

TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**FOTONİK YAPILARIN HEDEF-İLK ALGORİTMASI İLE TERSİNE
TASARIMI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MEDİHA TUTGUN

Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Hamza KURT

ARALIK 2018

Fen Bilimleri Enstitüsü Onayı

.....
Prof. Dr. Osman EROĞUL
Müdür

Bu tezin Yüksek Lisans/Doktora derecesinin tüm gereksinimlerini sağladığını onaylarım.

.....
Doç. Dr. Tolga GİRİCİ
Anabilim dalı Başkanı

TOBB ETÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 151211052 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Mediha TUTGUN** 'un ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "**FOTONİK YAPILARIN HEDEF-İLK ALGORİTMASI İLE TERSİNE TASARIMI**" başlıklı tezi **10.12.2018** tarihinde aşağıda imzaları olan jüri tarafından kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Hamza Kurt**
TOBB Ekonomik ve Teknoloji Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. Tolga Girici (Başkan)**
TOBB Ekonomik ve Teknoloji Üniversitesi

Prof. Dr. Barış Akaoğlu
Ankara Üniversitesi

TEZ BİLDİRİMİ

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

Mediha TUTGUN

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

FOTONİK YAPILARIN HEDEF-İLK ALGORİTMASI İLE TERSİNE TASARIMI

Mediha TUTGUN

TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Hamza KURT

Tarih: Aralık 2018

Fotonik aygıtlar entegre optik devrelerin tasarımında kullanılan temel elemanlardır. Sezgisel olarak parametre uzayının taranması veya sezgisel olmayan eniyileme algoritmalarının kullanılması fotonik aygıt tasarım yöntemleridir. Sezgisel yöntemlerde fotonik yapının boyut, dielektrik sabiti gibi yapısal parametrelerin deneme-yanılma yöntemi ile incelenmesi ile tasarım gerçekleştirilir. Bu yöntemler iyi bir başlangıç noktasından başlama zorunluluğu ve uzun simülasyon maliyeti gerektirir. Parametre uzayını taramaya yönelik bazı arama algoritmaları da deneyime dayalı yöntemlere alternatif olarak ortaya çıkmıştır. Bu yöntemlerde cihaz performanslarındaki verimlilik ve fonksiyonellik gibi birçok belirleyici değişken göz önünde bulundurulduğunda daha kapsayıcı ve kontrollü bir tasarım yöntemine ihtiyaç duyulmuştur. Bu sebeple, literatürde hedef-ilk metodu olarak da adlandırılan tersine fotonik tasarım yöntemi ortaya çıkmıştır.

Hedef-ilk tersine tasarım algoritması literatürde pek çok lineer fotonik cihaza etkili bir şekilde uygulanmış güncel bir eniyileme yöntemidir. Hedef-ilk algoritması tasarım problemini tersine problem olarak ele alır ve iyi bir noktadan başlama zorunluluğunu

ortadan kaldırır. Hedef-ilk algoritmada sınır değer problemi olarak tanımlanan amaca yönelik fotonik yapı tasarlanır. Hedef-ilk algoritmasının teorik altyapısı zamanda durağan dalga denkleminin ayrı ayrı hem manyetik alan hem yapının dielektrik sabiti değişkenleri ile doğrusal özellik göstermesi sayesinde oluşturulmuştur. İkili doğrusallık özelliği sayesinde tasarım problemi iki alt probleme ayrılır ve alt problemler arasında döngüsel bir şekilde hesaplama yaparak en iyi sonuca ulaşır. Hedef-ilk ilk algoritmasında durağan durum dalga denklemine kesin olarak uyma zorunluluğu ortadan kalkar ve hata parametresi ile mümkün olan tasarıma ne kadar yaklaşıldığı hesaplanır. Doğrusallık özelliğinin doğal bir sonucu olarak çözüm kümesi sürekli bir dağılım gösterir ve ek maliyet hesaplamaları ile üretilebilir yapılara dönüştürülmesi mümkündür.

Bu tez kapsamında hedef-ilk algoritması ile optik kovuk rezonatör ve optik filtre tasarımları yapılmıştır. Optik kovuk rezonatör tasarımında kavite bölgesinin iki uç tarafına eklenen düzlem ayna koşulları ile defalarca yansıyan dalgaların hedeflenen frekansta rezonans oluşturulması sağlanmıştır. Tasarlanan rezonatör yapısında elle ayarlama işlemine gerek kalmadan dielektrik ayna ve kovuk bölümleri elde edilir. Tez kapsamında tasarlanan alçak ve yüksek geçiren filtrelerde algoritma çok amaç ve çok frekans için optimize edilmiştir. Tasarlanan filtre yapılarında izole edilen istenen frekanslar yapının başlangıcından yansıtılmış, diğer frekanslarda en yüksek iletim hedeflenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Nano fotonik, Entegre fotonik yapılar, Sezgisel olmayan tasarım, Kaviteler, Optik filtreler, Fotonik rezonatörler, Optimizasyon, Hesaplamalı fotonik.

ABSTRACT

Master of Science

INVERSE DESIGN OF PHOTONIC STRUCTURES WITH OBJECTIVE-FIRST ALGORITHM

Mediha TUTGUN

TOBB University of Economics and Technology

Institute of Natural and Applied Sciences

Department of Electrical and Electronics Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Hamza KURT

Date: December 2018

Photonic devices are the basic elements used in the design of integrated optical circuits. Intuitive scanning of the parameter space or the use of non-intuitive optimization algorithms are the methods of photonic device design. In intuitive methods, the design is performed by examining the structural parameters such as the size and dielectric constant of the photonic structure by trial and error method. These methods require starting from a good starting point and require much simulation cost. Some search algorithms for scanning the parameter space have emerged as an alternative to the experience-based method. Considering many determinants such as efficiency and functionality in device performances, a more comprehensive and controlled design method was needed. Therefore, the inverse photonical design method, also known as objective-first method, has emerged in the literature.

The objective-first inverse design algorithm is an up-to-date optimization method that has been effectively applied to many linear photonic devices in the literature. The objective-first algorithm approach the design problem as a reverse problem and

eliminates the need to start from a good point. A photonic structure is designed for the purpose defined as boundary value problem in objective-first inverse design algorithm.

The theoretical background of the objective-first algorithm was created by the bi-linearity property of the steady state wave equation both the dielectric constant and the magnetic response of the structure. Due to the bi-linearity feature, the design problem is divided into two sub-problems and it reaches the best result by calculating iteratively between sub problems. The objective-first inverse design algorithm eliminates the need to strictly observe the steady state wave equation, and calculates how close to the possible design with the error parameter. As a natural result of the linearity feature, the solution set shows a continuous distribution and it is possible to convert it into constructable structures with additional binarization cost.

Within the scope of this thesis, parallel plane resonator and optical filter designs have been made with the objective-first algorithm. In the parallel plane resonator design, the plane mirror conditions added to the two end sides of the cavity region and the waves reflected repeatedly to create the resonance at the targeted frequency. In the designed resonator structure dielectric mirror and cavity sections are obtained without manual adjustment. For low and high pass filters, the algorithm is optimized for multi-purpose and multi-frequency. The desired frequencies isolated in the designed filter structures are reflected from the beginning of the structure and the highest transmission is targeted at the other frequencies.

Keywords: nanophotonics, integrated photonic devices, non-intuitive design, cavities, optic filters, photonic resonators, optimization, computational photonics.

TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans tez çalışmalarımnda bana rehberlik eden ve araştırma yapma konusunda beni cesaretlendiren danışmanım Sayın Prof. Dr. Hamza KURT'a, değerli görüş ve önerileri için Sayın Tez Jürisi Üyeleri'ne, NANOFOTONİK ARAŞTIRMA GRUBU'undan beraber çalışma yaptığım arkadaşlarım, Döne Yılmaz, Dr. Neslihan ETİ, Dr. Aydan YELTİK, Yusuf Abdulaziz YILMAZ, Melike GÜMÜŐ ve Ahmet Mesut ALPKILIÇ'a, stresli ve uzun çalışma dönemlerimde her daim yanımda olan değerli arkadaşım Zeynep EVİRGEN AKYÜZ'e, sağladığı burs nedeniyle TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi'ne, 116F200 numaralı "Nano-fotonik Yapıların Sezgisel Olmayan Yöntemlerle Tasarımı" isimli proje kapsamında sağladığı destekten ötürü TÜBİTAK'a, beni bugünlere getiren annem ve babama, ihtiyaç duyduğumda desteklerini esirgemeyen kardeşlerime, her zaman bana destek olan sevgili eşim Raşit'e, tüm dokümanlarımı neşeli resimleriyle süsleyen minik kızım Elif'e teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİL LİSTESİ	x
KISALTMALAR	xi
SEMBOL LİSTESİ	xii
1. GİRİŞ	1
1.1. Sezgisel Yöntemler	2
1.2. Sezgisel Olmayan Yöntemler.....	3
2. HEDEF-İLK TERSİNE ALGORİTMA	5
2.1. Hedef-ilk Tersine Algoritma Teorik Altyapısı.....	5
2.2. Durağan Dalga Denkleminin İkili-doğrusallık Özelliği.....	6
2.3. Hedef-ilk Tersine Algoritmada Alt-Problemler Ve Hedef-Maliyet Fonksiyonları.....	7
2.4. Tersine Algoritma Akış Şeması Ve Farklı Tasarım Amaçları İçin Manipülasyonu	11
2.5. Hedef-ilk Algoritmasında Ayırıklaştırma	13
2.6. Literatürde Hedef-ilk Algoritma	14
3. HEDEF-İLK TERSİNE ALGORİTMA İLE KAVİTE TASARIMI	17
3.1. Dielektrik Dalga Kılavuzunda Rezonans Koşulu Ve Kalite Faktörünün Hesaplanması	18
3.2. Hedef-ilk Algoritması İle Rezonatör Tasarımı.....	19
3.3. Tasarım Sonucunun FDTD Yöntemi İle Analizi	21
3.4. Değerlendirme	24
4. HEDEF-İLK TERSİNE ALGORİTMA İLE FİLTRE TASARIMI	25
4.1. Filtre Tasarımı İçin İletim Ve Yansıtma Koçullarının Gerçekleştirilmesi.....	26
4.2. Yüksek Geçiren Filtre Tasarımı Ve FDTD Analizi	27
4.3. Alçak Geçiren Geçiren Filtre Tasarımı FDTD Analizi.....	29
4.4. Çentik Filtre Tasarımı FDTD Analizi	30
4.5. Değerlendirme	31
5. SONUÇ	33
KAYNAKLAR	35
ÖZGEÇMİŞ	41

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 Direkt tasarımı fotonik cihaz tasarımında parametre havuzunun gösterimi [13,14]	3
Şekil 1.2 Fotonik kristal dalga kılavuzunda temel TE ₀ modun önce TE ₁ moda dönüştürülmesi ve sonra tekrar TE ₁ modun TE ₀ moda çevrilmesi [30]	4
Şekil 2.1 Fotonik yapıların tersine tasarımının gösterimi	5
Şekil 2.2 Dalga denkleminin bi-lineer özelliği	7
Şekil 2.3 Hedef-ilk tersine algoritmada alt problemler	10
Şekil 2.4 Hedef-ilk algoritması ile dalga kuplör tasarımında parametreler [28].....	10
Şekil 2.5 Tasarım alanının hücresel gösterimi	11
Şekil 2.6 Tersine algoritma akış şeması.....	12
Şekil 2.7 Diyot çalışması için (a) fiziksel fazlalık, (b) dijital değer ve (c) iletim verimleri. (d) Tersine tasarım algoritması ile hesaplanan sürekli (sol) ve dijital (sağ) yapıların 1000 iterasyondan sonraki renk haritaları.....	14
Şekil 2.8 Mod dönüştürücü optik kuplör yapısı ve H_z alan sonuçları [28].....	14
Şekil 2.9 Üretim sınırlandırılması ile tasarlanmış 3 kanallı dalga boyu ayırıcı [33] .	15
Şekil 3.1 Hedef-ilk algoritması ile hedeflenen tasarım yapısı	19
Şekil 3.2 (a) Tanımlanan dalga kılavuzu ortamı, (b) sürekli şekilde dağılmış dielektrik ortamda tasarlanan kavite ve (c) hava ve silisyum ortamlarından oluşan ayırık kavite yapısı.....	20
Şekil 3.3 Tasarımın algoritmada tanımlı (a) x ve (b) iterasyon sayısına bağlı kalite faktörü değerleri	21
Şekil 3.4 Tasarlanan kavite yapısının (a) iletim spektrumu ve (b) dielektrik dağılımı ile rezonans dalga boyunda elde edilen H-alan (c) şiddeti, (d) dağılımı ve (e) kesit profili	22
Şekil 3.5 Elde edilen H-alan şiddeti ve Gaussian fit profili.....	23
Şekil 3.6 Ayrıklaştırılmış kavite yapısının (a) dielektrik dağılımı ile rezonans dalga boyunda elde edilen H-alan (b) şiddeti, (c) dağılımı ve (d) kesit profili.....	23
Şekil 4.1 (a) 1000 iterasyon için tüm geçiren filtre yapısının dielektrik dağılımı (b) 1000 ve 1500 iterasyon için iletim tayfları ve 1500 iterasyon için elektrik alan dağılımı	26
Şekil 4.2 (a) Işığı yansıtmak için optimize edilmiş yapının normalize edilmiş iletim verimliliği, (b) Tasarlanan yapının dielektrik dağılımı, (c) FDTD ve (d) FDFD yöntemiyle hesaplanan manyetik alan büyüklüğü	27
Şekil 4.3 Tasarlanan yüksek geçiren ve alçak geçiren filtrenin şematik gösterimi.	28
Şekil 4.4 Yüksek geçiren filtre yapıları,iletim tayfları, off-on state için H-alan şiddetleri (a), (b) 1000 iterasyon ve (c), (d) 3000 iterasyon için.....	29
Şekil 4.5 Alçak geçiren filtre yapıları, iletim tayfları, açık-kapalı durum için H-alan şiddetleri (a), (b) 1000 iterasyon ve (c), (d) 3000 iterasyon için.....	30
Şekil 4.6 Görünür frekans spektrumunda tasarlanmış çentik filtre (a) dielektrik yapısı (b) normalize iletim eğrisi.....	31

KISALTMALAR

RF	: Radyo frekans (Radio frequency)
FDTD	: Zaman- alanında Sonlu-farklar (Finite-difference time-domain)
CVX	: MATLAB Software for Disciplined Convex Programming
FDFD	: Frekans- alanında Sonlu-farklar (Finite-difference frequency-domain)
TE	: Enine Elektrik (Transverse electric)
TIR	: Toplam iç yansıma (Total Internal Reflection)
DBR	: Dağıtılmış Bragg Yansıması (Distributed Bragg Reflection)

SEMBOL LİSTESİ

Bu çalışmada kullanılmış olan simgeler açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
\vec{E}	Elektrik alan
\vec{H}	Manyetik alan
\vec{S}	Poynting vektör
ϵ	Dielektrik dağılım
ω	Açısal frekans
μ_0	Manyetik geçirgenlik
J	Elektrik akısı
\vec{H}_z	Manyetik alanın z yönündeki bileşeni
λ	Dalga boyu

1. GİRİŞ

Fotonik; ışık oluşumunu, işlenmesini algılanmasını bunun yanı sıra iletim, modülasyon ve anahtarlama yoluyla manipülasyonunu inceleyen bir bilim dalıdır. Başka bir ifadeyle elektroniğin elektronlarla yaptığı işlemleri fotonlarla yapar.

Fotonik alanında çalışmalar, lazerlerin keşfinden sonra 1960 yılında başlamıştır [1]. Bilgi iletimi için optik fiberlerin kullanılması ve 1970'lerde lazer diyotunun yanı sıra erbiyum fiber amplifikatörlerinin bulunmasıyla önemli ilerleme elde edilmiştir. Fotonik biliminde bir diğer önemli atılım silikon tabanlı entegre fotonik sistemlerin kullanılmasıyla mümkün olmuştur [2].

Bakır tellerdeki elektronlara göre ışıkta elektromanyetik girişim olmaması 20. Yüzyıl'ın sonlarında telekomünikasyon sektöründe sanayii devrimi için temel oluşturmuştur. Optik aygıtlar şu anda daha yaygın olarak kullanılan elektriksel tabanlı ağların yerini aldığı anda, ışık hızına yakın iletim elde edilebilecektir. Haberleşme sistemleri altyapısında günümüzde kullanılan RF ve mikrodalga sistemleri doğal sınırlarına ulaşmış durumdadır. Veri iletişimde artan hız ve kapasite ihtiyacını karşılamak için yüksek frekanslara sahip elektromanyetik dalga olan ışık kullanmanın çözüm olacaktır. İletişimin ışıkla yapıldığı fiber optik kablolar sayesinde çok önemli hız artışı sağlanmıştır ancak bu konuda asıl sınırlama bilgi depolama ve işleme işlemleri yapan uç cihazlardan kaynaklanmaktadır.

Kimi zaman optoelektronik olarak da isimlendirilen fotonik bilimindeki gelişmeler haberleşme alanında olduğu gibi daha pek çok alanı da etkiler. Geniş bir yelpazede bilimsel ve teknolojik uygulamalara olan fotonik bilim dalı, bugün günlük hayatta vazgeçilmez bir rol almış durumdadır. Medikal cerrahide, görüntüleme teknolojilerinde, lazer baskı ve dijital fotoğrafçılıkta, CD'lerde, etkin bir şekilde kullanılmaktadır. Ek olarak filtreleme, doğrusal olmayan optik, kimyasal/biyolojik al

gülayıcılar, optomekanik, kuantum bilgi işleme gibi alanlarda çok yaygın uygulama alanına sahiptir [3–9].

Eli Yablonovitch'in literatüre kazandırmış olduğu fotonik kristaller çalışmalarından sonra literatürde sıklıkla düzenli yapılar ile fotonik aygıt tasarımı yapılmıştır [10,11]. Son yıllarda sıklıkla çalışılan plazmonik yapılar, meta-malzemeler ve düzensiz yapılarda fotonların sergilediği daha karmaşık madde enerji etkileşimi sayesinde elde edilebilen yeni özellikler üzerinde durulmaktadır.

Bir taraftan boyutları küçülürken, maliyetleri azalan ve fonksiyonları da gün geçtikçe artan cihaz bazlı fotonik cihaz tasarımı ihtiyacı farklı yaklaşımların da ortaya çıkmasını gerektirmiştir. Fotonik cihaz tasarım yöntemini genel olarak sezgisel ve sezgisel olmayan yöntemler olarak ikiye ayırmak mümkündür.

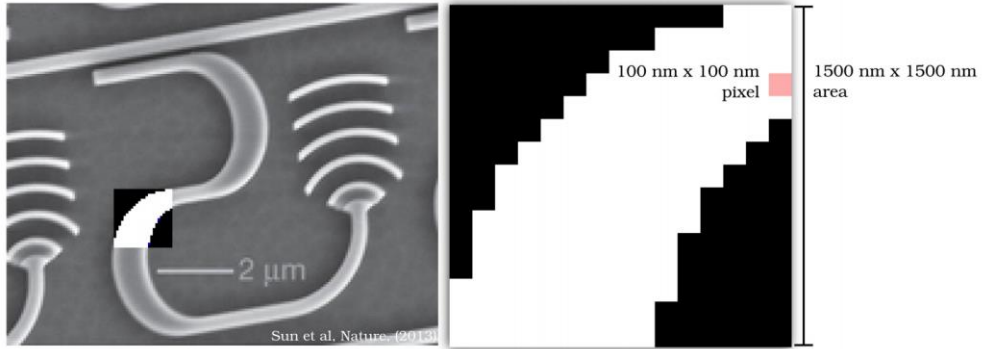
1.1. Sezgisel Yöntemler

Fotonik yapıların tasarlanmasında sezgisel yöntemler deneme-yanılma yöntemine dayanmaktadır. Tasarımı yapan kişinin bilgi ve deneyimine oldukça bağlı olan bu yöntemde, bir başlangıç yapısı seçilerek yapının elektromanyetik cevabı bir elektromanyetik çözümleyici ile hesaplanır, sonrasında istenen amaca ne kadar uzak olduğu bilgisi yeniden süzülerek birbirini tekrar eden denemeler ile tasarım tamamlanır [12,13]. Tüm parametre havuzunun bu şekilde taranmasının imkansız yakın olmasıyla beraber, hesaplama maliyeti ve zaman açısından dezavantajlıdır. Parametre havuzunu daha etkili tarayabilme ihtiyacı ve kısa zamanda, uzman bilgisi ve deneyiminden bağımsız etkili tasarım yapma ihtiyacı algoritma tabanlı tasarım yöntemlerinin ortaya çıkmasına neden olmuştur.

Ayrıca karmaşık malzeme yapısına sahip düzensiz yapıların (metamalzeme) tasarımı sezgisel yöntemlerle tasarımı da sistematik parametre havuzu taranamadığından dolayı oldukça yetersizdir.

Nanofotonik faz dizilerinin çalışıldığı Şekil 1.1'deki çalışma doğrudan tasarım yöntemine örnek olarak gösterilebilir. Bu çalışmada en iyi performansı elde edebilmek için tüm tasarım parametrelerinin elle ayarlanması gerekmiştir. Şekil 1.1'de gösterildiği gibi, bahsi geçen çalışmadaki tasarımın sadece 1500nm x 1500nm

boyutundaki kısmının tasarımını 100nmx100nm boyutundaki hücrelerle tasarladığımız varsayımında bile deneme havuzumuz 2^{225} eleman içerir. Deneme havuzunun bu büyüklüğü karşısında deneme-yanılma yöntemlerinin ne denli yetersiz kaldığı anlaşılmaktadır.



Şekil 1.1 Direkt tasarımı fotonik cihaz tasarımında parametre havuzunun gösterimi [13,14]

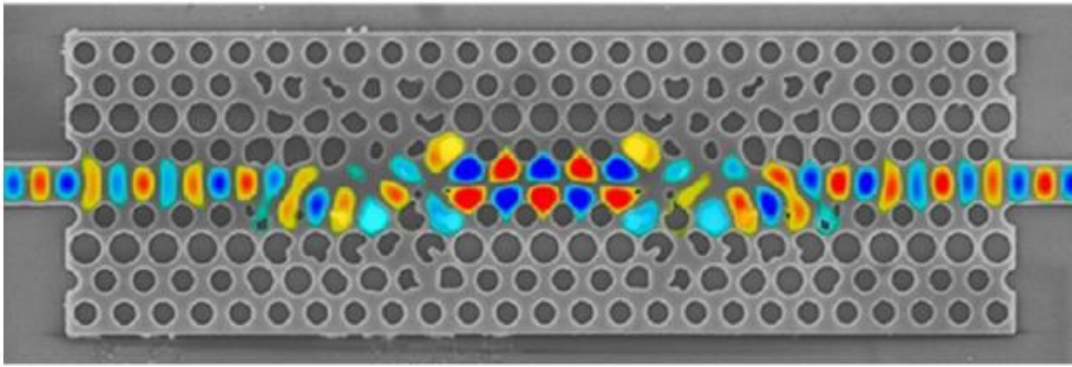
1.2. Sezgisel Olmayan Yöntemler

Parametre havuzunun sistematik olarak taranabildiği optimizasyon yöntemleri son zamanlarda pek çok farklı fotonik aygıt tasarımında sıklıkla kullanılmaktadır. Diğer pek çok alanda olduğu gibi, fotonik aygıt tasarımında da optimizasyon algoritmalarında literetürdeki öncü yaklaşım topolojik tasarım metotları olmuştur [15–17]. Bu çalışmalar fotonik aygıtların yalnızca doğrudan nümerik yöntemler kullanılarak tasarlanamayacağını ve optimizasyon yöntemleriyle klasik yöntemlerle tasarlanması mümkün olmayan yapıların tasarlanmasının mümkün olduğunu kanıtlamıştır. Güncel olarak kullanılan önemli tasarım yöntemleri arasında genetik algoritmalar , aşama-ayarlı metotlar, parçacık-sürü optimizasyonu gibi yöntemler de sayılabilir [18–21].

Şekil 1.2’de topoloji optimizasyon yöntemiyle tasarlanmış bir mod dönüştürücü yapısı gösterilmiştir. Sezgisel yöntemlerle bu tip bir düzensiz yapıyla yüksek performanslı aygıtların üretilmesi imkansıza yakındır.

En yaygın kullanılan optimizasyon yöntemlerinden olan genetik algoritma ikilik sisteme göre çalışmakta ve yapılan tasarım dielektrik malzemenin olması veya olmaması şeklinde olmaktadır.

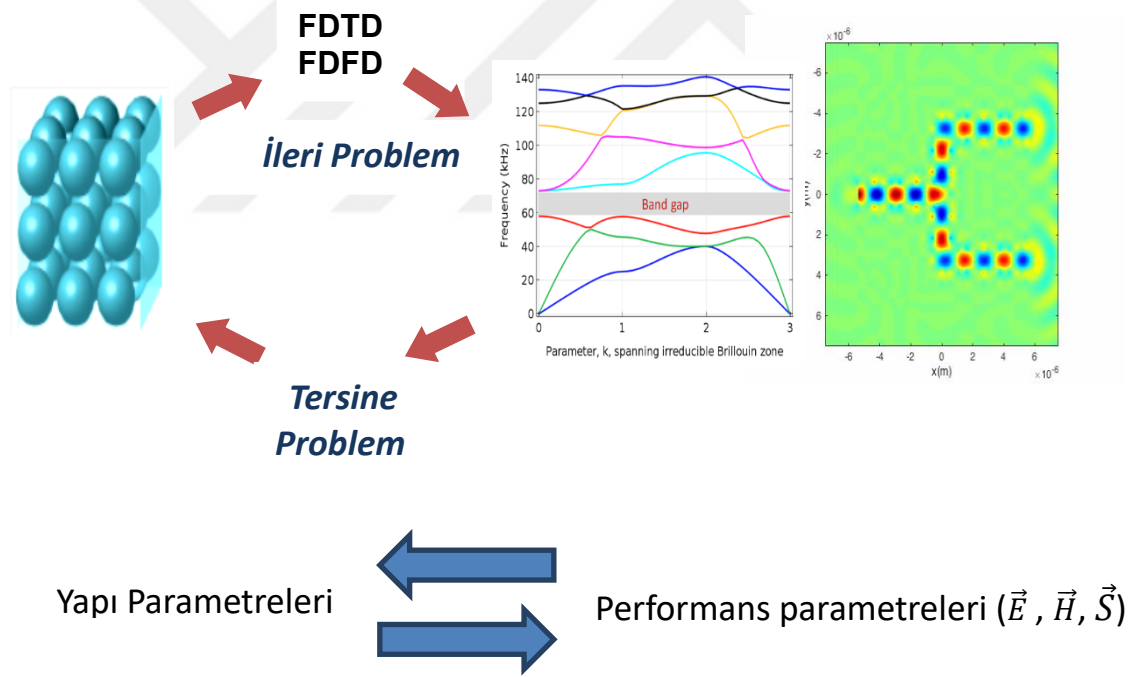
Tasarım özgürlüğünü kısıtlayan bu durum nedeniyle genetik algoritma iki boyutlu problemler ve hesaplama açısından oldukça küçük üç boyutlu problemlerde kullanılmıştır. Binlerce simülasyon yapılması gerekliliğinden dolayı genetik algoritmanın üç boyutlu cihaz tasarımında kullanılması sınırlı kalmıştır. Skolastik (olasılıksal) algoritmaların uygulanmasında temel kısıt simülasyon sayısıdır [22–25]. Kısa sürede, kompakt ve yüksek performanslı cihazlar tasarlamak amacıyla parametre havuzu araştırmasının hedefe yönelik tasarım stratejisiyle birleşmesi ihtiyacı doğmuştur. Son derece ilgi çekici bir tasarım yöntemi olan Hedef-İlk tersine tasarım yöntemi son yıllarda literatürde yerini almayı başarmıştır [26–29].



Şekil 1.2 Fotonik kristal dalga kılavuzunda temel TE₀ modun önce TE₁ moda dönüştürülmesi ve sonra tekrar TE₁ modun TE₀ moda çevrilmesi [30]

2. HEDEF-İLK TERSİNE ALGORİTMA

Hedef-ilk tersine tasarım yöntemi elektrik alan (\vec{E}), manyetik alan (\vec{H}) ve poynting vektör (\vec{S}) gibi hedef performans parametrelerini belirlediğimiz bir fotonik aygıtın dielektrik dağılımı (ϵ)'nın bulunup bulunamayacağı sorusundan yola çıkarak ortaya çıkmıştır. Şekil 2.1'de gösterildiği üzere fotonik cihaz tasarımı ileri problem olarak ele alındığında belirlenen dielektrik yapının elektromanyetik cevabı nümerik yöntemler ve çözümleyiciler yardımıyla hesaplanmaktadır. Hedef-ilk algoritması ise fotonik cihaz tasarımını tersine problem olarak ele almaktadır, böylece başlangıçta belirlenen hedeflere uygun olarak fotonik aygıtın dielektrik dağılımı (ϵ) iteratif olarak bulunur.



Şekil 2.1 Fotonik yapıların tersine tasarımının gösterimi

2.1. Hedef-ilk Tersine Algoritma Teorik Altyapısı

Hedef-ilk tersine algoritma Maxwell denklemlerinin matematiksel ayrıklaştırma yöntemleri kullanılarak yapının dielektrik değerine ve manyetik alana göre ayrı ayrı lineer (bi-linear) olarak yazılabilmesi sayesinde mümkün olmuştur. Matematiksel

ayrıklaştırma işlemleriyle problem \vec{H} ve ε 'a göre bikonveks olarak yazılmış olup güvenilir bir şekilde global optima hesaplanabilmektedir.

2.2. Durağan Dalga Denkleminin İkili-doğrusallık Özelliği

Hedef-ilk tersine algoritma Maxwell denklemlerinin matematiksel ayrıklaştırma yöntemleri kullanılarak yapının dielektrik değerine ve manyetik alana göre ayrı ayrı lineer (bi-lineer) olarak yazılabilmesi sayesinde mümkün olmuştur. Matematiksel ayrıklaştırma işlemleriyle problem \vec{H} ve ε 'a göre bikonveks olarak yazılmış olup güvenilir bir şekilde global optima hesaplanabilmektedir.

Durağan durum Maxwell denkleminin hedef-ilk algoritmasına geçişi adım adım incelenecektir. Öncelikle durağan durum dalda denklemini Eşitlik (2.1)'deki gibi yazılmaktadır.

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

Yee hücre methodunun rotesyonel (∇_x) işlemin kesikli hale getirilmesi için kullanılması sayesinde dalga denklemini Eşitlik (2.2)'deki gibi numerik olarak ayrıklaştırılmış olarak yazmak mümkündür.

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

Burada, $A(p) = \nabla_x \varepsilon^{-1} \nabla_x$, $x = \vec{H}$, $b(p) = \nabla_x \varepsilon^{-1} J$ ve $p = \varepsilon^{-1}$ 'yi ifade etmektedir. $A(p)$ ve $b(p)$ ifadelerinin A ve B yerine kullanılması, iki ifadenin de $p = \varepsilon^{-1}$ 'nin fonksiyonları olduğunu göstermektedir.

Amaçlanan manyetik alana göre yapının dielektrik dağılımını hesaplamak için, noktasal çarpımın dağılma özelliğini kullanarak durağan durum dalga denklemini farklı bir düzenleme ile Eşitlik (3)'teki gibi yazılabilir.

$$\varepsilon^{-1} (\nabla_x \vec{H}) = (\nabla_x \vec{H}) \varepsilon^{-1} \text{ ve } \varepsilon^{-1} J = J \varepsilon^{-1} \quad (2.3a)$$

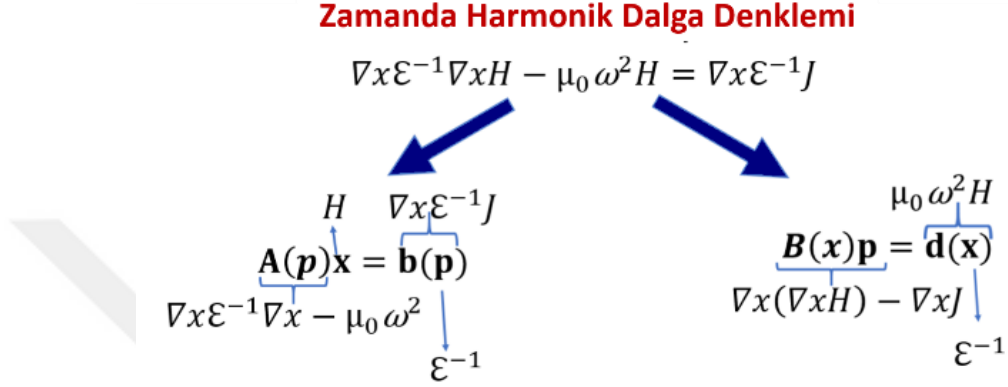
$$\nabla_x (\nabla_x \vec{H}) \varepsilon^{-1} - \nabla_x J \varepsilon^{-1} = \mu_0 \omega^2 \vec{H} \quad (2.3b)$$

Bu değişik gösterim sayesinde dalga denkleminin \vec{H} 'a göre lineer olarak yazılmıştır ve amaçlanan bir manyetik alan çıktısına göre yapının dielektrik dağılımının hesaplanması mümkün olabilmektedir. Bu çıkarımın numerik olarak ifade edilmiş hali Eşitlik (4)'deki gibidir.

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

Burada, $B(x) = \nabla x(\nabla x \vec{H}) - \nabla x J$ ve $d(x) = \mu_0 \omega^2 \vec{H}$ olarak ifade edilmektedir.

Maxwell zamanda harmonik dalga denkleminin, manyetik alan (\vec{H}) ve yapı (ϵ) değişkenlerinde ayrı ayrı lineer olduğundan lineer cebir dilinde yazılabilmesi Şekil 2.2'deki denklem şeması ile özetlenmiştir.



Şekil 2.2 Dalga denkleminin bi-lineer özelliği

2.3. Hedef-ilk Tersine Algoritmada Alt-Problemler Ve Hedef-Maliyet Fonksiyonları

Başarılı bir tasarım için ek matematiksel işlemlere de ihtiyaç duyulur ancak dalga denkleminin \vec{x} ve p 'ye göre bilinear olması algoritmanın temelini oluşturmaktadır. Açıklayacak olursak, \vec{x} 'i sabitleyip p 'ye göre denklemin çözülebilmesi veya p 'yi sabitleyip \vec{x} 'e göre denklemin çözülebilmesi durumunda problem lineerdir. Bu iki alt değişkenin beraber değişmesi durumunda iki değişkenli bu problemin doğrusal özellik göstermez.

Eşitlik (2.5)'te gösterildiği üzere Eşitlik (2.3) ve Eşitlik (2.4) dalga denkleminin farklı nümerik ifadelerle yazılmasından ibarettir.

$$A(p)\vec{x} - b = B(\vec{x})p - d(\vec{x}) \quad (2.5)$$

Algoritmanın temelini oluşturan iki alt problemi tanımladıktan sonra, algoritmanın oluşturulması için kullanılan ek matematiksel işlemleri adım adım inceleyebiliriz:

Adım 1: Tasarım amacımız ve aynı zamanda maliyet fonksiyonumuz olan $f(\vec{x})$ tasarladığımız cihaz için özelleştirerek yazılır ve mümkün olan en düşük seviyeye ulaşılması hedeflenir. Örneğin yüksek iletim hedeflenen bir rezonatörde $f(\vec{x})$ cihazdan sızandan kayıp güç olarak ya da belirli bir modda iletim yapılmasını hedeflediğimiz bir aygıtta diğer modlara sızan enerji olarak tanımlanabilir.

Adım 2: Problemin konveks olması sayesinde, global optimal noktasında etkili ve güvenilir bir şekilde bulunması mümkündür.

Adım 3: Hedef-ilk tasarım problemiyle ilişkilendirmek üzere ilk olarak tipik bir ileri tasarım problemi ele alınacaktır. Bir fiziksel yapının ileri çözümünde hedef fonksiyonu olan $f(\vec{x})$ 'in değerini mümkün olduğunca azaltmak için \vec{x} ve p değişkenleri aynı zamanda değişmektedir. Tanımlanan bu problem lineer değildir ve çözümü bitişik form optimizasyon yöntemi ile yapılır. Direkt yönteminde yapının dalga denklemine tam olarak uyması beklenir.

$$\text{Hedef Fonksiyonu:} \quad \min_{\vec{x}, p} f(\vec{x}) \quad (2.6a)$$

$$\text{Kısıt Fonksiyonu:} \quad A(p)\vec{x} - b = 0 \quad (2.6b)$$

Adım 4: Denklem 7'de görüldüğü üzere Hedef-ilk algoritması tipik bir tasarım yönteminde tanımlanan hedef ve kısıt problemlerinin yerlerini değiştirerek problemin doğasına müdahale eder. Bu sayede yapının dalga denklemine kesin olarak uyma zorunluluğu ortadan kalkar ve $A(p)\vec{x} - b \neq 0$ eşitsizliğine izin verilmiş olur. Yapının dalga denkleminde ne kadar uzak olduğunu belirtmek üzere fiziksel fazlalık adında bir parametre tanımlanır. Hedef-ilk stratejisinde kısıt fonksiyonumuz dalga denklemine kesin olarak uymak olarak değil, fiziksel fazlalığı mümkün olduğunca düşük tutmak olarak tanımlanır.

$$\text{Hedef Fonksiyonu:} \quad \min_{\vec{x}, p} \|A(p)\vec{x} - b(p)\|^2 \quad (2.7a)$$

$$\text{Kısıt Fonksiyonu:} \quad f(\vec{x}) = f_{ideal} \quad (2.7b)$$

Adım 5: Uygulamada Eşitlik (2.7)'ye ek bir kısıt olarak üretim için izin verilen p aralığı tanımlanarak, hedef-ilk algoritmasının Eşitlik (2.8)'de gösterilen genelleştirilmiş haline ulaşılır.

$$\text{Hedef Fonksiyonu:} \quad \min_{\vec{x}, p} \|A(p)\vec{x} - b(p)\|^2 \quad (2.8a)$$

$$\text{Kısıt Fonksiyonu 1:} \quad f(\vec{x}) = f_{ideal} \quad (2.8b)$$

$$\text{Kısıt Fonksiyonu 2:} \quad p_0 \leq p \leq p_1 \quad (2.8c)$$

Adım 6: Algoritmanın genel formülasyonunun çıkarımını inceledikten sonra, daha önce bahsetmiş olduğumuz alan ve yapı alt problemlerini detaylı olarak inceleyebiliriz.

Denklem 9’da matematiksel ifadesi verilen alan alt probleminde hedeflenen manyetik alan (\vec{x}) için çözüm yapılırken p sabit tutulmakta ve \vec{x} bağımsız olarak optimize edilmektedir.

Tasarımda en düşük fiziksel fazlalık değerine ulaşmak için Eşitlik (2.7) ve Eşitlik (2.8) arasında dönüşümlü hesaplama yapılır. Bu döngü Eşitlik (2.9)’da gösterilmektedir. Bu döngü sayesinde her aşamada maliyet fonksiyonunun düşürülmesi garanti altına alınır.

Döngü:

$$\min_{\vec{x}} \|A(p)\vec{x} - b(p)\|^2 \quad (2.9a)$$

$$f(\vec{x}) = f_{ideal}; \quad (2.9b)$$

$$\min_p \|B(\vec{x})p - d(\vec{x})\|^2 \quad (2.9c)$$

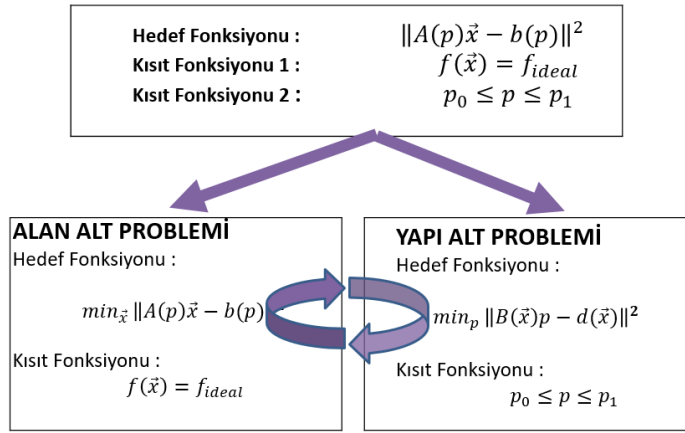
$$p_0 \leq p \leq p_1 \quad (2.9d)$$

Hedef-ilk algoritmasının alt problemlerinin şematik özelliği Şekil 2.3’te yer almaktadır. Alan alt problemi iç bükey ve ikinci dereceden olması sebebiyle en düşük kareler yöntemi gibi standart çözüm yöntemleriyle çözülebilmektedir. Yapı alt probleminde ise MATLAB’da kullanılmak üzere yazılmış etkili, güvenilir ve hızlı konveks optimizasyon paketi olan CVX kullanılmaktadır [31].

Adım 7: Hedef-ilk stratejisinin uygulanmasının örneği olarak giriş portundan belirlenmiş bir modda verilen enerjinin çıkış portundan yine belirli bir modda en yüksek verimlilikle alınmasını hedefleyen, dalga kılavuzu kuplör tasarımı incelenecektir.

Kuplör için tasarım amacı Şekil 2.4’te gösterildiği üzere yapının sınırında maksimum manyetik alan değerine ulaşmak olarak tanımlanır. Eşitlik (11)’de ifade edilen tasarım

amacı için sınır değerleri dışında bir amaç belirlenmez. Yapının tamamı sınırdaki belirlenen amaca uygun olarak algoritma tarafından üretilir.

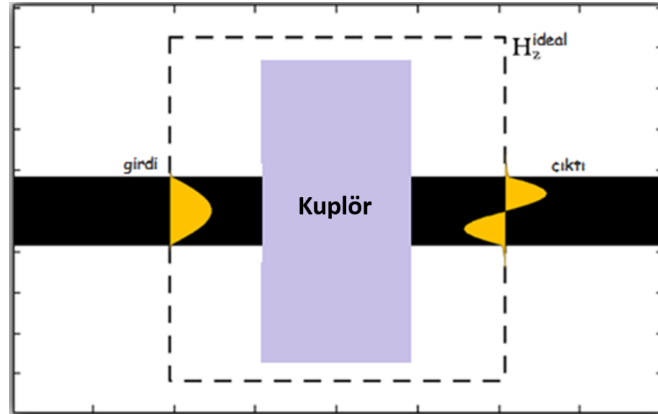


Şekil 2.3 Hedef-ilk tersine algoritmada alt problemler

Performans için bilinmesi gereken değerler sadece sınırdaki \vec{H}_z ve \vec{H}_z 'nin yüzey normalindeki birinci dereceden türevidir ($\frac{\partial \vec{H}_z}{\partial n}$). Alternatif olarak sınırdaki iki katman için \vec{H}_z değerlerinin hesaplanması da yeterli olacaktır.

Sınırdaki: $f(\vec{x}) = \vec{x} - x_{ideal}$ (2.10a)

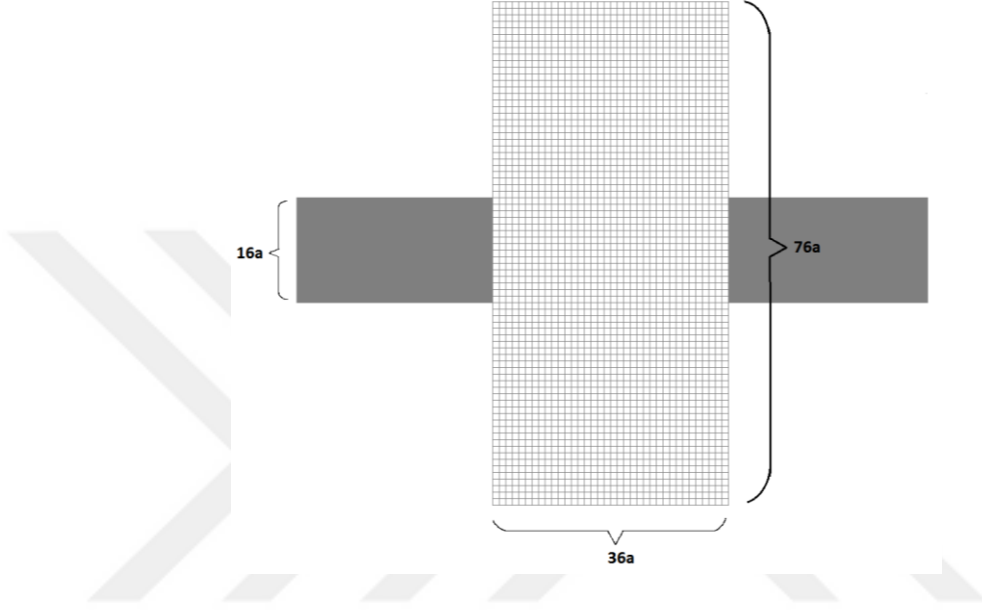
Diğer yerlerde: $f(\vec{x}) = 0$ (2.10b)



Şekil 2.4 Hedef-ilk algoritması ile dalga kuplör tasarımında parametreler [28]

Tasarımlar ilerleme yönünde tek bileşeni olması nedeniyle hesaplama kolaylığı sağladığı için TE mod için yapılmıştır. Durağan dalga denklemiyle başlanmasından ötürü çözümleyici olarak frekans-alanında sonlu-farklar (FDFD) yöntemi

kullanılmaktadır. Ayrıklaştırma yönteminde YEE hücre methodunun kullanılması sebebiyle, tasarım alanı dikdörtgenseldir. Maxwell dalga denklemlerinin ölçeklenebilirliği sayesinde tasarım alanının boyutları ve kaynak dalga boyu çalışmak istenen frekansa normalize edilmiş temel hücre boyutlarıyla belirlenir. Tasarımın başlangıcında yapının kaç hücre içereceğini kullanıcı belirler. Şekil 2.5'te görüldüğü üzere, algoritmadan her hücre için ayrı ayrı hesaplanan sonuçların toplamı yapıyı verir.



Şekil 2.5 Tasarım alanının hücresel gösterimi

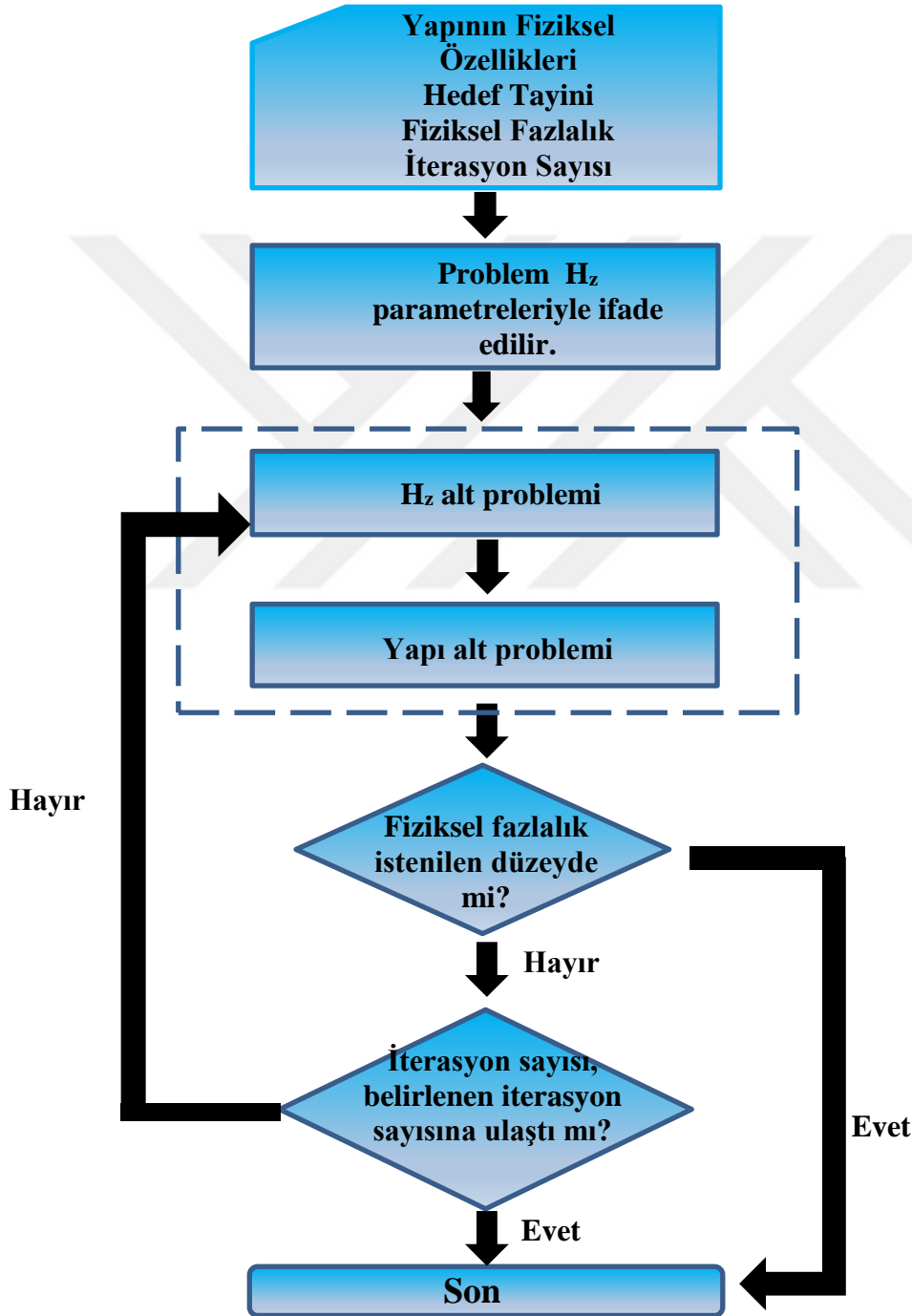
2.4. Tersine Algoritma Akış Şeması Ve Farklı Tasarım Amaçları İçin Manipülasyonu

Şekil 2.6'daki akış şemasında algoritmanın çalışma şekli aşama aşama anlatılmıştır. Algoritmaya girdi olarak tasarım alanının fiziksel özellikleri ve açısal frekans bilgisi verilir. Giriş ve çıkış portlarında amaçladığımız hedef tayin edilir. Ek olarak iterasyonlar ne mertebede sonlanacağını belirtmek üzere istenen fiziksel fazlalık değeri ve iterasyon sayısı bilgileri algoritmaya verilir. Örneğin temel kuplör tasarımı için giriş portu için TE modun derecesi çıkış portu için TE modun derecesi ve tasarımda kullanılacak dielektrik sabit aralığı verilir.

Bundan sonraki aşama da girdilerle tanımlanan problem \vec{H}_z parametreleri cinsinden matematiksel olarak ifade edilir. Sonra amaçlanan tasarıma ulaşıncaya kadar alt problemler arasında döngü devam eder.

Algoritmanın farklı fotonik aygıt tasarımında kullanılması için hedef fonksiyonunun matematiksel olarak yeniden yazılması gerekmektedir. Örneğin çok modda ve frekansta çalışan fotonik aygıtların tasarımında optimizasyon problemi Eşitlik (2.11)'de verilmiştir [32]. Bu problem de tek modlu problemdeki gibi iki alt probleme ayrılırlarak çözülür.

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



Şekil 2.6 Tersine algoritma akış şeması

2.5. Hedef-ilk Algoritmasında Ayırıklaştırma

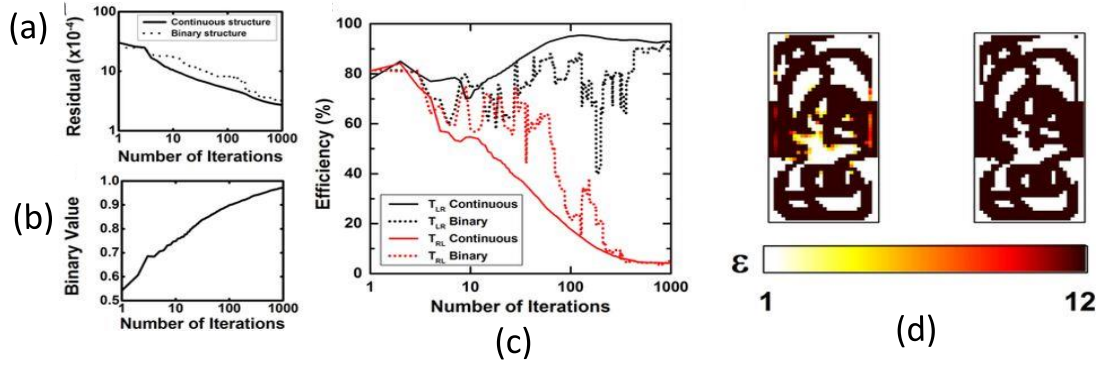
Hedef-ilk algoritması durağan dalga denkleminin bi-convex olarak ifade edilmesi sayesinde yaratılmıştır. Problemin convex olmasının doğal bir sonucu olarak çözüm kümesi sürekli bir yapıya sahiptir. Tasarlanan fotonik yapının dielektrik dağılımının sürekli bir yapıya sahip olması üretilebilmesi açısından dezavantaj oluşturmaktadır. Bu nedenle tasarlanan yapının üretimi mümkün olan belirli sayıda dielektrik değere (örneğin hava ve silisyum için iki dielektrik değer) indirebilmesi yani ayırıklaştırılması önem arzeder.

Ayırıklaştırma işlemi için uygulanabilecek en basit yöntem belirlenen bir eşik değerinden, $\varepsilon_{eş}$, büyük değerleri silisyumun dielektrik değerine yakınsatırken küçük değerleri havanın dielektrik değerine götürmektir. ($\varepsilon > \varepsilon_{eş}$ için $\varepsilon = \varepsilon_{silisyum}$ ve $\varepsilon \leq \varepsilon_{eş}$ için $\varepsilon = \varepsilon_{hava}$). Bu yöntemi seviye ayırıklaştırma veya ara değer yöntemi olarak adlandırabiliriz. Bu yaklaşımda belirlenen ara değer olan $\varepsilon_{eş}$ değeri tasarım sonucunun performansında belirleyicidir ve bu değer her tasarım için yeniden belirlenmek zorundadır. Ayrıca tasarlanan sürekli yapının dielektrik malzeme değerlerinin ara değerlere daha yakın olması durumunda bu ayırıklaştırma yöntemi ciddi performans düşüşüne sebep olacak ve başarısız olacaktır.

Performans kriterlerini mümkün olduğunca düşürmeden ayırıklaştırma işleminin gerçekleşmesi için optimizasyon problemine ayırıklaştırma için “ayırıklaştırma maliyeti yöntemi” yaklaşımı ortaya çıkmıştır [29]. Bu yöntem de ilk olarak seviye ayarlama yönteminde olduğu gibi bir $\varepsilon_{eş}$ değeri belirlenir. Ek olarak amaç fonksiyonuna p_{bin} (ayırıklaştırma maliyeti) eklenir. Aşağıdaki formülde görüldüğü üzere kullanılan γ (ağırlık faktörü parametresi) katsayısı her iterasyonda 0'dan ∞ 'a arttırılacak şekilde ayırıklaştırma maliyeti'ni (p_{bin}) hesaplamalara dahil eder.

$$\min_p \|B(x)p - d(x) + \gamma(p - p_{bin})\|^2 \quad (2.12)$$

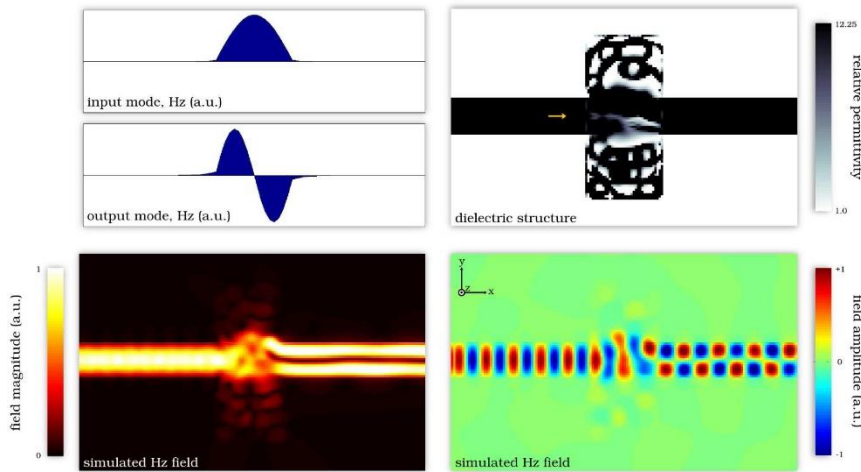
Ağırlık faktörü parametresinin başarıyla uygulandığı Şekil (2.7)'de sonuçları sunulan hedef-ilk tersine algoritma ile tasarlanmış diyot çalışmasında sağdan sola iletim sürekli yapıda %97 iken, kesikli yapıda %92 civarındadır. Benzer şekilde soldan sağa iletim sürekli yapıda %2.8 iken kesikli yapıda %3.2 değerine yükselmiştir. Bu tez kapsamında yapılan çalışmalarda bu yöntem kullanılacaktır.



Şekil 2.7 Diyot çalışması için (a) fiziksel fazlalık, (b) dijital değer ve (c) iletim verimleri. (d) Tersine tasarım algoritması ile hesaplanan sürekli (sol) ve dijital (sağ) yapıların 1000 iterasyondan sonraki renk haritaları

2.6. Literatürde Hedef-ilk Algoritma

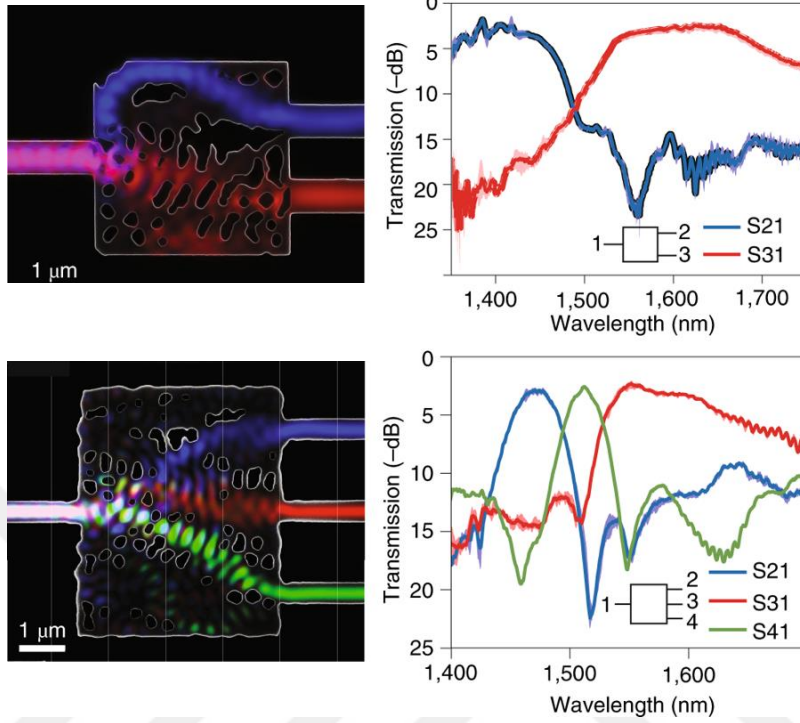
Hedef-ilk tersine algoritma literatürde pek çok lineer fotonik ağıta başarıyla uygulanmış ve üretimi yapılarak yüksek faktörlü dergilerde yayınlanmıştır. Şekil 2.8’de görüldüğü gibi, algoritma hızlı olması ve yüksek çözünürlük gerektirmemesi gibi avantajları sayesinde yüksek verimlilikte çeşitli mod dönüştürücü ve Kuplörlerinin tasarımında kullanılmıştır.



Şekil 2.8 Mod dönüştürücü optik kuplör yapısı ve H_z alan sonuçları [28]

Şekil 2.9’da gösterilen dalga boyu ayırıcı çalışması ise üretim faktörü kısıtlanmalı olarak tasarlanmıştır [33]. Bu çalışmada üretim kolaylığı sağlamak amacıyla yapının

dielektrik malzemesinde ayrıklaştırma faktörü yapılırken, benzerlik faktörü de dikkate alınmıştır.



Şekil 2.9 Üretim sınırlandırılması ile tasarlanmış 3 kanallı dalga boyu ayırıcı [33]

Tersine hedef-ilk algoritması ile geniş dalga boyunda çalışan meta aygıtlar ve lensler de tasarlanan güncel çalışmalar arasında yer almaktadır [34,35].

Hedef-ilk tersine algoritma ile 2.5D yaklaşımıyla 3 boyutlu cihaz tasarımı da yapılmıştır [34]. 2.5D yaklaşımıyla 2 boyutlu tasarıma sadece kalınlık verilerek hesaplama maliyeti düşürülmektedir. Bu yaklaşımda düzlem içinde ϵ değeri aynı kaldığı için yapı kalınlığının doğru seçilmesi gerekmektedir [36].

Bu tez kapsamında hedef-ilk tersine algoritmanın etkili manipülasyonu sayesinde optic kovuk ve filtre tasarımları ilk defa olarak gerçekleştirilmiş ve literetüre kazandırılmıştır [37–39].



3. HEDEF-İLK TERSİNE ALGORİTMA İLE KAVİTE TASARIMI

Rezonatör olarak da adlandırabileceğimiz optik kaviteler, içerisinde ideal duran dalgalar oluşabilen iletken kapalı kutulardır. Oluşan ideal dalgalar sayesinde bir veya birkaç modda rezonator modları oluşturulabilir.

Işımanın kontrol edilebilmesi ve belirli modlara sıkıştırılabilmesini sağlayan optik kaviteler ışık madde etkileşimindeki yüksek performansından ötürü fotonik entegre yapılar için önemli bir yere sahiptir. Yüksek kalite faktörü ile ışığı depolama özelliğinin getirdiği avantaj sayesinde lazerler, kuantum bilgi işleme gibi pek çok alanda etkili bir biçimde kullanılmaktadır [40–42]. Uygulama alanının bu denli geniş olması sebebiyle optik kaviteler literatürde güncelliğini korumaktadır. Güncel çalışmalar da kalite (Q) faktörü ve modal hacim (V_m) (mode volume) olarak da adlandırılan rezonans moduna bağlı özellikler üzerine çalışmalar devam etmektedir [43,44]. Oldukça yüksek Q-faktörlü ile dalga boyu ölçekli V_m değerlerine sahip bu yapıların fotonik tabanlı çok küçük lazerler, güçlü ışık-madde kuplaj sistemleri, sensörler ve optik anahtarlar gibi yeni nesil birçok cihazda kullanılması mümkün olacaktır.

Literatürde yer alan kavite tasarımlarının pek çoğu fotonik kristal tabanlı olarak yapı kusuru yaratılarak yasaklı bant manipülasyonu ile tasarlanmıştır. Işığın hapsedilmesinde kullanılan en önemli mekanizma DBR (Distributed Bragg Reflection) ve en önemli kayıp mekanizması ise mükemmel olarak gerçekleştirilemeyen TIR'dır[45]. 2 boyutlu fotonik kristallerle yapılan çalışmalarda ışığın saçılmasının engellenmesi hedeflenir. Yasaklı bant aralığında rezonans modları elde edilerek yapılan bu tasarımların pek çoğu sezgisel olarak yapısal parametrelerin denenmesiyle yapılır [42]. Bu yöntemler tasarım esnekliği, performansı, işlevselliği ve hesaplama maliyeti ve simülasyon zamanı açısından yetersiz kalmaktadır. Son zamanlarda tasarımdaki bu engelleri kaldırmak amacıyla tersine problem bakış açısıyla bir kaç deterministik fotonik kavite tasarımı yöntemi ortaya çıkmıştır [5].

Tezin bu bölümünde, hedef-ilk tersine tasarım yaklaşımıyla elde edilen fotonik kavite tasarımı sunulmaktadır. Bu tasarımda amaçlanan rezonans frekansında kavite elde edilmektedir.

Tasarlanması amaçlanan fotonik aygıt için amaçlanan performans kriterinin sınır değer problemleri olarak tanımlanması ile optik kovuk diğer adıyla rezonatör tasarımı gerçekleştirilmiştir.

Optik kovuk tasarımı için ışığı hapsedmek amacıyla bir dielektrik kovuk bölgesi iki tarafında ayna bölgesi konulan amaç doğrultusunda algoritma tarafından otomatik olarak üretilir. Aynalar arasında defalarca yansımaya uğrayan ışık dalgaları güçlenerek osilasyona uğrar.

3.1. Dielektrik Dalga Kılavuzunda Rezonans Koşulu Ve Kalite Faktörünün Hesaplanması

Tezin bu bölümünde, hedef-ilk tersine tasarım yaklaşımıyla elde edilen fotonik kavite tasarımı sunulmaktadır. Bu tasarımda amaçlanan rezonans frekansında kavite elde edilmektedir.

Aynı fazdaki dalgaların yapıcı girişim oluşturarak durağan dalga oluşturmasının temel koşulu eşitlik (3.1) ile sağlanır.

$$N\lambda = 2 \times \text{Kovuk Uzunluğu} \quad (3.1)$$

Burada N tam sayısı desteklenen mod sayısı belirler. Kovuk uzunluğu boşluk dalga boyunun yarısının tam katı olmalıdır. Ortam hava olduğunda geçerli olan bu eşitliğe dielektrik ortamda etkin indis n_{eff} parametresi eklenir [48].

Optik kavitenin ışığı ne kadar iyi hapsedebildiği birimsiz bir büyüklük olan kalite faktörü (Q) ile ifade edilir. Kalite faktörü iki farklı şekilde hesaplanabilir. İlk yöntem eşitlik (3.2)'de gösterilen, literetürde yarılanma frekansı (FWHM) olarak geçen kavite rezonansının frekansının, iletim değeri genliğinin yarıya düştüğü iki frekans arasındaki farka bölünmesi yöntemidir.

$$Q = f/\Delta f \quad (3.2)$$

Kalite faktörü için bir diğer yaygın tanım ise Eşitlik (3.3)'de verilen, salınım yapan rezonatörde depolanan enerjinin, sönüm işlemiyle döngü başına harcanan enerjiye oranıdır[49].

$$Q = 2\pi \times \frac{\text{Depolanan Enerji}}{\text{Bir döngüde kaybedilen Enerji}} \quad (3.3)$$

3.2. Hedef-ilk Algoritması İle Rezonatör Tasarımı

Durağan dalga oluşturmak için temel yöntem olan iki ucunda düz ayna yer alan optik kavite tanımı hedef-ilk algoritmasına tanımlanan sınır değer koşulları ile tasarlanmıştır. Burda tasarlanan yapının tamamının dielektrik olması metalik ayna yüzeylerinde özellikle yüksek frekanslarda oluşabilecek olumsuz koşulları yok etmesi açısından önem arz etmektedir. Hedeflenen yapı Şekil 3.1'deki gibi optik kazanç bölgesi (kovuk) ve etrafında iki adet dielektrik ayna bölgesi tanımının yapılmasıdır. Algoritmada yapının tam ortasında hem +x hem de -x yönünde ışımaya yapan gauss kaynak tanımlanır. Sınır değer koşulu olarak da ayna bölgesinin başlangıcına yansıtıcılık koşulu koyulmuştur. Kovuk bölgesinin uzunluğu Eşitlik (3.2)'de verilen desteklenen mod sayısı koşuluna uygun olarak, kavite bölgesinde sadece temel modu desteklemek amacıyla uygun olarak seçilmiştir.



Şekil 3.1 Hedef-ilk algoritması ile hedeflenen tasarım yapısı

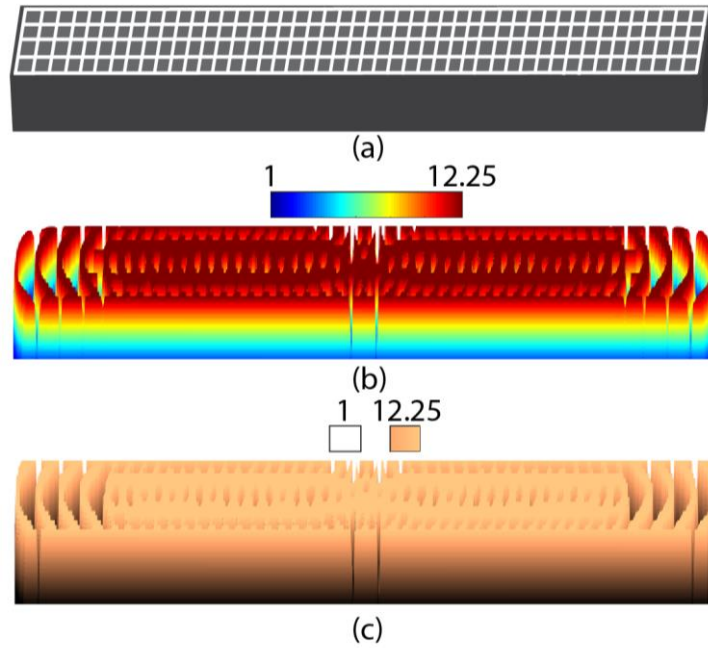
Hedef-ilk tersine algoritma ile kavite tasarımında yapının boyutları ve kaynak dalga boyu, istenen frekansa normalize edilen temel hücre boyutları ile belirlenir. Tasarım sonucu ortaya çıkacak olan rezonans frekansı algoritmada amaç olarak belirlenir böylece rezonans frekansının boyut parametrelerinin değişimi gibi sezgisel yöntemlerle ayarlanmasına gerek kalmaz. Bir kez yapının kaç hücre içereceğini belirledikten sonra, algoritma her hücre için ayrı ayrı alınan sonuçların toplamını verir.

Nanoışın kavite tasarımında ilk olarak Şekil 3.2(a)'da görüldüğü üzere başlangıç dalgakılavuzu ile başlanır. Başlangıç yapısında amaçlanan rezonans frekansı belirlenir ve kavite ve ayna bölümleri oluşturulması için sınır değer problemleri tanımlanır. Bu

yapıya ulaşmak için ilk olarak dielektrik dağılım 1 (hava) ile 12.25 (Si) arasında sınırlandırılmıştır ve hedeflenen rezonans dalgaboyu 1550 nm olarak belirlenmiştir.

Sonrasında, tersine optimizasyon yöntemi, manyetik alan ve dielektrik değer bağımlı doğrusal alt problemlerin iteratif şekilde çözülmesi şeklinde uygulanmıştır. Şekil 3.2(b)'den de görüldüğü gibi ortaya çıkan fotonik yapı, kavite bölgesinin etrafındaki hava/Si katmanlarını içeren neredeyse simetrik olarak dağılmış dielektrik bölümlerinden oluşmaktadır.

Bir sonraki aşamada ise kavitenin üretilebilir bir tasarım haline gelmesi için gerekli olan yapının ikileştirilmesi (sadece iki farklı kırılma indisinden oluşması) çalışması gerçekleştirilmiştir. Yukarıda geniş şekilde anlatılan “ayrıklaştırma maliyeti” yöntemi ile elde edilen ikili yapı Şekil 3.2(c)'de görülmektedir.



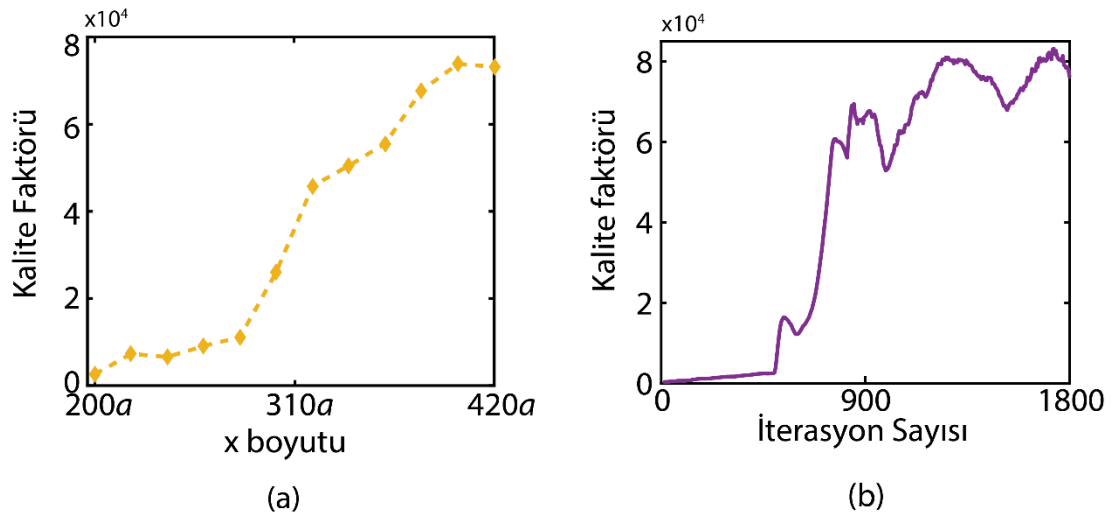
Şekil 3.2 (a) Tanımlanan dalga kılavuzu ortamı, (b) sürekli şekilde dağılmış dielektrik ortamda tasarlanan kavite ve (c) hava ve silisyum ortamlarından oluşan ayrık kavite yapısı

Kavite tasarımında algoritma da kavite ve ayna bölgeleri oluşması amaçlanacak şekilde problem tanımı yapılmıştır. Algoritmanın literetüre ilk kazandırdığı çalışmalardan farklı olarak tasarımı yapılacak alanın tam olarak orta noktasına kaynak

tanımlanmış ve x ekseninde her iki yönde aynı şekilde yayılacağı bilgisi verilmiştir. Tasarımın ikinci aşamasında algoritmada enine yönde simetrik olarak iki noktaya yansıtma koşulları eklenerek ayna bölgeleri oluşturulmuştur. Ayna sayesinde kovuk bölgesindeki dalgalar yapıcı girişim sayesinde daha güçlü bir rezonans etkisi oluştururlar. Algoritma bragg benzeri bir yapılanma ile yansıtma koşulunu sağlar.

3.3. Tasarım Sonucunun FDTD Yöntemi İle Analizi

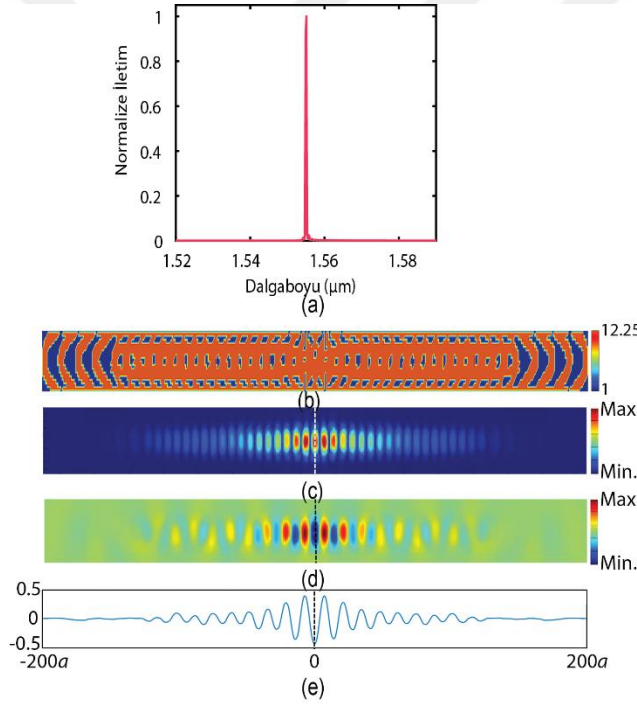
Uygun boyutlardaki tasarım alanında hedefler belirlenerek algoritmanın sonuca ulaşılması beklenir. Yapının yüksekliği boşuk dalga boyunun yarısından küçük olacak şekilde 16 grid olarak seçilmiştir. Yapının x boyutu ise Şekil 3.3(a)'da görüldüğü gibi, beklendiği üzere belli bir boyuta kadar artış gösterdikten sonra sabitlenir ve daha fazla ayna katmanı kullanılmasına gerek kalmaz. Boşluk dalga boyunun $42a$ olması ve yapının sağladığı Q faktörünün tam katlarında sıçrayış göstermesi bilgisiyle uyumludur. Şekil 3.3(b)'de sunulduğu üzere, Q faktöründeki değişiklik, algoritmadaki yineleme sayısındaki artışla araştırılmıştır. Beklendiği üzere kalite faktörü sistematik olarak iterasyonların sayısı ile artar ve belirli bir aralıkta neredeyse sabitlenir.



Şekil 3.3 Tasarımın algoritmada tanımlı (a) x ve (b) iterasyon sayısına bağlı kalite faktörü değerleri

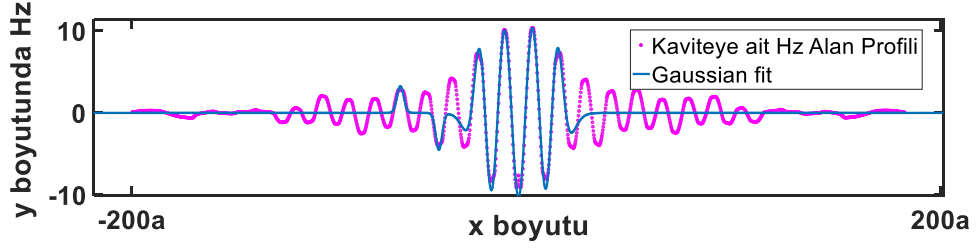
Tanımlanan sınır değer koşullarından sonra algoritma tarafından otomatik olarak tasarlanan yapının iletim spektrumu ve dielektrik dağılımı Şekil 3.4(a) ve Şekil 3.4(b)'de sırasıyla gösterilmektedir. Sürekli dağılıma sahip bu yapının zaman tanımlı analizleri zaman-alanında sonlu-fark (FDTD) yöntemi ile elde edilmiştir. Beklendiği

üzere Şekil 3.4(a)'da 1550 nm dalga boyunda keskin bir geçirgenlik gözlemlenebilmektedir. Elde edilen optimum yapının Q-faktörü 86700 olarak hesaplanmıştır. Şekil 3.4(b)'de gösterilen optimum yapının rezonans dalga boyunda (1550 nm) uyarımından çıkan ışık yoğunluğu ve manyetik alan dağılımları Şekil 3.4(c) ve Şekil 3.4(d)'de sırasıyla sunulmuştur. Şekil 3.4(c)'den de görüldüğü gibi, maksimum yoğunluk mod hacmi olarak $V_m=10.14 \mu\text{m}^2$ ile kavite merkezinde yer almaktadır ve bu yoğunluk merkezden uzaklaştıkça kademeli olarak azalan bir dağılıma sahiptir. Şekil 3.4(d) göstermektedir ki kavite bölgesi manyetik alanın temel modunu desteklemektedir. Şekil 3.4(e)'deki H -alanı verilerinden çıkarılan alan profilinde ise nanoışın kavitelelerinin radyasyona bağlı kayıplarını engellemek için optimal olan Gaussian benzeri bir dağılım görülmektedir.



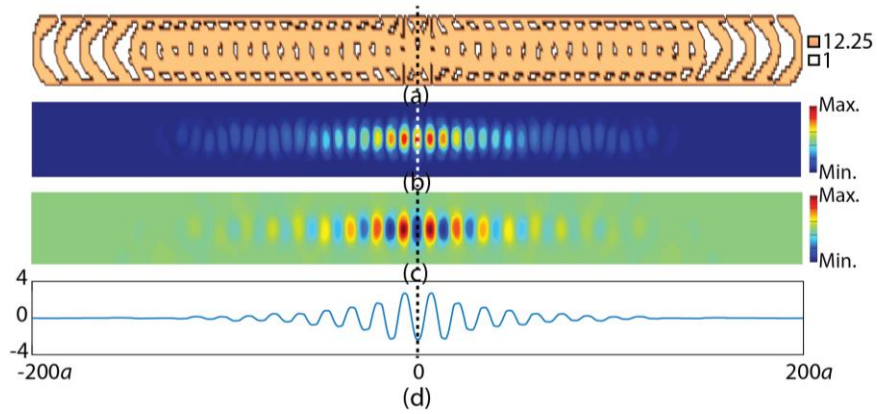
Şekil 3.4 Tasarlanan kavite yapısının (a) iletim spektrumu ve (b) dielektrik dağılımı ile rezonans dalga boyunda elde edilen H-alan (c) şiddeti, (d) dağılımı ve (e) kesit profili

Şekil 3.5'te görüldüğü gibi, MATLAB Curve Fitting Toolbox ile yapılan analiz sonucunda elde edilen H -alanı şiddetinin Gaussian profile %78 oranında uyumlu olduğu görülmüştür. Bu çerçevede, kullanılan algoritmada yapılacak daha ileri seviyedeki düzenlemeler ile tam bir Gaussian dağılımına sahip olan alan profili elde edilebilir ve Q-faktörü ile mod hacmi açısından daha iyi sonuçlara ulaşılabilir.



Şekil 3.5 Elde edilen H-alan şiddeti ve Gaussian fit profili

Kavite tasarımının son aşaması olarak, üretim için gereken iki malzemeli yapının tasarımında dielektrik değerlerinin 1 (hava) ve 12.25 (silisyum) olmasını sağlayan gerekli düzenlemeler algoritmaya eklenmiştir. Literatürde optik diyot tasarımında sunulan ayırıklaştırma maliyetli yöntemdeki gibi ikileştirme şartı eklenen algoritma ile elde edilen nanofotonik yapı Şekil 3.6(a)'da gösterilmiştir. Litografik yöntemlerle kolayca üretimi yapılabilecek bu yapının FDTD yöntemi ile hesaplanan H -alan yoğunluğu, dağılımı ve kesit profili Şekil 3.6(b), Şekil 3.6(c) ve Şekil 3.6(d)'de sırasıyla verilmektedir. Şekilden de görüldüğü üzere H-alanı, kavitenin merkezinde güçlü bir şekilde lokalize olmuştur. Ayrıca, bu ikileştirilmiş yapı sürekli dielektrik dağılımına sahip yapıda olduğu gibi Gaussian benzeri bir profil sergilemektedir. Tasarlanan bu nanoışın kavitenin Q-faktör değeri ise 1555 nm dalga boyunda 24000 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 3.6 Ayırıklaştırılmış kavite yapısının (a) dielektrik dağılımı ile rezonans dalga boyunda elde edilen H-alan (b) şiddeti, (c) dağılımı ve (d) kesit profili

Tasarımın başarısını analiz etmek amacıyla literetürde yer alan bragg yansıtıcı tabanlı Fabry-perot resonotorlerle boyut ve performans analizi açısından karşılaştırma yapıldığında, başarımların kabul edilebilir düzeyde olduğu görülmüştür [50].

3.4. Değerlendirme

Tezin bu bölümünde, ilk defa hedef-ilk tersine tasarım optimizasyon yöntemi kullanılarak elde edilen optik kovuk rezonatör yapıları sunulmuştur. Tasarımı yapılan sürekli ve ayırık dielektrik malzeme dağılımlarına sahip nanofotonik yapılar, elektromanyetik tepkinin amaçlanan çıktı olarak önceden algoritmaya entegre edilmesi neticesinde oluşturulmuştur. Algoritmadaki hücre boyutlarının ölçeklenebilir olması üretilecek fotonik yapı boyutlarının esnekliği açısından önemlidir. Geliştirilen algoritmada, en iyi yansıma koşulunu elde etmek için ayna bölümlerinin boyutunu ve şeklini belirlenmiştir. Böylece, en iyi manyetik alan dağılımını veren yapının tasarımı, ayna bölümlerinin özelliklerinin herhangi bir geleneksel parametrik analizi yapılmadan gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan kovuk yapısı, etkin ışık-madde etkileşimi sağlaması nedeniyle nano boyutlarda optik filtreler, ışık kaynakları ve biyosensör tasarımlarında kolaylık sağlayacaktır. Kovuk bölgesinde ortaya çıkan modun hacminin yüksek olması düz ayna koşulunun doğal sonucudur [49]. İçbükey aynalar kullanarak daha yüksek kalite faktöründe ve daha düşük mode hacminde kavite elde etmek mümkündür.

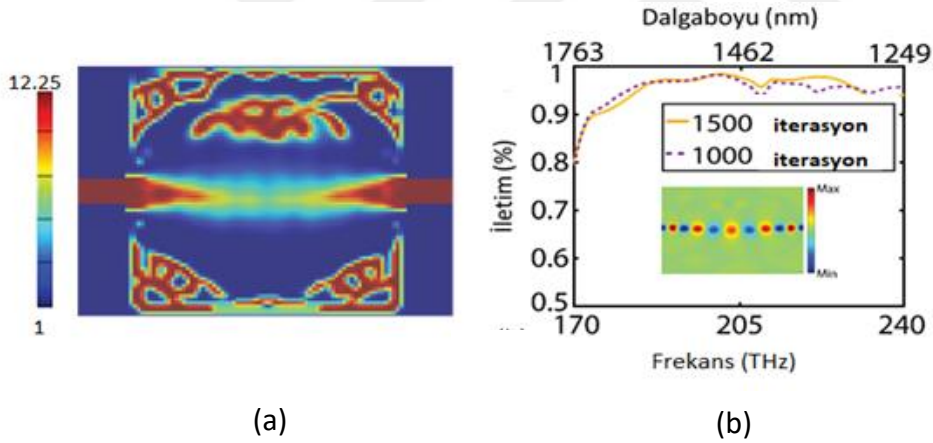
4. HEDEF-İLK TERSİNE ALGORİTMA İLE FİLTRE TASARIMI

Optik frekans filtreleri, spektroskopi, floresan mikroskobu, görüntüleme, lazer ve biyoalgılama gibi çok çeşitli uygulamalarda kullanılan vazgeçilmez elemanlardır [51–53]. Basamaklı Mach-Zehnder interferometer, çoklu halka filtre ve dizi dalga kılavuzu ızgarası gibi çeşitli tasarımları içermekle beraber, bu cihazlar başlıca iki grupta sınıflandırılabilir: emici ve dikroik filtreler. Emici filtreler, tanımlanan elektromanyetik bölgedeki ışığı soğurmak için boyalar ve yarı iletkenler gibi bazı malzemeleri içerir, ancak emilen ışığın ısıya dönüşmesinden dolayı yüksek güçlü optik radyasyon için uygun değildirler. Aksine, dikroik filtreler genellikle dalga boyu bağımlı faz kaymaları veya yol uzunluk farkları ile birlikte girişim etkilerine dayanır. Ek olarak, dalga boyu bağımlı polarizasyon, kırılma veya kırılmaya dayalı çeşitli diğer frekans filtreleme yapıları da önerilmiştir. Son zamanlarda, tek çipli (on-chip) ve entegre devre halinde fotonik devre ağlarının geliştirilmesinde yaşanan umut verici gelişmeler, dikroik frekans filtreleri de dahil olmak üzere geleneksel cihazların minyatür tasarımlarının gerekliliğine yol açmıştır. Bu sebeple, optik cihazların tasarımında, sezgisel yaklaşımlar ve parametre arama optimizasyonları gibi farklı kavramlar kullanılmıştır [12,13,54]. Gelen ışıktan tekli frekansı veya bir frekans bandını izole etmek, seçici iletmek veya bloke etmek frekans filtreleme elemanlarının etkili tasarımı için son derece önemlidir. Yeni nesil sistemler için önerilen mikron büyüklüğündeki frekans filtreleme elemanlarının etkili tasarımları genellikle analitik tabanlı deneme-yanılma yaklaşımları ve/veya bazı arama algoritmaları ile gerçekleştirilmiştir[55–57]. Genellikle fotonik kristaller ve halka rezonatörler gibi fotonik yapıları içeren bu tasarım metodolojileri, başlangıç tahminiyle başlar, bunu optimum yapının sistematik araştırması izler. Sezgisel veya parametre arama yöntemleriyle, tüm yapısal parametrelerin etkin optimizasyonu tüm yapısal parametrelerin etkin optimizasyonunu zorlaştırmaktadır. Bu nedenle son zamanlarda etkili tersine optimizasyon yöntemleri literatürde yerini almaktadır [58–60].

Tezin bu kısmında literatürde ilk kez, hedef-ilk algoritmanın etkili manipülasyonu sayesinde tek çipli (on-chip) yüksek geçiren, alçak geçiren ve Notch (çentik) filtre tasarımları yapılmıştır.

4.1. Filtre Tasarımı İçin İletim Ve Yansıtma Koşullarının Gerçekleştirilmesi

Hedef-ilk algoritması çip üzerinde (tek cihaz bazlı) kompakt ve yüksek verimlilikte optik filtre tasarımında kullanılmıştır. Tasarımının ilk adımı olarak hedef-ilk algoritmasının geniş bant aralığı için optimize edilerek performansın sistemli olarak ölçülmesi sağlanmıştır. Bu tasarımı gerçekleştirmek için çok frekans noktasında iletimi maksimum yapan koşul algoritmaya eklenerek Şekil 4.1(a)'deki dielektrik dağılım elde edilmiştir. Şekil 4.1(b)'de gösterildiği üzere, 1500 iterasyon için transimiyon yüzdesi, 209.9 THz'de %96.12 iken, aynı frekansta 1000 kez yinelenen simülasyondan yaklaşık % 94.23'dür. Sonuç olarak Şekil 4.1(b)'de görüldüğü üzere birçok frekans noktası için optimize edilen tüm-geçiren filtre yapısının iletim spektrumunda 400 nm'lik bant genişliğinde %90'ın üzerinde iletim söz konusudur.

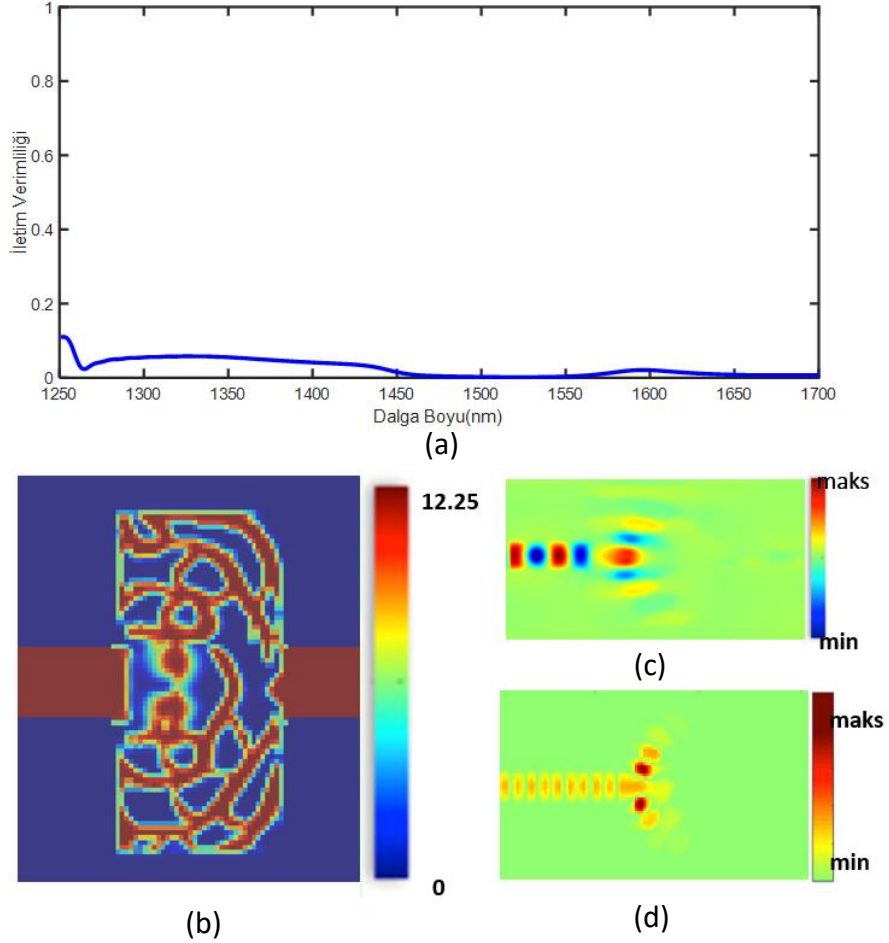


Şekil 4.1 (a) 1000 iterasyon için tüm geçiren filtre yapısının dielektrik dağılımı (b) 1000 ve 1500 iterasyon için iletim tayfları ve 1500 iterasyon için elektrik alan dağılımı

İstenilen bölgenin yüksek verimlilikle iletiminin sağlanması sonrasında bloke edilmesi istenen frekans aralığı için algoritmaya yansıtma koşulu eklenmiştir. Yansıtıcı tasarımında x ve y boyutu 80a olarak belirlenmiş ve birim hücre 1550 nm için normalize edilerek 37 nm olarak seçilmiştir. Şekil 4.2(a)'da yapının iletim grafiğinden görüldüğü gibi, 1450-1650 nm gibi geniş bir frekans aralığının yapı tarafından bloke edilmektedir. Şekil 4.2(b)'de yapının dielektrik dağılımı gösterilmiştir. Ayrıca elde edilen yapının manyetik alan cevabı Şekil 4.2(c)'de FDTD yöntemi ile ölçülürken

Şekil 4.2(d)'de FDFD yöntemi ile doğrulanmıştır.

Algoritma, belirli frekanslarda maksimum iletmek ve belirli frekanslarda yansıtılmak üzere optimize edildikten sonra, bu iki amaç için birlikte optimize edilerek telekomünikasyon dalga boyu aralığında çalışan (1200 nm - 1600 nm), yüksek geçiren, alçak geçiren ve çentik filtre tasarlamak üzere etkili bir biçimde revize edilmiştir.

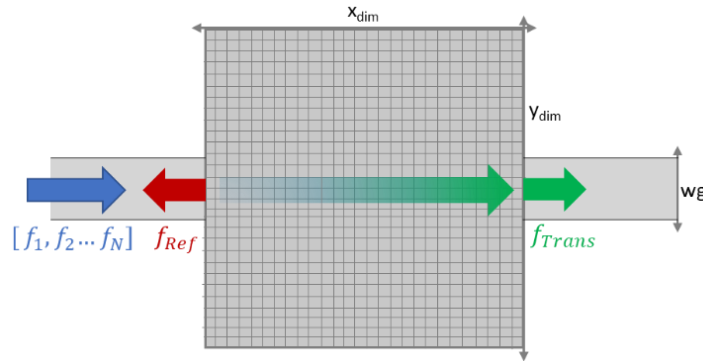


Şekil 4.2 (a) Işığın yansıtılmak için optimize edilmiş yapının normalize edilmiş iletim verimliliği, (b) Tasarlanan yapının dielektrik dağılımı, (c) FDTD ve (d) FDFD yöntemiyle hesaplanan manyetik alan büyüklüğü

4.2. Yüksek Geçiren Filtre Tasarımı Ve FDTD Analizi

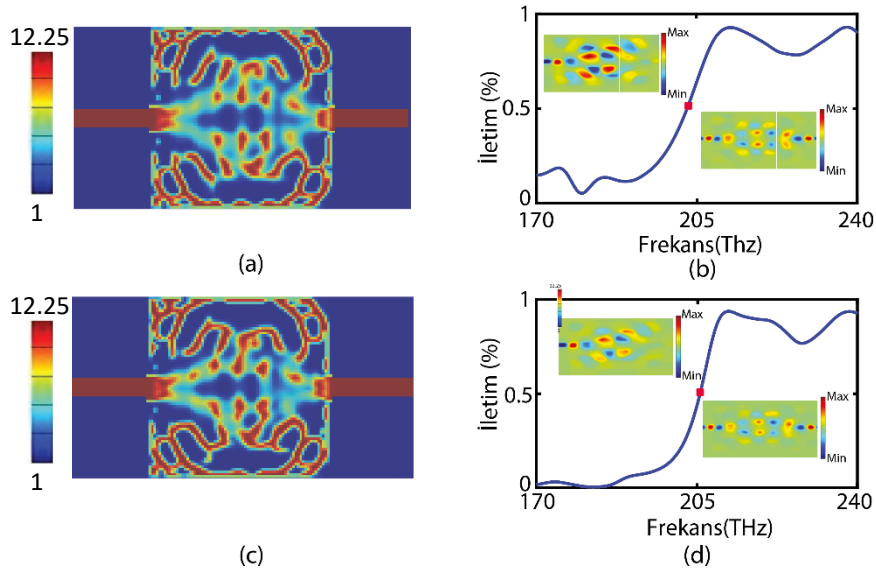
Yüksek geçiren ve alçak geçiren fotonik filtrelerin tasarımında Şekil 4.3'te görüldüğü üzere bloklanmak istenen frekanslar giriş portunda yansıtılmış ve yapının içine nüfus etmesi engellenmiştir. Diğer yandan yüksek verimlilikle iletilmesi hedeflenen spektrum bölgesinde, çıkış portuna yüksek verimlilikle iletilmesi sağlanmaktadır.

Tasarım alanı x ve y boyutu 80a olarak belirlenmiş ve birim hücre 1550 nm için normalize edilerek 37 nm olarak seçilmiştir.



Şekil 4.3 Tasarlanan yüksek geçiren ve alçak geçiren filtrenin şematik gösterimi

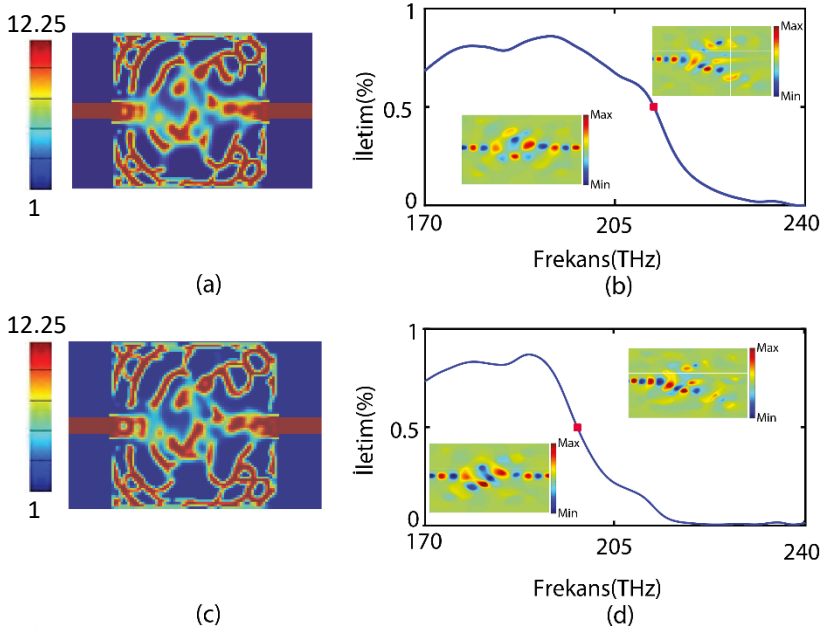
Hedef-ilk algoritma ile tasarlanan yüksek geçiren filtre karakteristiğinin iterasyon sayısına bağımlılığını incelemek üzere Şekil 4.4'te 1000 iterasyon ve 3000 iterasyon sonucu elde edilen yapıların karşılaştırmaları yapılmıştır. Yüksek geçiren filtre 2.96 μm x 2.96 μm boyutunda tasarlanmıştır. 1000 iterasyon için elde edilen dielektrik dağılım Şekil 4.4(a)'da gösterildiği gibi y ekseninde neredeyse simetrik bir görünüm sergilemektedir. Yapının filtreleme karakteristiklerini ölçmek için FDTD simülasyonu yapılarak iletim verimliliği ve yansıtıcı ve geçiren (on-state ve off-state) durumlarındaki manyetik alan cevapları Şekil 4.4(b)'de sunulmuştur. Yüksek frekanslarda iletim değeri önemli bir doğrusalılık sergileyerek %92.6'ya kadar ulaşmıştır. Düşük frekans bölgesinde iletim yaklaşık %0.1 gibi makul değerlere düşmüştür ve kesme frekansının 202.9 THz olduğu görülmüştür. Şekil 4.4 (b)'de sunulan yüksek geçiren spektrumda ve alçak geçiren spektrumdaki manyetik alan şiddeti çıktılarından filtrenin off-state durumundaki bloklama etkisi ve on-state durumundaki yüksek iletim özelliği açıkça görülmektedir. Filtreleme özelliklerini iyileştirmek amacıyla iterasyon sayısı 3000'e çıkarıldığında elde edilen dağılım Şekil 4.4(c)'de görüldüğü gibi 1000 iterasyona göre dielektrik dağılımda farklılıklar mevcuttur. Tasarlanan yapının FDTD analizinde iletim verimliliği ve yansıtıcı ve geçiren (on-state ve off-state) durumlarındaki manyetik alan cevapları Şekil 4.4(d)'de verilmiştir. Yüksek geçiren bölgede en fazla %93.38 iletime kadar ulaşılmış ve kesme frekansı 205.3 THz'e gelmiştir. Off-state durumunda yansıtılması hedeflenen frekanslardaki başarımleri artmıştır.



Şekil 4.4 Yüksek geçiren filtre yapıları,iletim tayfları, off-on state için H-alan şiddetleri (a), (b) 1000 iterasyon ve (c), (d) 3000 iterasyon için

4.3. Alçak Geçiren Geçiren Filtre Tasarımı FDTD Analizi

Alçak geçiren filtre için yapılan iterasyon sayısına bağlı performans analizi Şekil 4.5'te sunulmuştur. Şekil 4.5(a)'da 1000 iterasyon için elde edilen tasarımın dielektrik yapısı görülmektedir. Alçak geçiren filtre $2.96 \mu\text{m} \times 2.96 \mu\text{m}$ boyutunda tasarlanmıştır. Yüksek geçiren filtrede olduğu gibi burada da y eksenine göre neredeyse simetrik bir dağılım göze çarpmaktadır. Şekil 4.5(b)'de verilen FDTD analiz sonuçları ve yansıtan ve geçiren (on-state ve off-state) durumlarındaki manyetik alan cevaplarında görüldüğü üzere, 212.2 THz olan kesim frekansının altında %85.95'e varan performansa ait ve nerdeyse doğrusal formda iletim elde edilmiştir ve diğer iletim tayfı önemli ölçüde baskılanmıştır. Tasarım sonucunun iyileştirilmesi için iterasyon sayısı 3000'e çıkartıldığında Şekil 4.5(c)'de görüldüğü gibi dielektrik dağılımda farklılıklar meydana gelmektedir. Şekil 4.5(d)'de sunulan filtre profili ve yansıtan ve geçiren bölgelere ait tasarlanan yapının manyetik alan cevabı, ilgili spektral aralıklarda önemli ölçüde yüksek bastırma (%0.00506'ya kadar) ve yüksek iletim (~%86.95'e kadar) sergileyerek, 3000 iterasyon için daha iyi sonuçların elde edildiğini göstermektedir. Kesim frekansı 198 THz değerine gelmiştir.



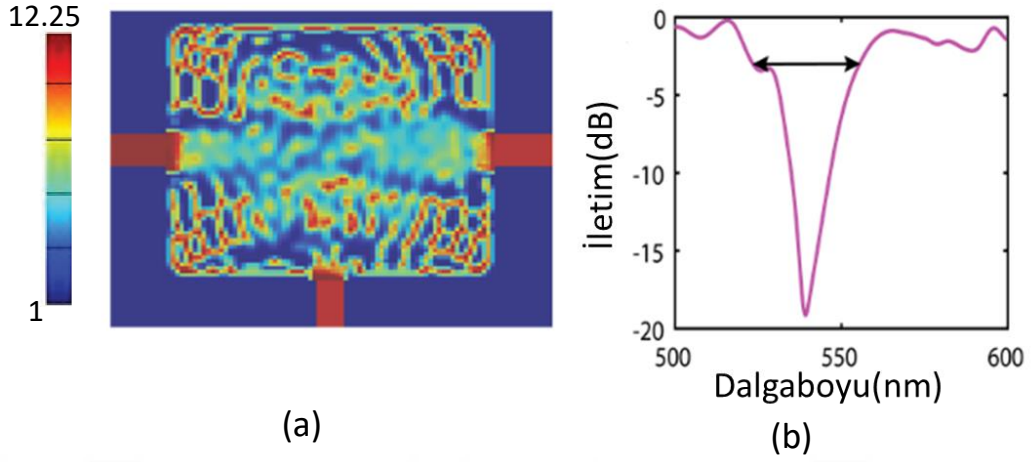
Şekil 4.5 Alçak geçiren filtre yapıları, iletim tayfları, açık-kapalı durum için H-alan şiddetleri (a), (b) 1000 iterasyon ve (c), (d) 3000 iterasyon için

4.4. Çentik Filtre Tasarımı FDTD Analizi

Notch filtre (çentik filtre) bant durdurucu filtre çeşitlerinden biridir. Mikrodalga bölgesinde çalışılan fotonik Notch filtreler radar sistemlerde, geniş bant kablosuz iletişimde ve uydu sistemlerinde kendilerine geniş uygulama alanı bulmaktadır [26]. Görünür bölgede çalışmak üzere tasarlanan çentik filtrelerde pek çok uygulama için vazgeçilmez eleman durumundadır. Proje kapsamında görünür spektrumda üç dalga boyu değerinde istenen oranda yansıma ve iletim değeri verebilen Notch filtrenin tasarlanması hedeflenmiştir. Literatürde yer alan bazı filtre tasarım çalışmalarında olduğu gibi hedef-ilk algoritmasıyla tasarlanan Notch filtrelerde de tahliye portu kullanılmıştır [26].

Notch filtre tasarımına ilk olarak görünür bölgede, 550 nm’de çentik hedeflenerek başlanmıştır. Tasarım alanı x ve y boyutu 120 grid ve 80 grid olarak belirlenmiş ve birim hücre 550 nm için normalize edilerek 20 nm olarak seçilmiştir. Notch filtre 4.44 μm x 2.96 μm boyutunda tasarlanmıştır. Şekil 4.6(a)’da görüldüğü üzere tasarım alanının altına tanımlanan tahliye portuna iletimi engellenmek istenen frekans bölgesi aktarılmıştır. 10000 iterasyon için yapılan tasarım sonucuna ait normalize edilmiş transmisyon grafiği Şekil 4.6(b)’de sunulmuştur. Şekilde görüldüğü üzere hedeflenen

noktada -20 dB civarında zayıflama sağlanmıştır. İletimde %50 zayıflamanın sağlandığı (-3 dB) frekans aralığı 32.4 GHz olarak ölçülmüştür.



Şekil 4.6 Görünür frekans spektrumunda tasarlanmış çentik filtre (a) dielektrik yapısı (b) normalize iletim eğrisi

4.5. Değerlendirme

Tezin bu bölümünde, yüksek performanslı, alçak geçiren, yüksek geçiren ve çentik filtrelerin ters tasarımlarını göstermekteyiz. Bu amaçla, burada etkili bir tasarım yaklaşımı olarak kullanılan objektif-ilk ters tasarım algoritmasına gerekli modifikasyonlar uygulanmış ve her bir simülasyonda yinleme sayısı değiştirilmiştir.

İletim özelliklerini belirlenen belirli frekanslar için amaç optimizasyon algoritmasına tasarım başlangıcında tanıtılır. Bu nedenle tasarım parametrelerinin boyut, kırıcılık indisi gibi özelliklerinin deneme-yanılma yolu ile incelenmesi gerekmez. Tasarım sonuçları FTDT yöntemiyle analiz edilmiş ve performanslarının yeterli düzeyde olduğu görülmüştür. Hedef-ilk tersine algoritmanın doğası gereği tasarlanan yapılar sürekli kırıcılık indisi dağılımına sahiptir. Tasarım maliyetine ayrıklaştırma maliyeti ekleyerek, üretimi mümkün istenilen kırıcılık indisi değerlerine taşımak mümkündür.

Sonuç olarak tek yongada (on-chip), ayarlanabilen büyüklükte ve yüksek performanslarda tasarlan optik filtreler literatüre kazandırılmak adına önemli adaylar arasında yer almaktadır.



5. SONUÇ

Hedef-ilk tersine tasarım yöntemi literatürde pek çok cihaza etkili bir şekilde uygulanmış güncel bir optimizasyon yöntemidir. Tez kapsamında hedef-ilk algoritması ile yeni fotonik yapılar tasarlanmıştır. Amaçlanan yapılarda elde etmek istediğimiz özelliklere ait fiziksel fenomenler sınır-değer problemi olarak algoritmaya tanımlanmış ve tasarımı yapılan yapıların FTDT yöntemini kullanan ticari bir programla sağlanması ve incelenmesi yapılmıştır [61].

Tasarımı yapılan optik kovuk çalışmasında dielektrik ayna yapısının düzensiz malzeme yapısında elde edilmesi sağlanmıştır. Genelde düzenli kristal yapılarında kusur yaratılarak yapılan kavite çalışmalarından farklı olarak yarıçap, indis gibi parametrelerin elle değişimine gerek kalmadan amaçlanan frekansta rezonans elde edilmiştir. Daha yüksek kalite ve daha düşük mod hacmi için geliştirmeye açık olan bu tasarım da iki tarafında doğrusal ayna içeren temel optik kovuk yapısındaki fiziksel fenomenleri kullanır.

Hedef-ilk algoritması ile tasarımı yapılmış filtre yapılarında ise, algoritma birden fazla amaç için etkin şekilde kullanılmıştır. Filtre tasarımlarını yansıtma tabanlı yapmak amacıyla izole edilmek istenen frekanslar için yapının başlangıcında faz ilerlemesi ters olarak tanımlanarak yapıya hiç nüfus edmeden yapının başından yansıtılır. İzole edilmek için kullanılan başka bir yöntem ise topraklama portlu filtre tasarımı ile mümkün olmuştur. Çentik filtre tasarımında bu yöntem kullanılmıştır. Yüksek iletim sağlanmak istenen frekanslar içinse algoritmanın literatürde ilk çıkış noktası olan yüksek iletim hedefli tasarımında olduğu gibi iletimin mümkün olduğu kadar yüksek olması hedeflenir. Ancak belirli aralıklarla birden fazla frekans noktasında yüksek iletim hedeflenerek iletim bant genişliği arttırılmıştır. Fotonik filtrelerin tasarımında genel olarak kullanılan yöntem olan yasaklı bant aralığının kaydırılmasına gerek kalmadan amaç frekanslarına uygun olarak tasarım elde edilmiştir.

Hedef-ilk tersine algoritma literatürde henüz tasarlanmamış pek çok iki boyutlu lineer fotonik cihaza tasarımı için gelecek vaat etmektedir. Fotonik aygıt tasarımında

incelenmesi gereken devasa parametre havuzu için amaca yönelik araştırmayı otomatik hale getirmesi önemli bir avantajdır. Sürekli dielektrik dağılım içeren çözüm kümesinde çalışmasından kaynaklanan dezavantajın geliştirilecek yeni ayrıklaştırma yöntemleriyle bertaraf etmek mümkündür.



KAYNAKLAR

- [1] **Maiman, T. H.**, (1960). Stimulated optical radiation in Ruby, *Nature*, 187, 493-494.
- [2] **Amiri, I., Azzuhri, S., Jalil, M., Hairi, H., Ali, J., Bunruangses, M., Yupapin, P.**, (2018). Introduction to Photonics: Principles and the Most Recent Applications of Microstructures. *Micromachines*, 9, 452.
- [3] Joannopoulos J J D, Johnson S, Winn J N J and Meade R R D 2008 *Photonic crystals: molding the flow of light* (Princeton: Princeton University Press)
- [4] **Hwang, M. S., Kim, H. R., Kim, K. H., Jeong, K. Y., Park, J. S., Choi, J. H., Kang, J. H., Lee, J. M., Park, W. Il., Song, J. H., Seo, M. K., Park, H. G.**, (2017) Switching of Photonic Crystal Lasers by Graphene. *Nano Lett.*, 17, 1892–8
- [5] **Ge, X., Shi, Y., He, S.**, (2014). Ultra-compact channel drop filter based on photonic crystal nanobeam cavities utilizing a resonant tunneling effect. *Opt. Lett.*, 39, 6973.
- [6] **Poulton, C. P., Zeng, X., Wade, T. M., Popović, M.A.**, (2015). Channel add-drop filter based on dual photonic crystal cavities in push-pull mode. *Opt. Lett.*, 40, 4206-4209.
- [7] **Yang, D., Tian, H., Ji, Y.**, (2015). High-Q and high-sensitivity width-modulated photonic crystal single nanobeam air-mode cavity for refractive index sensing. *Appl. Opt.*, 54, 1.
- [8] **Eichenfield, M., Chan, J., Camacho, R. M., Vahala, K. J., Painter, O.**, (2009). Optomechanical crystals. *Nature*, 462, 78–82.
- [9] **Carter, S. G., Sweeney, T. M., Kim, M., Kim, C. S., Solenov, D., Economou, S. E., Reinecke, T. L., Yang, L., Bracker, A. S., Gammon, D.**, (2013). Quantum control of a spin qubit coupled to a photonic crystal cavity. *Nat. Photonics*, 7, 329–34.
- [10] **Yablonovitch, E.**, (1987). Inhibited spontaneous emission in solid state physics and electronics, *Physical Review Letters*, 58, 2059-2062.

- [11] **John, S.**, (1987). Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices. *Phys. Rev. Lett.*, 58, 2486–9.
- [12] **Xu, Q., Schmidt, B., Pradhan, S., Lipson, M.**, (2005). Micrometre-scale silicon electro-optic modulator. *Nature*, 435, 325–7.
- [13] **Sun, J., Timurdogan, E., Yaacobi, A., Hosseini, E. S., Watts, M. R.**, (2013). Large-scale nanophotonic phased array. *Nature*, 493, 195–9.
- [14] **Lu, J.** (2013), *Nanophotonic Computational Design* (doktora tezi). Adres: https://web.stanford.edu/group/nqp/jv_files/thesis/Jesse-thesis.pdf
- [15] **Elesin, Y., Lazarov, B. S., Jensen, J. S., Sigmund, O.**, (2012). Design of robust and efficient photonic switches using topology optimization. *Photonics Nanostructures - Fundam. Appl.*, 10, 153–65.
- [16] **Martinelli, L., Jameson, A.**, (2012). Computational Aerodynamics: Solvers and Shape Optimization. *J. Heat Transfer*, 135, 011002.
- [17] **Bendsøe, M. P., Sigmund, O.**, (1999). Material interpolation schemes in topology optimization. *Arch. Appl. Mech.*, 69, 635–54.
- [18] **Marqués-hueso, J., Sanchis, L., Cluzel, B., Fornel, F. De., Martínez-pastor, J.P.**, (2017). Genetic algorithm designed silicon integrated photonic lens operating at 1550 nm. *Appl. Phys. Lett.*, 97, 071115.
- [19] **Preble, S., Lipson, M., Lipson, H., Preble, S., Lipson, M.**, (2014). Two-dimensional photonic crystals designed by evolutionary algorithms. *Appl. Phys. Lett.*, 86, 061111.
- [20] **Kao, C. Y., Osher, S., Yablonovitch, E.**, (2005). Maximizing Band Gaps in Two-Dimensional Photonic Crystals by Using Level Set Methods. *Appl. Phys.*, 81, 235–44.
- [21] **Abedi, K., Mirjalili, S. M.**, (2015). Slow light performance enhancement of Bragg slot photonic crystal waveguide with particle swarm optimization algorithm. *Opt. Commun.*, 339, 7–13.
- [22] **Miyazaki, H. T., Ha, A.**, (2006). Inverse Design for Full Control of Spontaneous Emission Using Light Emitting Scattering Optical Elements. *Physical Review Letters*, 96, 153902.
- [23] **Richardson, D. J.**, (2005). Inverse design and fabrication tolerances of ultra-flattened dispersion holey fibers. *Optics Express*, 13, 3728–36.
- [24] **Triltsch, U., Phataralaoha, A., Straube, D., Franke, J.**, (2006). Optimization of lithographic masks using genetic algorithms. *Analog Integr Circ Sig*

Proces, 48, 49–56.

- [25] **Goh, J., Fushman, I., Englund, D. Vuckovic, J.,** (2007). Genetic optimization of photonic bandgap structures. *Optics Express*, 15, 8218–30.
- [26] **Lu, J., Vuckovic, J.,** (2010). Inverse design of nanophotonic structures using complementary convex optimization. *Opt. Express*, 18, 3793–804. [27] **Lu, J., Vuckovic, J.,** (2013). Nanophotonic computational design. *Opt. Express*, 21, 13351.
- [28] **Lu, J., Vuckovic, J.,** (2012). Small-Footprint Couplers Between Arbitrary Nanophotonic Waveguide Modes. *C 20*, 7221–36.
- [29] **Callewaert, F., Butun, S., Li, Z. Aydin, K.,** (2016). Inverse design of an ultra-compact broadband optical diode based on asymmetric spatial mode conversion. *Sci. Rep.*, 6, 1–10.
- [30] **Frandsen, L. H., Elesin, Y., Frelsen, L. F., Mitrovic, M., Ding, Y., Sigmund, O., Yvind, K.,** (2014). Topology optimized mode conversion in a photonic crystal waveguide fabricated in silicon- on-insulator material. 22, 9444–50.
- [31] **Matlab software for disciplined convex programming**, <http://cvxr.com/cvx/>
- [32] **Lu, J., Vuckovic, J.,** (2013). Numerical Methods for Metamaterial Design, Diest (Springer)
- [33] **Piggott, A. Y., Su, L., Sapra, N. V., Petykiewicz, J. Vuckovic, J.,** (2018) Fabrication Constrained Inverse Design of a 3-channel Wavelength Demultiplexer. *Conf. Lasers Electro-Optics, CLEO 2018 - Proc.* 3–4
- [34] **Callewaert, F., Velev, V., Jiang, S., Sahakian, A. V., Kumar, P., Aydin, K.,** (2018). Inverse-designed stretchable metalens with tunable focal distance. *Appl. Phys. Lett.*, 112, 1–5.
- [35] **Callewaert, F., Velev, V., Kumar, P., Sahakian, A. V., Aydin, K.,** (2018). Inverse-Designed Broadband All-Dielectric Electromagnetic Metadevices, *Sci. Rep.*, 8, 1–8.
- [36] **Lu, J., Boyd, S., Vučković, J.,** (2011). Inverse design of a three-dimensional nanophotonic resonator. *Opt. Express*, 19, 10563.
- [37] **Tutgun, M., Alpkılıç, A. M., Yılmaz Y. A., Yeltik, A., Yılmaz, D., Kurt, H.,** (2018). On-chip photonic filter design via objective-first algorithm. *SPIE Optics Photonics*, San Diego, United States, 19-23 August.
- [38] **Tutgun, M., Yılmaz Y. A., Yeltik, A., Yılmaz, D., Alpkılıç, A. M., Kurt, H.,**

- (2018). Inverse Design of Next-Generation Nanophotonic Devices. *26th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*, , İzmir, Türkiye, 2-5 Mayıs.
- [39] **Yılmaz, D., Tutgun, M., Yılmaz, Y.A., Alpkilic, A. M., Yeltik, A., Kurt, H.,** (2018). Design of Nanobeam Cavity with Inverse Objective- First Algorithm. *26th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*, İzmir, Türkiye, 2-5 Mayıs.
- [40] **Zhang, Y., Khan, M., Huang, Y., Ryou, J., Deotare, P., Dupuis, R., Lončar, M.,** (2010). Photonic crystal nanobeam lasers. *Appl. Phys. Lett.*, 97, 051104
- [41] **Belotti, M., Galli, M., Gerace, D., Andreani, L. C., Guizzetti, G., Zain, A. R., Johnson, N. P., Sorel, M., Rue, R. M. D.,** (2010). All-optical switching in silicon-on-insulator photonic wire nano – cavities. *Opt. Express*, 18, 3140–8.
- [42] **O’Brien, J. L., Furusawa, A., Vučković, J.,** (2009). Photonic quantum technologies. *Nat. Photonics*, 3, 687–95.
- [43] **Quan. Q., Floyd, D. L , Burgess, I. B., Deotare, P. B., Frank, I. W., Tang, S. K., Ilic, R., Loncar, M.,** (2013). Single particle detection in CMOS compatible photonic crystal nanobeam cavities. *Opt. Express*, 21, 32225.
- [44] **Tandaechanurat, A., Ishida, S., Guimard, D., Nomura, M., Iwamoto, S., Arakawa, Y.,** (2011). Lasing oscillation in a three-dimensional photonic crystal nanocavity with a complete bandgap. *Nat. Photonics*, 5, 91–4.
- [45] **Englund, D., Fushman, I., Vuckovic, J.,** (2005). General Recipe for Designing Photonic Crystal Cavities. 1, 1708–19.
- [46] **Hu, S., Weiss, S. M.,** (2016). Design of Photonic Crystal Cavities for Extreme Light Concentration. *ACS Photonics*, 3, 1647–53.
- [47] **Quan, Q., Burgess, I. B., Tang, S. K. Y., Floyd, D. L., Loncar. M.,** (2011). Deterministic design of wavelength scale, ultra-high Q photonic crystal nanobeam cavities. *Opt. Express*, 19, 258–65.
- [48] **Kasap, S.O.,** (2001). *Optoelectronics and Photonics: Principles and Practices*, Prentice Hall.
- [49] **Wilson, J., Hawkes, J.,** (1998). *Optoelectronics: ann Introduction (3rd Edition)*,

Prentice Hall PTR.

- [50] Grieco, A., Slutsky, B., Tan, D.T.H., Zamek, S., Nezhad, M. P., Fainman, Y., (2012). Optical bistability in a silicon waveguide distributed bragg reflector Fabry-pérot resonator. *J. Light. Technol.*, 30, 2352–5.
- [51] Coluccelli, N., Cassinerio, M., Redding, B., Cao, H., Laporta, P., Galzerano, G., (2016). The optical frequency comb fibre spectrometer. *Nat. Commun*, 7,1–11.
- [52] Liu. X-L., Liu, H-N., Wu, J-B., Wu, H-X., Zhang, T., Zhao, W-Q., Tan, P-H., (2017). Filter-based ultralow-frequency Raman measurement down to 2 cm^{-1} for fast Brillouin spectroscopy measurement. *Rev. Sci. Instrum*, 88, 53110.
- [53] Reichman, J., (2017). *Handbook of optical filters for fluorescence microscopy* (Chroma Technology Corp An Employee-Owned Company)
- [54] Oskooi, A., Mutapcic, A., Noda, S., Joannopoulos, J. D., Boyd, S. P., Johnson, S. G., (2012). Robust optimization of adiabatic tapers for coupling to slow-light photonic-crystal waveguides. *Opt. Express*, 20, 21558.
- [55] Weng, T. W., Melati, D., Melloni, A., Daniel, L., (2017) Stochastic simulation and robust design optimization of integrated photonic filters. *Nanophotonics*, 6, 299–308.
- [56] Feng, S., Wang Y., (2013). Unidirectional wavelength filtering characteristics of the two-dimensional triangular-lattice photonic crystal structures with elliptical defects. *Opt. Mater. (Amst)*, 35, 2166–70.
- [57] Horie, Y., Arbabi, A., Han, S., Faraon, A. (2015). High resolution on-chip optical filter array based on double subwavelength grating reflectors. *Opt. Express*, 23, 29848.
- [58] Hassan, A. S. O., Mohamed, A. S. A., Maghrabi, M.M.T., Rafat, N. H., (2015). Optimal design of one-dimensional photonic crystal filters using minimax optimization approach. *Appl. Opt*, 54, 1399–409.
- [59] Mirjalili, S. M., Merikhi, B., Mirjalili, S. Z., Zoghi, M., Mirjalili, S., (2017). Multi-objective versus single-objective optimization frameworks for designing photonic crystal filters. *Appl. Opt*, 56 9444–51.
- [60] Yang, H., Peng, S., Meng, S., (2017). Optimization of photonic crystal filter based on slack variables, *Opt. Appl*. 47, 621–33.

[61] **Lumerical FDTD Solutions, Inc.**, <http://www.lumerical.com>



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Mediha TUTGUN
Uyruđu : Türkiye Cumhuriyeti
Dođum Tarihi ve Yeri : 01.01.1984-ANKARA
E-posta : mtutgun@etu.edu.tr

ÖĐRENİM DURUMU:

Lisans :2007, Anadolu Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM:

Yıl	Yer	Görev
2007-2015	Türk Telekom	Veri Uzman Mühendisi
2016-2018	TOBB Ekonomi ve Tekn. Üniv.	Proje Burslu Y. Lisans Öğrencisi

YABANCI DİL: İngilizce

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR:

- **Tutgun M.,** Yeltik A., Yimaz Y.A., Kurt H., 2017, Inverse Photonic Design of Alignment Tolerant Coupler, 13th Nanoscience&Nanotechnology Conference, 22-25 October, Antalya, Türkiye.
- **Tutgun M.,** Yimaz Y.A., Yeltik A., Yilmaz D., Alpkilic A.M., Kurt H., 2018, Inverse Design of Next-Generation Nanophotonic Devices, 26th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), 2-5 May, İzmir, Türkiye.

- Yimaz Y.A., **Tutgun M.**, Yeltik A., Yilmaz D., Kurt H., 2018, Design of nanobeam cavity with inverse objective-first algorithm, 26th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), 2-5 May, İzmir, Türkiye.
- **Tutgun M.**, Alpkilic A.M., Yimaz Y.A., Yeltik A., Yilmaz D., Kurt H., 2018, High-Efficient On-Chip Optical Filters via Objective-First Algorithm, SPIE Optics Photonics, 19-23 August, San Diego, United States.
- Yimaz Y.A., Alpkilic A.M., Yeltik A., **Tutgun M.**, Yilmaz D., Kurt H., 2018, Inverse Design of High-Efficient and Compact 1xN Wavelength Demultiplexer, SPIE Optics Photonics, 19-23 August, San Diego, United States.

DİĞER YAYINLAR:

- **Tutgun M.**, Can M.G., Kurt. H., 2017. Engineering defect modes in symmetry reduced 1D photonic crystal nanobeam waveguide, In Numerical Simulation of Optoelectronic Devices (NUSOD), July 24-28, Copenhagen, Denmark.
- Yimaz D., **Tutgun M.**, Kurt H., 2018, Strong Light Confinement of Tunable Resonances in Low Symmetric Quasicrystal through Orientational Variations, SPIE Europe, April 22-26, Strasbourg, France.