

TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FOTONİK YAPILARIN ENİYİLEME ALGORİTMASI İLE TASARIMI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Emre BOR

Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Hamza KURT

ARALIK 2016

Fen Bilimleri Enstitüsü Onayı

.....
Prof. Dr. Osman EROĞUL
Müdür

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

.....
Doç. Dr. Tolga GİRİCİ
Anabilimdalı Başkanı

TOBB ETÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün **141211004** numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Emre BOR**'un ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**FOTONİK YAPILARIN ENİYİLEME ALGORİTMASI İLE TASARIMI**” başlıklı tezi **01.12.2016** tarihinde aşağıda imzaları olan jüri tarafından kabul edilmiştir.

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

Eş Danışman : **Yrd. Doç. Dr. Mirbek TURDUEV**
TED Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Yrd. Doç. Dr. Rohat MELİK (Başkan)**
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Çiçek BOZTUĞ
TED Üniversitesi

Doç. Dr. Ali BOZBEY
TOBB Ekonomi ve Teknoloji 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.

Emre BOR

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

FOTONİK YAPILARIN ENİYİLEME ALGORİTMASI İLE TASARIMI

Emre BOR

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

Danışman: Prof. Dr. Hamza KURT

Tarih: Aralık 2016

Doğada bulunan malzemelerin farklı karakteristik özellikleri bulunmaktadır. Bu özelliklerden biri de maddenin ışık ile etkileşimine sebep olan kırıcılık indisidir. Farklı kırıcılık indislerine sahip dielektrik malzemelerin bir araya gelmesi ile fotonik kristaller oluşur. Fotonik kristaller bir, iki veya üç boyutlu periyodik ve dielektrik malzemelerden oluşan yapılardır. Fotonik kristaller ile ışığın hareketini farklı şekillerde kontrol etmek mümkündür.

Fotonik kristallerin ortaya çıkışında etkili olan en büyük özellikleri fotonik yasaklı band aralıklarına sahip olmalarıdır. Bunun anlamı, bir fotonik kristal üzerine gelen ışığın frekansı bu fotonik yasaklı band aralığında bulunuyor ise gelen ışık fotonik kristal içerisinde ilerleyemez. Fotonik yasaklı band aralığı özelliğinden faydalanarak farklı fotonik kristal yapılar tasarlanabilmektedir. Örneğin; fotonik kristaller üzerinde nokta kusur oluşturulduğunda fotonik kristal kavite yapıları tasarlanabilir. Bir başka örnek; fotonik kristal üzerinde bir çizgi kusur oluşturulursa fotonik kristal dalgakılavuzu yapısı elde edilebilir. Fotonik kristaller ile tasarlanabilen yapılar sadece fotonik yasaklı band aralığı esasına göre tasarlanmazlar. Örneğin bir fotonik kristal yapısı ile gelen ışığı odaklayabilen lens yapısı elde edilebilir. Fotonik kristallerde özkolimasyon, süper prizma, negatif kırılma ve yavaş ışık gibi

alışılmadık ışık hareketlerini gözlemlemek de mümkündür. Ayrıca, fotonik kristaller ile biyokimyasal algılayıcı yapılar da tasarlanabilir.

Fotonik kristaller genellikle elle tasarlanan basit yapılardır. Karmaşık fotonik kristallerin daha iyi sonuçlar verebildiği bilinmektedir. Ancak yüksek performansa sahip karmaşık fotonik kristalleri analitik teori ve tahminler ile tasarlamak oldukça sınırlıdır. Bu sebeple, yüksek performansa sahip karmaşık fotonik kristalleri tasarlarken bir eniyileme algoritması kullanmak iyi bir çözüm olabilir.

Eniyileme algoritmaları, bir sistemin istenilen özelliklerini artırırken istenmeyen özelliklerini azaltmak için tasarım aşamasında kullanılan yöntemlerdir. Eniyileme algoritmaları genellikle doğadan veya evrim teorisinden esinlenilerek oluşturulan algoritmalarlardır. Eniyileme algoritmaları karmaşık tasarım problemleri için iyi birer aday sonuç verebilmektedir. Fotonik kristal tasarımı da karmaşık bir problem olduğu için eniyileme algoritmaları kullanarak fotonik kristal tasarlama fikri son yıllarda oldukça dikkat çekmiştir. Çünkü eniyileme algoritması ile tasarlanan fotonik kristaller oldukça iyi özelliklere sahip olabilmektedirler.

Bu tez kapsamında eniyileme algoritması kullanılarak çeşitli fotonik kristal yapıları tasarlanmıştır. Eniyileme algoritması olarak bir çeşit evrimsel algoritma olan Diferansiyel Evrim algoritması kullanılmıştır. Diferansiyel Evrim algoritmasının yaygın olarak kullanılan diğer eniyileme algoritmalarına kıyasla daha iyi sonuçlar üretebildiği gösterilmiştir. Diferansiyel Evrim algoritması kullanılarak dalgaboyu altında odaklayan fotonik kristal lens yapıları tasarlanmıştır. Fotonik kristallerin birim hücrelerinde eniyileme yapılarak fotonik yasaklı band aralığı genişletilmiş ve bir fotonik kristal dalgakılavuzu yapısı tasarlanmıştır. Fotonik kristal kavite yapısının kavite bölgesi eniyileme algoritması ile değiştirilerek yüksek kalite faktörü elde edilmiştir.

Bu tez kapsamında yapılan çalışmalar sonucunda tasarlanan yapılar literatüre bir katkı yapmıştır. Ayrıca, Diferansiyel Evrim algoritmasının fotonik kristal tasarımlarında uygulanabilir olduğu gösterilmiştir ve literatüre yeni bir tasarım yöntemi kazandırılmıştır. Elde edilen sonuçlar ileride tasarlanacak fotonik kristal yapıları için umut vericidir.

Anahtar Kelimeler: Fotonik kristaller, Diferansiyel evrim, Dalgaboyu altında odaklama, Fotonik yasaklı bant aralığı, Dalgakılavuzu, Kavite.

ABSTRACT

Master of Science

DESIGNING PHOTONIC STRUCTURES BY USING AN OPTIMIZATION

ALGORITHM

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: December 2016

Materials in nature have different characteristic properties. One of these properties is refractive index which leads to light-matter interaction. Photonic crystals consist of dielectric materials with different refractive index values. Photonic crystals are periodically designed dielectric structures and their periodicity can be one, two, or three dimensional. One can achieve different light manipulation scenarios by using photonic crystals.

The main phenomena behind the revelation of photonic crystal is the photonic band gap which means that if a frequency of an incident wave is in the frequency interval of a photonic band gap, the incident wave cannot propagate through the photonic crystal structure. Taking advantage of photonic band gaps, various photonic crystal structures can be designed. For instance, by introducing a point defect in a photonic crystal, a photonic crystal cavity structure can be designed. Another example is that by introducing a line defect in a photonic crystal, one can design a waveguide structure. Photonic crystal structures are not only designed based on photonic band gap phenomena. For example, a photonic crystal lens structure can be designed to focus an incident wave. Also, anomalous light behaviors such as self-collimation, superprism, negative refraction and slow light phenomena can be observed in

photonic crystals. Besides, a bio-chemical sensor structure can be designed by using photonic crystals.

In general, photonic crystals are simple and designed by hand. And it is known that complex photonic crystal structures can have high performance. However, designing complex structures with high performance based on analytical theory and an intuition approach is limited. For this reason, using an optimization algorithm to design a photonic crystal with high performance can be a good solution.

Optimization algorithms are used to increase the desired property and decrease the undesired property of a system during the design process of that system. In general, optimization algorithms are created as algorithms which are inspired by nature or theory of evolution. Optimization algorithms can produce good candidate solutions for complex design problems. Since designing a photonic crystals can be a complex problem, idea of using an optimization algorithm to design a photonic crystal structures has taken great attention in recent years because a photonic crystal that is designed by using an optimization algorithm can possess very good properties.

In this dissertation, various photonic crystal structures are designed by using an optimization algorithm. Differential Evolution, which is an evolutionary algorithm, is selected as an optimization algorithm in this dissertation. It is shown that Differential Evolution can produce better solutions than the other well known optimization algorithms can. By using Differential Evolution, subwavelength focusing photonic crystal lens structures are designed. And by optimizing the unit cell of a photonic crystal, photonic band gap is widened and a waveguide structure is designed. Also, cavity region of a photonic crystal cavity structure is optimized to obtain a high quality factor value.

As a result of the studies in this dissertation, the designed structures are brought to the literature. Also, it is shown that Differential Evolution can be used to design photonic crystal structures and a new approach to design a photonic crystal is introduced. The obtained results are promising for the photonic crystals that will be designed in the future.

Keywords: Photonic crystals, Differential evolution, Subwavelength focusing, Photonic band gap, Waveguide, Cavity.

TEŞEKKÜR

Çalıőmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren hocalarım Hamza KURT'a ve Mirbek TURDUEV'e, kıymetli tecrübelerinden faydalandığım TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerine, araőtırmalarımnda bana yardımcı olan İbrahim Halil GİDEN'e, Zeki HAYRAN'a ve tüm diğer TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Nanofotonik Araştırma Grubu üyelerine, TED Üniversitesi çalıőanlarına ve destekleriyle her zaman yanımda olan aileme ve arkadaşlarıma çok teşekkür ederim. Yüksek lisans eğitimim sırasında bana araştırma bursundan yararlanma imkanı sunan TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi'ne ve bu tez kapsamında yapılan çalışmaları bünyesindeki Bilimsel Araştırma Projesi kapsamında destekleyen TED Üniversitesi'ne (TEDU BAP 15A301) teőekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİL LİSTESİ	x
ÇİZELGE LİSTESİ	xii
KISALTMALAR	xiii
SEMBOL LİSTESİ	xiv
1. GİRİŞ	1
2. FOTONİK KRİSTALLER	5
3. ALGORİTMA İLE TASARLANAN FOTONİK KRİSTALLER	11
4. DİFERANSİYEL EVRİM ALGORİTMASI	19
4.1 Diferansiyel Evrim Algoritması ve Mekanizmaları	20
4.1.1 Popülasyon kavramı	21
4.1.2 Genel gösterim	22
4.1.3 Başlangıç popülasyonu	23
4.1.4 Mutasyon mekanizması	24
4.1.5 Çaprazlama mekanizması	26
4.1.5.1 Tek noktada çaprazlama	27
4.1.5.2 N noktada çaprazlama	27
4.1.5.3 Üstel çaprazlama	28
4.1.5.4 Binom çaprazlama	29
4.1.6 Seçim	30
4.2 Diferansiyel Evrim Algoritması'nın Karşılaştırılması ve Kullanımı	32
5. DİFERANSİYEL EVRİM İLE FOTONİK KRİSTAL TASARIMI	35
5.1 Dalgaboyu Altında Odaklayan Fotonik Aygıt Tasarımı.....	35
5.2 Dalgaboyu Altında Odaklayan Küçük Boyutlu Fotonik Aygıt Tasarımı	55
5.3 Birim Hücre Eniyilemesi ile FYBA'nın Genişletilmesi	61
5.4 Yüksek Kalite Faktörlü FK Kavite Tasarımı	71
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	83
KAYNAKLAR	87
ÖZGEÇMİŞ	95

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Tavus kuşunun fotoğrafı ve tüylerinin üzerindeki FK yapıları	2
Şekil 1.2 : Bukalemunun renk değiştirmesi ve derisinin üzerindeki FK yapıları.....	3
Şekil 2.1 : Bir, iki ve üç boyutlu FK'ler.....	5
Şekil 2.2 : Kare örgü ve üçgen örgü yapılar için bant diyagramları.....	6
Şekil 2.3 : FK kavite ve dalgakılavuzu yapıları	9
Şekil 3.1 : GA ile tasarlanan çiftleyici yapısına ait şiddet dağılımı	12
Şekil 3.2 : Yapıya ait şiddet dağılımı ve çıkışındaki kesit profili.....	13
Şekil 3.3 : Mod çeviriciye ait anlık elektrik alan görüntüsü	14
Şekil 3.4 : Dalgaboyu ayırıcı yapısı ve şiddet dağılımları	15
Şekil 3.5 : Üretilen yapının görüntüsü ve şiddet dağılımları.....	16
Şekil 4.1 : Tek noktada çaprazlama	27
Şekil 4.2 : N noktada çaprazlama	28
Şekil 4.3 : Üstel çaprazlama	28
Şekil 4.4 : Binom çaprazlama.....	29
Şekil 4.5 : DE akış şeması.....	31
Şekil 4.6 : Maliyet fonksiyonunun aldığı değerın iterasyona göre değişimi.....	34
Şekil 5.1 : DE kullanılan tasarım yöntemi	38
Şekil 5.2 : Minimum ve maksimum birim hücre boyutları için (a) bant diyagramları ve (b) grup kırıcılık indisleri. (c) DE ile tasarlanan yapının görüntüsü...	40
Şekil 5.3 : $a/\lambda=0.11$ ve $a/\lambda=0.12$ normalize frekanslarında tasarlanan FK'lere ait şiddet dağılımları ve odak notkası kesit profilleri	44
Şekil 5.4 : $a/\lambda=0.13$ ve $a/\lambda=0.14$ normalize frekanslarında tasarlanan FK'lere ait şiddet dağılımları ve odak notkası kesit profilleri.....	45
Şekil 5.5 : $a/\lambda=0.11$ ve $a/\lambda=0.12$ normalize frekanslarında tasarlanan FK'lere ait FWHM değerlerinin odak uzaklığına göre değişim grafikleri.....	46
Şekil 5.6 : $a/\lambda=0.13$ ve $a/\lambda=0.14$ normalize frekanslarında tasarlanan FK'lere ait FWHM değerlerinin odak uzaklığına göre değişim grafikleri.....	47
Şekil 5.7 : Deney düzeneğinin şematığı ve tasarlanan en iyi FK'in fotoğrafı.....	49
Şekil 5.8 : Deneyde elde edilen odak noktası kesiti ve yapıdan sonraki alana ait şiddet dağılımı.	50
Şekil 5.9 : Deneysel olarak ölçülen FWHM değerlerinin odak noktasına göre değişimi.....	51
Şekil 5.10 : (a) Nümerik ve (b) deneysel olarak elde edilen odak noktası kesit profillerinin frekansa göre değişimleri	53
Şekil 5.11 : $a/\lambda=0.11$ (4.25GHz) ve $a/\lambda=0.12$ (4.64GHz) için nümerik ve deneysel odak noktası kesit profilleri.....	54
Şekil 5.12 : $a/\lambda=0.13$ (5.03GHz) ve $a/\lambda=0.14$ (5.42GHz) için nümerik ve deneysel odak noktası kesit profilleri.....	55
Şekil 5.13 : DE ile FK tasarım yöntemi	59

Şekil 5.14 : (a) Nümerik ve (b) deneysel şiddet dağılımları. (c) nümerik ve deneysel odak noktası kesit profilleri.....	60
Şekil 5.15 : Deney düzeneğinin ve tasarlanan FK'in fotoğrafı.....	61
Şekil 5.16 : (a) Tasarlanan birim hücre ve Brillouin bölgesinin köşe noktaları. (b) Tasarlanan birim hücreye ait TM polarizasyonu için birinci ve ikinci iletim bantlarını gösteren bant diyagramı	65
Şekil 5.17 : (a) Birim hücrenin kare örgüde dizilmesi ile elde edilen FK yapısı ve (b) bu yapıya ait iletim grafiği	66
Şekil 5.18 : (a) Tasarlanan FK dalgakılavuzu yapısı. (b) Dalgakılavuzunu PWE ile incelerken kullanılan süper hücre. (c) Dalgakılavuzu içerisinde ilerleyen modun elektrik alan görüntüsü	68
Şekil 5.19 : (a) Dalgakılavuzu içerisinde ilerleyen modun bant diyagramında gösterimi. (b) Dalgakılavuzu yapısının iletim verimliliği. (c) $a/\lambda=0.383$ normalize frekansında dalgakılavuzu içerisinde ilerleyen elektrik alan dağılımının anlık görüntüsü	69
Şekil 5.20 : Katman kalınlığının FYBA'na etkisi	75
Şekil 5.21 : L3 kavitesinde DE ile eniyilenecek hava boşlukları.....	76
Şekil 5.22 : (a) Tasarlanan yapının görüntüsü. (b) Tasarlanan kavite yapısındaki modun elektrik alan görüntüsü	79

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 5.1 : Dört farklı tasarlanan yapıya ait sonuçlar2

KISALTMALAR

FK	: Fotonik Kristal
FYBA	: Fotonik yasaklı bant aralığı
TE	: Enine elektrik (Transverse Electric)
TM	: Enine manyetik (Transverse Magnetic)
TFYBA	: Tam fotonik yasaklı bant aralığı
PWE	: Düzlem dalga açılımı (Plane Wave Expansion)
1B	: Bir boyutlu
2B	: İki boyutlu
3B	: Üç boyutlu
TIR	: Toplam iç yansıma (Total Internal Reflection)
DE	: Diferansiyel Evrim (Differential Evolution)
GA	: Genetik Algoritma (Genetic Algorithm)
PSO	: Parçacık Sürü Eniyilemesi (Particle Swarm Optimization)
ACO	: Karınca Kolonisi Algoritması (Ant Colony Optimization)
TO	: Topoloji Eniyilemesi (Topology Optimization)
GRIN	: Derecelendirilmiş kırıcılık indisi (Graded Index)
FWHM	: Maksimumun yarısında tüm genişlik (Full Width at Half Maximum)
MSL	: Maksimum yan kulakçık seviyesi (Maximum Sidelobe Level)
FDTD	: Sonlu farklar zaman boyutu (Finite Difference Time Domain)
PML	: Mükemmel eşlenmiş katmanlar (Perfectly Matched Layers)
SI	: Uluslararası Birimler Sistemi (Système International d'unités)

SEMBOL LİSTESİ

Bu çalışmada kullanılmış olan simgeler açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
a	Örgü sabiti
k	Dalgavektörü
λ	Dalgaboyu
N_p	Popülasyondaki birey sayısı
D	Bireydeki parameter sayısı
i	Birey indisi
j	Parametre indisi
g	İterasyon (nesil) indisi
x	Birey
v	Mutant vektör
u	Deneme vektörü
P	Popülasyon
b_j^L	Alt limit
b_j^U	Üst limit
F	Mutasyon faktörü
CR	Çaprazlama faktörü
E	Elektrik alan
H	Manyetik alan
n	Kırıcılık indisi
r	Yarıçap
Δx	Birim hücrenin x yönünde genişliği
Δy	Birim hücrenin y yönünde genişliği
a/λ	Normalize frekans
Si	Silikon
$GaAs$	Galyum arsenit
ΔF	Odak noktasının yapıdan uzaklığı
Q	Kalite faktörü
V	Mod hacmi
f	Frekans
c	Işık hızı

1. GİRİŞ

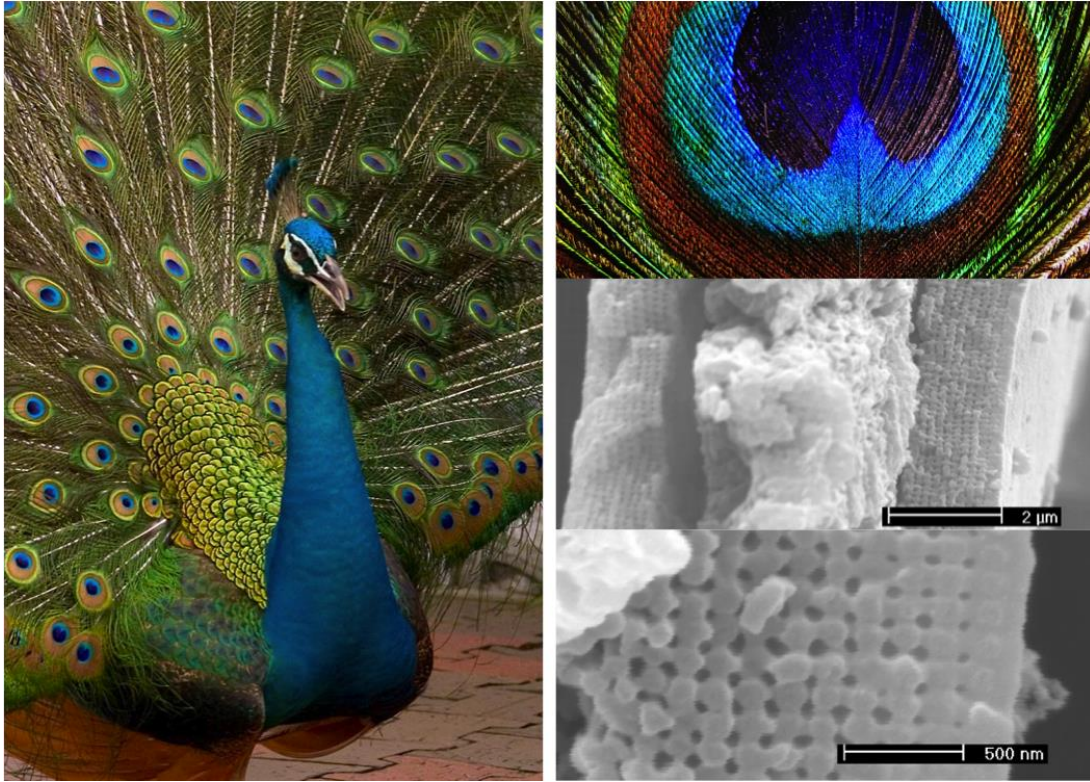
Doğadaki malzemelerin sahip olduğu karakteristik özellikler tarih boyunca farklı amaçlar için kullanılmıştır ve ortaya çok farklı bilim ve mühendislik dalları çıkmıştır. Transistörün icadı ile beraber malzemelerin elektriksel özelliklerinin önemi artmış ve teknoloji hızla gelişmeye başlamıştır. Gelişen teknoloji ile elektronik ve bilgisayar teknolojileri önemi kazanmış ve teknolojik gelişmeler günlük hayattaki uygulamalarda da yer edinmiştir. Yapılan çalışmalarda temel amaç veri iletimini ve işlenmesini iyileştirmek, bu sayede cihazların performanslarını yükseltmektir.

Günümüzde yaygın olarak kullanılan silikon tabanlı teknoloji, elektronların madde içerisindeki hareketleri esas alınarak geliştirilmiştir. Ancak doğadaki malzemeler sadece elektronlar ile etkileşime girmemektedir. Bir başka deyişle, malzemelerin sadece elektriksel özellikleri bulunmamaktadır. Malzemelerin sahip olduğu farklı özelliklerden bir diğeri ise optik özellikleridir, yani maddenin ışık ile etkileşimidir. Optik özellikler, elektromanyetik teori ve kuantum teorisi ile açıklanabilmektedir [1]. Malzemelerin optik özelliklerinin günümüz teknolojisi için kullanılabilecek duruma getirilmesini ve geliştirilmesini amaçlayan bilim dalı ise fotonik olarak bilinmektedir. Fotonik sayesinde veri iletimi ve işlenmesi için ışığı oluşturan parçacıkların yani fotonların kullanılabilmesi mümkündür. Fotonik alanı, haberleşme, silikon teknolojisi ile birleştirilerek entegre devre tasarımı ve biyokimyasal algılayıcılar gibi çok farklı konularda kendisine yer edinmiştir.

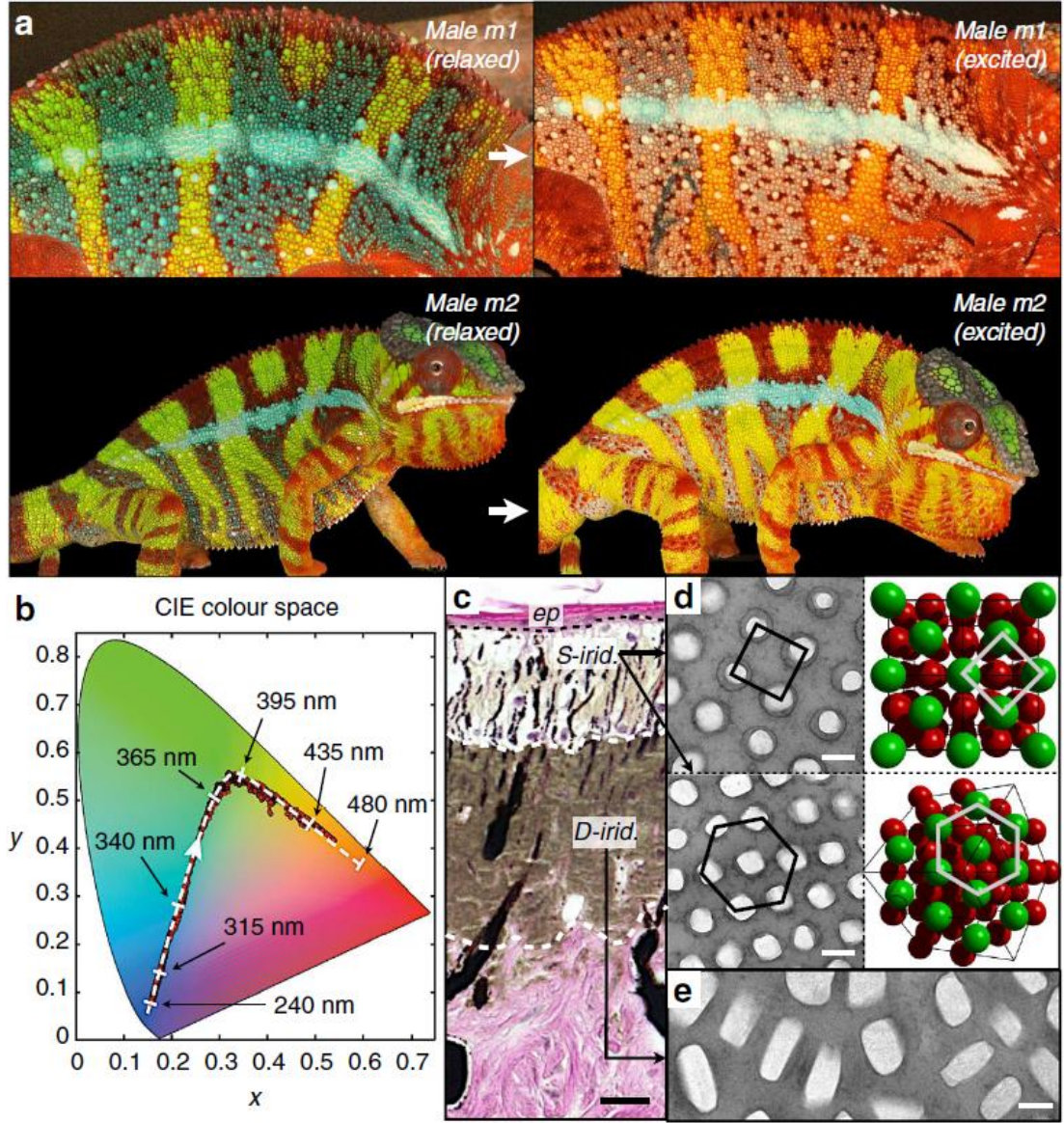
Fotonik biliminin günümüzdeki en önemli ürünlerinden biri ışığın hareketini kontrol edebilmeyi mümkün kılan fotonik kristal (FK) adı verilen fotonik aygıtlardır. Tüm bu çalışmaların temelinde FK'lerin fiziksel ve geometrik özellikleri bulunmaktadır. Bu sebeple, FK'lerin tasarımı fotonik alanındaki gelişmeler için büyük bir öneme sahiptir.

FK'ler sadece insan eliyle tasarlanan yapılar değildir. Doğada da FK'e rastlamak mümkündür. Örneğin, bir hayvanın tüylerinin veya derisinin rengi bilinen genel kanıya göre pigmentlerden kaynaklanmaktadır. Ancak bu durum her hayvan için

geçerli değil. Bazı hayvanların renklerini belirleyen etken ise hayvanların tüylerinde veya derilerinde yer alan FK'lerdir. Bunun sebebi hayvanın üzerinde bulunan farklı örgülerdeki FK'ler farklı dalgaboylarını yansıtmaktadır. Bunun sonucunda hayvanın tüyleri üzerinde farklı renklerin oluştuğu gözlemlenir. Örneğin; bir tavus kuşunun tüyleri ve bukalemunun derisi üzerinde bulunan FK'ler, hayvanların rengini belirlemektedir [2,3]. Bukalemunun renk değiştirme özelliği de derisi üzerindeki FK örgüsünü değiştirebilmesinden kaynaklanmaktadır. Tavus kuşunun tüyelerine ait görüntü Şekil 1.1'de ve bukalemunun derisine ait görüntü ise Şekil 1.2'de verilmiştir.



Şekil 1.1 : Tavus kuşunun fotoğrafı ve tüyelerinin üzerindeki FK yapıları [2].



Şekil 1.2 : Bukalemunun renk değiştirmesi ve derisinin üzerindeki FK yapıları [3].

Tezin ikinci bölümünde FK'ler ile ilgili bilgiler yer almaktadır. Bir FK içerisinde oluşan fotonik yasaklı bant aralığından (FYBA) bahsedilmiştir. FK içerisinde oluşturulan farklı kusurlar ile kavite ve dalgakılavuzu gibi fotonik yapıların nasıl oluşturulduğu anlatılmıştır.

Üçüncü bölüm literatür taramasına ayrılmıştır. Bu bölümde geçmişte algoritma kullanılarak tasarlanan FK yapılarından bahsedilmiştir.

Dördüncü bölüm Diferansiyel Evrim Algoritması'na ayrılmıştır. Bu bölümde, evrimsel algoritmaların ortaya çıkışı hakkında kısa bilgiler verilmiştir. Sonrasında Diferansiyel Evrim Algoritması'nın tüm mekanizmaları ayrıntılı bir şekilde

anlatılmıştır. Son olarak, Diferansiyel Evrim Algoritması'nın kullanımına yönelik bazı ipuçları ve bilinen bazı algoritmalar ile kıyaslanmasına dair bilgiler verilmiştir.

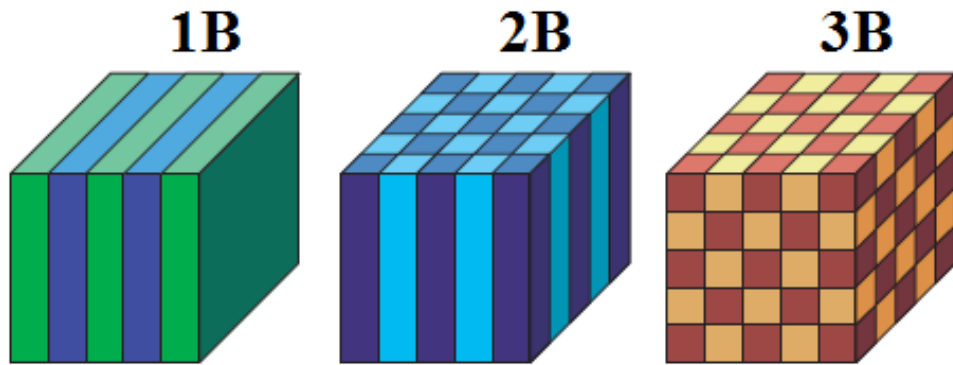
Beşinci bölüm, bu tez kapsamında yapılan çalışmaların anlatıldığı bölümdür. Bu bölümde öncelikle eniyileme algoritmaları kullanılarak tasarlanan fotonik yapılara ait literatürdeki çalışmalardan bahsedilmiştir. Sonrasında Diferansiyel Evrim Algoritması kullanılarak tasarlanan farklı fotonik aygıtlar sunulmuştur. Bu fotonik aygıtları tasarlamak için Diferansiyel Evrim Algoritması'nın nasıl kullanıldığı ve ortaya çıkan yapıların üstün özellikleri ayrıntılı bir şekilde anlatılmıştır. Tasarlanan yapılar arasında; dalgaboyu altında odaklayan FK lens yapıları, dalgakılavuzu ve kavite bulunmaktadır.

Tezin altıncı bölümünde, elde edilen sonuçlar üzerine yorumlar yapılmıştır ve gelecekte yapılabilecek çalışmalar hakkında önerilerde bulunulmuştur.

2. FOTONİK KRİSTALLER

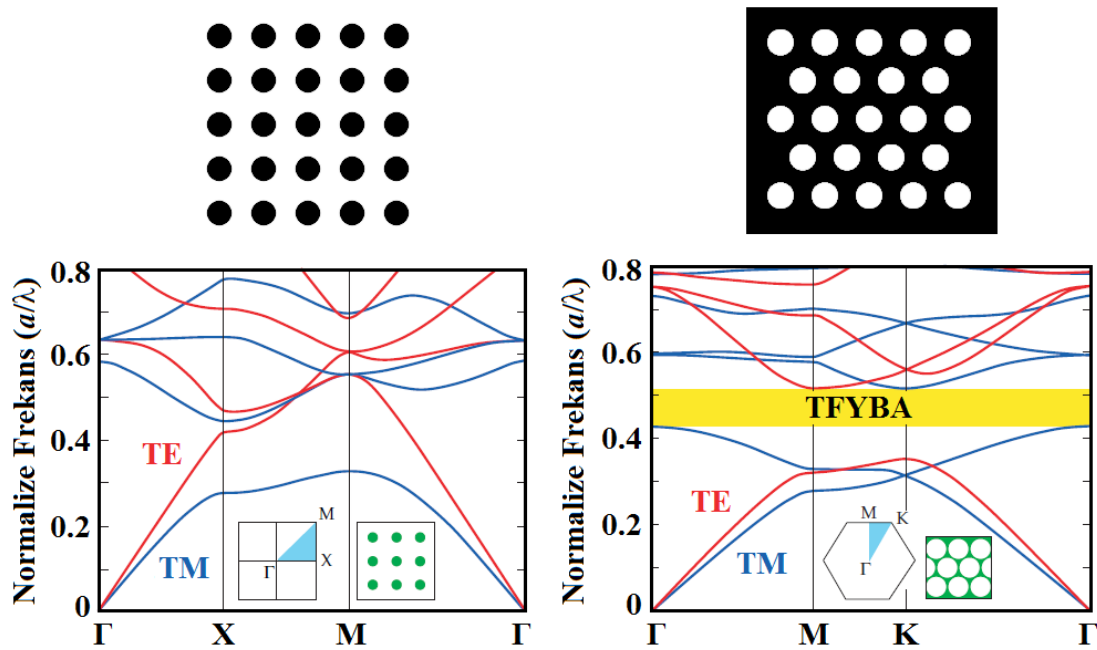
FK'ler dielektrik malzemelerin bir, iki veya üç boyutta periyodik olarak dizilmesi ile elde edilen fotonik yapılardır [4]. 1887 yılında Lord Rayleigh, tek boyutta ard arda dizilecek sonsuz sayıdaki dielektrik malzemelerin gelen ışığın tamamını yansıtabileceği fikrini sunmuştur [5]. Bu çalışma FK'lerin fotonik yasaklı bant aralığına sahip olduğuna işaret etmektedir. Bu çalışmadan sonra uzunca bir süre bu alanda önemli bir çalışma yapılmamıştır. Aradan geçen yüz yıllık bir sürenin ardından 1987 yılında Yablonovitch ve John, yaptıkları ayrı çalışmalar ile çok boyutlu FK'lerin tasarlanabileceğini ve FYBA'nın çok boyutlu yapılarda da ortaya çıkabildiğini göstermişlerdir [6,7].

Farklı dielektrik katmanların periyodik olarak dizilmesi ile elde edilen FK'lerin boyutlarına göre temsili gösterimi Şekil 2.1'de verilmiştir. Bir FK yapısının kaç boyutlu olduğu belirlenirken FK içerisinde bir noktadan hareketle bir eksen boyunca ilerlenir ve FK içerisinde dielektrik katmanın değişimi incelenir. Örneğin; Şekil 2.1'de solda görüldüğü üzere bir boyutlu FK yapısında bir nokta seçilirse ve sadece x eksenini yönünde ilerlendiği takdirde farklı dielektrik malzemeler ile karşılaşmaktadır. Bunun yanı sıra, aynı noktadan y ve z eksenleri yönünde ilerlendiğinde dielektrik sabitinde herhangi bir değişiklik olmamaktadır. Yani sadece tek boyutta dielektrik sabiti değişmektedir. Bu durumda tasarlanan FK yapısı tek boyutludur denilir. Benzer şekilde iki ve üç boyutlu FK yapıları da tanımlanabilir.



Şekil 2.1 : Bir, iki ve üç boyutlu FK'ler [2].

Bahsedildiği üzere, FK yapıları farklı dielektrik malzemelerden oluşmaktadır. Her malzeme sahip olduğu dielektrik sabitinden dolayı bir de kırıcılık indisi değerine sahiptir. Yani FK'ler farklı kırıcılık indisi değerlerine sahip malzemelerden oluşmaktadır. FK'leri tasarlarken her zaman iki farklı malzemenin kullanılması gerekmemektedir. FK'ler hava ortamında da tasarlanabilmektedir. Çünkü hava da bir kırıcılık indisi değerine sahiptir. Hava ortamına belirli aralıklarla bir dielektrik malzemeyi yerleştirerek de FK tasarlanması mümkündür. Benzer şekilde Bir dielektrik malzeme içerisinde belirli aralıklarla hava boşlukları açılarak da FK yapısı tasarlanabilir.



Şekil 2.2 : Kare örgü ve üçgen örgü yapılar için bant diyagramları [4].

FK'ler ışığı yani ışığı oluşturan ve foton adı verilen parçacıkların hareketini kontrol edebilmeyi sağlayan yapılardır. Optikte ışık, ışın ve dalga olarak ele alındığı gibi bir elektromanyetik dalga olarak da düşünülebilmektedir [1]. Bu noktada FK'lerin ışık ile etkileşimi aslında bir maddenin elektromanyetik bir dalga ile etkileşimi olarak da düşünülebilir. Elektromanyetik dalgalar farklı özelliklere sahip olabileceği için FK'ler ile etkileşimleri de farklı olmaktadır. Elektromanyetik dalgaların sahip olduğu ve FK'ler ile etkileşimlerindeki en önemli ayırt edici özellikleri polarizasyonlarıdır. Bir elektromanyetik dalga iki farklı polarizasyona yani enine elektrik (transverse electric, TE) veya enine manyetik (transverse magnetic, TM) polarizasyonlarından birine sahip olabilmektedir. Dalganın polarizasyonu belirlenirken dalganın ilerleme yönüne ve dalga içerisindeki elektrik alan (E) ve manyetik alan (H) bileşenlerine

bakılır. Örneğin; z eksenini yönünde ilerlemekte olan TE polarizasyonuna sahip bir elektromanyetik dalga ilerlediği yönde elektrik alan bileşenine E_z sahip olmayacaktır ama bu yönde manyetik alan bileşenine H_z sahip olacaktır. TM polarizasyona sahip z yönünde ilerlediği varsayılan bir elektromanyetik dalga için ise tam tersi bir durum söz konusudur. TM polarizasyonlu bu dalga elektrik alanının E_z bileşenine sahip olurken manyetik alanının H_z bileşenine sahip olmayacaktır [4].

FK'lerin sahip oldukları FYBA'ları da etkileşime geçtikleri elektromanyetik dalganın polarizasyonuna göre de değişiklik göstermektedir. Bunun sebebi, FK'lerin sahip olduğu farklı fiziksel ve geometrik tasarımlardır. FK'lerin tasarımları birbirlerine göre oldukça farklılıklar göstermektedir. En önemli farklılıklardan biri yapı örgüsüdür. Örneğin FK'ler kare veya üçgen şeklinde yapı örgülerine sahip olabilmektedirler. Şekil 2.2'de sol üstte, hava ortamında dielektrik silindirik çubukların kare örgüde dizilmesi sayesinde tasarlanan iki boyutlu FK yapısının üstten görünüşü verilmiştir. Yine Şekil 2.2'de sağ üstte, dielektrik ortamda üçgen yapı örgüsüne göre açılan hava boşlukları ile tasarlanan iki boyutlu FK yapısının üstten görünüşü verilmiştir. Şekil 2.2'deki kare örgü ile tasarlanan FK yapısı TM polarizasyonu için FYBA'na sahip olurken üçgen örgü ile tasarlanan FK yapısı hem TE hem de TM polarizasyonları için ortak bir FYBA'na yani tam fotonik yasaklı bant aralığına (TFYBA) sahip olmaktadır. FYBA, TE veya TM polarizasyonlardan birine sahip elektromanyetik dalganın FK yapısından geçemediği belirli bir frekans aralığı olarak tanımlanır. Eğer belirli bir frekans aralığında FK yapısı her iki polarizasyondaki elektromanyetik dalgaları da geçirmiyorsa, bu frekans aralığına TFYBA denir [4].

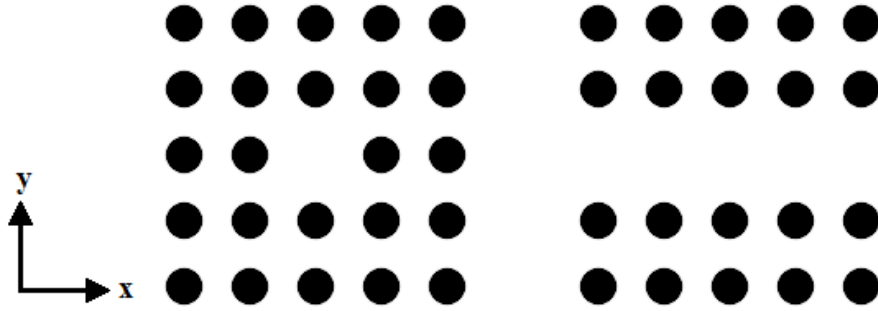
FK yapıları periyodik oldukları için bu yapıların içerisinde ilerleyen elektromanyetik dalgaları periyodik bir fonksiyon ile çarpılmış bir elektromanyetik dalga olarak ifade edebiliriz ve bu dalgalara Bloch dalgası denilmektedir [4,8]. Bir başka deyişle, bir düzlem dalgayı periyodik bir fonksiyon ile çarparsak Bloch dalgasını elde ederiz. Buradaki periyodik fonksiyon, FK yapısının sahip olduğu periyottur. Bloch dalgaları $2\pi/a$ ile periyodiktir. Burada a örgü periyodudur ve ölçeklenebilir bir değerdir. Bu sebeple, bir k dalgavektörünü $-\pi/a < k < \pi/a$ aralığında değerlere sahip olacak şekilde incelemek yeterli olacaktır. Bu aralık Brillouin bölgesi olarak adlandırılır. Şekil 2.2'de aşağıda iki FK yapısı için FYBA'larını gösteren bant diyagramları verilmiştir. Bant diyagramları hesaplanırken FK'lerin birim hücreleri spektral boyutta düzlem

dalga açılımı (plane wave expansion, PWE) yöntemi kullanılarak incelenir [9]. İncelemenin yapıldığı FK'ler döngüsel simetriye sahip ve periyodik oldukları için Brillouin bölgelerinin içerisinde analiz yapılır. Brillouin bölgesi ise kendi içerisindeki simetriden dolayı daha küçük parçalara ayrılabilir ve bu bölgeyi simetrik olarak oluşturabilecek en küçük parçaya indirgenemez Brillouin bölgesi denir. İndirgenemez Brillouin bölgesinin her köşesi simetri noktalarıdır ve bir karakter ile isimlendirilir [4]. Şekil 2.2'de verilen kare ve üçgen yapı örgülerine ait bant diyagramlarında simetri noktalarının genel notasyonda nasıl isimlendirildiği görülebilir. Ayrıca burada İndirgenemez Brillouin bölgeleri mavi renk ile belirtilmiştir.

Yapılan çalışmalarda en çok kullanılan FK'ler iki boyutludur. Bir boyutlu (1B) ve üç boyutlu (3B) FK'lere kıyasla iki boyutlu (2B) FK'lerin kullanılmasının bazı avantajları vardır. 2B FK'ler, 1B FK'lere göre daha fazla tasarım çeşitliliği sunmaktadır. Yine 2B FK'ler, 3B FK'lere göre ise üretimi daha kolay fotonik yapılardır. Ayrıca FK'ler dielektrik malzemelerden oluştuğu ve içlerinde herhangi bir metalik malzeme bulundurmadıkları için emilim kayıpları gözlenmez.

FK'lerin ilk ortaya çıkışı üzerlerine gelen ışığın yansımaları ile olmuştur [5]. Bu durum FK'lerin sahip olduğu FYBA'ndan kaynaklanmaktadır. Bir 2B FK yapısı, sahip olduğu FYBA'daki frekans değerlerine sahip elektromanyetik dalgaların iletimine izin vermez. Örneğin; hava ortamında dielektrik silindir çubukların kare örgüde dizilmesi ile elde edilen bir FK yapısı TM polarizasyona sahip elektromanyetik dalgaları geçirmezken yani TM polarizasyonu için ayna gibi davranırken, TE polarizasyona sahip elektromanyetik dalgaları geçirecektir. Bu sayede, tasarlanan 2B FK yapısı polarizasyon ayırıcı olarak kullanılabilir. Ancak, 2B FK'lerin içerisinde çeşitli kusurlar oluşturulursa elektromanyetik dalgaın FK ile etkileşimi değişir. Bu sayede FK yapısı içerisine girebilecek modlar oluşturulabilir. Şekil 2.3'te solda, hava ortamında kare örgüye göre yerleştirilen dielektrik silindir çubuklar ile tasarlanan ve ortasında nokta kusur bulunan bir 2B FK yapısı verilmiştir. Bu nokta kusur, yapının ortasındaki dielektrik silindir çubuğun yapıdan çıkarılması ile elde edilmiştir. Bu tür kusurlar ile oluşturulan kusurlara kavite denilmektedir [4,10]. Kavite içerisinde, FK'in sahip olduğu FYBA'ndan bir rezonans frekansına sahip kavite modu oluşur [4].

FK'ler içerisinde oluşturulacak kusurlar sadece kavite ile sınırlı kalmamaktadır. Örneğin, Şekil 2.3'de sağda verilen 2B FK yapısında bir satır boyunca x yönünde tüm dielektrik silindir çubuklar yapıdan çıkarılmıştır. Bu tür çizgi kusurlar içerisinde elektromanyetik dalga saçılmadan x yönünde ilerlemekte ve elektromanyetik dalganın hava ortamında ilerleyişi kontrol edilebilmektedir. Bu tür yapılar dalgakılavuzu olarak bilinir [4,11]. Nokta kusur ve çizgi kusur arasında önemli bir fark bulunmaktadır. Kavite yapısında ışık nokta kusur içerisine hapsolür ve FYBA'ndan dolayı herhangi bir yöne hareket edemez. Nokta kusur içerisindeki mod FYBA'ndan herhangi bir frekansa sahip olabilir. Dalgakılavuzu yapısında çizgi kusur içerisindeki modun davranışı sadece frekansı ile açıklanamaz. Çünkü bu modun hareketi dalgavektörüne de bağlıdır. Dalgakılavuzu yapısındaki çizgi kusur içerisinde ilerleyecek bir mod, FK içerisinde engellenecek bir frekans ve dalgavektörü ikilisine sahip olmalıdır. Çizgi kusur içerisinde ilerleyecek modun sadece engellenen bir frekansa sahip olması yeterli değildir.



Şekil 2.3 : FK kavite ve dalgakılavuzu yapıları.

FK'ler ile tasarlanan bir dalgakılavuzunda ilerleyen bir dalganın dalgakılavuzu içerisine sıkıştırılması FYBA sayesinde gerçekleşmektedir. Bu sayede, çizgi kusur içerisinde ilerleyen dalga FK yapısının içerisine doğru ilerleyemez ve sadece FYBA ile karşılaşmayacağı yani kusurun olduğu yönde ilerleyecektir. FK kullanılmadan yapılan dalgakılavuzlarında bir dalganın dalgakılavuzuna sıkıştırılması toplam iç yansıma (total internal reflection, TIR) esasına dayanmaktadır. TIR'da dalga kılavuzu yüksek kırıcılık indisi değerine sahip bütün bir dielektrik malzemedendir oluşmaktadır. Bu dielektrik malzemenin etrafında ise kırıcılık indisi değeri daha düşük olan bir ortam bulunmaktadır. Bu düşük kırıcılık indisli ortam hava olabilmektedir. Bu tür bir dalgakılavuzu içerisinde ilerleyen dalga, yüksek kırıcılık indisinden düşük kırıcılık indisine geçecek olduğunda geri yansıma olacaktır ve tekrar dalgakılavuzu yapısının içine yönelecektir. Bu gibi yapılarda dalganın

kırıcılık indisinin değiştiği sınırlara geldiğindeki açısı önemli olmaktadır. Özellikle de bu dalgakılavuzları eğer belli yerlerde doğrusal olarak devam etmiyorsa yani bir köşe dönüşe veya eğimli bir geometriye sahipse dalgakılavuzu içerisinde ilerleyen dalğanın TIR ile dalgakılavuzu içerisine hapsedilmesi zor olmaktadır. Bunun sonucunda dalğanın dalgakılavuzu dışarısına çıkması kaçınılmazdır. Bu açıdan bakıldığında FK'ler ile dalgakılavuzu yapıldığında dalğanın dalgakılavuzu dışına çıkması söz konusu olmamaktadır. Ayrıca FK'ler ile dalgakılavuzları için farklı açılarda köşe dönüş yapıları da tasarlanabilmektedir. Bu yapılar sayesinde sadece doğrusal değil farklı geometrik şekillerdeki çizgi kusurlar ile bir dalgayı FK dalgakılavuzu içerisinde iletmek mümkün olmaktadır.

FK'ler, kavite ve dalgakılavuzu gibi FYBA tabanlı tasarımlardan farklı olarak birçok amaç için de kullanılabilir. FK'ler ile düz yüzeyle lens [12], biyokimyasal algılayıcı [13], mod çevirici [14], polarizasyon ayırıcı [15], güç bölücü [16], düşük eşikli lazer [17], optik diyot [18], dalgakılavuzu köşe yapısı [19], optik gizleyici [20], çiftleyici [21], dalgaboyu ayırıcı [22] ve polarizasyondan bağımsız çalışan fotonik aygıtlar [23] gibi önemli yapılar tasarlanabilmektedir. Ayrıca, yavaş ışık [24], negatif kırılma [25], özkolimasyon [26], süper prizma [27] gibi alışılmadık ışık hareketleri de FK'lerde gözlemlenebilmektedir.

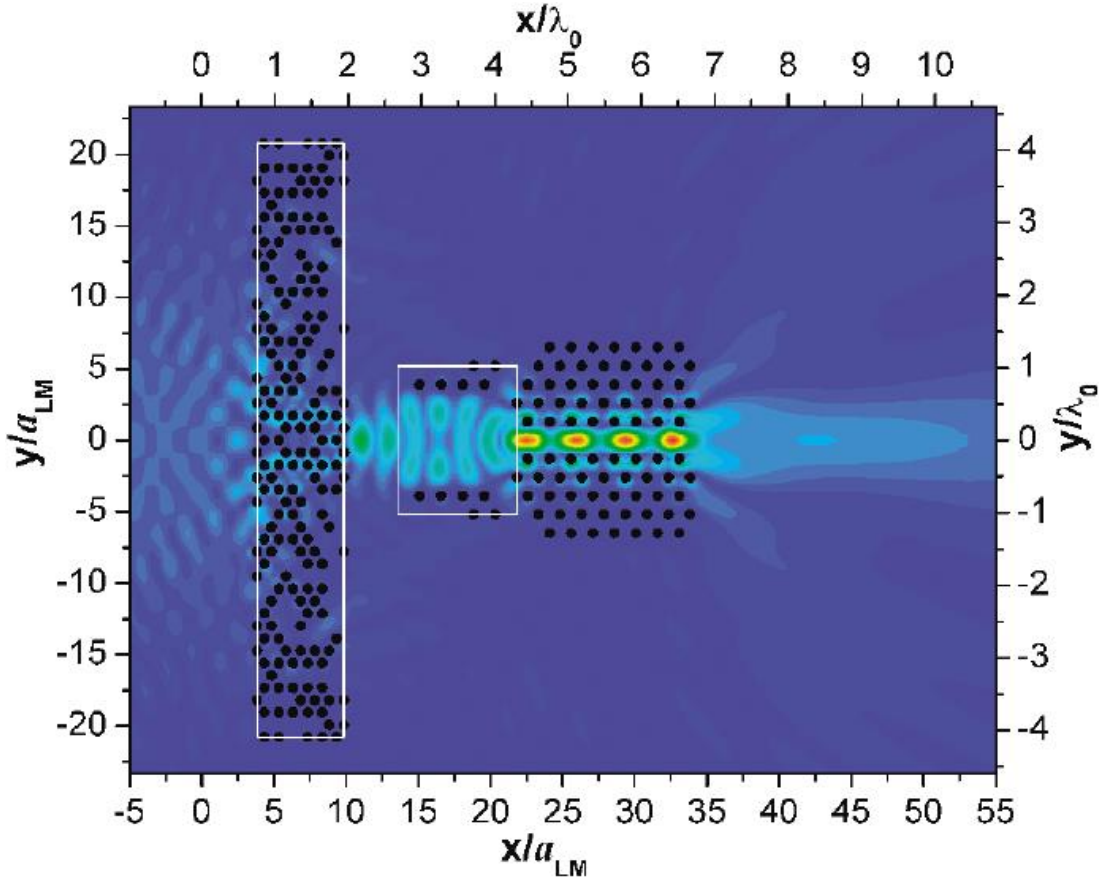
3. ALGORİTMA İLE TASARLANAN FOTONİK KRİSTALLER

Literatürde, eniyileme algoritmaları kullanılarak tasarlanmış fotonik aygıtlardan bahseden çalışmaların sayısı fazla değildir. Ancak bu teze ait çalışmaların yapıldığı süre zarfında bir eniyileme algoritması kullanarak fotonik kristal tasarlama düşüncesi dikkat çekmiş ve bu alanda yapılan çalışmaların sayısı hızla artmaya başlamıştır.

Bir eniyileme algoritması kullanarak fotonik aygıt yani bir bakıma FK yapısı tasarlamak için yapılan ilk çalışmalar dikkatleri üzerine çekmeyi başaramamıştır. Yapılan bu ilk çalışmalarda genellikle GA kullanılmıştır. GA'nın en yaygın bilinen eniyileme algoritmalarından biri olması, yapılan ilk çalışmalarda GA'nın tercih edilmesinin bir sebebi olmuştur. Ancak GA'nın yeteri kadar iyi sonuç vermemesi, yapılan ilk çalışmalara önem kazandıramamıştır. Çünkü eniyileme algoritması kullanılarak tasarlanan ilk FK yapıları, diğer FK'lere göre beklenene kıyasla çok daha iyi sonuçlar verememiştir. Bu şekilde yapılan çalışmalar sadece birer tasarım yöntemi olarak sunulmaktan ileri gidememiştir. Bu çalışmalar, FK yapılarının sadece teorik bilgiler, analitik çözümler veya nümerik yöntemler baz alınarak tasarlanmayacağını, hatta klasik yöntemlerle tasarlanamayacak yapıların da tasarlanabileceğini göstermiştir. Bu bakımdan yapılan ilk çalışmalar için daha farklı algoritmalar kullanılarak yapılan çalışmaların yapılmasına vesile olduğu için önemlidirler denilebilir.

Literatürde fotonik aygıt tasarlamak için pek çok farklı eniyileme algoritması kullanılmış ve geliştirilmiştir. Örneğin; GA kullanılarak odak noktasının boyutunu azaltan bir yapı tasarlanmıştır [28]. Bu çalışmada tasarlanan yapı, hava ortamında üçgen örgüye göre yerleştirilen dielektrik silindir çubuklardan oluşmaktadır. Yapıdan x eksenine göre simetrik olacak şekilde bazı dielektrik silindir çubuklar çıkarılmıştır. Hangi silindir çubukların yapıdan çıkarılacağını, belirlenen amaca göre GA kararlaştırmıştır. Ayrıca yine bu çalışmada GA ile tasarlanan bir başka yapının arka tarafına yani ışığın odaklandığı tarafa bir adet FK dalgakılavuzu yapısı konulmuş ve tasarlanan yapının çiftleyici olarak çalışması iletim yüzdesi göz önünde

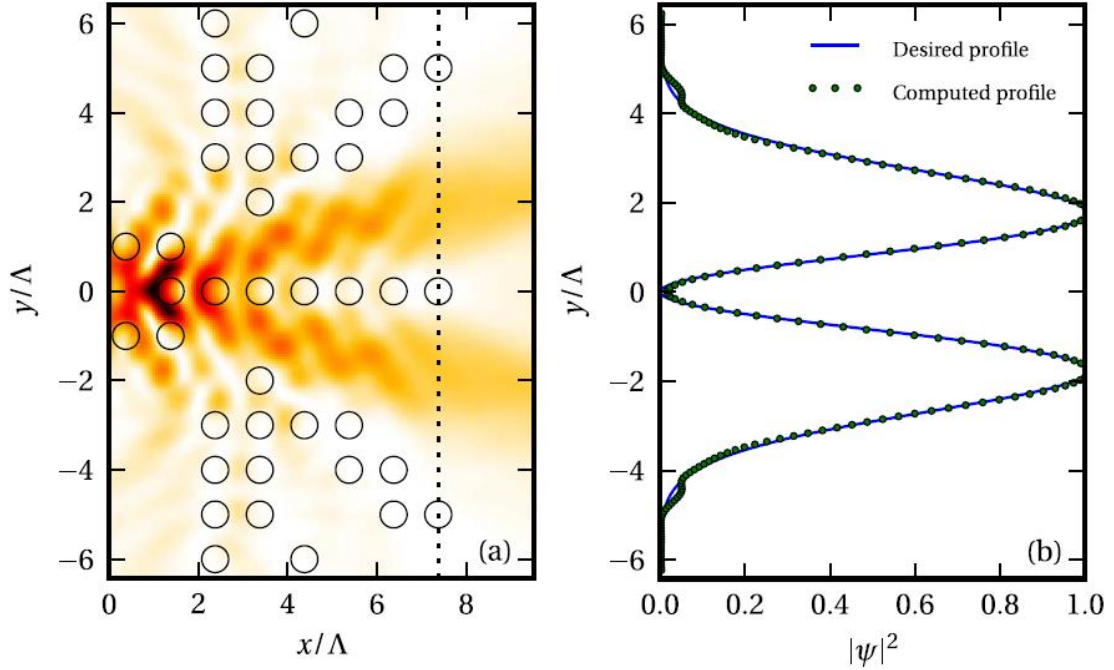
bulundurulmuş ve incelenmiştir. Tasarlanan çiftleyici yapısına ait şiddet dağılımı Şekil 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.1 : GA ile tasarlanan çiftleyici yapısına ait şiddet dağılımı [28].

GA kullanılarak yapılan bir diğer çalışmada bir FK lens yapısı tasarlanmıştır [29]. Bu tasarlanan yapı, silikon tabaka üzerinde kare örgüye göre açılan silindir şeklindeki hava boşluklarından oluşmaktadır. Bir önceki çalışmaya benzer şekilde yapı x eksenine göre simetriktir ve hava boşluklarının hangilerinin olacağına hangilerinin olmayacağına GA karar vermiştir. Tasarlanan yapının fabrikasyonu yapılmış ve yapının 1550nm dalgaboyunda çalışabildiği deneysel olarak gözlemlenmiştir. Bir başka çalışmada GA, dalgaboyu ayırıcı ve çiftleyici tasarlamak için kullanılmıştır [30]. Bu tasarımda da hava ortamına üçgen örgüye göre yerleştirilen dielektrik silindir çubukların hangilerinin yapıda bulunacağı, hangilerinin yapıdan çıkarılacağı GA ile belirlenmiştir. Elde edilen yapı gelen iki farklı dalgaboyundaki ışığı farklı dalgakılavuzlarının içerisine yönlendirmektedir. GA’nın kullanıldığı bir başka çalışmada ise birim hücre içerisi küçük piksellere ayrılmış ve birim hücre yapısı kopyalanarak kare örgüde dizildiği takdirde geniş bir FYBA oluşturması istenmiştir [31]. Oluşturulan birim hücrenin hangi pikselinde dielektrik malzeme bulunacağı,

hangi pikselinin hava olarak bırakılacağı algoritma sayesinde kararlaştırılmıştır. Bir diğer GA kullanılarak tasarlanan FK yapısı gelen dalganın profilini yapının çıkışında Hermite-Gauss profiline dönüştürmektedir [32]. Bu yapı, hava ortamına kare örgü ile dizilen dielektrik silindir çubukların yapıdan çıkarılması ile tasarlanmıştır. Yapıdan çıkarılacak dielektrik silindir çubukları seçme işlemi GA tarafından gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan yapıya ait şiddet dağılımı ve yapının çıkışındaki kesit profili Şekil 3.2’de verilmiştir.

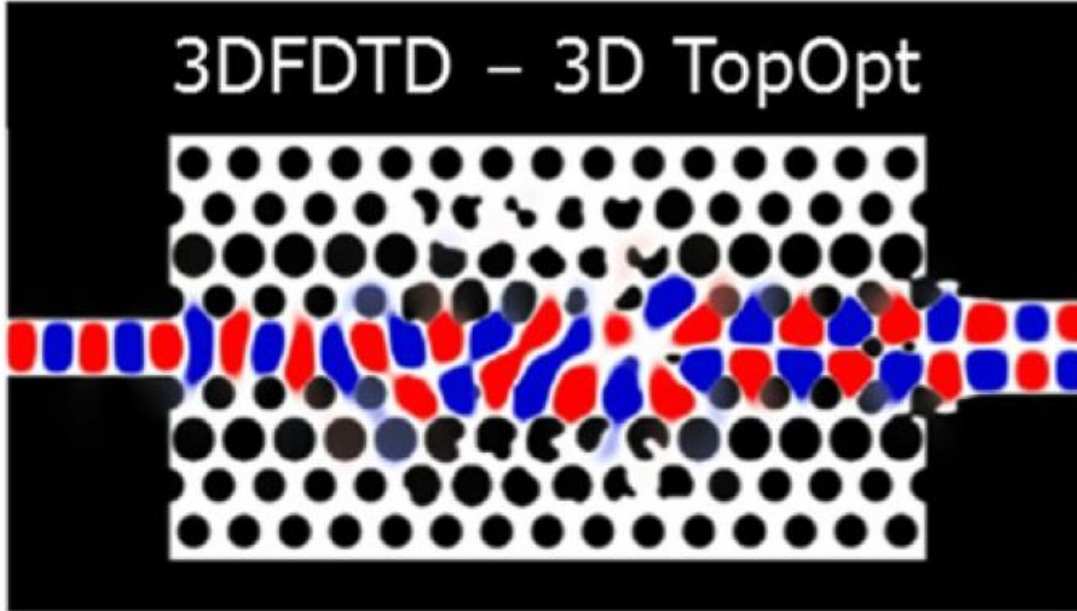


Şekil 3.2 : Yapıya ait şiddet dağılımı ve çıkışındaki kesit profili [32].

Dikkat edildiği üzere, GA ile yapılan çalışmalar daha çok sabit bir yapıda bulunan dielektrik silindir çubukların veya silindirik hava boşluklarının yapıdan çıkarılması esasına göre çalışmaktadır. Yani dielektrik çubukların veya hava boşluklarının olması veya olmaması durumuna göre çalışmaktadır. Bunun sebebi, GA'nın çalışma şeklinden kaynaklanmaktadır. GA, ikilik sayı sistemine göre çalışan bir algoritma olduğu için bu ikilik sistemdeki 1 ve 0 sayıları belirli bir pozisyondaki dielektrik malzemenin veya hava boşluğunun olması veya olmaması durumlarını temsil ederler. Bu bakımdan GA genellikle sabit bir yapı üzerinden çalışabildiği için tasarımcıya yeteri kadar özgürlük sağlamamaktadır. Sonuç olarak, GA ile tasarlanmış yapılar yeteri kadar üstün performans sergileyememiştir.

Fotonik aygıtların tasarımında kullanılan bir diğer yöntem ise topoloji eniyilemesidir (TO). Örneğin; bu yöntem kullanılarak 90° eğime sahip dalgakılavuzunun köşe

bölgesi eniyilenecek iletimin artırılması sağlanmıştır [33]. Benzer şekilde TO yöntemi bir başka çalışmada da FYBA'ni genişletmek için kullanılmıştır [34]. TO kullanılarak yine bir dalgakılavuzu köşe yapısının tasarımı yapılmıştır [35]. TO ile tasarlanmış en özgün FK yapılarından biri ise gelen dalga'nın modunu değiştirmektedir [36]. Bu çalışmada dielektrik bir tabaka üzerine üçgen örgüye göre hava boşlukları açılmış ve orta kısmına bir çizgi kusur açılarak bir dalga kılavuzu yapısı elde edilmiştir. Dalgakılavuzunun orta bölgesi ve çıkış bölgesi TO ile tasarlanarak girişteki dalga modunun yapı içerisinde değiştirilerek çıkışa yönlendirilmesi işlemi FK ile gerçekleştirilebilmektedir. Tasarlanan yapının fabrikasyonu yapılmış ve yapının yaklaşık 1550nm'de çalışabildiği gözlemlenmiştir. Yapı içerisinde mod değişimini gösteren anlık elektrik alan görüntüsü Şekil 3.3'te verilmiştir.

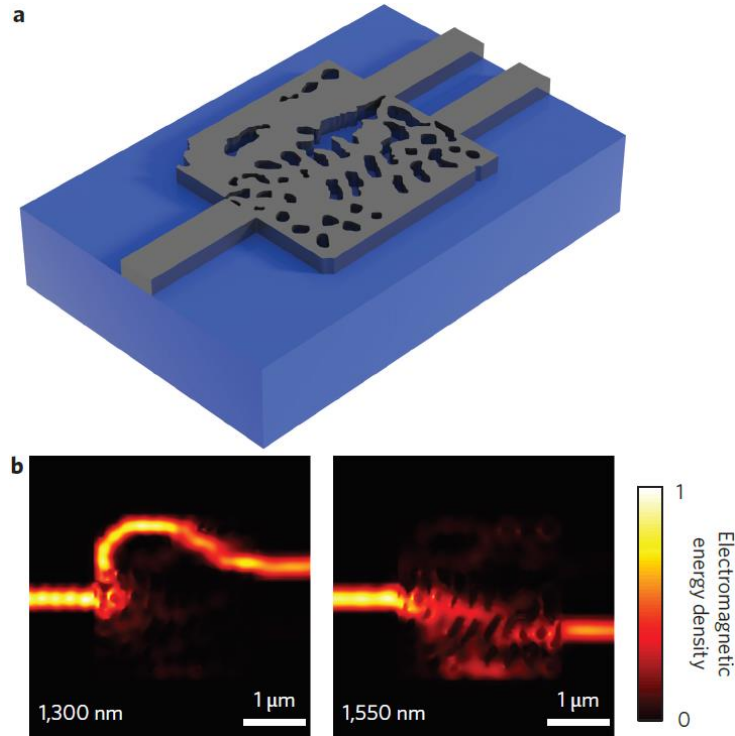


Şekil 3.3 : Mod çeviriciye ait anlık elektrik alan görüntüsü [36].

Parçacık sürü eniyilemesi (PSO) ise FK yapısı tasarlanmak için kullanılan bir başka eniyileme algoritması olmuştur. PSO kullanılarak hava ortamında kare örgüye göre dielektrik silindir çubuklar dizilmiş, ortasından çizgi kusur açılarak dalgakılavuzu yapısı oluşturulmuş ve dalgakılavuzunun çıkış bölgesi algoritma ile eniyilenecek yapıdan çıkan ve boşlukta ilerleyecek olan dalga'nın istenilen yönde ilerlemesi kontrol edilebilmiştir [37].

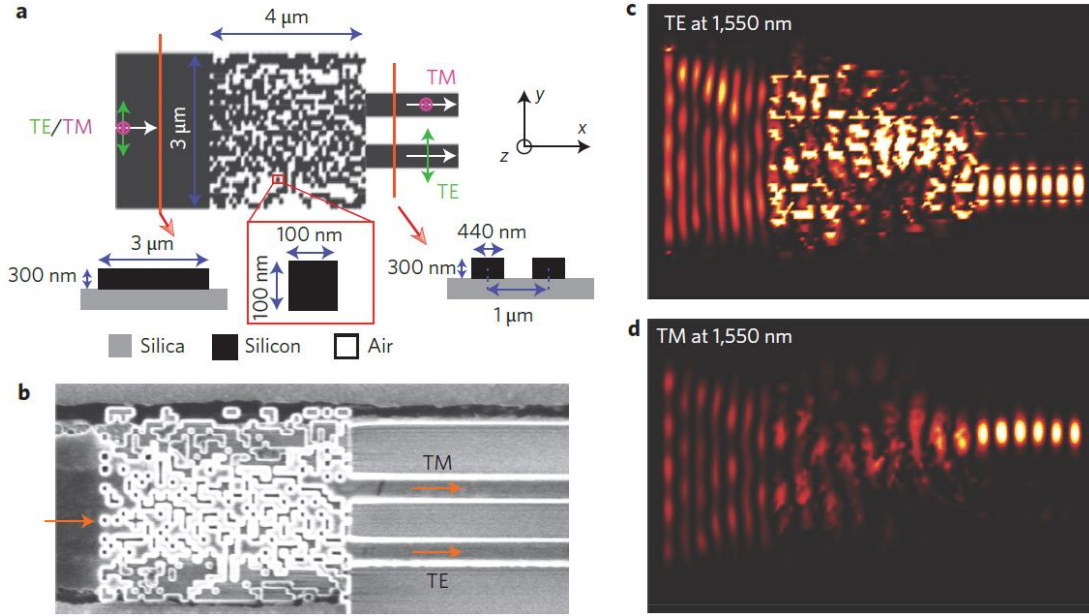
Bilinen eniyileme algoritmalarının yanı sıra araştırmacılar tarafından fotonik aygıt tasarlamak için geliştirilen yöntemler de mevcuttur. Örneğin; Stanford

Üniversite'sindeki araştırmacılar tarafından fotonik aygıt tasarımı için geliştirilmiş bir yöntem mevcuttur [38]. Bu yöntemin çalışabildiğini göstermek üzere çeşitli fotonik aygıtlar nümerik olarak tasarlanmış ve sunulmuştur. Mevcut yöntemin dikkatleri üzerine çekmesi, $2.8 \times 2.8 \mu\text{m}^2$ boyuta sahip oldukça küçük bir dalgaboyu ayırıcı tasarlanması ile olmuştur [39]. Tasarlanan yapının fabrikasyonu ve karakterizasyonu yapılmış, yapının 1300nm ve 1550nm dalgaboylarına sahip aynı girişten gelen dalgaları farklı çıkışlara yönlendirebildiği ve iletim yüzdelerinin her iki dalgaboyu durumuna göre istenilen çıkışta yüksek, istenmeyen çıkışta düşük olması sağlanmıştır. Bu çalışma ile tasarlanan yapı, tasarım alanının piksellere ayrılması ve her bir pikselde dielektrik malzeme mi bulunacak yoksa hava boşluğu mu bırakılacak şeklinde bir karar verme işleminin algoritma kullanılarak yapılması sonucu ortaya çıkmıştır. Karar verme işlemi ačíısından bakıldığında, yapılan çalışmanın daha önceden GA kullanılarak yapılan çalışmalar ile benzerlik gösterdiği göze çarpmaktadır. Ancak buradaki fark, kullanılan algoritmanın GA'dan daha iyi bir performans sergileyebilmiş olmasıdır. Yapılan bu çalışma ile bir algoritma kullanarak son derece yüksek performans verebilen bir fotonik aygıtı tasarlanmış ve bu konuya olan ilgi artmıştır. Çalışmada sunulan fabrikasyonu gerçekteşirilmiş yapının görüntüsü ve şiddet dağılımı şekil 3.4'te verilmiştir.



şekil 3.4 : Dalgaboyu ayırıcı yapısı ve şiddet dağılımları [39].

Eniyileme algoritması ile fotonik aygıt tasarlanmanın önemini artıran bir diğer çalışmada ise doğrusal olmayan arama algoritması kullanılarak $2.4 \times 2.4 \mu\text{m}^2$ boyutlarında polarizasyon ayırıcı fotonik aygıt tasarlanmıştır [40]. Tasarlanan yapının fabrikasyonu yapılmıştır. Üretilen yapının görüntüsü ve şiddet dağılımları Şekil 3.5'te verilmiştir.



Şekil 3.5 : Üretilen yapının görüntüsü ve şiddet dağılımları [40].

Yine bu çalışmada da yapının tasarlandığı bölge piksellere yani küçük karelere ayrılmış, bu karelerin hangisine dielektrik malzeme koyulacağı, hangilerinin hava boşluğu olarak bırakılacağı doğrusal olmayan arama algoritması kullanılarak belirlenmiştir. Bu algoritmanın kullanılma şekli de GA kullanılarak yapılmış çalışmalara benzemektedir. Yine bu algoritma da, GA'dan daha iyi performans sergileyebilmiştir. Sonuç olarak ortaya çıkan polarizasyon ayırıcı, o çalışmanın yapıldığı tarih itibari ile tasarlanan, fabrikasyonu ve karakterizasyonu yapılabilen en küçük dalgaboyu ayırıcı fotonik aygıt olmuştur. Bu açıdan bakıldığında, bir eniyileme algoritması kullanarak tasarlanan fotonik aygıtlar, sadece yüksek performans vermekle kalmıyor, fotonik entegre devrelerde kullanılabilmeleri için az yer kaplayacak ve üretimi kolay olacak şekilde tasarlanıyorlar. Bu durum, bir eniyileme algoritması ile fotonik aygıt tasarlanmanın fotonik entegre devrelerin geleceği için ne kadar önemli olduğunu gözler önüne sermektedir.

Bu çalışmalarda kullanılan algoritmaların dışında az da olsa kullanılan farklı algoritmalar da mevcuttur. Örneğin; yer çekimi arama algoritması kullanılarak L3

fotonik kristal kavite yapısı tasarlanmıştır [41]. Bir başka algoritmaya örnek olarak doğrusal ikili arama algoritması (DBS) kullanılarak optik diyotlar tasarlanmıştır [42,43]. DBS algoritması kullanım şekli bakımından GA'nın ilk kullanıldığı çalışmalar ile benzerlik göstermektedir. GA'nın kullanımı, ilk kullanıldığı zamanlarda yapılan çalışmalardaki gibi sadece ikili durumlar ile tasarım yapmak için kullanılmakla sınırlı kalmamıştır. Örneğin; GA kullanılarak farklı fotonik kristal kavite yapıları tasarlanmıştır [44]. Bu çalışmada, dielektrik bir tabaka üzerinde üçgen örgüye göre silindirik hava boşlukları açılmış ve yapının ortasındaki hava boşlukları açılmayıp dielektrik malzeme olarak bırakılmış, bu sayede çeşitli kusurlar elde edilmiştir. Elde edilen kusurlar etrafındaki silindirik hava boşluklarının konumları GA ile belirlenmiş yani hava boşlukları x-y düzleminde kaydırılmış, sonuç olarak yüksek kalite faktörüne sahip fotonik kristal kavite yapıları tasarlanmıştır. Yakın zamanda yapılan bir başka çalışmada ise ikilik sisteme göre çalışabilen bir çeşit PSO algoritması kullanılarak 2*2 güç ayırıcı fotonik aygıt yapıları tasarlanmıştır [45]. Tasarlanan yapılar $4.8\mu\text{m} \times 4.8\mu\text{m}$ boyutlarındadır ve $200\text{nm} \times 200\text{nm}$ veya $100\text{nm} \times 100\text{nm}$ boyutlarındaki hücrelerden oluşmaktadır. Hangi hücrede dielektrik malzeme olacağı, hangisinde olmayacağı algoritma ile kararlaştırılmıştır.

Bu tez kapsamında yapılan çalışmalarda ise FK tasarlamak için Diferansiyel Evrim algoritması kullanılmıştır. Tezin dördüncü bölümünde Diferansiyel Evrim algoritmasının çalışmasına ve kullanımına yönelik detaylı bilgiler verilmiştir. Tezin beşinci bölümünde ise Diferansiyel Evrim algoritması kullanılarak tasarlanan farklı FK yapılarının tasarımlarına ve algoritmanın uygulanmasına dair bilgiler verilmiştir.

4. DİFERANSİYEL EVRİM ALGORİTMASI

Matematikte, bilgisayar biliminde ve yöneylem araştırmada eniyileme belli bir amaca uygun olan seçeneklerden en iyisini seçme işlemi olarak tanımlanabilir. Mühendislikte ise tasarım hedeflerinin elde edilmesi işlemidir. Bu tez kapsamında kullanılan eniyileme kavramı, bir sistemin tasarımı sırasında sistemin iyi özelliklerinin artırılması ve kötü özelliklerinin azaltılması işlemidir.

Eniyileme işlemi en iyi sonucun bilinmediği problemlerde kullanılır. Bir en iyileme işlemi sonucunda elde edilen sonuçlar en iyi sonuçtur denilemez. Çünkü eniyileme işlemi sırasında bütün çalışma uzayı aranmamaktadır. Ancak elde edilen sonuçlar en iyi sonuçlardan biridir denilebilir. Aynı tasarım problemi için eniyileme işlemi tekrar tekrar uygulandığında daha iyi veya daha kötü sonuçlar da elde edilebilir. En iyi sonucun bilinmesi için ise tarama uzayındaki bütün çözümlerin bilinmesi gerekmektedir. Fakat tarama uzayının tamamının incelenmesi imkansızdır.

Eniyileme işlemleri için eniyileme algoritmaları kullanılır. Bu algoritmalar, bütün tarama uzayındaki sonuçları bilmeyi gerektirmeden görece iyi sonuçlar elde etmek için kullanılmaktadırlar. Eniyileme algoritmalarından olan evrimsel algoritmalar 1960'larda ortaya çıkmıştır. Evrimsel algoritmalar arasında en çok bilineni olan Genetik Algoritma 1989'da mühendislik problemleri için kullanılınca eniyileme algoritmalarının ne kadar önemli ve kullanışlı olduğu anlaşılmıştır [46].

Evrimsel algoritmalar, biyolojik evrimdeki üreme, mutasyon, rekombinasyon, seleksiyon gibi mekanizmalardan esinlenilerek tasarlanan popülasyon tabanlı üstbuluşsal (metaheuristic) eniyileme algoritmalarıdır. Burada bahsi geçen terimlerden buluşsal teknik veya kısaca buluşsal (heuristic), bir problemin çözümünde en iyi olmasa da hedeflenen amaca yönelik iyi çözümleri arama işlemidir. Üstbuluşsal ise eniyileme problemleri için iyi sonuç veren buluşsalları bulan, oluşturan ve seçen daha gelişmiş bir buluşsal tekniktir [47].

Evrimsel algoritmalar iteratif olarak çalışırlar. Bu algoritmaların birçoğu, her bir iterasyonda elde edilen en iyi bireyleri bir sonraki iterasyona aktarır. Yani, en iyi

bireyin hayatta kalması sağlanır ve bu şekilde doğal seleksiyon modellenmiş olur. Yine bu algoritmaların birçoğunun mutasyon veya çaprazlama gibi mekanizmaları bulunmaktadır. Bu algoritmalarla en iyi bireyleri belirlemek için bir amaç fonksiyonu tanımlanır. Bu fonksiyon sayesinde her bir bireye karşılık sayısal değer hesaplanır. Algoritmalar bireylerin sahip olduğu sayısal değerleri azaltmak veya artırmak üzerine çalışabilir. Bireylerin sahip olduğu değerlerin azaltılması hedefleniyorsa kullanılan amaç fonksiyonuna maliyet fonksiyonu, değerlerin artırılması hedefleniyorsa kullanılan amaç fonksiyonuna uygunluk fonksiyonu denir [48]. Amaç fonksiyonları kullanıcı tarafından belirlenir. Yanlış belirlenen bir amaç fonksiyonu algoritmanın yakınsama ihtimalini azaltır ve istenilen sonuca ulaşmak mümkün olmayabilir. Bu sebeple amaç fonksiyonunu doğru belirlemek algoritma için en önemli konulardan biridir diyebiliriz. Örnek bir maliyet fonksiyonu şu şekildedir:

$$f = w_1|x - x_d| + w_2|y - y_d|$$

Evrimsel algoritmalar çalışmalarının bir kısmında rastgele üretilen sayılar ile işlem yaparlar. Bu nedenle, elde edilen sonuçlar için asla en iyi çözümlerdir denilemez. Çünkü bütün çalışma uzayı taranmadığı için en iyi çözüm bilinmemektedir. Bu sebeple, elde edilen sonuçlar için amaca uygun olan iyi çözümlerdir denilebilir. Ayrıca evrimsel algoritmalar iteratif çalışan metotlar oldukları için çalışmaları uzun sürebilir. Hem kesin sonuç vermemesi hem de uzun çalışma ihtimalinden dolayı evrimsel algoritmaları gerçek zamanlı uygulamalarda kullanmak pek mümkün olmamaktadır. Ancak evrimsel algoritmaları bir sistemin tasarımında kullanmak faydalı olabilmektedir. Genelde en çok kullanılan ve yaygın olarak bilinen evrimsel algoritmalar örnek olarak; Genetik Algoritma [49], Parçacık Sürü Eniyilemesi [50], Karınca Kolonisi Eniyilemesi [51] ve Diferansiyel Evrim algoritması [52] verilebilir.

4.1 Diferansiyel Evrim Algoritması ve Mekanizmaları

Diferansiyel Evrim (DE) algoritması ilk olarak Rainer Storn'un Ken Price'a Chebychev polinom ayarlama fonksiyonunu sorması ve Price'ın bunu çözmek için yaptığı denemeler sonucu ortaya çıkmıştır. Price, vektör popülasyonunu değiştirmek için vektör farklarını kullanma düşüncesini öne sürmüştür. Bu küçük fikirden yola çıkan Price ve Storn ikilisi pek çok çalışma yapmış ve bilgisayar simülasyonları çalıştırmışlardır. Bu sebeple DE bugün bile çok yönlü ve güçlü bir araç olarak kullanılmaktadır. Price ve Storn'un en büyük isteği DE'nin diğer bilim adamları

tarafından daha da geliştirilmesi ve günlük hayatta da kullanılmasıdır. Bu nedenle DE algoritması patentlenmemiştir.

DE algoritması 1996 yılında Japonya'nın Nagoya şehrinde düzenlenen Birinci Uluslararası Evrimsel Hesaplama Yarışması'nda (1st ICEO) en iyi 3. algoritma olarak seçilmiştir. Yine aynı yarışmada DE, gerçek değerli deneme fonksiyonunu çözen en iyi genetik tipinde algoritma olarak seçilmiştir. İlk iki sıradaki algoritmalar genetik tipinde değillerdir ve evrensel olarak uygulanabilir değillerdir. Fakat bu iki algoritma deneme problemlerini DE'den daha hızlı çözmüştür. DE, popülasyon tabanlı, rastgele fonksiyon küçültebilen basit bir algoritmadır. DE'nin arkasındaki en önemli kısım deneme vektörleri oluşturmalarıdır.

4.1.1 Popülasyon kavramı

DE popülasyon tabanlı çalışan bir algoritmadır ve iterasyonlar boyunca sahip olduğu popülasyon üzerinde işlem yaparak çalışmaktadır. DE'de bir popülasyon kullanıcı tarafından belirlenen N_p sayıda bireyden oluşmaktadır. Bir popülasyondaki her birey ise D sayıda parametreden oluşmaktadır. Kısaca DE, $N_p * D$ boyutlu vektörler üzerinde işlem yapar. DE'deki bir popülasyon $P_{x,g}$ aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$\begin{aligned} P_{x,g} &= (x_{i,g}), \\ x_{i,g} &= (x_{j,i,g}), \\ i &= 0,1,2, \dots, N_p - 1, \\ g &= 0,1,2, \dots, g_{max}, \\ j &= 0,1,2, \dots, D - 1 \end{aligned}$$

Burada g indisi bir vektörün kaçınıcı nesilden olduğunu yani bir bakıma algoritmanın kaçınıcı iterasyonda olduğunu gösterir. Benzer şekilde $g+1$ gibi bir indis ise yeni oluşturulacak popülasyonu, yani bir sonraki iterasyonu işaret eder. Algoritma çalıştırılmadan önce kullanıcı tarafından tanımlanan maksimum iterasyon sayısı ise g_{max} ile gösterilir. i indisi bir popülasyondaki kaçınıcı birey olduğunu, j ise bir bireydeki kaçınıcı parametre üzerinde işlem yapıldığını temsil eder. Popülasyon içerisindeki bireyler de $x_{i,g}$ ile gösterilir. Bir çok uygulama için popülasyondaki birey sayısının $N_p=10*D$ olarak seçilmesi önerilmiştir [53].

DE ilk çalışmaya başladığı anda bir ara popülasyon $P_{v,g}$ oluşturur. Bu ara popülasyon N_p sayıda mutant vektörden $v_{i,g}$ oluşmaktadır. Bir ara popülasyon aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\begin{aligned}
 P_{v,g} &= (v_{i,g}), \\
 v_{i,g} &= (v_{j,i,g}), \\
 i &= 0,1,2, \dots, N_p - 1, \\
 g &= 0,1,2, \dots, g_{max}, \\
 j &= 0,1,2, \dots, D - 1
 \end{aligned}$$

Çaprazlama işlemi sonucunda her vektör bir mutant vektörü ile birleştirilerek bir deneme vektörü $u_{i,g}$ elde edilir. Bir deneme vektörü popülasyonu ise şu şekilde gösterilir:

$$\begin{aligned}
 P_{u,g} &= (u_{i,g}), \\
 u_{i,g} &= (u_{j,i,g}), \\
 i &= 0,1,2, \dots, N_p - 1, \\
 g &= 0,1,2, \dots, g_{max}, \\
 j &= 0,1,2, \dots, D - 1
 \end{aligned}$$

4.1.2 Genel gösterim

DE algoritmasının kendine özgün mekanizmaları vardır. Her bir mekanizma ise kendi içinde farklı şekillere ayrılmaktadır. Ancak kullanılan DE algoritmasının hangi mekanizmayı hangi şekilde kullandığını belirtmek için genel bir gösterime ihtiyaç duyulmuştur. Bu genel gösterim belirli bir kurala göre yazılır ve temel olarak “algoritma/baz vektörün seçilme yöntemi/kullanın vektör farkının sayısı/çaprazlama yöntemi” şeklinde ifade edilir. Örneğin bir DE’de baz vektör rastgele seçilmiş, bir tane vektör farkı kullanılmış ve binom dağılıma göre çaprazlama yapılmış ise bu DE’nin genel gösterimi “DE/rand/1/bin” şeklinde olacaktır. Benzer şekilde sadece baz vektörün seçimini popülasyondaki en iyi vektörü seçecek şekilde değiştirirsek bu DE’nin genel gösterimi “DE/best/1/bin” şeklinde olacaktır. Daha farklı yöntemler kullanıldığında daha farklı DE genel gösterimlerini yazmak mümkündür.

4.1.3 Başlangıç popülasyonu

DE’de her popülasyon bireylerden ve bu bireyler de parametrelerden oluşmaktadır. Tasarımın amacına yönelik kaç tane parametre ile çalışılacağını kullanıcı belirler. Ancak bu parametrelerin alabileceği değerler belirli sınırlar içerisinde olmalıdırlar. Parametreler için bir alt sınır b_j^L ve bir de üst sınır b_j^U belirlenir. Parametreler bu sınırlar arasında değerler alabilmektedir. Eğer farklı parametreler farklı sınırlar arasından değer alacak ise her bir farklı parametre için farklı alt ve üst sınır belirlemek gerekir. Burada j indisi D sayıdaki parametrelerden kaçınıcı parametrenin kullanıldığını ve bu parametreye karşılık hangi alt ve üst sınırların kullanılacağını gösterir. Sınırlar belirlendikten sonra algoritmanın çalışmaya başlaması için popülasyonu oluşturan bireyleri oluşturması gerekir. Bireylerin oluşturulması için her bireyin parametresinin değeri alt ve üst sınırlarına göre rastgele belirlenir. Bu parametreler genelde düzgün dağılıma göre sınırlar içerisindeki rastgele oluşturulan gerçek sayıların atanması ile elde edilir. Bu atama işlemi şu şekilde ifade edilebilir:

$$x_{j,i,g} = rand_j(0,1) \cdot (b_j^U - b_j^L) + b_j^L$$

Burada $rand_j(0,1)$ ifadesi rastgele üretilen bir sayıyı göstermektedir. D sayıdaki her bir parametre için farklı rastgele sayılar üretilir. Bu sayılar $[0,1)$ aralığından düzgün dağılım ile oluşturulur.

Algoritma çalışmaya başlamadan önce seçilen alt ve üst sınırların nasıl belirlendiği çok önemlidir. Yanlış belirlenen sınırlar ile algoritmanın yakınsama ihtimali olmayabilir. Yani hedeflenen çözüme yönelik parametre değerleri parametre sınırlarının dışında kalmış olabilir. Bu nedenle alt ve üst sınırlar arasındaki aralık geniş olacak şekilde ayarlanabilir. Ancak bu durumda da parametrelerin alabileceği değerlerin sayısı fazla olacağı için çok farklı bireyler üretilebilir ve algoritmanın yakınsama hızında düşme gözlemlenebilir. Bu gibi durumlarda algoritmanın daha uzun iterasyonlarda çalışması gerekir ve bu da çalışma süresini artırır. Bu sebeple alt ve üst sınırların bilinçli bir şekilde belirlenmesi çok önemlidir. Eğer hedeflenen amaca yönelik parametrelerin aralık içerisinde almaları gereken değerler tahmin edilebiliyorsa bu değerlerin seçilme şansını artırmak için daha farklı olasılık yoğunluk fonksiyonları da kullanılabilir [48]. Bu sayede algoritmanın yakınsama hızı yükseltilebilir ve daha kısa iterasyonda sonuca ulaşmak mümkün olabilir.

4.1.4 Mutasyon mekanizması

DE çalışmaya başladıktan sonra ve her iterasyonda, o an mevcut olan popülasyonun bireylerini kullanarak mutant vektörleri oluşturur. Bu oluşturulan mutant vektörleri ile popülasyon bireylerini çaprazlama işlemi ile birleştirerek deneme vektörlerini oluşturur. Elde edilen deneme vektörleri ile mevcut popülasyonun bireyleri arasından seçim yapılarak bir sonraki iterasyonun popülasyonu oluşturulur. Tüm bu işlemler için gerçekleştirilmesi gereken ilk adım olan mutasyon işlemi çok farklı şekillerde yapılabilmektedir. Örneğin; mevcut popülasyondan rastgele seçilmiş bir baz vektörü ve yine mevcut popülasyondan rastgele seçilmiş iki vektörün ağırlıklı farklarının toplamı bir mutant vektörü oluşturmak için yeterlidir. Bu işlem şu şekilde ifade edilir:

$$v_{i,g} = x_{r_0,g} + F(x_{r_1,g} - x_{r_2,g})$$

Burada r_0 indisi rastgele seçilen baz vektörünü gösterir. r_1 ve r_2 ise yine rastgele seçilen diğer iki bireyi gösterir. Baz vektöründen farklı olarak seçilen iki bireyin farkı alınır ve F ile gösterilen ağırlık fonksiyonu ile çarpılır. Bu ağırlık fonksiyonuna mutasyon faktörü denilmektedir. Mutasyon faktörü $[0,2]$ aralığında bir gerçek değere sahip olmaktadır. Mutasyon faktörünün doğru seçilmesi algoritmanın yakınsaması bakımından önemlidir. Mutasyon faktörünün genellikle $[0.5,1]$ aralığından seçilmesinin gerektiği belirtilmiştir. Popülasyon büyüklüğü yani bir popülasyondaki birey sayısı N_p artırıldığında mutasyon faktörü F de azaltılmalıdır [53].

DE’de mutasyon işlemi aynı popülasyondaki bireyler ile yapıldığı için sağlanması gereken bazı koşullar bulunmaktadır. İlk olarak $i \neq r_0 \neq r_1 \neq r_2$ şartı sağlanmalıdır [52]. Sağlanması gereken bir diğer koşul ise baz vektörü ve farkı alınan vektörlerin seçilmesi ile ilgilidir. Burada istenen seçim $r_1 \neq r_2$ şeklinde olmalıdır. Aksi halde algoritmanın yakınsama ihtimali azalabilmektedir [48].

DE’de daha farklı mutasyon işlemleri yapmak mümkündür. Örneğin “DE/rand/1/bin” için aşağıdaki gibi bir mutasyon işlemi yapılır:

$$x_{i,g} = x_{r_0,g} + F(x_{r_1,g} - x_{r_2,g})$$

Bu denklem, klasik DE’de genel olarak kullanılan mutasyon yöntemidir. Burada baz vektörü rastgele seçilmiştir.

Bir başka mutasyon işlemi ise “DE/best/1/bin” olarak genel gösterimi yazılan DE algoritması için aşağıdaki gibidir:

$$x_{i,g} = x_{opt,g} + F(x_{r1,g} - x_{r2,g})$$

Bu DE şemasında baz vektör olarak seçilen vektör seçildiği popülasyondaki en iyi amaç fonksiyonu değerine sahip olan bireydir. Bu baz vektörü opt indisi ile gösterilir. Bu şekilde mutant vektör oluşturulduğunda yakınsama hızı klasik DE’den daha hızlı olmaktadır. Ancak parametre sayısı D büyük değerler aldığında çözüme ulaşamamaktadır.

Bir diğer mutasyon yöntemi “DE/target-to-best/1/bin” olarak gösterilen DE şemasındadır. Bu şema daha çok binom dağılımlı çaprazlama ile kullanılır ve mutasyon işlemi şu şekilde ifade edilir:

$$x_{i,g} = x_{i,g} + F(x_{opt,g} - x_{i,g}) + F(x_{r1,g} - x_{r2,g})$$

“DE/best/1/bin” şemasının biraz daha farklı hali olan “DE/best/1/bin(with uniform jitter)” şeması da farklı bir mutasyon mekanizması olarak kullanılabilir ve mutasyon işlemi aşağıdaki gibidir:

$$x_{i,g} = x_{opt,g} + F_j(x_{r1,g} - x_{r2,g}),$$

$$F_j = k.rand(0,1) + F,$$

$$k \in R^+, k \ll 1$$

“DE/best/1/bin” şemasında mutasyon faktörü F her zaman sabit bir değer alırken, “DE/best/1/bin(with uniform jitter)” şemasında mutasyon faktörü F değişken bir değer almaktadır. Eşitlikte k ile gösterilen sayı 1’den çok küçük gerçek bir sayıdır. Bu k sayısı [0,1) aralığından rastgele seçilen bir sayı ile çarpılır ve sabit mutasyon faktörü F ile toplanır. Yine bu şema için de binom dağılımı kullanılır ve büyük parametrelili problemler için çözüme ulaşmak mümkün değildir.

Bir başka değişken mutasyon faktörüne sahip olan DE şeması ise “DE/best/1/bin(with per-vector-dither)” şemasıdır ve mutasyon işlemi şu şekildedir:

$$x_{i,g} = x_{r0,g} + F_d(x_{r1,g} - x_{r2,g}),$$

$$F_d = F + rand(0,1)(1 - F)$$

Burada değişken mutasyon faktörü her vektör için farklıdır. Değişken mutasyon faktörünün her nesilde farklı olması istenirse “DE/best/1/bin(with per-generation-dither)” şeması kullanılır ve aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$x_{i,g} = x_{r0,g} + F_{d,g}(x_{r1,g} - x_{r2,g}),$$

$$F_{d,g} = F + rand(0,1)(1 - F)$$

Mutasyon mekanizması daha da karmaşık olarak tanımlanabilir. Örneğin; bazı durumlarda klasik DE şemasına göre mutasyon yapılmasını, bazı durumlarda ise kullanıcı tarafından belirlenen bir mutasyon işlemi yapılmasını kullanmak için “DE/rand/1/bin: either-or-algorithm” şeması kullanılabilir. Bu şemaya ait örnek bir mutasyon eşitliği aşağıdaki gibi olabilir:

$$x_{i,g} = \begin{cases} x_{r0,g} + F(x_{r1,g} - x_{r2,g}) & , \quad \gamma < P_{mu} \\ x_{r0,g} + K(x_{r1,g} + x_{r2,g} - 2x_{r0,g}) & , \quad \gamma \geq P_{mu} , K = P_{mu}(F + 1) \end{cases}$$

Burada P_{mu} ifadesi mutasyon olasılığı sabitidir. Bu sabit ifade ile $[0,1)$ aralığından değer alan γ terimi karşılaştırılır. γ teriminin P_{mu} teriminden büyük veya küçük olmasına göre hangi mutasyon mekanizmasının kullanılacağına karar verilir. Yine bu denklemde K ile gösterilen terim kullanıcı tarafından özel olarak belirlenen bir mutasyon faktörüdür.

4.1.5 Çaprazlama mekanizması

Mutasyon işleminden hemen sonra gerçekleştirilen işlem çaprazlamadır. Çaprazlama işlemi sonucunda deneme vektörü $u_{i,g}$ oluşturulur. Çaprazlama işleminde, deneme vektörünün hangi parametresinin mevcut birey $x_{i,g}$ 'den hangisinin mutant vektör $v_{i,g}$ 'den seçileceği kararlaştırılır. Bu karar verme işlemi için farklı çaprazlama mekanizmaları mevcuttur. Örneğin; klasik DE'de binom çaprazlama işlemi şu şekildedir:

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

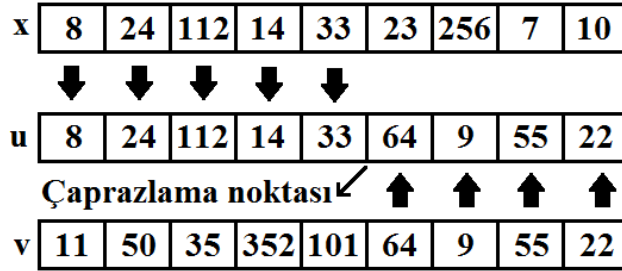
Burada CR ile gösterilen terim çaprazlama faktörüdür ve $[0,1]$ aralığında değer alır. Yakınsama sağlanamayan durumlarda çaprazlama faktörü CR 'nin $[0.8,1]$ aralığında değer alması önerilir [53]. Yine bu ifadedeki j terimi işlem yapılan parametreyi gösterir. j_{rand} ise rastgele üretilen bir tam sayıdır. Ayrıca $rand_j(0,1)$ ifadesi $(0,1)$ aralığından rastgele seçilen bir gerçek sayıdır. CR 'nin $rand_j(0,1)$ ifadesinden küçük

ve eşit olduğu durumlarda deneme vektörünün parametresi mutant vektörden gelir. CR'nin $\text{rand}_j(0,1)$ ifadesinden büyük olduğu durumlarda ise deneme vektörünün parametresi mevcut bireyden gelir. Ayrıca bu ifadede, işlem yapılan j sayısı ile rastgele üretilen j_{rand} sayısı karşılaştırılır. j sayısı ile j_{rand} sayısı eşit olduğunda deneme vektörünün parametresi mutant vektörden gelir. Bu sayede tüm parametrelerin mevcut bireyden gelmesi engellenir.

DE'de çaprazlama mekanizmaları olarak tek noktada çaprazlama, N noktada çaprazlama, üstel çaprazlama ve binom (düzgün dağılımlı) çaprazlama gibi mekanizmalar bulunmaktadır.

4.1.5.1 Tek noktada çaprazlama

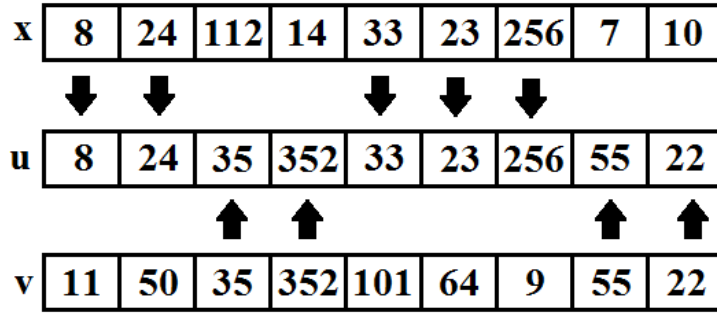
Tek noktada çaprazlama yapılırken deneme vektörü $u_{i,g}$ üzerinden bir nokta seçilir. Bu noktadan önce gelen parametreler mevcut bireyden kopyalanırken, bu noktadan sonra gelen parametreler mutant vektörden kopyalanır. Tek noktada çaprazlama işleminin temsili gösterimi Şekil 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.1 : Tek noktada çaprazlama.

4.1.5.2 N noktada çaprazlama

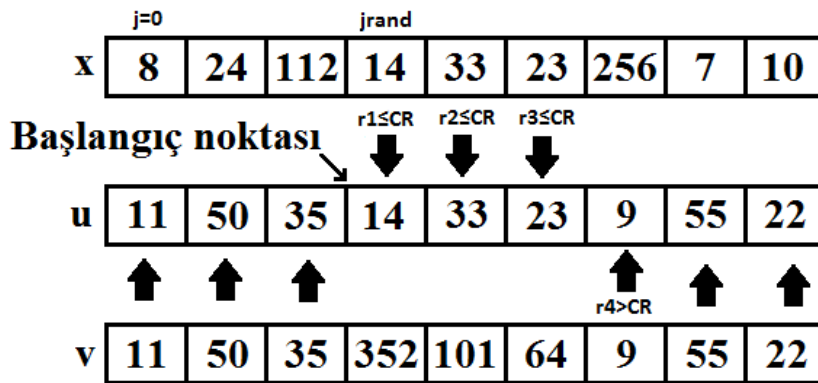
N noktada çaprazlama yapılırken deneme vektörü $u_{i,g}$ üzerinden N sayıda nokta seçilir. İlk noktadan önce gelen parametreler mevcut bireyden kopyalanır. İlk noktadan sonra gelen parametreler ikinci noktadan öncesine kadar mutant vektörden kopyalanır. İkinci nokta ile üçüncü nokta arasındaki deneme vektörünün parametreleri yine mevcut bireyden kopyalanır. Yani her noktadan sonra deneme vektörünün parametrelerinin nereden kopyalanacağı değişir. Bu değişim tüm deneme vektörü parametreleri oluşturuluncaya kadar N sayıda nokta için gerçekleştirilir. Şekil 4.2'de N noktada çaprazlama işlemi gösterilmiştir.



Şekil 4.2 : N noktada çaprazlama.

4.1.5.3 Üstel çaprazlama

Üstel çaprazlama yapılırken öncelikle deneme vektörü üzerinden rastgele bir nokta seçilir. Bu noktadan itibaren deneme vektörüne her parametre atanırken $[0,1]$ aralığında rastgele seçilen bir sayı ile CR sayısı karşılaştırılır. CR sayısı rastgele üretilen sayıdan küçük olduğu sürece deneme vektörünün parametreleri mevcut bireyden kopyalanır. Ard arda her parametre için rastgele sayı üretilir ve CR sayısı ile karşılaştırılır. Yine ard arda CR sayısının rastgele üretilen sayılardan küçük olduğu sürece deneme vektörü parametresi mevcut bireyden gelir. Ancak bu ard arda devam eden süreklilik CR sayısından daha büyük veya CR sayısına eşit ilk rastgele sayının üretilmesi ile son bulur. Bu sürekliliğin bittiği parametreden itibaren bütün parametreler mutant vektörden kopyalanır. Yani ilk hangi parametre mutant vektörden kopyalanırsa sonrasında tekrar rastgele sayı üretilmez ve CR ile karşılaştırma yapılmaz. Sonuç olarak, geriye kalan bütün parametreler mutant vektörden getirilir. Şekil 4.3'te üstel çaprazlama işlemi temsili olarak gösterilmiştir.

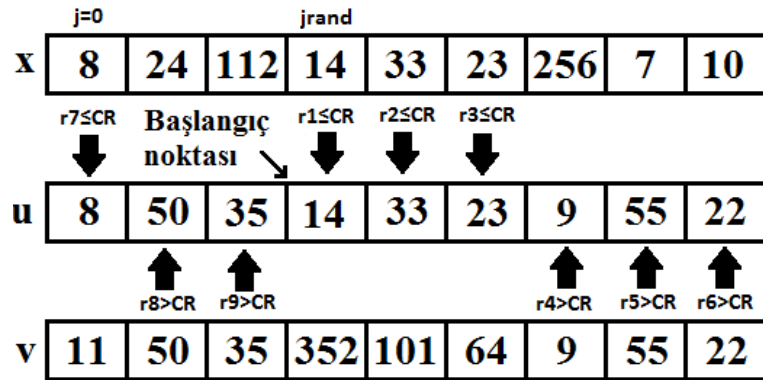


Şekil 4.3 : Üstel çaprazlama.

4.1.5.4 Binom çaprazlama

Binom çaprazlama işlemi üstel çaprazlama ile benzerlik göstermektedir. Ancak aralarında önemli bir fark bulunmaktadır. Üstel çaprazlamada olduğu gibi öncelikle deneme vektörü üzerinde rastgele bir başlangıç noktası seçilir. Bu seçilen noktada deneme vektörünün parametresi mutant vektörden gelir. Sonrasında her birey için $[0,1]$ aralığından rastgele üretilen bir sayı ile CR sayısı karşılaştırılır. CR sayısı rastgele sayılardan büyük veya eşit olduğu durumlarda deneme vektörünün parametresi mutant vektörden kopyalanır. Eğer CR sayısı rastgele üretilen sayılardan küçük ise deneme vektörünün parametresi mevcut bireyden kopyalanır. Üstel çaprazlamada mevcut bireyden parametre kopyalandıktan sonra CR sayısı herhangi bir rastgele üretilmiş sayı ile karşılaştırılmazken böyle bir durum binom çaprazlama için geçerli değildir. Dolayısıyla binom çaprazlamada, deneme vektörünün bir parametresi mevcut bireyden kopyalandıktan sonra bir diğer parametrenin yine mutant vektörden gelme ihtimali bulunmaktadır. Yani binom çaprazlamada başlangıçtan sonra her parametre için rastgele bir sayı üretilir ve CR sayısı ile karşılaştırılır.

Binom çaprazlamada tüm parametrelerin mevcut bireyden gelmesini engellemek yani CR sayısının üretilen tüm rastgele sayılardan büyük olma ihtimalini ortadan kaldırmak için işlem yapılan parametre indisi j ile rastgele üretilen j_{rand} tam sayısının birbirlerine eşit olmaması durumunda deneme vektörünün parametresinin mutant vektörden gelmesi şartı bulunur. Bu sayede deneme vektörünün en az bir elemanının mutant vektöründen gelmesi sağlanır [52]. Binom çaprazlamaya ait temsili gösterim Şekil 4.4'te verilmiştir.



Şekil 4.4 : Binom çaprazlama.

4.1.6 Seçim

Çoğu evrimsel algoritma gibi DE de popülasyon tabanlı çalışan iteratif bir eniyileme algoritmasıdır. Bu algoritmalar her iterasyonda mevcut popülasyonlarını yenileyerek çalışırlar. Bu yenileme işleminde oluşturulan popülasyon bireylerinin bir önceki nesilden yola çıkılarak üretilmesi gerekir. Yani bir iterasyondaki popülasyon kendisinden bir önceki iterasyonun popülasyonundan oluşturulurken, kendisinden bir sonraki iterasyonun popülasyonunun oluşmasında rol alır. Bu popülasyonların bireylerinin oluşturulduğu kısım seçim işlemidir. Bu işlemde genellikle iyi bireylerin hayatta kalması koşulu esas alınır. Ancak farklı seçim yöntemleri de mevcuttur. Bu yöntemlere örnek olarak sadece yaşa göre seçim (age only), sadece amaca göre seçim (objective function value only) ve hem yaşa hem amaca göre seçim (age and objective function value) yöntemleri gösterilebilir.

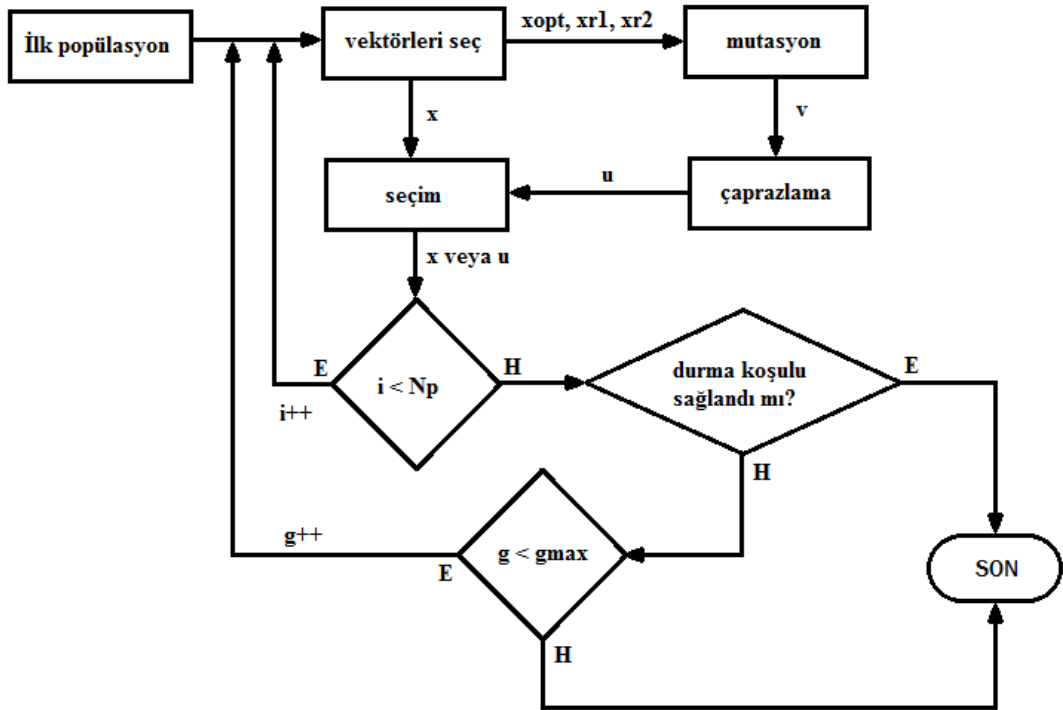
Bir popülasyondaki bireylere ebeveyn (parent) vektörleri ve bu ebeveyn vektörden üretilen deneme vektörlerine de çocuk (child) vektörleri diyecek olursak, bir sonraki nesilde oluşturulacak bireylerin hangilerinin ebeveyn veya hangilerinin çocuk vektörlerden geleceğini belirlemek gerekir. Genel kullanımda ebeveyn vektörlerinin boyutu μ ile, çocuk vektörlerin boyutu ise λ ile gösterilir. Genetik algoritmalar, age only seçim ($\mu=\lambda$) yöntemini kullanır. Yani yeni nesildeki tüm bireyler çocuk vektörlerden oluşturulur. Ancak bu durumda, çocuk vektörlerden daha iyi amaç fonksiyonu değerine sahip ebeveyn vektörler yeni nesile aktarılmamış olur. Bu sebeple yeni nesildeki bireyler için her zaman eski nesildeki bireylerden daha iyidir diyemeyiz. Kısaca, sadece yaşa göre yapılan seçim işlemi klasik DE için uygun değildir diyebiliriz.

Sadece deneme vektörlerinden oluşan yeni bir nesilde o ana kadar elde edilen en iyi çözüm olan best-so-far çözümü yeni nesile aktarılmamış olabilir. best-so-far çözümün bir sonraki nesile aktarılması şartı elitizm olarak bilinir. DE dahil çoğu evrimsel algoritma seçim işlemine ebeveyn vektörlerini de dahil eder. Örneğin; objective function value only seçim ($\mu+\lambda$) yapılırken $\mu + \lambda$ sayıda vektör, yani tüm ebeveyn ve çocuk vektörler bir havuzda toplanır. Bu havuzdaki vektörler yaşlarına bakılmaksızın sadece amaç fonksiyonlarının sahip olduğu değerlere göre sıralanırlar. μ sayıda en iyi vektör seçilir ve bir sonraki nesile aktarılır. Bu tür bir seçim işlemi turnuva metodu ile benzerlik gösterir [48]. Ayrıca, sadece amaca göre seçimin kullanıldığı DE çeşitleri de bulunmaktadır.

Bir diğer seçim yöntemi olarak age and objective function value seçim (μ, λ) incelenebilir. Bu seçim yönteminde bir birey, tüm deneme vektörleri ile karşılaştırılmaz, sadece bir deneme vektörü ile karşılaştırılır. Karşılaştırılan iki vektörden iyi olan bir sonraki nesile aktarılır. Ancak bu seçim yönteminde herhangi bir karşılaştırmada elenen vektör, bir başka karşılaştırma sonucu yeni nesile aktarılan vektörden daha iyi olabilir. Bu sebeple yaşa ve amaca göre seçim yöntemi elitizm şartını sağlamaz. Ancak bu yöntemde best-so-far çözümü elenebilir olsa da algoritmanın yerel çözümden kaçması sağlanmış olur. Klasik DE'de yaşa ve amaca göre seçim yöntemi kullanılır. Yaşa ve amaca göre yapılan seçim işlemini aşağıdaki gibi ifade edebiliriz:

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

Yeni nesil oluşturulduğunda algoritma aynı zamanda bir sonraki iterasyona geçmiş olur. g iterasyonunda üretilen yeni nesil, $g+1$ iterasyonu için ebeveyn vektörleri konumundadır. Algoritma, mevcut bireylerden herhangi biri önceden belirlenen amaç fonksiyonu değerine ulaştığında veya maksimum iterasyon sayısına ulaşıldığında sonlanır. Klasik DE için akış şeması Şekil 4.5'te verilmiştir.



Şekil 4.5 : DE akış şeması.

4.2 Diferansiyel Evrim Algoritması'nın Karşılaştırılması ve Kullanımı

Evrimsel algoritmalar başta olmak üzere bir çok eniyileme algoritması çeşitli problemlerin çözümlerinde ve mühendislik tasarımlarında kullanılmıştır. Bu tez kapsamında evrimsel algoritmalarından biri olan DE FK yapılarının tasarımı için kullanılmıştır. DE'nin seçilmesinin bazı nedenleri bulunmaktadır. DE'nin diğer evrimsel algoritmalar ile kıyaslandığı üstün olduğunu performans sergilediğini gösteren pek çok bilimsel bulunmaktadır. Çoğu makalede DE'nin diğer evrimsel algoritmalarla kıyasla daha iyi olduğu belirtilmiştir. DE'nin kıyaslandığı algoritmalar arasında popüler olan ve sık kullanılan evrimsel algoritmalar Genetik Algoritma (GA) [49], Parçacık Sürü Eniyilemesi (PSO) [50] ve Karınca Kolonisi Eniyileme algoritması (ACO) [51] gibi algoritmalar bulunmaktadır [54-59]. DE, karşılaştırıldığı bir çok algoritmaya göre istenilen sonuca daha yakın çözüm bulmuştur veya elde edilebilecek en iyi çözüme ulaşmıştır. Ayrıca DE'nin, diğer algoritmalarla göre daha "robust" olduğu yani bir problem için tekrar tekrar kullanıldığında da iyi sonuç verebildiği gözlenmiştir. Yine DE, diğer algoritmalarla kıyasla daha hızlı bir şekilde yani daha az iterasyonda sonuca ulaşabilmiştir. Son olarak, DE'nin birden fazla amaca yönelik (multi-objective) problemlerin çözümünde de daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.

DE'nin bu tez kapsamında kullanılmasının bir diğer sebebi ise tez çalışmalarının yapıldığı zaman zarfında ve öncesinde DE kullanılarak FK tasarımı üzerine neredeyse hiç çalışma yapılmamış olmasıdır. Farklı algoritmalar kullanılarak fotonik yapıların tasarlanmış olması ve DE'nin fotonik alanında kullanılan algoritmalarla kıyasla daha iyi sonuçlar verebildiği göz önünde bulundurulduğunda DE ile fotonik yapı tasarlamasının literatüre katkı sağlayacağı düşünülmüştür. Nitekim DE, fotonik dışında bir çok mühendislik alanında kullanılmış ve yine bu alanlarda da diğer algoritmalarla kıyasla daha iyi sonuçlar vermiştir [54, 57, 60].

DE, sahip olduğu mekanizmaların kendi içerisinde çeşitli olmasından dolayı çok farklı şemalarda kullanılabilir. DE şemalarına örnek olarak "DE/best/1/bin", "DE/rand/1/bin", "DE/rand-to-best/1/bin" gibi şemalar örnek verilebilir. Yine bu şemalar arasında da hangisinin daha iyi olduğunu belirlemek amacı ile farklı DE şemalarının uygulanacağı ortak bir mühendislik problemi belirlenmiş ve uygulanan şemaların sonuçları karşılaştırılmıştır [61]. Sonuç olarak bu şemalar arasından

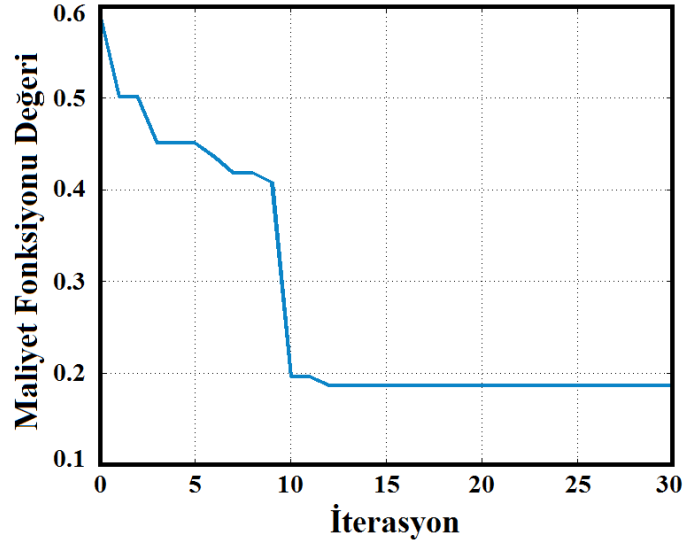
“DE/best/1/bin” şemasının diğer şemalara kıyasla daha iyi sonuç verdiği belirtilmiştir. Bu nedenle, bu tez çalışması kapsamında yapılan fotonik kristal yapılarının tasarımında “DE/best/1/bin” şemasına sahip DE kullanılmıştır.

DE algoritmasının kullanılmasına dair bazı önemli kurallar bulunmaktadır [53]. Bu kurallar DE’de kullanılan ve kullanıcı tarafından belirlenen F , CR ve N_p sayılarının seçimi ile ilgilidir:

- Başlangıçta oluşturulan popülasyon, tarama uzayının üzerinde mümkün olduğunca geniş bir şekilde dağılmalıdır.
- Çaprazlama faktörü CR genellikle $[0,1]$ aralığından seçilir ve kesinlikle 1’den daha küçük değer almalıdır. Eğer yakınsama sağlanamazsa, CR sayısının $[0.8,1]$ aralığından değer alması faydalı olabilir.
- Bir çok uygulama için popülasyondaki birey sayısı N_p ile bir bireydeki parametre sayısı D arasında $N_p=10*D$ şeklinde bağıntı olması iyi bir tercih olacaktır. Ayrıca ağırlıklandırma katsayısı F ise genellikle $[0.5,1]$ aralığından seçilir.
- N_p ne kadar büyük seçilirse, F sayısının da bir o kadar küçültülmesi gerekir.
- Parametreleri takip etmek: eğer bir popülasyondaki en iyi elemanın parametreleri nesilden nesile çok değişiyor ise, özellikle de minimizasyon problemlerinde popülasyonun en iyi elemanın sahip olduğu amaç fonksiyonu değeri yavaşça azalıyor ise bu iyi bir yakınsamanın yapıldığı anlamına gelir.
- Amaç fonksiyonunu takip etmek: minimizasyon işlemi sırasında popülasyondaki en iyi bireyin sahip olduğu amaç fonksiyonu değeri bazı nesillerde değişmiyorsa, yani grafiği çizdirildiğinde bazı iterasyonlarda düz (sabit değerli) bölgeler oluşuyorsa bu kötü bir anlam taşımaz. Ancak, bu durum minimizasyonun uzun süreceği anlamına gelir veya yakınsama için popülasyon boyutu N_p ’nin artırılmasının yararlı olacağını gösterir.
- Popülasyondaki en iyi bireyin sahip olduğu amaç fonksiyonu değeri nesilden nesile çok hızlı azalmamalıdır. Aksi halde eniyileme işlemi yerel minimum değerine kötü bir şekilde takılabilir.

- Amaç fonksiyonunun düzgün bir seçimi çok önemlidir. Ne kadar çok bilgi sahibi olunursa, minimizasyon işlemi o kadar iyi yakınsayacaktır. Hataların karelerinin toplamı her zaman iyi bir seçenek değildir. Çünkü bu durumda global minimuma giden yol saklanmış olabilir. En büyük hatanın azaltılmaya çalışılması genellikle daha iyi bir amaç olabilir ancak bu durumda da yerel minimum değerlerine daha fazla yönelim olabilir.

Bu tez kapsamında DE'nin kullanıldığı uygulamalardan biri olan dalgaboyu altında odaklama sağlayan fotonik yapının tasarımı için çok amaçlı bir maliyet fonksiyonu belirlenerek minimizasyon işlemi yapılmıştır. Bu işleme ait maliyet fonksiyonunun değerinin iterasyona göre nasıl değiştiği Şekil 4.6'da gösterilmiştir.



Şekil 4.6 : Maliyet fonksiyonunun aldığı değer in iterasyona göre değişimi.

5. DİFERANSİYEL EVRİM İLE FOTONİK KRİSTAL TASARIMI

Tezin bu bölümünde DE kullanılarak tasarlanan fotonik aygıtlar anlatılacaktır.

5.1 Dalgaboyu Altında Odaklayan Fotonik Aygıt Tasarımı

Her ne kadar farklı ışığı kontrol edebilme senaryoları olsa da, hedeflenen en yaygın amaçlardan biri FK'lerin odaklama karakteristiklerini geliştirmek olmuştur. Işık bir dalga olarak doğası gereği bir kısıtlamaya sahiptir. Bu kısıtlama, ışığın dalgaboyunun yarısından daha küçük olan bir noktaya odaklanamayacağı şeklindedir. Işığı odaklamak için kullanılan yaygın yöntemler için aynalara veya sabit kırıcılık indisi değerlerine sahip eğimli yüzeyleri olan lenslere ihtiyaç duyulmaktadır [62]. Bu durumlarda yansıma ve kırılma olayları ışığın odaklanmasından sorumludurlar. Bunun yanı sıra kırınım mekanizması da ışığı odaklamak için kullanılabilir ve bunun için ışığın kırılarak yayılmasına neden olan optik elemanlar kullanılır [63]. Daha ileri durumlarda eğimli yüzeylerin kullanılması gerekmeyebilir. Her ne kadar iki yaklaşım farklı yapısal özelliklere sahip olsa da, ikisi de homojen olmak gibi tek bir ortak noktaya sahiptirler yani belirli bölgelerde kırıcılık indisleri sabittir.

Işığın odaklanması, indis değişimi sağlayan homojen olmayan ortamlar kullanılarak da gerçekleştirilebilir. FK'ler kullanılarak sürekli olan indis değişiminin yaklaşık hali tasarlanabilir [64]. Derecelendirilmiş kırıcılık indisine (gradient index, GRIN) sahip FK'ler, dağılım (dispersion) yöntemlerinin incelenmesi veya etkin ortam teorisi ile tasarlanmış olup ışığın kontrol edilmesine dair özgün yeteneklere sahiptirler. Bu yaklaşım için en büyük kısıtlama, girişte verilen derecelendirilmiş indis profilinin taklit ve takip edilmesidir. GRIN FK'lerden farklı yöntemler kullanılarak da ışığın odaklanması olayı gerçekleştirilebilir. Bu yöntemler arasında metal nano açıklık lensleri [65] ve hava boşluklarından oluşan yapısal katmanları [66] kullanmak gösterilebilir. Hatta, GA kullanarak bir FK yapısındaki bazı dielektrik çubukları yapıdan çıkarma yöntemi ile odak noktasını küçülten bir yapı tasarlanmıştır [28].

Işığın dalgaboyu altı boyutlarda kontrol edilebilmesi son yıllardaki en önemli araştırma konularından biri olmuştur. Işığın dalgaboyu altında odaklanması bir çok farklı uygulama alanı için önemlidir. Bu uygulama alanlarına görüntüleme [67-69], nano fabrikasyon [68,69], manipülasyon [68-73] ve nano odaklama [74] örnek olarak gösterilebilir. Işık hüzmelerini sıkı bir şekilde odaklamak, küçük boyutlardaki parçacıkları ve nesnelere manipüle edebileceğimiz anlamına gelir. Dahası, dalgaboyu altında görüntüleme, hücre veya DNA, virüsler ve proteinler gibi çok küçük biyolojik parçacıkları detaylı bir şekilde görüntülemek için faydalı olabilir. Bu sebeple dalgaboyu altında odaklama elde edebilmek için yapılan çalışmalar literatürde mevcuttur. Örneğin; bir dielektrik FK tabakası kullanılarak ışığın dalgaboyu altında odaklanabilmesi için kanalizasyon yöntemi sunulmuştur [75]. Bu çalışmada dalgaboyu (λ veya λ_0) altında odaklamanın bir ölçütü olan maksimumun yarısında tüm genişlik (full width at half maximum, FWHM) değeri $0.059\lambda_0$ olarak hesaplanmıştır. FWHM, odak noktasındaki ışık şiddeti kesit alındığında ortaya çıkan profilde, ana hüzmelinin maksimum değerinin yarısına sahip olan iki nokta arasındaki mesafedir ve dalgaboyu cinsinden hesaplanır. Yine bu çalışmada asıl amaç odak noktasını uzak mesafelere taşıyabilmektir. Ancak, kısa mesafeler için yapının odaklama özelliğinden bahsedilmemiştir ve hava ile yapı arasındaki yüzeyde oldukça yüksek bir yansıma gözlemlenmiştir.

Dalgaboyu altında odaklama için önerilen bir diğer yapı ise hiper ızgaralardır ve bu yapılar için FWHM değerleri $\lambda_0/20$ ve $\lambda_0/50$ arasında değişebilmektedir [76]. Bir başka çalışmada, bölge tabakalara sahip düzlemsel yönbağımlı metamalzeme yapısı ışığın dalgaboyu altında odaklanması amacı ile sunulmuştur [77]. Bu çalışmada hesaplanan FWHM değeri $\lambda_0/10$ olarak verilmiştir. Ancak, metamalzeme yapılar yüksek malzeme emilim kayıplarına sahiptirler. Bunun sebebi, metamalzeme içerisindeki metalin sahip olduğu dielektrik sabitinin sanal kısmıdır. Metamalzeme yapılar ile dalgaboyu altında odaklama durumunda emilim odak noktasının çözünürlüğünü de etkilemektedir ki bu durum yapının dalgaboyu altında odaklama performansını sınırlamaktadır. Bu çalışmalara ek olarak, dalgaboyu altındaki boyutlarda eksen dışı odaklama karakteristiği nano boyutlardaki açıklıklara sahip metamalzeme tabakası kullanılarak incelenmiş ve çalışılan dalgaboyunun 365nm olduğu durumda FWHM değerinin 22nm'ye eşit olduğu bildirilmiştir [78]. Yine bu

durumda, odaklanan ışığın şiddeti kaynaktan gelen ışığın şiddetine kıyasla çok düşüktür. Bunun sebebi, metamalzeme içerisindeki yapısal kayıplardır.

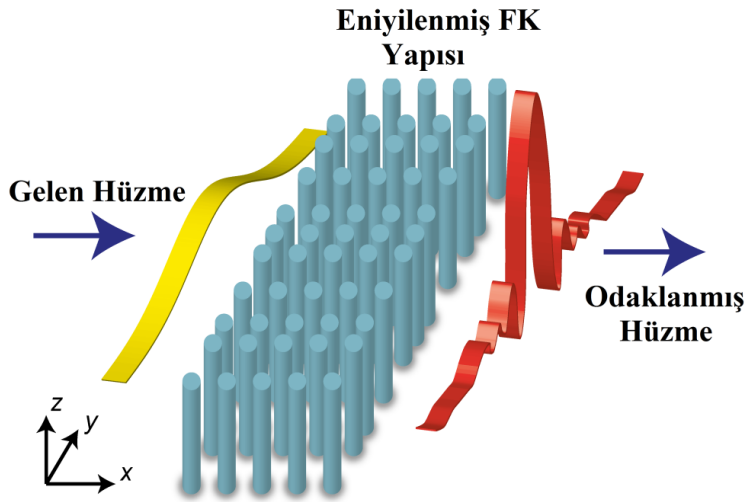
Faz kompanzasyonu mekanizması ile metamalzeme içerisindeki yapıcı girişimler sayesinde bir düzlem dalganın bir noktaya odaklanabileceği gösterilmiştir ve FWHM değeri $0.14\lambda_0$ olarak hesaplanmıştır [79]. Ayrıca, optik hiper lens sistemi ile çözünürlük kapasitesinin $\lambda_0/2$ 'den daha iyi olabileceği önerilmiştir [80]. Burada şöyle önemli bir soru sorulabilir: bir eniyileme algoritması kullanarak ışığı dalgaboyu altında odaklayan ve tamamen dielektrik malzemeden oluşan bir yapı tasarlanmaya çalışılırsa ne olur?

Bu tez kapsamında yapılan çalışmaların bir kısmında bu soruya cevap aranmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda, DE kullanılarak gelen ışığı dalgaboyu altında odaklayabilen ve dielektrik malzemelerden oluşan bir fotonik kristal yapısı tasarlanmıştır [81]. Girişteki dalganın kesitinin şekli tasarlanan yapı tarafından şekillendirilmektedir. Bu sayede bastırılmış yan kulakçıklar ile beraber güçlü bir odaklama elde edilmiştir. Mikrodalga deneyleri gerçekleştirilerek nümerik sonuçların doğruluğu kanıtlanmıştır. Yapılan çalışmada, bir yapıdaki dielektrik silindir çubuklar arasındaki y yönündeki mesafeler, dalgaboyu altında odaklama elde edebilmek için DE kullanılarak belirlenmiştir. Sonuçlar şunu göstermektedir; önerilen eniyileme yöntemi, çoklu amaçlar tanımlandığında istenilen hüzmeye özelliklerini verebilen ve dalgaboyu altında odaklama yapan FK yapısının tasarımı için kullanılabilir. Önerilen yöntemin bazı avantajları bulunmaktadır. Örneğin; tasarlanan yapı sadece dielektrik malzemelerden oluşmaktadır. Tasarımda herhangi bir metalik veya egzotik malzeme kullanılmamıştır. Bunun sonucunda, dalgaboyu altında odaklayan yapıda emilim kayıpları görülmez ve tasarlanan yapı geniş dalgaboyu aralığında çalışabilir.

Bu çalışmanın asıl amacı dalgaboyu altında odaklamayı sağlayacak bir fotonik yapı tasarlamaktır. Karakteristik için önemli olan parametreler uzaysal boyut ve kesit profilidir. Bu geometrik parametreler, hüzmeye şekillendirme, yüksek çözünürlükte görüntüleme ve yüksek verimde çiftleme gibi farklı uygulamalar için önemlidir. Odak noktasının boyutu FWHM değeri ile karakterize edilir ve dalgaboyu altında odaklama için bu değer hava ortamında $\lambda/2$ 'den küçük olması gerekir. Güçlü odaklamada ışığı $\lambda/2$ 'den daha küçüğe odaklamanın yanı sıra yan kulakçıklara dikkat edilmelidir ki bu yan kulakçıklar hüzmeyi enerjisinin çoğunluğunu taşımamalıdır. Eğer enerjinin büyük bir bölümü yan kulakçıklarda bulunuyorsa,

ışık belirli bir mesafe katettikten sonra istenmeyen yayılım örüntüsü ortaya çıkabilir ve ışığın odak noktası ile etkileşimi zayıflayabilir. Odak noktasının kenarındaki yan kulakçıkların seviyeleri azaltılırsa, FWHM değeri genellikle yükselir. Burada karşılıklı bir değiş tokuş olayı bulunmaktadır. Yani bir özelliği iyileştirirken diğer özellik kötüye gitmektedir. Sadece küçük FWHM değerine sahip olmaktan ziyade, aynı anda yan kulakçık seviyelerinin maksimum değerini (MSL) de ana kulakçığa kıyasla olabildiğince azaltmak gerekir ve bunun için çok amaçlı eniyileme yöntemi kullanmak mümkün bir çözüm verebilir.

Şekil 5.1’de DE’nin uygulandığı tasarım yöntemi şematik olarak ifade edilmiştir. Yapıya giren ve yapıdan çıkan ışık hüzmelerinin kesitleri temsili olarak gösterilmiştir. Burada DE kullanılmasının nedeni hüzmeyi şekillendiren bir fotonik yapı tasarlamaktır. Bu şekilde hava ortamına (havanın kırıcılık indisi $n_{\text{hava}}=1$) dielektrik silindir çubuklar (dielektrik malzemenin kırıcılık indisi $n_{\text{dielektrik}}=3.13$) yerleştirilmiştir.

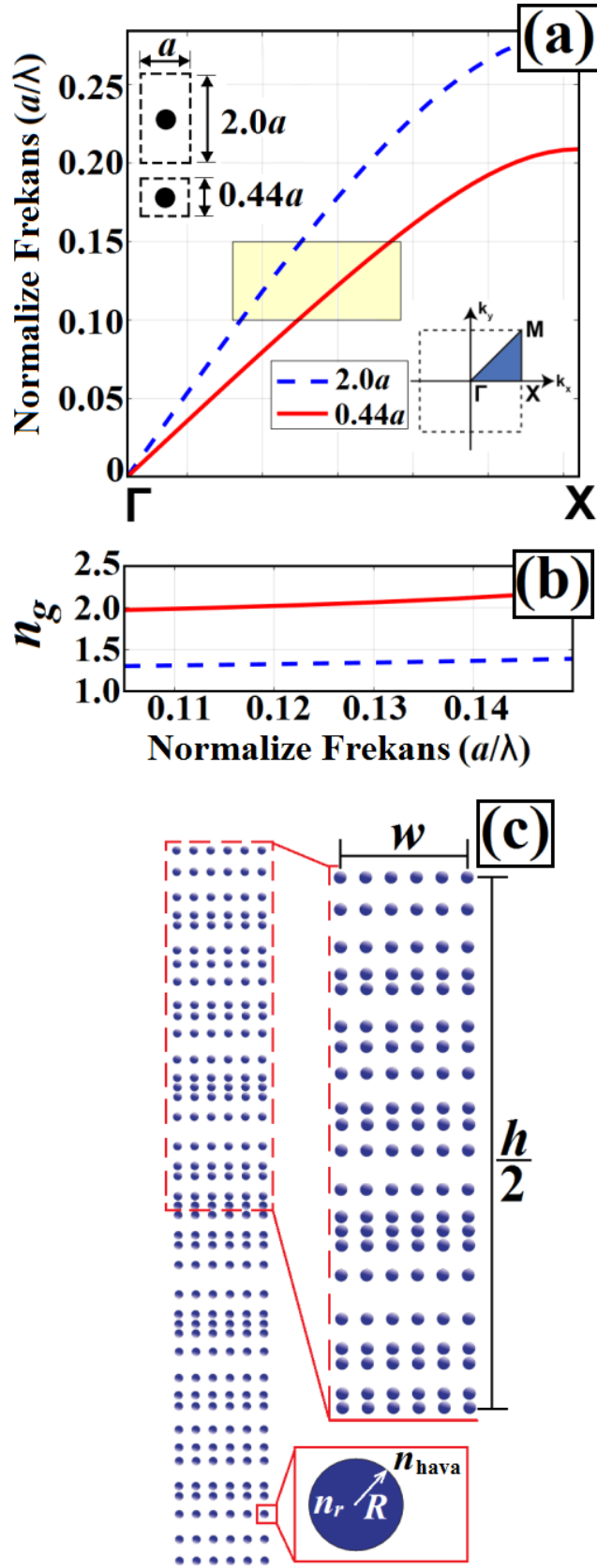


Şekil 5.1 : DE kullanılan tasarım yöntemi [81].

Bu çalışmada, FK yapısının doluluk oranı yani etkin indisi değiştirilmiş ve DE kullanılarak dalgaboyu altında odaklama elde edebilmek için FK yapısı eniyilenmiştir. Kırıcılık indisi değişimi FK parametrelerini değiştirerek elde edilebilir. Örneğin; malzemenin kırıcılık indisi kademeli olacak şekilde düzenlendiğinde veya doluluk oranı değiştirildiğinde veya örgü periyodu değiştirildiğinde kırıcılık indisi değişimine sahip bir FK yapısı elde edilebilir [82-84]. Ayrıca, indis değişimi, dalgaboyu altı ızgaralarda etkin kırıcılık indisini yerel olarak değiştiren farklı görev dönemleri ve homojen olmayan ızgara yapılarındaki lens

etkisi kullanılarak da elde edilebilir [85-87]. Bu tez kapsamında yapılan çalışmada, bahsedilen son yöntem kullanılmıştır, yani burada FK birim hücrelerinin boyutları aynı dielektrik silindir çubukların yapıldığı malzeme tipi ve çubukların yarıçapları sabit tutularak eniyilenmiştir. FK birim hücrelerinin boyutlarının değiştirilmesi ile etkin kırıcılık indisi değişimi ortaya çıkmış ve bu durum yapının gelen dalğanın dalga ön cephelelerini manipüle etmesine izin vermiştir. FK'yi oluşturan çubukların yarıçapları $r=0.2a$ olarak sabitlenmiş ve kırıcılık indisleri $n=3.13$ olarak seçilmiştir. Kırıcılık indisini bu değerde seçmemizin sebebi tasarlanacak yapıyı alümin (alumina) çubuklar kullanarak deneysel olarak mikrodalga frekanslarında test etmektir.

Birim hücrelerin dikey boyutları $\Delta y=0.44a$ ve $\Delta y=2.0a$ arasında olacak şekilde eniyileme algoritmasının başlangıcında tanımlanmıştır. Çubukların merkezleri arasındaki yatay mesafe yani, x yönündeki mesafe $\Delta x=1a$ olarak sabitlenmiştir. Bir başka deyişle, etkin indis değişimi y-ekseni boyunca olmuştur. Birim hücrelerin y yönündeki boyutları Şekil 5.2(a)'dan görülebilmektedir. Burada dikkat edilmesi gereken bir durum bulunmaktadır; dielektrik çubukların yerleştirilmelerinde bir kısıtlama vardır. FK'deki çubukların merkezleri arasındaki mesafe y yönünde maksimum $2.0a$ ve minimum $0.44a$ olabilmektedir. Bu minimum mesafenin $0.44a$ seçilmesinin sebebi çubukların birbirlerine dokunmayacak şekilde çok yakın yerleştirilebilmesini sağlamaktır. Bu yapısal parametreler kullanılarak, FK yapısındaki birim hücrelerin maksimum ve minimum boyutları için dağılım diyagramları PWE yöntemi ile hesaplanmıştır [9]. Dağılım diyagramları Şekil 5.2(a)'da verilmiştir. Birim hücre boyutları arttıkça ilgili bantlar yüksek frekanslara doğru ilerlemektedir. Burada birim hücrelerin yatay boyutları sabit tutulmuştur ve sadece dikey boyutları değiştirilmiştir. Şunu göz önünde bulundurmalıyız ki, yapılan tüm nümerik analizler boyunca sadece TM polarizasyonu kullanılmıştır. Yani elektrik alanın ve manyetik alanın E_z , H_x ve H_y bileşenleri sıfır değildir. Buna ek olarak, tasarlanan fotonik yapı birinci iletim bandında çalışmaktadır.



Şekil 5.2 : Minimum ve maksimum birim hücre boyutları için (a) bant diyagramları ve (b) grup kırıcılık indisleri. (c) DE ile tasarlanan yapının görüntüsü [81].

Her bir bandın grup indisi n_g değerlerini çıkarmak için Şekil 5.2(a)'da verilen ilgili eğrilerin eğimleri kullanılmıştır ve sonuçlar yine Şekil 5.2(b)'de verilmiştir. Birinci banttaki daha uzun dalgaboyları için eğriler birbirlerine çok yakındırlar ve normalize frekanslara göre doğrusal bir şekilde değişmektedirler. $a/\lambda=0.11$ 'den $a/\lambda=0.14$ 'e kadar olan normalize frekans değerleri için hesaplanan minimum ve maksimum grup indisleri $n_g=1.40$ ve $n_g=2.20$ değerleri arasında bulunmaktadır. Buradan şu çıkarılabilir; farklı Δy değerleri için farklı n_g değerleri bu aralıktan çıkmaktadır.

Bahsedildiği üzere, dielektrik silindir çubuklar arasındaki mesafeler yani birim hücrelerin dikey boyutları DE kullanılarak belirlenmiştir. Bu çalışmanın amacı küçük boyutlarda ve üretilebilecek bir FK yapısı tasarlamak olduğu için yapısal kısıtlamalar belirlenmelidir. Aynı sütundaki çubukların merkezleri arasındaki mesafe y yönünde, önceden bahsedildiği üzere, maksimum $2.0a$ ve minimum $0.44a$ olacak şekilde seçilmiştir. Her bir sütunda ise toplam 41 dielektrik silindir çubuk bulunmaktadır. Bu çubuklardan 20 tanesi x ekseninin yukarısında, 20 tanesi x ekseninin aşağısında ve 1 tanesi de x eksenini üzerinde yer almaktadır. Algoritma ile sadece bir sütun tasarlanmakta olup, elde edilen sütun kopyalanarak istenilen sayıda sütun oluşturulmaktadır. Yani bir yapıdaki sütunlar birbirlerinin aynısıdır. Optik eksen üzerinde odak noktası elde edebilmek için yapının yani bir sütunun x eksenine göre simetrik olarak tasarlanması kararlaştırılmıştır. Bunun sonucunda algoritma yapının sadece bir yarısını tasarlamak için kullanılmıştır. Tasarlanan yapı ise x eksenine göre simetrik olarak kopyalanarak yapının diğer yarısı oluşturulmuştur. Aslında burada tek bir sütun oluşturulurken bu sütun x eksenine göre simetrik oluşturulmuştur. Oluşturulan bu sütun kopyalandığında da oluşan yapının tamamı x eksenine göre simetrik olacak şekilde ortaya çıkmıştır.

Algoritmada kullanılan maliyet fonksiyonu FWHM değerinin azaltılması ve MSL değerinin %20'nin (normalize olarak 0.2'nin) altında tutulması amacına göre tanımlanmıştır. FWHM değeri için hedef sıfır olarak belirlenmiştir. Bunun sebebi, elde edilebilecek en küçük FWHM değerinin dalgaboyu altında odaklama için daha iyi olacağı anlamına gelmesidir. Yani bu çalışmada ortaya çıkan yapılar arasından FWHM değeri düşük olanlar diğer yapılardan daha iyidir. Ancak, daha önce bahsedildiği üzere sadece FWHM değerinin düşürülmesi tek başına iyi sonuç vermemektedir. Fakat dalgaboyu altında odaklamanın elde edilebilmesi bu çalışmanın asıl amacı olduğu için, FWHM değeri daha düşük olan yapılar seçilmiştir.

Algoritmanın başlangıcında sütun sayısı ve normalize frekans değeri kullanıcı tarafından belirlenir. Tasarlanan bir yapının yatay uzunluğunun odaklama etkisini gözlemlemek amacı ile farklı sütun sayılarına sahip yapılar farklı normalize frekans aralıkları için tasarlanmıştır. Burada sütun sayısı 5 ile 10 arasında değiştirilmiştir. Normalize frekans değerleri ise $a/\lambda=0.11, 0.12, 0.13$ ve 0.14 olarak seçilmiştir. Bir diğer önemli parametre ise odak noktası ile yapının arka yüzeyi arasındaki mesafedir. Bu çalışmada yapılan eniyileme durumu için FWHM değerleri yapının en az $0.32a$ uzağından itibaren hesaplanmıştır. Maliyet fonksiyonunun matematiksel tanımı şu şekildedir:

$$f(x, y) = \alpha_x |x - x_d| + \alpha_y |y - y_d|$$

Burada x_d ve y_d sırası ile hedeflenen FWHM ve MSL değerleridir. x ve y ise sırasıyla hesaplanan FWHM ve MSL değerleridir. Yine bu ifadedeki α_x ve α_y sabitleri ise ağırlıklandırma katsayılarıdır. Bu katsayılar sayesinde FWHM ve MSL değerlerinin maliyet fonksiyonu üzerindeki etkileri eşitlenmeye çalışılmıştır.

Eniyilenen FK lens yapılarının nümerik olarak modellenmesi ve zaman boyutundaki analizleri sonlu farklar zaman boyutu (finite difference time domain, FDTD) yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir [88,89]. Tüm nümerik simülasyonlarda hesaplanan yani çalışılan alan iki boyutlu bir uzay olarak sınırlandırılmıştır ve üçüncü boyutta her şeyin tekdüze olduğu kabul edilmiştir. İstenmeyen geri yansımaları engellemek için çalışılan alanın sınırları mükemmel eşlenmiş katmanlar (perfectly matched layers, PML) ile çevrelenmiştir [90]. Yapının girişinde Gauss profiline sahip bir kaynak kullanılarak eniyilenen FK lensin odaklama etkisinin uzaysal şiddet dağılımı hesaplanmıştır.

Algoritma kullanılarak farklı normalize frekans değerleri için farklı yapılar tasarlanmıştır. Her bir normalize frekans değeri için de farklı sütun sayılarında yapılar tasarlanmıştır. Yani 6 farklı sütun sayısı ve 4 farklı normalize frekans değeri için toplam 24 farklı yapı tasarlanmıştır. Her normalize frekans değeri için ayrı ayrı en iyi yapılar seçilmiştir ve bu seçim yapılırken sütun sayıları dikkate alınmamıştır. Yani her normalize frekans değeri için bir tane iyi yapı seçilmiştir. Bu seçilen yapılar arasında en iyi olan yapı ise çalışmada önerilen asıl yapı olmuştur ve deneysel olarak incelemesi de yapılmıştır. Seçilen bu yapının yani tasarlanan en iyi yapının şematik görüntüsü Şekil 5.2(c)'de verilmiştir. Tasarlanan en iyi yapının x yönünde uzunluğu

5.4a, y yönünde genişliği ise 45.27a olarak hesaplanmıştır. Normalize frekans değerleri $a/\lambda=0.11, 0.12, 0.13$ ve 0.14 için seçilen iyi yapıların şiddet dağılımları ve odak noktasındaki alan kesitleri sırası ile Şekil 5.3'te ve Şekil 5.4'te verilmiştir.

Şekil 5.3'ten ve Şekil 5.4'ten görüldüğü üzere dalgaboyu altında odaklama en düşük $FWHM=0.19\lambda$ olacak şekilde elde edilmiştir. Diğer FWHM değerleri de 0.5λ değerinin altındadır. Yine burada dikkat edilmelidir ki, yan kulakçıklar x eksenine göre simetriktir. FWHM ve MSL değerleri hesaplandığında elde edilen sonuçlara bakacak olursak istenilen şartlar DE tarafından sağlanmıştır. Genel olarak FWHM değerleri $\lambda/5$ 'ten küçük ve MSL değerleri de %20'den az olacak şekilde sonuçlar elde edilmiştir. Hatta, seçilen yapılar için odak noktasının çevirim oranı hesaplanmıştır. Bu çevirim oranı, girişteki dalganın kaç kat küçültüldüğünü gösterir. İlgili sonuçlar Çizelge 5.1'de verilmiştir.

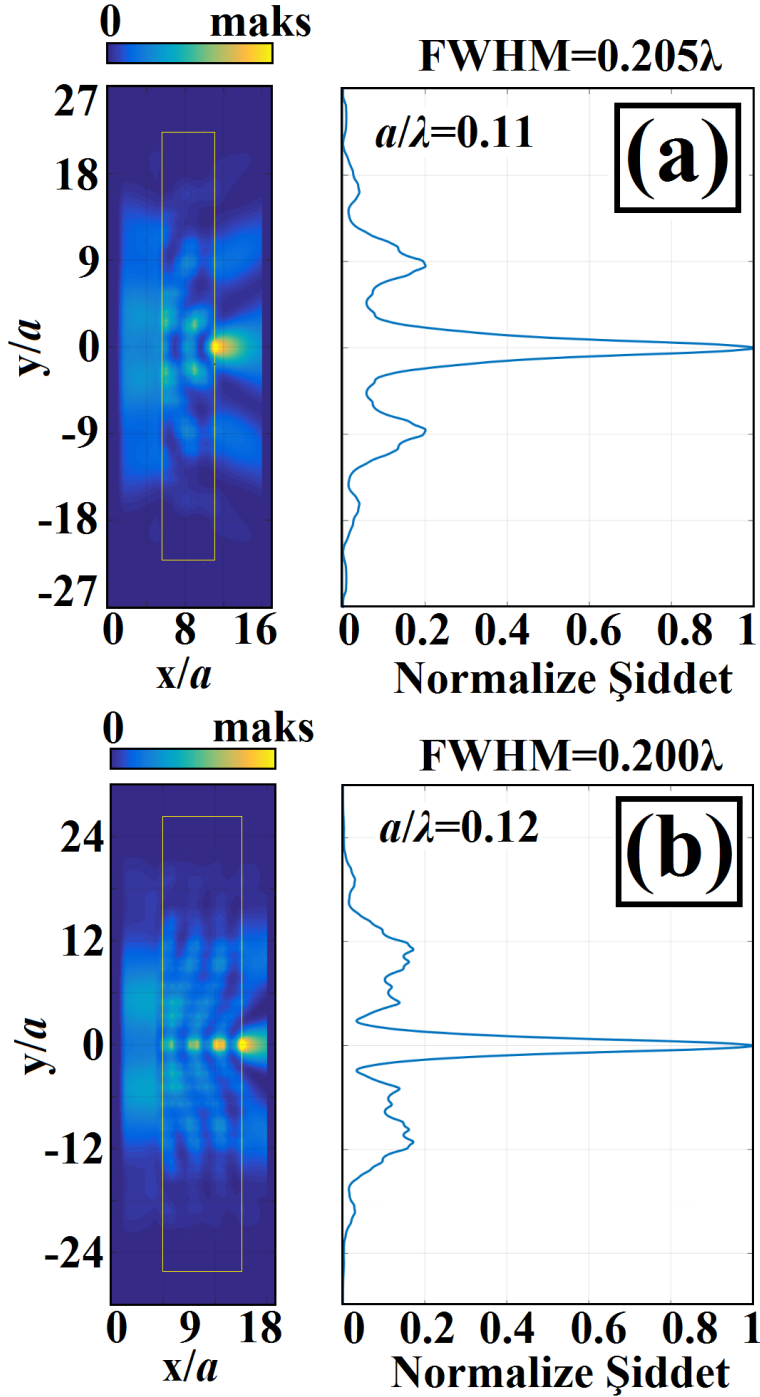
Şuna dikkat edilmelidir ki, FWHM değerlerinin yanında MSL değerleri de oldukça azaltılmıştır. Ayrıca, ana kulakçıktaki enerji oranları hesaplanmış ve Çizelge 5.1'de verilmiştir. Sonuçlara bakıldığında, odaklanan ışıktaki enerjinin yaklaşık olarak %40'ı ana kulakçıkta bulunmaktadır.

Çizelge 5.1 : Dört farklı tasarlanan yapıya ait sonuçlar.

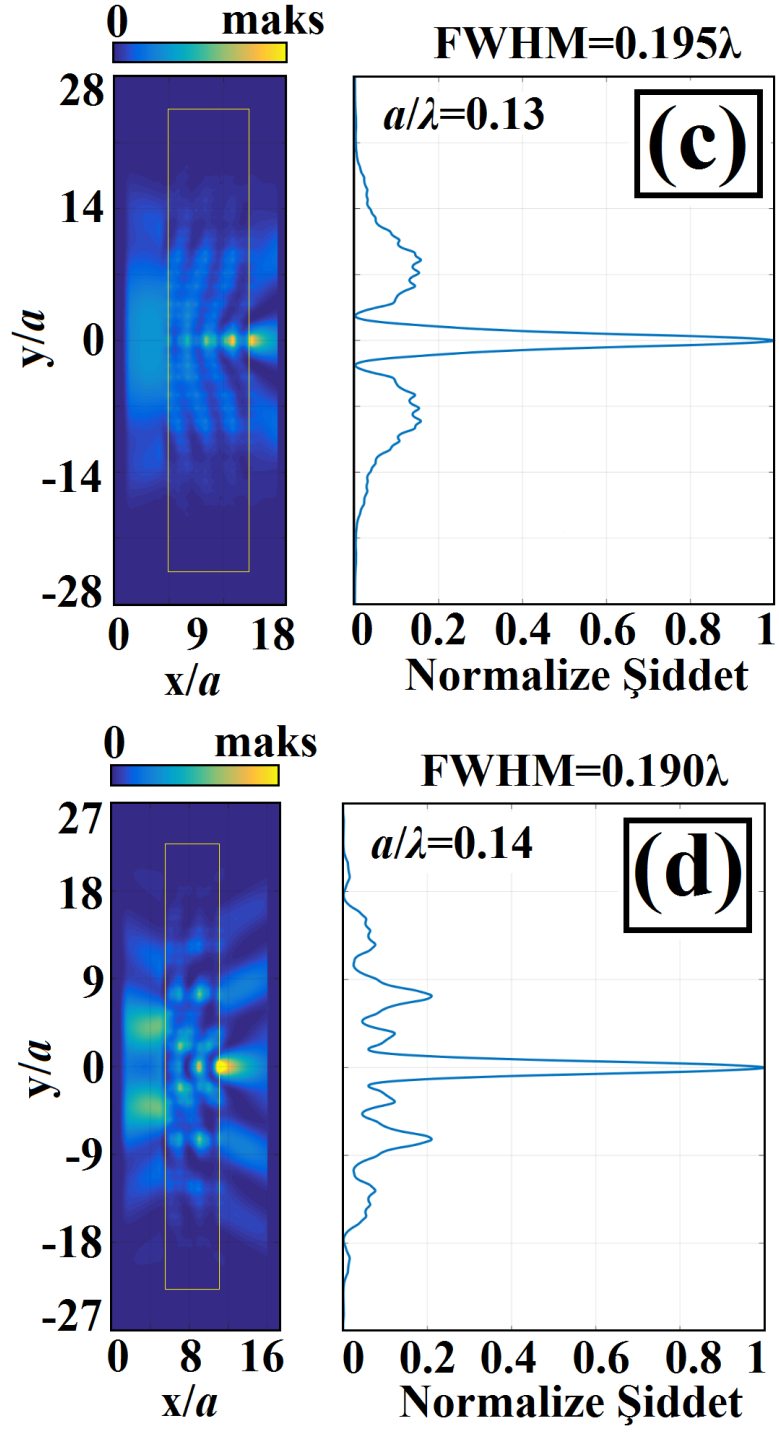
Normalize Frekans (a/λ)	Sütun sayısı	FWHM	MSL	Odak genişliği çevirim oranı	Ana kulakçıktaki enerji yüzdesi
0.11	6	0.205λ	% 19.9	9.34	%56.69
0.12	10	0.200λ	% 16.8	12.08	%41.35
0.13	10	0.195λ	% 14.8	12.62	%43.87
0.14	6	0.190λ	% 19.9	12.95	%39.79

Şekil 5.3'te ve Şekil 5.4'te verilen dört farklı yapı için FWHM değerlerinin yapıdan uzaklaştıkça nasıl değiştiğini gösteren grafikler Şekil 5.5'te ve Şekil 5.6'da verilmiştir. Bu şekilden görüldüğü üzere, odak mesafeleri $0.32a$ ile $2.56a$ arasında $0.32a$ kadarlık adımlarla değişmektedir. Ayrıca, her yapı için $0.32a$ ve $2.56a$ uzaklıklardaki şiddet profillerinin kesiti de verilmiştir. Şekil 5.5'ten ve Şekil 5.6'dan görüldüğü üzere, odak mesafesi doğrusal olarak arttığında FWHM değerleri de doğrusal bir biçimde artmaktadır ve FWHM değerleri yine de kırınım limiti olan $\lambda/2$

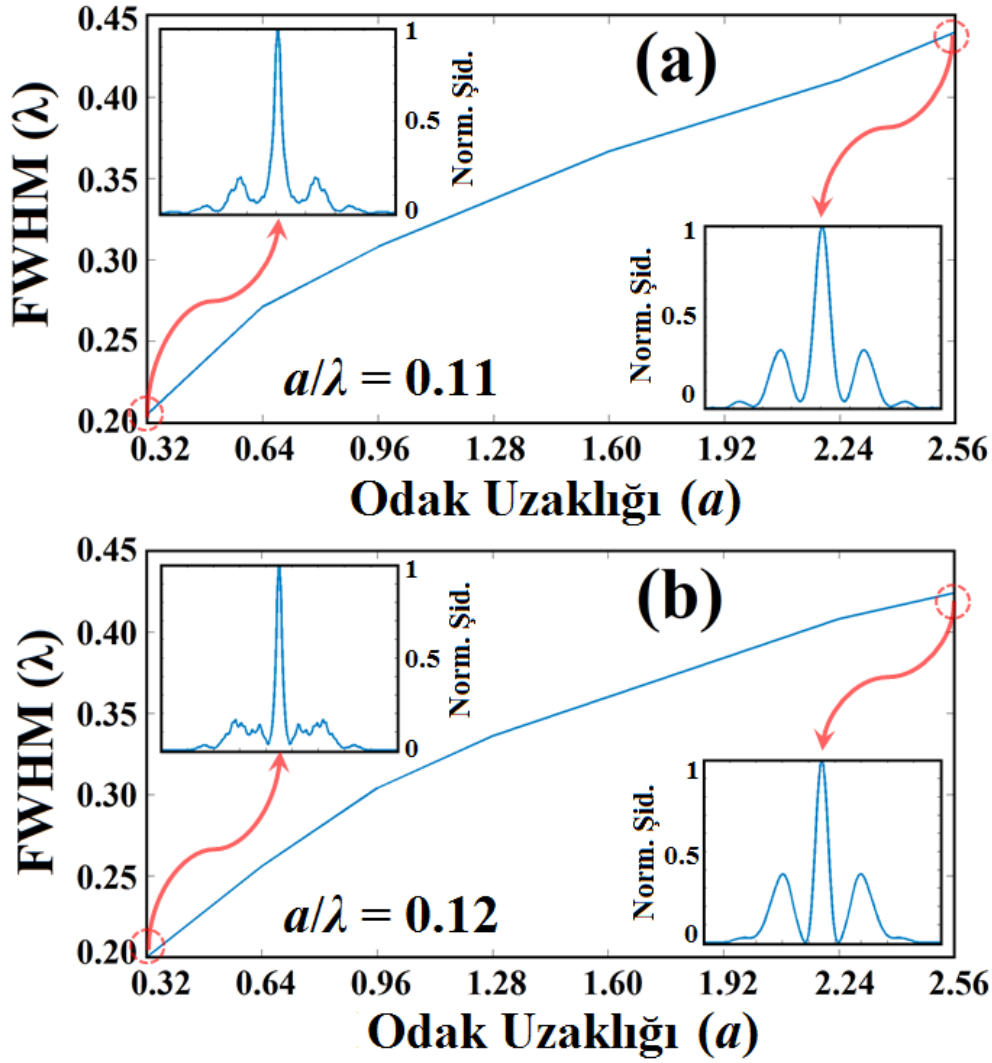
değerinin altında kalmaktadırlar. Yapıdan olan uzaklık arttığında MSL değerleri de artmaktadır. Ancak yine de MSL değerleri %50'nin altında kalmaktadırlar.



Şekil 5.3 : $a/\lambda=0.11$ ve $a/\lambda=0.12$ normalize frekanslarında tasarlanan FK'lere ait şiddet dağılımları ve odak noktası kesit profilleri [81].

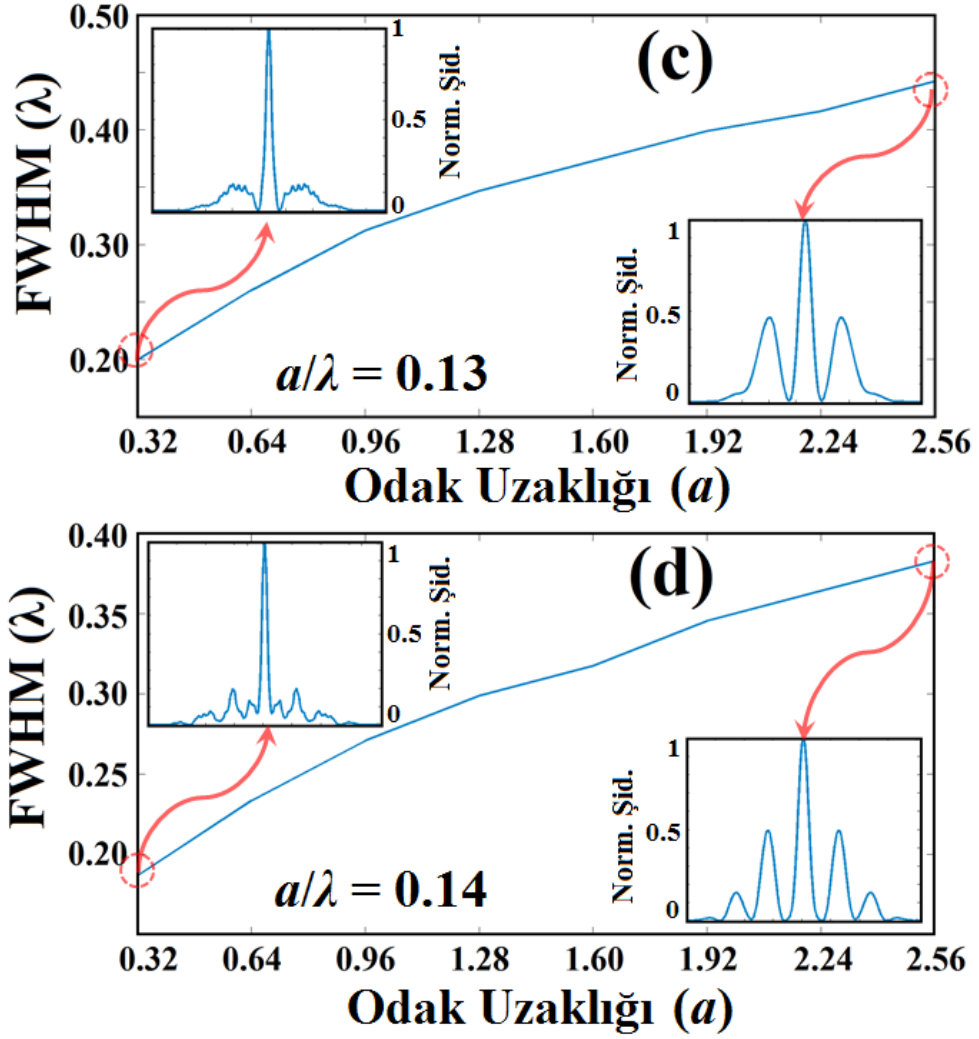


Şekil 5.4 : $a/\lambda=0.13$ ve $a/\lambda=0.14$ normalize frekanslarında tasarlanan FK'lere ait şiddet dağılımları ve odak noktası kesit profilleri [81].



Şekil 5.5 : $a/\lambda=0.11$ ve $a/\lambda=0.12$ normalize frekanslarında tasarlanan FK'lere ait FWHM değerlerinin odak uzaklığına göre değişim grafikleri [81].

Işığın güçlü bir şekilde odaklanmasının iki sebebi olduğu söylenebilir. Birincisi, dielektrik silindir çubukların düzensiz olarak dizilmesinden ortaya çıkan kırıcılık indisinin dereceli olarak değişimidir. Her ne kadar çubuklar arasındaki boşluk düzensiz olsa da, Şekil 5.2(c)'de görüldüğü üzere dielektrik malzeme yoğunluğu yapının merkezinde daha fazladır ve kenarlara doğru bu yoğunluk azalmaktadır. Kırıcılık indisi değişiminin varlığı Şekil 5.3'teki ve Şekil 5.4'teki şiddet profillerinden belli olan faz ön yüzeylerinden anlaşılmaktadır.



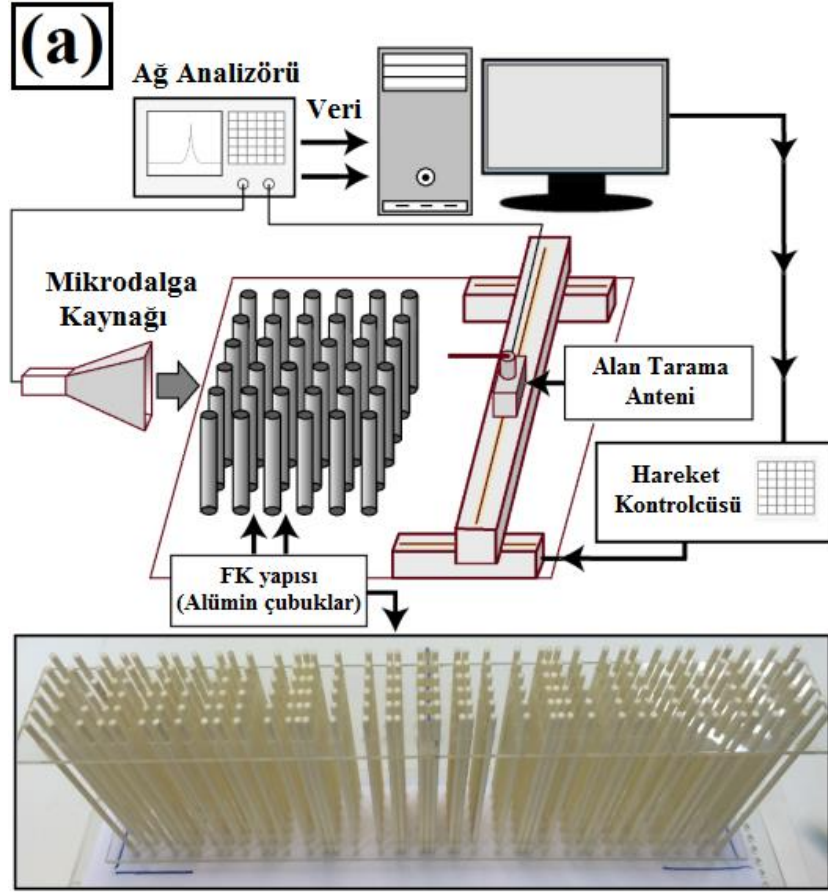
Şekil 5.6 : $a/\lambda=0.13$ ve $a/\lambda=0.14$ normalize frekanslarında tasarlanan FK'lere ait FWHM değerlerinin odak uzaklığına göre değişim grafikleri [81].

Kırıcılık indisinin dereceli değişiminden farklı olarak belirtilen bir diğer odaklama mekanizması ise yapıdaki çubuklar arasında oluşan geniş boşluklarda ışığın girişimidir. Bu geniş boşluklar ışığı yönlendiren dalgakılavuzları gibi davranırlar ve çoklu hüzmeye girişimine sebep olurlar. Her bir dalgakılavuzu kanalının çıkışında bir elektrik alan oluşur ve N sayıda kanaldan sızan dalgaların girişimi toplamda skaler bir elektrik alanının oluşmasını sağlar. Bu oluşan elektrik alanı aşağıdaki formül ile açıklayabiliriz:

$$E_{sum} = \sum_{i=1}^N U_i e^{(j\varphi_i)} e^{(j(\omega t - \vec{k}_i \cdot \vec{r}_i))}$$

Bu denklemde, dalgakılavuzunun çıkışındaki dalganın genliği ve fazı sırasıyla U_i ve ϕ_i ile gösterilmiştir. Ayrıca, w ilerleyen dalganın açısız frekansını, N ise kanal sayısını temsil eder. Yine bu denklemde, zaman harmonik bağımlılığının olduğu varsayılmıştır. Her bir kanalın girişim etkisini gösteren faz terimi dalgavektörü k_i ve pozisyon vektörü r_i terimlerinin nokta çarpımı ile kararlaştırılır. Şiddet profili $(E_{\text{sum}}E_{\text{sum}}^*)/2$ ile kararlaştırılır ve buradaki E_{sum}^* ifadesi toplam elektrik alanın karmaşık eşleniğidir. Yukarıdaki denklem için herhangi bir yaklaşımda veya öngöründe bulunmadan şiddet profilinin kapalı formda gösterilmesi kolay değildir. Ancak, şunu gösterebiliriz ki, şiddet profilinde rol alan parametreler genlik profilleri, ilgili faz terimleri ve girişimde bulunan dalgakılavuzu sayılarıdır. N 'in büyük olması yapının ortasında yüksek şiddet değerine sahip dar bir tepe noktasının oluşmasını sağlar. Bir diğer deyişle, N arttıkça ortadaki kulakçık daha da sıklaşır çünkü dalgakılavuzu sayısı artmaktadır. Burada yan kulakçıkların olması da çoklu hüzmeye girişiminin olduğunu gösterir. Bu iki mekanizmanın sonucunda yapının dışarısında güçlü bir odaklama ortaya çıkar. Hayali kanallar arasındaki faz farkını ve yapının çıkışındaki dalganın genliği bilinmediği için yapıdan sonraki şiddet dağılımının profili çıkarılmaya çalışılmamıştır. Burada denklemin paylaşmamızın tek amacı odaklama etkisinde rol alan, yapının çıkışındaki düzensiz genlik dağılımının ve faz çeşitliliğinin önemini tartışmaktır.

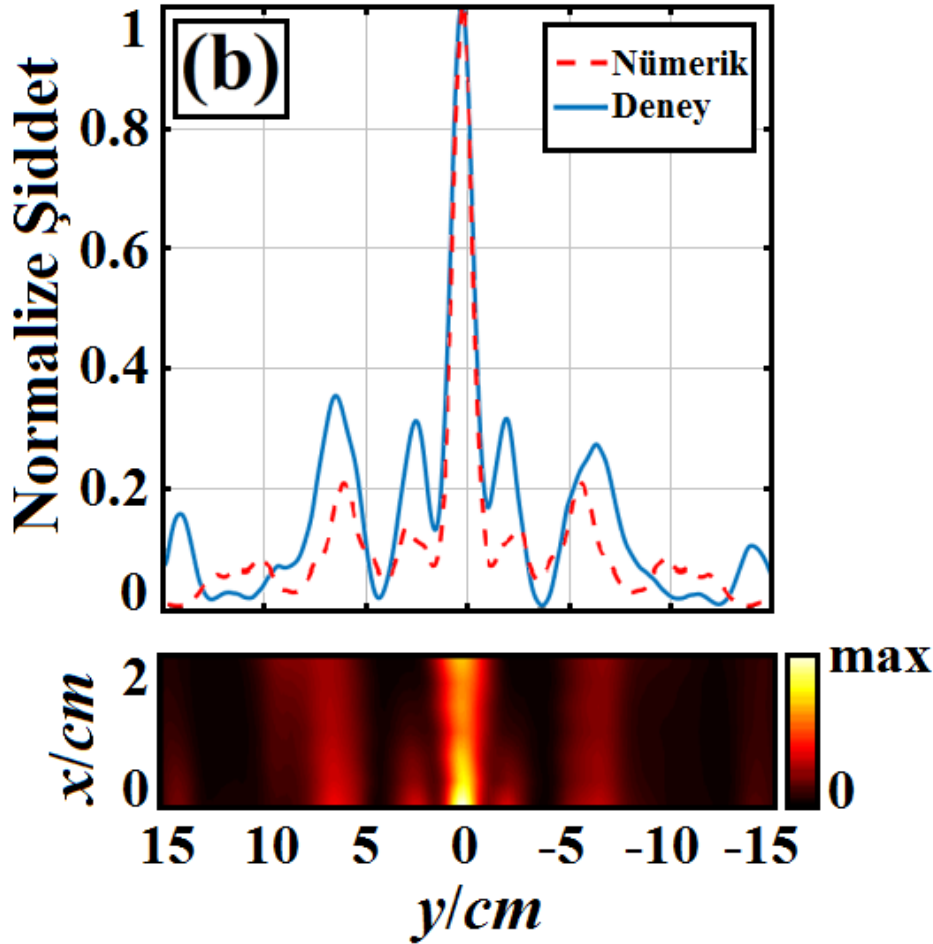
Nümerik sonuçları doğrulamak için en iyi yapının mikrodalga bölgesinde deney yapılmıştır. FK lensi oluşturmak için nümerik hesaplamalarda olduğu gibi dielektrik alümin çubuklar kullanılmıştır. Şekil 5.7'de deney düzeneğinin şeması ve tasarlanan en iyi yapının fotoğrafı verilmiştir. Agilent E5071C ENA vektör ağ analizörü kullanılarak elektromanyetik dalga kaynağı oluşturulmuş ve odaklanan elektromanyetik dalganın alan şiddeti ölçülmüştür. FK lens yapısını uyarmak için açıklık anten, durgun haldeki şiddet dağılımını ölçmek için ise monopol anten kullanılmıştır. Kullanılan antenlerin çalışma frekansı aralığı 4GHz ile 6GHz arasındadır.



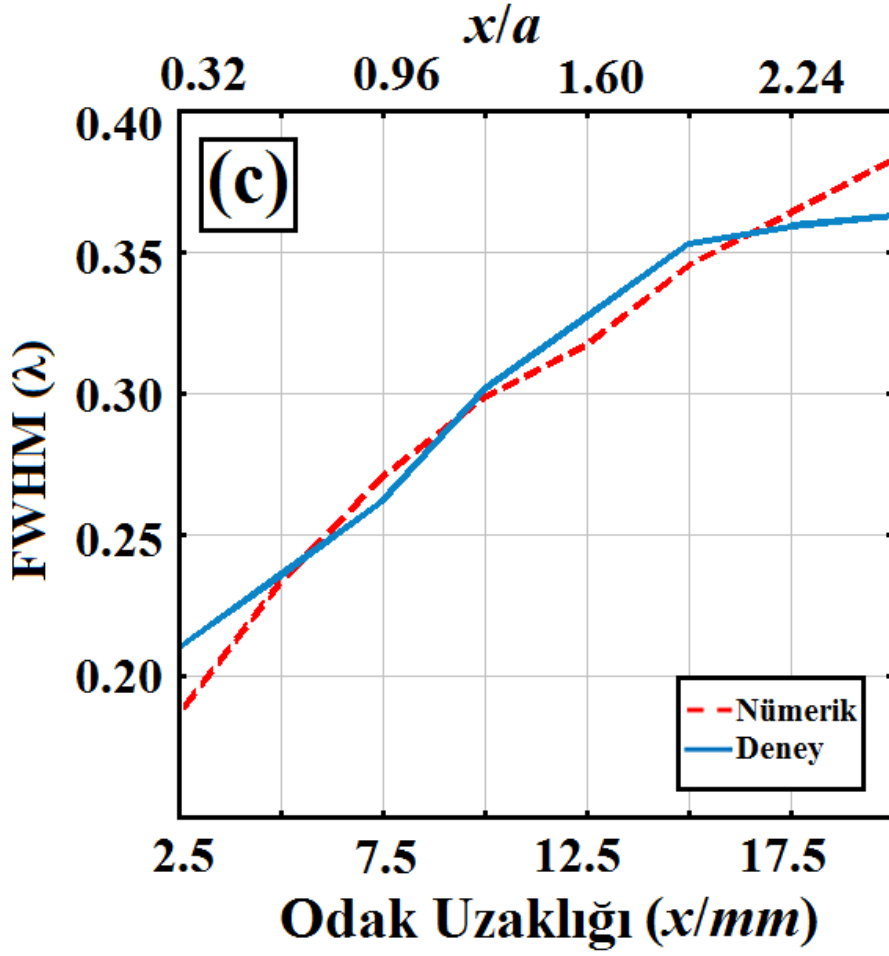
Şekil 5.7 : Deneysel düzeneğin şeması ve tasarlanan en iyi FK'nin fotoğrafı [81].

Nümerik ve deneysel sonuçların birbirleri ile uyuşması için yapıyı uyarma koşulları dikkatlice ayarlanmıştır. Bunun için de hem nümerik simülasyonlarda hem de deneyde yapıyı uyaran dalga kaynağı FK lens yapısının hemen girişine yerleştirilmiştir. Buna ek olarak, olası geri yansımaları azaltmak için yapının etrafına mikrodalga emiciler yerleştirilmiştir. TM polarizasyona sahip bir dalga FK lens yapısına gönderilmiştir. Monopol anten kullanılarak yapının arkasındaki hava ortamında odaklanan dalganın alan şiddeti ölçülmüştür. Monopol anten çubuklara paralel olarak yerleştirilmiştir ve antenin ucu çubukların yarı yüksekliğine hizalanmıştır. Deneyde kullanılan yapı alümin silindir çubuklardan oluşmaktadır. Alümin çubukların kırıcılık indisi $n=3.13$ 'tür, yarıçapları ise $r=1.55\text{mm}$ olarak seçilmiştir. Deneydeki hesaplamalarda kullanılan örgü sabiti $a=7.75\text{mm}$ olarak seçilmiştir. Yapının arka tarafında oluşan durgun haldeki şiddet alanını ölçmek için monopol anten 2.5mm adımlarla y yönünde 300mm ve x yönünde 20mm ölçülerindeki bir alanı taramıştır. Şekil 5.8'in üst kısmında deneyde seçilen çalışma frekansı 5.42GHz 'den ve iki boyutlu nümerik simülasyonlardan elde edilen şiddet profillerinin kesitleri verilmiştir. Buradan görüldüğü üzere, simülasyon ve deney

sonuçları arasında iyi bir uyum elde edilmiştir. Şekil 5.8'in alt tarafında 5.42GHz'de yapılan deneyden elde edilen şiddet alan dağılımının görüntüsü verilmiştir. Deneyde elde edilen FWHM değeri 0.21λ olarak ölçülmüştür ve MSL değeri %30'un altında kalmaktadır. Hesaplanan ve ölçülen FWHM değerleri karşılaştırıldığında aralarında 0.02λ kadarlık fark olduğu görülmektedir ki bu fark ihmal edilebilecek kadar küçüktür. Şekil 5.9'da hem nümerik hem de deneysel FWHM değerlerinin farklı uzaklıklardaki değerleri gösterilmiştir. Deneyde x-ekseni boyunca 20mm'lik bir mesafe taranmıştır. FWHM değerleri 2.5mm'den 20 mm'ye kadar olan mesafede 2.5mm aralıklarla ölçülmüştür. Görüldüğü üzere, deneyde ölçülen FWHM değerleri kırınım sınırının altında kalmaktadır ve nümerik olarak hesaplanan FWHM değerleri ile örtüşmektedir. Hatta, deneyde odak noktasında ölçülen hüzmeyin enerjisinin %30.5'i ana kulakçıkta kalmaktadır.



Şekil 5.8 : Deneyde elde edilen odak noktası kesiti ve yapıdan sonraki alana ait şiddet dağılımı [81].



Şekil 5.9 : Deneysel olarak ölçülen FWHM değerlerinin odak noktasına göre değişimi [81].

Burada örgü sabiti $a=7.75\text{mm}$ olduğu için ve çalışılan normalize frekans değerleri $a/\lambda=0.14$ olduğu için çalışılan dalgaboyunu $\lambda=55.35\text{mm}$ olarak hesaplayabiliriz. Şekil 5.9'da görüldüğü üzere, 0.21λ FWHM değeri ile dalgaboyu altında odaklama $\Delta F=2.5\text{mm}$ uzaklıkta, bir başka deyişle $\Delta F=0.0452\lambda$ mesafede ortaya çıkmaktadır ve FWHM değeri 0.36λ 'ya kadar artarken $\Delta F=0.3613\lambda$ 'ya kadar artmaktadır. Bu sebeple, kuvvetli odaklama 0.0452λ ile 0.3613λ mesafeleri arasında ortaya çıkmaktadır denilebilir. Bu durumda, tasarlanan yapının yakın alanda, bir başka deyişle $\Delta F < \lambda/2$ sınırından kısa mesafelerde, dalgaboyu altında odaklama yaptığı söylenebilir. Yakın alanda kuvvetli odaklamanın biyo görüntüleme, yakın alan litografi, optik hafıza depolama, ışık toplama ve spektral sinyal artırma gibi çeşitli alanlar için kullanışlı olduğu bilinmektedir [91]. Hatta, yakın alanda kuvvetli odaklama elde etmek süper çözünürlük uygulamaları gerektiren alan yerelleştirme, fabrikasyon, karakterizasyon, algılama ve görüntüleme, yakın alan taramalı optik

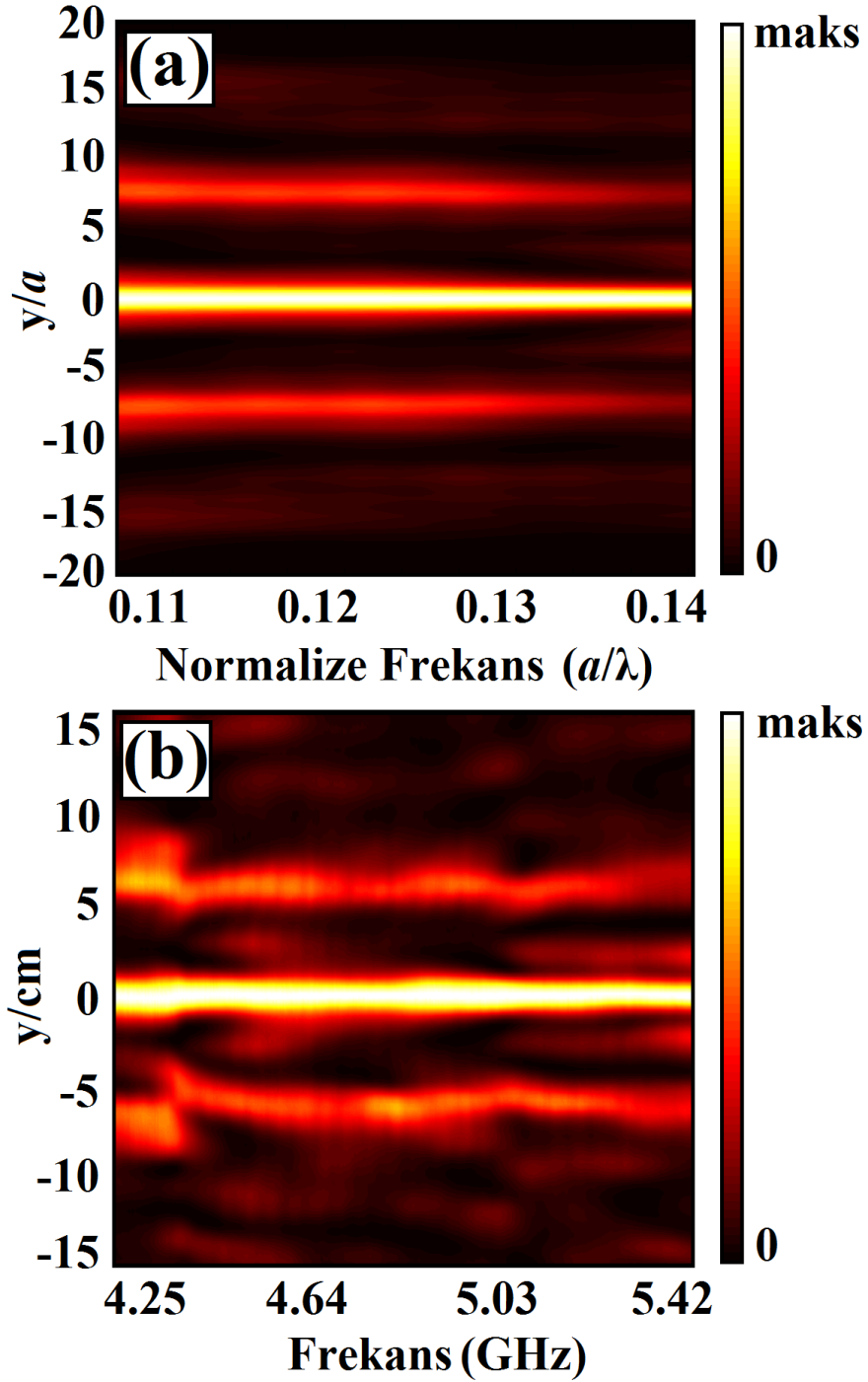
mikroskopi ve yakın alan kızıl ötesi spektrometri gibi bazı alanlar için de önemlidir [92-96].

Tasarlanan FK lens yapısının geniş bir çalışma frekansı aralığında dalgaboyu altında odaklayan aygıt olarak çalışabildiğini göstermek için 4.25GHz ile 5.42GHz frekans aralığında da deneyler yapılmıştır. Bu frekans aralığı $a/\lambda=0.11$ ile $a/\lambda=0.14$ normalize frekans aralığına karşılık gelmektedir. Şekil 5.10(a)'da ve Şekil 5.10(b)'de nümerik ve deneysel yatay kesit şiddet haritaları gösterilmektedir. Şekil 5.10(a)'da $a/\lambda=0.11, 0.12, 0.13$ ve 0.14 normalize frekansları belirtilmiştir ve bu normalize frekans değerlerine karşılık gelen FWHM değerleri sırasıyla $0.205\lambda, 0.200\lambda, 0.195\lambda$ ve 0.190λ olarak hesaplanmıştır. Şekil 5.10(b)'de ise 4.25GHz, 4.64GHz, 5.03GHz ve 5.42GHz frekans değerleri belirtilmiştir ve bu frekanslardaki FWHM değerleri sırasıyla $0.234\lambda, 0.230\lambda, 0.225\lambda$ ve 0.210λ olarak ölçülmüştür. Her ne kadar iki durumda da asıl özellikler birbirlerine benzese de aralarında bir uyumsuzluk bulunmaktadır çünkü açıklık anten kullanılan mikrodalga deneyleri sonlu adımlarla (sonlu uzaysal çözünürlük ile) gerçekleştirilmiştir. Buna ek olarak, alıcı anteni yapının arka yüzeyine yaklaştırmak oldukça zordur. Sonuç olarak, Şekil 5.10'da deneysel ve nümerik sonuçlar arasında çözünürlükten kaynaklanan bazı farklılıklar görülmektedir.

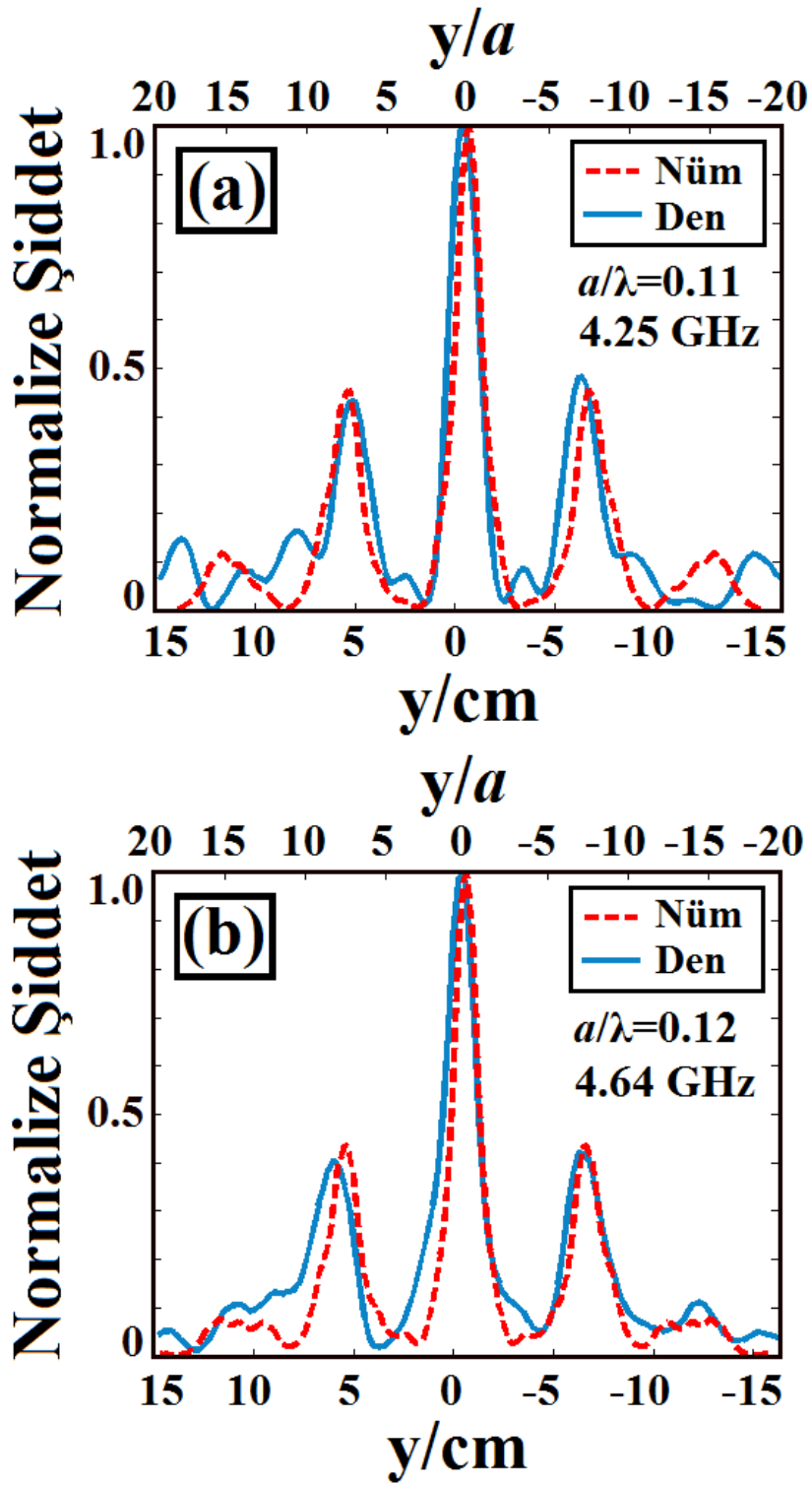
Çalışılan dört farklı frekans için verilen enine şiddet profilleri incelendiğinde orataya çıkan dalgaboyu altında odaklanmış hüzmeler Şekil 5.11'de ve Şekil 5.12'de verilmiştir. Görüldüğü üzere, nümerik ve deneysel sonuçlar birbirleri ile uyusmaktadır. Hatta, odaklanan dalganın yan kulakçıkları %50'nin altında kalmaktadır. Bu sonuçlar tasarlanan yapının geniş bantta çalışabildiğini göstermektedir. Sonuç olarak, birden fazla frekansta ışığın dalgaboyu altında odaklanması elde edilmiştir.

Özetleyecek olursak, bu çalışmada DE kullanılarak herhangi bir kayıp mekanizması olmayan ve sadece dielektrik malzemelerden oluşan bir fotonik yapının tasarlanabileceği gösterilmiştir. Çalışmadaki amaç ışığın güçlü odaklanmasını sağlayacak bir fotonik yapı tasarlamaktır. Algoritma ile FDTD yöntemi birleştirilmiş ve dar odak noktası genişliği ile düşük yan kulakçık seviyeleri çoklu amaçlar olacak şekilde maliyet fonksiyonu tanımlanmıştır. Yapılan bu çalışmanın bir diğer önemi ise DE algoritmasının ilk defa dalgaboyu altında odaklama için kullanılmasıdır. FWHM değeri 0.25λ 'nın altında düşük yan kulakçık seviyeleri ile beraber elde edilmiş ve bu

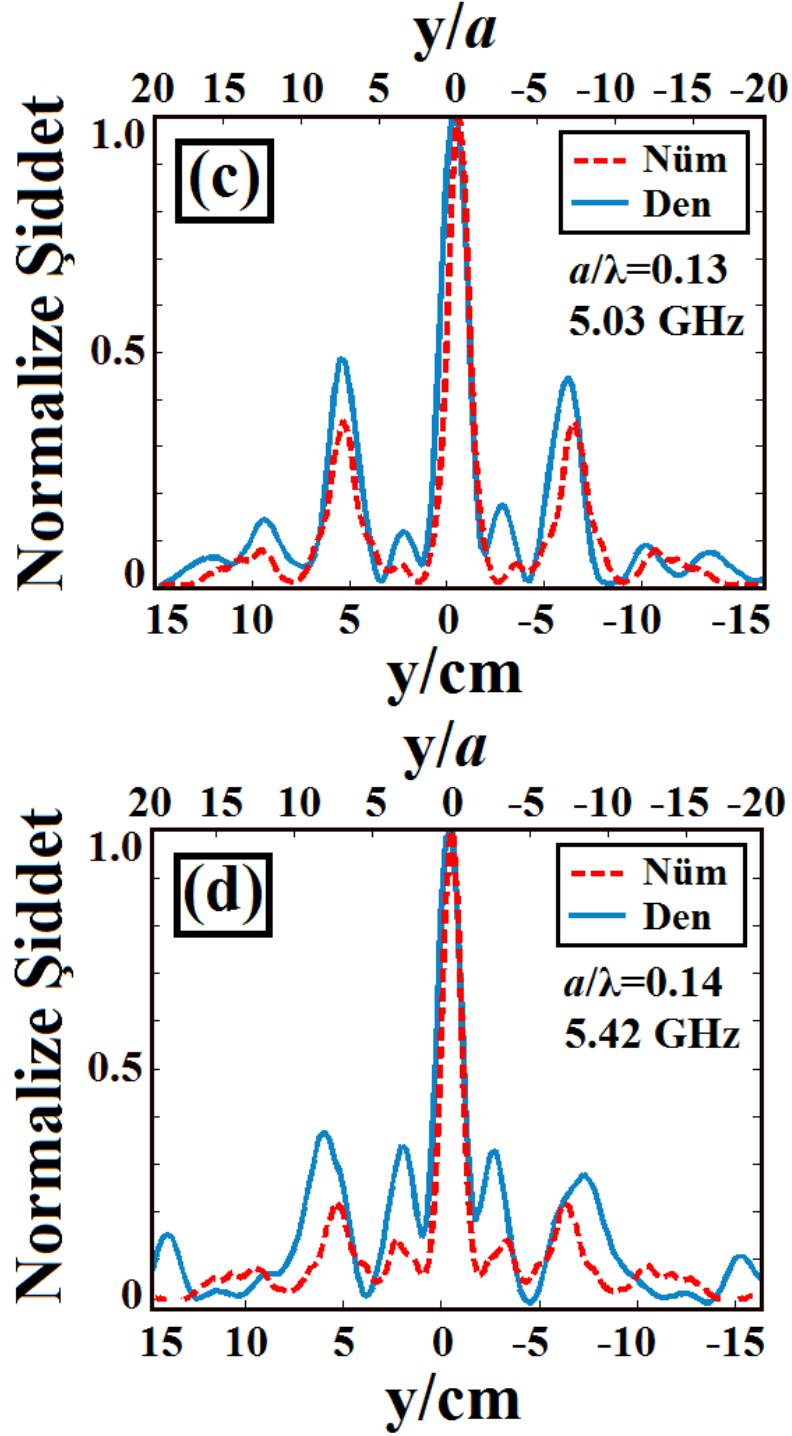
durum hem nümerik hem de deneysel olarak gösterilmiştir. Işığın dalgaboyu altında odaklanmasının sebebi girişim etkisi ve kırıcılık indisinin düzensiz değişimi olarak açıklanmıştır. Işığın dalgaboyu altında odaklanabilmesi, görüntüleme ve litografi alanlarında çözünürlüğün iyileştirilmesi ve optik ortamlarda veri depolama kapasitelerinin artırılması bakımından faydalı olabilir. Önerilen DE ile daha farklı ışık manipülasyon senaryolarını gerçekleştirebilecek fotonik yapılar tasarlanabilir.



Şekil 5.10 : (a) Nümerik ve (b) deneysel olarak elde edilen odak noktası kesit profillerinin frekansa göre değişimleri [81].



Şekil 5.11 : $a/\lambda=0.11$ (4.25GHz) ve $a/\lambda=0.12$ (4.64GHz) için nümerik ve deneysel odak noktası kesit profilleri [81].



Şekil 5.12 : $a/\lambda=0.13$ (5.03GHz) ve $a/\lambda=0.14$ (5.42GHz) için nümerik ve deneysel odak noktası kesit profilleri [81].

5.2 Dalgaboyu Altında Odaklayan Küçük Boyutlu Fotonik Aygıt Tasarımı

Tez kapsamında yapılan çalışmaların ilk kısmında ışığı dalga boyu altında odaklayabilen bir fotonik aygıt yapısı tasarlanmıştır. Bu çalışmanın devamı niteliğinde, daha farklı bir fotonik aygıt daha tasarlanmıştır. Bu tasarlanan aygıt, yine

ışığı dalgaboyu altında odaklayabilirken aynı zamanda küçük boyutlara sahip olmaktadır. Bir önceki kısımda bahsedilen fotonik aygıt yapısına ait nümerik ve deneysel sonuçlar paylaşılmıştır. Her ne kadar tasarlanan yapı üstün performans sergilese de yapının y yönündeki boyutları görece büyük olarak ortaya çıkmıştır. Tezin bu kısmında ise daha küçük boyutlarda dalgaboyu altında odaklama yapabilen bir yapının nasıl tasarlandığı anlatılacaktır.

Eğer yerleştirilen dielektrik çubukların pozisyonları DE ile belirleniyor ise, DE ile tasarlanan yapıların boyutlarını tasarım öncesinde belirlemek mümkün değildir. Tasarlanacak yapıların kaç sütundan oluşacağını belirledikten sonra DE algoritması farklı sütun sayıları için ayrı ayrı çalıştırılmıştır. Aradığımız temel nitelik, ışığın dalgaboyu altında odaklanması olduğu için en iyi sonucu veren yapı seçilir ve bu yapının sahip olduğu sütun sayısı da doğrudan yapının x yönündeki boyutunu belirlemektedir. Burada bir diğer etken ise kullanılan dielektrik silindir çubukların yarıçaplarıdır. Ancak yapının x yönündeki boyutunu belirleyen ana etken, belirtildiği üzere, sütun sayısıdır.

Tasarlanan yapıların x yönündeki boyutlarını tahmin etmek biraz da olsa mümkündür. Çünkü yaptığımız çalışmalarda çubuklar, yani sütunlar, arasındaki x yönündeki mesafe her zaman $1a$ olarak sabitlenmiştir. Ancak tasarlanan yapıların y yönündeki boyutlarını önceden tahmin etmek imkansızdır. Bunun sebebi, DE algoritmasının rastgele üretilen sayılar ile çalışmasıdır. Bu durumu şu şekilde açıklayabiliriz. DE algoritması ile belirlenen amaca yönelik bir fotonik aygıt tasarlanırken, bir sütundaki dielektrik silindir çubuklar arasındaki y yönündeki mesafeler eniyileştirilmiştir. Bir başka deyişle, bu mesafeler DE algoritması ile belirlenmiştir. Bu mesafelerin değerlerinin ne çıkacağı tasarımdan öne tam olarak bilinmemektedir. Ancak, bu mesafelerin hangi aralıkta olacağı algoritmaya başlangıçta kullanıcı tarafından girilmektedir.

Tasarlanan yapının y yönündeki boyutlarını belirleyen iki etken bulunmaktadır. Bunlardan biri, dielektrik çubuklar arasında y yönünde olabilecek maksimum mesafedir. Bu maksimum mesafe bir bakıma birim hücrelerin y yönündeki genişliğinin Δy maksimum değeri olarak da belirlenebilir. Bu sebeple, dielektrik çubukların içlerinde buldukları birim hücrelerin y yönündeki mesafelerinin azaltılması, yapının y yönündeki boyutunu değiştirecektir. Burada, daha küçük fotonik aygıt tasarlayabilmek için Δy 'nin alabileceği maksimum değeri azaltmak işe

yarayacaktır. Δy 'nin alabileceği maksimum değerin küçültülmesi, birim hücre bazında çok etkili olmasa da, y yönünde ard arda dizilen çubuklar, yapının toplam boyutunda büyük bir etki yaratabilirler. Tezin bir önceki kısmında tasarlanan yapı için Δy 'nin maksimum değeri $2.0a$ olarak seçilmiştir. Tezin bu kısmında ise küçük boyutlu bir fotonik aygıt tasarlamak için Δy 'nin maksimum değeri $1.5a$ olarak seçilmiştir. Her iki kısımda da Δy 'nin alabileceği minimum değer $0.44a$ olarak seçilmiştir ve dielektrik çubukların yarı çapları $r=0.2a$ olarak sabitlenmiştir. Yine her iki kısımda da Δx , yani birim hücrelerin x yönündeki genişlikleri, $1a$ olarak seçilmiştir. Bir başka deyişle, sütunlar arasındaki mesafe $1a$ olarak sabitlenmiştir.

Tasarlanması istenilen fotonik aygıtın y yönündeki boyutunu etkileyecek bir diğer önemli etken ise bir sütunda bulunan dielektrik silindirik çubukların sayısıdır. Çubuk sayısının azaltılması, yapının y yönündeki boyutunu ciddi bir ölçüde azaltacaktır. Bir önceki kısımda tasarlanan yapıda bir sütunda 41 tane dielektrik çubuk yer alırken, bu kısımda tasarlanan yapıda bir sütunda 21 dielektrik çubuk yer almaktadır.

Δy 'nin alabileceği maksimum değerin azaltılması ve bir sütunda yer alabilecek dielektrik çubuk sayısının azaltılması, iki etken birlikte, yapının y yönündeki boyutunu ciddi ölçüde küçültecektir. Algoritmayı çalıştırmadan önce Δy 'nin maksimum değerinin ve bir sütundaki çubuk sayısının azaltılması, DE ile tasarlanacak yapıların, önceki kısımdaki fotonik aygıt yapısına kıyasla daha küçük boyutlarda olmasını mümkün kılacaktır.

Yine bu kısımda da, sütun sayısı 5 ile 10 arasında değiştirilerek, DE algoritması farklı sütun sayıları için çalıştırılmıştır. Çalışılan normalize frekans değerleri ise yine $a/\lambda=0.11, 0.12, 0.13, 0.14$ olarak seçilmiştir. Bir başka deyişle, her bir sütun sayısı ve normalize frekans değerine karşılık gelecek şekilde DE algoritması tekrar tekrar çalıştırılmıştır.

Tezin bu kısımda tasarlanan fotonik aygıtların bir önceki kısımda tasarlanan fotonik aygıtlardan farklı olduğu bir durum söz konusudur. Bu durum, sütunların birbirlerinden farklı olmasıdır. Bir önceki kısımda tek bir sütun tasarlanmış ve bu sütun, istenilen sütun sayısı kadar çoğaltılarak bir fotonik aygıt oluşturulmuştur. Ancak bu kısımda tasarlanan fotonik aygıtların her bir sütunu birbirinden bağımsız olarak DE ile tasarlanmıştır. Bunun sebebi, fotonik aygıtın boyutlarını küçültürken istenilen FWHM ve MSL değerlerine ulaşmayı mümkün kılabilmesidir. Ancak

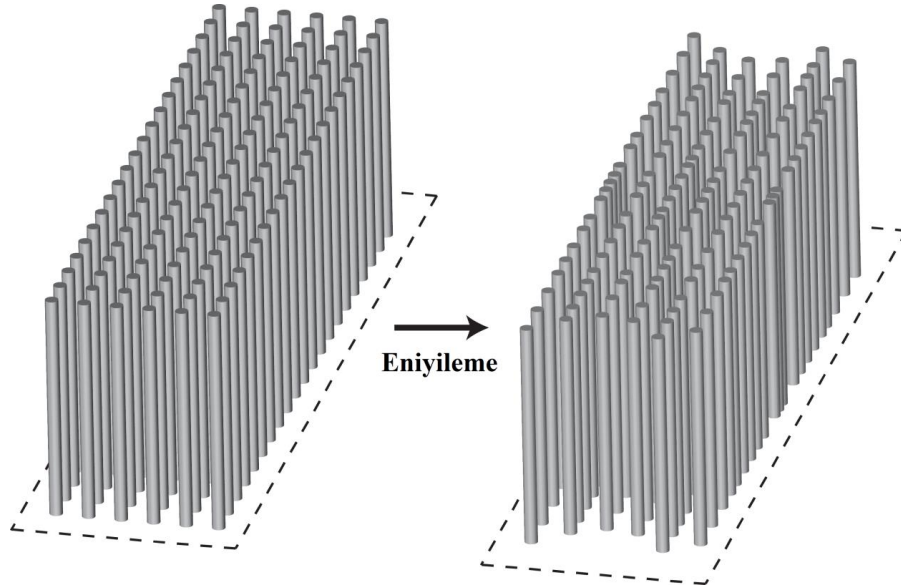
burada, önemli olan etken yapının boyutlarının küçük olması ve gelen ışığı dalgaboyu altında odaklayabilmesidir.

Bir önceki kısımda, FWHM ve MSL değerlerinin beraber azaltılması sırasında bu iki değer arasında bir değiş tokuşun olduğu, yani birinin artarken diğerinin azalması gibi bir durumun söz konusu olduğundan bahsedilmiştir. Tezin bu kısmında küçük boyutlu yapı tasarlanırken de FWHM ve MSL değerlerinin beraber azaltılması amaçlanmış ve aynı amaç fonksiyonu burada da kullanılmıştır. Fakat burada, maliyet fonksiyonuna dahil edilmeyen bir durum bulunmaktadır ki bu da yapının boyutunun küçültülmesidir. Farklı sütun sayılarında algoritma çalıştırıldığı için yapının boyutlarını maliyet fonksiyonuna katmak göreceli olarak her zaman az sayıda sütuna sahip yapıların DE tarafından tercih edilmesine sebep olacaktır. Ancak bu durumda da FWHM değerinin artması ve dalgaboyu altında odaklamanın sağlanamaması söz konusu olabilir. Δy 'nin maksimum değeri ile bir sütundaki dielektrik çubuk sayısı azaltıldığı için yapının görece küçük boyutlarda çıkması beklenecektir. Bu sebeple tasarlanacak fotonik aygıtların boyutlarını maliyet fonksiyonuna dahil etmek, dalgaboyu altında odaklama özelliğini elde edebilmenin önüne geçebilir. Bunu şu şekilde açıklayabiliriz; eğer algoritma ile yapının boyutunu da FWHM ve MSL değerleri ile beraber küçültmeye çalışırsak, algoritma için yapının boyutunu azaltmak daha kolay olacağı için sonuç olarak elimizde küçük boyuta sahip ama dalgaboyu altında odaklama yapamayan bir yapı olacaktır. Belki de bu yapı sadece küçük boyutlara sahip olacak ve herhangi bir odaklama işlemi yapmayacaktır. Burada yapılmak istenen hedeflerin beraber maliyet fonksiyonunda tanımlanması algoritmayı çok farklı yönde çalıştıracaktır ve istenilen hedefe hiç bir zaman ulaşamamaya neden olabilecektir. Daha önceden bahsedildiği üzere, maliyet fonksiyonunun doğru tanımlanması, algoritmanın daha iyi sonuç vermesini sağlayacaktır.

Küçük boyutlu dalgaboyu altında odaklama yapan fotonik aygıtları tasarlamak için DE kullanıldığında başka bir değiş tokuş olayı daha ortaya çıktığı gözlemlenmiştir. Yapının y yönünde boyutu azaldığında FWHM ve MSL değerlerinin yükseldiği farkedilmiştir. Çalışmada FWHM değerinin MSL değerine kıyasla daha önemli olduğu düşünüldüğünde, MSL değerinden az da olsa feragat edilebileceği düşünülmüştür. Bu sebeple, bir önceki kısımda MSL değeri %20'nin altında tutulmak istenirken, bu kısımda %30'un altında kalması tercih edilmiştir. Yine

FWHM değerinin olabildiğince küçük olması istenmiş ve hedef olarak sıfır değeri seçilmiştir.

Tasarlanan en iyi yapı 6 sütundan oluşmaktadır ve $a/\lambda=0.14$ normalize frekans değeri için tasarlanmıştır. Tasarlanan bu yapı dalgaboyu altında odaklama yapabilmektedir. Bu FK lens yapısına ait FWHM ve MSL değerleri nümerik olarak sırasıyla 0.19λ ve %23 şeklinde hesaplanmıştır. Bir önceki kısımda tasarlanan FK lens yapısı ise $FWHM=0.190\lambda$ ve $MSL=\%20$ değerlerine sahiptir. Burada tasarlamış olduğumuz küçük boyutlu yapının y yönündeki boyutları $21.26a$ olurken, bir önceki kısımda tasarlamış olduğumuz yapının y yönündeki boyutları $45.27a$ olarak hesaplanmıştır. Her iki yapı da aynı sayıda sütundan oluştukları için x yönündeki boyutları aynıdır ve $5.4a$ olarak hesaplanmıştır. Tasarlanan yapının görüntüsü Şekil 5.13'deki gibidir.

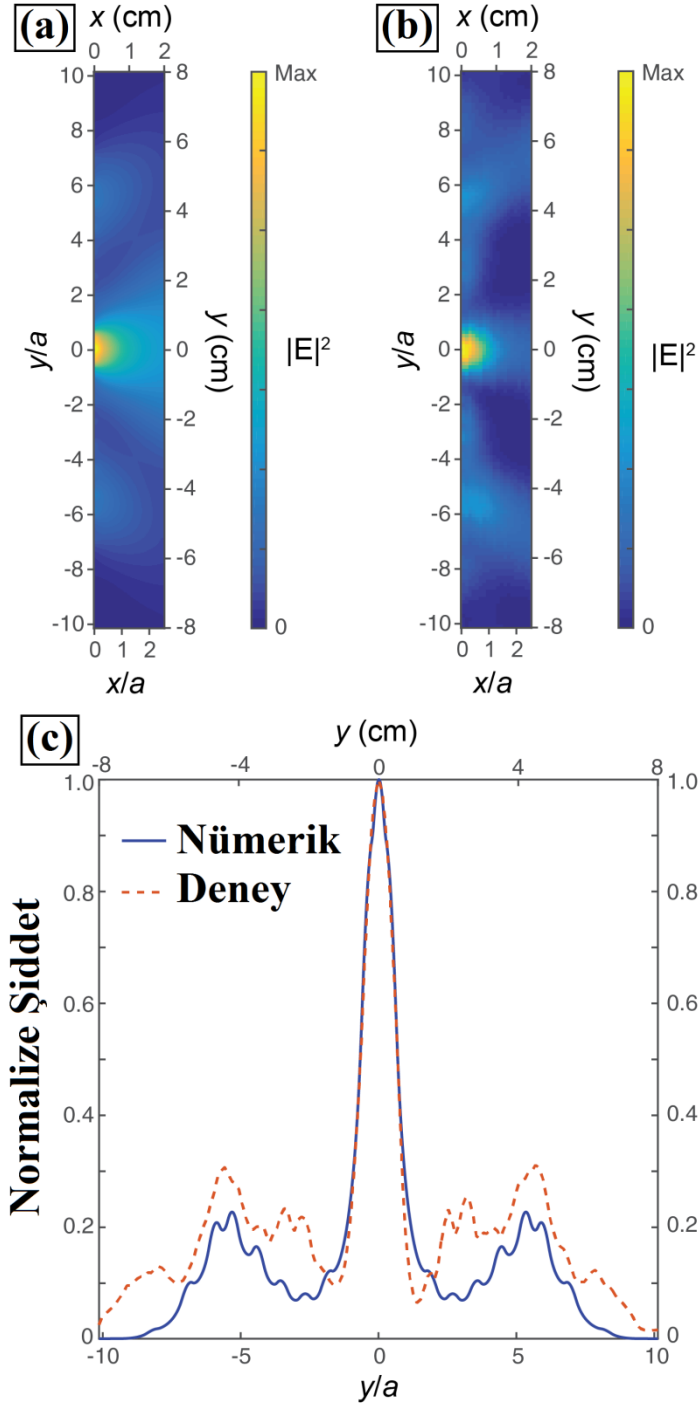


Şekil 5.13 : DE ile FK tasarım yöntemi.

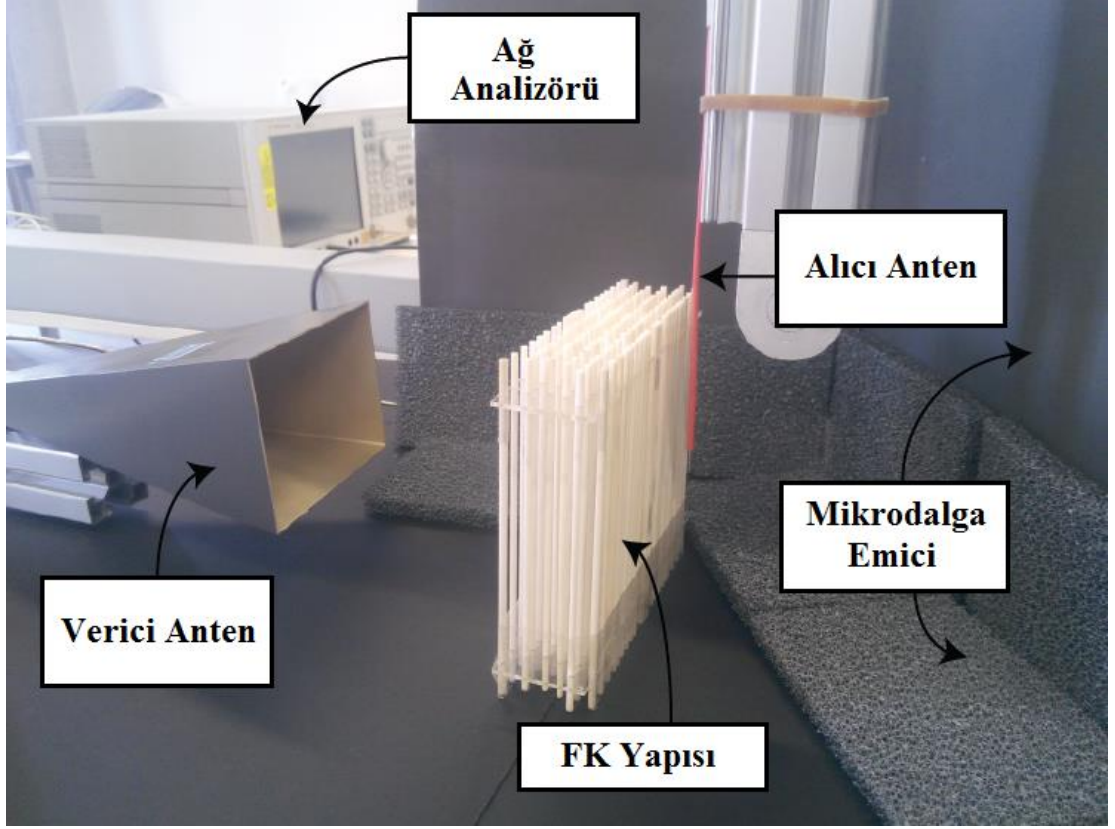
Tasarlanan yapıya ait $a/\lambda=0.14$ normalize frekansındaki elektrik alan dağılımı Şekil 5.14(a)'da, odak noktasındaki enine kesit profili ise Şekil 5.14(c)'de verilmiştir. Görüldüğü üzere odak noktası yapının hemen uç kısmındadır ve az sayıda yan kulakçıklara sahip temiz bir elektrik alan dağılımı bulunmaktadır.

Tasarlanan yapıya ait nümerik sonuçların doğrulunu kanıtlamak amacı ile mikrodalga frekansında deney yapılmıştır. Deney için tasarlanan yapının fotoğrafı Şekil 5.15'de verilmiştir. Oluşturulan yapı alümin çubuklardan meydana gelmektedir ve nümerik simülasyonlarda olduğu gibi bu çubuklar alümin malzemesinden oluşmaktadırlar ve $n=3.13$ kırıcılık indisi değerine sahiptirler. Deneydeki çalışma

frekansı 5.42GHz olarak seçilmiştir. Deneyde kullanılan örgü sabiti $a=7.75\text{mm}$ 'dir. Bundan yola çıkarak deneyde kullanılan dalgaboyu $\lambda=55.35\text{mm}$ olarak hesaplanır. Deneysel olarak ölçülen elektrik alan dağılımı ve odak noktasındaki enine kesit profili sırasıyla Şekil 5.14(b) ve Şekil 5.14(c)'de verilmiştir. Deneyde hesaplanan FWHM değeri 0.19λ ve MSL değeri ise %31 olarak ölçülmüştür.



Şekil 5.14 : (a) Nümerik ve (b) deneysel şiddet dağılımları. (c) nümerik ve deneysel odak noktası kesit profilleri.



Şekil 5.15 : Deney düzeneğinin ve tasarlanan FK'in fotoğrafı.

Nümerik ve deneysel sonuçlar arasında iyi bir benzerlik bulunmaktadır. MSL değerinin istenen üst sınırı her ne kadar yükseltilmiş olsa da elde edilen MSL değeri sınırın oldukça aşağısındadır. Ayrıca FWHM değeri ise yaklaşık $\lambda/5$ olarak elde edilmiştir ve bir önceki kısımda elde edilen değere kıyasla aynı seviyededir. Sonuç olarak, küçük boyutlara sahip dalgaboyu altında odaklayabilen bir FK lens yapısı tasarlanmıştır. Tasarlanan yapı, dalgaboyu altında odaklamanın önemli olduğu alanlarda kullanılabileceği gibi bu yapının fotonik entegre devrelere yerleştirilmesi de daha kolay olacaktır.

5.3 Birim Hücre Eniyilemesi ile FYBA'nın Genişletilmesi

FK'lerin ortaya çıkışı, FYBA'nın bulunması ile olmuştur. FK'ler aslında FYBA tabanlı, belirli bir periyoda ve simetriye sahip yapılar olsalar da bu özelliklerinin yanında farklı amaçlar için kullanılabilecekleri de ortaya çıkmıştır [64]. Literatürdeki çalışmaların çoğunda simetrik bir birim hücreye sahip, belirli bir periyotta ve yapı örgüsünde (kare veya üçgen) oluşturulmuş FK'ler sunulmuştur. Bu durum, üretim ve tasarım açısından kolaylık sağlasa da FK'lerin sahip olabileceği üstün performansları

gizleyebilmektedir. Bu sebeple, öncelikle FK'lerin yapı örgüleri değiştirilerek farklı amaçlar için kullanılması önerilmiştir. Örneğin, bir kare örgüdeki FK'de bir sütundaki dielektrik silindirlere arasındaki mesafe dereceli olarak artırıldığında kırıcılık indisinin de dereceli olarak değişiminin modellenebileceği düşünülmüş ve bu sayede odaklama yapabilen FK lens yapıları tasarlanmıştır. Yapılan çalışmalarda ortaya çıkan fotonik yapılara GRIN FK lens yapıları denilmektedir [64]. Tezin bundan önceki kısımlarında ise dielektrik silindirlere arasındaki mesafenin bir eniyileme algoritması ile belirlenmesi sayesinde dalgaboyu altında odaklama yapabilen FK lens yapılarının tasarlanabileceği gösterilmiştir. Bu yapılar FK'lerin ortaya çıkmasındaki asıl etken olan FYBA özelliğinden farklı bir kullanım alanı sunmaktadır ve oluşturulan yapılar sabit birer kare veya üçgen örgüye sahip değildirlere.

FK'lerin tasarımındaki özgürlük sadece dielektrik silindirlerin yerlerini değiştirmekle sınırlı kalmamıştır. Düşük simetri adı verilen çalışmalarda ise FK'lerin sahip olduğu birim hücrelerin simetrisi bozulmuştur ve karmaşık birim hücreler tasarlanmıştır. Bu tasarlanan birim hücreler kullanılarak çok farklı özelliklere sahip FK yapıları sunulmuştur [97].

FK'lerin birim hücrelerinin simetrik olması, indirgenemez Brillouin bölgesinin kullanılmasını ve birim hücrelerin dağılım diyagramlarının daha kolay incelenmesini sağlamaktadır. Birim hücrelerin PWE metodu kullanılarak dağılım diyagramlarının hesaplanması FYBA'nın incelenbilmesine imkan vermektedir. Ayrıca, eş frekans eğrileri (iso-frequency contour, IFC) hesaplanarak belirli bir yapı örgüsünde dizilen bir birim hücre ile oluşan FK yapısının özkolimasyon, negatif kırılma ve süper prizma gibi anormal ışık yayılımı gösterebileceği anlaşılabilir. Birim hücrelerin simetrik olması ise bu incelemelerde indirgenemez Brillouin bölgesinin kullanılmasını sağlayarak incelemeleri kolaylaştırmaktadır. Ancak bir birim hücre her zaman simetrik olmayabilir. Ayrıca kaç sayıda katlama eksenine göre simetrik olduğu da değişiklik gösterebilmektedir. Bunun neticesinde indirgenemez Brillouin bölgesi de değişmektedir.

Simetrik olmayan birim hücrelerin tasarımını elle yapmak zor olabileceği için istenilen amaca yönelik bir birim hücre tasarlanırken bir eniyileme algoritmasının kullanılması, üstün özellik verebilen birim hücrelerin tasarlanmasını sağlayabilir. Literatürde birim hücre eniyilemesi üzerine yapılan çalışmalar daha çok bir

polarizasyon için FYBA'nı genişletmek veya TFYBA bulmak üzerinedir [98]. Bunun yanında, eniyileme algoritması kullanılarak negatif kırılma olayını elde etmek için birim hücre tasarlanmıştır [99].

Tezin bu kısmında, bir FK birim hücresi DE kullanılarak tasarlanmıştır. Tasarımın amacı, TM polarizasyonundaki birinci FYBA'nı genişletmektir. Tasarlanan birim hücrenin kare örgüde dizilerek bir FK'yi oluşturacağı varsayılmıştır. Ayrıca tasarlanacak birim hücrenin x ve y eksenlerine göre simetrik olması istenmiştir. Tasarlanan birim hücrenin uygulaması olarak bu birim hücrenin kare örgüde dizilmesi ile oluşturulan FK'in ortasına çizgi kusur açılarak FK dalgakılavuzu yapısının tasarlanması amaçlanmıştır.

Birim hücrelerde yapılan iyileştirmeler genellikle daha çok dielektrik çubuğun veya hava boşluğunun yarıçapını değiştirmek şeklinde olmuştur. Ancak, birim hücrelerin bir eniyileme algoritması ile tasarlanması fikri ortaya çıktığında bir birim hücredeki dielektrik malzemenin veya hava boşluğunun bilinen bir geometrik şeklinin olmaması ihtimali üzerinde durulmuştur. Bu sebeple, yapılan çalışmalarda birim hücre kare ızgaralara, örneğin 10*10 sayıda piksellere, ayrılmıştır. Ayrıca, bir birim hücrenin daha küçük karelere bölüdüğü çalışmalar da literatürde mevcuttur [98].

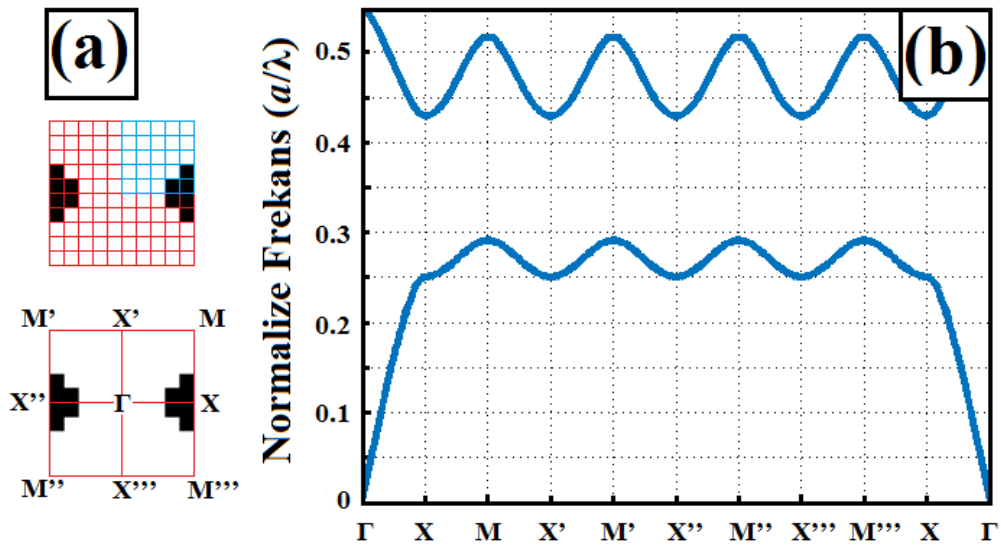
Birim hücreleri küçük karelere bölerek eniyileme algoritması ile tasarlama işlemi her bir karede dielektrik malzemenin olması veya olmaması (hava olması) durumuna göre çalışmayı gerektirmektedir. Burada yapılan eniyileme işlemi ikili bir işlemdir. Bir birim hücreyi çok sayıda küçük karelere bölmek tasarım parametrelerinin sayısını artırır. Bu durum kullanılan eniyileme algoritmasının yakınsamasını olumsuz yönde etkileyebilir. Ayrıca, bir birim hücreyi çok küçük karelere bölmek o birim hücrenin üretilmesini imkansız hale getirmektedir. Günümüzde var olan teknoloji ile yaklaşık 100nm boyutunda bir kare şeklinde dielektrik piksel üretilebilmektedir [39]. Bu açıdan bakıldığında, çok küçük karelerden üretilen bir birim hücre her ne kadar iyi sonuç verse bile fabrikasyon kısmı zorlaşmaktadır. Ayrıca dielektrik malzemeleri kare şeklinde üretmek bazı üretim hatalarını da beraberinde getirebilmektedir. Örneğin; bir karenin köşesi tam olarak sivri bir şekilde üretilmeyebilir. Ayrıca etrafı hava boşluğu olarak bırakılan bir dielektrik karenin tek başına üretilmesi de üretim tekniklerinin hassasiyetlerine bağlı olarak mümkün olmayabilir. Bu durumun tam tersi olarak dielektrik ile doldurulan karelerin ortasında sadece bir karenin hava

boşluğu olarak bırakılması üretim sırasında bu hava boşluğunun açılmamasına da sebep olabilir [39].

Tezin bu kısmında yapılan çalışmalarda tasarlanan birim hücreler 10*10 sayıda karelere bölünmüştür. Bu karelere dielektrik malzeme yerleştirilmesi veya karelerin hava boşluğu olarak bırakılması DE ile karşılaştırılmıştır. Yerleştirilen dielektrik malzeme silikon olmakla beraber kırıcılık indisi $n=3.46$ olarak seçilmiştir. Tasarlanan birim hücrelerin x ve y eksenlerine göre simetrik olarak tasarlanması düşünülmüştür. Bunun sebebi inceleyebilecek bir indirgenemez Brillouin bölgesi elde edebilmektir. Bu sayede PWE yöntemi ile Brillouin bölgesinde daha az sayıda köşe noktası kullanılarak analiz yapmak mümkün olacaktır. Birim hücreleri simetrik olarak tasarlama düşüncesi analitik düzlemin birinci, ikinci, üçüncü ve dördüncü bölgeleri göz önünde bulundurularak açıklanabilir. 10*10'luk karelerden oluşan bir birim hücre 5*5'lik dört farklı bölgeden oluşmaktadır. Bu bölgelerin analitik düzlemin dört bölgesi ile birebir eşleştiğini varsayarsak sadece 5*5'lik bir bölgenin DE kullanılarak tasarlanması ve bu bölgenin simetrisi alınarak geri kalan üç bölgenin oluşturulması sağlanabilir. Bu sayede dört bölge yani birbirinin simetrisi dört tane 5*5'lik bölgeler ile bir birim hücre elde edilmiş olur. PWE yöntemi ile bu birim hücrenin kare örgüde dizileceği varsayılarak dağılım diyagramları hesaplanır. Dağılım diyagramlarından FYBA'nın genişliği normalize frekans değerleri cinsinden bulunabilir. Bu kısımda yapılan çalışmalarda tasarımı anlatılan birim hücrenin TM polarizasyonunda birinci FYBA'nın genişletilmesi amaçlanmıştır. Ancak bu işlem yapılırken FYBA için alt veya üst sınır belirlenmemiş, bir başka deyişle FYBA'nın ortasını belirtecek bir normalize frekans değeri seçilmemiştir. Eniyileme işlemi süresince ortaya çıkan birim hücrelerin FYBA'larının genişliği ve hangi normalize frekanslar arasında olduğu değişmektedir.

DE ile tasarlanan bir birim hücrenin kare şeklinde olması ve birim hücrenin x ve y yönündeki genişliklerinin sırasıyla $\Delta x=1a$ ve $\Delta y=1a$ olması istenmiştir. Eniyileme işlemi sonucunda elde edilen bir birim hücrenin görüntüsü Şekil 5.16(a)'daki gibidir. Tasarlanan bu birim hücre 10*10 sayıda küçük piksellerden oluşmaktadır. Yani her bir pikselin bir kenarı $0.1a$ kadardır. Görüldüğü üzere birim hücre yapısı x ve y eksenlerine göre simetriktir. Asıl tasarlanan kısım analitik düzlem düşünüldüğünde birinci bölgedeki 5*5'lik kısımdır. Simetri kullanmanın bir indirgenemez Brillouin bölgesi kullanma haricinde bir diğer avantajı ise algoritma da kullanılan tasarım

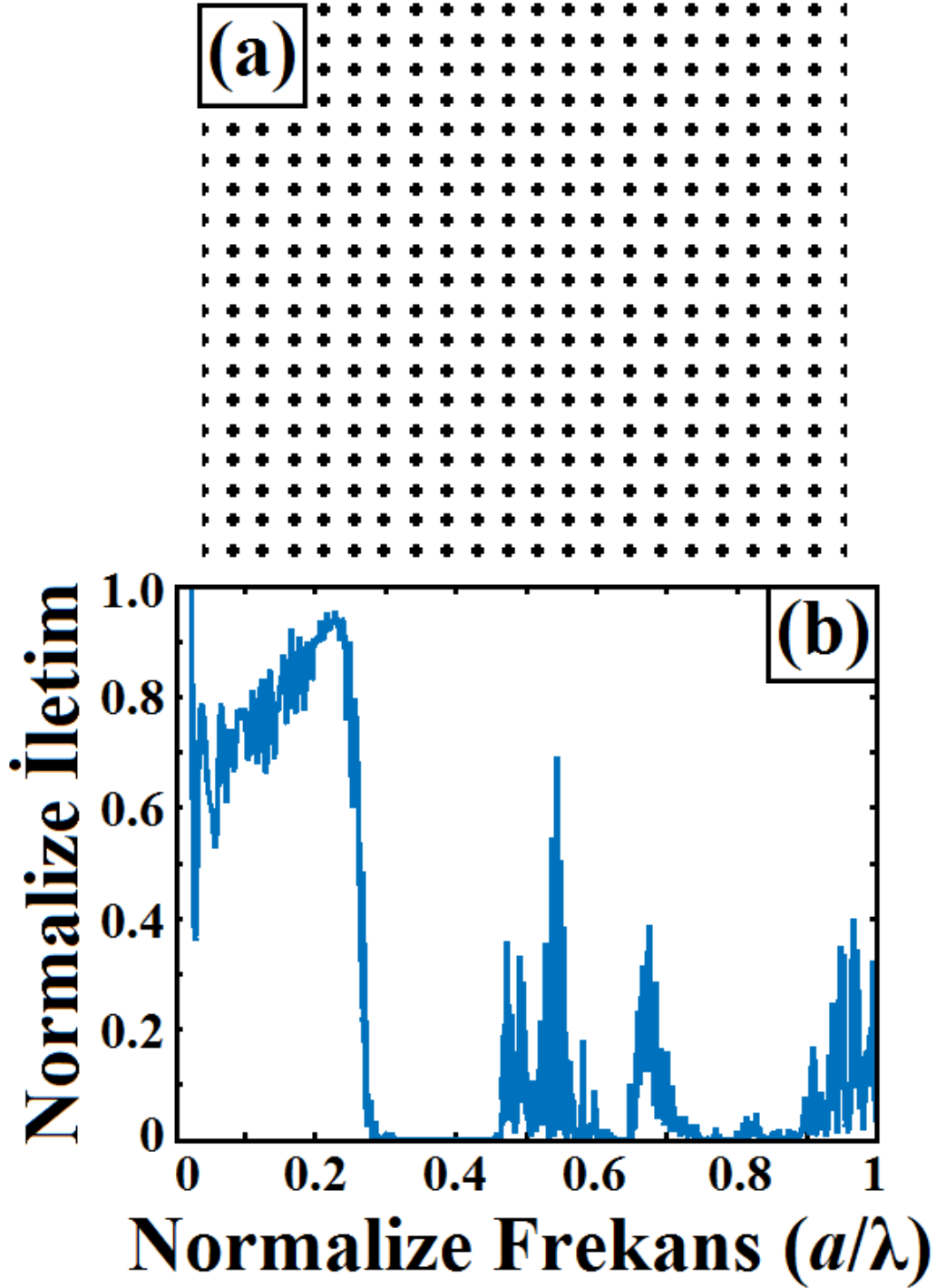
parametrelerinin sayısını azaltmaktır. Bu sayede algoritmanın sonuca ulaşma hızının artması mümkün olmaktadır. Ayrıca birim hücrenin x ve y eksenlerine göre simetrik olması, bu birim hücre ile oluşturulan FK'de çizgi kusur açılarak dalgakılavuzu yapının daha kolay tasarlanmasını sağlar. Ancak elde edilen sonuç, daha çok sayıda pikselden oluşan birim hücrelere kıyasla daha kötü olabilir. Burada bir karşılaştırılma yapılacak ise kullanılan farklı algoritmaların çalışma şekillerinin de FYBA'nı genişletmede etkili olabileceği göz ardı edilmemelidir. Şekil 5.16(a)'da görüntüsü verilen yapıya ait TM polarizasyonu için dağılım diyagramı Şekil 5.16(b)'de verilmiştir.



Şekil 5.16 : (a) Tasarlanan birim hücre ve Brillouin bölgesinin köşe noktaları. (b) Tasarlanan birim hücreye ait TM polarizasyonu için birinci ve ikinci iletim bantlarını gösteren bant diyagramı.

Şekil 5.16(b)'de verilen dağılım diyagramında TM polarizasyonu için verilen FYBA $a/\lambda=0.25$ ile $a/\lambda=0.43$ normalize frekansları arasında bulunmaktadır. FYBA'nın ortası $a/\lambda=0.34$ normalize frekansıdır. FYBA'nın genişliğini göstermek amacı ile kullanılan bir değer ise yasaklı bant genişliğinin bant ortasındaki frekansa oranının (bandgap to midgap ratio) yüzde olarak verilmesidir. Şekil 5.16(b)'deki dağılım diyagramında görülen TM polarizasyonuna ait FYBA'nın %53 genişlikte olduğu hesaplanmıştır. Burada TM polarizasyonu için genişletilen FYBA, birinci iletim bandı ile ikinci iletim bandı arasında bulunmaktadır. Eniyileme işlemi sonucunda elde edilen birim hücre kare örgüde dizilerek bir FK yapısı oluşturulmuştur. Bu oluşturulan FK yapısı herhangi bir kusur içermemektedir. Yine bu yapının FDTD kullanılarak simülasyonları yapılmış ve iletim verimliliği incelenmiştir. Oluşturulan

FK yapısının görüntüsü ve iletim grafiği Şekil 5.17’de verilmiştir. İletim verimliliği ölçülürken yapının sol tarafından geniş bant aralığına sahip Gauss profilinde bir kaynak kullanılmıştır ve ölçümler yapının sağ tarafından yapılmıştır. Yani iletim olan frekanslarda dalganın yapı içerisinde soldan sağa doğru ilerlediği varsayılmaktadır.



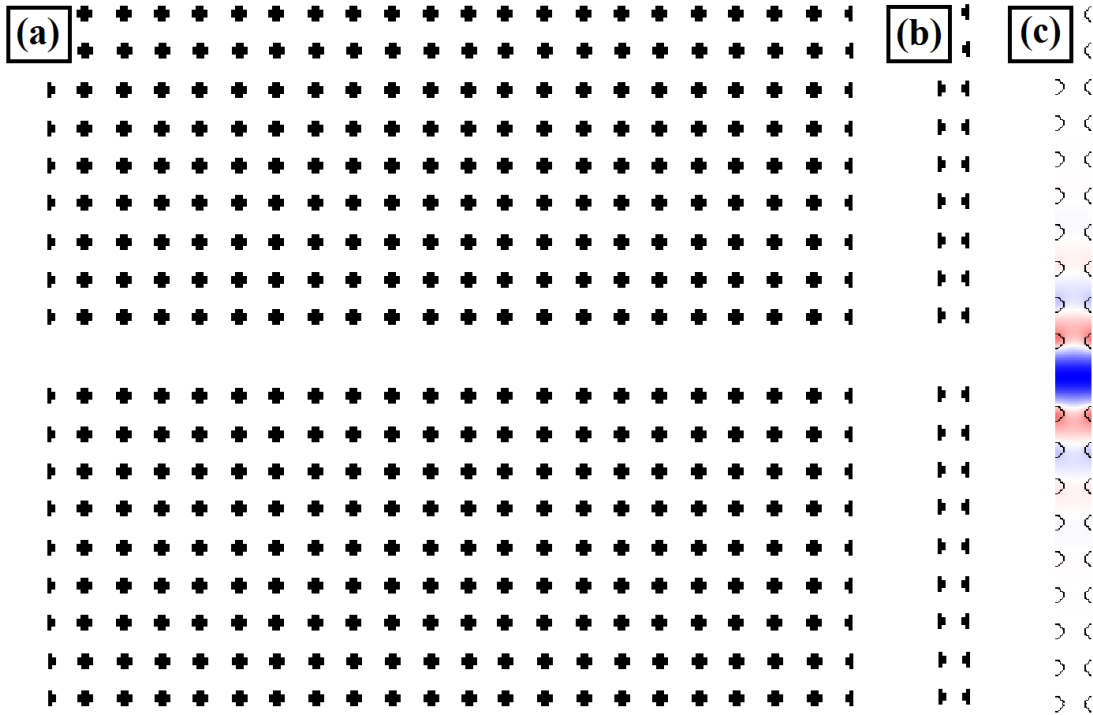
Şekil 5.17 : (a) Birim hücrenin kare örgüde dizilmesi ile elde edilen FK yapısı ve (b) bu yapıya ait iletim grafiği.

Tasarlanan birim hücrenin bir uygulaması olarak elde edilen FK yapısının ortasına çizgi kusur açılarak FK dalgakılavuzu yapısı tasarlanmıştır. Dalgakılavuzu içerisinde ilerleyen bir dalga, FYBA'ndan bir frekansa sahip olur. Aksi halde, FYBA etkisi kaybolacağı için dalgakılavuzu içerisinde ilerleyen dalga FK yapısının içerisine sızacaktır ve dalganın bir kusur içerisine sıkıştırılması gözlemlenemeyecektir.

Bir FK dalgakılavuzu yapısı oluşturulduğunda dalgakılavuzu içerisinde farklı modlarda dalgalar ilerleyebilmektedir. Bu dalgalara yönlendirilen mod (guided mode) denilmektedir. Bu modların da ayrıca incelenmesi gerekmektedir. Yönlendirilen modları incelemek için PWE yönteminde süper hücreler kullanılır. Süper hücreler, birim hücrelerden ve kusurdan oluşur. Eğer dalgakılavuzu periyodik ise süper hücrenin küçük seçilmesi ve bu seçilen süper hücrenin çoğaltılarak dalgakılavuzu yapısını oluşturabilmesi beklenir. Örneğin, eniyileme sonucu elde ettiğimiz birim hücreden oluşturduğumuz bir FK yapısının ortasına çizgi kusur açığımızda bir FK dalgakılavuzu elde ederiz. Bu FK dalgakılavuzunun görüntüsü Şekil 5.18(a)'da verilmiştir. Bu FK dalgakılavuzunu PWE yöntemi ile incelemek istersek kullanmamız gereken süper hücrenin görüntüsü de Şekil 5.18(b)'de verilmiştir. Görüldüğü üzere süper hücre çoğaltılarak x eksenini boyunca yan yana eklendiğinde dalgakılavuzu yapısı oluşturulabilmektedir. Bu süper hücre PWE ile incelendiğinde dağılım diyagramında bazı yönlendirilen modlar ortaya çıkmaktadır. Bu modlar arasından sadece bir tanesi dalgakılavuzuna hapsolmaktadır. Bu hapsolabilen moda ait elektrik alan görüntüsü Şekil 5.18(c)'de verilmiştir. Bu modun dağılım diyagramındaki gösterimi Şekil 5.19(a)'daki gibidir. Ayrıca, dalgakılavuzu yapısının iletim verimliliği Şekil 5.19(b)'de verilmiştir.

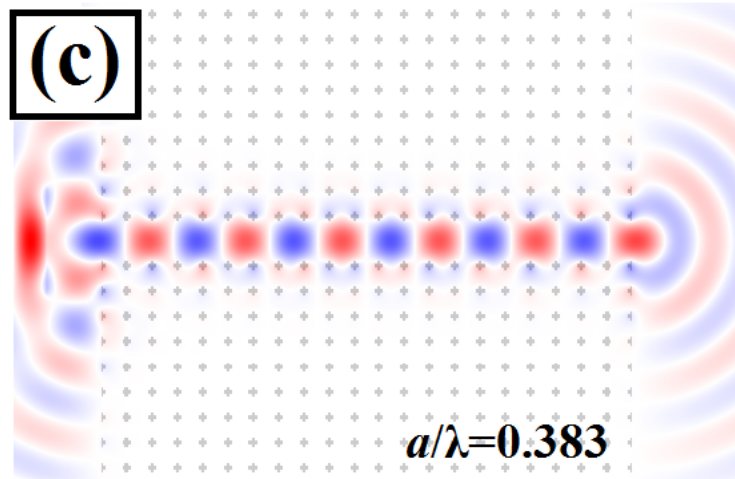
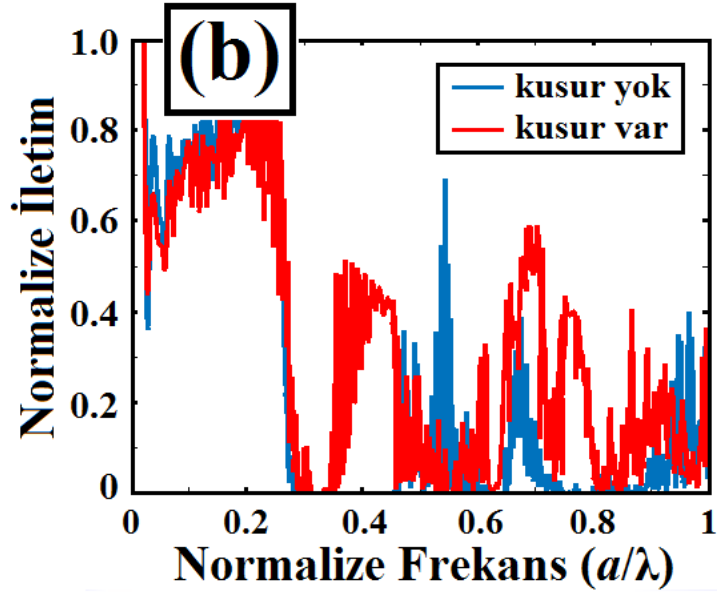
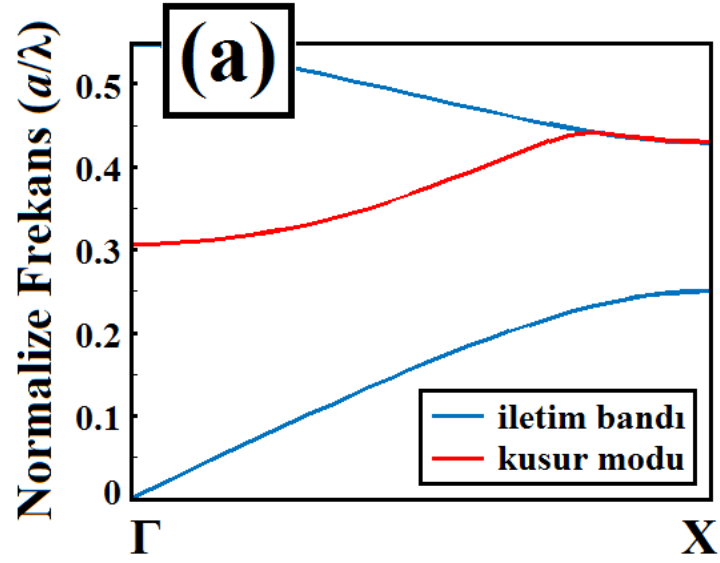
Bir dalgakılavuzunda iletilen dalga ile bir veriyi taşıyabilmek için tek bir frekansta iletimin olması yetersizdir. Çünkü bir sinyal iletilirken belli bir bant aralığına yani frekans aralığına sahip olmalıdır. Sinyalin bant aralığının mümkün olduğunca geniş olması tercih edilen bir durumdur. Bu noktadan yola çıkarak bir dalgakılavuzu geniş bir frekans aralığında iletim yeteneğine sahip olmalıdır denilebilir. Ancak burada önemli bir husus bulunmaktadır. Bu husus, farklı frekanslardaki yani farklı dalgaboylarındaki dalgaların iletim hızlarının birbirlerinden farklı olabilmesi durumudur. Her bir frekansın hızı farklı olduğunda iletilen sinyalde bozulmalar gözlemlenecektir. İstenen durum hızların sabit olacağı bir frekans aralığı bulmaktır. Bu aralık ise yönlendirilen modun dağılım diyagramındaki eğiminin neredeyse sabit

olduğu frekanslardır. Şekil 5.19(a)'daki yönlendirilen mod için yaklaşık olarak $a/\lambda=0.344$ ile $a/\lambda=0.422$ arasında eğimin yani hızın sabit olduğu söylenebilir. Bu şekilde bir aralık belirlemenin amacı eğimin değişken olması durumunda ($d^2w/dk^2 \neq 0$) grup hızı dağılımının (group velocity dispersion) ortaya çıkmasıdır. Bu olumsuz durum gerçekleştiğinde dalga öbeği dağılacak ve bozulacaktır. Sonuç olarak dalgakılavuzdaki iletim bölgesinin merkez frekansı $a/\lambda=0.383$ olacaktır. Eğer bu dalgakılavuzu telekom dalgaboyları için kullanılacak ise seçilen merkez normalize frekans değeri $a/\lambda=0.383$ 'ün 1550nm dalgaboyuna eşitlenmesi gerekir. Bunun için uygun bir örgü sabiti a değeri seçilmelidir. Bu kısımda sunulan dalgakılavuzu için örgü sabiti yaklaşık olarak $a=595\text{nm}$ olarak seçilmelidir [4].



Şekil 5.18 : (a) Tasarlanan FK dalgakılavuzu yapısı. (b) Dalgakılavuzunu PWE ile incelerken kullanılan süper hücre. (c) Dalgakılavuzu içerisinde ilerleyen modun elektrik alan görüntüsü.

Frekans aralığı belirlemenin yanı sıra dalgakılavuzlardaki bir diğer dikkat edilmesi gereken nokta ise belirlenen normalize frekans aralığı için iletim veriminin yüksek olmasıdır. Tasarlanan birim hücreden oluşturulan FK dalgakılavuzu yapısı için iletim grafiği Şekil 5.19(b)'de verilmiştir. Bu FK dalgakılavuzu için açılan çizgi kusurun yönündeki genişliği $1a$ kadardır. Şekil 5.19(c)'de ise $a/\lambda=0.383$ normalize frekansında bir dalganın dalgakılavuzu içerisinde ilerleyişinin anlık görüntüsü gösterilmiştir.



Şekil 5.19 : (a) Dalgakılavuzu içerisinde ilerleyen modun bant diyagramında gösterimi. (b) Dalgakılavuzu yapısının iletim verimliliği. (c) $a/\lambda=0.383$ normalize frekansında dalgakılavuzu içerisinde ilerleyen elektrik alan dağılımının anlık görüntüsü.

Dalgakılavuzu oluşturulurken açılan çizgi kusurun genişliği de bir diğer önemli etkidir. Dalgakılavuzu içerisinde tek moda (single-mode) sahip bir dalganın ilerlemesi istenir. Eğer kusur oluşturulurken birden fazla sıradaki birim hücreler yapıdan çıkarılırsa ortaya daha geniş bir dalgakılavuzu kusuru ve çoklu mod (multi-mode) çıkacaktır. Dalgakılavuzlarında tek mod olması istenir, çoklu mod olması veri iletiminde istenilen bir durum değildir. Bunun sebebi, eğer sinyaller birden fazla hızda iletilecek olursa sinyaller karışması (modal dispersion) ortaya çıkacaktır. Tek moda sahip bir dalgakılavuzunda kusurun genişliğini belirlemek için dalgakılavuzunun boş bir uzayda karşılıklı duran çok iyi yansıtıcı iki duvardan oluştuğu düşünülebilir. Bu dalgakılavuzunda ilerleyen bir mod için sınır koşullarını yaklaşık olarak belirlerken dalganın duvarlara geldiğinde yok olduğu kabul edilir. Dalgayı dalgakılavuzunda maksimum sıkıştırabilmek için FYBA'nın tam ortasındaki frekans çevresinde çalışmak gerekir. En düşük frekansa sahip mod için dalgaboyunun genişliğinin yaklaşık olarak bir dalga boyunun yarısı kadar olması gerekir. Örneğin, burada merkez normalize frekans değeri $a/\lambda=0.383$ olarak seçildiğinde, dalgakılavuzunun genişliğinin yaklaşık olarak $1.3a$ olması gerekir. Bu değerden daha geniş bir kusura sahip dalgakılavuzu oluşturulduğunda kusur içerisinde çoklu mod ortaya çıkacaktır. [4].

Literatürde birim hücre eniyilemesi ile FYBA'nı genişletme üzerine yapılan çalışmalarda tasarlanan birim hücreler ile bir FK oluşturulması ve bu FK yapısının FDTD ile incelenmesi üzerinde pek durulmamıştır. Burada önemli bir husus unutulmaktadır. Bu önemli husus ise PWE ile ortaya çıkmayan bazı dezavantajların FDTD ile ortaya çıkmasıdır. Örneğin, bir birim hücre eğer herhangi bir simetriye sahip değilse bu birim hücre ile oluşturulan bir FK içerisine çizgi kusur açıldığında elde edilen dalgakılavuzunda yüksek modların oluşması, ışığın yapının içerisine sızması veya yüzey modlarının oluşması gibi durumlar ortaya çıkacaktır. Bunun sebebi oluşturulan birim hücrenin simetrik olmamasıdır. Eğer birim hücre x veya y eksenlerinden sadece birine göre simetrik olsa bile bu durumlar ile karşılaşabilmektedir. Bu sebeple birim hücrenin en az iki eksene göre simetrik olması bu durumların ortaya çıkma ihtimalini azaltacaktır. Burada unutulmaması gereken nokta şudur; tüm bu simülasyonlar sadece PWE ile yapıldığı için ve tasarım sırasında yani eniyileme algoritması çalışırken FDTD ile bir kontrol yapılmıyorsa bu tür sorunlar daha sonra ortaya çıkacaktır. Literatürdeki birim hücre eniyilemesi

çalışmalarında genellikle sadece FYBA'nın genişletilmesi veya TFYBA elde etme üzerine çalışmalar yapılmıştır, dalgakılavuzu tasarımı veya bir dalgakılavuzunun çalıştığı bant aralığının genişletilmesi üzerine çalışmalar yapılmamıştır.

5.4 Yüksek Kalite Faktörlü FK Kavite Tasarımı

FK'lerin sahip olduğu FYBA özelliklerinden yola çıkarak yapı içerisinde kusur oluşturulması ile tasarlanan yapılara FK kavite yapıları denilmektedir. Kavite içerisinde ışık hapsedilir ve yerleştirilir. Işığın hapsolme miktarını belirlemek için ise kalite faktörü (quality factor, Q) hesaplanır. Bu değer, cihazdaki her aşamada depolanan enerjinin yayılan enerjiye oranıdır [100]. Işığın yerleşmesini tanımlamak için kavitenin mod hacmi (mode volume, V) kullanılır. Farklı amaçlar için mod hacim hesabı değişiklik göstermektedir. Bu tezde yapılan çalışmalar için mod hacmi hesaplanırken Purcell yükseltmesi temel alınmıştır:

$$V \equiv \frac{\int \varepsilon(r)|E(r)|^2 dr}{\max(\varepsilon(r)|E(r)|^2)}$$

Kavite tasarımları yapılırken sonlu boyuta sahip bir FK yapısı seçilmiştir ve Maxwell denklemleri çözülerek simülasyonlar yapılmıştır. Bu simülasyonlar FDTD kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kusur bölgesinde Gauss fonksiyonu profiline sahip geniş frekans aralığında çalışan bir kaynak kullanılmış, sistemin gittikçe sönümlenmesine izin verilmiştir ve elektrik alan değerleri incelenmiştir. Belirli bir zaman geçtikten sonra yapı içerisinde sadece kavite kusur frekansı kalmaya devam etmektedir. Daha sonrasında ise yapı içerisinde sadece tek bir mod kalacak şekilde daha dar bir frekans aralığına sahip kaynak ile yapı uyarılmıştır. Sonrasında kavitenin karşı-düğüm (anti-node) noktasında elektrik alan incelenerek kalite faktörü hesaplanır. Mod hacmi ise simülasyonun sonunda hesaplanır.

FK'in mod hacminden bahsederken literatürde farklı birimlerde değerlere rastlamak mümkündür. Bazı çalışmalarda μm veya diğer uluslararası birimler sistemine ait (Système International d'unités, SI) birimleri kullanılmıştır. Ancak bu değerler kullanışlı değildir çünkü bu değerler sadece belirli bir örgü sabiti değerine aittir. FK'ler ölçeklenebilir örgü sabiti değerine sahiptirler [4]. Bu sebeple mod hacminin de örgü sabiti cinsinden verilmesi daha kullanışlı olacaktır. Bu tez kapsamında verilen mod hacimleri örgü sabiti a cinsinden verilmiştir. Diğer çalışmalarda dielektrik malzeme içerisindeki dalgaboyu $(\lambda_0/n)^3$ veya dalgaboyunun yarısı $(\lambda_0/2n)^3$

cinsinden değerler verilmiştir. Burada λ_0 ışığın boşluktaki dalgaboyudur. Merkez frekans değeri biliniyorsa frekans ile dalgaboyu arasında dönüşüm yapmak mümkündür. Örneğin bir mod $f=0.264c/a$ frekansına sahipse ve dielektrik malzeme olarak kırıcılık indisi $n=3.46$ olan silikon (Si) kullanılmış ise dielektrik içerisindeki dalgaboyu şu şekilde hesaplanabilir:

$$\frac{\lambda_0}{n} = \frac{c}{nf} = \frac{c}{(3.46)(0.264 c/a)} = 1.094a$$

$$\frac{\lambda_0}{n} = 0.547a$$

Tezin bu kısımda yapılan çalışmalara ait simülasyonlarda yüksek kırıcılık indisi değerine sahip malzeme olarak silikon ($n=3.46$) ve düşük kırıcılık indisi değerine sahip malzeme olarak hava ($n=1$) kullanılmıştır. Literatürdeki kavite çalışmalarında yüksek kırıcılık indisi değerine sahip malzeme olarak genellikle Si veya galyum arsenit (GaAs) kullanılmıştır. Tasarlanan FK kavite yapıları dielektrik malzeme üzerine üçgen örgüde hava boşlukları açılarak elde edilmiştir. Bu yapılar içerisinde farklı kusurlar ile farklı kavite yapılarını görmek mümkündür. Örneğin yapının merkezindeki hava boşluğu açılmayarak yani dielektrik malzeme bırakılarak elde edilen kavite yapıları mevcuttur. Bu kavite yapıları 1 delik kusuru içerdikleri için H1 kavite olarak bilinirler. Yapının ortasından bir hava boşluğu kaldırmak yerine yan yana bulunan iki delik birbirlerinden uzaklaştırılarak da kavite yapısı elde edilebilir. Bu kavite yapıları ise herhangi bir hava boşluğu yapıdan çıkarılmadığı için H0 olarak bilinirler. Eğer bir hava boşluğu, etrafındaki 6 hava boşluğu ile beraber yapıdan çıkarılırsa bu tür kavite yapılarına H2 kavite denilmektedir. Buradaki H harfi, altıgen (hexagonal, H) kelimesinin kısaltmasıdır. Çünkü bir hava boşluğu çıkarıldığında ortaya çıkan dielektrik bölgesi altıgen şeklindedir.

FK'ler ile kavite oluştururken daha farklı şekillerde kusurlar da kullanılabilir. Örneğin bir hava boşluğu kendisi ile aynı hizada bulunan yanındaki iki hava boşluğu ile beraber yapıdan çıkarılırsa yani doğrusal (linear, L) bir dielektrik bölgesi ortaya çıkmaktadır. Bu şekilde elde edilen kavite yapısı 3 hava boşluğu çıkarılarak doğrusal bir şekle sahip olduğu için L3 kavite yapısı olarak bilinir. Aynı hizada 5 hava boşluğu çıkarılırsa L5 kavite yapısı elde edilmiş olur. Literatürdeki en çok kullanılan kavite yapısı L3 yapısıdır [101].

Doğrusal kusura sahip kavite ler altıgen şeklindeki kusura sahip kavite lerden daha iyi kavite faktörü ve mod hacmi değerlerine sahiptir. Bunun sebebi kavite modunun polarizasyonudur. Elektrik alan L3 kavite ekseninin dikey doğrultusundadır. H2 şeklindeki bir kavitenin kavite bölgesinin yukarısına ve aşağısında hava boşlukları yerleştirildiğinde dielektrik bölgeler birbirlerine daha ince bir şekilde bağlanmaktadır. Bu durum FYBA oluşmasına sebep olmaktadır. Yani bu hava boşluklarını eklemek kalite faktörünü artırır ve sistemi daha ideal bir FK yapar. Buna ek olarak, daha az sayıda hava boşluğu yapıdan çıkarılmış olacağı için FK yapısını modu daha yoğun bölgeye doğru sıkıştırır ve mod hacmi küçülür. L3 kavite leri yüksek kalite faktörüne, düşük mod hacmine ve sadece 3 karşı-düğüm noktasına sahip olduğu için ışığın malzeme ile etkileşiminin incelendiği çalışmalarda yaygın olarak kullanılır [101].

FK kavite lerinde iyileştirme yapmak için farklı yöntemler kullanılmıştır. Örneğin; hava boşlukları uzatılarak kalite faktörü artırılmıştır [102]. Bir başka örnek olarak doğrusal hizadaki yuvarlak hava boşluklarının yarıçaplarının değiştirilmesi verilebilir [101]. Kavite bölgesinin etrafındaki hava boşluklarının yarıçaplarının değiştirilmesi de çalışılmıştır [103]. Hatta, kavite bölgesinin etrafındaki hava boşluklarının şeklinin eniyileme işlemi ile değiştirilmesi de sunulmuştur [104]. En yaygın yöntem ise, Akahane ve diğerleri tarafından sunulan, L3 kavitesinin kenarındaki iki hava boşluğunun kavite merkezinden dışarıya doğru kaydırılmasıdır [105]. İki hava boşluğunun dışarı yönde kaydırılması ile kavite bölgesinin boyutu artmış olur ve bunun sonucunda kalite faktörü ve mod hacmi artar. İki hava boşluğunu kaldırmak (yani L5 kavitesi elde etmek) yerine yanlara kaydırmak yeni karşı-düğüm leri oluşmasını engeller. Az sayıda karşı-düğümün oluşması tercih edilen bir durum olduğu ve bu şekilde L5 kavitesinden daha yüksek kalite faktörü elde edilebildiği için önerilen bu kavite yapısı çalışmalar için oldukça uygundur.

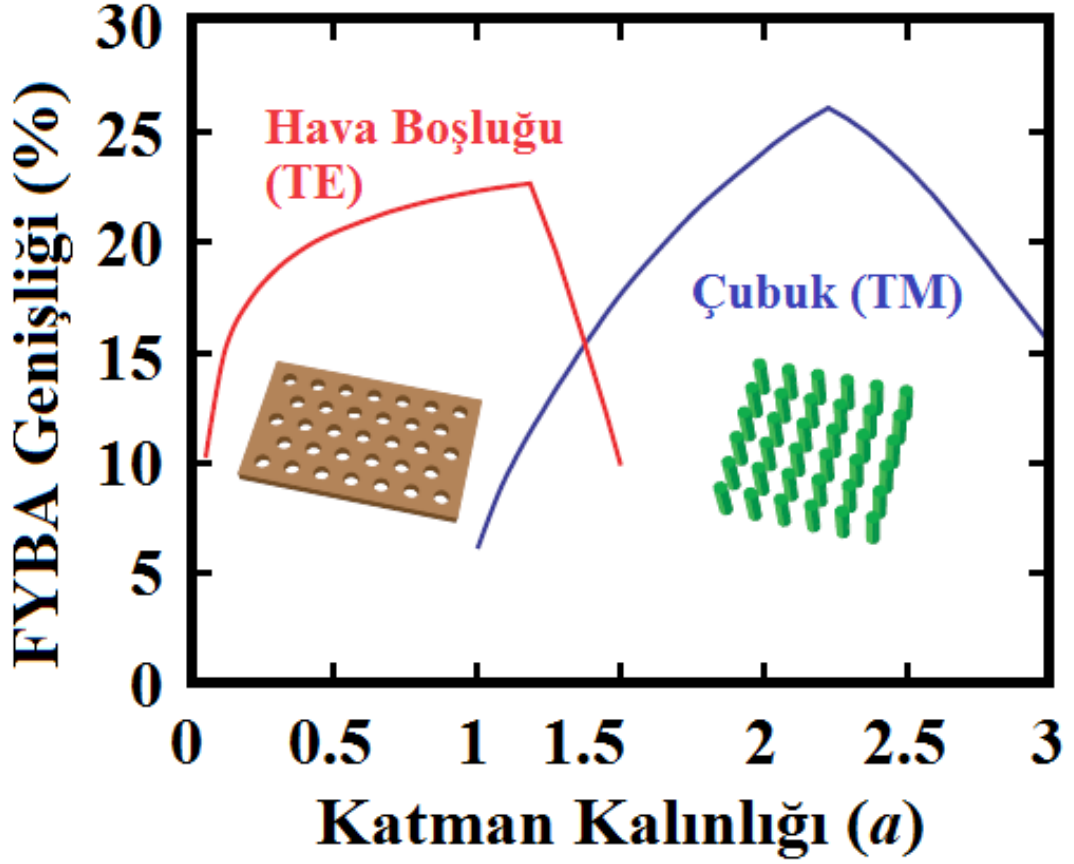
Bu basit hava boşluğu kaydırma işlemi ile kalite faktöründe bu kadar iyileştirme elde edebilmenin sebebi daha detaylı olarak açıklanabilir. Akahane ve diğerlerine göre ideal bir kavite, içerisindeki temel modun dalgaboyunun yarısının tam katlarına uymalıdır [105]. Eğer elektrik alanın uzaysal profiline bakılırsa sinc zarf fonksiyonun temel mod ile çarpılmış hali olduğu görülür. Bu uzaysal profilin Fourier dönüşümü alındığında sinc zarf fonksiyonunun düşük dalga vektörlerine sahip geniş bileşenler oluşturduğu bulunmuştur. Düşük dalgavektörü bileşenleri, Snell yasasında şart olan

sızıntı koşullarını uyuşturmayı sağlamaya neden olur [4,105]. Eğer Gauss zarf fonksiyonu şeklinde bir kavite oluşturulseydi, onun dönüşümünde küçük dalga vektörlerine sahip çok küçük bileşenler olacaktı. Bu durumda daha az kayıp ve sonuç olarak daha büyük kalite faktörü olacaktır.

Özetlenecek olursa; iyi kavite kavite sınırlarında daha yumuşak mod profili geçişlerine sahip olurlar. Kavite profilindeki daha yumuşak geçişler istenilen sonuçları verecektir. Kavite sınırlarındaki hava boşlukları yerine orta değerde bir kırıcılık indisine (yüksek kırıcılık indisi ile düşük kırıcılık indisi arasında bir kırıcılık indisi değerine) sahip bir malzeme koyulamayacağı için daha farklı yöntemler düşünülmelidir. Bu yöntemlerden biri de hava boşluklarının yarıçaplarını değiştirmektir [59]. Alternatif olarak, kenardaki hava boşluklarının kaydırılması, geçiş sırasında moda yüksek dielektrik malzemede daha fazla yer vermektedir. Bu durumlar için modların Fourier dönüşümleri yapıldığında küçük dalga vektörlerinde düşük şiddet verdikleri görülür. Kaviteden ideal FK'e oldukça yumuşak geçişler yapılması kalite faktörlerinin artmasını sağlar.

Bu tez kapsamında yapılan çalışmaların bu kısmında bir FK yapısı DE algoritması kullanılarak tasarlanmıştır. Eniyileme işleminde temel alınan FK kavite yapısı L3 tipinde bir yapıdır. Yapı silikon malzeme ($n=3.46$) içerisine silindir şeklinde hava boşlukları açılarak elde edilmiştir. Bu hava boşluklarının yarıçapı $r=0.29a$ olarak seçilmiştir. Tezin önceki kısımlarında yapılan simülasyonlarda 3.boyut yani z eksenine dikkate alınmamış yani dielektrik malzemelerin z boyutundaki büyüklükleri sonsuz olarak kabul edilmiştir. Ancak kavite için üçüncü boyutun sonsuz olması gibi bir durum söz konusu değildir. Çünkü kavite kalite faktörlerinin hesabında asıl belirleyici olan kısım ışığın z eksenine yönünde nasıl hapsedildiğidir. Kavite ışığın xy düzleminde hapsedilmesi FYBA sayesinde gerçekleşir. Işığın z yönünde hapsedilmesi ise TIR ile gerçekleşir. Bu sebeple FK kavite katmanının kalınlığının doğru seçilmesi Q değerini belirlemede etkili olduğu için önemlidir. Genel olarak iki boyutlu bir FK yapıları incelenirken üçüncü boyut dikkate alınmaz. Ama FK katmanlar (PC slab) incelenirken üçüncü boyutun kalınlığı önemlidir. Özellikle de dielektrik katmanlar üzerine hava boşlukları açılarak elde edilen bir yapı ise katmanın kalınlığı TIR elde edebilmek için önemlidir. Katman kalınlığının belli bir değer altında olması FK katman yapısının ışığı hapsedemeyeceği anlamına gelir. Hapsedilemeyen ışık ise kayıptır. Kayıbı azaltmak için üçüncü boyutun değerinin

nasıl seçileceğine dair farklı polarizasyonlarda belirli kalınlık aralıkları bulunmaktadır. Şekil 5.20’de görüldüğü üzere farklı yapılar farklı polarizasyonları desteklediği gibi bu farklı yapıların farklı kalınlıklarda olmaları gerekmektedir. Yine bu şekilde yapıların sahip olduğu FYBA’nın kalınlık ile nasıl değiştiği gösterilmiştir.

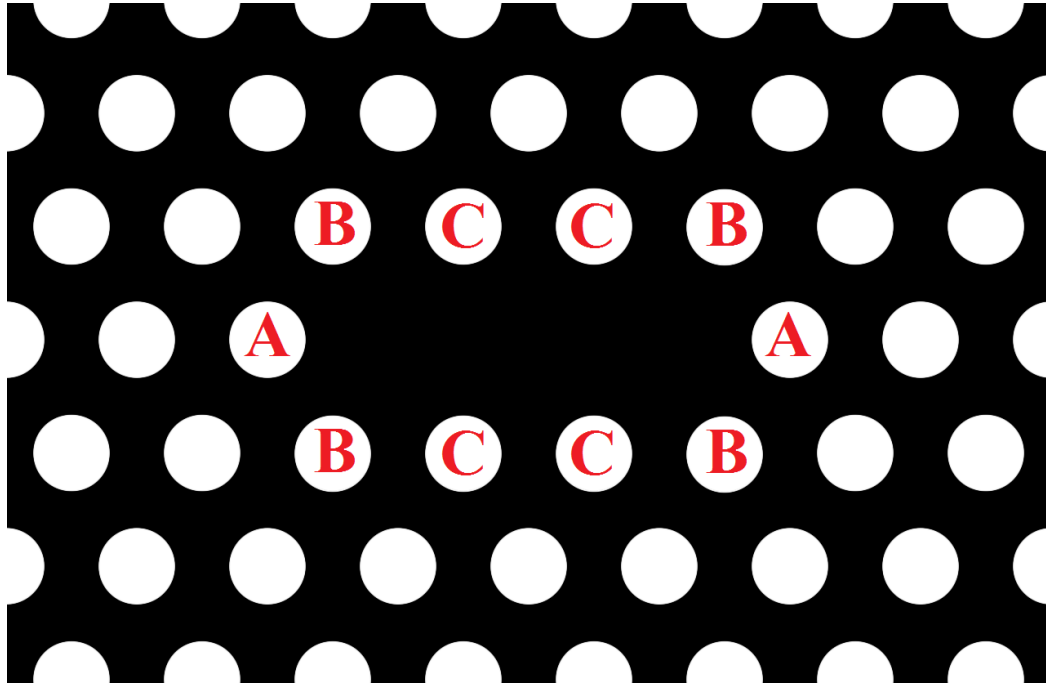


Şekil 5.20 : Katman kalınlığının FYBA'na etkisi [2].

Dielektrik malzeme üzerine üçgen örgüde açılan silindirik hava boşlukları ile tasarlanan bir FK kavite yapısı TE modunda çalışır. Şekil 5.20’de görüldüğü üzere bunun gibi bir FK katman yapısı için kalınlığın yaklaşık olarak $0.5a$ ile $1a$ arasında olması tercih edilir. Daha düşük veya daha yüksek kalınlıklardaki katmanların iyi sonuç vermediği de yine bu şekilde görülmektedir. Ayrıca TE polarizasyonu için $1a$ kalınlığa yaklaştıkça olan değişimin azalması ise $1a$ kalınlıktan daha ince katman kalınlığının yeterli olabileceği anlamına gelir. Her ne kadar $1a$ kalınlığı en iyi sonucu veriyor gibi görünse de üretim sırasında tam istenilen kalınlığı ayarlamak mümkün olmayabilmektedir. Bu durumda $1a$ değerinden daha kalın bir FK katman yapısı üretilirse istenilen iyi sonuçlar elde edilemeyebilir. Görüldüğü üzere kalınlıklar örgü sabiti cinsinden verilmiştir. FK’lerde örgü sabiti ölçeklenebilir olduğu için örgü sabiti değerine karşılık gelecek değerin seçimi FK katman yapısını çok kalın

yapabilir ve bu durumda dielektrik malzeme içerisine hava boşluklarının istenilen şekilde açılması mümkün olmayabilir. Literatürdeki kavite çalışmalarında FK katmanın kalınlığının $0.6a$ civarında seçildiği sıklıkla görülebilir. Bu tez kapsamında tasarlanan FK kavite yapısının z yönündeki kalınlığı $0.6a$ olarak seçilmiştir. Kavite modunun frekansının ise dalgaboyu olarak 1550nm 'ye karşılık gelmesi ve bunun için uygun örgü sabiti değerinin seçilmesi tercih edilmektedir.

Tezin bu kısmında L3 kavite yapısının tasarımı DE kullanılarak eniyileştirilmiştir. L3 kavite yapısında kavite bölgesinin etrafında ilk sırada bulunan silindir şeklindeki hava boşluklarının yarıçapları ve pozisyonları DE algoritması kullanılarak belirlenmiştir. Bu hava boşlukları Şekil 5.21'deki gibi isimlendirilmiştir.



Şekil 5.21 : L3 kavitesinde DE ile eniyilenecek hava boşlukları.

Şekil 5.21'de görüldüğü üzere kavitenin x yönündeki komşuluğunda bulunan hava boşlukları A olarak isimlendirilmiştir. Kavitenin yukarısında ve aşağısında merkeze yakın olan hava boşlukları C olarak, diğerleri ise B olarak isimlendirilmiştir. Aynı isimli hava boşluklarının pozisyonlarındaki değişimler kavitenin merkezine göre simetrik. Yani Şekil 5.21'de kavite bölgesinin sağ üst komşuluğunda görülen B boşluğu yukarıya ve sağa doğru kaydırılırsa kavitenin sol üst komşuluğundaki B boşluğu ise yukarıya ve sola doğru kayacaktır. Yine benzer şekilde kavite bölgesinin sol altında yer alan B boşluğu ise aşağıya ve sola doğru kayacaktır. Aynı isimlere sahip hava boşluklarının yarıçaplarının da aynı olması istenmiştir.

Tasarım sırasında A ile isimlendirilen boşlukların pozisyonlarının sadece x yönünde değişmesi istenmiştir. B ve C boşluklarının pozisyonlarının ise hem x hem de y yönünde değişmesi istenmiştir. Ayrıca tüm hava boşluklarının yarıçaplarının değişmesi istenmiştir. Hava boşluklarının pozisyonlarının x ve y yönünde değişimlerinin bir L3 kavitesinde bulunan konumlarına göre $-0.2a$ ile $+0.2a$ arasında olması istenmiştir. Yine bu hava boşluklarının yarıçaplarının ise $0.1a$ ile $0.4a$ arasında olması istenmiştir.

Bir FK kavitesinin kalite faktörü artırılırken aynı zamanda mod hacminin azaltılması istenir. Ancak bu iki durumun aynı anda gerçekleşmesi zordur. Bu sebeple bir eniyileme algoritması kullanılarak FK kavite yapısı tasarlamaya ihtiyaç duyulmuştur. Bir FK yapısı için sadece Q değerinin yüksek olması bir anlam ifade etmez. Bu sebeple FK kavite yapısının kalite faktörünün mod hacmine oranı Q/V değeri dikkate alınır. Q/V değerinin yüksek olması tercih edilen bir durumdur. Bu sebeple eniyileme işleminde Q/V değerinin yükseltilmesi amaçlanmıştır.

DE ile kavite yapıları tasarlanırken FDTD simülasyonları için Meep yazılımı kullanılmıştır. Meep, Massachusetts Institute of Technology'deki (MIT) bir grup araştırmacı tarafından geliştirilen ve Maxwell denklemlerini zamana göre çözen bir yazılımdır [89]. Eniyileme sırasında çok sayıda simülasyon çalıştırılması gerektiği için simülasyonları olabildiğince hızlı çalıştırmak gerekmektedir. Ancak programları hızlı çalıştırırken elde edilecek sonuçların yanlış olmamasına dikkat edilmedilir. Bu sebeple bazı değişkenlerin seçimi önemlidir. Eniyileme sırasında yapılan Meep simülasyonlarında çözünürlük 10 olarak seçilmiştir. Kullanılan Gauss profilindeki kaynağın merkez frekansı $0.25a/\lambda$, kaynağın bant genişliği ise $0.1a/\lambda$ olarak belirlenmiştir. Seçilen L3 yapısının kavite bölgesinin etrafına 5 sıra hava boşluğu yerleştirilerek FK kavite yapısı tasarlanmıştır. FK kavite katmanının kalınlığı $0.6a$ seçilirken katmanın altında ve üstünde toplam $5a$ hava boşluğu bırakılmıştır. Sonuç olarak 3 boyutlu FDTD simülasyonunda z yönünde çalışılan boyut $5.6a$ kadardır.

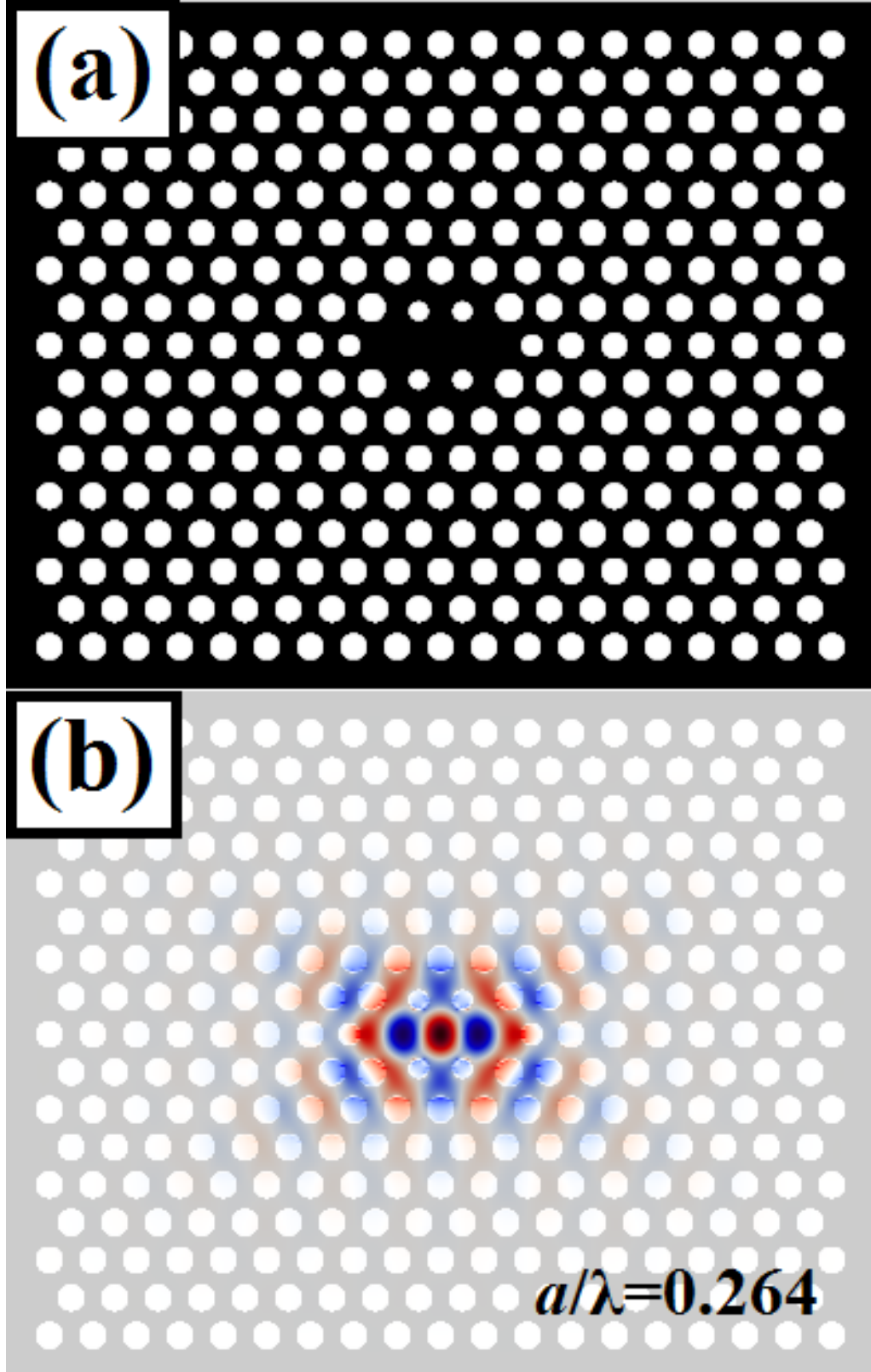
Eniyileme sonucunda elde edilen yapı kesin doğru sonucu veremeyebilir. Bu sebeple yapı etrafındaki hava boşluğu sayısı artırılır ve 9 sıra hava boşluğu yerleştirilerek FK kavite yapısı tasarlanır. Ayrıca çözünürlük 20 olarak seçilir ve simülasyon tekrar çalıştırılır. Kavite bölgesi etrafında hava boşluğu sayısını artırmak Q değerini artırır ancak bu Q değeri belli bir hava boşluğu sayısı sayısından itibaren sabit kalır. Bu sebeple hava boşluğu sayısının çok olması belli bir yerden sonra Q değerini

değiştirmeyeceği gibi çalışılan uzayın x ve y boyutlarını genişleteceği için simülasyonun çalışma süresini uzatır. Çözünürlüğü artırmak ise daha gerçekçi bir Q değeri sunmaktadır. Hava boşluğu sayısı ve çözünürlük artırıldıktan sonra yine eniyileme süresince kullanılan kaynak merkez frekansı ve kaynak bant genişliği (geniş bant aralığı) ile simülasyon tekrarlanır. Ortaya çıkan sonuçlar arasında yüksek Q değerine sahip kavite modunun normalize frekans değeri seçilir. Bu seçilen frekans değeri kaynağın merkez frekansı olarak ayarlanır ve kaynağın bant genişliği $0.01a/\lambda$ olacak şekilde daraltılarak simülasyon tekrarlanır. Sonuç olarak elde edilen kalite faktörü ve mod hacmi en doğru değerdir denilebilir.

Burada simülasyon yapılırken dikkat edilmesi gereken önemli bir husus bulunmaktadır. Eniyileme sırasında düşük çözünürlükte simülasyonlar yapıldığında ortaya çıkan kavite moduna ait frekans değeri çözünürlük yükseltildiğinde değişiklik gösterebilmektedir. Yani geniş bantta ve düşük çözünürlükte tasarladığımız bir yapıyı kontrol ederken doğrudan hem çözünürlüğü yükseltmek hem de düşük çözünürlükte elde edilen frekans ile dar banda sahip bir kaynak ile simülasyon yapmak yanlış sonuç verecektir. Bu sebeple öncelikle sadece çözünürlük yükseltilir ve yine geniş bant bir kaynak ile simülasyon yapılır. Bunun sonucunda yüksek Q değerinin ortaya çıkacağı frekans değerinin değiştiği gözlenecektir. Kaynağı geniş bant ile çalıştırdığımızda birden fazla kavite modu ortaya çıkar. Ancak gerçek bir kavitede tek bir mod olması istenir. Bu sebeple geniş bantta en yüksek kavite değerini veren modun frekansı seçilir. Bu moda ait frekans değeri kullanılarak yine yüksek çözünürlükte kaynağın merkezi bu frekans yapılarak dar bant aralığına sahip bir kaynak ile yapı uyarılır. Sonuç olarak yapıda tek bir kavite modunun ortaya çıkması beklenir. Tüm simülasyonlarda kavite bölgesi yapının tam merkezinde yer alır ve yapılar kavite merkezinin ortasından yani yapının ortasından uyarılır.

DE kullanılarak tasarlanan bir FK kavite yapısı Şekil 5.22(a)'da verilmiştir. Burada A hava boşluklarının yarıçapı $0.237a$, B hava boşluklarının yarıçapı $0.310a$ ve C hava boşluklarının yarıçapları $0.210a$ olarak algoritma tarafından belirlenmiştir. İsimlendirilen hava boşluklarının pozisyonlarının değişme miktarları ise kavite bölgesinin sağ üst tarafında bulunanlar için şu şekilde verilebilir: A boşluğu x yönünde $+0.103a$ kadar, B boşluğu x yönünde $+0.089a$ ve y yönünde $+0.008a$ kadar, C boşluğu ise x yönünde $-0.006a$ ve y yönünde $-0.077a$ kadar yer değiştirmiştir. Burada + olarak belirtilen değişimler x veya y eksenlerinde pozitif yöndeki

kaymaları, - olarak belirtilen değişimler ise x ve y eksenlerinde negatif yöndeki kaymaları gösterir.



Şekil 5.22 : (a) Tasarlanan yapının görüntüsü. (b) Tasarlanan kavite yapısındaki modun elektrik alan görüntüsü.

DE ile tasarlanan FK kavite yapısının yüksek çözünürlükte ve dar banda sahip bir kaynak ile uyarılması sonucu $a/\lambda=0.264$ normalize frekansında kalite faktörü $Q=82200$ ve mod hacmi $V=0.96a^3$ olan bir kavite mod ortaya çıkmaktadır. Bunun sonucunda kalite faktörünün mod hacmine oranı ise $Q/V=85625a^{-3}$ olarak hesaplanmıştır. Tasarlanan kavite yapısına ait elektrik alan enerji dağılım profili Şekil 5.22(b)'de verilmiştir. Görüldüğü üzere mod genel olarak kavitenin merkezinde yoğunlaşmıştır. Kuantum noktalarının kavite moduna eşleştirilebilmesi modun uzaysal boyutuna bağlı olduğu için elde edilen bu durum yararlıdır. Tasarlanan yapı bir E_y karşı-düğümüne sahiptir.

Akahane ve diğerlerinin yaptığı çalışmadan çıkarılan bir sonuca göre kavitenin kenarlarındaki boşlukların kaydırılması modun FK yapısının daha fazla içine girmesine izin vermektedir [105]. Bu kaydırma ile elektrik alan daha ideal bir FK yapısı ile karşılaşıyor gibi olur ve kavitenin merkezine doğru kusursuz bir geri yansıma olur. Bu durumda kalite faktörü artar ama mod hacmi de bir artış gösterir. Buna ek olarak kavitenin boyutları da genişler. Geniş kaviteler daha yüksek kalite faktörüne ve mod hacmine sahip olurlar. Hava boşluklarının yarıçaplarını küçültmek de kavite modu üzerinde aynı etkiyi yapar. Bu sayede kavite ve FK yapısı arasında daha yumuşak bir geçiş sağlanabilir. Tasarımlardaki bir amaç modun FK içinde daha fazla ilerleyebilmesi ve kalite faktörü ile mod hacminin yükseltilmesi olabilir.

Kavite bölgesinin yukarısındaki ve aşağısındaki C ile isimlendirilen hava boşlukları kavite merkezine doğru kaymıştır. Elektrik alan yüksek dielektrik malzemede yoğunlaşacağı için hava boşlukları kavite modunu merkeze doğru sıkıştırır. Kavite tasarımlarında iki farklı etken ortaya çıkmaktadır. Bazı değişkenler hem kalite faktörünü hem de mod hacmini yükseltir. Diğer değişkenler ise tam tersi yönde etki gösterir. Yani hem kalite faktörünü hem de mod hacmini azaltır. Burada amaç değişkenler arasında uygun bir seçim yapmaktır. Yapılabilecek bu seçimler arasında çok farklı eşleşmeler olabilir. Örneğin; yarıçapları genişletmek ve tüm hava boşluklarını kavite merkezinden dışarıya doğru kaydırmak bir çözüm olabilir. Ancak yapılabilecek seçimler çok karmaşık olabileceği için tüm çözümleri incelemek mümkün olmayacaktır. Bu sebeple tasarımlarda bir eniyileme algoritmasının kullanılmasının sebebi bu şekilde açıklanabilir.

Tasarlanan bu kavite yapısındaki yüksek kavite değerinin oluşmasında iki etken olduğu söylenebilir. Bunlardan birincisi, kavite merkezine doğru hava boşlukları

ilerlediğinde mod hacmi azalmaktadır ancak aynı anda kalite faktörü de azalmaktadır. Her ne kadar kalite faktörü azalsa da FK ile kavite bölgesi arasında ani bir değişim ortaya çıkmaktadır. İkinci olarak, yarıçaplar küçüldüğünde FK ile kavite arasında daha yumuşak bir geçiş oluşmaktadır ve bu durum da kalite faktörünün artmasını sağlamaktadır. Ancak bu değişim mod hacminin genişlemesine sebep olmaktadır. Görüldüğü üzere birbiri ile çelişen iki farklı durum söz konusudur. Bu sebeple sadece Q değerinin artırılması veya V değerinin azaltılması mümkün olmamaktadır. Sonuç olarak, V değeri artsa bile Q değerindeki daha büyük olduğu için Q/V değerinin artmasına neden olacaktır. Buradan hareketle etkenler arasında seçim yaparak bir eniyileme algoritması ile Q/V değeri yüksek bir FK kavite yapısı tasarlamak daha mantıklı bir tasarım yöntemi olacaktır. Ayrıca bir eniyileme algoritması kullanılsa dahi Q değerini artırırken V değerinin azaltılması mümkün olmayabilir. Bu sebeple Q/V değerinin artırılması daha gerçekçi bir seçim olacaktır.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

FK'ler sahip oldukları özellikler sayesinde ışığın farklı şekillerde manipüle edilmesine olanak sağlamaktadırlar. Bu açıdan FK'ler üzerine olan çalışmalar artmıştır. Çalışmalarda farklı amaçlar için tasarlanan FK yapılarının performanslarının artırılması hedeflenmiştir. Ancak yüksek performans veren FK'ler karmaşık yapıya sahiptir ve elle tasarlanması zordur. Bu sebeple FK'lerin tasarımında eniyileme algoritmalarının kullanılması önemlidir.

Bu tez kapsamında FK'ler tasarlanırken bir eniyileme algoritmasından yararlanılmıştır. Kullanılan eniyileme algoritması ise literatürde DE olarak bilinen bir çeşit evrimsel algoritmadır. DE, yaygın olarak kullanılan diğer eniyileme algoritmalarına kıyasla daha iyi sonuç verebilmektedir. Bu sebeple, tez kapsamında tasarlanan FK'ler DE kullanılarak tasarlanmıştır.

Tezin üçüncü bölümünde DE kullanılarak tasarlanan FK yapıları verilmiştir. Bu kısımda yapılan çalışmalardan birincisi dalgaboyu altında odaklama yapabilen bir FK lens tasarımıdır. Buradaki amaç; tasarlanan lens yapısının FWHM değerinin dalgaboyunun yarısının altına indirilmesi ve mümkün olduğunca küçültülmesidir. Bunun yanı sıra MSL değerinin küçültülmesi de istenilen bir başka hedefdir. Burada DE çok amaçlı bir eniyileme işlemi için kullanılmıştır ve hem FWHM hem MSL değerlerinin azaltılması başarılmıştır. Sonrasında yine dalgaboyu altında odaklama yapabilen ve daha küçük boyutlara sahip olan bir FK lens yapısı tasarlanmıştır. Bu yapının tasarımında da FWHM ve MSL değerlerinin aynı anda azaltılması işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu tasarlanan FK yapıları hava ortamına dizilen dielektrik silindir çubuklardan oluşmaktadır. DE algoritması ile dielektrik silindir çubukların y eksenindeki pozisyonları istenilen amaca uygun olacak şekilde belirlenmiştir.

Tez kapsamında tasarlanan bir diğer yapı ise FK dalgakılavuzudur. FK dalgakılavuzları FK'ler içerisine çizgi kusur açılarak elde edilen yapılardır. Bu yapılar, FK'lerin sahip olduğu FYBA özelliğini esas alarak çalışılır. Burada yapılan eniyileme işlemi, FK yapısını oluşturan birim hücrelerin piksellere ayrılarak

eniyilenmesi üzerinedir. Kendisinden daha küçük karelere ayrılan bir birim hücrede dielektrik malzeme dağılımının nasıl olacağı FYBA aralığını genişletme amacına uygun olacak şekilde DE tarafından belirlenmiştir. Tasarlanan birim hücre x ve y eksenlerine göre simetriktir. Bu birim hücreler kare örgüde dizilerek bir FK yapısı oluşturulmuş ve bu FK yapısının ortasına da x eksen yönünde bir çizgi kusur açılarak FK dalgakılavuzu yapısı elde edilmiştir. Tasarlanan FK dalgakılavuzu yapısının iletim verimliliği ve bant genişliği incelenmiştir.

Tez kapsamında DE ile tasarlanan bir diğer yapı ise FK kavite yapısıdır. Tasarlanan FK yapısı L3 tipindeki bir FK kavite yapısı baz alınarak elde edilmiştir. Burada kavite bölgesinin etrafındaki hava boşluklarının pozisyonları ve yarıçapları DE ile belirlenmiştir. Kavite kalite faktörü değerlerinin artırılması o kavitenin iyi bir kavite yapısı olduğunu göstermez. İyi bir kavite yapısının aynı zamanda düşük bir mod hacmi değerine sahip olması da gerekir. Bu sebeple iyi bir kavite yapısında kalite faktörünün mod hacmine oranının yüksek olması gerekir. Burada DE'nin kullanılmasının sebebi tasarlanan FK kavite yapısının sahip olduğu Q/V oranının artırılmasıdır.

Bir eniyileme algoritması ile tasarlanan yapının avantajları olduğu gibi dezavantajları da olabilmektedir. Avantajları, algoritmanın istenilen amaca uygun bir yapı ortaya çıkarmasıdır. Bir başka deyişle, bir yapının hangi özelliği iyileştirilmek isteniyorsa algoritma ile o özelliği iyi olan bir yapı tasarlanır. Sonuç olarak ortaya çıkan yapının avantajı da tasarım öncesi algoritmadan iyileştirilmesi istenen özelliği olur. Ancak eniyileme sırasında dikkate alınmayan özelliklerde kötüye gitme olabilir. Örneğin; bu tez kapsamında ilk tasarlanan yapı olan dalgaboyu altında odaklayıcı FK lens yapısında dielektrik silindir çubukların yerleri algoritma ile belirlenmiştir. Algoritma ise oldukça küçük mesafelerde çubukları kaydırmıştır. Ortaya çıkan yapıları nano boyutlarda üretmek mümkün olmayabilir. Yani dielektrik çubukları tam olması gereken koordinatlarda üretmek zor olacaktır. Eğer ortaya çıkacak bu üretim hatalarına karşı yapının odaklama özellikleri değişiyorsa yapının uygulanabilirliğinin zor olduğu ortaya çıkar. Bu yüzden bir algoritma ile tasarlanan yapının üretiminin zor olması, o yapının tercih edilmeme sebebi de olabilir. Benzer şekilde tasarlanan kavite yapısındaki hava boşluklarının pozisyonlarını ve yarıçaplarını algoritmanın bulduğu oranda üretmek mümkün olmayabilir. Bu nedenle kalite faktörünün ve mod hacminin kötüye gitmesi durumu ortaya çıkabilir. Tüm bu bozulmalar tasarım

sırasında kontrol edilmediği için tasarım sonucunda ortaya çıkan dezavantajlardır. Eğer bu dezavantajları da eniyileme sürecine dahil edersek algoritmanın yakınsama hızı düşebilir. Belki de algoritmanın hiç bir zaman işe yarar bir yapı bulamamasına neden olur. Bu gibi üretim hatalarını kontrol etmek için tasarlanan yapının üzerinde rastgele bir şekilde olası üretim hataları uygulanarak simülasyonlar yapılabilir. Bunun sonucunda ortaya çıkan yapının üretim hatalarına karşı ne kadar duyarlı olduğu incelenebilir.

Eniyileme algoritmalarını kullanırken ortaya çıkabilecek dezavantajlardan diğerleri de algoritmanın kendi içerisinde sahip olduğu mekanizmalarından, seçilen katsayılarından ve kullanılan amaç fonksiyonundan ortaya çıkabilecek dezavantajlardır. Tüm bu etkenler doğru belirlenmediği takdirde bir algoritma ile işe yarar bir yapı tasarlamak mümkün olmayabilir.

Bu tez kapsamında yapılan çalışmalarda tasarlanan FK'ler haricinde başka yapılar da bir eniyileme algoritması kullanarak tasarlanabilir. Literatürde bu gibi yapılara rastlamak mümkündür. Ancak daha önce herhangi bir eniyileme algoritma kullanmadan tasarlanan bir yapı eniyileme algoritması ile tasarlanabilir. Bunun haricinde tasarlanan bir yapı üzerindeki bir parametrenin yapının performansına etkisi bir eniyileme algoritması ile yapılabilir. Yani analitik bilgilere ve tahminlere yönelik elle tasarlanmış bir yapı üzerinde performansı artırmaya yönelik işlemler bir eniyileme algoritması ile yapılabilir, tıpkı kavite tasarımlarında olduğu gibi. Bu işlemler sadece kavite yapıları ile sınırlı kalmayabilir. Eğer iyi sonuç vereceği önceden tahmin edilebilen bir yapı varsa bu yapıyı bir eniyileme algoritmasının başlangıcında kullanmak avantajlı olabilir. Ayrıca, daha önceden bir eniyileme algoritması ile tasarlanan bir yapıyı başka bir eniyileme algoritması ile yeniden tasarlayarak performansını artırmak da mümkün olabilir. Benzer şekilde bir eniyileme algoritması ile tasarlanan bir yapıyı yine aynı eniyileme algoritmasının farklı mekanizmalarını kullanarak geliştirmek de kullanılabilir bir başka yöntem olabilir. Son olarak, daha önceden hiç tasarlanmamış bir yapıyı ilk defa bir eniyileme algoritması ile tasarlamak da mümkün olabilir.

Sonuç olarak, eniyileme algoritmaları ile yapılabilecek tasarım çeşitliliği oldukça geniştir. Bu çeşitlik sayesinde üstün özelliklere sahip FK yapılarının tasarlanması mümkün olabilir. Yapılacak bu çalışmalar fotonik alanının gelişmesine hız kazandıracaktır ve fotonik alanının değerini artıracaktır.

KAYNAKLAR

- [1] **Saleh, B. E. A., Teich, M. C.**, *Fundamentals of Photonics*, John Wiley & Sons, Inc. Canada, 1991.
- [2] **Zi, J., Yu, X., Li, Y., Hu, X., Xu, C., Wang, X., Liu, X., Fu, R.**, (2003)., Coloration strategies in peacock feathers, *PNAS*, 100(22):12576–12578.
- [3] **Teyssier, J., Saenko, S. V., van der Marel, D., Milinkovitch, M. C.**, (2015). Photonic crystals cause active colour change in chameleons, *Nat. Commun.*, 6:6368.
- [4] **Joannopoulos J. D., Johnson, S. G., Winn, J. N., Meade, R. D.**, *Photonic Crystals Molding the Flow of Light*, Princeton University Press, New Jersey, USA, 2nd edition, 2008.
- [5] **Rayleigh, L.**, (1887). On the maintenance of vibrations by forces of double frequency, and on the propagation of waves through a medium endowed with a periodic structure, *Phil. Mag. S.5*, 24:145–159.
- [6] **Yablonovitch, E.**, (1987). Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics, *Phys. Rev. Lett.* 58:2059.
- [7] **John, S.**, (1987). Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices, *Phys. Rev. Lett.*, 58:2486.
- [8] **Kittel, C., McEuen, P.**, *Introduction to solid state physics* Wiley, New York, USA, 8th edition, 1976.
- [9] **Johnson, S. G., Joannopoulos, J.**, Block-iterative frequency-domain methods for Maxwell's equations in a planewave basis, *Opt. Express*, 8:173–190 (2001).
- [10] **Akahane, Y., Asano, T., Song, B., Noda, S.**, (2003). High-Q photonic nanocavity in a two-dimensional photonic crystal, *Nature*, 425:944–947.
- [11] **Lončar, M., Nedeljkovic D., Doll, T., Vuckovic, J., Scherer, A., Pearsall, T.**, (2000). Waveguiding in planar photonic crystals, *Appl. Phys. Lett.*, 77:1937.
- [12] **Kurt, H., Colak, E., Cakmak, O., Caglayan, H., Ozbay, E.**, (2008). The focusing effect of graded index photonic crystals, *Appl. Phys. Lett.*, 93:171108.
- [13] **Kurt, H. & Citrin, D. S.**, (2005). Photonic crystals for biochemical sensing in the terahertz region. *Appl. Phys. Lett.*, 87:041108.
- [14] **Oner B. B., Turduev, M., Giden, I. H., Kurt, H.** (2013). Efficient mode converter design using asymmetric graded index photonic structures, *Opt. Lett.*, 38(2):220–222.

- [15] **Schonburn, E., Wu, Q., Park, W., Yamashita, T., Summers, C. J.**, (2006). Polarization beam splitter based on a photonic crystal heterostructure, *Opt. Lett.*, 31(21):3104–3106.
- [16] **Chien, H., Chen, C., Luan, P.**, (2006). Photonic crystal beam splitters, *Opt. Commun.*, 259:873–875.
- [17] **Lončar, M., Yoshie, T., Scherer, A., Gogna, P., Qiu, Y.**, (2002). Low-threshold photonic crystal laser, *Appl. Phys. Lett.*, 81:2680.
- [18] **Wang, C., Zhou, C., Li, Z.**, (2011). On-chip optical diode based on silicon photonic crystal heterojunctions, *Opt. Express*, 19(27):26948–26955.
- [19] **Liu, V., Fan, S.**, (2013). Compact bends for multi-mode photonic crystal waveguides with high transmission and suppressed modal crosstalk, *Opt. Express*, 21(7):8069–8075.
- [20] **Oner, B. B., Can, M. G., Kurt, H.**, (2014). Dual polarized broadband and all dielectric partial cloaking using stacked graded index structures, *Opt Express*, 22(17): 20457–20462.
- [21] **Kurt, H., Oner, B. B., Turduev, M., Giden, I. H.**, (2012). Modified maxwell fish-eye approach for efficient coupler design by graded photonic crystals, *Opt. Express*, 20(20):22018–22033.
- [22] **Hayran, Z., Turduev, M., Botey, M., Herrero, R., Staliunas, K., Kurt, H.**, (2016). Numerical and experimental demonstration of a wavelength demultiplexer design by point-defect cavity coupled to a tapered photonic crystal waveguide, *Opt. Lett.*, 41(1):119–122.
- [23] **Kurt, H., Citrin, D. S.**, (2005). Annular photonic crystals, *Opt. Express*, 13:10316–10326.
- [24] **Ustun, K., Kurt, H.**, (2011). Compact coupling of light from conventional photonic wire to slow light waveguides, *J. Appl. Phys.*, 110:113109.
- [25] **Notomi, M.**, (2000). Theory of light propagation in strongly modulated photonic crystals: refractionlike behavior in the vicinity of the photonic band gap, *Phys. Rev. B*, 62(16):10696.
- [26] **Kosaka, H., Kawashima, T., Tomita, A., Notomi, M., Tamamura, T., Sato, T., Kawakami, S.**, (1999). Self-collimating phenomena in photonic crystals, *Appl. Phys. Lett.*, 74:1212.
- [27] **Kosaka, H., Kawashima, T., Tomita, A., Notomi, M., Tamamura, T., Sato, T., Kawakami, S.**, (1998). Superprism phenomena in photonic crystals, *Phys. Rev. B.*, 58(16):10096.
- [28] **Sanchis, L., Hakansson, A., Lopez-Zanon, D., Bravo-Abad, J., Sanchez-Dehesa, J.**, (2004). Integrated optical devices design by genetic algorithm, *Appl. Phys. Lett.*, 84:4460.
- [29] **Marques-Hueso, J., Sanchis, L., Cluzel, B., De Fornel, F., Martinez-Pastor, J. P.**, (2010). Genetic algorithm designed silicon integrated photonic lens operating at 1550 nm, *Appl. Phys. Lett.*, 95:071115.
- [30] **Hakansson, A., Sanchez-Dehesa, J.**, (2005). Inverse designed photonic crystal de-multiplex waveguide coupler, *Opt. Express*, 13:5440–5449.

- [31] **Preble, S., Lipson, M., Lipson, H.**, (2005). Two-dimensional photonic crystals designed by evolutionary algorithms, *Appl. Phys. Lett.*, 86:061111.
- [32] **Gagnon, D., Dumont, J., Dube, L. J.**, (2012). Beam shaping using genetically optimized two-dimensional photonic crystals, *J. Opt. Soc. Am. A*, 29:2673–2678.
- [33] **Jensen, J. S., Sigmund, O.**, (2011). Topology optimization for nano-photonics, *Laser Photon. Rev.*, 5:308–321.
- [34] **Sigmund, O., Hougaard, K.**, (2008). Geometric properties of optimal photonic crystals, *Phys. Rev. Lett.*, 100:153904.
- [35] **Jensen, J. S., Sigmund, O.**, (2004). Systematic design of photonic crystal structures using topology optimization: low-loss waveguide bends, *Appl. Phys. Lett.*, 84:2022.
- [36] **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.
- [37] **Kumar, M. S., Menabde, S., Yu, S., Park, N.**, (2010). Directional emission from photonic crystal waveguide terminations using particle swarm optimization, *J. Opt. Soc. Am. B* 27:343–349.
- [38] **Lu, J., Vuckovic, J.**, (2013). Nanophotonic computational design, *Opt. Express*, 21(11):13351–13367.
- [39] **Piggott, A. Y., Lu, J., Lagoudakis, K. G., Pwtykiewicz, J., Babinec, T. M., Vuckovic, J.**, (2015). Inverse design and demonstration of a compact and broadband on-chip wavelength demultiplexer, *Nature Photon.* 9:374–377.
- [40] **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, *Nature Photon.*, 9:378–382.
- [41] **Saucer, T. W., Sih, V.**, (2013). Optimizing nanophotonic cavity designs with the gravitational search algorithm, *Opt. Express*, 21:20831–20836.
- [42] **Shen, B., Polson, R., Menon, R.**, Integrated digital metamaterials enables ultra-compact optical diodes, *Opt. Express*, 23:10847–10855.
- [43] **Shen, B., Polson, R., Menon, R.**, (2015). Broadband asymmetric light transmission via all-dielectric digital metasurfaces, *Opt. Express*, 23:20961–20970.
- [44] **Minkov, M., Savona, V.**, (2014). Automated optimization of photonic crystal slab cavities, *Sci. Rep.*, 4:5124.
- [45] **Mak, J. C. C., Sideris, C., Jeong, J., Hajimiri, A., Poon, J. K. S.**, (2016). Binary particle swarm optimized 2 x 2 power splitters in a standard foundry silicon photonic platform, *Opt. Lett.*, 41(16):3868–3871.
- [46] **Goldberg D. E.**, *Genetic algorithms in search, optimization and machine learning*, Addison-Wesley, Massachusetts, 1989.

- [47] **Bianchi, L., Dorigo, M., Gambardella, L. M., Gutjahr, W. J.,** (2009). A survey on metaheuristics for stochastic combinatorial optimization, *Natural Computing: an international journal*, 8(2):239–287.
- [48] **Price KV, Storn RM, Lampinen JA.,** *Differential evolution: a practical approach to global optimization*, Springer, Berlin, 1st edition, 2005.
- [49] **Mitchell, M.,** “An introduction to genetic algorithms. MIT Press, Cambridge, MA, 1996.
- [50] **Kennedy, J., Eberhart, R.,** (1995). Particle swarm optimization. In *Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks IV*, pages 1942–1948.
- [51] **Dorigo, M., Gambardella, L. M.,** (1997). Ant colony system: a cooperative learning approach to the traveling salesman problem, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 1(1):53–66.
- [52] **Storn R., Price K.,** (1997). Differential evolution—a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces, *Journal of Global Optimization*, 11:341–359.
- [53] **Storn, R.,** (1996). On the usage of differential evolution for function optimization. *Fuzzy Information Processing Society, 1996. NAFIPS., 1996 Biennial Conference of the North American, Berkeley, CA, 1996*, pages 519–523.
- [54] **Deb, A., Roy, J. S., Gupta, B.,** (2014). Performance comparison of differential evolution, particle swarm optimization and genetic algorithm in the design of circularly polarized microstrip antennas, *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 62(8):3920–3928.
- [55] **Iwan, M., Akmeliawati, R., Faisal T., Al-Assadi, H. M. A. A.,** (2012). Performance comparison of differential evolution and particle swarm optimization in constrained optimization. *Procedia Engineering*, 41:1323–1328.
- [56] **Vu, V. T.,** (2012). A comparison of particle swarm optimization and differential evolution, *International Journal on Soft Computing (IJSC)*, 3(3):13–30.
- [57] **Zheng, F., Simpson, A. R., Zecchin, A.,** (2012). A performance comparison of differential evolution and genetic algorithm variants applied to water distribution system optimization, *World Environmental and Water Resources Congress 2012*, 2954–2963.
- [58] **Jones, K. O., Bouffet, A.,** (2007). Comparison of ant colony optimization and differential evolution, In *Proceedings of the 2007 International conference on computer systems and technologies*, 25.
- [59] **Vesterstrom, J., Thomsen, R.,** (2004). A comparative study of differential evolution, particle swarm optimization, and evolutionary algorithms on numerical benchmark problems, *Evolutionary Computation, 2004*, pages 1980–1987.

- [60] **Yang, S. Gan, Y. B., Qing, A.** (2002). Sideband suppression in time-modulated linear arrays by the differential evolution algorithm, *IEEE Antenn. Wireless Propag. Lett.*, 1(1):173–175.
- [61] **Regulwar, D. G., Choudhari, S. A., Raj, P. A.**, (2010). Differential evolution algorithm with application to optimal operation of multipurpose reservoir, *J. Water Resource and Protection*, 2:560–568.
- [62] **Hecht, E.**, *Optics*, Addison-Wesley, USA, 4th edition, 2001.
- [63] **Turunen, J., Wyrowski, F.**, *Diffraction optics for industrial and commercial applications*, Wiley-VCH Verlag GmbH, 1998.
- [64] **Turduev, M., Giden, I. H., Kurt, H.**, (2015). Design of flat lens-like graded index medium by photonic crystals: exploring both low and high frequency regimes, *Opt. Comm.*, 339, 22–33.
- [65] **Ishii, S., Kildishev, A. V., Shalaev, V. M., Chen, K. P., Drachev, V. P.**, (2011). Metal nanoslit lenses with polarization-selective design. *Opt. Lett.*, 36:451–453.
- [66] **Chien, H. T., Chen, C. C.**, (2006). Focusing of electromagnetic waves by periodic arrays of air holes with gradually varying radii, *Opt. Express*, 14:10759–10764.
- [67] **Srituravanich, W., Pan, L., Wang, Y., Sun, C., Bogy, D. B., Zhang, X.**, (2008). Flying plasmonic lens in the near field for high-speed nanolithography, *Nat. Nanotechnol.*, 3:733–737.
- [68] **Schuller, J. A., Barnard, E. S., Cai, W., Jun, C. Y., White, J. S., Brongersma, M. L.**, (2010). Plasmonics for extreme light concentration and manipulation, *Nature Materials*, 9:193–204.
- [69] **Gramotnev, D. K., Bozhevolnyi, S. I.**, (2010). Plasmonics beyond the diffraction limit, *Nature Photon.*, 4:83–91.
- [70] **Grier, D. G.**, (2003). A revolution in optical manipulation, *Nature*, 424:810–816.
- [71] **Yang, A. H. J., Moore, S. D., Schmidt, B. S., Klug, M., Lipson, M., Erickson, D.**, (2009). Optical manipulation of nanoparticles and biomolecules in sub-wavelength slot waveguides, *Nature*, 457:71–75.
- [72] **Righini, M., Zelenina, A. S., Girard, C., Quidant, R.**, (2007). Parallel and selective trapping in a patterned plasmonic landscape, *Nature Phys.*, 3:477–480.
- [73] **Grigorenko, A. N., Roberts, N. W., Dickinson, M. R., Zhang, Y.**, (2008). Nanometric optical tweezers based on nanostructured substrates, *Nature Photon.*, 2:365–370.
- [74] **Gramotnev, D. K., Bozhevolnyi, S. I.**, (2014). Nanofocusing of electromagnetic radiation, *Nature Photon.*, 8:13–22.
- [75] **Jin, Y., He, S.**, (2007). Canalization for subwavelength focusing by a slab of dielectric photonic crystal, *Phys. Rev. B*, 75:195126.
- [76] **Thongrattanasiri, S., Podolskiy, V. A.**, (2009). Hypergratings nanophotonics in planar anisotropic metamaterials, *Opt. Lett.*, 34:890–892.

- [77] **Ren, G., Lai, Z., Wang, C., Feng, Q., Liu, L., Liu, K., Luo, X.,** (2010). Subwavelength focusing of light in the planar anisotropic metamaterials with zone plates, *Opt. Express*, 18:18151–18157.
- [78] **Ren, G., Wang, C., Zhao, Z., Tao, X., Luo, X.,** (2012). Off-axis characteristic of subwavelength focusing in anisotropic metamaterials, *J. Opt. Soc. Am. B*, 29:3103–3108.
- [79] **Ma, C., Lu Z.,** (2010). A super resolution metalens with phase compensation mechanism, *Appl. Phys. Lett.*, 96:183103.
- [80] **Jacob, Z., Alekseyev, L. V., Narimanov, E.,** (2006). Optical hyperlens: far-field imaging beyond the diffraction limit, *Opt. Express*, 14:8247–8256.
- [81] **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.
- [82] **Kurt, H., Citrin, D.,** (2007). Gradient-index photonic crystals, *Opt. Express*, 15:1240–1253.
- [83] **Centeno, E. Cassagne, D., Albert, J.,** (2006). Mirage and superbending effect in two-dimensional graded photonic crystals, *Phys. Rev. B*, 73:235119.
- [84] **Liu, S., Li, L., Lin, Z., Chen, H. Y., Zi, J., Chan, C. T.,** (2010). Graded index photonic hole: analytical and rigorous full wave solution, *Phys. Rev. B*, 82:054204.
- [85] **Halir, R., Ortega-Monux, A., Schmid, J. H., Alonso-Ramos, C., Lapointe, J., Xu, D., Wangüemert-Perez, J. G., Molina-Fernandez, I., Janz, S.,** (2014). Recent advances in silicon waveguide devices using sub-wavelength gratings, *IEEE J. Sel. Top. Quant.*, 20:279–291.
- [86] **Wang, J., Glesk, I., Chen, L. R.,** (2014). Subwavelength grating filtering devices, *Opt. Express*, 22:15335–15345.
- [87] **Levy, U., Abashin, M., Ikeda, K., Krishnamoorthy, A., Cunningham, J., Fainman, Y.,** (2007). Inhomogeneous dielectric metamaterials with space-variant polarizability, *Phys. Rev. Lett.*, 98:243901.
- [88] **Taflove, A., Hagness, S. C.,** *Computational electrodynamics: the finite-difference time-domain method*, Artech House, Massachusetts, USA, 3rd edition, 2005.
- [89] **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.
- [90] **Berenger, J.,** (1994). A perfectly matched layer for absorption of electromagnetic waves, *J. Comput. Phys.*, 114:185–200.
- [91] **Lee, Y. J., Hong, B. H., Kim, W. Y., Min, S. K., Kim, Y., Jouravlev, M. V., Bose, R., Kim, K. S., Hwang, I., Kaufman, L. J., Wong, C. W., Kim, P., Kim, K. S.,** (2009). Near-field focusing and magnification

through self-assembled nanoscale spherical lenses, *Nature*, 460:498–501.

- [92] **Guo, W., Wang, Z. B., Li, L., Whitehead, D. J., Luk'yanchuk, B. S., Liu, Z.,** (2007). Near-field laser parallel nanofabrication of arbitrary-shaped patterns, *Appl. Phys. Lett.*, 90:243101.
- [93] **Wang, Z. B., Luk'yanchuk, B. S., Li, L., Crouse, P. L., Liu, G., Dearden, G., Watkins, K. G.,** (2007). Optical near-field distribution in an asymmetrically illuminated tip-sample system for laser/STM nanopatterning, *Appl. Phys. A*, 89:363–368.
- [94] **Wang, Z. B., Guo, W., Li, L., Luk'yanchuk, B., Khan, A., Liu, Z., Chen, Z., Hong, M.,** (2011). Optical virtual imaging at 50 nm lateral resolution with a whitelight nanoscope, *Nat. Commun.*, 2:218.
- [95] **Betzig, E., Lewis, A., Harootunian, A., Isaacson, M., Kratschmer, E.,** (1986). Near Field Scanning Optical Microscopy (NSOM), *Biophys. J.*, 49:269–279.
- [96] **Pollock, H. M., Smith, D. A.,** *Handbook of vibrational spectroscopy Vol. 2*, Wiley, 2006.
- [97] **Turduev, M., Giden, I. H., Kurt, H.,** (2013). Extraordinary wavelength dependence of self-collimation effect in photonic crystal with low structural symmetry, *Phot. Nano. Fund. Appl.*, 11:241–252.
- [98] **Gonzalez-Garcia, R., Castanon, G., Hernandez-Figueroa, H. E.,** (2014). 2D photonic crystal complete band gap search using cellular automaton refinement, *Phot. Nano. Fund. Appl.*, 12:527-539.
- [99] **Meng, F., Li, S., Lin, H., Jia, B., Huang, X.,** (2016). Topology optimization of photonic structures for all-angle negative refraction, *Finite Elem. Anal. Des.*, 117-118:46-56.
- [100] **Paschotta, R.,** *Encyclopedia of Laser Physics and Technology*, John Wiley & Sons, Inc., 2008.
- [101] **Englund, D., Fushman, I., Vuckovic, J.,** (2005). General recipe for designing photonic crystal cavities, *Opt. Express*, 12: 5961.
- [102] **Vuckovic, J., Loncar, M., Mabuchi, H., Scherer, A.,** (2001). Design of photonic crystal microcavities for cavity QED, *Phys. Rev. E*, 65:016608.
- [103] **Portalupi, S. L., Galli, M., Reardon, C., Krauss, T. F., O'Faolain, L., Andreani, L. C., Gerace, D.,** (2010). Planar photonic crystal cavities with far-field optimization for high coupling efficiency and quality factor, *Opt. Express*, 18:16064.
- [104] **Frei, W. R., Johnson, H. T., Choquette, K. D.,** (2008). Optimization of a single defect photonic crystal laser cavity, *J. Appl. Phys.*, 103:033102.
- [105] **Akahane, Y., Asano, T., Song, B. S., Noda, S.,** (2005). Fine-tuned high-Q photoniccrystal nanocavity, *Opt. Express*, 13:1202.

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, Optik Fotonik

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

Yıl	Yer	Görev
2014	TED Üniversitesi	Araştırma Görevlisi
2012	Türk Telekom	Stajyer
2011	Türk Telekom	Stajyer

YABANCI DİL: İngilizce

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- Kucukates, B., Turdnev, M., **Bor, E.**, Kurt, H., 2016. Photonic crystal sub-wavelength $\lambda/5$ focusing lens design using optimization method, *Proc. 2016 18th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, July 10-14, Trento, Italy.

- **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.
- **Bor, E.**, Turduev, M., Kurt, H. 2016. Compact subwavelength focusing lens design, *Appl. Phys. Lett.*, (in preparation).

DİĞER YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- 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.
- Tellioglu, B., **Bor, E.**, Turduev, M., Kurt, H., 2016. Polarization independent focusing of light by gradually modulated annular photonic structure, *Proc. 2016 18th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, July 10-14, Trento, Italy.
- Babayığit, C., Turduev, M., Giden, I. H., **Bor, E.**, Kurt, H., 2016. T-shape slotted photonic crystal based sensor with high sensitivity, *Proc. 2016 18th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, July 10-14, Trento, Italy.
- Turduev, M., **Bor, E.**, Kurt, H., 2016. Polarization insensitive focusing of light by graded all dielectric annular photonic crystals, *J. Appl. Phys.*, (submitted).
- Turduev, M., Giden, I. H., Babayığit, C., Hayran, Z., **Bor, E.**, Boztug, C., Kurt, H., Staliunas, K., 2016. Mid-infrared T-shaped photonic crystal waveguide for optical refractive index sensing, *Sens. Actuator B-Chem.*, (submitted).