotonik cihazlar arasından puanlama fonksiyonunu maksimize eden yeni bir fotonik cihaz yani sonuç matrisi bulma konusunda karar vermektedir.

Tasarlanmış olan fotonik cihaz hava ortamına yerleştirilmiş kare şeklinde dielektrik silikon pikseller içermektedir. TPÖA piksellerin hava veya dielektrik olma durumlarını yakın alanda istenen odaklama özelliğini elde etmek için belirlemektedir. TPÖA ile ilgili bir diğer önemli nokta ise belirlenen fotonik yapının enine manyetik (EM) polarizasyon için yani manyetik alanın xy-düzlemi doğrultusunda ( $H_x$ ,  $H_y$ ) ve elektrik alanın xy-düzlemine dik ( $E_z$ ) olması koşulları altında kuvvetli odaklama yapabilesidir. Burada polarizasyon seçimi sadece EM olarak kısıtlandırılmamakla beraber, EE polarizasyonu için de aynı tasarım işlemi uygulanabilir.

Veri kümesindeki rastgele üretilen fotonik cihazlar EM polarizasyonda sürekli kaynak ile çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Yapılan tüm nümerik hesaplamalarda yapıyı uyarmak için Gauss şiddet profiline sahip ışık kaynağı kullanılmıştır, yani kaynağın genliği bir uzaysal Gauss fonksiyonu ile sonlu ve düzgün bir hüzme genişliği elde etmek için çarpılmıştır. Bu çalışmanın amacına uygun olarak, optik iletişim uygulamaları doğrultusunda tasarım süresince kullanılan dalga boyu optik haberleşme dalga boyu olan 1550 nm olarak sabitlenmiştir. En iyi dalga boyu altında odaklama performansına sahip fotonik cihaz Şekil 3.6(a)'da verilmiştir. Tasarlanan fotonik lens 280 nm kalınlıkta silikon katmanın 3.5  $\mu\text{m}$  yalıtkan üstünde silikon (YÜS) alt taş üzerine inşa edilmiştir. Silikon (Si) katmanın ve silikondioksit ( $\text{SiO}_2$ ) alt alttaşın kırılma indisleri sırası ile  $n_{\text{Si}}=3.46$  ve  $n_{\text{SiO}_2}=1.44$  olarak sabitlenmiştir. Şekil 3.6(a) ve Şekil 3.6(b)'de sunulan lensin yapısal ölçülerine karşılık gelen sırasıyla üç boyutlu ve üstten görünümü gösterilmektedir. Fotonik cihazın genişliği (W) ve uzunluğu (L) sırasıyla  $W=2 \mu\text{m}$  ve  $L=1 \mu\text{m}$  şeklindedir ve YÜS teknolojisi ve optik haberleşme

sistemleri ile uyumlu olması açısından, tasarlanan fotonik cihazın Si katman kalınlığı (H) tasarım süreci boyunca  $H=280$  nm olarak sabitlenmiştir.

Tasarlanan lensin görüntüsünden de anlaşılacağı üzere, odak noktasını optik eksen üzerinde elde edebilmek için oluşturulan bütün yapılar x-ekseni doğrultusunda simetrik olacak şekilde tasarlanmıştır. Şekil 3.6(c)'de tasarlanan lensin durgun haldeki elektrik alan şiddet ( $|E_z|^2$ ) dağılımı gösterilmiştir. Görüldüğü üzere, ışık yapının optik merkezi doğrultusunda yerleşmektedir ve 1550 nm gelen dalga boyunda, yapıdan küçük bir odak noktası şeklinde ayrılmaktadır. Odak noktası, tasarlanan yapının bitiş noktasında konumlandırılmıştır ve bu sayede yakın alanda odaklama oluşmaktadır. Şekil 3.6(c)'den çıkarılabilecek bir diğer sonuç ise ışığın yapıya girdiği düzlemde oluşan geri yansımaya oranının düşük olmasıdır. Burada, elektrik alan şiddet dağılımı  $z=0$  düzleminde kesit alınarak gösterilmiştir ve tasarlanan yapının odaklama etkisi bu düzlemde incelenmiştir. Buradan şu sonuç çıkarılabilir; odak noktası z-ekseni yönünde uzanmaktadır ve bu durum, çizgi şeklinde odaklama yapıldığını gösterir. Odak noktasındaki şiddet dağılımının yanal kesit alanı Şekil 3.6(d)'de gösterildiği gibidir. Dalga boyu altında odaklamanın bir kanıtı olarak, gelen ışığın dalga boyu 1550 nm olduğunda tasarlanan lensin YMTG değeri  $0.155\lambda$ , yani 240.25 nm olarak hesaplanmıştır.

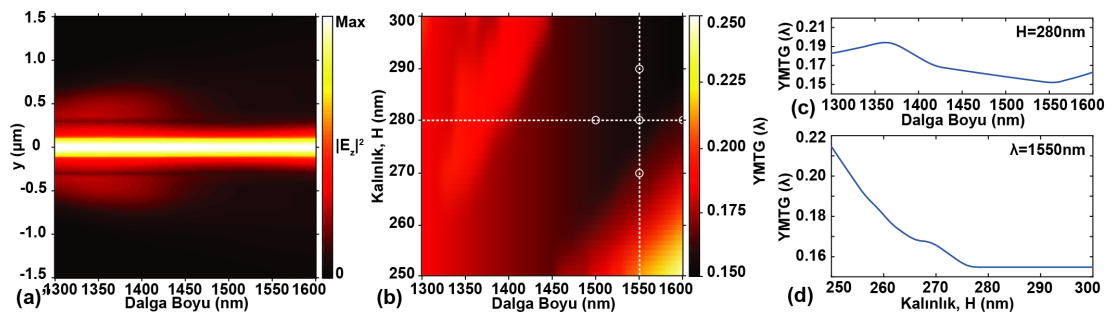


Şekil 3.6 : Tasarlanan fotonik lens yapısının (a) üç boyutlu ve (b) üstten görünümü (c) Yapıya ait  $z=0$  düzlemindeki elektrik alan şiddet dağılımı. (d) Fotonik lens yapısının odak noktasından alınmış olan yanal kesit elektrik alan şiddet dağılımı.

Tasarlanan fotonik lensin geniş bant aralığında dalga boyu altında odaklama yeteneğine sahip olduğunu göstermek amacı ile 1300 nm'den 1600 nm'ye kadar olan

dalga boylarında elektrik alan şiddet dağılımları hesaplanmıştır. Odak noktalarındaki yanal kesitler bir harita olarak Şekil 3.7(a)'da verilmiştir. Bu haritadaki incelenen yapıların kalınlıkları  $H=280$  nm olarak seçilmiştir. Şekil 3.7(a)'da farklı dalga boylarında da yapının odak noktasında kuvvetli bir hüzmeyin bulunduğu ve optik eksen etrafında yan kulakçıkların düşük olduğu görülmektedir. Eğer yan kulakçıklardaki radyasyon fazla olsaydı ana kulakçıktaki radyasyon miktarı azalacaktı ki bu durum ışığın kuvvetli odaklanması için istenmeyen bir durumdur. Bu sebeple, TPÖA kullanılmasının asıl amacı YMTG değerinin odak noktasında minimize edilmesinin yanı sıra MYKS değerlerinin de bastırılması olmuştur. Şekil 3.6(c) ve Şekil 3.7(a)'da görüldüğü üzere yapıya gelen ışık hüzmesi dar bir noktaya odaklanırken oluşan yan kulakçıklar ihmal edilebilir seviyededir.

Fotonik cihazın katman kalınlığının değişimine göre odaklama performansını gözlemlemek ise bir diğer performans incelemesidir. Bu nedenle yapının katman kalınlığı 250 nm'den 300 nm'ye kadar değiştirilmiştir ve YMTG değerleri hesaplanmıştır ve Şekil 3.7(b)'de katman kalınlığının ve EM polarizasyonda gelen hüzmeyin dalga boyunun değişimine göre harita olarak verilmiştir. Bu haritadan görülebildiği üzere kesikli çizgilerin kesiştiği nokta 280 nm katman kalınlığını ve 1550 nm dalga boyunu göstermektedir. Haritadaki şiddet değerleri  $0.15\lambda$  ile  $0.25\lambda$  arasında değişen YMTG değerlerini göstermektedir. 250 nm'den 300 nm'ye değişen olası kalınlık değişimlerinde bile tasarlanmış olan fotonik lens yine de istenen dalga boyu altında odaklama etkisini gösterebilmektedir.

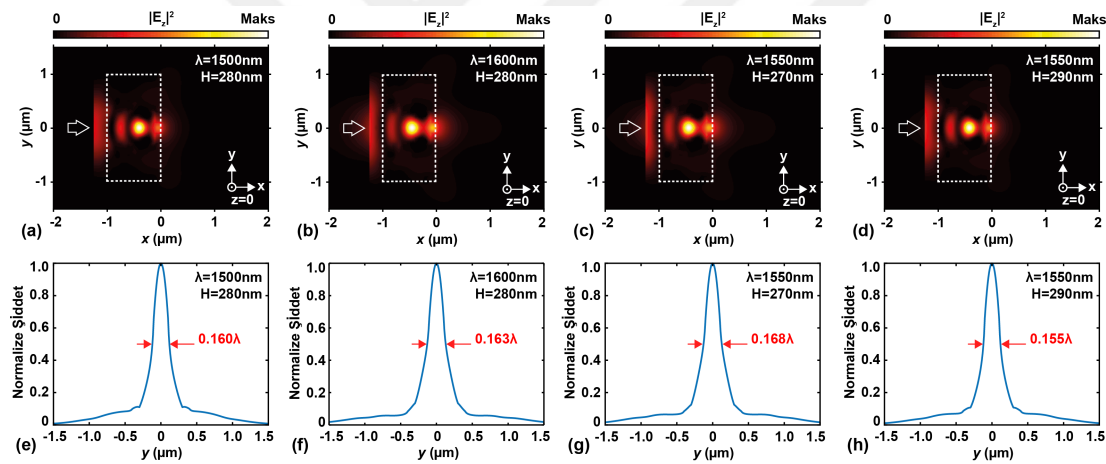


Şekil 3.7 : (a) 280 nm sabit kalınlıkta enine kesit elektrik alan şiddet dağılımı haritası. (b) Farklı kalınlıklarda tasarlanmış lensler için hesaplanmış YMTG değerlerinin haritası. (c) 280 nm sabit kalınlık için YMTG değerleri. (d) 1550 nm dalga boyunda, kalınlık ile değişen YMTG değerleri.

Tasarlanan lensin odaklama performansını incelemek amacı ile Şekil 3.7(a)'da verilen harita üzerinde dikey ve yatay kesitler alınmıştır. Alınan bu kesitler sırasıyla Şekil 3.7(c) ve Şekil 3.7(d)'de gösterilmiştir. Şekil 3.7(c)'deki eğri, dalga boyunun

değişimine göre sabit 280 nm kalınlıkta YMTG değerlerinin değişimini göstermektedir. Öte yandan, Şekil 3.7(d) ise YMTG değerlerinin fotonik yapının katman kalınlığına göre değişimini göstermektedir. Şekil 3.7(c) ve Şekil 3.7(d)'de belirtildiği üzere, hesaplanmış YMTG değerleri 1450 nm – 1590 nm arası dalga boylarında ve 280 nm sabit kalınlık için  $0.16\lambda$ 'nın altında kalmaktadır; sabit 1550 nm dalga boyu ile 275 nm – 300 nm arasında değişen kalınlık değerleri için  $0.16\lambda$  YMTG değeri elde edilmektedir.

Tasarlanmış olan lensin özellikleri daha ayrıntılı incelenebilir. Bu nedenle, tasarlanan lens için farklı dalga boyları ve farklı katman kalınlıkları göz önünde bulundurularak Şekil 3.7(b)'de verilen haritada beyaz çemberler ile seçilmiş olan durumların elektrik alan şiddet dağılımları incelenmiştir. İlk olarak sırasıyla Şekil 3.8(a) ve Şekil 3.8(b)'de katman kalınlığı 280 nm, gelen dalga boyunun 1500 nm ve 1600 nm olduğu durumlarda elektrik alan şiddet dağılımları gösterilmiştir.



Şekil 3.8 : Farklı dalga boyları ve kalınlıkları için sunul odak noktasındaki şiddet dağılımları ve şiddet kesit profilleri. Kalınlığı 280 nm olan (a) 1500 nm ve (b) 1600 nm dalga boylarındaki yapıların şiddet dağılımları. 1550 nm dalga boyunda, katman kalınlığı (c) 270 nm ve (d) 290 nm olan yapıların şiddet dağılımları. Seçilen yapıların odak noktalarındaki şiddet kesit profilleri sırasıyla (e), (f), (g) ve (h)'de verilmiştir.

Yine bu durumlar için odak noktasında şiddet kesitleri ise sırasıyla Şekil 3.8(e) ve Şekil 3.8(f)'de gösterilmiştir. Bu şekillerden görüldüğü üzere, hesaplanmış olan YMTG değerleri halen  $0.16\lambda$  civarındadır. Buradan dalga boyu altında odaklamanın 100 nm gibi geniş bir bant aralığında elde edilebildiği anlaşılmaktadır. Entegre edilebilir fotonik yapılar için bir diğer önemli nokta ise katman kalınlığının üretim hatalarından dolayı belirsiz olma ihtimali durumudur. Bu amaç doğrultusunda, 1550 nm'de çalışacak şekilde tasarlanan lens yapısı için katman kalınlığı değerleri 270 nm

ve 290 nm olarak alınmıştır ve elektrik alan şiddet dağılımları sırasıyla Şekil 3.8(c) ve Şekil 3.8(d)'de gösterilmiştir. Şiddet dağılımlarına karşılık gelen odak noktalarındaki şiddet kesit alanları Şekil 3.8(g) ve Şekil 3.8(h)'da gösterilmiştir. Bu şekillerden görüldüğü üzere, hesaplanmış olan YMTG değerleri  $0.17\lambda$ 'dan küçüktür. Böylelikle, tasarlanmış olan lens yapısının değişen katman kalınlık değerlerine rağmen iyi performans verebildiği görülmüştür.

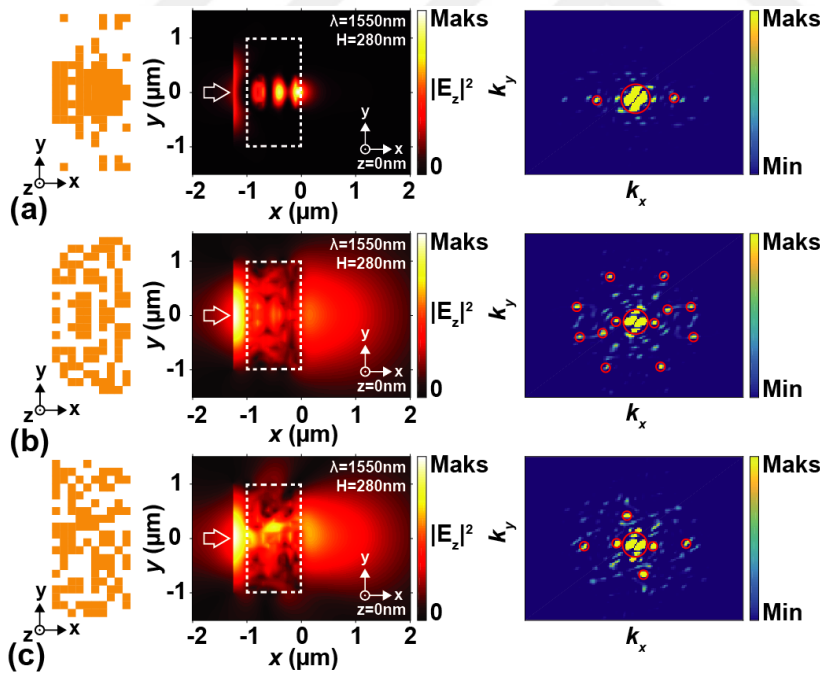
Tasarlanmış olan fotonik cihazın ışığı kuvvetli odaklama mekanizmasının fiziksel olarak açıklanması gerekmektedir. Fourier bileşenlerinin ters uzayda dağılımları bize madde-ışık etkileşim davranışları ve yapının kırınım modu özellikleri hakkında bilgi vermektedir. Bu sebepten dolayı, iki boyutta tasarlanan yapının üzerinde optik saçılım özelliklerini belirlemek amacı ile ayrık Fourier dönüşümü (AFD) uygulanmıştır. İki boyutta AFD matematiksel olarak şu şekilde ifade edilir.

$$F(k_x, k_y) = \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} \varepsilon(x, y) e^{-j2\pi\left(\frac{k_x x}{M} + \frac{k_y y}{N}\right)} \quad (3.6)$$

Burada  $\varepsilon(x, y)$ , xy-ekseninde  $M \times N$  boyutlarındaki dielektrik bir ortamın geçirgenliğini ifade eder. Fourier dönüşümünün uzaysal spektrumunu daha iyi anlamak için tasarlanmış yapı, rastgele oluşturulmuş simetrik ve asimetric yapılarla karşılaştırılmıştır ve sonuçlar Şekil 3.9'da verilmiştir. Bu şekilde sol tarafta karşılaştırmada kullanılan yapılar; ortada ilgili yapıların 1550 nm'deki elektrik alan şiddet dağılımları; sağ tarafta ilgili yapılara karşılık gelen Fourier dönüşümleri verilmiştir. Fourier spektrumlarında gösterilen kırmızı çemberler toplanan dalga vektörlerini işaret eder. Aslında sıkıştırılmış olan bu dalga vektörleri yapının içine sıkıştırılmış olan modların göstergesidir. Fourier spektrumlarında merkezdeki kırmızı çemberin yakınındaki modlar yönlü bağlantıyı dalga bileşenlerinin arasına yönlendirir. Başka bir deyişle, yapıya giren enerji çıkışa yerleştirilecek bir dalga kılavuzuna verimli bir şekilde aktarılabilir. Fakat, Si malzemesinin rastgele dağıtıldığı fotonik yapılarda Fourier spektrumları Şekil 3.9(b)'de sağda ve Şekil 3.9(c)'de sağda görüldüğü gibi dağınık dalga vektörlerine sahiptir. Bu nedenle yapıya gelen dalganın enerjisinin farklı modlara aktarıldığı ve bunun sonucunda çıktı yüzeyinde yetersiz ışık toplanmasının oluşacağı sonucuna ulaşılabilir. Bu duruma karşılık gelen elektrik alan şiddet dağılımları Şekil 3.9(b)'de ortada ve Şekil 3.9(c)'de ortada gösterilmiştir. Fourier spektrumundaki merkez etrafında yayılan benekler diğer üst seviye modlara karşılık

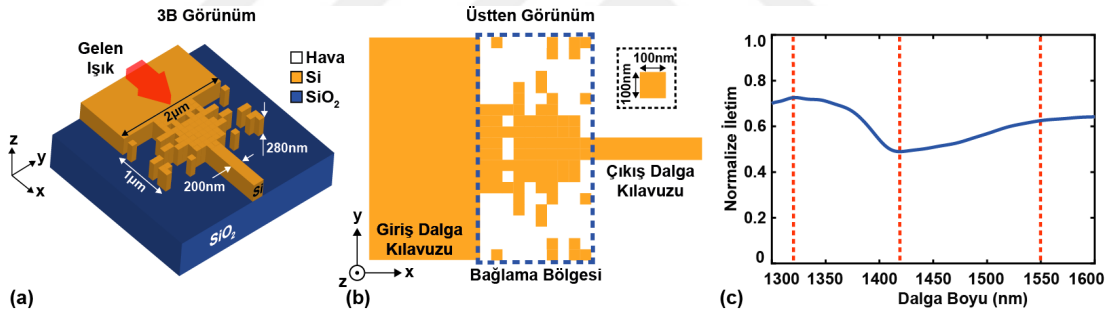
gelmektedir. Sonuç olarak, TPÖA dalga boyu altında odaklama etkisi sayesinde ışığı kuvvetli bir şekilde sıkıştırabilmektedir ve ışığı verimli bir şekilde yapı dışına transfer edebilmektedir.

Bu sonuçlar tasarlanan yapının optik haberleşme dalga boylarında YMTG değeri olarak  $\lambda/6.25$ 'in altında geniş bant aralığında dalga boyu altında odaklama etkisi yaptığını göstermektedir. Bu denli kuvvetli dalga boyu altında odaklama yapabilen bir entegre fotonik cihaz geniş bir dalga kılavuzundan gelen ışığı daha dar bir dalga kılavuzunun içine sıkıştırabilir. Burada, bağlama bölgesinin önemi ilerleyen dalğanın dalga kılavuzu içerisine sıkıştırılmasını sağlamaktır. Kuvvetli ışık sıkıştırmasına ek olarak, küçük taban alanı ve Şekil 3.9(a)'da görüldüğü gibi ona karşılık gelen Fourier dönüşümü tasarlanmış olan fotonik lensin gerçekten de dalga kılavuzundan dalga kılavuzuna optik bağlama uygulamaları için umut vaat edici bir çözüm olduğunu göstermektedir. Buna ek olarak, tasarlanmış olan yapı plazmonik ve meta malzeme karşıtlarıyla karşılaştırıldığı zaman yapının tamamen dielektrik olması onu bütün emilim kayıplarından muaf tutar ve geniş bant aralığında çalışmasına olanak sağlar.



Şekil 3.9 : (a) Solda: En yüksek puanlama değerine sahip olan fotonik yapı; Merkezde: 1550 nm çalışma dalga boyu için şiddet dağılımı; Sağda: Yapının temsili ters uzay karşılığı. (b) Solda: En düşük puanlama değerine sahip rastgele oluşturulmuş simetrik yapı; Merkezde: 1550 nm çalışma dalga boyu için şiddet dağılımı; Sağda: Yapının temsili ters uzay karşılığı (c) Solda: rastgele oluşturulmuş asimetric fotonik yapı; Merkezde: 1550 nm çalışma dalga boyu için şiddet dağılımı; Sağda: Yapının temsili ters uzay karşılığı.

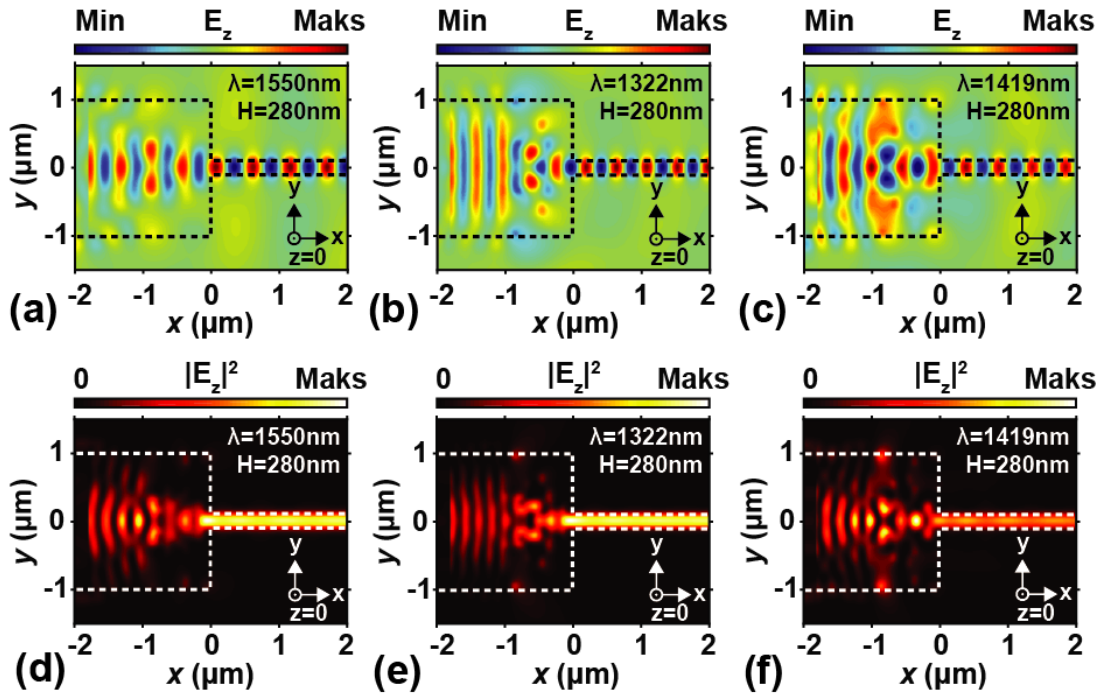
Bu çalışmada önerilen TPÖA tabanlı fotonik lens tasarımı aynı zamanda bağlama işlevi için de ayrıntılı bir biçimde incelenmiştir. Bu nedenle, 200 nm genişliğinde silikon dalga kılavuzu yapının arka yüzeyine entegre edilmiştir. Giriş dalga kılavuzu olarak, 2  $\mu\text{m}$  kalınlığında silikon dalga kılavuzu yapının ön yüzüne entegre edilmiştir. Üç boyutlu tasarlanmış olan 280 nm kalınlığında, dalga kılavuzundan dalga kılavuzuna bağlayıcı ve buna karşılık gelen bağlayıcının üstten görünümü sırasıyla Şekil 3.10(a) ve Şekil 3.10(b)'de gösterilmiştir. Tasarlanmış olan yapının 1300 nm ve 1600 nm dalga boyları arasında hesaplanan iletim verimliliği ise Şekil 3.10(c)'de gösterilmektedir. Bu şekilde, 1550 nm, 1322 nm ve 1419 nm dalga boylarındaki kesikli çizgiler sırasıyla tasarım dalga boyunu, en yüksek iletimin olduğu dalga boyunu ve en düşük iletimin olduğu dalga boyunu temsil etmektedirler. 1550 nm dalga boyu için hesaplanan iletim verimi %62'dir. Maksimum iletim değeri 1322 nm dalga boyu için %72 olarak hesaplanmıştır. Minimum iletim değeri 1419 nm dalga boyu için %51 olarak hesaplanmıştır. İletim verimliliği hesaplamalarında bağlama kayıpları kadar üçüncü boyutta ortaya çıkan kayıplar da hesaba katılmıştır.



Şekil 3.10 : Tasarlanan optik bağlayıcı yapısını (a) üç boyutlu ve (b) üstten görünümü verilmiştir. (c) Tasarlanmış olan verimli bağlayıcı yapısının normalize edilmiş iletim grafiği.

Burada tasarlanan cihaz için gelen hüzmelerin çıkış dalga kılavuzuna sıkıştırılan hüzmeye oranının 10:1 olduğu durumlarda verimli bir şekilde dalga kılavuzundan dalga kılavuzuna ışık bağlama işleminde kullanılabileceği yorumu yapılabilir. Yani, tasarlanan bağlayıcı fotonik cihaz haberleşme dalga boyu olan 1550 nm'de ışık enerjisini 2  $\mu\text{m}$  genişliğinde bir dalga kılavuzundan genişliği 200 nm olan bir dalga kılavuzuna %62 oranında bağlama verimliliğine sahiptir. Dahası, tasarlanmış olan bağlayıcı 1300 nm'den 1600 nm'ye olan geniş dalga boyu aralığında %51'in üzeri değerlerde yeterli bir bağlama performansına sahiptir.

1550 nm, 1322 nm ve 1419 nm dalga boylarına karşılık gelen durgun hal elektrik alan ( $E_z$ ) dağılımları sırasıyla Şekil 3.11(a)-(c)'de gösterilmiştir. Farklı bölgelerdeki (giriş, bağlayıcı ve çıkış) alan dağılımları seçilmiş olan temsili dalga boylarından gözlemlenebilir. Aynı dalga boyları için uzaysal elektrik alan şiddet dağılımları ise Şekil 3.11(d)-(f)'de gösterilmektedir. Bu şekillerde kesikli çizgiler, tasarlanmış olan bağlayıcı yapının sınırlarını temsil etmektedir. Şekil 3.11'den görüldüğü üzere çıkış dalga kılavuzuna sıkıştırılan ışık tek moda sahiptir. Şekil 3.10(c)'deki bağlayıcı verimini göz önünde bulundurduğumuzda, tasarlanmış olan lensin kabul edilebilir bir bağlayıcı etkisi gösterdiği sonucuna varılabilir. Tasarlanan bu optik bağlayıcı yapısı tek modda çalışan entegre fotonik devre uygulamaları için kullanılabilir.



Şekil 3.11 : (a) 1550 nm, (b) 1322 nm ve (c) 1419 nm dalga boylarında elektrik alan dağılımları. Elektrik alan şiddet dağılımları ise sırasıyla (d), (e) ve (f)'de verilmiştir.

Sonuç olarak, TPÖA kullanarak dalga boyu altında odaklama yapabilen bir lens tasarlanmış ve bu lensin dalga boyu altında odaklama özelliği 3B SFZB metodu kullanılarak nümerik olarak incelenmiştir. Tasarlanmış olan lens yapısının SFZB değeri  $0.155\lambda$  ve bastırılmış yan kulakçık seviyeleriyle kuvvetli odaklama kabiliyetine sahiptir. Çalışma aralığı olarak dalga boyu 1500 nm'den 1600 nm'ye ve katman kalınlığı 270 nm'den 300 nm'ye değişen değerler için YMTG değerleri  $\lambda/6$  civarında hesaplanmıştır ki bu tasarlanan yapının %6.45 oranında çalıştığı geniş bant aralığına sahip olduğunu ve üretim sırasında katman kalınlığında çıkan hatalardan



performansının etkilenmediğini gösterir. Tasarlanmış olan lens yapısının odaklama mekanizmasının fiziksel arka planını açıklamak için AFD kullanılmıştır. Buna ek olarak, tasarlanan lens yapısının optik bağlayıcı olarak kullanımı da sunulmuştur. Optik bağlayıcının iletim verimliliği 1550 nm dalga boyunda %62 olarak hesaplanmıştır. Tasarlanmış olan bağlayıcı yapısı 10:1 oranında sıkıştırma özelliğine sahiptir ve 1300 nm'den 1600 nm'ye (%20.68 oranında bant genişliği) %51'in üstünde bir bağlama verimliliği göstermektedir. Tasarlanan fotonik cihaz küçük boyutlara sahip olmasının yanında, tamamen dielektrik malzemelerden oluşmaktadır, YÜS teknolojisine uygulanabilir özelliktedir ve entegre fotonik devrelerde kullanımı mümkündür. Son olarak, TPÖA verimli ve küçük boyutlu entegre fotonik cihazların tasarımı için etkili bir yöntemdir.

### **3.3 Optik Bağlayıcı Tasarımı\***

Entegre fotonik cihazlar arasında ışığın verimli bir şekilde iletimi entegre fotonik devrelerin performansı için temel bir karakteristiktir. Burada, serbest uzaydan entegre fotonik devrelere yeterli miktarda optik gücün enjekte edilmesi önemlidir. Çünkü, entegre fotonik devreler içerisinde dolaşan ışık entegre fotonik cihazların çalışmasını doğrudan etkiler. Ancak, ışığın serbest uzaydan entegre fotonik cihazlara iletilmesi oldukça zordur. Bunun sebebi, YÜS platformlardaki yüksek kırıcılık indisi farkı ve optik fiberler ile dalga kılavuzları arasındaki mod derecesinin farklı olmasıdır. Bu nedenle, gelen ışığı dalga kılavuzuna hapseden optik bağlayıcı tasarımı entegre fotonik devre uygulamaları için önemlidir.

Bu çalışmada, YSA tabanlı ÇS algoritmasının bir uygulaması olarak oldukça küçük boyutlu ve verimli bir optik bağlayıcı entegre fotonik cihazın tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan optik bağlayıcı, serbest uzayda ilerlemekte olan gelen ışığı silikon dalga kılavuzu içerisine hapsedmektedir. Burada tasarımı hedeflenen entegre fotonik cihaz nümerik olarak YÜS malzemeler kullanılarak tasarlanmıştır. Bir entegre fotonik cihaz tasarlamak için istenilen optik karakteristiklerini ÇS algoritmasına maliyet fonksiyonu olarak tanımlamak gerekmektedir.

---

\*Bu bölümün esas alındığı çalışma: Bor, E., Alparslan, O., Turduev, M., Hanay, Y. S., Kurt, H., Arakawa, S., Murata, M., (2018). Integrated silicon photonic device design by attractor selectin mechanism based on artificial neural networks: optical coupler and asymmetric light transmitter, Opt. Express, 26(22):29032–29044.

Bu nedenle, optik bağlayıcı yapısı için bir maliyet fonksiyonu belirlenmiştir. Burada, ÇS algoritması kullanılarak haberleşme dalga boylarında belirli bir çalışma bant aralığı için iletim verimliliğinin artırılması başarılmıştır. Bu durumda, ilgili hata değeri hedef iletim verimi ile anlık tasarlanan yapının iletim verimi arasındaki farkın tüm dalga boyları için toplamıdır.

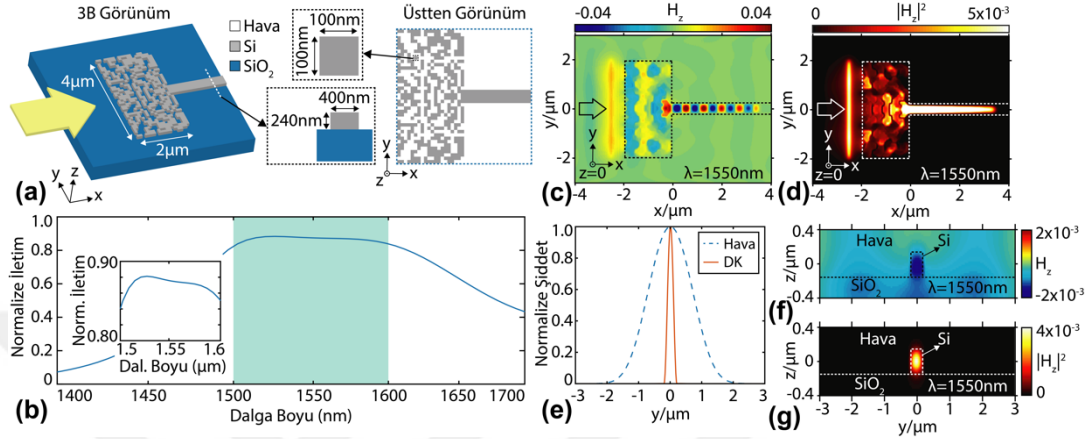
Optik bağlayıcı tasarlamak için maliyet fonksiyonu olarak kullanılan hata ( $E$ ) değeri aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$E_{bağlayıcı} = \sum_{i=\lambda_{ilk}}^{\lambda_{son}} (T_{hedef} - T_i). \quad (3.7)$$

Burada,  $T$  kullanıcı tarafından belirlenen hedef iletim verimidir.  $T_i$  ise seçilen  $i$ . sıradaki dalga boyundaki hesaplanan iletim verimidir. Hedeflenen çalışma bant aralığındaki ilk dalga boyu ve son dalga boyu sırasıyla  $\lambda_{ilk}$  ve  $\lambda_{son}$  ile temsil edilmiştir.

Bu çalışmada, ÇS algoritması kullanılarak  $4 \times 2 \mu\text{m}^2$  boyutta bir optik bağlayıcı yapısı tasarlanmıştır. Tasarlanan optik bağlayıcı  $100 \text{ nm} \times 100 \text{ nm}$  boyutlarında ve  $240 \text{ nm}$  kalınlığında silikon birim hücrelerden oluşmaktadır.  $400 \text{ nm}$  genişliğinde silikon nano dalga kılavuzu ise optik bağlayıcı bölgesinin çıkışına bitişik olacak şekilde yerleştirilmiştir. Şekil 3.12(a)'da fotonik cihazın 3B ve üstten görüşleri ile yapısal boyutları verilmiştir. Tasarlanan optik bağlayıcı yapısı serbest uzayda gelmekte olan dalgayı silikon nano dalga kılavuzu içerisine yatay düzlemde sıkıştırmaktadır. Işığın ilerleme yönü sarı ok ile Şekil 3.12(a)'da belirtilmiştir. 3B SFZB simülasyonları boyunca, YÜS platformunun şartlarını sağlamak adına  $\text{SiO}_2$  malzemesi alttaş olarak seçilmiştir. Sunulan optik bağlayıcı yapısı x-eksenine göre simetrik olacak şekilde tasarlanmıştır (eksenler Şekil 3.12(a)'da gösterilmiştir). 3B SFZB simülasyonlarında optik bağlayıcının bağlama verimini hesaplamak için EE polarizasyona sahip  $1300 \text{ nm} - 1800 \text{ nm}$  dalga boyları arasında çalışan düzlem dalga ışık kaynağı kullanılarak entegre fotonik cihaz uyarılmıştır. Burada xy-düzleminde elektrik alan bileşenleri ( $E_x$ ,  $E_y$ ) ve xy-düzlemine dik olan yönde manyetik alan bileşeni ( $H_z$ ) bulunmaktadır. Bahsedildiği üzere, ÇS algoritması kullanılarak optik haberleşme dalga boylarında belirli bir bant genişliğinde çalışan optik bağlayıcı yapısı tasarlanmıştır. Bu nedenle, tasarlanan optik bağlayıcı yapısına ait bağlama verimi Şekil 3.12 (b)'de verilmiştir. Bu şekil üzerinde, gölgelendirilmiş bölge çalışma aralığı olan  $1500 \text{ nm} - 1600 \text{ nm}$  dalga

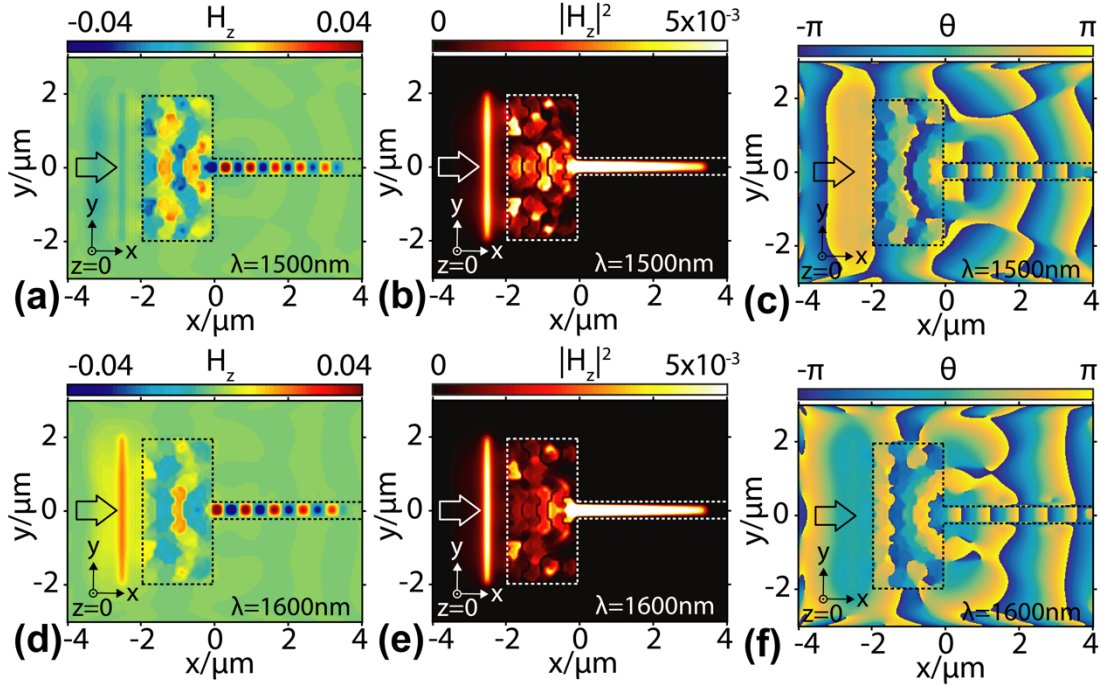
boyları arasını göstermektedir ki bu dalga boyları sırasıyla hata değer hesaplama denkleminde yer alan  $\lambda_{ilk}$  ve  $\lambda_{son}$  terimleridir. Bunun sonucunda ÇS algoritması, Şekil 3.12(b)'de görüldüğü üzere, bağlama verimi %84'ün üzerinde ve merkezi 1550 nm dalga boyunda olan %6.45 bant aralığına sahip optik bağlayıcı tasarlamıştır. Merkez dalga boyu 1550 nm'de hesaplanan iletim verimi %87.5'tir.



Şekil 3.12 : (a) Optik bağlayıcı yapısının 3B ve üstten görünüşü (b) Normalize iletim verimi. (c) Manyetik alan ve (d) şiddet kesitleri. (e) Yapının girişinde (havada) ve nano dalga kılavuzu üzerinde şiddet profilleri. Nano dalga kılavuzu üzerinde (f) manyetik alan ve (g) şiddet dağılımları.

Manyetik alana ( $H_z$ ) ve şiddetine ( $|H_z|^2$ ) ait 3B SFZB bölgesinde  $z=0$  düzleminde ve gelen ışığın dalga boyu  $\lambda=1550$  nm olduğu durumda hesaplanan uzaysal durgun hal kesitlerinin görüntüsü sırasıyla Şekil 3.12(c) ve Şekil 3.12(d)'de verilmiştir. Bu şekiller üzerinde, kesikli çizgiler ile optik bağlayıcı yapısının sınırları belirtilmiştir. Şekil 3.12(c)'de görüldüğü üzere, tasarlanan fotonik cihaz gelen ışığı nano dalga kılavuzuna hapsedmektedir. Önerilen optik bağlayıcı 10:1 oranında yüksek dönüşüm oranına sahiptir. Bir başka deyişle, bağlayıcı bölgesi 4 μm genişliğe sahipken, nano dalga kılavuzu 400 nm genişliğe sahiptir. Şekil 3.12(c) ve Şekil 3.12(d)'de görüldüğü üzere, tasarlanan bağlayıcı bölgesi sayesinde havadan gelen ışığın yansımaları azalmaktadır ve gelen ışık nano dalga kılavuzu içerisine %87.5 bağlama verimi ile sıkıştırılmaktadır. Gelen dalganın sıkıştırılma işlemi dalga cephelerinin yakınsar hâle dönüştürülmesi ile sağlanmaktadır, yani gelen dalga bağlayıcı alan ile nano dalga kılavuzu arasında bulunan bölgedeki bir noktaya doğru odaklanmaktadır. Bu nedenle, odaklanan dalga kolay bir şekilde nano dalga kılavuzuna hapsolabilmekte ve yüksek iletim verimi ile ilerleyebilmektedir. Şekil 3.12(e)'de gelen dalganın ve nano dalga kılavuzu içerisinde ilerleyen dalganın y-ekseni yönünde şiddet kesitleri üst üste

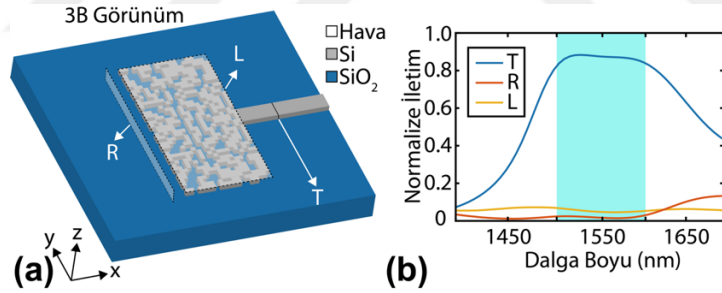
çizdirilmiştir ve burada gelen dalga için uzaysal olarak sıkışması açıkça görülmektedir. Şekil 3.12(f) ve Şekil 3.12(g)'de nano dalga kılavuzu üzerinde yz-düzleminde hesaplanan manyetik alan ve şiddet kesitleri sırası ile gösterilmiştir. Bu şekiller üzerinde kesikli çizgiler cihazın sınırlarını göstermektedir. Yine bu şekillerden görüldüğü üzere, gelen dalga nano dalga kılavuzuna güçlü bir şekilde hapsedilirken SiO<sub>2</sub> altına sızan ışık miktarı ihmal edilecek kadar azdır.



Şekil 3.13 : 3B SFZB uzayında  $z=0$  düzleminde  $\lambda=1500$  nm dalga boyu için hesaplanan (a) manyetik alan, (b) şiddet ve (c) faz dağılımları gösterilmiştir. 3B SFZB uzayında  $z=0$  düzleminde  $\lambda=1600$  nm dalga boyu için hesaplanan (d) manyetik alan, (e) şiddet ve (f) faz dağılımları gösterilmiştir.

Tasarlanan optik bağlayıcının geniş bant aralığında çalışmasını incelemek için 3B SFZB uzayının  $z=0$  düzleminde dalga boylarında hesaplanan durgun haldeki manyetik alan, şiddet ve faz kesitleri 1500 nm dalga boyu için Şekil 3.13(a)-(c)'de ve 1600 nm dalga boyu için Şekil 3.13(d)-(f)'de verilmiştir. Seçilen bu dalga boyları hesaplanan çalışma bant aralığının sınırlarıdır. Şekil 3.12(b)'de verilen iletim verimi grafiğine göre tasarlanan optik bağlayıcının bağlama verimi 1500 nm ve 1600 nm dalga boyları için sırasıyla %84 ve %85 olarak hesaplanmıştır. Bu nedenle, Şekil 3.13(a) ve Şekil 3.13(d)'de verilen alan dağılımları güçlü sıkıştırma etkisini göstermektedir. Hatta, Şekil 3.12(b)'de görüldüğü üzere, belirlenen çalışma bant aralığında bağlama verimi neredeyse sabittir (salınımlar ihmal edilecek kadar azdır). Bu nedenle, 1500 nm ve 1600 nm dalgaboyları aralığında yüksek sıkıştırma etkisi gözlemlenebilir. Benzer

şekilde, aynı çalışma bant aralığının sınırlarında bulunan dalga boyları için yüksek uzaysal sıkıştırmanın olduğu Şekil 3.13(b) ve Şekil 3.13(e)'de verilen şiddet dağılımlarından görülebilmektedir. Ek olarak, 1500 nm ve 1600 nm dalga boylarındaki faz dağılımları sırasıyla Şekil 3.13(c) ve Şekil 3.13(f)'de verilmiştir. Bu faz dağılımları gelen dalganın düzlem faz yüzlerinin optik bağlayıcı içerisinde yakınsayan şekilli faz yüzlerine dönüştüğünü göstermektedir. Sonuç olarak, yakınsayan faz yüzlerine sahip dalga nano dalga kılavuzu içerisine hapsolmaktadır. Şekil 3.13(a)-(f) üzerindeki kesikli çizgiler bağlama bölgesinin ve nano dalga kılavuzunun sınırlarını göstermektedir. Tüm bunlara ek olarak, optik bağlayıcının iletim (T) değerinin yanı sıra yansıma (R) ve düzlem dışı kayıp (L) karakteristikleri incelenmiştir. Bu sebeple, girişteki ışık kaynağının arkasına optik güç ölçen monitör yerleştirilerek tasarlanan entegre fotonik cihazın giriş yüzeyinden yansıyan dalganın optik gücü hesaplanmıştır. Buna ek olarak, bağlama bölgesinin yukarısına optik güç monitörü yerleştirilerek düzlem dışı kayıplar hesaplanmıştır. Şekil 3.14(a)'da bu monitörlerin yerleri temsili olarak 3B görünüm üzerinde gösterilmiştir. Hesaplanan verimler Şekil 3.14(b)'de sunulmuştur. Bu şekilden görüldüğü üzere, çalışma bant aralığı için yansıyan optik güç %2.5'tan azdır ve düzlem dışı kayıplar %5'ten düşüktür.



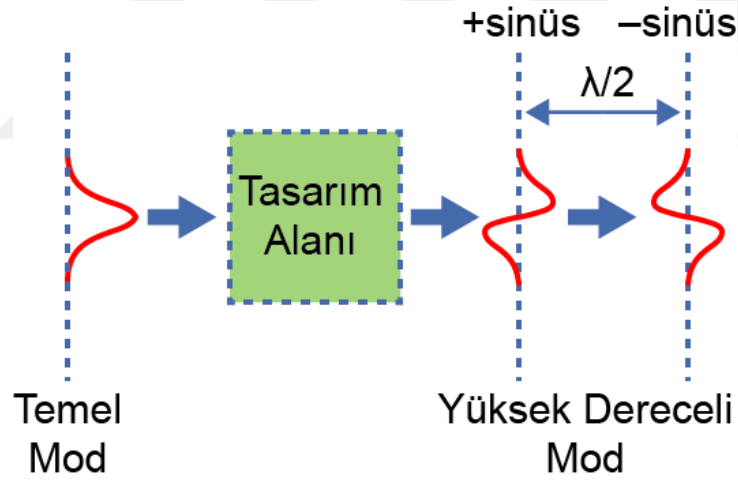
Şekil 3.14 : (a) Optik bağlayıcı yapısının 3B şematığı üzerinde iletim, yansıma ve düzlem dışı kayıpları hesaplamak için yerleştirilen optik güç monitörlerinin pozisyonları gösterilmiştir. (b) İletim, yansıma ve düzlem dışı kayıp verimleri verilmiştir, gölgelendirilmiş bölge çalışma bant aralığını göstermektedir.

### 3.4 Mod Mertebe Çevirici Fotonik Kristal Tasarımı\*

Fotonun akışının kontrolü ve ilerleyen dalga modunun mertebesinin ayarlanması, özellikle optik haberleşme ve tüm optik sinyal işleme sistemlerinde önemli rol oynar.

\*Bu bölümün esas alındığı çalışma: Bor, E., Kurt, H., Turduev, M., (2019). Metaheuristic approach enabled mode order conversion in photonic crystals: numerical design and experimental verification, J. Opt., 21(8):085801.

Genellikle, dar yapılu dalga kılavuzu sistemleri sadece temel modları desteklerken, yüksek mertebeden modları desteklemezler. Ancak, çok modlu optik devre uygulamalarında yüksek mertebede moda sahip ışığa ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmada DE algoritması kullanılarak bir mod mertebeye çevirici fotonik cihaz tasarlanmıştır. Mod mertebeye çevirici yapısı tasarlamak için kare örgüde dizilmiş iki boyutlu bir FK yapısı ele alınmıştır. Bu yapıda bir sütundaki çubukların y-ekseni boyunca mesafeleri algoritma ile belirlenerek çıkışta yüksek moda sahip bir hüzmeye elde edilmiştir. SFZB simülasyonlarında kullanılan çubukların malzemesi alumina ( $Al_2O_3$ ) olarak seçilmiştir ve kırıcılık indisleri  $n_{\text{çubuk}}=3.13$  olarak sabitlenmiştir. Çubukların yarı çapları  $r=0.2a$  ve çubukların merkezleri arasındaki x-ekseni boyunca olan mesafe  $1a$  olarak sabitlenmiştir. Burada uzunluk birimi olan  $a$  FK'in örgü sabitidir. Eniyileme işlemi FK'deki bir sütuna uygulanmıştır ve tasarlanan bu sütun çoğaltılarak bütün bir yapı oluşturulmuştur. Tasarlanan yapı EM polarizasyonundaki bir dalgayı  $EM_0$  temel moddan  $EM_1$  yüksek dereceli moda çevirmektedir. Tasarım işlemi Şekil 3.15'te temsilen gösterilmiştir.



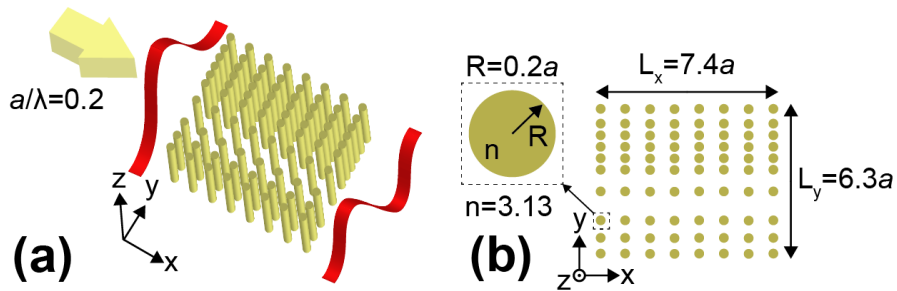
Şekil 3.15 : Boş uzayda mod mertebeye çevrimi için FK tasarlama işlemi.

Burada, yapının çıkışındaki elektrik alanda dalga boyunun yarısı kadar mesafeden alınan elektrik alan kesit profillerinin sinüs dalgasına benzemesi, yüksek dereceli modun elde edilmesinde faydalı olacaktır. Bu nedenle, yapının çıkışındaki ilk kesit profiline normal bir sinüs fonksiyonu olması, ilk kesitten yarım dalga boyu uzaklıktaki ikinci kesitteki profiline ise negatif sinüs fonksiyonu olması istenmiştir. Bu doğrultuda hedef fonksiyonları tanımlanmıştır. Bu hedef fonksiyonları ile belirlenen pozisyonlarda hesaplanan elektrik alan kesit profilleri arasındaki hata minimize edilmeye çalışılmıştır. Bunun için tanımlanan maliyet fonksiyonu aşağıdaki gibidir.

$$f_{maliyet} = w_L \left\{ \sum_y (|E_{h,L}(y) - E_{z,L}(y)|) \right\} + w_R \left\{ \sum_y (|E_{h,R}(y) - E_{z,R}(y)|) \right\} - w_T T \quad (3.8)$$

Burada  $L$  ve  $R$  ifadeleri sırasıyla sol ve sağ kesit pozisyonlarını temsil etmektedir. Hedeflenen kesit profilleri yani sinüs grafikleri ise  $E_{h,L}$  ve  $E_{h,R}$  ile ifade edilmiştir. Ayrıca, DE algoritması ile iletim verimliliği ( $T$ ) de artırılmaya çalışılmıştır. Burada  $w_L$ ,  $w_R$  ve  $w_T$  ifadeleri ise ağırlıklandırma katsayılarıdır. Bu ağırlıklandırma katsayılarının belirlenmesi önemlidir. Bunun sebebi, kesit profillerinden kaynaklanan hata değerlerinin iletim verimliliği değerinden sayısal olarak daha büyük olmasıdır. Bu nedenle iletim verimliliği için olan katsayının ( $w_T$ ) diğer ağırlıklandırma katsayılarından daha büyük olması gerekmektedir. Sonuç olarak  $a/\lambda=0.2$  normalize frekansı için tasarlanan FK yapısının görünüşü Şekil 3.16'da verilmiştir.

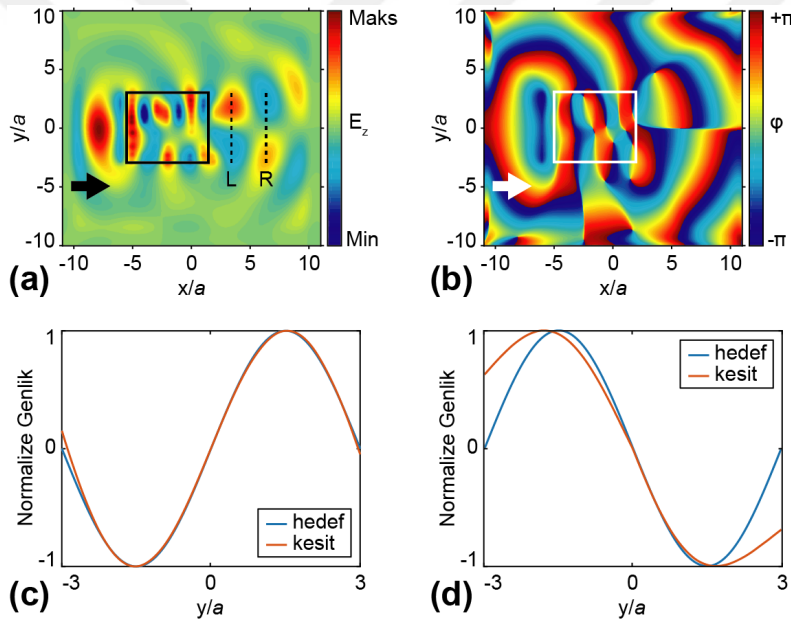
Şekil 3.16(a)'da görüldüğü üzere, tasarlanan mod mertebeye çevirici FK yapısı  $a/\lambda=0.2$  normalize frekansında gelen dalga ile uyarılmaktadır. Şekil 3.16(b)'de ise tasarlanan FK yapısına ait parametreler verilmiştir. Sonuç olarak tasarlanan yapının bir sütununda 10 dielektrik silindir çubuk bulunmaktadır ve yapı toplamda 8 sütundan oluşmaktadır. Yapının x-ekseni ve y-ekseni boyunca uzunlukları sırasıyla  $L_x=7.4a$  ve  $L_y=6.3a$  olarak ortaya çıkmıştır. Tasarlanan mod mertebeye çevirici FK yapısına ait nümerik olarak hesaplanan elektrik alan ( $E_z$ ) ve faz ( $\varphi$ ) dağılımları ile elektrik alan kesit profilleri Şekil 3.17'de verilmiştir.



Şekil 3.16 : Boş uzay için FK mod mertebeye çevirici yapısının (a) 3B ve (b) üstten görünüşü.

Şekil 3.17(a) ve Şekil 3.17(b)'de sırasıyla nümerik olarak hesaplanan elektrik alan ve faz dağılımları verilmiştir. Bu şekiller üzerinde dikdörtgen ile çevrelenmiş alan

tasarlanan FK yapısının sınırlarını temsil etmektedir. Şekil 3.17(a)'da ise yapının çıkışında elektrik alan kesit profillerinin hesaplandığı yerler kesikli çizgiler ile gösterilmiştir. FK yapısının çıkışındaki (soldaki) kesikli çizgiler ile gösterilen konumda hesaplanan elektrik alan profili Şekil 3.17(c)'de verilmiştir. FK yapısının çıkışından daha uzakta bulunan (sağdaki) kesikli çizgilerin olduğu konumda hesaplanan elektrik alan profili ise Şekil 3.17(d)'de verilmiştir. Şekil 3.17(c) ve Şekil 3.17(d)'de görüldüğü üzere, hesaplanan profiller hedeflenen sinüs fonksiyonu profilleri ile benzerlik göstermektedir. Elektrik alan dağılımlarından ve kesit profillerinden anlaşılacağı üzere, tasarlanan FK yapısının oluşturduğu elektrik alan dağılımı mod merteye çevirme işlemi başarılı bir şekilde gerçekleştirmektedir. Bu durum fiziksel olarak yapı içerisinde ilerleyen dalga'nın faz hızının asimetrik olarak değişmesinden kaynaklanmaktadır.



Şekil 3.17 : Boş uzayda mod merteye çevirici FK yapısına ait nümerik olarak hesaplanan (a) elektrik alan ve (b) faz dağılımı. Elektrik alan kesitleri ise (c) ve (d) grafiklerinde verilmiştir.

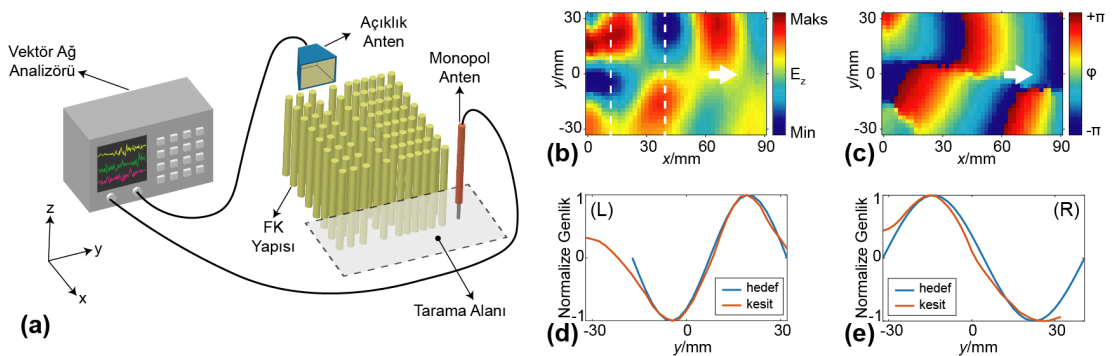
Şekil 3.16'dan görüldüğü üzere, yapının alt bölgesinde bulunan dielektrik silindirik çubuklar arasındaki mesafe az olurken, yapının üst kısmında bulunan dielektrik silindirik çubuklar arasındaki mesafe daha fazladır. Bu durumda yapının alt kısmında etkin kırıcılık indisi daha yüksek olurken, yapının üst kısmındaki etkin kırıcılık indisi daha düşük olmaktadır. Etkin kırıcılık indisinin yüksek olması, yapı içerisinde ilerleyen dalga'nın faz hızının daha yavaş olması anlamına gelmektedir. Bu durumda yapı içerisinde ilerleyen dalga ikiye ayrılmaktadır. İkiye ayrılan dalgadan yukarıdan



ilerleyen dalga üst kısımda daha yüksek faz hızına sahip olurken, alt kısımdan ilerleyen dalga daha düşük faz hızına sahip olmaktadır. Bunun sonucunda FK yapısının içerisinde ilerleyen dalga, yapının çıkışına ulaştığında alt ve üst kısmında faz farkına sahip olmaktadır. Bu sayede  $EM_0$  modu  $EM_1$  moduna çevrilmektedir.

Tasarlanan FK yapısının mod merteye çevirme özelliğini deneysel olarak kanıtlamak için mikrodalga frekanslarında deney yapılmıştır. Deney düzeneği Şekil 3.18(a)'da verilmiştir. Deney için kırıcılık indisi  $n=3.13$  olan alumina ( $Al_2O_3$ ) malzemesinden yapılan dielektrik çubuklar kullanılmıştır. Örgü sabiti  $a=7.75$  mm seçilerek çapları 3.1 mm olan dielektrik çubuklar kullanılarak FK yapısı oluşturulmuştur. Bu durumda yapının boyutları  $L_x=57.4$  mm ve  $L_y=48.8$  mm olmaktadır. Mikrodalga frekansı olarak 7.74 GHz'te deney yapılmıştır. FK yapısının çıkışında ölçülen elektrik alan ve faz dağılımları ile elektrik alan kesit profilleri Şekil 18'de verilmiştir.

Şekil 3.18(b) ve Şekil 3.18(c)'de sırasıyla FK yapısının çıkışında ölçülen elektrik alan ve faz dağılımları gösterilmiştir. Bu şekiller üzerinde ışığın ilerleme yönü ok ile gösterilmiştir. Şekil 3.18(b)'de yapının çıkışında elektrik alan kesit profillerinin ölçüldüğü konumlar kesikli çizgiler ile gösterilmiştir. Bu kesikli çizgilerdeki elektrik alan profilleri Şekil 3.18(d) ve Şekil 3.18(e)'de verilmiştir. Elektrik alan profilleri, eniyileme sürecinde hedef olarak belirlenen sinüs fonksiyonları ile büyük ölçüde uyuşmaktadır. Bu durum, mod merteye çevirme işleminin deneysel olarak başarılı bir şekilde gerçekleştirildiğinin gösterebilir. Ayrıca, Şekil 3.18(c)'den görülebileceği üzere, yapı içerisinde ilerleyen dalga yaşadığı faz kayması da nümerik sonuçlar ile uyuşmaktadır ve mod merteye çevirme işleminin gerçekleştiği görülmektedir.



Şekil 3.18 : (a) Boş uzayda mod merteye çeviren FK yapısının deney için kullanılan mikrodalga deney düzeneğinin şematiği. Bu yapıya ait deneysel olarak ölçülen (b) elektrik alan ve (c) faz dağılımı. Elektrik alan kesitleri ise (d) ve (e) grafiklerinde verilmiştir.

Sonuç olarak Şekil 3.16(a)'da verilen heterojen yapı kullanıldığında ise Şekil 3.17(a)'daki elektrik alan profili elde edilmektedir ve bu şekilden de fark edildiği gibi oldukça başarılı bir mod mertebe çevirme işlemi gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.17(a)'daki gibi mod mertebe çeviricisi içinde hareket eden ışık dalgası heterojen yapının optik eksenine iki ayrı kola ayrılır. Bunun sebebi yapıda optik eksenin alt ve üst kısımlarındaki çubukların dağılım yoğunluklarının farklı olmasıdır. Yapının üst kısmında ilerleyen dalga alt kısmında ilerleyenden daha hızlı hareket eder ve ışığın iki ayrı kolu arasında faz farkı oluşur. Burada, mod mertebe çevirme işleminin başarılı bir şekilde gerçekleştiğini iddia etmek için sadece  $2\pi$  faz kayması yeterli olmayabilir. Bu yüzden hem genlik hem de faz farkı birlikte dikkate alınırsa daha doğru sonuca ulaşılır. Genlik değişiminin (güç dağılımı) ortaya çıkarılması için, mertebesi çevrilen mod ideal profil ile karşılaştırılmalıdır. Yüksek mertebeden modun iki tepe noktası anti-simetrik olmalıdır. Elde edilen yüksek mertebeden modun genlik değişimi Şekil 3.17(c)'deki gibidir. Şekil 3.17(a)'da gösterilen elektrik alan dağılımı,  $EM_1$  moduna sahip ışığın ilerlemesini göstermektedir. Sonuç olarak, Şekil 3.17'den ve Şekil 3.18'ten görüldüğü üzere temel mod  $EM_0$  yüksek mertebeli  $EM_1$  moduna başarılı bir şekilde çevrilmiştir.

### 3.5 Çok Düzeyli Difraktif Lens Tasarımı\*

Optik lensler ışığın etkin olduğu teknolojilerde çok önemli rol oynarlar. Işığın kırınım olgusunu kullanarak çalışan difraktif düz lensler sayesinde iri katman lenslerin odaklama etkileri iyileştirilmiştir [104]. Bu difraktif düz lenslerde, gelen ışın bölgeler adı verilen geometrik olarak ayarlanmış eş merkezli halkalar aracılığıyla odaklanır. Bu halkalar ayarlanarak, gelen ışığın ardışık faz değişimine (faz düzeltmesine) uğraması sağlanır. Bu faz düzeltmesi de lensin arka odak düzlemindeki yapıcı girişim sayesinde odaklamaya sebep olur. Difraktif lenslerin odaklama etkisini arttırmak için çok düzeyli ızgaralar ve basamak benzeri kesitler geliştirilmiştir [105]. Bunlara ek olarak, daha verimli ve güçlü bir odak elde edebilmek için her bir halkanın yüksekliğini veya kalınlığını değiştirmek suretiyle halkaların fiziksel boyutları da ayarlanabilir [64,106].

---

\*Bu bölümün esas alındığı çalışma: Yildirim, B. K., Bor, E., Kurt, H., Turduev, M., (2020). Zones optimized multilevel diffractive lens for polarization-insensitive light focusing, J. Phys. D: Appl. Phys, 53(49):495109.

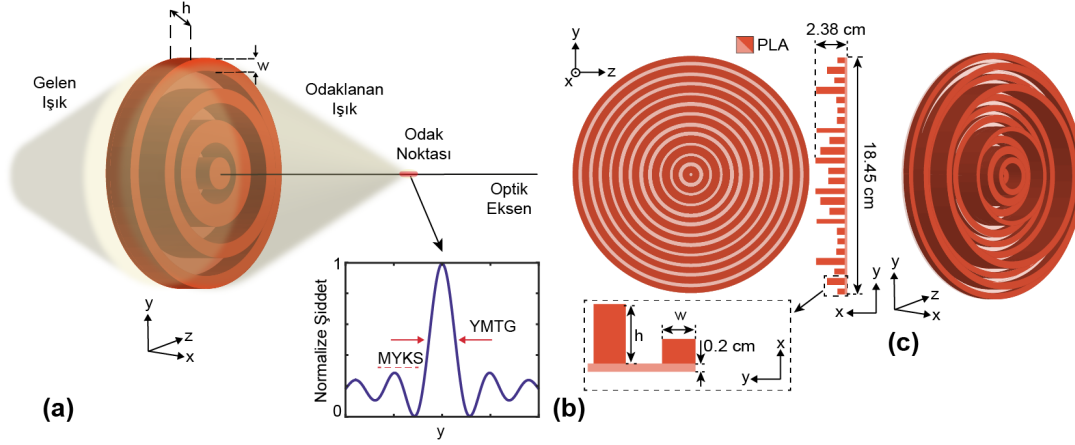
Ayrıca, verimliliği arttırmak ve yapısal kayıpları azaltmak için difraktif lenslerin üretimi sırasında plazmonik metayüzeyler yerine dielektrik malzemeler kullanılır [107]. Geleneksel iri kırıcı lensler pahalı, büyük boyutlu ve kavisli yapıya sahiptirler. Son yıllarda, metayüzeyleri de içeren difraktif düzlemsel bileşenler optik sistemler için yüksek performansla beraber küçük boyutları da sunmaktadırlar. Geometrik olarak ayarlanan difraktif bileşenler bizlere istenilen şiddeti ya da faz dağılımını verebilmektedirler [62].

Bu çalışmada, polarizasyondan bağımsız, yani EE ve EM polarizasyonlarındaki dalgaları aynı odak noktasında (odak mesafesinde) odaklayan çok düzeyli difraktif lens yapısı sunulmuştur. Güçlü odaklama etkisini ve polarizasyona duyarsızlık özelliğini elde edebilmek amacıyla lens halkalarının yükseklik ve kalınlıkları DE algoritması ile belirlenmiştir. Yapının halkalardan oluşması nokta şeklinde odak elde edilmesini sağlamaktadır. Yapı malzemesi olarak kırılma indisi  $n_{PLA}=1.55$  olan PLA malzemesi tercih edilmiştir. Burada lens malzemesi olarak PLA kullanılmasının sebebi, bu yapının 3B yazıcılar ile kullanılabilmesi ve 10 GHz mikrodalga frekansı civarında deneysel doğrulamaya olanak sağlamasıdır [74].

DE algoritması, her bir halkanın yüksekliğini ( $h$ ) ve kalınlığını ( $w$ ) istenilen kriterlere uygun bir odaklama yapacak şekilde belirlemektedir. Odak noktası için belirlenen kriterlerden birincisi YMTG değerini minimize etmek, ikincisi ise MYKS değerini her iki polarizasyon için olabildiğince düşürmektir. Ayrıca, iki polarizasyona ait odak mesafelerinin  $\Delta F$  arasındaki fark azaltılarak ışığın her iki polarizasyon için de aynı noktaya odaklanması sağlanmıştır. Eniyileme işlemi için belirlenen maliyet fonksiyonu aşağıda verilmiştir.

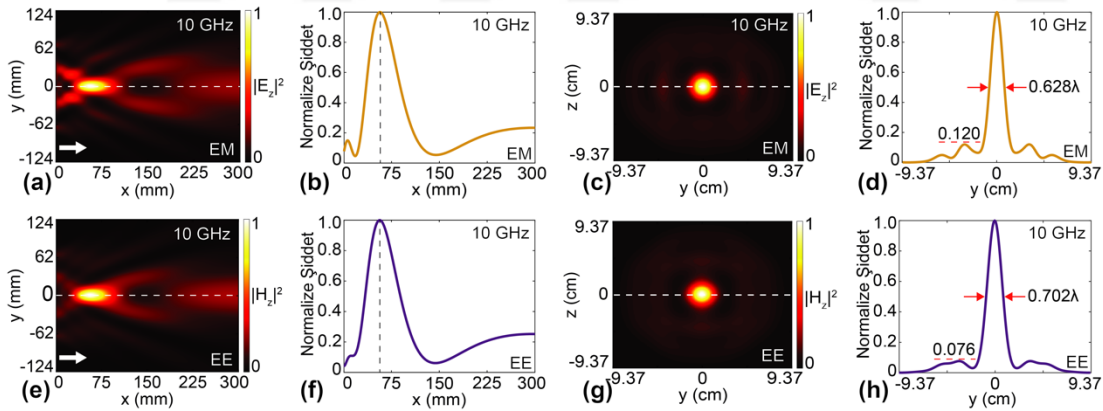
$$f_{maliyet} = w_1 YMTG_{EM} + w_2 MYKS_{EM} + w_3 YMTG_{EE} + w_4 MYKS_{EE} + w_5 |\Delta F_{EM} - \Delta F_{EE}| \quad (3.9)$$

Burada  $w$  ile gösterilenler ağırlıklandırma katsayılarıdır. Bu katsayılar, algoritmanın birden fazla hedefe dengeli bir biçimde ulaşabilmesi için kullanılırlar. Tasarım işlemi 2B SFZB kullanılarak EM ve EE polarizasyonu için yapılmıştır. Daha sonrasında tasarlanan 2B lens, içerisinden geçen optik eksenin etrafında  $180^\circ$  döndürülerek 3B dairesel bir lense dönüşmektedir. Şekil 3.19(a)'da tasarım işlemine ait şematik verilmiştir.



Şekil 3.19 : (a) Tasarım yaklaşımının şematiği. (b) Tasarlanan lensin üstten ve kesit görünüşü ile yapısal parametreleri (c) Lensin perspektif görüntüsü.

Lens ile aynı malzeme olan PLA'dan oluşan alt taş ve dielektrik halkalardan oluşan difraktif lensin üstten ve kesit görünüşü Şekil 3.19(b)'de sunulmuştur. SFZB simülasyonlarında kullanılan yapının malzemesi olan PLA'nın kırıcılık indisi  $n_{PLA}=1.55$  olarak seçilmiştir. Alt taş kalınlığı 0.2 cm olarak sabitlenmiştir. Eniyileme işlemi sonucunda elde edilen yapının yanal uzunluğu 18.45 cm ve boylamsal uzunluğu ise 2.38 cm'dir. Şekil 3.19(c)'de difraktif lensin perspektif görüntüsü verilmiştir. Bu lens yapısı, 10 GHz mikrodalga frekansında çalışabilecek şekilde tasarlanmıştır.



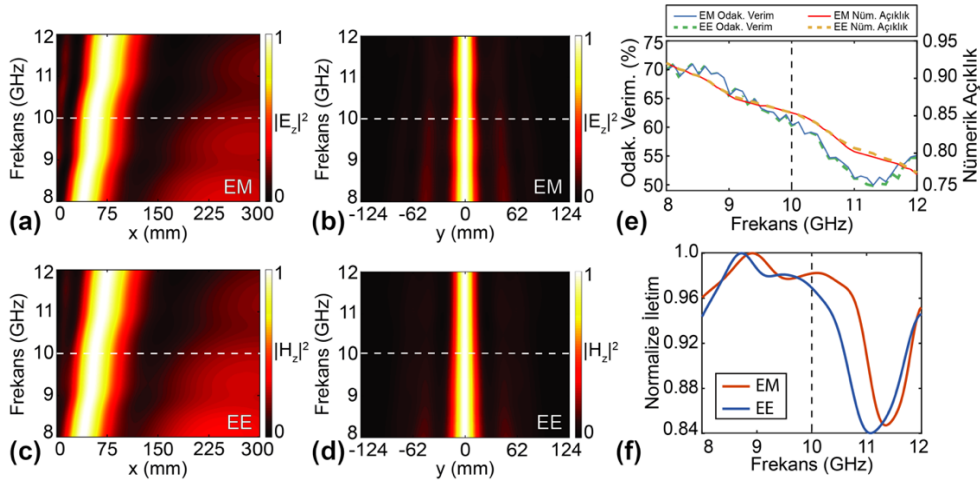
Şekil 3.20 : (a) 10 GHz için hesaplanmış elektrik alan şiddeti ( $|E_z|^2$ ) dağılımı. (b) optik eksen üzerinde normalize kesit profili, (c) odak noktasının görüntüsü ve (d) normalize enine kesit profili. (e) 10 GHz için hesaplanmış manyetik alan şiddeti ( $|H_z|^2$ ) dağılımı. (f) optik eksen üzerinde normalize kesit profili, (g) odak noktasının görüntüsü ve (h) normalize enine kesit profili.

3B SFZB simülasyonlarının sonucunda EM polarizasyonda ve 10 GHz için hesaplanmış olan elektrik alan şiddeti ( $|E_z|^2$ ) dağılımı Şekil 3.20(a)'da verilmiştir. Şekil 3.20(b)'de optik eksen üzerinden alınmış olan normalize boylamsal kesitin grafiği verilmiştir. Odak noktasının lens yapısına olan uzaklığı 57.12 mm olarak

hesaplanmıştır. Şekil 3.20(c)'de EM polarizasyon için odak noktasının görüntüsü verilmiştir. Şekil 3.20(d)'de ise elde edilen odak noktası üzerinden alınmış olan normalize enine kesit grafiği yer almaktadır. EM polarizasyon için YMTG değeri  $0.628\lambda$ , MYKS değeri ise normalize cinsten 0.120 olarak bulunmuştur. Burada  $\lambda$  ile gelen ışığın dalga boyu temsil edilmektedir. Benzer şekilde EE polarizasyonda ve aynı frekansta hesaplanan manyetik alan şiddeti ( $|H_z|^2$ ) dağılımı Şekil 3.20(e)'de gösterilmiştir. Odak mesafesi diğer polarizasyonda olduğu gibi 57.12 mm hesaplanmış ve optik eksen üzerinden alınan normalize boylamsal kesit grafiği Şekil 3.20(f)'de verilmiştir. Şekil 3.20(g)'de ise EE polarizasyon için odak noktasının görüntüsü verilmiştir. Şekil 3.20(h)'de odak noktası üzerindeki normalize enine kesitin grafiği gösterilmektedir. TE polarizasyon için YMTG değeri  $0.702\lambda$ , MYKS değeri normalize cinsten 0.076 olarak hesaplanmışlardır.

Difraktif lensin polarizasyona duyarsızlığını incelemek için SFZB simülasyonları 8 GHz – 12 GHz frekans aralığında yapıldı. EM polarizasyondaki optik eksen üzerinde uzunlamasına ve odak noktasında enine kesitlerin haritaları sırasıyla Şekil 3.21(a) ve Şekil 3.21(b)'de gösterilmiştir. Buna ek olarak, EE polarizasyon için de benzer şekilde, aynı frekans değerleri için optik eksen üzerinden alınan uzunlamasına kesitin haritası Şekil 3.21(c)'de ve odak noktası üzerinden alınan enine kesitlerin haritası da Şekil 3.21(d)'de verilmiştir. Uzunlamasına kesitlerin haritalarından da görüldüğü üzere, odak uzaklığı iki polarizasyon içinde aynı oranda olmak üzere çok az değişmektedir. Enine kesitlerin olduğu haritalarda da lensin seçilen geniş frekans aralığı boyunca odaklama kabiliyetinin olduğu görülmektedir.

Şekil 3.21(e)'de odaklama verimliliği ve nümerik açıklık (NA) grafikleri verilmiştir. Odaklama verimlilikleri hesaplanırken 3B SFZB simülasyonlarında odak noktasında YMTG değerlerinin üç katı kadar büyüklükte monitörler yerleştirilerek normalize iletim miktarı hesaplanmıştır [108,109]. Hesaplanan odaklama verimliliği %50'nin üzerindedir. NA değerleri ise  $NA=n_{hava}\sin\alpha$  formülüne göre hesaplanmaktadır. Burada  $n_{hava}$  ile tasarlanan lensin bulunduğu ortamın kırıcılık indisi ifade edilirken,  $\alpha$  ise yapıdan geçebilecek ışığın optik eksen ile yapabileceği maksimum açıya karşılık gelmektedir. Hesaplanan NA değerleri ise 0.77 ve 0.92 arasında değişmektedir Şekil 3.21(f)'de verilen iletim grafiğine göre ise seçilen aralıktaki neredeyse tüm frekans değerlerinde %80 ve üzerinde iletim değeri hesaplanmıştır.

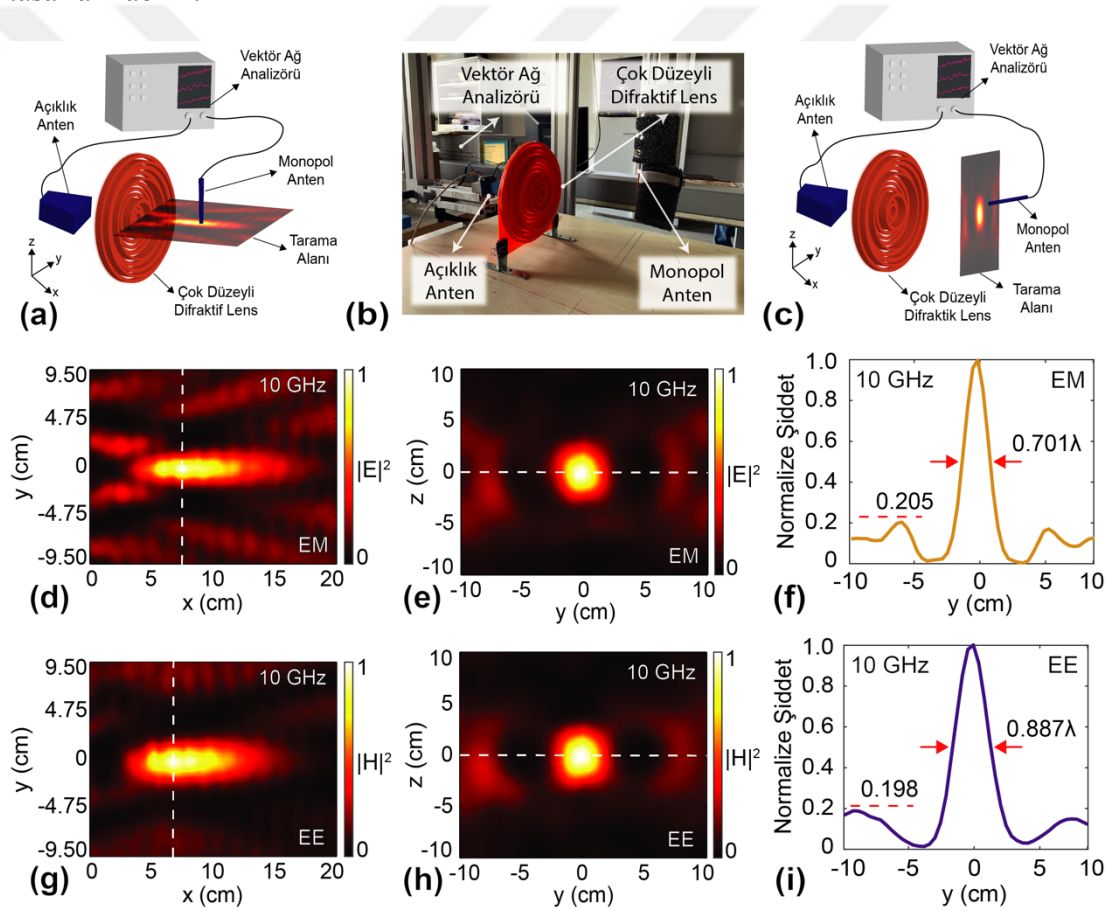


Şekil 3.21 : Seçilen frekans aralığında (a) EM ve (c) EE polarizasyonlar için optik eksen üzerinden alınmış uzunlamasına kesit profillerinin haritaları. Bu frekans aralığında (b) EM ve (d) EE polarizasyonları için odak noktaları üzerinden alınan enine kesit profillerinin haritaları. EM ve EE polarizasyonları için (e) Odaklama verimi ile nümerik açıklık grafikleri ve (f) normalize iletim grafiği verilmiştir.

DE algoritması yardımıyla tasarlanan çok düzeyli difraktif lensi mikrodalga frekanslarında test etmek 3B baskı tekniği ile yapı üretilmiştir. Şekil 3.22(a)'da ilk deney düzeneğinin şematiği (EE ve EM polarizasyonu için xy- düzleminin taranması) ve Şekil 3.22(b)'de de bu deney ortamının fotoğrafı verilmiştir. Vektör ağ analizörü kullanılarak gelen dalganın üretilmesi ve istenilen ölçümlerin yapılması sağlanmıştır. Simülasyon ortamında tasarlanan lens ile kaynağın arasındaki mesafeyi baz alarak mikrodalga açıklık anten lensten belirli bir uzaklıkta mesafeye yerleştirilmiştir. Monopol anten ise x-ekseninde ve y-ekseninde otomatik tarayıcı mekanizma ile hareket ettirilerek tarama alanındaki elektrik alan şiddeti ve manyetik alan şiddeti dağılımları ölçülmüştür. Şekil 3.22(c)'de ise odak noktalarının görüntüsünü deneysel olarak elde edebilmek için kurulan deney düzeneğinin şematiği verilmiştir. Bu deney düzeneğinde monopol anten önceki deneyden farklı olarak tam odak noktası düzleminde y-ekseninde ve z-ekseninde hareket ettirilerek elektrik alan şiddeti ve manyetik alan şiddeti incelenmiştir. Şekil 3.22(d) ve Şekil 3.22(e)'de sırası ile EM polarizasyonu için lensin arkasındaki bölgede oluşan ve odak noktası etrafındaki elektrik alan şiddet dağılımı verilmiştir. Şekil 3.22(f)'de ise EM polarizasyonu için odak noktasından alınan kesit profili verilmiştir. Şekil 3.22(g) ve Şekil 3.22(h)'de sırası ile EE polarizasyonu için lensin arkasındaki bölgede oluşan ve odak noktası etrafındaki manyetik alan şiddet dağılımı verilmiştir. Şekil 3.22(i)'de ise EE polarizasyonu için odak noktasından alınan kesit profili verilmiştir. Burada EM

polarizasyon için  $YMTG=0.701\lambda$  ve  $MYKS=0.205$  olarak ölçülmüştür. Ayrıca, EE polarizasyonu için ise  $YMTG=0.887\lambda$  ve  $MYKS=0.198$  olarak ölçülmüştür.

Sonuç olarak, bu tez kapsamında yapılan çalışmada düşük kırıcılık indisine sahip mikrodalga frekanslarında çalışan polarizasyona duyarlı çok düzeyli difraktif bir lens tasarlanmıştır. Elde edilen lensin geometrik boyutları DE algoritması ile belirlenmiş ve 3B SFZB metodu ile simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Yapı ince bir PLA alt taş üzerine yerleştirilen dielektrik PLA halkalardan oluşmaktadır. Tasarlanan yapı 3B yazıcı ile üretilmiştir. Üretilen yapı ile mikrodalga frekanslarında gerçekleştirilen deneyler nümerik sonuçları doğrulamaktadır. Sunulan tasarım yaklaşımı ile görünür ışık dalga boylarında gerçekleştirilen optik uygulamalarında kullanılabilir lensler tasarlanabilir.



Şekil 3.22 : (a) Elektrik alan şiddeti ve manyetik alan şiddeti dağılımlarını incelemek için kurulan mikrodalga deney düzeneğinin şematik gösterimi ve (b) bu deney düzeneğinin fotoğrafı. (d) Elektrik alan şiddeti ( $|E_z|^2$ ) ve (g) manyetik alan şiddeti ( $|H_x|^2$ ) dağılımı. (c) odak noktasının görüntüsünü almak için kurulan mikrodalga deney düzeneğinin şematik gösterimi ve bunun sonucunda bulunan (e) EM polarizasyonda ve (h) EE polarizasyonda odak noktasının görüntüsü. (f) EM ve (i) EE polarizasyonları için odak noktasından alınan normalize enine kesitler.

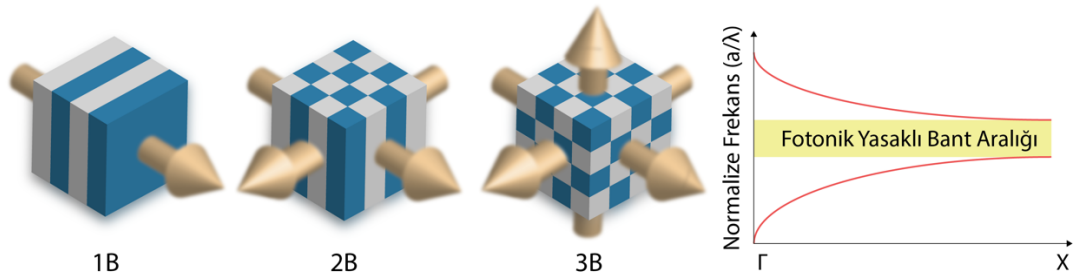




#### 4. FOTONİK YASAKLI BANT TABANLI YAPI TASARIMLARI

Bu tez kapsamında yapılan çalışmaların bir kısmı yasaklı bant tabanlı fotonik cihazlar başlığı altında toplanabilir. Bu bağlamda, FK yapılarının dağılım karakteristiklerinden yola çıkarak fiziksel mekanizmalar elde edilmiştir. Bu mekanizmalara sahip FK'ler algoritmalar ile eniyilenecek yeni fotonik cihazlar tasarlanmıştır.

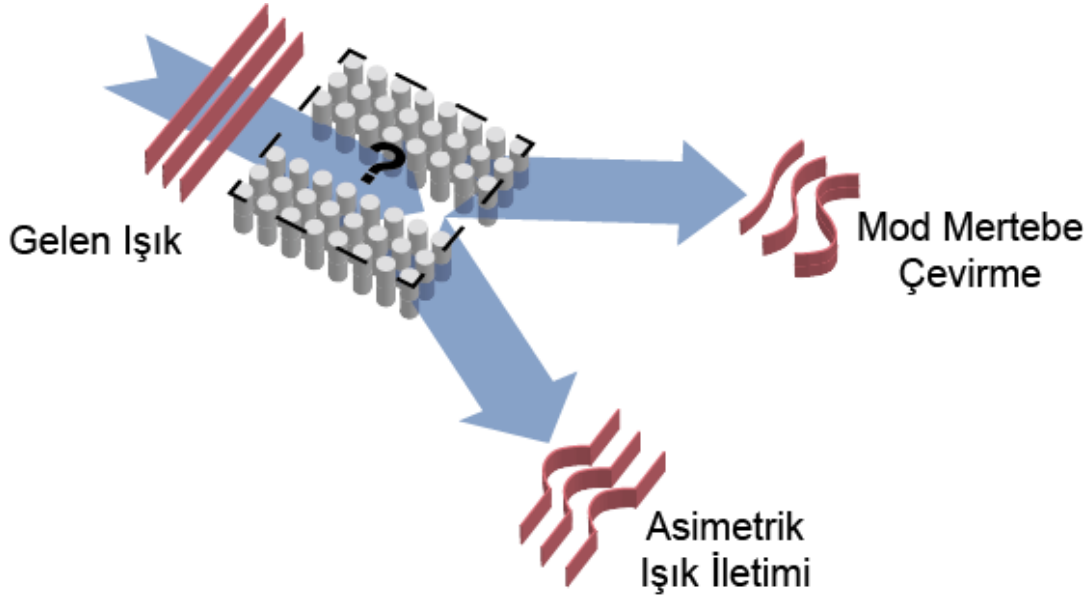
FK'ler fotonik alanının en önemli çıktılarından biridir. FK'ler iki farklı dielektrik malzemenin belirli bir periyoda sahip olacak biçimde dizilmesi ile tasarlanan bir boyutlu (1B), 2B, veya 3B, yapay ve tamamen dielektrik malzemelerden oluşan yapılardır [110]. Genellikle bu yapıları oluşturan malzemelerden bir tanesi hava olarak seçilir ve bu sayede bir dielektrik malzeme kullanılarak FK'ler tasarlanabilir. Periyodik dizilim sayesinde ışığın polarizasyonuna göre fotonik kristallerde fotonik yasaklı bant aralığı (FYBA) oluşmaktadır. Şekil 4.1'de boyutlarına göre FK'lerin şematiki ve tek yöndeki FYBA'nın temsili gösterimi verilmiştir. Bu yasaklı bant aralığı sayesinde dalga kılavuzu ve kavite gibi FK tabanlı yapılar tasarlanmıştır [111,112]. Ayrıca, FK'ler yasaklı bant aralığı etkisinin dışında da negatif kırılma gibi doğada gözlenmeyen optik özelliklerin elde edilebilmesinin önünü açmıştır [113].



Şekil 4.1 : 1B, 2B ve 3B boyutlu FK şematikleri ve bant diyagramında FYBA'nın temsili gösterimi. Oklar ışığın ilerleme yönü göstermektedir.

Bu tez kapsamındaki FK tabanlı yapı tasarımlarına dair çalışmalarda SFZB yöntemi [25] ve DE algoritması [55] birleştirilerek FK yapıları üzerinde eniyilemeler gerçekleştirilmiştir. SFZB yöntemi olarak MEEP yazılımı [84] kullanılmıştır ve DE algoritması MATLAB ile kodlanmıştır. Ayrıca, DDA yöntemi ile tasarlanan FK'lerin

bant yapıları hesaplanmıştır. DDA yöntemi olarak ise MPB yazılımı kullanılmıştır [114]. Fotonik yasaklı bant tabanlı yapılar üzerinde eniyileme uygulanmasının şematığı Şekil 4.2’de verilmiştir.



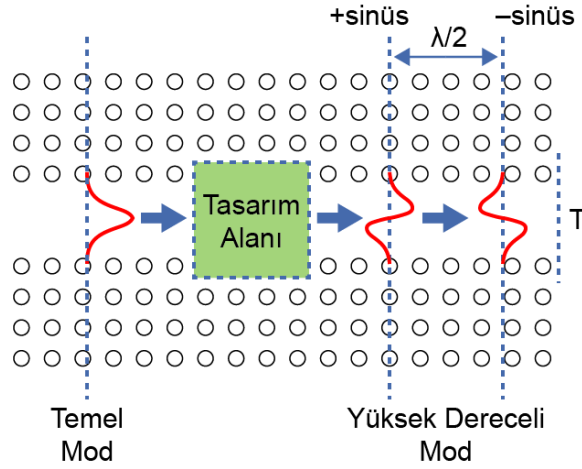
Şekil 4.2 : FK dalga kılavuzuna ait bant diyagramı ve süper-hücre modlarının görüntüsü.

#### 4.1 Fotonik Kristal Dalga Kılavuzu Tabanlı Mod Mertebe Çevirici Tasarımı\*

Bu tezde yapılan çalışmalar dahilinde yasaklı bant tabanlı fotonik cihazlara eniyileme algoritması uygulayarak ilk olarak bir FK mod mertebe çevirici dalga kılavuzu tasarlanmıştır. Şekil 4.3’de tasarım işleminin şematığı verilmiştir. Bu FK mod mertebe çevirici cihazının tasarımında EM polarizasyona sahip ışığın hapsedilebileceği bir FK dalga kılavuzu tercih edilmiştir. Dalga kılavuzunun içerisindeki tasarım bölgesinden geçen dalga  $EM_0$  modundan  $EM_1$  moduna dönüşmektedir. Bu mod dönüşümünü sağlamak için tasarım alanının çıkışında yer alan dalga kılavuzunda iki farklı pozisyondan alınan elektrik alan kesitleri incelenmiştir. Hedef olarak bu kesitlerin sinüs fonksiyonuna benzemesi istenmiştir. Öte yandan çıkış dalga kılavuzundaki elektrik alan kesitlerinin incelenmesi tek başına yeterli değildir.

\*Bu bölümün esas alındığı çalışma: Bor, E., Kurt, H., Turduev, M., (2019). Metaheuristic approach enabled mode order conversion in photonic crystals: numerical design and experimental verification, J. Opt., 21(8):085801.

Mod dönüşüm işleminde önemli olan bir diğer konu ise girişteki modun enerjisinin çıkıştaki diğer moda aktarılmasıdır. Bu nedenle çıkış dalga kılavuzundaki iletim verimliliğinin ( $T$ ) de artırılması hedeflenmiştir.



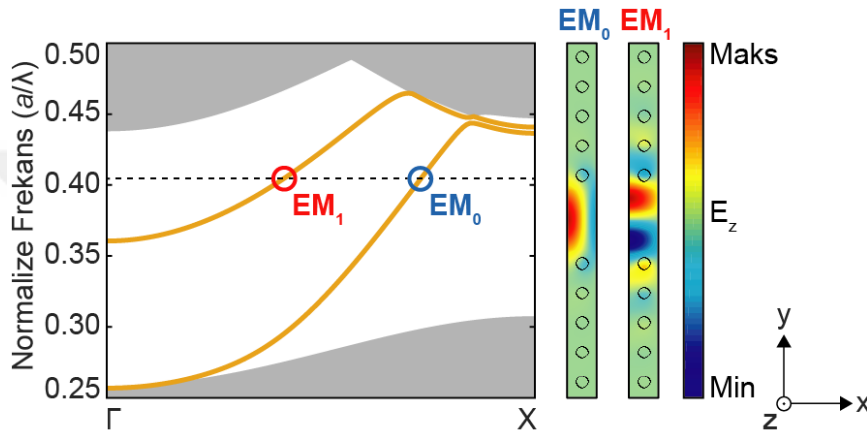
Şekil 4.3 : FK dalga kılavuzu içerisinde mod merteye çevrimi için tasarım işlemi.

FK dalga kılavuzu içerisinde mod merteye çevirim bölgesi tasarlamak için kullanılan maliyet fonksiyonu aşağıda verilmiştir. Burada elektrik alan kesitleri ile hedef olarak seçilen sinüs fonksiyonları arasındaki hata oranı azaltılırken iletim verimi artırılmaktadır. Ancak, kodlanan DE algoritması minimizasyon işlemi için çalışmaktadır. Bu nedenle, maksimizasyon hedefine sahip olan  $T$  değeri diğer hata değerlerinin toplamından çıkarılmaktadır.

$$f_{maliyet} = w_L \left\{ \sum_y (|E_{h,L}(y) - E_{z,L}(y)|) \right\} + w_R \left\{ \sum_y (|E_{h,R}(y) - E_{z,R}(y)|) \right\} - w_T T \quad (4.1)$$

Burada  $L$  ve  $R$  ifadeleri sırasıyla sol ve sağ kesit pozisyonlarını temsil etmektedir. Hedeflenen kesit profilleri yani sinüs grafikleri ise  $E_{h,L}$  ve  $E_{h,R}$  ile ifade edilmiştir. Burada  $w_L$ ,  $w_R$  ve  $w_T$  ifadeleri ise ağırlıklandırma katsayılarıdır. Bu ağırlıklandırma katsayılarının belirlenmesi önemlidir. Bunun sebebi, kesit profillerinden kaynaklanan hata değerlerinin iletim verimliliği değerinden sayısal olarak daha büyük olmasıdır. Bu nedenle iletim verimliliği için olan katsayının ( $w_T$ ) diğer ağırlıklandırma katsayılarından daha büyük olması gerekmektedir.

Bu mod çevirici FK yapısı tasarlanmadan önce ilgili dalga kılavuzunun  $EM_0$  ve  $EM_1$  modlarını desteklemesi önemlidir. Bu sayede eniyileme işleminin yapılacağı normalize frekans değeri belirlenmiştir. İlk olarak, DDA yöntemi kullanılarak dalga kılavuzunun bant yapısı hesaplanmış ve süper hücre analizleri yapılmıştır. Hesaplanan bant yapısı ve süper hücre içerisine hapsedilebilen  $EM_0$  ve  $EM_1$  modlarının görüntüsü Şekil 4.4'te sunulmuştur. Burada,  $EM_0$  ve  $EM_1$  modları  $a/\lambda=0.4025$  normalize frekansında oluşmaktadır. Yine burada, FK'in örgü sabiti  $a$  ile temsil edilirken  $\lambda$  ise dalga boyuna karşılık gelmektedir.

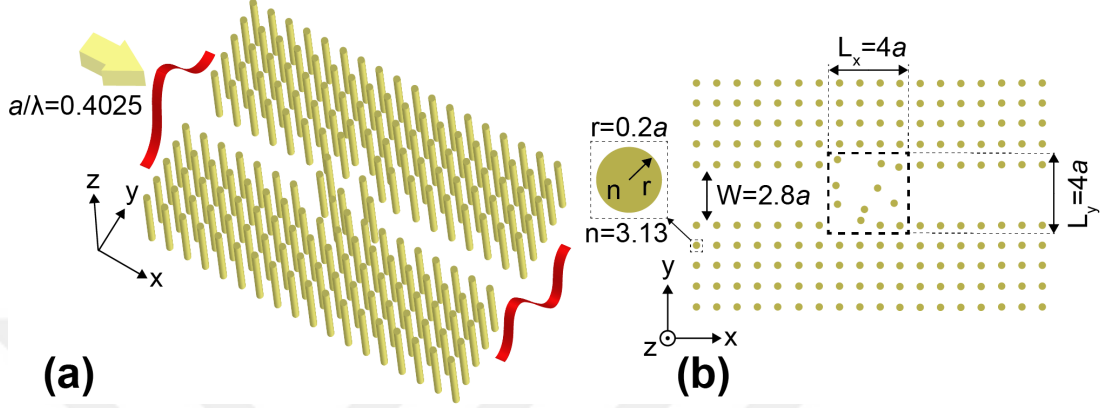


Şekil 4.4 : FK dalga kılavuzuna ait bant diyagramı ve süper-hücre modlarının görüntüsü.

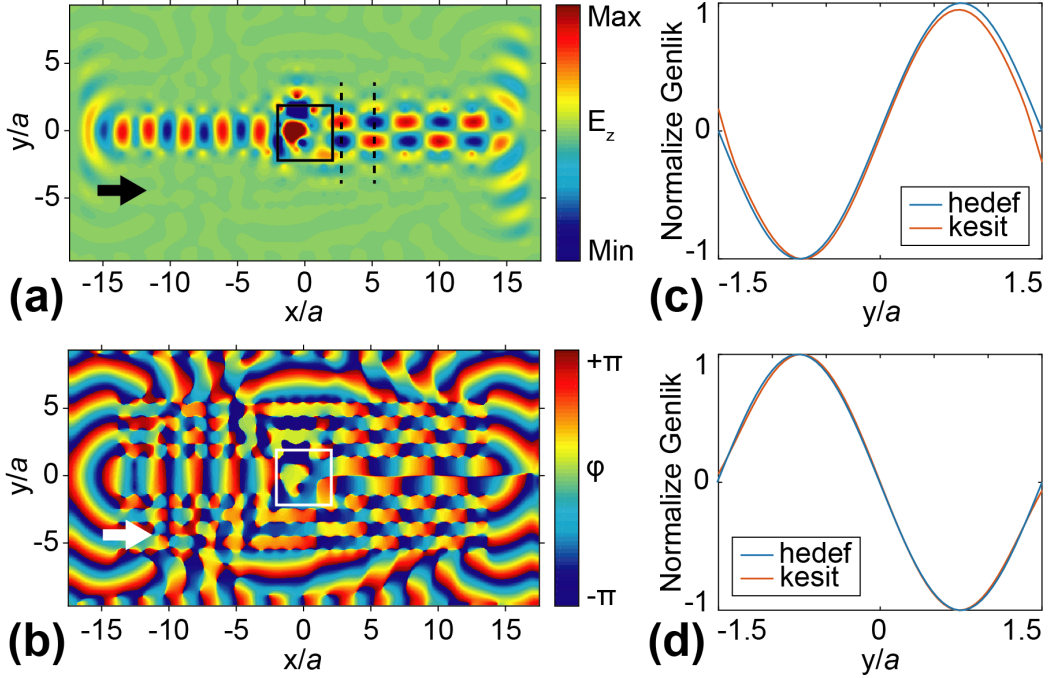
Mod mertebeye çevirici FK dalga kılavuzu yapısı tasarlanırken tasarım bölgesinde kare örgüde yerleştirilen dielektrik silindir çubukların x-ekseni ve y-ekseni yönündeki konumları ve çubukların tasarım bölgesinde bulunup bulunmama durumları algoritma ile kararlaştırmıştır. Tasarlanan mod mertebeye çevirici FK dalga kılavuzu yapısının 3B ve üstten görünüşü sırasıyla Şekil 4.5(a) ve Şekil 4.5(b)'de verilmiştir.

Şekil 4.5'ten görülebileceği üzere, ilgili cihazın tasarımı  $a/\lambda=0.4025$  normalize frekansında gerçekleştirilmiştir. Bu FK yapısı kare örgüde yerleştirilen dielektrik silindirlere oluşmuştur. Bu silindir çubukların kırıcılık indisi  $n=3.13$  ve yarıçapları  $R=0.2a$  olarak seçilmiştir. Tasarlanan FK dalga kılavuzunun genişliği  $w=2.8a$ , tasarım alanın boyutları x-ekseni ve y-ekseni doğrultusunda sırası ile  $L_x=4a$  ve  $L_y=4a$  olmaktadır. Eniyileme işlemine başlamadan önce tasarım bölgesinin kare şeklinde olması kararlaştırılmıştır. Bu bölgenin içerisine kare örgüde dizilen 16 adet dielektrik çubuk yerleştirilmiştir. Ancak, eniyileme işleminin sonucu olarak istenilen

mod mertebesi çevirme işlemini sağlayabilmek için DE algoritması kullanılarak bazı dielektrik çubukların yapıdan çıkarılmasına karar verilmiştir. Eniyileme sonucunda geriye 11 dielektrik çubuk kalmıştır ve bu çubukların x-eksenindeki ve y-ekseninden pozisyonları algoritma tarafından belirlenmiştir. Elde edilen mod dönüşüm işlemine ait SFZB ile hesaplanan nümerik sonuçlar Şekil 4.6’da sunulmuştur.



Şekil 4.5 : Mod mertebesi çevirici FK dalga kılavuzu yapısının (a) 3B ve (b) üstten görünüşü.

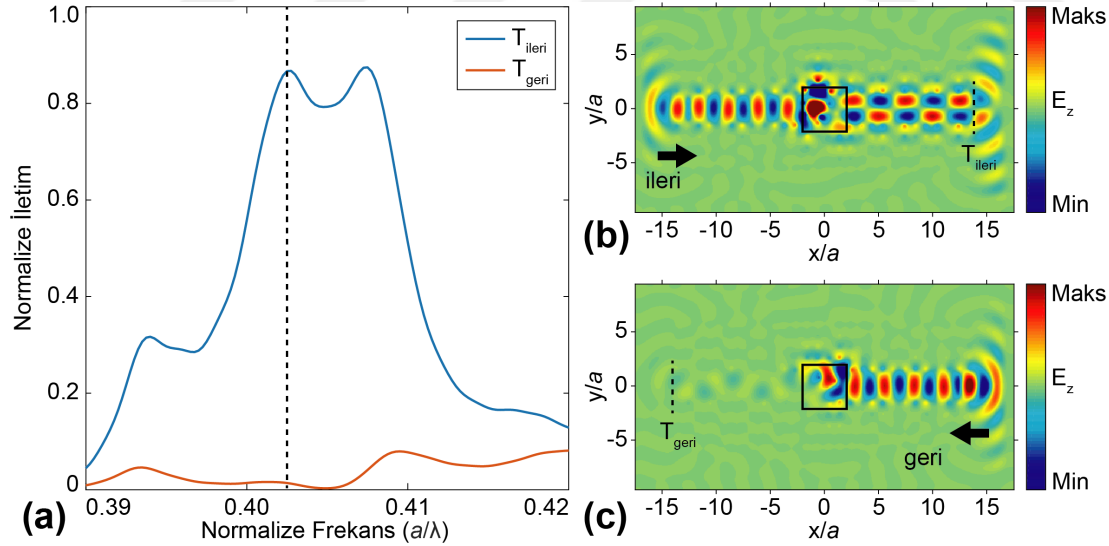


Şekil 4.6 : Mod mertebesi çevirici FK dalga kılavuzu yapısına ait nümerik olarak hesaplanan (a) elektrik alan ve (b) faz dağılımı. Elektrik alan kesitleri ise (c) ve (d) grafiklerinde verilmiştir.

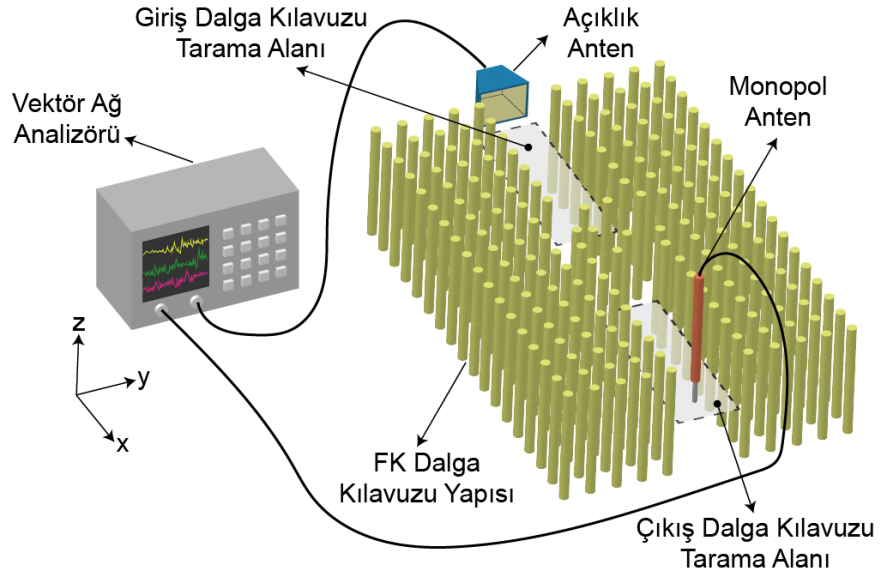
Şekil 4.6(a) ve Şekil 4.6(b)’de sırası ile elektrik alan ( $E_z$ ) ve faz ( $\phi$ ) dağılımları gösterilmiştir. Bu şekillerde, dalganın ilerleme yönü ok ile gösterilirken mod mertebesi dönüştürme alanının etrafı kare ile çevrelenmiştir. Şekil 4.6(a)’da çıkış dalga

kılavuzundaki iki kesikli çizgi ile elektrik alan kesitlerinin alındığı konumlar gösterilmiştir. Soldaki ve sağdaki konumlarda hesaplanan kesitler ise sırasıyla Şekil 4.6(c) ve Şekil 4.6(d)'de verilmiştir. Elektrik alan kesitleri ile hedef olarak belirlenen sinüs fonksiyonları birbirlerine benzemektedir. Ayrıca, çıkış dalga kılavuzundaki iletim verimi  $T=86\%$  olarak hesaplanmıştır.

Mod çevirici yapıları ileri ve geri yönde aynı temel mod ile uyarılacak şekilde çalışmaları kısıtlanırsa asimetrik ışık iletimi etkisi gösterirler [115]. Bu durum, sunulan mod mertebeye çevirici FK dalga kılavuzu yapısı için de geçerlidir. Tasarlanan fotonik cihaz ileri ve geri yönde temel  $EM_0$  modu ile uyarıldığında ileri yönde iletim değeri ( $T_{ileri}$ )  $86\%$  olarak hesaplanırken, geri yönde iletim verimliliği ( $T_{geri}$ )  $1.4\%$  olarak elde edilmiştir. Şekil 4.7(a)'da ileri ve geri yön için hesaplanan iletim grafikleri verilmiştir. Şekil 4.7(b)'de ve Şekil 4.7(c)'de ise sırası ile ileri ve geri yönlerde  $a/\lambda=0.4025$  normalize frekansından  $EM_0$  temel modu ile uyarılan yapının içerisindeki elektrik alan dağılımları verilmiştir. Burada şuna dikkat edilmelidir; tasarlanan yapı tamamen dielektrik olduğu ve asimetrik ışık iletimi sadece temel mod ile uyarım şeklinde sınırlandırıldığı için gözlemlenen bu etki optik izolasyon değildir ve Lorentz simetri şartını bozmamaktadır [115].

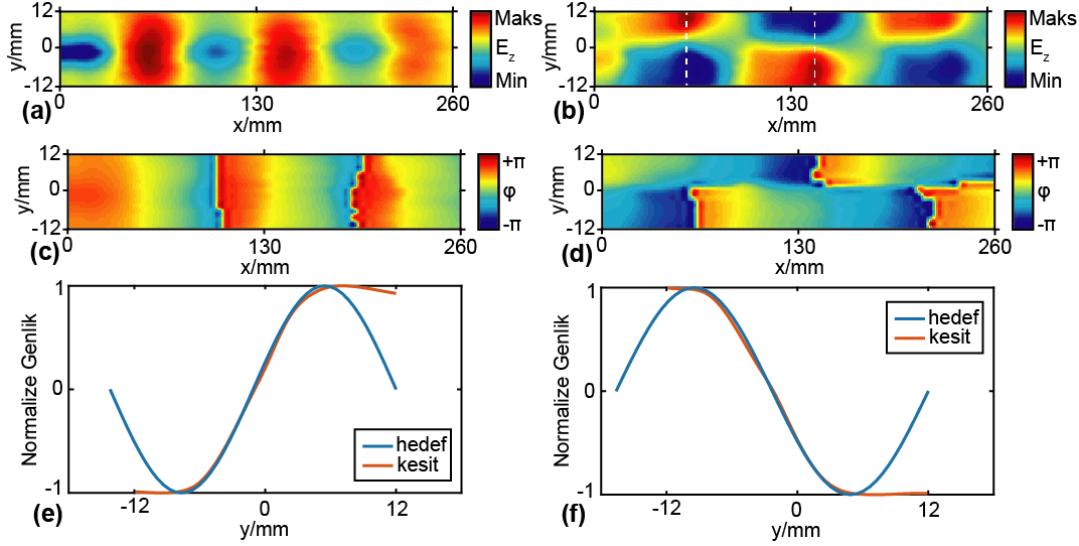


Şekil 4.7 : (a) Mod mertebeye çevirici FK dalga kılavuzu yapısının ileri ve geri yönde  $EM_0$  modu ile uyarılması sonucu hesaplanan iletim verimliliği grafiği. (b) İleri yönde ve (c) geri yönde  $a/\lambda=0.4025$  normalize frekansında temel mod ile yapılan uyarım için hesaplanan elektrik alan dağılımı.



Şekil 4.8 : Mod mertebeye çevirici FK dalga kılavuzu yapısına ait mikrodalga deney düzeneğinin şematiği.

Tasarlanan yapının mikrodalga frekanslarında deneyi yapılmıştır. Deney düzeneğinin temsili gösterimi Şekil 4.8’de verilmiştir. Burada, deney için örgü sabiti  $a=15.75$  mm olarak seçilmiştir. Bunun sonucunda, mikrodalga deneyi ise 7.66 GHz frekansında gerçekleştirilmiştir. Kırıcılık indisi  $n=3.13$  olan alumina ( $Al_2O_3$ ) dielektrik silindir çubuklar kullanılarak tasarlanan cihaz oluşturulmuştur. Dielektrik çubukların çapları ise  $R=6.3$  mm’dir. Tasarlanan FK dalga kılavuzunun genişliği  $w=44.2$  mm olurken tasarım alanının x-ekseni ve y-ekseni yönlerindeki genişlikleri sırasıyla  $L_x=63$  mm ve  $L_y=63$  mm olmaktadır. Giriş ve çıkış dalga kılavuzlarında ölçülen elektrik alan dağılımları sırası ile Şekil 4.9(a)’da ve Şekil 4.9(b)’de verilmiştir. Şekil 4.9(c) ve Şekil 4.9(d)’de ise giriş ve çıkış dalga kılavuzlarında ölçülen faz dağılımları sunulmuştur. Şekil 4.9(b)’deki kesikli çizgiler ile çıkış dalga kılavuzu içerisinde elektrik alan kesitlerinin ölçüldüğü konumlar gösterilmiştir. Soldaki ve sağdaki seçilen konumlarda ölçülen elektrik alan kesitleri sırasıyla Şekil 4.9(e) ve Şekil 4.9(f)’de verilmiştir. Bu şekillerden görüldüğü üzere elektrik alan kesitleri hedef olarak seçilen sinüs fonksiyonlarına benzemektedir.



Şekil 4.9 : (a) Giriş ve (b) çıkış dalga kılavuzlarında deneysel olarak ölçülen elektrik alan dağılımı. (c) Giriş ve (d) çıkış dalga kılavuzlarında deneysel olarak ölçülen faz dağılımı. Çıkış dalga kılavuzunda ölçülen elektrik alan dağılımının (e) sol ve (f) sağ konumdaki kesitlerinin grafikleri.

## 4.2 Epsilon-Mu-Sıfıra-Yakın Birim Hücreli Asimetrik Işık İletici Fotonik

### Kristal Tasarımı\*

Son yıllarda FK'lerin birçok yeni özelliği ortaya çıkarılmıştır. Bu özelliklerden biri de altıgen örgüye sahip FK'lerin Brillouin bölgelerinin köşe noktalarında meydana gelen doğrusal tekillik ile ortaya çıkan fotonik Dirac konisidir. Fotonik Dirac konisi, grafen gibi elektronik katı hâl sistemlerinde görülen Dirac konisinin optik eşdeğeridir ve kuantum Hall etkisi ve zitterbewegung gibi önemli karakteristikleri göstermektedir. Fotonik Dirac konisinin tanımı genişleyerek Dirac-benzeri konik (DBK) dispersiyon olgusu olarak ortaya çıkmıştır. DBK, belirli yapı parametrelerine sahip dielektrik çubuklardan oluşan FK yapılarının Brillouin bölgesi merkezinde, yani dalga vektörünün  $k=0$  olduğu konumda yer almaktadır. Periyodik FK yapısı, DBK noktasında epsilon-mu-sıfıra-yakın (EMSY) yani sıfır kırıcılık indisli malzeme davranışı göstermektedir. Tipik olarak EMSY yapılarının etkin elektriksel geçirgenlikleri ( $\epsilon_{\text{etk}}$ ) ve etkin manyetik geçirgenlikleri ( $\mu_{\text{etk}}$ ) sıfıra yakınsamaktadır ( $\epsilon_{\text{etk}} \approx \mu_{\text{etk}} \approx 0$ ) ve dolayısıyla kırıcılık indisleri sıfıra yakınsamaktadır ( $n \approx 0$ ).

\*Bu bölümün esas alındığı çalışma: Bor, E., Turdjev, M, Yasa, U. G., Kurt, H., Staliunas, K., (2018). Asymmetric light transmission effect based on an evolutionary optimized semi-Dirac cone dispersion photonic structure, Phys. Rev. B, 98:245112.



Literatürde örnekleri verilen FK tabanlı EMSY çalışmalarından önce sıfır kırıcılık indisi gösteren malzemeler metalik bileşenler içeren tasarımlar ile elde edilmiştir. Ancak, bu yapıların elektriksel ve manyetik geçirgenlik katsayıları eş zamanlı olarak sıfıra eşit olmadığı için ( $\epsilon_{\text{etk}} \approx 0$ ,  $\mu_{\text{etk}} \neq 0$  veya  $\epsilon_{\text{etk}} \neq 0$ ,  $\mu_{\text{etk}} \approx 0$ ), buldukları ortam ile aralarında empedans farkı oluşmaktadır. Ortaya çıkan empedans uyumsuzluğu, tasarlanan cihazların iletim verimliliklerinin iyi olmamasına sebep olmaktadır. Bu yapay (doğal olmayan) yapılar, etkin yapısal parametrelerine göre iki başlık altında toplanabilmektedir:  $\epsilon_{\text{etk}} \approx 0$ ,  $\mu_{\text{etk}} \neq 0$  ise epsilon-sıfıra-yakın (EYS) ve  $\epsilon_{\text{etk}} \neq 0$ ,  $\mu_{\text{etk}} \approx 0$  ise mu-sıfıra-yakın (MYS). Erken dönem yaklaşımlarının sahip olduğu metalik bileşenler, empedans uyumsuzluğu ve karmaşık tasarımlar nedeni ile DBK'ya sahip FK'ler kırıcılık indisi sıfıra eşit olan ortamlar elde etmek için uygun bir alternatif olabilirler. Bu FK'ler elektromanyetik dalgaların tüm yayılım yönleri için izotropik bir karakteristiğe sahiptirler. Yani, elektriksel ve manyetik geçirgenlik değerleri yapının içerisinde bütün doğrultular boyunca aynıdır.

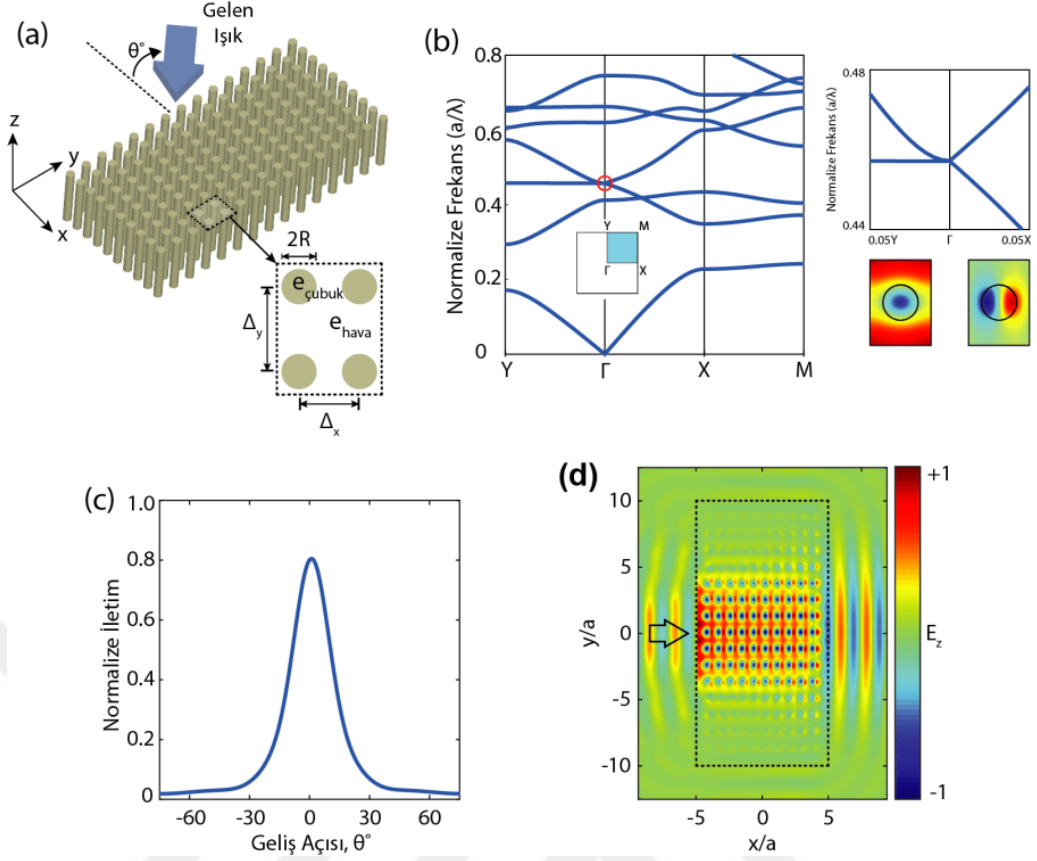
Bu özelliklerinden dolayı, DBK tabanlı fotonik cihaz uygulamalarında, istenilmeyen doğrultulardaki ışık iletimini engellemek için yansıtıcı katmanlar kullanılması gerekmektedir. Ayrıca DBK, spesifik birim hücre konfigürasyonlarında ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle, tasarlanan birim hücre yapılarına karşılık gelen sadece tek bir DBK frekansı bulunmaktadır. Bu yapısal eşsizlik, farklı frekans noktalarında sıfır kırıcılık indisi gerektiren fotonik cihaz uygulamaları için istenmeyen bir durumdur. Yukarıda belirtilen kısıtlayıcı nedenler DBK'ya sahip FK'lere dayalı fotonik cihaz uygulamalarının tasarım ve eniyileme aşamalarını zorlaştırmaktadır. Sıfır kırıcılık indisine sahip yapay ortamların tasarımına olan ilginin sebebi bu malzemelerin elektromanyetik dalgalar ile etkileşiminin alışılmamış şekilde olmasından kaynaklanmaktadır. Snell yasasına göre, sıfır kırıcılık indisinin temel fiziksel belirtilerinden birisi bu malzemelerden çıkış yapan dalgaların yüzey normali ile  $0^\circ$  açı yaparak yoluna devam etmesidir. Ayrıca, bu malzeme üzerine düşen elektromanyetik dalgaların normal ile yaptığı geliş açısı  $0^\circ$ 'den farklı ise dalgalar sıfır kırıcılık indisli malzemenin yüzeyinden büyük oranda yansımaktadırlar.

Tez kapsamındaki bu çalışmada DBK fenomenine bir alternatif olan yarım-Dirac konik (YDK) dispersiyonu FK yapısı ile asimetric ışık iletimi (Aİİ) için bir fotonik cihaz tasarlanmıştır. DBK sahibi periyodik ortamlardan farklı olarak YDK içeren FK'ler, bir iletim yönü için düşük kayıplı EMSY ortam davranışı gösterirken dikey

iletim yönü için uyumsuz empedanslı ESY özelliğine sahiptir. Bu nedenle önerilen düşük dönel simetrik ortamlar herhangi bir yansıtıcı katmana gerek olmadan elektromanyetik dalgaları tek bir doğrultuda iletmektedirler.

Bu çalışmada ilk kez YDK dispersiyon fenomeni ile evrimsel eniyileme birleştirilerek Aİİ etkisini elde etmek için yeni bir yöntem önerilmiştir. Burada DE algoritması YDK dispersiyonu etkisini gösteren FK yapısının seçilen bölgesini eniyilemek için uygulanmıştır. Öncelikle, fotonik bantları arasında yarı-Dirac noktasına sahip bir FK yapısını tasarlamak ve silindir dielektrik çubukların dikdörtgen hücre yapısını bulmak için DDA yöntemi kullanılmıştır. Daha sonra SFZB yöntemi kullanılarak Aİİ etkisine ulaşmak için FK yapısının arka bölgesinde DE algoritması ile eniyileme yapılmıştır. Burada FK'in arka bölgesindeki silindir çubukların konumları y-ekseni yönünde ayarlanmıştır. SFZB simülasyon sonuçlarına göre, tasarlanan Aİİ FK yapısına belirli bir yönden gelen dalga ileri yönde %80'lik verim ile iletilirken, ışığın ters yönden gelmesi durumunda iletim verimi %10'a kadar düşmektedir.

Şekil 4.10(a)'dan görülebileceği üzere, kullanılan FK yapısı hava ortamına yerleştirilmiş silindir dielektrik çubukların dikdörtgen örgüde dizilmesi sonucu oluşturulmuştur. Hava ortamının ve dielektrik çubukların elektriksel geçirgenlikleri sırası ile  $\epsilon_{\text{hava}}=1$  ve  $\epsilon_{\text{çubuk}}=9.8$  olarak seçilmiştir. Dielektrik çubuklar  $R=0.29a$  yarıçapına sahiptir ve çubukların merkezleri arasındaki mesafeler sırasıyla x-ekseni ve y-ekseni boyunca  $\Delta x=1a$  ve  $\Delta y=1.4a$  olarak sabitlenmiştir. Burada  $a$  örgü sabitini göstermektedir. Şekil 4.10(b)'de sunulan Brillouin bölgesinin merkezinden görülebileceği üzere üçüncü ve dördüncü EM polarizasyon bantları  $a/\lambda=0.457$  normalize frekansında kesişmektedir ve kesişim bölgesi kırmızı renkli bir daire ile gösterilmiştir. Bu noktada periyodik yapının  $\Gamma X$  ve  $\Gamma Y$  ilerleme yönlerinde sırası ile EMSY ve ESY ortamları olarak davrandığı görülmektedir. Bu nokta yarı-Dirac frekansı olarak adlandırılır ve bu tesadüfi frekans noktası bant diyagramlarını ayıran nokta olarak tanımlanır. Ayrıca Şekil 4.10(c)'de YDK yapısına gelen dalganın geliş açısına ( $\theta$ ) göre dalganın iletim veriminin değişimi sunulmuştur. Bu şekilden görülebileceği üzere yapıya gelen dalganın yüzey normali ile yaptığı açı arttıkça iletimin aniden azaldığı görülmektedir. Bu hızlı azalmanın sebebi dik açıdan farklı açılar ile yüzeye gelen dalgaların yapının içerisine girememesi yani YDK yapısının yüzeyinden geri yansımadır.

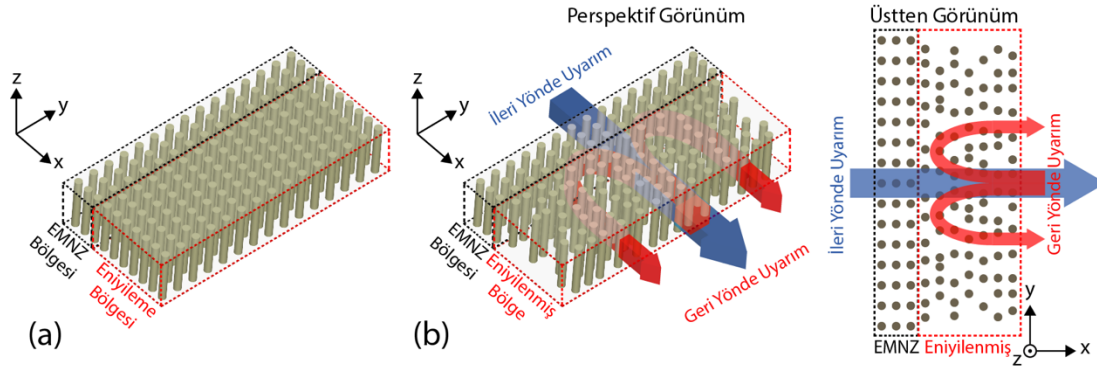


Şekil 4.10 : (a) YDK dispersiyonuna sahip FK yapısının 3B şematik görüntüsü. (b) İlgili birim hücrenin fotonik bant diyagramı ve EMSY etkisini gösteren  $\Gamma$  noktasının yakınlaştırılmış hali. (c) YDK etkisi gösteren FK yapısının iletiminin gelen dalganın açısına bağlı değişim grafiği. (d) YDK FK yapısı boyunca ilerleyen dalganın elektrik alan profili.

YDK dağılımlı FK yapısının iletim veriminin gelen dalganın giriş açısına bağlı olması AIİ etkisine sahip bir fotonik cihaz tasarlanması fikrini ortaya çıkarmıştır. Bu nedenle, birbirine zıt iki ilerleme yönü için bir taraftan YDK yapısının yüzeyine dik gelen dalga ile diğer yönden yüzeye eğik açı ile gelen dalganın ayarlanması durumunda AIİ etkisi elde edilebilir. YDK FK yapısının bu açı hassasiyetli dağılım özelliği ve eniyileme yaklaşımını kullanarak tamamen dielektrik ve yüksek verimli bir AIİ cihazı tasarlanmıştır.

Bu çalışmada, YDK dispersiyon etkisini sergileyen bir FK yapısında AIİ etkisini sağlamak için DE algoritması uygulanmıştır. Burada, 10 dielektrik çubuk sütunundan oluşan bir EMSY FK yapısı eniyileme işlemi için bir başlangıç yapısı olarak seçilmiştir. Bu başlangıç yapısı Şekil 4.11(a)'da şematik olarak verilmiştir. EMSY ortamına dik açıda gelen ışığın iletilmesi özelliğinden faydalanabilmek adına EMSY FK yapısının 3 sütunu (EMSY bölgesi) eniyileme süreci boyunca sabitlenmiştir.

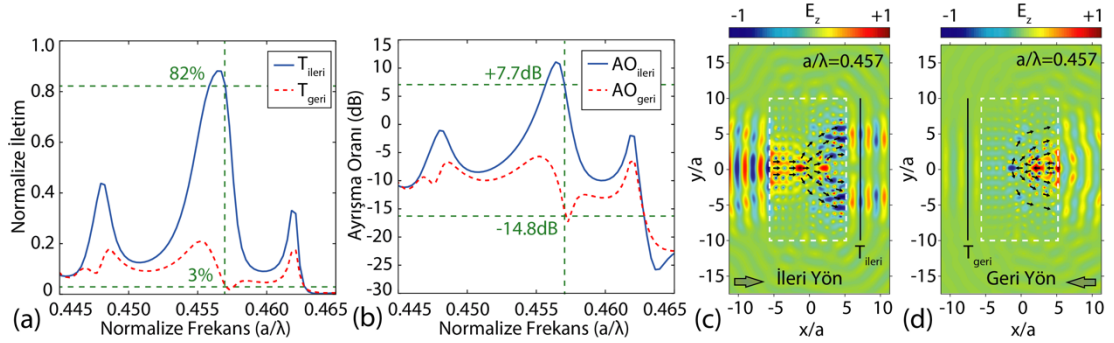
Geriye kalan 7 sütundaki (Eniyileme bölgesi) dielektrik çubukların ise y-eksenindeki pozisyonları DE algoritması eniyilenmiştir ve bu sayede AIİ etkisi elde edilmiştir. Bu çalışmada, DE algoritması SFZB metodu ile birleştirilmiştir; ileri ve geri yönleri için  $a/\lambda=0.457$  YDK frekansında iletim değerleri hesaplanmıştır. Tasarlanan AIİ FK yapısının perspektif görüntüsü ve üstten görünüşü Şekil 4.11(b)'de verilmiştir. Bu şekil üzerinde mavi ve kırmızı oklar dalgaın sırası ile ileri ve geri yöndeki ilerleyişini temsil etmektedir.



Şekil 4.11 : (a) Eniyileme için temel olarak seçilen FK yapısının üç boyutlu gösterimi. Önceden seçilmiş sabit EMNZ bölgesi ve eniyileme bölgesi sırasıyla siyah ve kırmızı kesik çizgilerle çevrelenmiştir. (b) Eniyilenmiş FK yapısı verilir ve sabit EMNZ bölgesi ve Eniyilenmiş bölge sırasıyla siyah ve kırmızı kesik çizgilerle çevrelenir. Eniyilenmiş FK yapısının ileri ve geri uyarımları sırasıyla gölgeli mavi ve gölgeli kırmızı oklarla gösterilmiştir.

Eniyilenmiş FK yapısı önce ileri ve sonra geri yönde Gaussian profiline sahip bir ışık kaynağı ile uyarılmıştır. İletim verimliliğini hesaplamak için optik güç ölçüm monitörü eniyilenmiş FK yapısının çıkışına yerleştirilmektedir. Burada şuna dikkat edilmelidir; yapının giriş ve çıkış bölgeleri ışığın ilerlediği yöne bağlı olarak değişmektedir. Şekil 4.12(a)'da ileri ve geri yönleri için hesaplanan normalize iletim değerleri verilmiştir. Bu şekilden anlaşılacağı üzere, YDK frekansının yakınında bir AIİ özelliği elde edilmektedir. İlgili cihazın tasarlandığı  $a/\lambda=0.457$  normalize frekansında ileri ( $T_{ileri}$ ) ve geri ( $T_{geri}$ ) yöndeki iletim verimleri sırası ile  $T_{ileri}=\%82$  ve  $T_{geri}=\%3$  olarak hesaplanmıştır. Bunun yanı sıra, elde edilen AIİ etkisini değerlendirmek için ileri ( $AO_{ileri}$ ) ve geri ( $AO_{geri}$ ) yöndeki ayırışım oranı (AO) değerleri hesaplanmıştır ve Şekil 4.12(b)'de verilmiştir. Burada, ileri ve geri yönde hesaplanan AO değerleri  $AO_{ileri}=+7.7$  dB ve  $AO_{geri}=-14.8$  dB'ye eşittir. Burada pozitif  $AO_{ileri}$  değeri ile ileri yöndeki uyarım için düşük yansımının ve yüksek iletim

veriminin elde edildiği anlaşılır. Öte yandan, negatif  $AO_{geri}$  değeri ise geri yönde yüksek yansıma ve düşük iletim veriminin olduğunu işaret eder.



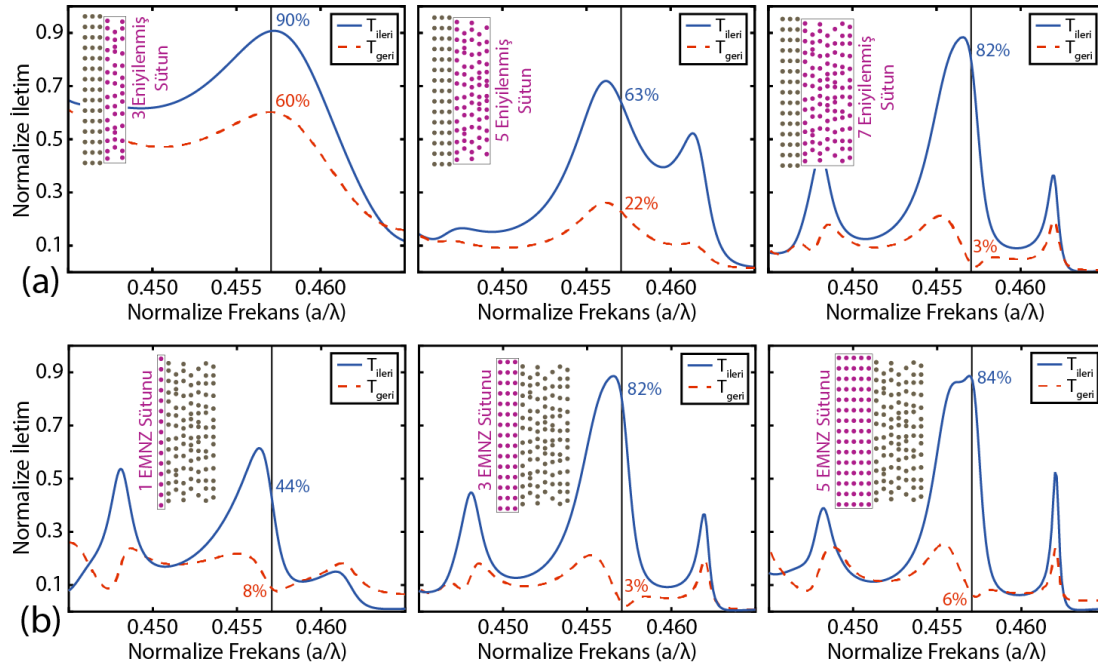
Şekil 4.12 : (a) Eniyilenmiş FK yapısının ileri ( $T_{ileri}$ ) ve geri ( $T_{geri}$ ) uyarımları için normalize edilmiş iletim verimlilikleri (b) Eniyilenmiş YDK FK yapısının ileri ( $AO_{ileri}$ ) ve geri ( $AO_{geri}$ ) yönde uyarımları için sönüm oranı değerleri. (c) ve (d) sırasıyla eniyilenen AIİ yapısının ileri ve geri uyarımlar için SFZB metodu  $a/\lambda=0.457$  ile hesaplanmış elektrik alan profilleri.

AIİ FK cihazında ileri ve geri için yarı-Dirac frekansında ışığın ilerlemesi sırası ile Şekil 4.12(c) ve Şekil 4.12(d)'de verilmiştir. İleri yönde gelen ışık yapı içerisinde ilerlerken ikiye ayrılarak yapıyı terk etmektedir. Öte yandan, geri yönde yapıya gelen ışık yapının içerisinde eniyileme bölgesine girmekte ancak EMSY bölgesine giremeyerek yansımaktadır. Bunun sebebi, geri yönde gelen ışık ilk olarak yapının eniyileme bölgesine girmektedir ve burada dalga ön cepheleri bozulmaktadır. Bunun sonucunda ise EMSY bölgesine girmesi engellenmiş olmaktadır. Ancak, ileri yönde böyle bir durum söz konusu değildir. İleri yönde gelen ışık ilk olarak yapının EMSY bölgesine girmektedir ve buradan geçerek eniyileme bölgesine gelmektedir. EMSY bölgesinde dalga ön cepheleri bozulan ışık saçılmaktadır ancak bu durumda tekrar EMSY bölgesine girmesi engellenmiş olmaktadır. Bununla beraber ileri yönde ilerleyen dalga eniyileme bölgesi içerisinde ikiye ayrılarak yapıyı arka yüzeyinden terk etmektedir.

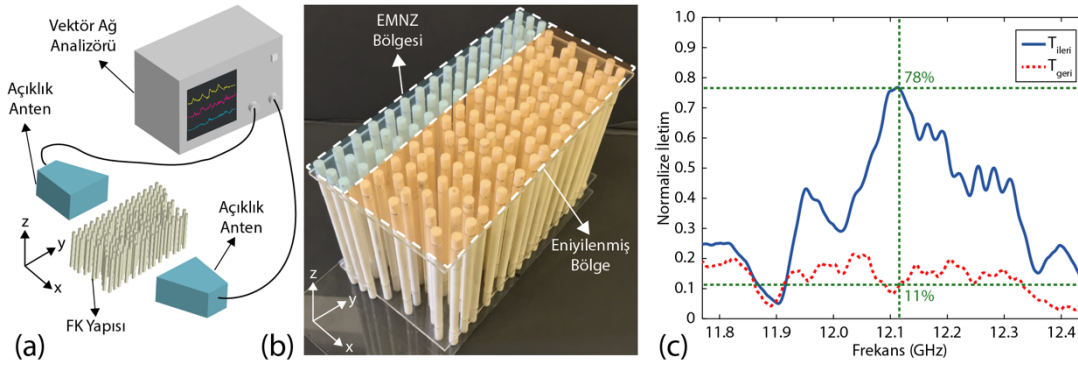
Tasarlanan YDK FK cihazının sahip olduğu AIİ etkisini daha iyi inceleyebilmek için EMSY Eniyileme bölgelerindeki sütun sayılarının etkisini gösteren iletim grafikleri Şekil 4.13'de verilmiştir. Bu grafiklerden görüldüğü üzere eniyileme yönteminin silindirik çubukları maliyet fonksiyonunu sağlamak için yerleştirdiği anlaşılmaktadır.

Nümerik olarak hesaplanan AIİ etkisi mikrodalga frekanslarında yapılan deneyler ile doğrulanmıştır. Tasarlanan FK yapısı elektriksel geçirgenliği  $\epsilon=9.8$  olan alumina ( $Al_2O_3$ ) silindirik çubuklar kullanılarak oluşturulmuştur. Deney düzeneğinin temsili

görüntüsü Şekil 4.14(a)'da verilmiştir. Deneysel Agilent E5071C ENA vektör ağ analizörü kullanılarak yapı uyarılmıştır. Tasarlanan yapının örgü sabiti  $a=11.32$  mm ve dielektrik çubukların çapları ise 6.6 mm olarak seçilmiştir. Ayrıca, sunulan FK cihazın boyutları x-yönünde ve y-yönünde sırası ile 108.46 mm ve 228.46 mm olmaktadır. Bu yapısal parametrelere karşılık gelen yarı-Dirac frekansı 12.11 GHz olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.13 : (a) Eniyilenmiş bölgenin sütunlarının asimetrik iletme olan etkisi (b) EMSY bölgesinin sütunlarının asimetrik iletme olan etkisi.

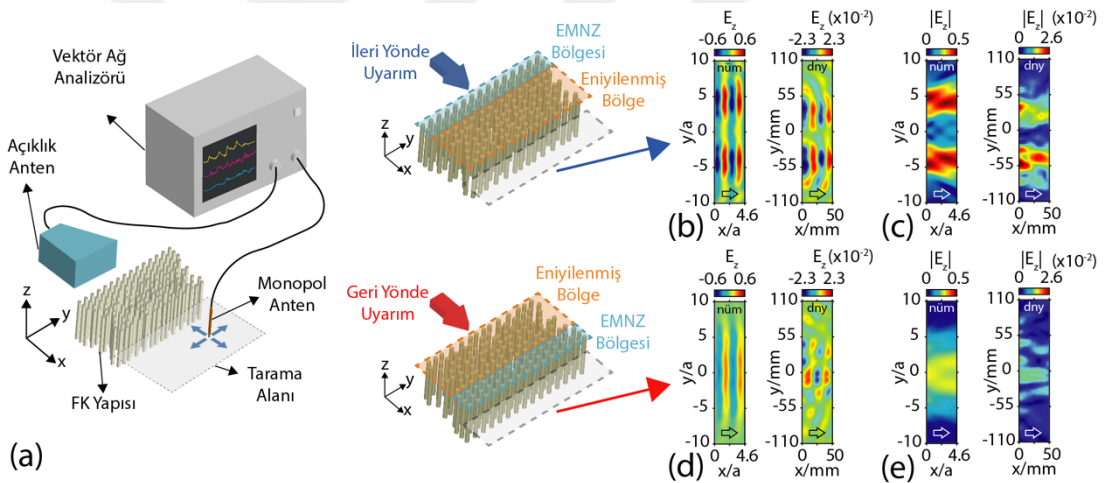


Şekil 4.14 : (a) Tasarlanmış FK yapısının ileri ve geri yönde iletim ölçmek için kullanılan mikrodalga deney düzeneğinin temsili görüntüsü. (b) Tasarlanan ALT FK cihazının fotoğrafı. (c) İleri (mavi çizgi) ve geri (kırmızı kesikli çizgi) yönde ölçülen iletim değerleri.

Açıklık anten kullanılarak FK cihaz uyarılmıştır. İleri ve geri yönde iletimi ölçmek için bir diğer açıklık anten kullanılmıştır. Tasarlanan cihazın fotoğrafı Şekil 4.14(b)'de gösterilmiştir. İleri ve geri yönde ölçülen iletim değerleri Şekil 4.14(c)'de

verilmiştir. 12.11 GHz olan yarı-Dirac frekansındaki ileri ve geri yönleredeki iletim değerleri sırası ile  $T_{ileri}=\%78$  ve  $T_{geri}=\%11$  olarak ölçülmüştür.

İletim ölçümünün yanı sıra Aİ FK yapısının çıkış düzlemindeki elektrik alan dağılımı ölçülmüştür. Bunun için monopul anten ile çıkış düzlemi hem ileri hem de geri yöndeki ışık uyarımları için taramıştır. Burada dikkat edilmesi gereken durum ışığın uyarım yönüne bağlı olarak yapının giriş ve çıkış yüzeylerinin yer değiştirmesidir. Elektrik alan dağılımlarının taranmasında kullanılan deney düzeneğinin temsili görüntüsü Şekil 4.15(a)'da verilmiştir. Burada, monopul anten ilgilenilen bölgeyi taramak için x-ekseni ve y-ekseni yönlerinde hareket ettirilmiştir. İleri yön için hesaplanan nümerik ve ölçülen deneysel elektrik alan ( $E_z$ ) ve büyüklük ( $|E_z|$ ) dağılımları sırası ile Şekil 4.15(b) ve Şekil 4.15(c)'de gösterilmektedir. Öte yandan, geri yönde hesaplanan elektrik alan ve büyüklük dağılımları ise sırası ile Şekil 4.15(d) ve Şekil 4.15(e)'de gösterilmiştir.



Şekil 4.15 : (a) FK yapısının çıkış bölgesindeki elektrik alan dağılımının ölçümünde kullanılan mikrodalga deney düzeneğinin temsili görüntüsü. Tasarlanan FK yapısının ileri ve geri yönde uyarılma doğrultuları ve tarama alanları. İleri yönde hesaplanan ve ölçülen (b) elektrik alan ve (c) büyüklük dağılımları. Geri yönde hesaplanan ve ölçülen (d) elektrik alan ve (e) büyüklük dağılımları.





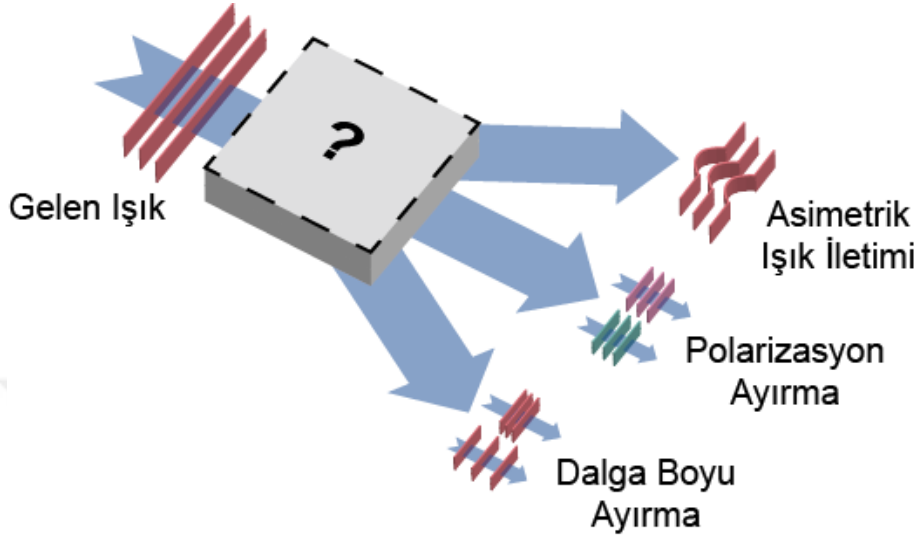
## 5. OPTİK NİTELİK AYIRICI ENTEGRE FOTONİK CİHAZ TASARIMLARI

Bu tez kapsamında yapılan çalışmaların bir kısmı optik nitelik ayırıcı entegre fotonik cihazlar başlığı altında toplanabilir. Nanofotonik uygulamalarında, yüksek performanslı ve yüksek fabrikasyon yoğunluğuna sahip entegre fotonik devrelerin tasarımı zor bir görevdir çünkü bu iki özellik kendi arasında ters orantılı olarak değişmektedir. Analitik bilgi ve tahminlere dayalı geleneksel tasarım yöntemleri bu dengeyi sağlayacak bir çözüm bulma konusunda yetersiz kalmaktadırlar. Bu nedenle, verimli ve küçük boyutlu entegre fotonik cihazları tasarlamak için bahsedilen bu dengeyi sağlayacak tasarım yöntemlerine ihtiyaç duyulmuştur. Bu tez kapsamında yapılan çalışmalarda, bu sorunu çözmesi için ÇS [80] ve GA [54] kullanılmıştır.

Bu bağlamda, YÜS malzemeler kullanılarak fotonik cihazlar tasarlanmıştır. Bu sayede, yapıların tümler-metal-oksit-yarıiletken (TMOY) teknolojisi ile uyumlu olması amaçlanmıştır. Tasarlanan yapılar silikon malzemesinden oluşmaktadır. Bu yapılar SiO<sub>2</sub> alttaş üzerine yerleştirilecek şekilde tasarlanmıştır. Eniyileme ve makine öğrenmesi algoritmaları ile yapıların yatay xy-düzlemindeki geometrisi değiştirilerek istenilen optik karakteristikler elde edilmiştir. Silikon (Si) malzemesi yakın kızılötesi olan 1550 nm dalga boyu dolaylarında yüksek kırıcılık indisine ( $n_{Si}=3.46$ ) sahip olduğu için yapı içerisinde ilerleyen ışık dikey z-ekseninde yapının içerisine hapsolmektedir. Bu hapsolmanın sebebi toplam iç yansıma (TİY) mekanizmasıdır.

Tasarlanan yapılar entegre dalga kılavuzları arasındaki bir tasarım bölgesinden oluşmaktadır. Tasarım bölgeleri ise xy-düzleminde kare şeklinde küçük piksellere ayrılmışlardır. Algoritmalar ile bu piksellerin durumları yani silikon veya hava boşluğu olmaları kararlaştırılmıştır. Burada algoritmaların 0 ve 1 sayılarını kullanarak ikilik sayı sisteminde (binary) çalıştığı belirtilmelidir. Tasarımlar sırasında tasarlanan yapılar birer matris gibi düşünülürse bu matrisin elemanları 0 ve 1'lerden oluşmaktadır. Bu matrisin fiziksel karşılığı ise 0 olan elemanların yerine karşılık gelen piksellerin hava boşluğu olması, 1 olan elemanların silikon olarak düşünülmesidir.

Tasarım alanlarının bitişğinde giriş ve çıkış dalga kılavuzları bulunmaktadır. Girişte gelen ışığın ilgilenilen özellikleri farklı çıkış dalga kılavuzlarına yönlendirilir. Şekil 5.1’de optik nitelik ayırıcı bir entegre fotonik cihazın tasarım mantığı şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 5.1 : Optik nitelik ayırıcı entegre fotonik cihaz tasarım şematığı.

### 5.1 Asimetrik Işık İletici Entegre Fotonik Cihaz Tasarımı\*

Bu tez kapsamında YSA tabanlı ÇS algoritması ile oldukça küçük boyutlu verimli AIİ entegre fotonik cihaz tasarımı sunulmuştur. Tasarlanan AIİ yapısı ışığın bir yönde iletimini sağlarken diğer yöndeki iletimini engellemektedir. Burada tasarımı hedeflenen fotonik cihaz nümerik olarak YÜS malzemeler kullanılarak tasarlanmıştır.

ÇS algoritması AIİ etkisini elde etmek için uygulandığından, ışığın ileri yöndeki iletim verimi artırılırken geri yöndeki iletim veriminin azaltılması için bir maliyet fonksiyonu tanımlanması gerekmektedir. Bu durumda, AIİ tasarlamak için algoritmaya iki farklı hedef belirlenmiştir. İlk hedef, seçilen dalga boyunda ileri yöndeki iletim verimini artırmaktır. İkinci hedef ise aynı dalga boyunda geri yöndeki iletim verimini düşürmektir.

---

\*Bu bölümün esas alındığı çalışma: Bor, E., Alparslan, O., Turduev, M., Hanay, Y. S., Kurt, H., Arakawa, S., Murata, M., (2018). Integrated silicon photonic device design by attractor selectin mechanism based on artificial neural networks: optical coupler and asymmetric light transmitter, Opt. Express, 26(22):29032–29044.

Bu nedenle, bir tanesi ileri yönde yüksek iletim ve diğeri ise geri yönde düşük iletim için birden fazla hata değerlerinin hesaplanması gerekmektedir. ÇS algoritması sadece bir hedef değeri için çalıştığından dolayı, algoritma her iki hata değerinin toplamını azaltmak için kullanılmıştır. AIİ tasarlamak için kullanılan hata değeri ( $E$ ) hesaplama formülü (maliyet fonksiyonu) şu şekildedir:

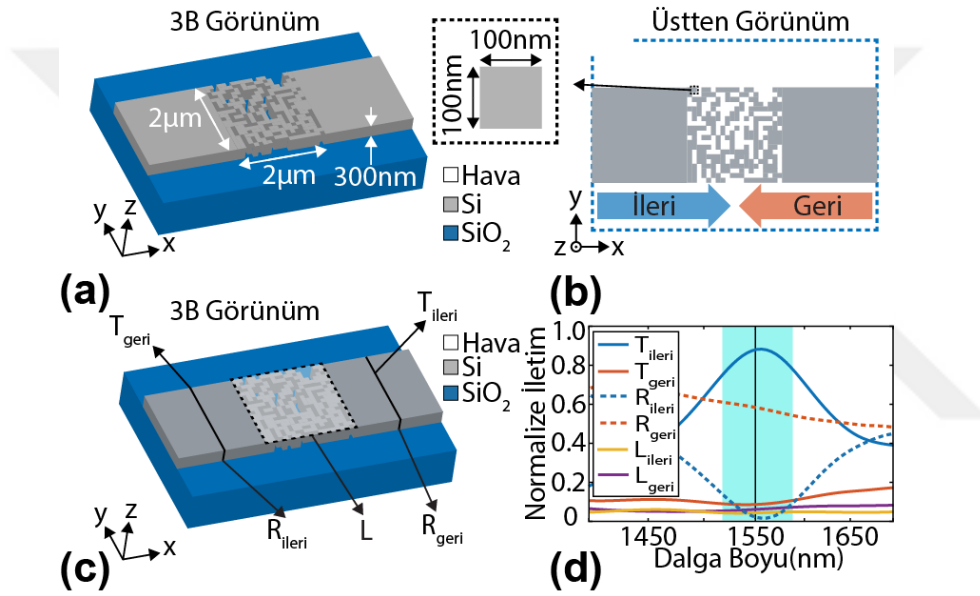
$$E_{AIİ} = (T_{ileri,hedef} - T_{ileri}) + (T_{geri} - T_{geri,hedef}) \quad (5.1)$$

Burada,  $T_{ileri}$  ve  $T_{geri}$  sırasıyla ileri ve geri yönde aynı dalga boyu için hesaplanan iletim verimleridir. Ayrıca,  $T_{ileri,hedef}$  ve  $T_{geri,hedef}$  ise sırasıyla ileri ve geri yön için aynı dalga boyunda hedeflenen iletim verimleridir.

Bu çalışmada, tasarlanan küçük boyutlu entegre fotonik cihaz  $2 \times 2 \mu\text{m}^2$  boyutlara ve 300 nm kalınlığa sahiptir. Burada,  $100 \text{ nm} \times 100 \text{ nm}$  boyutlarındaki silikon birim hücreler  $\text{SiO}_2$  alttaş üzerine ÇS algoritması ile dağıtılarak AIİ entegre fotonik cihaz tasarlanmıştır. AIİ entegre fotonik cihaz tasarımının 3B SFZB simülasyonlarında, EE polarizasyonlu düzlem dalga kaynağı kullanılmıştır ve tasarım dalga boyu  $\lambda=1550$  nm olarak sabitlenmiştir. Burada, xy-düzleminde elektrik alan bileşenleri ( $E_x$ ,  $E_y$ ) ve xy-düzlemine dik olan yönde ise manyetik alan bileşeni ( $H_z$ ) bulunmaktadır.

Şekil 5.2(a)'da görüldüğü üzere, tek yönlü ışık iletim bölgesi (tasarım bölgesi)  $2 \mu\text{m}$  genişlikte ve 300 nm kalınlıktaki giriş ve çıkış silikon dalga kılavuzları arasına yerleştirilmiştir. Ayrıca, Şekil 5.2(b)'de tasarlanan entegre fotonik cihazın üstten görünüşü şematik olarak verilmiştir; ileri ve geri yönler sırasıyla mavi ve kırmızı oklar ile temsil edilmiştir. ÇS algoritmasını kullanmanın amacı AIİ entegre fotonik cihazı içerisinde ileri yönde ışık iletimine izin verirken geri yönde ışık iletimini engellemektir. Tasarım işlemi sırasında gelen ışık giriş dalga kılavuzuna hapsolmuş şekildedir ve iletim verimliliği çıkış dalga kılavuzunda hesaplanmıştır. Dikkat edilmesi gereken bir konu ise giriş ve çıkış dalga kılavuzlarının tanımlarıdır. Bu tanımlar, AIİ entegre fotonik cihazın uyarıldığı yöne bağlıdır. Giriş terimi, ışık kaynağının konumunu ve çıkış terimi ise optik güç monitörünün konumunu anlatmaktadır. Giriş ve çıkış dalga kılavuzlarının içerisine yerleştirilen monitörlerin tasarlanan 3B AIİ entegre fotonik cihazının üzerindeki görüntüsü Şekil 5.2(c)'de verilmiştir. Hem ileri hem geri yönde hesaplanan iletim, yansıma ( $R$ ) ve düzlem dışı kayıplar ( $L$ ) Şekil 5.2(d)'de verilmiştir ve dalga boyu olan 1550 nm gösterilmiştir. İleri yönde iletim  $T_{ileri}=\%88.1$  olurken, geri yönde iletim ise  $T_B=\%8.6$  olarak tasarım

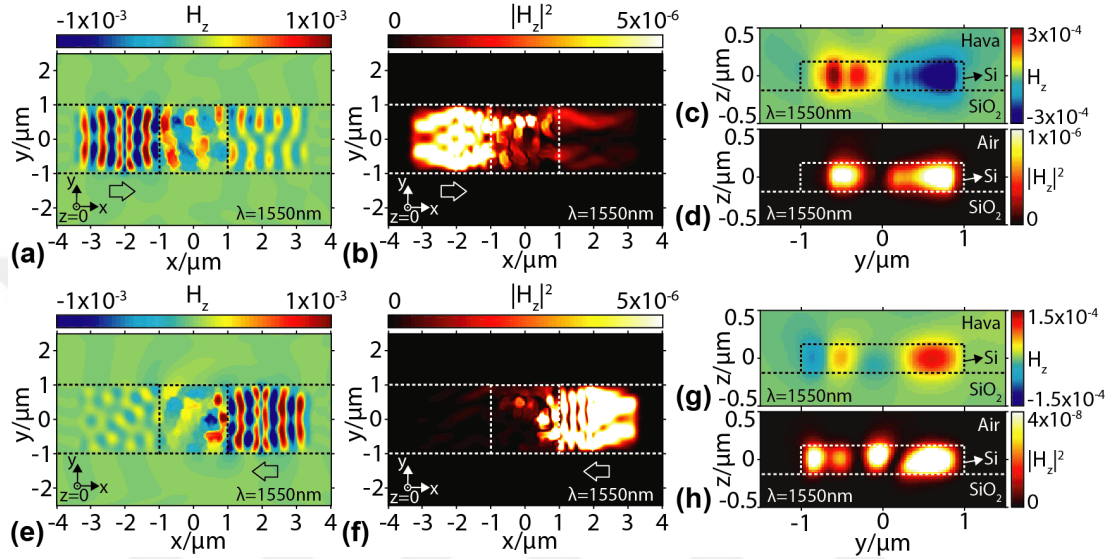
dalga boyu için hesaplanmıştır. Tasarlanan Aİİ entegre fotonik cihaz için çalışma bant aralığı 1527 nm ve 1581 nm dalga boyları arasında %3.47 olarak hesaplanmıştır ve Şekil 5.2(d)'de gölgelendirilen bölge olarak gösterilmiştir. Bu aralıkta ileri yönde iletim %80'den fazla olurken geri yönde iletim %10'un altındadır. Burada, ileri yöndeki yansıma ( $R_{ileri}$ ) ve geri yönde yansıma ( $R_{geri}$ ) sırasıyla %1.7 ve %58 olarak hesaplanmıştır. Buna ek olarak, düzlem dışı kayıplar ileri ve geri yönler için sırasıyla  $L_{ileri}=\%4.1$  ve  $L_{geri}=\%5.10$  olarak hesaplanmıştır. Burada, tasarım bölgesinin gelen ışığı düzlem dışına kaçırmadığı yorumu yapılabilir. Ancak, özellikle geri yönde gelen ışığın büyük bir kısmı cihazı yanlardan terk etmektedir veya altına sızmaktadır.



Şekil 5.2 : Tasarlanan Aİİ entegre fotonik cihazının (a) 3B ve (b) üstten görüntüsü ile yapısal boyutları verilmiştir. (c) İleri ve geri yön için iletim, yansıma ve düzlem dışı kayıpların hesaplandığı monitörlerin konumları gösterilmiştir. (d) İleri yönde iletim ( $T_{ileri}$ ), yansıma ( $R_{ileri}$ ), düzlem dışı kayıplar ( $L_{ileri}$ ) ve geri yönde iletim ( $T_{geri}$ ), yansıma ( $R_{geri}$ ), düzlem dışı kayıplar ( $L_{geri}$ ) verilmiştir.

Buna ek olarak, Aİİ entegre fotonik cihazın ileri ve geri yönleri için manyetik alanın ve şiddetinin durgun haldeki kesitleri 1550 nm dalga boyunda incelenmiştir. Şekil 5.3(a) ve Şekil 5.3(b)'de ileri yöndeki iletim için 3B SFZB uzayının  $z=0$  düzleminde alınan manyetik alan ve şiddetinin kesitleri sırasıyla gösterilmiştir. Ayrıca, ileri yöndeki iletim için  $yz$ -düzleminde  $x=2 \mu\text{m}$  konumunda çıkış dalga kılavuzu üzerinde alınan manyetik alan ve şiddetinin kesitleri sırasıyla Şekil 5.3(c) ve Şekil 5.3(d)'de verilmiştir. Benzer şekilde geri yöndeki iletim için  $z=0$  düzleminde hesaplanan manyetik alan ve şiddetinin kesitleri Şekil 5.3(e) ve Şekil

5.3(f)'de sırasıyla gösterilmiştir. Geri yöndeki iletim için çıkış dalga kılavuzundaki manyetik alan ve şiddetinin dağılımları yz-düzleminde  $x=2 \mu\text{m}$  konumunda hesaplanan kesitler ile Şekil 5.3(g) ve Şekil 5.3(h)'de sırayla verilmiştir. Bu şekiller üzerinde kesikli çizgiler tasarım bölgesinin ve dalga kılavuzlarının sınırlarını göstermektedir. Ayrıca, ileri ve geri yönde gelen ışığın yönü sırasıyla soldan-sağa ve sağdan-sola olan oklar ile gösterilmiştir.



Şekil 5.3 : İleri yönde iletim için  $z=0$  düzleminde  $\lambda=1550 \text{ nm}$  dalga boyunda hesaplanan (a) manyetik alan ve (b) şiddet kesitleri verilmiştir. İleri yönde ilerim için  $x=2 \mu\text{m}$  düzleminde nano dalga kılavuzu üzerinde hesaplanan (c) manyetik alan ve (d) şiddet kesitleri verilmiştir. Geri yönde iletim için  $z=0$  düzleminde  $\lambda=1550 \text{ nm}$  dalga boyunda hesaplanan (e) manyetik alan ve (f) şiddet kesitleri verilmiştir. Geri yönde ilerim için  $x=2 \mu\text{m}$  düzleminde nano dalga kılavuzu üzerinde hesaplanan (g) manyetik alan ve (h) şiddet kesitleri verilmiştir.

Şekil 5.3(a) ve Şekil 5.3(e)'den görüldüğü üzere, çıkış dalga kılavuzlarında hapsolan ışık yüksek dereceli mod karakteristiğine sahip olurken giriş dalga kılavuzunda hapsolan ışık temel mod karakteristiğine sahiptir. Ayrıca, bu etki açık bir şekilde Şekil 5.3(c) ve Şekil 5.3(g)'de verilen manyetik alan kesitlerinden de görülmektedir. Hem ileri hem geri yönde çıkış dalga kılavuzuna iletilen ışık yüksek dereceli mod karakteristiğine sahiptir. Ortaya çıkan mod derecesinin dönüşümü aslında Aİİ etkisinin arkasındaki ana fiziksel mekanizmadır. Bir başka deyişle, piksellerin, yani kırıcılık indisinin, dağıtılma biçimi girişteki temel mod için bir bozulma ortaya koyarken çıkış dalga kılavuzunda ilerleyen ışığın yüksek dereceli moda sahip olmasına neden olmaktadır. Bu nedenle, ileri yönde ışık iletimi sağlanırken geri yönde ışık iletimi neredeyse engellenmiştir çünkü yüksek dereceli mod geri yönde

desteklenmemektedir. İleri yönde ışık tasarlanan ortamda ilerlerken kırıcılık indisi profilinin yüksek saçıcı etkisinden dolayı faz bozulması ve yüksek dereceli mod oluşumu gerçekleşmektedir. Ancak, geri yönde güçlü yansıma olduğu için diğer tarafa neredeyse hiç ışık geçmemektedir. Burada giriş ve çıkış dalga kılavuzlarının her ikisinin de yüksek dereceli modları destekleyebildiğine ve ileri ve geri yönde yapının sadece temel mod ile uyarıldığına dikkat edilmelidir. Ayrıca, ileri ve geri yönde iletilen yüksek modlar birbirlerinden farklıdır ve farklı oranda optik güç taşımaktadırlar. Bu durum da Aİİ etkisi olarak adlandırılmaktadır.

Düzgün bir optik yalıtım, ışığın geri yöndeki iletiminin tüm modlar için mükemmel bir şekilde engellenmesidir ve sadece Lorentz simetri şartı bozularak elde edilebilir. Tek yönlü ışık iletimi için girişte ve çıkışta farklı modları seçmek optik yalıtım sağlamak için yeterli değildir. Ancak, tasarlanan entegre fotonik cihazın çalışmasını belirli modlar ile sınırlarsak cihazı bir çeşit optik diyot olarak düşünebiliriz. Burada göz önünde bulundurulması gereken durum; tasarlanan Aİİ entegre fotonik cihazı bir optik yalıtıcı değildir. Optik yalıtım etkisini tamamen incelemek için geri yönde uygulanabilecek tüm modları analiz etmek gerekmektedir. Çünkü toplam enerji farklı modlar üzerinde düzensiz bir şekilde dağılmaktadır. Bu sebeple bazı modlar tek yönlü ışık iletimi karakteristiği göstermektedir. Bir başka deyişle, bir mod geri yönde düşük iletim verimine sahip olurken bir başka mod geri yönde yüksek iletim verimine sahip olabilir. Geri yönde düşük iletime sahip modu seçerek optik yalıtımın elde edildiği söylenemez. Çünkü, optik yalıtımda tüm modlar için geçerli olan bir asimetric saçılım matrisi gereklidir. Hatta, doğrusal ve zamandan bağımsız bir malzeme ile tasarlanan fotonik cihaz simetric saçılım matrisine sahip olacaktır ve bu şekilde optik yalıtım sağlamak imkansızdır [115]. Bu bilgiler ışığında, tasarladığımız Aİİ entegre fotonik cihazının optik yalıtıcı olmadığı sonucuna varılır, çünkü tamamen dielektrik malzemedен tasarlanmıştır. Öte yandan, tasarlanan oldukça küçük boyutlu entegre fotonik cihaz Aİİ davranışı sergiler, çünkü karşılıklı yönde ilerleyen dalgalar farklı modlara sahiptirler.

## **5.2 Dalga Boyu Ayırıcı Entegre Fotonik Cihaz Tasarımları**

Bu çalışmada optik nitelik ayırıcı cihaz olarak dalga boyu ayırıcı entegre fotonik cihazlar tasarlanmıştır. Bu yapıların tasarımında YSA tabanlı ÇS mekanizması kullanılmıştır. İlgili cihazların tasarımları için bu algoritma 3B SFZB yöntemi ile

birleştirilmiştir ve iki farklı dalga boyu ayırıcı yapısı tasarlanmıştır. Her iki cihaz silikon (Si) malzemesi ile silikon dioksit (SiO<sub>2</sub>) alttaş üzerine üretilebilecek şekilde tasarlanmıştır, yani YÜS malzemeler kullanılmıştır ve TMOY teknolojisi ile uyumludur. SFZB simülasyonlarında silikonun kırıcılık indisi  $n_{Si}=3.46$ , silikon dioksit alttaşın kırıcılık indisi ise  $n_{SiO_2}=1.45$  olarak seçilmiştir. Bu cihazlar  $3 \times 3 \mu m^2$  boyutlarına ve 300 nm Si katman kalınlığına sahiptirler. Algoritma ile  $100 \times 100 nm^2$  boyutlarında pikseller yerleştirilerek dalga boyu ayırma işleminin gerçekleştiği bölge tasarlanmıştır. Ayrıca, giriş ve çıkış dalga kılavuzları ise 500 nm genişliğe sahiptirler.

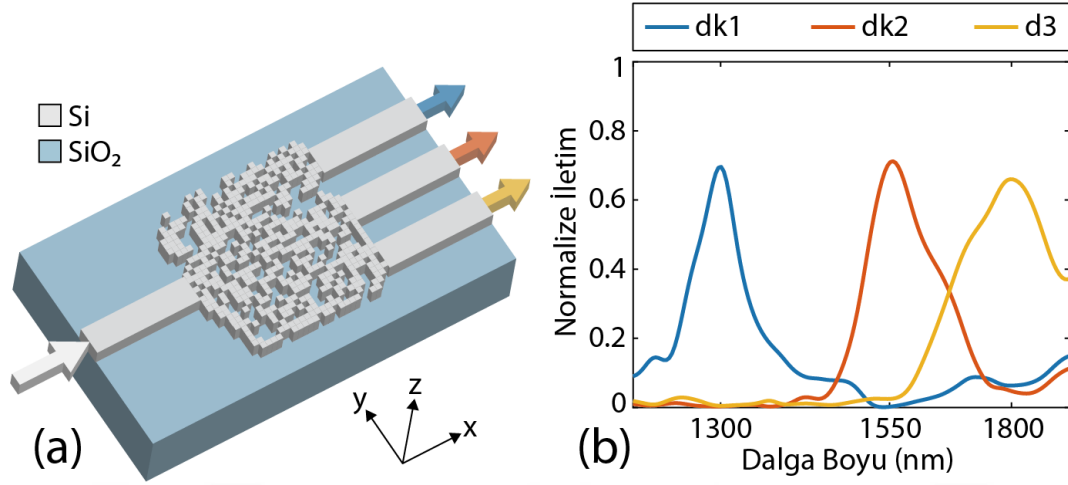
Tasarlanan ilk dalga boyu ayırıcı cihaz EE polarizasyonuna sahip ışığın 1300 nm, 1550 nm ve 1800 nm dalga boylarını ayırmaktadır. Şekil 5.4(a)'da görüleceği üzere, çıkıştaki üç dalga kılavuzunun her birine farklı dalga boyunda ışık iletilmiştir. Çıkış dalga kılavuzları arasında y-eksenine göre yukarı da bulunan dalga kılavuzuna (dk1) 1300 nm dalga boyuna sahip ışık iletilirken, ortadaki dalga kılavuzuna (dk2) ise 1550 nm dalga boyunda ışık hapsolmektedir. 1800 nm dalga boyuna sahip ışık ise aşağıdaki dalga kılavuzunda (dk3) ilerlemektedir. İlgili dalga kılavuzlarında hesaplanan optik güç grafikleri Şekil 5.4(b)'de gösterilmiştir. Görüleceği üzere bir dalga kılavuzunda iletilmesi istenilen dalga boyuna ait iletim seviyesi %70 civarında olurken, istenmeyen dalga boylarının iletim seviyeleri %10'un altında kalmaktadır. Tasarım işlemi için bir dalga kılavuzunda istenilen dalga boyu artırılması hedef olarak belirlenmiştir. Bu yapının tasarımı için maliyet fonksiyonu aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

$$f_{maliyet} = w_1(1 - T_1) + w_2(1 - T_2) + w_3(1 - T_3) \quad (5.2)$$

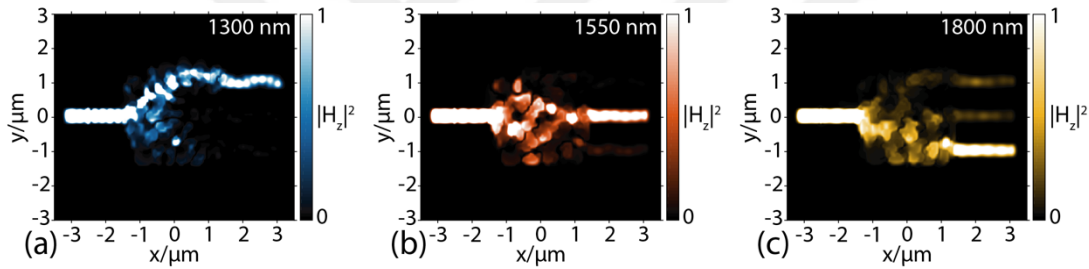
Burada, T ile bir dalga kılavuzunda ilerlemesi istenilen dalga boyuna ait iletim değeri temsil edilmektedir. Maliyet fonksiyonunun dengeli olması adına üç farklı hedef için ayrı ayrı ağırlıklandırma katsayıları (w) belirlenmiştir. Bu sayede, algoritmanın üç hedefi beraber gerçekleştirmesi sağlanmıştır.

Tasarlanan cihazın içerisinde ilerleyen 1300 nm, 1550 nm ve 1800 nm dalga boylarındaki ışığın manyetik alan şiddeti ( $|H_z|^2$ ) dağılımları sırasıyla Şekil 5.5(a)-(c)'de verilmiştir. İlgili şekilden görülebileceği üzere, bir dalga kılavuzunda iletilmesi istenilen dalga boyu için şiddet yüksek olurken diğer dalga kılavuzlarına bu dalga boyu iletilmemektedir. Yani, dalga kılavuzlarındaki karşılıklı gürültü az

olmaktadır ve ilgili cihaz dalga boyu ayırma işlemini başarılı bir şekilde gerçekleştirebilmektedir.



Şekil 5.4 : (a) Tasarlanan yapının 3B görünüşü. (b) Üç farklı çıkış dalga kılavuzlarındaki normalize iletim değerlerinin dalga boylarına göre grafikleri.

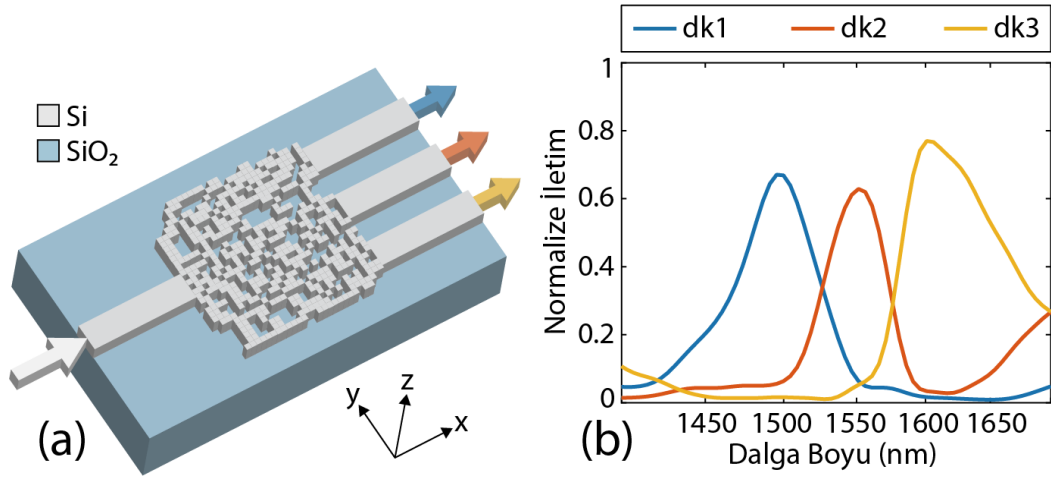


Şekil 5.5 : Tasarlanan dalga boyu ayırıcı cihazın (a) 1300 nm, (b) 1550 nm ve (c) 1800 nm dalga boylarındaki manyetik alan şiddeti dağılımları.

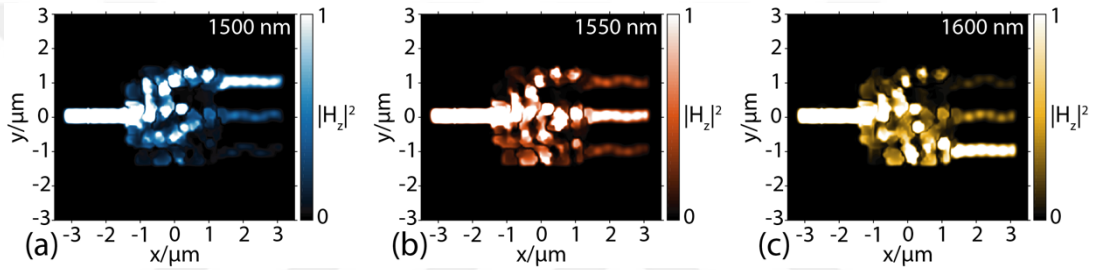
Tasarlanan bir diğer dalga boyu ayırıcı entegre fotonik cihazı ise 1500 nm, 1550 nm ve 1600 nm dalga boylarını farklı dalga kılavuzlarına yönlendirebilmektedir. İlgili yapının görüntüsü Şekil 5.6(a)'da ve çıkış dalga kılavuzlarının iletim grafikleri Şekil 5.6(b)'de verilmiştir. Yukarıdan aşağıya doğru olan dalga kılavuzlarının iletim grafikleri sırasıyla dk1, dk2 ve dk3 olarak sunulmuştur. Bu grafikten %75 civarlarında iletim değerlerine ulaşılabildiği görülmektedir. Yine bu cihaz için de çıkış dalga kılavuzları arasındaki karşılıklı gürültünün az olduğu görülmektedir. Bir önceki dalga boyu ayırıcı yapısının maliyet fonksiyonunun aynısı bu cihazın tasarımı için de kullanılmıştır. Buradaki tek fark, dalga kılavuzlarının içerisinde ilerlemesi istenen dalga boylarının farklı olmasıdır.

İlgili yapının farklı dalga boyları için çalışmasını incelemek için manyetik alan şiddeti ( $|H_z|^2$ ) dağılımları hesaplanmıştır. Şekil 5.7(a)-(c)'de sırasıyla 1500 nm, 1550 nm ve 1600 nm dalga boylarındaki ışığın cihazın içerisindeki dağılımı gösterilmiştir.





Şekil 5.6 : (a) Tasarlanan yapının 3B görünüşü. (b) Üç farklı çıkış dalga kılavuzlarındaki normalize iletim değerlerinin dalga boylarına göre grafikleri.



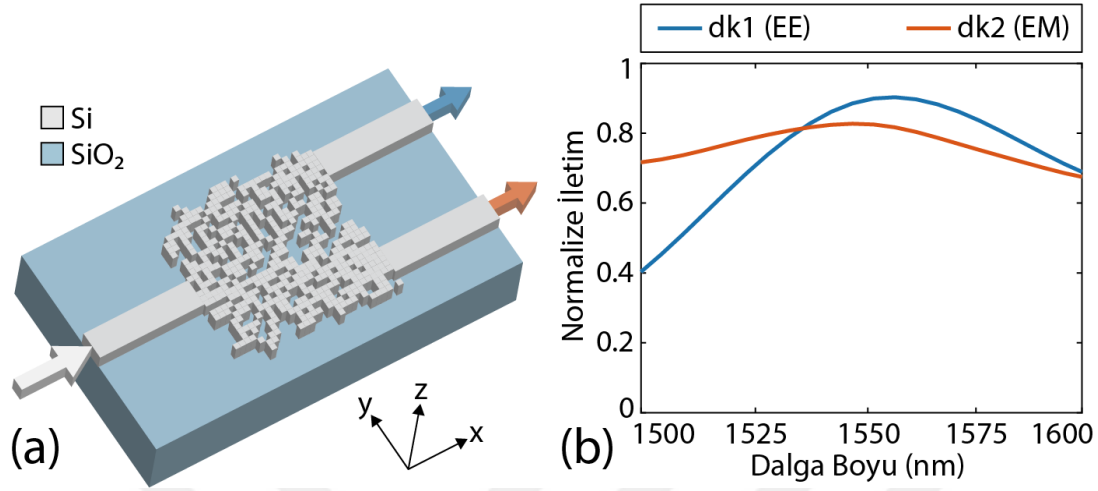
Şekil 5.7 : (a) 1500 nm, (b) 1550 nm ve (c) 1600 nm dalga boylarındaki ışığın tasarlanan cihaz içerisindeki manyetik alan şiddeti dağılımları.

Ayrıştırılan dalga boylarının birbirlerine yakın olması dar bir spektrumda daha çok dalga boyu ayrıştırılabileceğine yönelik çalışmaların öncüsü olacaktır. Ayrıca, tasarlanan yapılar küçük boyutlara sahiptirler. Bu sayede, entegre fotonik devrelerde daha az yer kaplayarak devrelerin daha yoğun bir biçimde üretilebilmesine olanak sağlamaktadırlar.

### 5.3 Polarizasyon Ayırıcı Entegre Fotonik Cihaz Tasarımı

Bu çalışmada tasarlanan bir diğer optik nitelik ayırıcı entegre fotonik cihaz ise 1550 nm dalga boyundaki ışığın iki farklı polarizasyonunu, yani EE ve EM polarizasyonlarını ayırmaktadır. Tasarlanan cihaz silikon dioksit (SiO<sub>2</sub>) alttaş üzerine silikon (Si) katman olacak şekilde tasarlanmıştır. 3B SFZB hesaplamalarında, silikon dioksit ve silikonun kırıcılık indisleri sırasıyla  $n_{\text{SiO}_2}=1.45$  ve  $n_{\text{Si}}=3.46$  olarak sabitlenmiştir. Polarizasyon ayırıcı cihaz  $3 \times 3 \mu\text{m}^2$  boyutlarına ve 300 nm katman kalınlığına sahiptir. Bu alanın içerisi  $100 \times 100 \text{ nm}^2$  boyutlarında piksellere ayrılmıştır ve ÇS algoritması ile piksellerin hangilerinin hava boşluğu hangilerinin silikon

olması gerektiği belirlenmiştir. Yapının giriş dalga kılavuzu ve çıkıştaki iki dalga kılavuzunun genişlikleri 500 nm olarak belirlenmiştir. Polarizasyon ayırıcı entegre fotonik cihazın 3B görünüşü Şekil 5.8(a)'da verilmiştir.



Şekil 5.8 : (a) Tasarlanan yapının 3B görünüşü. (b) İki farklı çıkış dalga kılavuzlarındaki normalize iletim değerlerinin polarizasyonlara göre grafikleri.

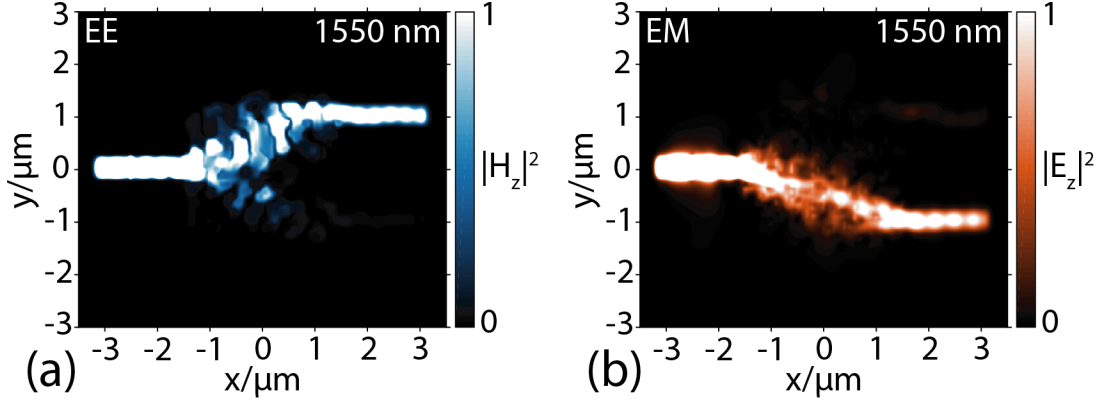
Çıkışta bulunan iki dalga kılavuzundan yukarıda olanın (dk1) içerisine EE polarizasyonu hapsolürken, aşağıdaki dalga kılavuzuna (dk2) EM polarizasyonuna sahip ışık hapsolmektedir. İlgili dalga kılavuzunda ilerlemesi istenilen polarizasyona ait normalize iletim grafikleri Şekil 5.8(b)'de gösterilmiştir. Bu entegre fotonik cihaz 1550 nm dalga boyunda çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Grafik incelendiğinde 1550 nm dalga boyunda EE ve EM polarizasyonlarına ait ışığın iletimi farklı dalga kılavuzlarında %80'den daha yüksek olmaktadır. Her ne kadar tasarım dalga boyu 1550 nm olarak sabitlenmiş olsa da cihaz belli bir çalışma bant genişliğine de sahip olmaktadır. Algoritma ile polarizasyon ayırıcı dalga boyu tasarlamak için aşağıdaki maliyet fonksiyonu kullanılmıştır.

$$f_{maliyet} = w_{EE}(1 - T_{EE}) + w_{EM}(1 - T_{EM}). \quad (5.3)$$

Burada T ile bir dalga kılavuzundaki ilerlemesi istenilen polarizasyona ait iletim değeri temsil edilmektedir. Maliyet fonksiyonunun dengeli olması adına iki farklı hedef için ayrı ayrı ağırlıklandırma faktörleri (w) belirlenmiştir. Bu sayede, algoritmanın üç hedefi beraber gerçekleştirmesi sağlanmıştır.

Bu cihazın içerisinde ilerleyen iki farklı polarizasyonu incelemek için manyetik alan şiddeti ( $|H_z|^2$ ) ve elektrik alan şiddeti ( $|E_z|^2$ ) dağılımları hesaplanmıştır. Şekil 5.9(a)'da 1550 nm dalga boyunda EE polarizasyona sahip dalganın manyetik alan

şiddeti dağılımı verilmiştir. Benzer şekilde TM polarizasyona sahip 1550 nm dalga boyundaki ışığın cihaz içerisinde ilerleyişini görebilmek için hesaplanan elektrik alan şiddeti dağılımı Şekil 5.9(b)'de verilmiştir.



Şekil 5.9 : (a) EE ve (b) EM polarizasyonlara sahip 1550 nm dalga boyundaki ışık şiddetinin cihaz içerisindeki dağılımları.

#### 5.4 Dalga Kılavuzu Geçiş Aracı, Optik Güç Zayıflatıcı ve Yansıtıcı Entegre Fotonik Cihaz Tasarımları

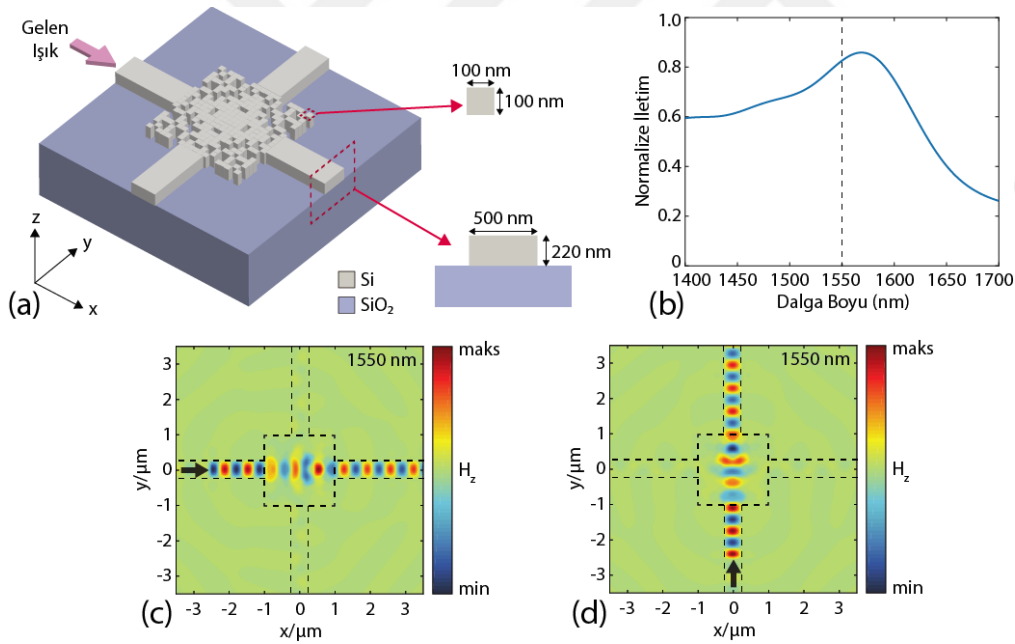
Bu tez kapsamında yapılan çalışmalarda GA tabanlı küçük boyutlu ve yüksek verimli dalga kılavuzu geçiş aracı, optik güç zayıflatıcı ve yansıtıcı cihazların tasarımı sunulmaktadır. Burada, belirtilen yapıların tasarımı için 3B SFZB ile GA birleştirilmiştir. Tasarlanan cihazlar, 220 nm katman kalınlığına sahip  $2 \times 2 \mu\text{m}^2$ 'lik küçük ayak izlerine sahip ve bir silikon dioksit ( $\text{SiO}_2$ ) alt tabakası üzerinde  $100 \times 100 \text{ nm}^2$  silikon (Si) veya hava hücrelerinden oluşturulmuştur. Si ve  $\text{SiO}_2$  malzemelerinin kırılma indisleri, 1550 nm dalga boyunda  $n_{\text{Si}}=3.46$  ve  $n_{\text{SiO}_2}=1.45$  olarak ele alınmıştır. Tasarlanan cihazların tümü, 500 nm genişliğinde bir silikon dalga kılavuzunda yönlendirilen EE polarizasyonda temel mod tarafından uyarılmaktadır. Eniyileme ile cihazların tasarımı sırasında cihaz fabrikasyon kısıtlamaları göz önünde bulundurulmuştur. Öncelikle, GA eniyileme yöntemi gelen ışığı karşıt dalga kılavuzuna aktaran bir dalga kılavuzu geçiş aracı tasarımı için uygulanmıştır.

\*Bu bölümün esas alındığı çalışma: Sahin, U., Bor, E., Kurt, H., Turduev, M., (2019). Genetically optimized design of ultra-compact and highly efficient waveguide crossing, optical attenuator and reflector, Proceedings of the 21th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), July 9-13, Angers, France.

Tasarlanan alan, Şekil 5.10(a)'da görülebileceği gibi dört özdeş dalga kılavuzu gerektiren dört yön boyunca iletimi sağlamak için dört katlı simetriye sahiptir. Şekil 5.10(b)'de, iletim verimliliği tasarlanan dalga kılavuzu geçişi aracı cihazı için verilmiştir. Bu yapının tasarlanması için aşağıdaki maliyet fonksiyonu kullanılmıştır:

$$f_{\text{maliyet}} = w(1 - T). \quad (5.4)$$

Bu fonksiyon ile normalize iletim seviyesinin olabildiğince yüksek olması hedeflenmiştir. T, tasarım dalga boyundaki iletim seviyesini gösterirken w ise ağırlıklandırma fonksiyonudur. Burada iletim değeri, giriş dalga kılavuzunun karışışındaki çıkış dalga kılavuzundan ölçülmüştür. Karşıdaki çıkış dalga kılavuzunda olan iletimin artırılması şeklinde belirlenen tasarım hedefi doğal olarak yanlardaki iki dalga kılavuzuna yönelen ışığı yani kayıpları azaltmaktadır. Bu nedenle maliyet fonksiyonuna diğer iki dalga kılavuzundaki kayıpları azaltmak için birer terim eklemek gerekmemektedir.



Şekil 5.10 : (a) Tasarlanan dalga kılavuzu geçişi alanının yapısal özelliklerinin de belirtilerek verilen şematiği. (b) Tasarlanan yapının iletim verimliliği grafiği. 1550 nm dalga boyunda (c) x-yönünde ve (d) y-yönünde dalga kılavuzunda ilerleyen elektrik-alanının dağılımları gösterilmiştir.

Ayrıca, bu tez kapsamında GA ile  $2 \times 2 \mu\text{m}^2$  boyutunda olan küçük boyutlu ve yüksek verimli optik güç zayıflatıcı cihazı tasarlanmıştır. Tasarlanan entegre fotonik cihazın perspektif görünüşü Şekil 5.11(a)'da verilmiştir. Optik güç zayıflatıcı bölgesi giriş ve çıkış dalga kılavuzlarının arasında yer almaktadır. Gelen ışığın yönü ve yapısal

parametreler de Şekil 5.11(a)'da gösterilmiştir. Çıkış dalga kılavuzuna aktarılan optik güç için iletim verimliliği hesaplanmıştır ve Şekil 5.11(b)'de gösterilmiştir. Bu şekilden görüldüğü üzere 1550 nm dalga boyunda iletim değeri yaklaşık %50'ye eşittir. Sunulan cihazın kararlı durum manyetik alan ( $H_z$ ) dağılımı, Şekil 5.11(c)'de verilmektedir. Şekil 5.11(c)'den görülebileceği üzere gelen ışığın bir kısmı giriş dalga kılavuzuna yansıtılır ve zayıflatıcı bölgedeki ışığın bir kısmı da serbest uzaya yayılmaktadır. Sonuç olarak, optik gücün sadece %50'si çıkış dalga kılavuzuna iletilmektedir. İlgili cihaz tek modda optik haberleşme spektrumunda çalışmaktadır ve giriş sinyali gücü için 3 dB zayıflama gerçekleştirmektedir. Bu yapının tasarlanması için aşağıdaki maliyet fonksiyonu kullanılmıştır:

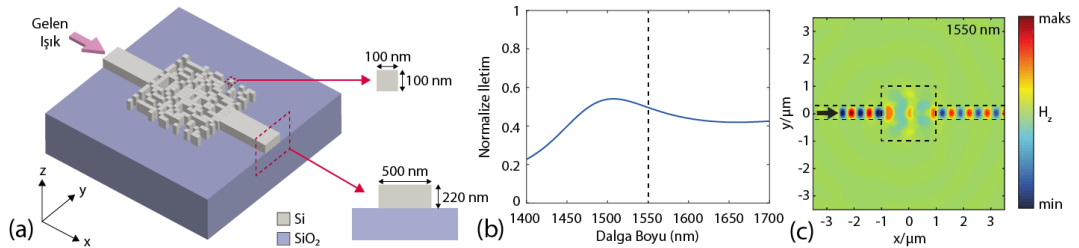
$$f_{maliyet} = w|0.5 - T| \quad (5.5)$$

Bu fonksiyon ile iletim seviyesinin 0.5'e yakın olması istenmiştir. T, tasarım dalga boyundaki iletim seviyesini gösterirken w ise ağırlıklandırma katsayısıdır.

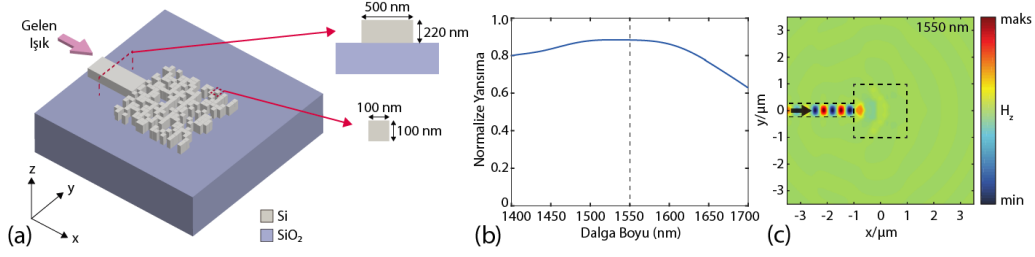
Son olarak, dalga kılavuzundan uyarılan dalgayı geri döndüren bir yansıtıcı entegre fotonik cihaz tasarlanmıştır. Yansıtıcılar, entegre fotonik devrelerinde önemli bir bileşendirler. Yansıtıcı tasarımın şematığının perspektif gösterimi Şekil 5.12(a)'da verilmiştir. Hesaplanan yansıma verimliliği Şekil 5.12(b)'de gösterilmiştir ve 1550 nm dalga boyunda %88,4'e eşittir. Şekil 5.12(c)'de kararlı durum manyetik alan ( $H_z$ ) dağılımı gösterilmektedir. Bu yapının tasarlanması için aşağıdaki maliyet fonksiyonu kullanılmıştır:

$$f_{maliyet} = w(1 - R) \quad (5.6)$$

Bu fonksiyon ile yansıma miktarının maksimum olması istenmiştir. R tasarım dalga boyundaki yansıma seviyesini gösterirken w ise ağırlıklandırma katsayısıdır.



Şekil 5.11 : (a) Tasarlanan optik güç zayıflatıcının 3B perspektif gösterimi ve yapısal parametrelerinin şematığı. (b) Tasarlanan cihazın iletim verimliliği grafiği. (c) 1550 nm dalga boyunda çalışan optik güç zayıflatıcı içerisindeki elektrik alan dağılımı.



Şekil 5.12 : Tasarlanan yansıtıcı ve yapısal parametrelerinin şematik gösterimi. (b) Cihazın iletim verimliliği grafiği. (c) 1550 nm dalga boyunda cihaz içerisindeki elektrik alan dağılımı.

Bu çalışmada sunulan dalga kılavuzu geçişi aracı cihazının, nano-opto-elektromekanik anahtarlar gibi cihazların tasarımında birbirlerine bağlı fotonik araçların bağlanmasında kullanılabileceği, tasarlanan optiksel zayıflatıcının, mikro-elektromekanik sistemlerde kullanılan diğer zayıflatıcıların yerine kullanılabileceği ve son olarak da sunulan yansıtıcı cihazın ise çip-üstü Fabry-Perot girişim ölçerlerinde ya da Michelson çukurlarında uygulanabileceği düşünülmektedir.

## 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tezde nanofotonik cihazların tasarımı için hesaplama tabanlı yöntemlerin uygulanmasına yönelik çalışmalar yapılmıştır. Bu bağlamda, eniyileme algoritmaları veya makine öğrenmesi algoritmaları ile SFZB yöntemi birleştirilerek nümerik olarak fotonik cihazlar tasarlanmıştır. Bu şekilde yapılan tasarım yöntemleri son yıllarda gittikçe artan bir şekilde ilgi görmekle beraber önümüzdeki yıllarda da bu alanda yapılacak çalışmalar artmaya devam edecektir.

Bu tezin birinci bölümünde eniyileme algoritmaları kullanılarak gerçekleştirilen hesaplama tabanlı fotonik cihaz tasarımlarının geçmişten günümüze kadar olan gelişmesi özetlenmiştir.

İkinci bölümde ise tez kapsamında kullanılan eniyileme algoritmaları ve makine öğrenmesi algoritmaları detaylı bir şekilde anlatılmıştır. Burada DE ve GA evrimsel algoritmaları ile TPÖA ve ÇS pekiştirmeli öğrenme algoritmaları detaylıca açıklanmıştır. Ayrıca, SFZB yöntemi ve algoritmalar ile bu yöntemin birleştirilmesi hakkında bilgi verilmiştir.

Tezin üçüncü bölümünde sunulan çalışmalardaki tasarlanan yapılar hüزمة şekillendirici fotonik cihazlar başlığı altında toplanabilir. Bu cihazlar gelen ışık dalgasının genliğini, şiddetini veya fazını, kısacası dalga hüzymesinin şeklini, manipüle ederek istenilen şekilde ışık hüzymeleri elde etmemizi sağlamaktadırlar. Bu bölümde tasarlanan yapılar arasında optik gizleyici, lensler, optik bağlayıcılar ve mod mertebe çevirici yer almaktadır. Bu bölümdeki bazı cihazların mikrodalga frekanslarında deneyleri yapılmıştır. Deneyi yapılan yapıların üretimi için alumina dielektrik çubukların yanı sıra PLA malzemesi ile 3B baskı tekniği de kullanılmıştır.

Dördüncü bölüm ise yasaklı bant tabanlı fotonik cihazlara ayrılmıştır. Bu cihazlar FK'lerin sahip olduğu özelliklerden faydalanılarak tasarlanmıştır. Bu bölümde tasarlanan cihazlar mod mertebe çevirici FK dalga kılavuzu ve EMSY birim hücreli AII FK yapısıdır. Bu bölümdeki cihazlar alumina dielektrik çubuklar kullanılarak üretilmiştir ve bu cihazların mikrodalga frekanslarında deneyleri yapılmıştır.

Beşinci bölümde optik nitelik ayırıcı entegre fotonik cihazlar tasarlanmıştır. Aİİ sağlayan entegre fotonik cihaz, dalga boyu ayırıcı, polarizasyon ayırıcı, dalga kılavuzu geçişi aracı, optik güç zayıflatıcı ve yantısıcı cihaz bu bölümde sunulan entegre fotonik cihazlardır. Bu cihazların tasarımında YÜS malzemeler kullanılarak tasarlanan entegre fotonik cihazların fabrikasyonlarının TMOY teknolojisi ile uyumlu olmaları sağlanmıştır.

Sonuç olarak, fotonik alanındaki tersine tasarım yöntemleri ile gerçekleştirilen çalışmaların sayısı her geçen gün artmaktadır. Bu alanda yeni algoritmaların sunulması, daha önceden tasarlanamamış yeni cihazların fotonik tasarım kütüphanesine kazandırılması ve bilinen cihazların boyutlarının küçültülürken performanslarının artırılması üzerine çalışmalar devam etmektedir. Tüm bu hesaplama tabanlı yaklaşımlar her geçen gün gelişmektedir ve fotonik alanı ile sınırlı kalmayarak fiziğin bir çok alanında kullanılmaya başlanmıştır.



## KAYNAKLAR

- [1] **Koenderink, A. F., Alù, A., Polman, A.,** (2015). Nanophotonics: shrinking light-based technology, *Science*, 348(6234):516–521.
- [2] **Baba, T.,** (2008). Slow light in photonic crystals, *Nat. Photon.*, 2(8):465–473.
- [3] **Caldwell, J. D., Kretinin, A. V., Chen, Y., Giannini, V., Fogler, M. M., Francescato, Y., Ellis, C. T., Tischler, J. G., Woods, C. R., Giles, A. J., Hong, M., Watanabe, K., Taniguchi, T., Maier, S. A., Novoselov, K. S.,** (2014). Sub-diffractive volume-confined polaritons in the natural hyperbolic material hexagonal boron nitride, *Nat. Commun.*, 5(1):5221.
- [4] **Hashemi, H., Rodriguez, A. W., Joannopoulos, J., Soljačić, M., Johnson, S. G.,** (2009). Nonlinear harmonic generation and devices in doubly resonant Kerr cavities, *Phys. Rev. A*, 79:013812.
- [5] **Yu, Z.,** (2010). Fundamental limit of nanophotonic light trapping in solar cells, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 107(41):17491–17496.
- [6] **Miller, O. D., Johnson, S. G., Rodriguez, A. W.,** (2015). Shape-independent limits to near-field radiative heat transfer, *Phys. Rev. Lett.*, 115:204302.
- [7] **Arabi, A., Faraon, A.,** (2017). Fundamental limits of ultrathin metasurfaces, *Sci. Rep.*, 7:43722.
- [8] **Bendsøe, M. P., Sigmund, O.,** *Topology optimization: theory, methods and applications*, Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 2nd edition 2003.
- [9] **Spühler, M. M., Offrein, B. J., Bona, G.-L., Germann, R., Massarek, I., Erni, D.,** (1998). A very short planar silica spot-size converter using a nonperiodic segmented waveguide, *J. Light. Technol.*, 16(9):1680–1685.
- [10] **Dobson, D. C., Cox, S. J.,** (1999). Maximizing band gaps in two-dimensional photonic crystals, *SIAM J. Appl. Math.*, 59(6):2108–2120.
- [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] **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.
- [13] **Boyd, S., Vandenberghe, L.,** *Convex Optimization*, Cambridge Univ. Press, Cambridge, 1st edition, 2004.

- [14] **Baumert, T., Brixner, T., Seyfried, V., Strehle, M., Gerber, G.,** (1997). Femtosecond pulse shaping by an evolutionary algorithm with feedback, *Appl. Phys. B*, 65(6):779–782.
- [15] **Doosje, M., Hoenders, B. J., Knoester, J.,** (2000). Photonic bandgap optimization in inverted fcc photonic crystals, *J. Opt. Soc. Am. B*, 17(4):600–606.
- [16] **Cox, S. J., Dobson, D. C.,** (2000). Band structure optimization of two-dimensional photonic crystals in H-polarization, *J. Comput. Phys.*, 158(2):214–224.
- [17] **Felici, T., Engl, H. W.,** (2001). On shape optimization of optical waveguides using inverse problem techniques, *Inverse Probl.*, 17(4):1141–1162.
- [18] **Geremia, J., Williams, J., Mabuchi, H.,** (2002). Inverse-problem approach to designing photonic crystals for cavity QED experiments, *Phys. Rev. E*, 66:066606.
- [19] **Jiang, J., Cai, J., Nordin, G. P., Li, L.,** (2003). Parallel microgenetic algorithm design for photonic crystal and waveguide structures, *Opt. Lett.*, 28(23):2381–2383 (2003).
- [20] **Kızıldağ, G., Psychoudakis, D., Volakis, J. L., Kikuchi, N.** (2003). Topology design optimization of dielectric substrates for bandwidth improvement of a patch antenna, *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 51(10):2732–2743.
- [21] **Erni, D., Wiesmann, D., Spühler, M., Hunziker, S., Moreno, E., Oswald, B., Fröhlich, J., Hafner, C.,** (2000). Application of evolutionary optimization algorithms in computational optics, *ACES*, 15(2):43–60.
- [22] **Veronis, G., Dutton, R. W., Fan, S.,** (2004). Method for sensitivity analysis of photonic crystal devices, *Opt. Lett.*, 29(19):2288–2290.
- [23] **Jiao, Y., Fan, S., Miller, D. A. B.,** (2006). Systematic photonic crystal device design: global and local optimization and sensitivity analysis, *IEEE J. Quantum Electron.*, 42(3):266–279.
- [24] **Molesky, S., Lin, Z., Piggott, A. Y., Jin, W., Vucković, J., Rodriguez, A. W.,** (2018). Inverse design in nanophotonics, *Nat. Photon.*, 12(11):659–70.
- [25] **Taflove, A., Hagness, S. C.,** *Computational electrodynamics: the finite-difference time-domain method*, Artech House, Massachusetts, USA, 3rd edition, 2005.
- [26] **Jin, J.-M.,** *The finite element method in electromagnetics*, Wiley-IEEE Press, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, USA, 3rd edition, 2014.
- [27] **Borel, P. I., Harpøth, A., Frandsen, L. H., Kristensen, M., Shi, P., Jensen, J. S., Sigmund, O.,** (2004). Topology optimization and fabrication of photonic crystal structures, *Opt. Express*, 12(9):1996–2001.

- [28] **Jensen, J. S., Sigmund, O.**, (2004). Systematic design of photonic crystal structures using topology optimization: low-loss waveguide bends, *Appl. Phys. Lett.*, 84(12):2022–2024.
- [29] **Jensen, J. S., Sigmund, O.**, (2005). Topology optimization of photonic crystal structures: a high-bandwidth low-loss T-junction waveguide, *J. Opt. Soc. Am. B*, 22(6):1191–1198.
- [30] **Kao, C.-Y., Osher, S., Yablonovitch, E.**, (2005). Maximizing band gaps in two-dimensional photonic crystals by using level set methods, *Appl. Phys. B*, 81(2-3):235–244.
- [31] **Burger, M.**, (2003). A framework for the construction of level set methods for shape optimization and reconstruction, *Interfaces Free Bound.*, 5(3):301–329.
- [32] **Burger, M., Osher, S. J., Yablonovitch, E.**, (2004). Inverse problem techniques for the design of photonic crystals, *IEICE Trans. Electron.*, 87:258–265.
- [33] **Gerken, M., Miller, D. A. B.**, (2003). Multilayer thin-film structures with high spatial dispersion, *Appl. Opt.*, 42(7):1330–1345.
- [34] **Håkansson, A., Sánchez-Dehesa, J.**, (2005). Inverse designed photonic crystal de-multiplex waveguide coupler, *Opt. Express*, 13(14):5440–5449.
- [35] **Sanchis, L., Håkansson, A., López-Zanón, D., Bravo-Abad, J., Sánchez-Dehesa, J.**, (2004). Integrated optical devices design by genetic algorithm, *Appl. Phys. Lett.*, 84(22):4460–4462.
- [36] **Preble, S., Lipson, M., Lipson, H.**, (2005). Two-dimensional photonic crystals designed by evolutionary algorithms, *Appl. Phys. Lett.*, 86(6):061111.
- [37] **Burger, M., Osher, S. J.**, (2005). A survey on level set methods for inverse problems and optimal design, *Eur. J. Appl. Math.*, 16(2):263–301.
- [38] **Alaeian, H., Atre, A. C., Dionne, J. A.**, (2012). Optimized light absorption in Si wire array solar cells, *J. Opt.*, 14(2):024006.
- [39] **Ganapati, V., Miller, O. D., Yablonovitch, E.**, (2014). Light trapping textures designed by electromagnetic optimization for subwavelength thick solar cells, *IEEE J. Photovolt.*, 4(1):175–182.
- [40] **Wang, P., Menon, R.**, (2013). Optimization of periodic nanostructures for enhanced light-trapping in ultra-thin photovoltaics, *Opt. Express*, 21(5):6274–6285.
- [41] **Riishede, J., Sigmund, O.**, (2008). Inverse design of dispersion compensating optical fiber using topology optimization, *J. Opt. Soc. Am. B*, 25(1):88–97.
- [42] **Dobson, D. C., Simeonova, L. B.**, (2009). Optimization of periodic composite structures for sub-wavelength focusing, *Appl. Math. Optim.*, 60(1):133–150.
- [43] **Borel, P. I., Bilenberg, B., Frandsen, L. H., Nielsen, T. Fage-Pedersen, J., Lavrinenko, A. V., Jensen, J. S., Sigmund, O., Kristensen, A.**, (2007). Imprinted silicon-based nanophotonics, *Opt. Express*, 15(3):1261–1266.

- [44] **Elesin, Y., Lazarov, B. S., Jensen, J. S., Sigmund, O.,** (2012). Design of robust and efficient photonic switches using topology optimization, *Photon. Nanostruct.*, 10(1):153–165.
- [45] **Jensen, J. S., Sigmund, O.,** (2011), Topology optimization for nano-photonics, *Laser Photon. Rev.*, 5(2):308–321.
- [46] **Frellsen, L. F., Ding, Y., Sigmund, O., Frandsen, L. H.,** (2016). Topology optimized mode multiplexing in silicon-on-insulator photonic wire waveguides, *Opt. Express*, 24(15):16866–16873.
- [47] **Su, L., Piggott, A. Y., Sapra, N. V., Petykiewicz, J., Vuckovic, J.,** (2017). Inverse design and demonstration of a compact on-chip narrowband three-channel wavelength demultiplexer, *ACS Photon*, 5(2):301–305.
- [48] **Piggott, A. Y., Lu, J., Lagoudakis, K. G., Petykiewicz, J., Babinec, T. M., Vuckovic, J.,** (2015). Inverse design and demonstration of a compact and broadband on-chip wavelength demultiplexer, *Nat. Photon.*, 9(6):374–377.
- [49] **Piggott, A. Y., Petykiewicz, J., Su, L., Vučković, J.,** (2017). Fabrication-constrained nanophotonic inverse design, *Sci. Rep.*, 7:1786.
- [50] **Frandsen, L. H., Sigmund, O.,** (2016). Inverse design engineering of all-silicon polarization beam splitters, Proceedings of the SPIE 9756, Photonic and Phononic Properties of Engineered Nanostructures VI, 97560Y, February 13-18, San Francisco, CA, USA.
- [51] **Sell, D., Yang, J., Doshay, S., Yang, R., Fan, J. A.,** (2017). Large-angle, multifunctional metagratings based on freeform multimode geometries, *Nano Lett.*, 17(6):3752–3757.
- [52] **Okoro, C., Kondakci, H. E., Abouraddy, A. F., Toussaint, K. C.,** (2017). Demonstration of an optical-coherence converter, *Optica*, 4(9):1052–1058.
- [53] **Michaels, A., Yablonovitch, E.,** (2018). Inverse design of near unity efficiency perfectly vertical grating couplers, *Opt. Express*, 26(4):4766–4779.
- [54] **Mitchell, M.,** *An introduction to genetic algorithms*, MIT Press, Cambridge, MA, 1996.
- [55] **Price, K.V., Storn, R.M., Lampinen, J.A.,** *Differential evolution: a practical approach to global optimization*, Springer, Berlin, 1st edition, 2005.
- [56] **Shen, B., Wang, P., Polson, R., Menon, R.,** (2015). An integrated-nanophotonics polarization beamsplitter with  $2.4 \times 2.4 \mu\text{m}^2$  footprint, *Nat. Photon*, 9(6):378–382.
- [57] **Lu, J., Vučković, J.,** (2013). Nanophotonic computational design, *Opt. Express*, 21(11):13351–13367.
- [58] **Piggott, A. Y., Petykiewicz, J., Su, L., Vučković, J.,** (2017). Fabrication-constrained nanophotonic inverse design, *Sci. Rep.*, 7:1786
- [59] **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, *Sci. Rep.*, 4:7210.

- [60] **Su, L., Trivedi, R., Sapra, N. V., Piggott, A. Y., Vercruyse, D., Vučković, J.,** (2018). Fully-automated optimization of grating couplers, *Opt. Express*, 26(4):4023–4034.
- [61] **Su, L., Piggott, A. Y., Sapra, N. V., Petykiewicz, J., Vučković, J.,** (2018). Inverse design and demonstration of a compact on-chip narrowband three-channel wavelength demultiplexer, *ACS Photon*, 5(2):301–305.
- [62] **Kim, G., Dominguez-Caballero, J. A., Menon, R.,** (2012). Design and analysis of multi-wavelength diffractive optics, *Opt. Express*, 20(3):2814–2823.
- [63] **Shen, B., Wang, P., Polson, R., Menon, R.,** (2014). Ultra-high-efficiency metamaterial polarizer, *Optica*, 1(5):356–360.
- [64] **Mohammad, N., Meem, M., Shen, B., Wang, P., Menon, R.,** (2018). Broadband imaging with one planar diffractive lens, *Sci. Rep.*, 8:2799.
- [65] **Shen, B., Polson, R., Menon, R.,** (2015). Broadband asymmetric light transmission via all-dielectric digital metasurfaces, *Opt. Express*, 23(16):20961–20970.
- [66] **Majumder, A., Shen, B., Polson, R., Menon, R.,** (2017). Ultra-compact polarization rotation in integrated silicon photonics using metamaterials, *Opt. Express*, 25(17):19721–19731.
- [67] **Shen, B., Wang, P., Polson, R., Menon, R.,** (2014). Integrated metamaterials for efficient and compact free-space-to-waveguide coupling, *Opt. Express*, 22(22):27175–27182.
- [68] **Shen, B., Polson, R., Menon, R.,** (2014). Increasing the density of passive photonic-integrated circuits via nanophotonics cloaking, *Nat. Commun.*, 7:13126.
- [69] **Andkjær, J., Sigmund, O.,** (2011). Topology optimized low-contrast all-dielectric optical cloak, *Appl. Phys. Lett.*, 98:021112.
- [70] **Andkjær, J., Mortensen, N. A., Sigmund, O.,** (2012). Towards all-dielectric, polarization-independent optical cloaks, *Appl. Phys. Lett.*, 100:101106.
- [71] **Frandsen, L. H., Elesin, Y., Frelsen, L. F., Mitrovic, M., Ding, Y., Sigmund, O., Yvind, K.,** (2014). Topology optimized mode conversion in a photonic waveguide fabricated in silicon-on-insulator material, *Opt. Express*, 22(7):8525–8532.
- [72] **Bor, E., Turduev, M., Kurt, H.,** (2016). Differential evolution algorithm based photonic structure design: numerical and experimental verification of subwavelength  $\lambda/5$  focusing of light, *Sci. Rep.*, 6:30871.
- [73] **Turduev, M., Bor, E., Kurt, H.,** (2017). Design and analysis of all-dielectric subwavelength focusing flat lens, *J. Phys. D Appl. Phys.*, 50(38):38LT02.
- [74] **Bor, E., Babayigit, C., Kurt, H., Staliunas, K., Turduev, M.,** (2018). Directional invisibility by genetic optimization, *Opt. Lett.*, 43(23):5781–5784.
- [75] **Bor, E., Kurt, H., Turduev, M.,** (2019). Metaheuristic approach enabled mode order conversion in photonic crystals: numerical design and experimental verification, *J. Opt.*, 21(8):085801.

- [76] **Neseli, B., Bor, E., Kurt, H., Turduev, M.,** (2020). Rainbow trapping in a tapered photonic crystal waveguide and its application in wavelength demultiplexing effect, *J. Opt. Soc. Am. B*, 37(5):1249–1256.
- [77] **Yildirim, B. K., Bor, E., Kurt, H., Turduev, M.,** (2020). Zones optimized multilevel diffractive lens for polarization-insensitive light focusing, *J. Phys. D: Appl. Phys*, 53(49):495109.
- [78] **Sahin, U., Bor, E., Kurt, H., Turduev, M.,** (2019). Genetically optimized design of ultra-compact and highly efficient waveguide crossing, optical attenuator and reflector, Proceedings of the 21th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), July 9-13, Angers, France.
- [79] **Turduev, M., Bor, E., Latifoglu, C., Giden, I. H., Hanay, Y. S., Kurt, H.,** (2018). Ultracompact photonic structure design for strong light confinement and coupling into nanowaveguide, *J. Lightwave Technol*, 36(14):2812–2819.
- [80] **Bor, E., Alparslan, O., Turduev, M., Hanay, Y. S., Kurt, H., Arakawa, S., Murata, M.,** (2018). Integrated silicon photonic device design by attractor selectin mechanism based on artificial neural networks: optical coupler and asymmetric light transmitter, *Opt. Express*, 26(22):29032–29044.
- [81] **Liu, D., Tan, Y., Khoram, E., Yu, Z.,** (2018). Training deep neural networks for the inverse design of nanophotonics structures, *ACS Photon*, 5(4):1365–1369.
- [82] **Yao, K., Unni, R., Zheng, Y.,** (2019). Intelligent nanophotonics: merging photonics and artificial intelligence at the nanoscale, *Nanophotonics*, 8(3):339–366.
- [83] Lumerical Inc. <https://www.lumerical.com/products/>
- [84] **Oskooi, A. F., Roundy, D., Ibanescu, M., Bermel, P., Joannopoulos, J. D., Johnson, S. G.,** (2010). MEEP: a flexible free-software package for electromagnetic simulations by the FDTD method, *Comput. Phys. Commun.*, 181:687–702.
- [85] **Mitchell, T. M.,** *Machine learning*, McGraw-Hill, New York, USA, 1st edition, 1997.
- [86] **Kashiwagi, A., Urabe, I., Kaneko, K, Yomo, T.,** (2006). Adaptive response of a gene network to environmental changes by fitness-induced attractor selection, *PLoS One*, 1(1):e49.
- [87] **Koizumi, Y., Miyamura, T., Arakawa, S., Oki, E., Shiomoto, K., Murata, M.,** (2010). Adaptive virtual network topology control based on attractor selection, *J. Lightwave Technol.*, 28(11):1720–1731.
- [88] **Hopfield, J. J.,** (1982). Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 79(8):2554–2558.
- [89] **Baram, Y., Center, A. R.,** (1988). Orthogonal patterns in binary neural networks. Erişim Adresi: <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19880008936.pdf>, alındığı tarih: 06.10.2020.

- [90] **Hanay, Y. S., Koizumi, Y., Arakawa, S., Murata, M.,** (2012). Virtual network topology with Oja and APEX learning, Proceedings of the 24th International Teletraffic Congress, September 4-7, Krakow, Poland.
- [91] **Leonhardt, U.,** (2006). Optical conformal mapping, *Science*, 312(5781):1777–1780.
- [92] **Pendry, J. B., Schuring, D., Smith, D. R.,** (2006). Controlling electromagnetic fields, *Science*, 312(5781):1780–1782.
- [93] **Chen, H., Chan, C. T., Sheng, P.,** (2010). Transformation optics and metamaterials, *Nat. Mater.*, 9(5):387–396.
- [94] **Li, J., Pendry, J. B.,** (2008). Hiding under the carpet: a new strategy for cloaking, *Phys. Rev. Lett.*, 101:203901.
- [95] **Valentine, J., Li, J., Zentgraf, T., Bartal, G., Zhang, X.,** (2009). An optical cloak made of dielectrics, *Nat. Mater.*, 8(7):568–571.
- [96] **Horsley, S. A. R., Artoni, M., La Rocca, G. C.,** (2009). Spatial Kramers-Kronig relations and the reflection of waves, *Nat. Photon.*, 9(7):436–439.
- [97] **Hayran, Z., Herrero, R., Botey, M., Kurt, H., Staliunas, K.,** (2018). Invisibility on demand based on a generalized hilbert transform, *Phys. Rev. A*, 98:013822.
- [98] **Hayran, Z., Herrero, R., Botey, M., Kurt, H., Staliunas, K.,** (2018). Invisibility on demand based on a generalized hilbert transform, *ACS Photon*, 5(5):2068–2073.
- [98] **Cai, W., Chettiar, U. K., Kildishev, A. V., Shalaev, V. M.,** (2007). Optical cloaking with metamaterials, *Nat. Photon.*, 1(4):224–227.
- [98] **Xiao, D., H. T. Johnson, H. T.,** (2008). Approximate optical cloaking in an axisymmetric silicon photonic crystal structure, *Opt. Lett.*, 33(8):860–862.
- [100] **Hodges, R., Dean, C., Durach, M.,** (2017). Optical neutrality: invisibility without cloaking, *Opt. Lett.*, 42(4):691–694.
- [101] **Vial, B., Torrico, M. M., Hao, Y.,** (2017). Optimized microwave illusion device, *Sci. Rep.*, 7:3929.
- [102] **Rosenblatt, F.,** (1958). The perceptron: a probabilistic model for information storage and organization in the brain, *Psychol. Rev.*, 65(6):386–408.
- [103] **Sutton, R. S., Barto, A. G.,** *Introduction to reinforcement learning*, MIT Press, Cambridge, Massachusetts, USA, 1st edition, 1998.
- [104] **Soret, J. L.,** (1875). Concerning diffraction by circular gratings, *Ann. Phys. Chem.*, 156(1875):99–113.
- [105] **Swason, G. J., Veldkamp, W. B.,** (1989). Diffractive optical elements for use in infrared systems, *Opt. Eng.*, 28(6):605–608.
- [106] **Wan, X., Shen, B., Menon, R.,** (2014). Diffractive lens design for optimized focusing, *J. Opt. Soc. Am. A*, 31(12):B27–B33.

- [107] **Khorasaninejad, M., Chen, W. T., Devlin, R. C., Oh, J., Zhu, A. Y., Capasso, F.,** (2016). Metalenses at visible wavelengths: diffraction-limited focusing and subwavelength resolution imaging, *Science*, 352(6290):1190–1194.
- [108] **Yilmaz, N., Ozer, A., Ozdemir, A., Kurt, H.,** (2019). Nanohole-based phase gradient metasurfaces for light manipulation, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 52(20):205102.
- [109] **Arbabi, A., Horie, Y., Ball, A. J., Bagheri, M., Faraon, A.,** (2015). Subwavelength-thick lenses with high numerical apertures and large efficiency based on high-contrast transmitarrays, *Nat. Commun.*, 6:7069.
- [110] **Joannopoulos, J D., Johnson, S. G., Winn, J. N., Meade, R. B.,** *Photonic crystals: molding the flow of light*, Princeton University Press, New Jersey, USA, 2nd edition, 2008.
- [111] **Pirollo, F., Gregorkiewicz, T., Galli, M., Krauss, T. F.,** (2014). Silicon nanostructures for photonics and photovoltaics, *Nat. Nanotechnol.*, 9(1):19–32.
- [112] **Akahan, Y., Asano, T., Song, B., Noda, S.,** (2003). High-Q photonic nanocavity in a two-dimensional photonic crystal, *Nature*, 425(6961):944–947.
- [113] **Notomi, M.,** (2000). Theory of light propagation in strongly modulated photonic crystals: refractionlike behaviour in the vicinity of the photonic band gap, *Phys. Rev. B*, 62:10696.
- [114] **Johnson, S., Joannopoulos, J. D.,** (2001). Block-iterative frequency-domain methods for Maxwell’s equations in a planewave basis, *Opt. Express*, 8(3):173–190.
- [115] **Jalas, D., Petrov, A., Eich, M., Freude, W., Fan, S., Yu, Z., Baets, R., Popovic, M., Melloni, A., Joannopoulos, J. D., Vanwolleghem, M., Doerr, C. R., Renner, H.,** (2013). What is – and what is not – an optical isolator, *Nat. Photon.*, 7(8):579–582.
- [116] **Bor, E., Turduev, M, Yasa, U. G., Kurt, H., Staliunas, K.,** (2018). Asymmetric light transmission effect based on an evolutionary optimized semi-Dirac cone dispersion photonic structure, *Phys. Rev. B*, 98:245112.



## ÖZGEÇMİŞ

**Ad-Soyad** : Emre BOR  
**Uyruğu** : T.C.  
**Doğum Tarihi ve Yeri** : 01.04.1991, Kayseri  
**E-posta** : ebor@etu.edu.tr

### ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2013, Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü
- **Yüksek lisans** : 2016, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği
- **Doktora** : 2020, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği

### MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

Yıl	Yer	Görev
2014-Halen	TED Üniversitesi	Araştırma Görevlisi
2016-2020	TOBB Üniversitesi	Araştırma Burslu Doktora Öğrencisi
2015-2016	TOBB Üniversitesi	Araştırma Burslu Y. Lisans Öğrencisi
2012	Türk Telekom	Stajyer
2011	Türk Telekom	Stajyer

**YABANCI DİL:** İngilizce

### TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- Turduev, M., **Bor, E.**, Latifoglu, C., Giden, I. H., Hanay, Y. S., Kurt, H., 2018. Ultracompact photonic structure design for strong light confinement and coupling into nanowaveguide, *J. Lightwave Technol.*, 36(14):2812-2819.

- **Bor, E.**, Alparslan, O., Turduev, M., Hanay, Y. S., Kurt, H., Arakawa, S., Murata, M., 2018. Integrated silicon photonic device design by attractor selection mechanism based on artificial neural networks: optical coupler and asymmetric light transmitter, *Opt. Express*, 26(22):29032-29044.
- **Bor, E.**, Babayigit, C., Kurt, H., Staliunas, K., Turduev, M., 2018. Directional invisibility by genetic optimization, *Opt. Lett.*, 43(23):5781-5784.
- **Bor, E.**, Turduev, M., Yasa, U. G., Kurt, H., Staliunas, K., 2018. Asymmetric light transmission effect based on an evolutionary optimized semi-Dirac cone dispersion photonic structure, *Phys. Rev. B*, 98(24):245112.
- **Bor, E.**, Kurt, H., Turduev, M., 2019. Metaheuristic approach enabled mode order conversion in photonic crystals: numerical design and experimental realization, *J. Opt.*, 21(8):085801.
- Yildirim, B. K., **Bor, E.**, Kurt, H., Turduev, M., 2020. Zones optimized multilevel diffractive lens for polarization-insensitive light focusing, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 53(49):495109.
- Hanay, Y. S., Alparslan, O., Turduev, M., Giden, I. H., **Bor, E.**, Latifoglu, C., Kurt, H., Arakawa, S., Murata, M., 2017. Compact air-to-waveguide coupler design based on neural networks. *Proceeding of the 24th Congress of the International Commission for Optics (ICO)*, August 21-25, Tokyo, Japan.
- Babayigit, C., **Bor, E.**, Kurt, H., Staliunas, K., Turduev, M., 2018. Directional invisibility of elliptical shaped all dielectric structure induced by evolutionary optimization approach, *Proceeding of the 20th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, July 1-5, Bucharest, Romania.
- Turduev, M., **Bor, E.**, Yasa, U. G., Kurt, H., 2018. Optimization of epsilon-and-mu-near-zero refractive index photonic structure to design unidirectional transmission device, *Proceeding of the 20th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, July 1-5, Bucharest, Romania.
- **Bor, E.**, Babayigit, C., Kurt, H., Turduev, M., 2018. All dielectric mode order transformation photonic structure design by evolutionary optimization approach, *Proceeding of the 20th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, July 1-5, Bucharest, Romania.
- Yildirim, B. K., **Bor, E.**, Kurt, H., Turduev, M., 2019. A broadband polarization-insensitive diffractive lens design for subwavelength focusing of light, *Proceeding of the 21th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, July 9-13, Angers, France.
- Sahin, U., **Bor, E.**, Kurt, H., Turduev, M., 2019. Genetically optimized design of ultra-compact and highly efficient waveguide crossing, optical attenuator and reflector, *Proceeding of the 21th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, July 9-13, Angers, France.

## DİĞER YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Bor, E.**, Turduev, M., Kurt, H., 2016. Differential evolution algorithm based photonic structure design: numerical and experimental verification of subwavelength  $\lambda/5$  focusing of light, *Sci. Rep.*, 6:30871.
- Turduev, M., Giden, I. H., Babayigit, C., Hayran, Z., **Bor, E.**, Boztug, C., Kurt, H., Staliunas, K., 2017. Mid-infrared T-shaped photonic crystal waveguide for optical refractive index sensing, *Sens. Actuators B. Chem.*, 245:765-773
- Turduev, M., **Bor, E.**, Kurt, H., 2017. Photonic crystal based polarization insensitive flat lens, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 50(27):275105.
- Turduev, M., **Bor, E.**, Kurt, H., 2017. Design and analysis of all-dielectric subwavelength focusing flat lens, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 50(38):38LT02.
- Grineviciute, L., Babayigit, C., Gailevicius, D., **Bor, E.**, Turduev, M., Purlys, V., Tolenis, T., Kurt, H., Staliunas, K., 2019. Angular filtering by Bragg photonic microstructures fabricated by physical vapour deposition, *Appl. Surf. Sci.*, 481:353-359.
- Babayigit, C., Evren, A. S., **Bor, E.**, Kurt, H., Turduev, M., 2019. Analytical, numerical, and experimental investigation of a Luneburg lens system for directional cloaking, *Phys. Rev. A*, 99(4):043831.
- Neseli, B., **Bor, E.**, Kurt, H., Turduev, M., 2020. Rainbow trapping in a tapered photonic crystal waveguide and its application for wavelength demultiplexing effect, *J. Opt. Soc. Am. B*, 37(5):1249-1256.
- **Bor, E.**, Yasa, U. G., Kurt, H., Turduev, M., 2020. Demonstration of carpet cloaking by anisotropic zero refractive index medium, *Opt. Lett.*, 45(8):2423-2426.
- Hayran, Z., Turduev, M., Parim, A. B., **Bor, E.**, Kurt, H., 2014. Light focusing by randomly distributed index gradient medium, *Proceeding of the 3rd Advanced Electromagnetics Symposium*, December 7-10, Hangzhou, China.
- Parim, A. B., Turduev, M., Hayran, Z., **Bor, E.**, Kurt, H., 2014. Optical resonators modified by random modulation of refractive index, *Proceeding of the 3rd Advanced Electromagnetics Symposium*, December 7-10, Hangzhou, China.
- Kucukates, B., Turduev, M., **Bor, E.**, Kurt, H., 2016. Photonic crystal sub-wavelength  $\lambda/5$  focusing lens design using optimization method, *Proceeding of the 18th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, July 10-14, Trento, Italy.
- Tellioglu, B., **Bor, E.**, Turduev, M., Kurt, H., 2016. Polarization independent focusing of light by gradually modulated annular photonic structure, *Proceeding of the 18th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, July 10-14, Trento, Italy.
- Babayigit, C., Turduev, M., Giden, I. H., **Bor, E.**, Kurt, H., 2016. T-shape slotted photonic crystal based sensor with high sensitivity, *Proceeding of the 18th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, July 10-14, Trento, Italy.

- Yilmaz, Y. A., Hayran, Z., Yildiz, F., Kilinc, T. O., Karabacak, C., **Bor, E.**, Kurt, H., 2017. Guided-mode resonance based multicolor germanium infrared photodetector, *Proceeding of the 17th International Conference on Numerical Simulation of Optoelectronic Devices (NUSOD)*, July 24-28, Copenhagen, Denmark.
- Turduev, M., **Bor, E.**, Giden, I. H., Kurt, H., 2017. Efficient and compact discrete photonic device design by evolutionary optimization approach, *Proceeding of the 24th Congress of the International Commission for Optics (ICO)*, August 21-25, Tokyo, Japan.
- Evren, A. S., Babayigit, C., **Bor, E.**, Kurt, H., Turduev, M., 2018. Directional cloaking by quadruple Luneburg lens system, *Proceeding of the 20th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, July 1-5, Bucharest, Romania.
- Ozkarali, B., **Bor, E.**, Kurt, H., Turduev, M., 2019. Photonic crystal rectangular hole based nanobeam cavity refractive index sensor, *Proceeding of the 21th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, July 9-13, Angers, France.
- Neseli, B., **Bor, E.**, Kurt, H., Turduev, M., 2019. Transmission enhanced wavelength demultiplexer design based on photonic crystal waveguide with gradually varied width, *Proceeding of the 21th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, July 9-13, Angers, France.
- Evren, A. S., **Bor, E.**, Kurt, H., Turduev, M., 2019. Hyperbolic secant graded index photonic crystal flat lens for subwavelength focusing of light, *Proceeding of the 21th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, July 9-13, Angers, France.
- Gailevicius, D., Grineviciute, L., Babayigit, C., **Bor, E.**, Turduev, M., Purlys, V., Tolenis, T., Kurt, H., Staliunas, K., 2019. Photonic crystal spatial filters fabricated by physical vapour deposition, *Proceeding of Conference on Lasers and Electro-Optics Europe and European Quantum Electronics Conference*, June 23-27, Munich, Germany.