

**DÜŞÜK SİMETRİ VE DERECELENDİRİLMİŞ KIRILMA İNDİSİNE SAHİP  
FOTONİK KRİSTALLERİN SPEKTRAL ANALİZİ**

**İBRAHİM HALİL GİDEN**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ**

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**EYLÜL 2013**

**ANKARA**

Fen Bilimleri Enstitü onayı

---

Prof. Dr. Necip CAMUŐCU

Müdü

Bu tezin Yüksek Lisans derecesinin tüm gereksinimlerini sağladığını onaylarım.

---

Doç. Dr. Hamza KURT

Anabilim Dalı Başkanı

İbrahim Halil GİDEN tarafından hazırlanan DÜŞÜK SİMETRİ VE DERECELENDİRİLMİŞ KIRILMA İNDİSİNE SAHİP FOTONİK KRİSTALLERİN SPEKTRAL ANALİZİ adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

---

Doç. Dr. Hamza KURT

Tez Danışmanı

Tez Jüri Üyeleri

Başkan :Doç. Dr. Hamza KURT

Üye : Doç. Dr. Kemal BIÇAKÇI

Üye : Yrd. Doç. Dr. İsrail BAHÇECİ

## **TEZ BİLDİRİMİ**

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada orijinal olmayan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

(İmza)

(Adı Soyadı)

**Üniversitesi** : TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi  
**Enstitüsü** : Fen Bilimleri  
**Anabilim Dalı** : Elektrik ve Elektronik Mühendisliği  
**Tez Danışmanı** : Doç. Dr. Hamza KURT  
**Tez Türü ve Tarihi** : Yüksek Lisans – Eylül 2013

**İbrahim Halil GİDEN**

## **DÜŞÜK SİMETRİ VE DERECELENDİRİLMİŞ KIRILMA İNDİSİNE SAHİP FOTONİK KRİSTALLERİN SPEKTRAL ANALİZİ**

### **ÖZET**

Tarihsel olarak, iki ve üç boyutlu Fotonik Kristaller (FK) olarak bilinen periyodik yapılara olan ilgi, Yablonovitch ve John isimindeki optik alanında çalışan bilim adamlarının periyodik yapılar üzerinde yaptıkları ilk çalışmalarıyla başladı. Onlar çalışmalarında, elektromanyetik (EM) dalgaların yayılımının da, yarıiletken yapıların elektron iletkenliğini etkileyebildiği gibi, kontrol edilebileceğini savundular. FK'ların önemli optiksel özelliklerinden biri, FK'lar – elektronik yasaklı bant aralığına benzer şekilde- iletim spektrumunda Fotonik yasaklı bant aralığına (FYB) sahiptir. Böylece, FK'lar belirli frekans bölgelerinde -yönden bağımsız olarak- ışığın yapı boyunca yayılmasını engeller. FYB bölgesinde, ne herhangi bir optiksel mod ne de fotonun anlık ışıması oluşmaz. FK birim hücreindeki dönme ve ayna simetrisinin kırılması, süper-kolimasyon, polarizasyondan bağımsız öz-kolimasyon, komple yasaklı bant aralığı ve çoklayıcı gibi özelliklerin oluşmasını sağlar. FK devre dizaynında bir başka önemli konu da -özellikle- iki boyutlu FK'ların pozisyonlarının düzenlenmesiyle ortamın kırılma indis profiline ayarlanabilmesidir. Derecelendirilmiş kırılma indisli FK'lar (DKİ FK) sayesinde küplör, lens ve süper-bükümler gibi Fotonik entegre devre parçaları oluşturulabilir.

**Anahtar Kelimeler:** Fotonik kristaller, Elektromanyetik dalgalar, Fotonik yasaklı bant aralığı, Derecelendirilmiş kırılma indisli ortam, Fotonik entegre devreler.

**University** : TOBB University of Economics and Technology  
**Institute** : Institute of Natural and Applied Sciences  
**Science Programme** : Electrical and Electronics Engineering  
**Supervisor** : Associate Professor Dr. Hamza KURT  
**Degree Awarded and Date** : M.Sc. – September 2013

**Ibrahim Halil GIDEN**

**SPECTRAL ANALYSES OF LOW-SYMMETRIC AND GRADED INDEX  
PHOTONIC CRYSTALS**

**ABSTRACT**

The great interest to the two and three dimensionally periodic structures, called photonic crystals (PCs), has begun with the pioneer works of Yablonovitch and John as one can efficiently control the propagation of the electromagnetic (EM) waves in the same manner with semiconductors that affect the electron conduction. One of the main peculiar properties of PCs is that they have photonic band gap (PBG) in the transmission spectrum similar to electronic band gap and hence, they are able to prevent the light to propagate in certain frequency regions irrespective of the propagation direction in space. Inside the PBG, neither optical modes nor spontaneous emissions exist. Breaking the rotational and mirror symmetries of PC unit cells provides rich dispersive features such as super-collimation, polarization insensitive self-collimation, complete band gap and multiplexing effects. Another important issue in PC designs is that it is feasible to design graded index medium if the parameters of the two dimensional PCs is intentionally rearranged. That type of configuration is known as Graded index photonic crystals (GRIN PCs). Specifically, re-orientation of PC unit cells gives rise to the implementation of graded index (GRIN) mediums. The implementations of GRIN via periodic structures provide great flexibilities in terms of designing different index gradient and photonic integrated circuit components such as couplers, lenses and super-bending.

**Keywords:** Photonic crystals, Electromagnetic waves, Photonic band gap, Graded index media, Photonic integrated circuits.

## **TEŞEKKÜR**

Çalıőmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren hocam Doç. Dr. Hamza KURT'a, yine zor anlarımda beni yalnız bırakmayıp daima beni pozitif yönde motive etmesini başaran can dostum Mirbek TURDUEV'e ve yine kıymetli tecrübelerinden faydalandığım TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerine ve tüm TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi ailesine teşekkürü bir borç bilirim.

## İÇİNDEKİLER

	<b>Sayfa</b>
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	x
KISALTMALAR	xiv
SEMBOL LİSTESİ	xv
1. GİRİŞ	1
1.1. Giriş ve Çalışmanın Amacı . . . . .	1
2. FOTONİK KRİSTALLER: FOTONLARIN OPTİK KONTROLÜ VE MANİPULASYONU	1
2.1. Fotonik Kristallere Giriş . . . . .	1
2.2. Önemli kristal özellikleri ve parametreleri . . . . .	1
2.3. Kısa Bir Tarihçe . . . . .	3
2.4. Fotonik Bant Yapısı . . . . .	4
2.4.1. Fotonik Yasaklı Bant Aralığı ve Komple Yasaklı Bant Aralığı. . . . .	5
2.5. Fotonik Kristal İçerisinde Işık: Sıra dışı Bant Dispersiyonu . . . . .	7
2.6. Fotonik Kristallerin Optik Uygulamaları . . . . .	9
3. YAPISAL ASİMETRİNİN FOTONİK KRİSTALLERİN BANT YAPISINDAKİ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ	10
3.1. Asimetrik Fotonik Kristallerin farklı optiksel devre uygulamaları . . . . .	12
3.2. Asimetrik Fotonik Kristal Mod Çeviricisi Tasarımı ve Spektral Analizi . . . .	13
3.3. Heteroyapının Zaman Düzlemindeki Analizi . . . . .	17

3.4. Sonuç .....	25
4. DERECELENDİRİLMİŞ KIRILMA İNDİSLİ FOTONİK KRİSTALLER VE OPTİK UYGULAMALARI	26
4.1. Homojen ve Fotonik Kristalli Yapıların Geometrik Analizleri .....	27
4.2. Tasarlanan Derecelendirilmiş Fotonik Kristal Yapısının Zaman Düzlemindeki Analizi .....	30
4.3. Sürekli Yapı ile Fotonik Kristalli Yapının Sayısal Kıyaslaması .....	35
4.4. Sonuç .....	38
KAYNAKLAR	39
ÖZGEÇMİŞ	46



## ÇİZELGELERİN LİSTESİ

<b>Çizelge</b>	<b>Sayfa</b>
Çizelge 3.1. Çalışma frekansı bölgesinde iletim verimliliği, faz kayması ve genlik karşılaştırması açısından mod çevirme performansı.	22

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. 1B, 2B ve 3B FK'ların basit bir gösterimi. Farklı renkler, farklı kırılma indise sahip dielektrik malzemeleri göstermektedir. FK'ların kristal örgü özelliklerini, bir veya daha fazla eksen boyunca görülen periyodikliği belirler.	2
Şekil 2.2. 2B kare-örgülü silindirik FK çubuklar. (a) Farklı indis modülasyonuna sahip iki yön belirtilmiştir. Şekilde Kristal örgü sabiti $a$ belirtilmiştir. (b) Kare örgülü yapıda belirtilen iki yön boyunca kırılma indis periyodikliği aynıdır.	5
Şekil 2.3(a) $r=0.36a$ yarıçaplı silindirik kare örgülü FK'ların dispersiyon diyagramı. (b) Bu özellikteki FK yapısının iletim spektrumu.	6
Şekil 2.4. Sabit frekansta farklı eğimlere sahip EFE'lere göre gelen fotonun davranışı. Belirli yön ve enerji aralıklarında, FK'lar öz-kolimatör, saçıcı veya toplayıcı lens gibi davranabilir.	7
Şekil. 2.5. $r=0.36a$ yarıçaplı FK birim hücresinin (a) Birinci, (b) İkinci, (c) Üçüncü ve (d) Dördüncü TM modları için oluşturulmuş EFE'ler. Belirli dalga vektör yönleri (a)'da gösterilmektedir.	8
Şekil 2.6. Ters uzayda tanımlanan FK örgüsü için tanımlanan Brillouin sınırı. Simetrik FK'lar için sadece $\Gamma$ -X-M üçgensel sınırı boyunca inceleme yapmak yeterlidir (koyu renkli bölge).	10
Şekil 2.7 (a) $r=0.36a$ yarıçaplı kare-örgülü simetrik ( $C_{4v}$ ) FK ile (b) $R=0.36a$ yarıçaplı ve $r=0.15a$ yarıçaplı delik bulunan düşük simetrlili ( $C_{2v}$ ) FK yapılarının dispersiyon diyagramları.	11
Şekil 3.1. MDFK ve silindirik FK'ların birim hücrelerinin geometrik	14

tasarımları (a) ve (b)'de gösterilmiştir. (c) Asimetrik FK'lar için ilgili Brillouin bölgesinin gösterimi.

Şekil 3.2. (a) MDFK ve normal FK in dispersiyon eğrileri ve (b) faz indis dağılımları. İki grafikte de eğriler asimetrik FK için kırmızı düz çizgi ile gösterilirken, simetrik FK için siyah kesikli çizgiyle gösterilmiştir. Çalışma frekansı aralığı turkuaz rengine boyanmıştır. Normal FK ve MDFK'nın ikinci bant eş-frekans eğrileri sırasıyla (c) ve (d)'de gösterilmiştir.

Şekil 3.3. FK heteroyapıya sahip olan mod-mertebe çeviricisinin şematik gösterimi.

Şekil 3.4. (a) FK yapının ve (b) yapı yukarısına asimetrik FK'lar eklenen mod çeviricisinin TM alan dağılımlarını göstermek için zaman düzlemindeki anlık görüntüleri sunulmuştur. Kırmızı (“+” ile gösterilen) ve mavi renkler (“-” ile gösterilen) maksimum ve minimum elektrik alan değerlerini göstermektedir. Kesitler kesikli çizgi ile gösterilen yerlerden alınmıştır ve  $TM_0$  ve  $TM_1$  modları için elde edilen çıkış dalganın elektriksel alan genlik profilleri (c)'deki gibi çizdirilmiştir.

Şekil 3.5. (a) Tasarlanan mod çeviricisinin giriş ve çıkış dalga kılavuzları ile şematik gösterimi. (b) Normalize frekansa karşılık normalize iletim verimliliği. İletim verimliliğinin yüksek olduğu frekans aralığı boyanmıştır. (c) Boyanan kısmın daha yakından gösterimi. İlk bölge odaklama bölgesini gösterirken, ikinci bölge ise öz-kolimasyon bölgesini göstermektedir.

Şekil 3.6. (a) Mod çevirici yapının sembolik gösterimi. (b) Yapının orta kısmı MDFK'dan kenarları ise simetrik FK'dan oluştuğunda yapının zaman düzleminde elde edilen anlık görüntüsü. Bu konfigürasyon ile yapının çıkışında yüksek mertebeli ( $TM_2$ ) mod elde edilmiştir. Kırmızı (“+” ile gösterilen) ve mavi (“-” ile gösterilen) renkler maksimum ve

minimum elektrik alanları gösterir. (c) Çıkış kanalında oluşan  $TM_2$  modun elektrik alan profili.

Şekil 4.1. (a) Derecelendirilmiş kırılma indisine sahip sürekli ortamın şematik gösterimi ve (b) kırılma indis profili. (c) Tasarlanan DKİ FK yapısının şematik gösterimi. Farklı giriş dalga boylarına bağlı ışın yolu resimlenmiştir. (d) Ayrık Hiperbolik sekant profiline sahip DKİ FK ortamının kırılma indis profili. 28

Şekil 4.2. (a) Farklı dalga boylarında ilerleyen dalganın ana lob açısıl koordinattaki güç akış şeması. Yedi farklı çalışma dalga boyundan dördü, sırasıyla, 1782.5nm, 1620.5nm, 1485.4nm ve 1371.2nm'dir. Örgü sabiti  $a=356.5\text{nm}$ 'ye sabitlenmiştir. (b) Çalışma dalga boyuna bağlı yatay eksenindeki konumsal kayma (düz çizgi) ve çıkış açısı (kesikli çizgi) grafiği. 32

Şekil 4.3. (a) Farklı dalga boylarında ilerleyen dalganın ana lob açısıl koordinattaki güç akış şeması. Farklı çalışma dalga boyları, sırasıyla, 1636.1nm, 1577.7nm, 1523.3nm ve 1472.5nm'dir. Örgü sabiti  $a=441.8\text{nm}$ 'ye sabitlenmiştir. (b) Çalışma dalga boyuna bağlı yatay eksenindeki konumsal kayma (düz çizgi) ve çıkış açısı (kesikli çizgi) grafiği. 33

Şekil 4.4. (a) Farklı dalga boylarında ilerleyen dalganın ana lob açısıl koordinattaki güç akış şeması. Farklı çalışma dalga boyları, sırasıyla, 1572.8nm, 1550.0nm ve 1527.9nm'dir. Örgü sabiti  $a=534.8\text{nm}$ 'ye sabitlenmiştir. (b) Çalışma dalga boyuna bağlı yatay eksenindeki konumsal kayma (düz çizgi) ve çıkış açısı (kesikli çizgi) grafiği. 34

Şekil 4.5. (a) 1636.1nm ve (b) 1523.3nm çalışma dalga boylarında derecelendirilmiş kırılma indisine sahip sürekli ortamın uzaysal elektrik alan dağılımı. (c) 1636.1nm ve (d) 1523.3nm çalışma dalga boylarında tasarlanan DKİ FK yapısının uzaysal elektrik alan dağılımı. Şekilde görülen FDTD analizi ile elde edilen elektrik alan dağılımları, Bölge-2 36

içinde yapılmıştır. Şekillerde görülen sarı işaretler, çıkış gücüne ait ana lobun ilerleme yönünü göstermektedir.

Şekil 4.6. Farklı örgü büyüklüğüne ( $\Delta_y$ ) sahip FK birim hücreleri için tanımlanan birinci TM bandı eş-frekans eğrilerinin gösterimi. 37

## KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış olan kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

### Kısaltmalar Açıklama

<b>FK</b>	Fotonik Kristaller
<b>EM</b>	Elektromanyetik dalga
<b>1B</b>	Bir Boyutlu kristal yapılar
<b>2B</b>	İki Boyutlu kristal yapılar
<b>3B</b>	Üç Boyutlu kristal yapılar
<b>FYB</b>	Fotonik Yasaklı Bant Aralığı
<b>EFE</b>	Eş Frekans Eğrileri
<b>EFY</b>	Eş Frekans Yüzeyleri
<b>MDFK</b>	Modifiye Delikli Fotonik Kristaller
<b>TM</b>	Enine Manyetik elektrik alanı

## SEMBOL LİSTESİ

Bu çalışmada kullanılmış olan simgeler açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklama</b>
$k$	Dalga vektörü
$c$	Hava Ortamında Yayılan Işık Hızı
$n$	Dielektrik Malzemenin Kırılma İndisi
$a$	Kristal Örgü Sabiti
$\omega(k)$	Dalga Vektörü $k$ 'ya Karşılık Gelen Açısal Frekans
$n_p$	Elektromanyetik Dalganın Faz Kırılma İndisi
$v_g$	Elektromanyetik Dalganın Grup Hızı
$k_{\parallel}$	Dalga Vektörü $k$ 'nın Paralel Bileşeni
$\Delta s$	Fotonik Kristalin Kaydırma Parametresi

## 1. GİRİŞ

### 1.1. Giriş ve Çalışmanın Amacı

Bu çalışmada, Fotonik Kristaller olarak adlandırılan kristal yapıların çeşitli optik devre tasarımları ve entegre devrelerde Fotonik uygulamaları incelenmiştir.

## 2. FOTONİK KRİSTALLER: FOTONLARIN OPTİK KONTROLÜ VE MANİPULASYONU

### 2.1. Fotonik Kristallere Giriş

Fotonik kristaller (FK), istenen çalışma dalga boyuyla kıyaslanabilen uzunlukta kırılma indisinin periyodik olarak modülasyonu ile elde edilen malzemelerdir. “Kristal” olarak adlandırılmasındaki sebep, yapının temel yapı bloklarının periyodik düzenlenmesiyle oluştuğundandır. “Fotonik” terimi ise fotonların yayılım özelliklerini etkilemesi için tasarlandığı için kullanılır. Genellikle, Elektromanyetik (EM) dalga belirli kırılma indisli bir yapı içinde ilerlediği sürece oldukça etkilenir. Farklı kırılma indisine sahip bölgeler arasındaki geçişlerde (ara yüzler), EM dalga uyumlu bir saçılıma uğrar. Belirli frekans bölgesinde bulunan bir fotonun özellikleri, FK içindeki yayılım yönüne bağlı olarak değişiklik gösterir. Malzemenin kırılma indisinde yapılan periyodik değişiklikler, belirli enerji seviyesi ve yayılım yönüne sahip fotonların yapı boyunca ilerlemesini yasaklıyor. Bu enerji bölgelerine “Fotonik yasaklı bant aralığı” denir. Eğer bu frekans aralığı fotonun polarizasyonundan ve yönünden bağımsız ise “Komple yasaklı bant aralığı” diye adlandırılır.

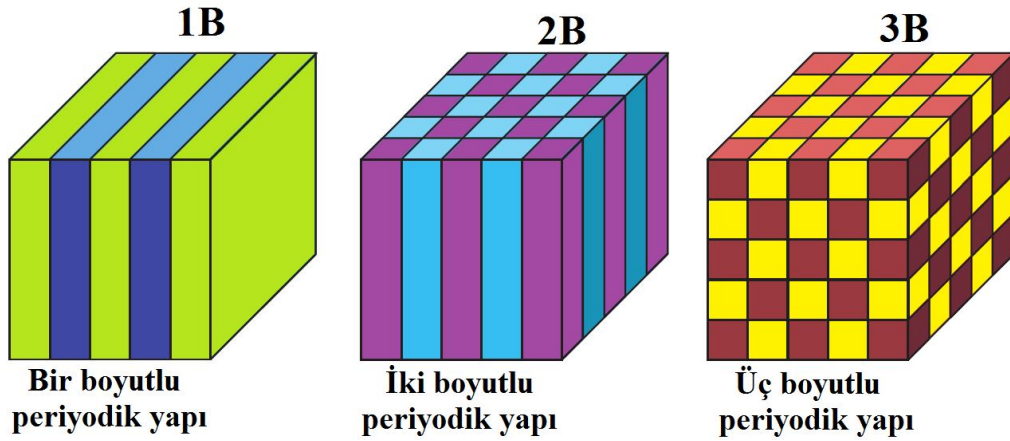
### 2.2. Önemli kristal özellikleri ve parametreleri:

FK bant özelliklerini etkileyen kristal özellikleri ve parametreleri aşağıda sıralanmıştır:

- *Kristal boyutu.* Kırılma indisinin periyodik düzeni, FK'nın boyutunu belirler. FK, bir boyutlu (1B), iki boyutlu (2B) veya üç boyutlu (3B) olabilir. Düzlemsel FK, kare/üçgensel örgülü FK ve Bravais örgülü FK sırasıyla 1B, 2B ve 3B FK için örnek olarak gösterilebilir (Şekil 2.1'i inceleyiniz).



- *Simetri*. Temel yapı bloklarının FK'daki pozisyonu kristal örgüsünün simetri özelliğini oluşturur (3. Bölümde detaylıca incelenecektir).
- *Kristal örgü ve parametreleri*. Temel yapı blokları arasındaki en küçük aralık "Kristal örgü sabiti" olarak isimlendirilir. Optik spektrumdaki çalışma bandı, kristal örgü sabiti ile orantılıdır.
- *Hücre sel dolun oranı ve efektif kırılma indisi*. Saçılma temel yapı bloklarını oluşturan malzemenin bağıl miktarına "Hücre sel dolun oranı" denir. "Efektif kırılma indisi" genellikle malzemenin ortalama dielektrik sabitinin kareköküne eşittir. Efektif kırılma indisi, kristal örgü sabiti ile birlikte FK'nın çalışma frekans bölgesini belirler.
- *Ölçeklenebilirlik*. FK'nın en ilgi çekici özelliklerinden birisi, esas uzunluk ölçüsü veya dielektrik sabitinin olmamasıdır. Bu sayede, teorik olarak bulunan sonuçlar tamamen ölçeklenebilir. Kristal örgü sabiti ve malzemenin kırılma indisi ayarlanarak istenilen frekans bölgesinde çalışılabilir.



Şekil 2.1. 1B, 2B ve 3B FK'ların basit bir gösterimi. Farklı renkler, farklı kırılma indise sahip dielektrik malzemeleri göstermektedir. FK'ların kristal örgü özelliklerini, bir veya daha fazla eksen boyunca görülen periyodikliği belirler.

### 2.3. Kısa bir tarihçe

“Fotonik kristaller” ve “Fotonik bant yapısı” terimleri 1987’den öncesinde kullanılmıyordu. Fakat optik frekans bölgesinde periyodik dielektrik yapıların fotonla etkileşimi incelenmiş ve yasaklı bant aralığı önceden çalışılmıştı.

1987 yılı Mayıs’ın ortalarında, iki birbirinden bağımsız araştırmacı (Yablonovitch ve John) popüler bir fizik dergisi olan “Physical Review Letters” in aynı sayısında iki makale yayınladılar. Bunlardan birincisi, ABD’de Bell Haberleşme ve Araştırma laboratuvarında çalışmalarını sürdüren Yablonovitch tarafından yayımlandı [1]. Çalışmasında, 3B periyodik yapılar kullanılarak elektromanyetik radyasyonların doğal ışımalarının engellenebileceğini ispatladı. Ve bu şekilde bir yapının FYB aralığına sahip olması gerektiği savında bulundu. John tarafından yayımlanan ikinci makalede ise [2], dikkatlice hazırlanmış düzensiz yapılarda fotonların güçlü Anderson lokalizasyon [3] özelliklerini inceledi. Dielektrik yapıda oluşturulan şekilsel bozuklukların belirli enerji seviyelerinde fotonların yayılımını engellediğini savundu. Bu sayede, “FK’lar” ve “FYB malzemeleri” optik araştırma konusu haline geldi.

Günümüzde ise Fotonik alanında çok güzel ilerlemeler kaydedildi. Bu konuyla ilgili genel bir değerlendirme için Referans 4’ü inceleyebilirsiniz. FK alanında hala gündemde olan konular aşağıdaki gibi sıralanabilir:

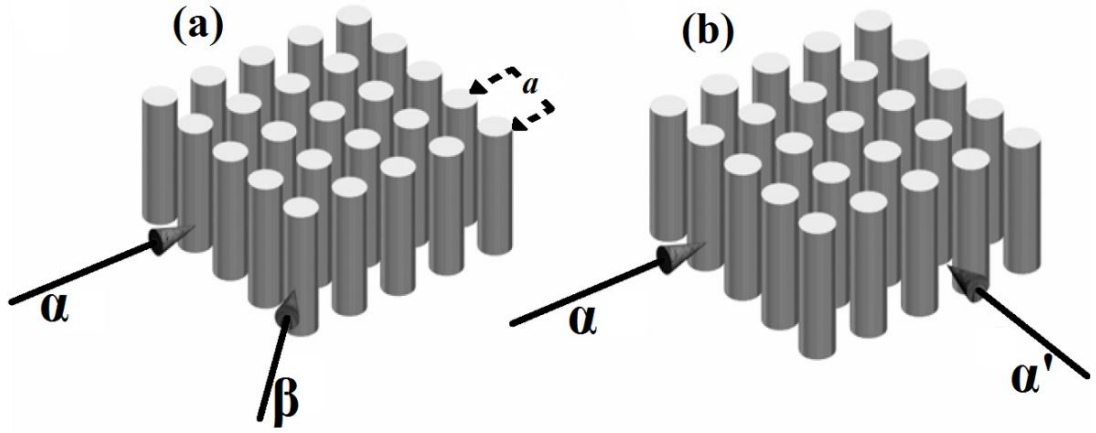
- FK’ların fabrikasyonu için “Holografik litografi” [5] gibi yeni ve pratik tekniklerin geliştirilmesi,
- İstenmeyen yapısal bozulmaların önlenmesi için kristal kalitesinin geliştirilme yolları [6],
- 3B FK yapılarında kontrol edilebilen yapısal bozulmaların tanımlanması ve böylece dalga kılavuzu ve rezonant kavite oluşturulması [7],
- Görünür frekans bölgesinde çalışabilen FK araştırması [8,9],
- FK’ların metalik malzemelerle fabrikasyonu [10,11],
- Yeni topolojide ve asimetrik yapıların tasarlanması [12,13].

## 2.4. Fotonik bant yapısı

Fotonik bant yapısı, EM dalga radyasyonunun FK içindeki yayılım özellikleri hakkında bize bilgi verir. Aslında, Fotonik bant yapısını “Mevcut enerji seviyelerinin yayılım yönüne bağlı çizimsel gösterimi” olarak düşünebiliriz.

Dalga vektörü  $k$  ve frekans arasındaki ilişki (“Dispersiyon ilişkisi” de denir) serbest fotonlar için  $\omega=c.k$  formülüyle ifade edilir. Bu eşitlikte,  $c$  hava ortamında yayılan ışık hızını gösterir. Eğer fotonlar homojen ve izotropik dielektrik bir ortamda ilerlerse, bu durumda, dispersiyon ilişkisi  $\omega=c.k/n$  şeklinde formülize edilir. Bu eşitlikte,  $n$  dielektrik malzemenin kırılma indisini gösterir. Formülden de anlaşılacağı üzere, frekans (dolayısıyla foton enerji seviyesi) dalga vektörü  $k$  ve kırılma indisi  $n$  arasındaki oran ile doğrusal bir bağıntıya sahiptir. İzotropik yapılarda, dispersiyon ilişkisinin yönsel bağımlılığı yoktur ve foton enerjisini elde etmek için sadece dalga vektörünün normu gereklidir. Fakat malzemenin kırılma indisi belirli yönler boyunca ayarlanırsa, bu durumda, foton enerjisinin yönsel bağımlılık özelliği ortaya çıkar (FK dispersiyon ilişkisi yönsel bağımlılık gösterir).

Kare örgülü 2B bir yapıyı ele alalım. Bu yapı, silindir şeklindeki dielektrik yapılardan oluşmuş olup komşu silindirler arası mesafe kristal örgü sabiti  $a$ 'ya eşittir (Şekil 2.2). Şekil 2.2(a)'da tanımlanan  $\alpha$  ve  $\beta$  yönlerinde farklı kırılma indis modülasyonu vardır ve bu yüzden de, dispersiyon ilişkisi farklı giriş açıları için farklılık göstermektedir. Fakat  $\alpha$  ve  $\alpha'$  doğrultuları boyunca periyodik olarak tekrarlanma aynı olduğundan dispersiyon ilişkileri de aynı özellikleri göstermektedir.



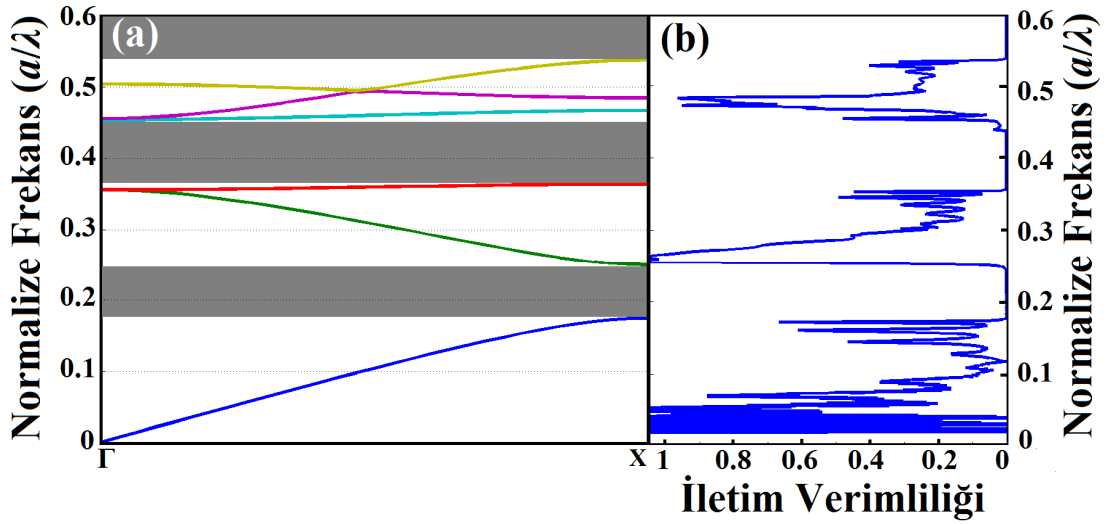
Şekil 2.2. 2B kare-örgülü silindirik FK çubuklar. (a) Farklı indis modülasyonuna sahip iki yön belirtilmiştir. Şekilde Kristal örgü sabiti  $a$  belirtilmiştir. (b) Kare örgülü yapıda belirtilen iki yön boyunca kırılma indis periyodikliği aynıdır.

FK'nın dispersiyon ilişkisini göstermek için katı hal fiziğinde [14,15] elektron enerji seviyelerini bulmak için kullanılan metodun benzeri takip edilecektir. Ters uzayda tanımlı herhangi bir dalga vektörünün birincil Brillouin bölgesinde ters örgülü temel vektörlerin doğrusal birleşimi olarak göstermek mümkündür. Bloch teorisi, bu dönüşümü ispatlamak için kullanılacaktır. Kare örgülü FK durumunda, gerçek uzay temel vektörler  $a_1=a.(1,0)$  ve  $a_2=a.(0,1)$ . Ters uzayda, temel vektörler  $b_1=2.\pi/a(1,0)$  ve  $b_2=2.\pi/a(0,1)$  haline dönüşür. İki uzayda tanımlı temel vektörler,  $a_i.b_j=2.\pi.\delta_{ij}$  koşulunu sağlarlar. Öyle ise, ters uzaydaki kristal örgüsü de kare örgüdür. Birincil Brillouin bölgesinin üç tane simetri noktası vardır:  $\Gamma$ , X, M. Bu noktalar, indirgenemez Brillouin bölgesinin köşelerini oluşturur.

#### 2.4.1. Fotonik yasaklı bant aralığı ve komple yasaklı bant aralığı.

Işık FK'ya girince, farklı dielektrik bölgelere geçiş esnasında saçılıma uğrar. Yapının periyodik oluşu nedeniyle, ışık saçılımı belirli yönde ve frekansta eş-evreli gerçekleşir. Dolayısıyla, bazı yönlerde belirli foton enerji seviyelerinin (Belirli frekans bölgelerinin) yayılımı periyodik yapı tarafından engellenir. Fotonik bant diyagramında hiçbir modu desteklemeyecek şekilde tanımlanan bölgelere "Fotonik yasaklı bant aralığı (FYB)" denir.

Sırasıyla Şekil 2.3(a)'da  $r=0.36a$  yarıçapında kare örgülü bir yapıya sahip dielektrik çubukların dispersiyon diyagramı ve Şekil 2.3(b)'de ise ilgili iletim karakteristiği gösterilmektedir. Şekil 2.3(a)'daki dispersiyon diyagramında bulunan taralı bölgeler, bu periyodik FK yapısı için tanımlanan Fotonik yasaklı bant aralıklarını ifade etmektedir. Taralı bölgelerde  $\Gamma$ -X doğrultusu boyunca foton iletimi gerçekleşmez. Bu durumu, Şekil 2.3(b)'deki iletim spektrumundan da kolaylıkla görebilmekteyiz (Taralı bölgelere karşılık gelen bölgelerde iletim yoktur). Fakat dalga modlarının oluştuğu diğer frekans aralıklarında (Şekil 2.3(a)'daki dispersiyon diyagramındaki eğriler, uyarılan dalga modlarını göstermektedir) belirli ölçüde yapı boyunca ışık iletimi gerçekleşmektedir. Bu durum ise, Şekil 2.3(b)'deki iletim verimliliği spektrumundan açıkça anlaşılmaktadır.



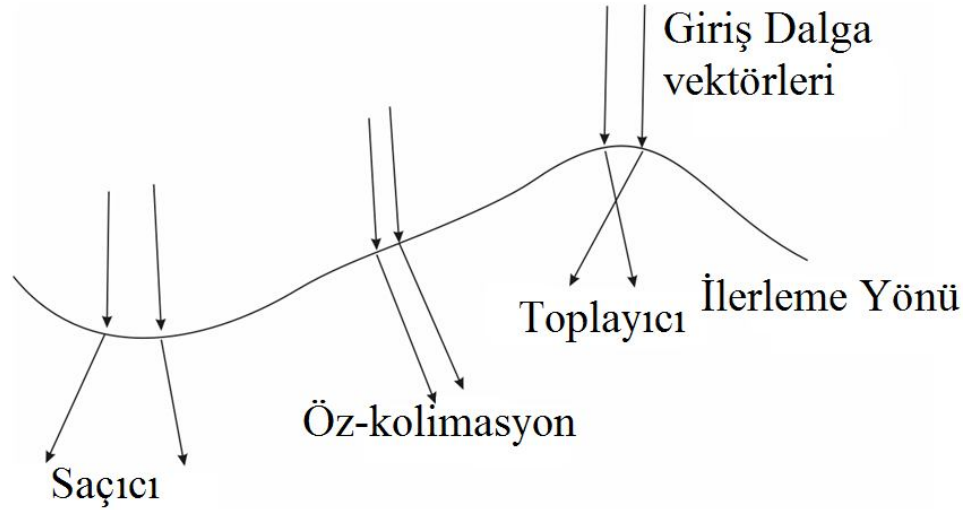
Şekil 2.3(a)  $r=0.36a$  yarıçaplı silindirik kare örgülü FK'ların dispersiyon diyagramı.

(b) Bu özellikteki FK yapısının iletim spektrumu.

FK periyodik yapılarda oluşturulan diğer önemli bir özellik de “Komple Fotonik yasaklı bant aralığı” fenomenidir: Bu frekans bölgesindeki foton-polarizasyonu ne olursa olsun, hiçbir şekilde yapı boyunca hiçbir yönde bir ilerlemesi olmaz. Bu bölgelerin tanımlanabildiği yapılar, polarizasyondan bağımsız dalga kılavuzu, interferometre vb. tasarımlarda kullanılabilir.

## 2.5. Fotonik Kristal içerisinde ışık: Sıra dışı Bant Dispersiyonu

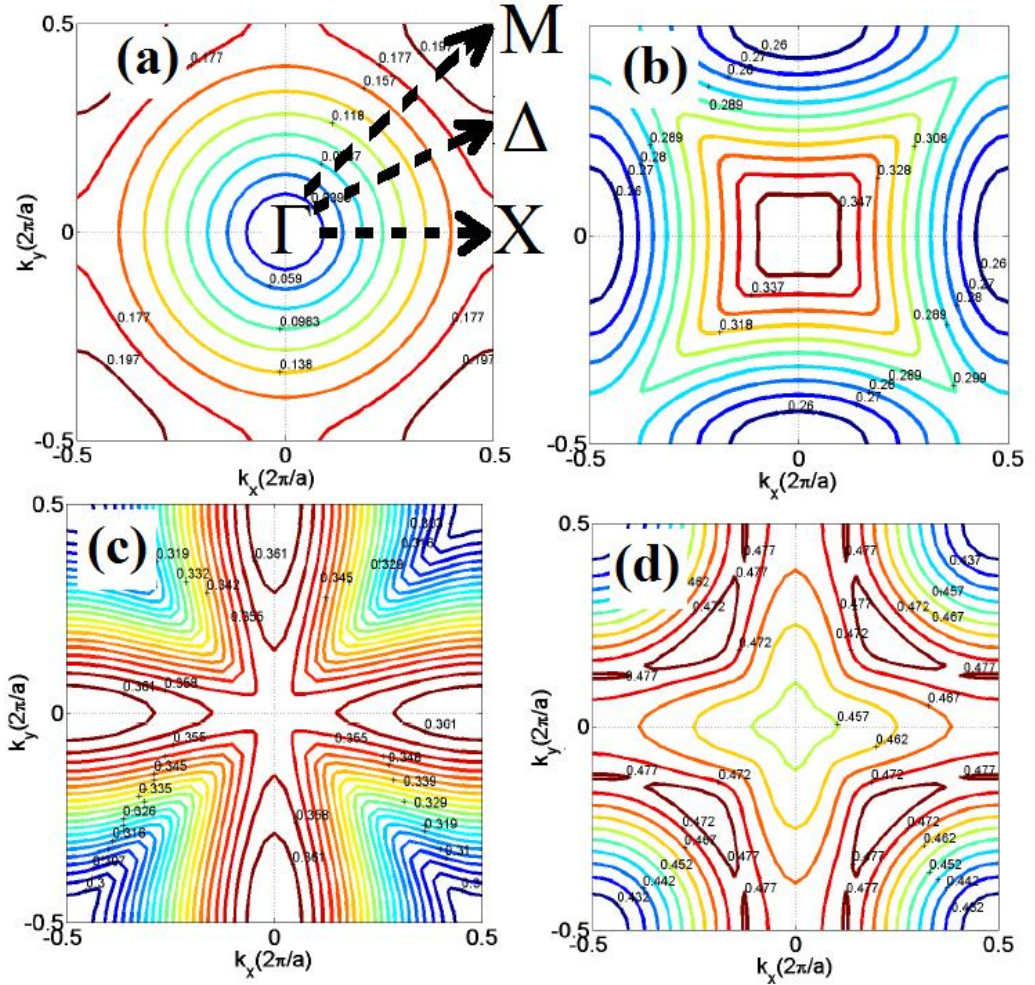
Işık, belirli bir  $\omega$  frekansında  $n_1$  kırılma indisine sahip bölgeden diğer kırılma indisli  $n_2$  bölgesine geçerken kırılmaya uğrar (Işığın yayılma yönü değişir). Dalga-vektör uzayında, dalga vektörünün paralel bileşenleri  $k_{\parallel}$  korunur [16]. Böylece, enerji ve frekans da korunmuş olur. Işık frekansı ile dalga vektörü arasındaki ilişki  $\omega=c.k/n$  olduğundan, Eş frekans yüzeyleri (EFY)  $\omega=c/n (k_x^2+k_y^2)^{1/2}$  şeklinde bir forma sahip olur. Ayrıca biliyoruz ki fotonun yayılım yönü,  $\vec{v}_g(x,y)=\nabla_k \omega(k)$  denkleminde bulunabilir. FK durumunda ise EFY eş-yönlü bir dağılıma sahip değildir. Bunun için ışığın FK yapısında ilerleme durumunu tahmin edebilmek için Fotonik bant yapısını kullanarak çıkarılan eş frekans eğrilerine (EFE) ihtiyacımız vardır. Şekil 2.4'ten anlaşılacağı üzere, sabit frekans değeri için EFE'lerin -farklı eğim tiplerine bağlı olarak- FK'lar öz-kolimasyon, saçıcı ve toplayıcı özellikler gösterebilir.



Şekil 2.4. Sabit frekansta farklı eğimlere sahip EFE'lere göre gelen fotonun davranışı. Belirli yön ve enerji aralıklarında, FK'lar öz-kolimasyon, saçıcı veya toplayıcı lens gibi davranabilir.

Şekil 2.5,  $r=0.36a$  yarıçaplı kare-örgülü FK silindirik çubukları için çıkarılan EFE'leri göstermektedir (Yapıda uyarılmış ilk dört bant için). EFE'ler üzerinde görülen değerler normalize olmuş frekans değerlerini ifade etmektedir. Şekil 2.5(a)'da da belirtildiği gibi, EFE'lere bakarak  $\Gamma$ -X  $\Gamma$ - $\Delta$  ve  $\Gamma$ -M yönlerindeki veya

herhangi bir yön için dalga-vektörü değerlerine ulaşabiliriz. Birinci bant için tanımlanmış EFE’de (Şekil 2.5(a)), EFE’ler dairesel bir şekle sahiptir. Bu demektir ki; periyodik yapımız, homojen bir ortam gibi davranmaktadır.  $a/\lambda=0.197$  normalize frekans değerinden sonra  $a/\lambda=0.260$  frekans değerine kadar (Şekil 2.5(b)), FYB sebebiyle EFY’de bir süreksizlik oluşmaktadır ve bu bölge içinde tanımlanmış bir dalga vektörü bulunmamaktadır. İkinci TM bandı için oluşturulan EFE’ler (Şekil 2.5(b)),  $\Gamma$ -X doğrultusu boyunca düz eğilime sahiptir. Bu nedenle –Şekil 2.4’te de gösterildiği gibi- FK yapısı, öz-kolimasyon özelliğini sağlamaktadır.



Şekil. 2.5.  $r=0.36a$  yarıçaplı FK birim hücresinin (a) Birinci, (b) İkinci, (c) Üçüncü ve (d) Dördüncü TM modları için oluşturulmuş EFE’ler. Belirli dalga vektör yönleri (a)’da gösterilmektedir.

## **2.6. Fotonik Kristallerin Optik Uygulamaları**

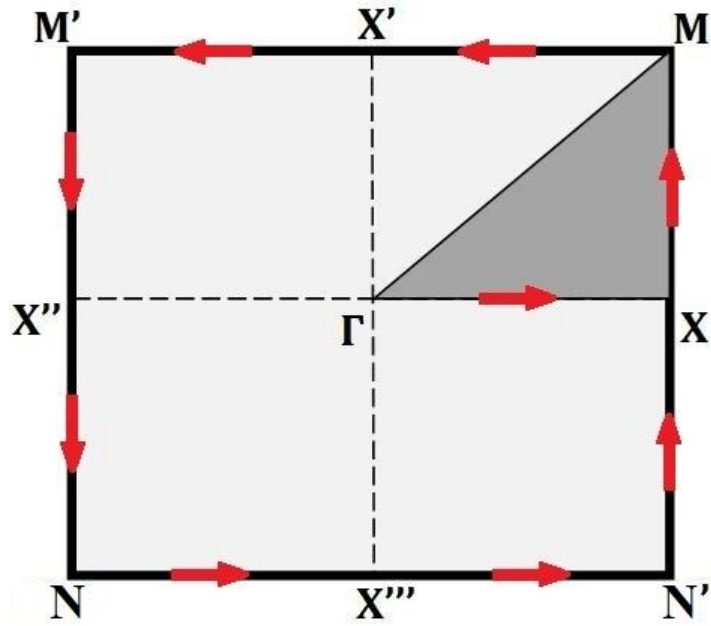
Çok sayıda Fotonik ve optik uygulama alanının olması, FK'ları araştırmacılar için vazgeçilmezlerden yapmıştır. FK'ların başlıca uygulama alanları şekildeki gibi sıralanabilir:

- Süper-kolimatörler ve süper-lensler [17],
- Süper-prizma etkisinin ve öz-kolimasyon etkilerinin kullanılmasıyla oluşturulmuş dalga boyu çoklayıcıları [18,19],
- Tüm-açı negatif kırılma özelliğini kullanarak tasarlanan optik lensler [20],
- Keskin köşeli ve T-yapılı dalga kılavuzları [21,22].



### 3. YAPISAL ASİMETRİNİN FOTONİK KRİSTALLERİN BANT YAPISINDAKİ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

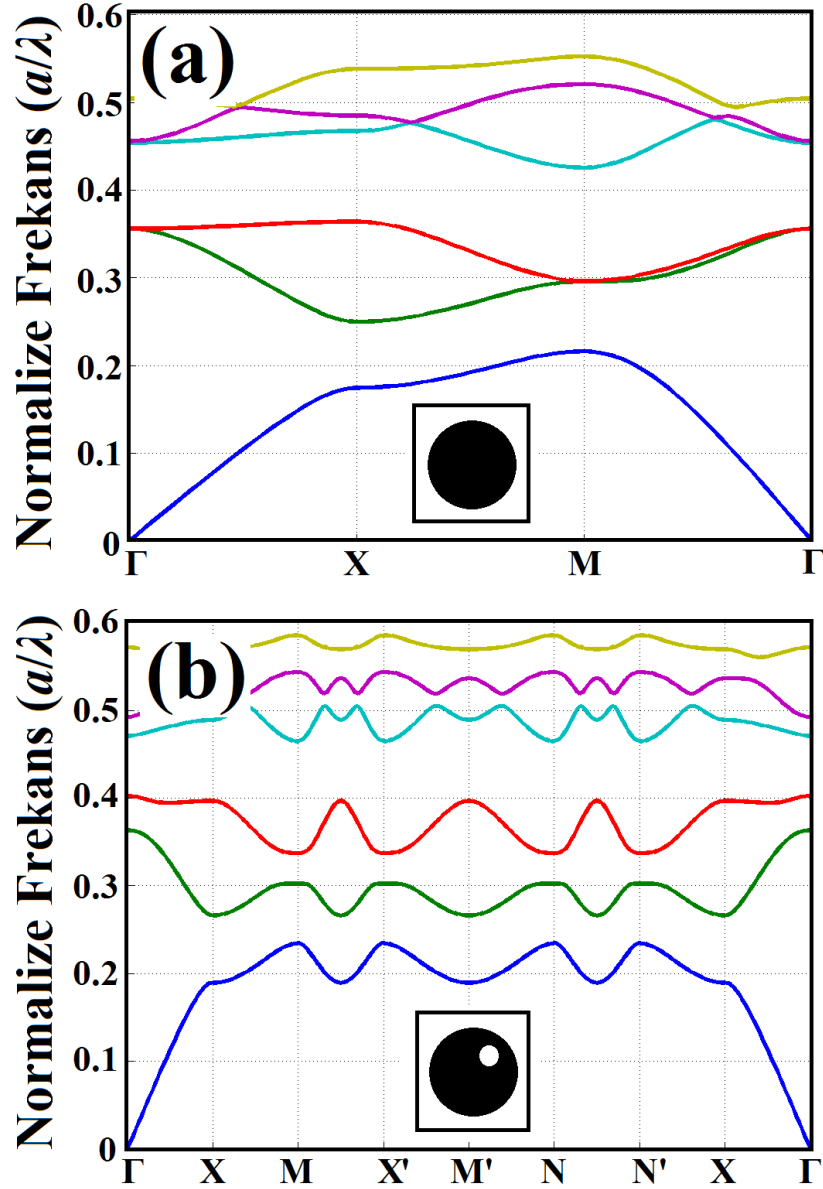
Kare örgülü 2B FK Fotonik bant yapısını elde etmek için, indirgenemez Brillouin bölgesi sınırlarında tanımlanmış dalga vektörü  $k$ 'ya karşılık gelen frekans  $\omega(k)$  çizilmelidir. Genel olarak yapının bant karakteristiğinin anlaşılması için bütün Brillouin bölgesi sınırlarının değerlendirilmesi gerekir (Şekil 2.6'da oklarla belirtilen Brillouin sınırları). Simetrik birim hücreli FK'larda -Her bir bandın maksimum ve minimum noktalarını bulmak için- indirgenemez Brillouin bölgesi boyunca ( $\Gamma$ -X-M üçgensel sınırı boyunca) incelenmesi yeterli olacaktır (Şekil 2.6'daki koyu renkli bölge).



Şekil 2.6. Ters uzayda tanımlanan FK örgüsü için tanımlanan Brillouin sınırı. Simetrik FK'lar için sadece  $\Gamma$ -X-M üçgensel sınırı boyunca inceleme yapmak yeterlidir (koyu renkli bölge).

FK birim hücrelerinin simetrisindeki değişimler -Dönme veya ayna simetrisindeki değişimler-, Fotonik bantların uç noktalarında kaymalara sebep olmaktadır. Bu etki de, dolayısıyla, FYB'nin frekans ekseninde kayması veya genişleyip daralmasına neden olmaktadır. Örnek olarak, kare örgülü  $C_{2v}$  simetrisine sahip bir FK ile tamamen simetrik - $C_{4v}$  simetrisine sahip- FK'nın dispersiyon diyagramları

incelendiğinde (Şekil 2.7) önemli değişimler göze çarpmaktadır [23]. Tamamen simetrik FK'dan düşük simetrlili FK'ya geçildiğinde dejenere noktalarında ( $\Gamma$ -X-M-X'-M'-N-N'-X- $\Gamma$ ) TM bantlarının maksimum ve minimum değerleri değişiklik arz etmektedir. Bu da, FYB aralığı tanımlamasında düşük simetrlili FK'ları incelediğimizde bütün Brillouin bölgesini tamamlamamız gerektiği sonucunu vermektedir.



Şekil 2.7 (a)  $r=0.36a$  yarıçaplı kare-örgülü simetrik ( $C_{4v}$ ) FK ile (b)  $R=0.36a$  yarıçaplı ve  $r=0.15a$  yarıçaplı delik bulunan düşük simetrlili ( $C_{2v}$ ) FK yapılarının dispersiyon diyagramları.

### 3.1. Asimetrik Fotonik Kristallerin farklı optiksel devre uygulamaları

Fotonun akışının kontrolü ve ilerleyen dalga modunun mertebesinin ayarlanması, özellikle, optik haberleşme ve tüm-optik sinyal işleme sistemlerinde önemli rol oynar. Genellikle, dar yapılı dalga kılavuzu sistemleri sadece temel modları desteklerken, yüksek mertebeli modları desteklemezler. Ancak, çok-modlu optik devre uygulamalarında yüksek mertebede moda sahip fotonlara ihtiyaç vardır. Bu durumda mod filtreleme, mod ayrışımı ve mod çevirme gibi mod kontrol tekniklerinin tüm çeşitlerinin gelişimi önemli hale gelir [24-26]. Literatürde şimdiye kadar çok-modlu dalga kılavuzlarında birçok mod çevirme teknikleri geliştirilmiştir [27-30]. Mod kontrol devrelerinin çalışma prensibi: çok-modlu dalga kılavuzu esasına dayanır ve mod-ayırıcı, mod-birleştirici ve çok kanallı konik dalga kılavuzunda oluşur. Bu devre elemanlarından birincisi olan mod-ayırıcıları, giriş modlarını ayırmak için mod-mertebe çeviricisinin giriş kısmında bulunur. Mod-birleştiricileri ise ayrılan modları birleştirmek için kullanılır. Konik dalga kılavuzları özel olarak seçilmiş dallardaki faz kaydırmaları sayesinde ilerleyen dalganın fazını geciktirirler ve çıkış kanalına ulaşıncaya kadar mod-mertebesinin çevrilmesini sağlarlar. Mod çevirmesiyle ilgili ikinci bir yaklaşım ise, eğik Bragg-ızgara yapılarının kullanılmasıdır [31]. Bu anti-simetrik yapılarda, fotonun yapı boyunca ilerlerken ızgara bölgesine ulaşması esnasında güçlü yansımalar geçirirler ve faz gecikmesi sayesinde yapının çıkış kanalında mod çevirme işlemini sağlar. Modun mertebesini çevirmek için başka bir seçenek de ekleme-bırakma filtreleme bloklarının kullanılmasıdır [32].

FK'lar, periyodik oluşu sayesinde belirli frekans bölgelerinde tanımlanan yasaklı bant aralıklarına sahiptir. Bu içsel özellik sayesinde ışık hareketi kontrolü kolaylıkla sağlanır [33]. FK'lar, genelde simetriktirler yani öteleme simetrisi ve dönme simetri korunmuştur. Fakat dönme veya öteleme simetrisinin bozulması, asimetrik FK kavramını ortaya çıkarır. FK'lara yapısal asimetri katılması, gelişmiş ve zengin spektral özelliklerin ortaya çıkmasını sağlar. FK'lar bu yönden önceden de çalışılmıştır [34-37]. Simetrik FK'larla yapı içerisine çizgisel olarak örgünün bozulmasıyla kompakt dalga kılavuzları tasarlamak mümkündür [33]. Ayrıca, FK

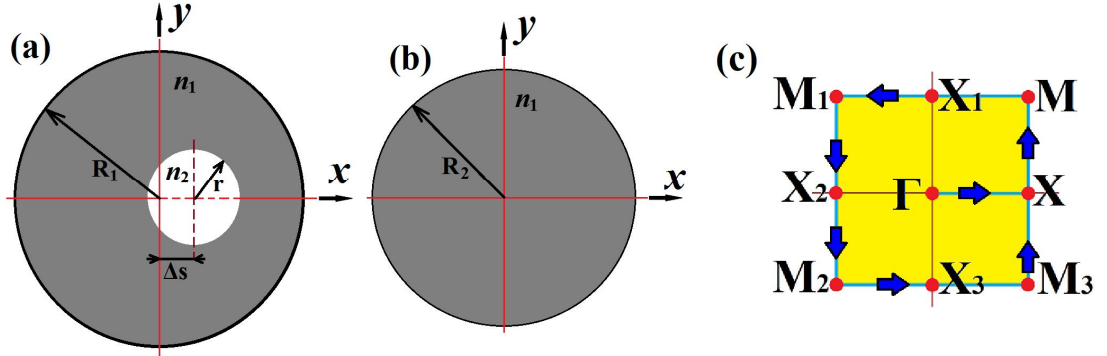
tabanlı dalga kılavuzu ile mod-mertebe çeviricileri tasarlayan çalışmalar vardır [38-40].

Mod-mertebe çevirme işlemi, modifiye delikli FK (MDFK) olarak adlandırılan asimetrik FK'lar ile ilk defa bu çalışmada gerçekleştirilmiştir. Dielektrik çubuklar içerisine delikler açılarak oluşturulan asimetrik FK'lar, daha önce de polarizasyondan bağımsız dalga kılavuzu tasarlamak ve komple yasaklı bant aralıkları tanımlamak için çalışılmıştır [23, 36]. Mod çeviricisi olarak önerilen FK yapısı, elektron demeti litografisi ve atomik katman kaplama gibi modern mikro-fabrikasyon teknolojileriyle üretimi gerçekleştirilebilir [41].

Bu kısımda öncelikle, MDFK ve silindirik FK konfigürasyonları kullanılarak oluşturulan heteroyapıdaki mod çeviricisinin tasarımı anlatılmıştır. Daha sonra ise iletim spektrumu gibi zaman düzlemindeki hesaplamalar ve yüksek mertebeli modların oluşturulması hakkında diğer bilgiler sunulmuştur.

### **3.2. Asimetrik Fotonik Kristal Mod Çeviricisi Tasarımı ve Spektral Analizi**

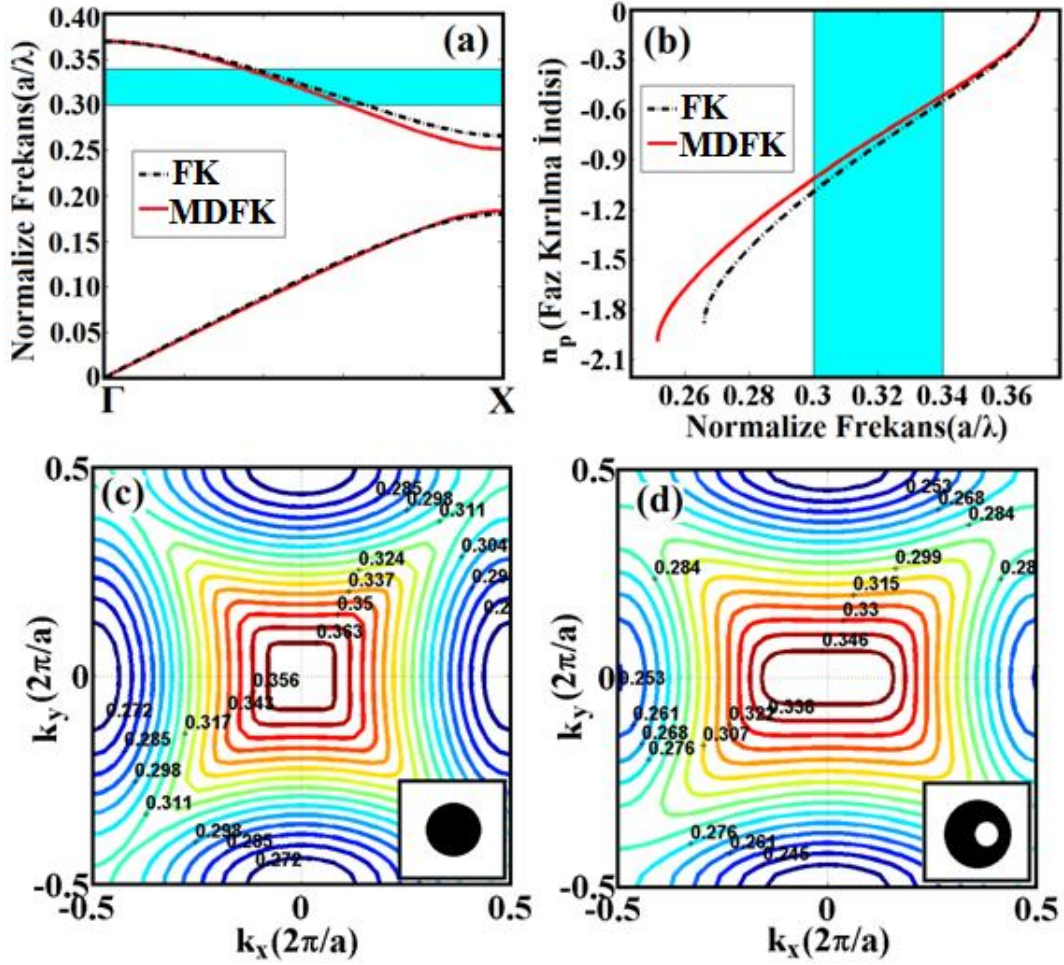
Bu kısımda, optik mod-mertebe çeviricisi oluşturmak için farklı türdeki FK'lardan oluşan heteroyapı sunulmuştur. Önerilen tasarım, kare-örgüye olup sahip silindirik dielektrik FK çubuklar ve MDFK'lar olmak üzere iki bölümden oluşmaktadır. Asimetrik ve simetrik FK'ların şematik gösterimleri geometrik parametrelerle birlikte sırasıyla Şekil 3.1(a) ve 3.1(b)'de sunulmuştur. MDFK delik yarıçapı  $r$  ile gösterilmiştir ve merkezden  $x$ -yönünde kaydırılmıştır. Bu kaydırma parametresi Şekil 3.1(a)'da görüldüğü gibi  $\Delta s$  ile gösterilmiştir. MDFK dielektrik çubuk kısmının yarıçapı ve simetrik Fotonik kristalin yarıçapı ise sırasıyla  $R_1$  ve  $R_2$  olarak simgelenmiştir. Birim hücrenin diğer kısımları ve asimetrik FK'nın iç deliği havadır, yani  $n_2 = 1.0$ 'dir. Dielektrik Fotonik kristaller silikondan oluşur ve kırılma indisi  $n_1 = 3.46$ 'dır. MDFK birim hücrelerinde, içteki deliğin konumu kaydırılarak örgünün dönme ve ayna simetrisi kırılmıştır. Bu sayede, 3.1. Bölümde de belirtildiği gibi, tasarlanan kare-örgülü yapının Fotonik bant hesaplamalarında Şekil 3.1(c)'de gösterilen Brillouin bölgesinin tüm kenarları hesaba katılmalıdır.



Şekil 3.1. MDFK ve silindirik FK'ların birim hücrelerinin geometrik tasarımları (a) ve (b)'de gösterilmiştir. (c) Asimetrik FK'lar için ilgili Brillouin bölgesinin gösterimi.

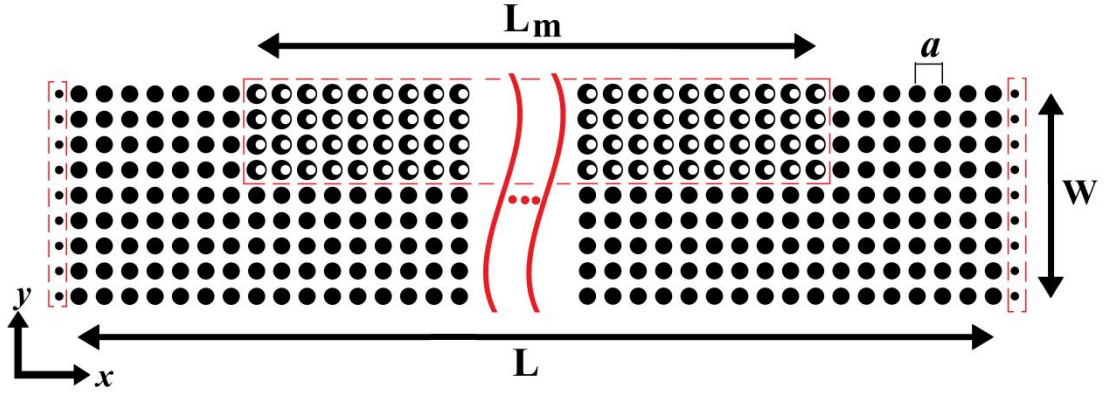
Mod-mertebe çevirici yapılar, fotonik uygulamalarda önemli yer tutar. Düşük güç kayıpları ve yüksek mod çevirme verimliliği, mod çevirici cihazların performans analizi için gerekli koşullardır. Bu yüzden, dalganın yapı boyunca ilerlemesinin düşük kayıpla olması için çalışma frekansı, FK'ların öz-kolimasyon bölgesine -gelen ışığın yapı içerisinde neredeyse hiç kırınım olmadan ilerlediği frekans aralığı- göre ayarlanmalıdır. Ayrıca, öz-kolimasyon özelliği çıkış kanalda pürüzsüz ve düz dalga faz önyüzleri elde etmeyi de sağlar. Bu özellik, önerilen konfigürasyonun yüksek iletim verimliliği ile mod çevirme işlemini sağlaması için göz önünde bulundurulmuştur. Bu yüzden, yapısal parametreler her iki fotonik kristalin öz-kolimasyon frekans bölgeleri maksimum şekilde üst üste gelecek şekilde ayarlanmıştır. MDFK birim hücresinin bütün yapısal parametreleri frekans bölgesi üzerinde etkilidir. Tanımlanan geometrik parametreler, öz-kolimasyon bölgesinde geniş bant-genişliği elde etmek için optimize edilmelidir. Bu durumda ilk olarak kaydırma değeri,  $\Delta s$ ,  $0.15a$  olarak ayarlanmıştır. Daha sonra iç deliğin yarıçapı,  $r$ ,  $0.19a$  olarak seçilmiş ve çubuğun yarıçapı ise  $R_1=0.40a$  olarak optimize edilmiştir. Sonra ise frekans bölgelerinin maksimum şekilde çakışmasını sağlamak için normal FK'nın yarıçapı  $R_2=0.34a$  olarak seçilmiştir. Tasarlanan asimetrik ve simetrik FK yapısının dispersiyon bağıntılarını incelemek için PWE yöntemi kullanılmıştır [42]. Her iki FK çeşidi için de ilgili bantlar  $\Gamma$ -X yönü boyunca hesaplanmıştır. Elde edilen dispersiyon diyagramları aynı grafik üzerinde Şekil 3.2(a)'da sunulmuştur.

Dispersiyon grafiğindeki modlar, enine manyetik (TM) modlardır, yani elektriksel alan ışığın yayılma düzlemine diktir. Şekil 3.2(a)'da, ikinci bantların boyanmış kısmında dalga-vektörüne göre her iki FK için de belirli frekans aralığında doğrusal bir davranış -hemen hemen sabit bir eğim- gözlemlenir [43]. Bu lineer bölge  $a/\lambda=(0.30-0.34)$  frekans aralığını kapsar. Bant diyagramlarından faydalanarak, MDFK ve simetrik FK için normalize frekansa göre ilgili faz indisleri Şekil 3.2(b)'deki gibi elde edilmiştir. Bu faz indisleri  $n_p=-k/\omega$  formülüne göre hesaplanmıştır ve burada  $k=2\pi/\lambda$ 'dir. Ayrıca verilen ifadede  $\omega$  ve  $k$  parametreleri sırasıyla açısal frekansı ve dalga vektörünü göstermektedir. İlgili ikinci TM bantların artan hareket sabitine göre azalan frekans davranışı göstermesi, iki FK çeşidi için de faz kırılma indislerinin negatif olmasına sebep olmuştur [44]. Şekil 3.2(b)'deki grafiklerden  $n_p$  değerlerinin iki FK türü için aynı olmadığı görülür. Bu farklılık, önerilen heteroyapı boyunca ilerleyen ışığın faz gecikmesine maruz kalmasına neden olur. Silindirik FK ve MDFK'nın  $a/\lambda=0.31$  normalize frekansında hesaplanan  $n_p$  değerleri sırasıyla -0.9444 ve -0.8810'dur. Bu durumda, faz kırılma indis farkı,  $\Delta n_p=0.0634$  olarak bulunmuştur. Bu faz indis farkı ışığın farklı faz hızlarıyla hareket etmesini sağlar ve heteroyapı içerisinde farklı optik yol uzunlukları ortaya çıkar. Böylece yapı sonunda istenilen faz farkı oluşmuş olur. Bu karakteristik, önerilen yapının mod-mertebe çevirme amacı için kullanılabileceğini gösterir. Bunlara ek olarak, simetrik FK'nın ve MDFK'nın öz-kolimasyon özelliklerini incelemek için ikinci TM bantlarının eş-frekans eğrileri sırasıyla Şekil 3.2(c) ve 3.2(d)'de verilmiştir. Gelen dalganın hareket doğrultusu eş-frekans eğrilerine diktir ve enerji akışı grup hızı ile aynı yönde gerçekleşir [33]. İkinci bantların eş-frekans eğrileri Şekil 3.2(c) ve 3.2(d)'de gösterildiği gibi düz-kare şekline sahiptir ve bu durum öz-kolimasyon özelliğinin göstergesidir [45]. Ortak bir frekans bölgesinde her iki FK konfigürasyonu için de düz eğriler gözlemlenir.



Şekil 3.2. (a) MDFK ve normal FK in dispersiyon eğrileri ve (b) faz indis dağılımları. İki grafikte de eğriler asimetric FK için kırmızı düz çizgi ile gösterilirken, simetric FK için siyah kesikli çizgiyle gösterilmiştir. Çalışma frekansı aralığı turkuaz rengine boyanmıştır. Normal FK ve MDFK'nın ikinci bant eş-frekans eğrileri sırasıya (c) ve (d)'de gösterilmiştir.

Daha önce belirtilen iki FK çeşidi kare örgülü düzeninde Şekil 3.3'deki gibi birleştirilmiştir. Faz indisi farkı kullanılarak öz-kolimasyon bölgesinde (geniş frekans aralığında  $a/\lambda=(0.30-0.34)$ ) mod çeviricisi oluşturulmuştur. Komşu çubuklar arası mesafe  $a$  olarak ayarlanmıştır. Burada  $a$  örgü sabitidir ve haberleşme dalga boyunda çalışmak için 480 nm olarak seçilmiştir. Tasarlanan yapının uzunluğu ( $L$ ) ve genişliği ( $W$ ) sırasıyla  $39a$  (18.72  $\mu\text{m}$ ) ve  $8a$  (3.84  $\mu\text{m}$ )'ya eşittir.



Şekil 3.3. FK heteroyapıya sahip olan mod-mertebe çeviricisinin şematik gösterimi.

Yapı boyunca ilerleyen dalganın faz indis farkının yardımıyla faz gecikmesi sağlamak için, MDFK bölümü konfigürasyona ilave edilmiştir.  $\pi$  faz kayması elde etmek için de asimetrik FK bölgesinin gerekli olan uzunluğu ( $L_m$ ),  $\Delta\phi = \Delta n_p k(\lambda) L_m$  denklemi kullanılarak hesaplanır. Burada  $\Delta\phi$  ve  $\Delta n_p$ , sırasıyla faz farkını ve simetrik ve asimetrik FK arasındaki faz kırılma indisi farkını göstermektedir. Verilen ifadeye göre, asimetrik FK bölgesinin yapısal uzunluğu  $L_m$  çalışma frekansında ( $a/\lambda=0.31$ ) yaklaşık olarak  $25.44a$  olarak hesaplanmıştır. Bu yüzden, bu bölgenin uzunluğu  $25a$  ( $12 \mu\text{m}$ ) olarak ayarlanmıştır ve bu asimetrik FK bölge yapının üst kısmına yerleştirilmiştir. Yapının diğer kısımları ise FK dielektrik çubuklardan oluşmaktadır. Ayrıca, hava-FK ara yüzeyindeki geri yansımaların etkisini azaltmak için, FK dalga kılavuzunun ön ve arka yüzüne  $0.17a$  yarıçapında dielektrik çubuklar konulmuştur.

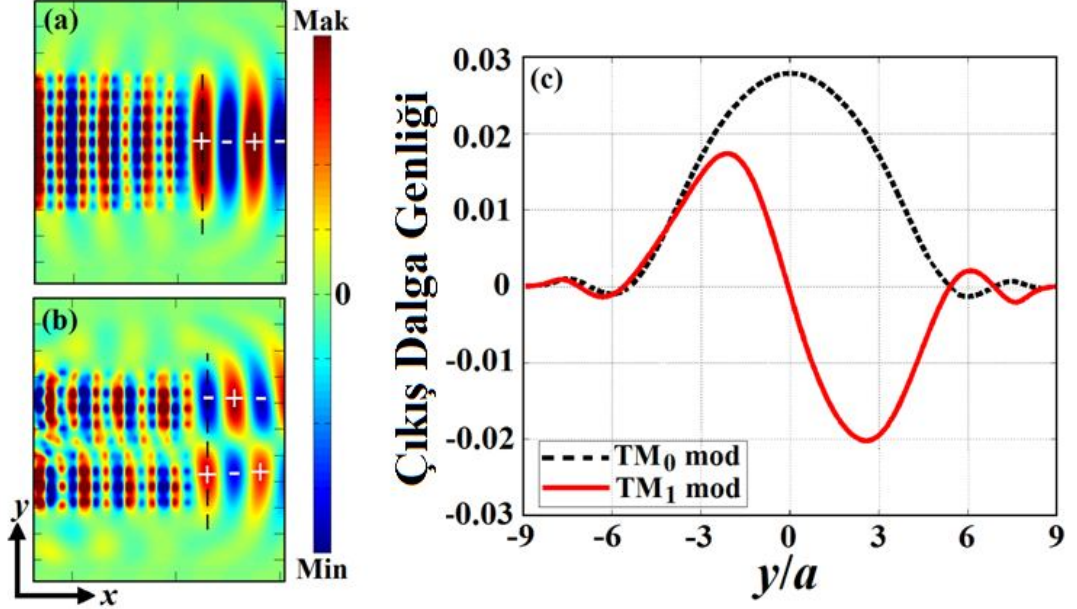
### 3.3. Heteroyapının Zaman Düzlemindeki Analizi

Mod çevirme işlemi ve tasarlanan yapının iletim verimliliğini göstermek için iki boyutlu FDTD analizi gerçekleştirilmiştir [46]. Zaman düzlemindeki hesaplamalarda, hesaplama alanının sınırlarındaki yansımaları yok etmek için konfigürasyonun etrafına PML katmanlar konulmuştur [47]. Tasarlanan yapı, merkez frekansı  $n_p$  grafiğine göre seçilen ve  $a/\lambda=0.31$  olan temel TM mod ( $\text{TM}_0$ ) ile uyarılmıştır. Gelen dalga, Gauss genlik dağılımına sahiptir.



Kare örgü dağılımına sahip FK yapının mod-mertebe çevirme bölgesi MDFK kullanımı ile oluşturulmuştur. Yapıya yerleştirilen asimetric FK bölgenin mod çevirme performansı üzerindeki etkisini incelemek için, normal FK ve tasarlanan mod-mertebe çeviricisinin FDTD analizleri yapılmıştır. Elektrik alanların anlık görüntüleri Şekil 3.4’de sunulmuştur. Şekil 3.4(a)’daki yapı sadece simetrik FK’den oluşmaktadır ve yapının son kısmı için elektrik alan profili Şekil 3.4(a)’da verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi ilerleyen dalga, yapı sonuna ulaştığında hala temel  $TM_0$  mod profiline sahiptir. Diğer yandan, Şekil 3.3’de verilen heteroyapı kullanıldığında ise Şekil 3.4(b)’deki alan profili elde edilir ve şekilden de fark edildiği gibi oldukça başarılı bir mod-mertebe çevirme işlemi gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.4(b)’deki mod çeviricisi içinde hareket eden ışık dalgası MDFK bölgesiyle karşılaştığında birbirine paralel iki ayrı kola ayrılır. Simetrik ve asimetric FK’lar farklı  $n_p$  değerlerine sahip olduğu için ayrılan ışıklar farklı faz hızları ile hareket ederler. Yapının üst kısmında ilerleyen dalga alt kısmında ilerleyenden daha hızlı hareket eder ve ışığın iki ayrı kolu arasında faz farkı oluşur. Yukarıdaki faz farkı denkleminde anlaşılacağı üzere, iki parça arasındaki faz değişim değeri asimetric FK’den oluşan kısmın uzunluğuna doğrudan bağlıdır. Eğer bu kısmın uzunluğu değiştirilse, ortaya çıkan faz farkı da değişmektedir. Uzunluk optimal boyuta  $L_m = 25a$  ayarlandığında, TM modun ayrılan kolları arasında  $\pi$  faz kayması oluşur. Ayrıca, mod çevirme işleminin başarılı bir şekilde gerçekleştiğini iddia etmek için sadece  $\pi$  faz kayması yeterli değildir. Hem genlik hem de faz farkı birlikte dikkate alınmalıdır. Genlik değişiminin (güç dağılımı) ortaya çıkarılması için, çevrilen mod ideal profil ile karşılaştırılmalıdır. Yüksek mertebeli modun iki tepe noktası anti-simetrik olmalıdır. Beklenen yüksek mertebeli modun genlik değişimi Şekil 3.4(c)’deki gibidir. Şekil 3.4(b)’de gösterilen elektrik alan dağılımı,  $TM_1$  moduna sahip ışığın ilerlemesini göstermektedir. Elde edilen sonuçlar, tasarlanan konfigürasyonun mod-mertebe çeviricisi olarak kullanılabilmesi fikrini destekler. Şekil 3.4(a) ve 3.4(b)’de kesikli çizgilerle gösterildiği gibi  $y$ -düzlemi boyunca kesit alındığında, ilgili TM elektrik alan profilleri Şekil 3.4(c)’deki gibi olur. Siyah kesikli çizgi genlik profili çift simetriye sahip  $TM_0$  modu gösterirken, kırmızı düz çizgi ise genlik profili tek simetriye sahip  $TM_1$  modu göstermektedir. Şekil 3.4’ten görüldüğü gibi, normal FK

yapı içerisine MDFK bölgesinin yerleştirilmesiyle temel çift mod ( $TM_0$ ),  $TM_1$  moda başarılı bir şekilde çevrilmiştir.

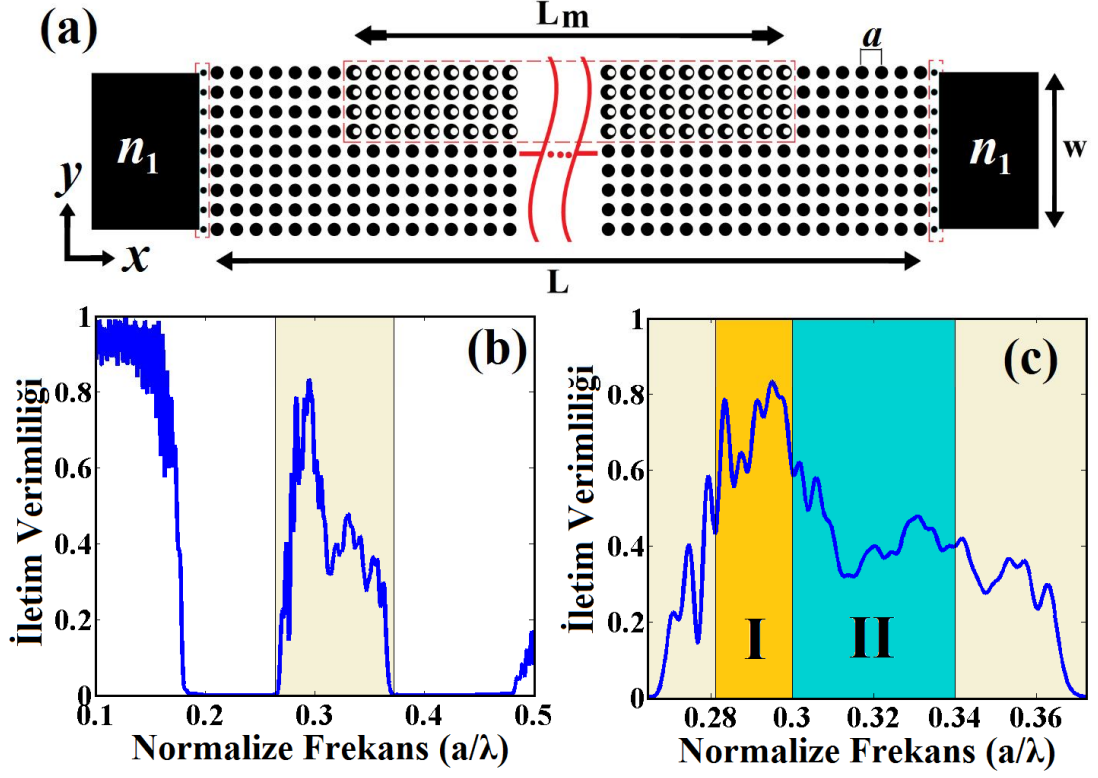


Şekil 3.4. (a) FK yapının ve (b) yapı yukarisına asimetrik FK'lar eklenen mod çeviricisinin TM alan dağılımlarını göstermek için zaman düzlemindeki anlık görüntüleri sunulmuştur. Kırmızı (“+” ile gösterilen) ve mavi renkler (“-” ile gösterilen) maksimum ve minimum elektrik alan değerlerini göstermektedir. Kesitler kesikli çizgi ile gösterilen yerlerden alınmıştır ve  $TM_0$  ve  $TM_1$  modları için elde edilen çıkış dalganın elektriksel alan genlik profilleri (c)’deki gibi çizdirilmiştir.

FK’lardan oluşan bileşenlerin literatürdeki optik bileşenlerle yarışabilmesi için kayıpların etkisi dikkate alınmalıdır. Tasarımdaki kayıplar, yapı içerisindeki yayılım kayıpları ve dalga kılavuzu ve FK bölgesi ara yüzündeki bağlantı kayıplarıdır. Bu çalışmada, iki boyutlu FK’lar dikkate alındığından  $z$ -ekseni boyunca oluşan kayıplar ihmal edilmiştir. Giriş/çıkış dielektrik dalga kılavuzları ve FK dalga kılavuzu ara yüz bağlantı kayıpları çok kritiktir. Sadece bir katmandan oluşan ara yüzey tanımlamak yerine daha iyi bir bağlantı stratejileriyle bağlantı kayıpları azaltılabilir. Tasarlanan yapıda ışığın FK dalga kılavuzuna bağlantısı için kullanılan dielektrik dalga kılavuzu Şekil 3.5(a)’daki gibidir. Ayrıca, eklenen dielektrik dalga kılavuzu ve FK dalga

kılavuzu ara yüzeyindeki empedans uyumsuzluğundan kaynaklanan geri yansımalar da ışığın bağlantı verimliliğini azaltmaktadır. Bu nedenle, geri yansımaları azaltmak için küçük yarıçapa sahip dielektrik çubuklar kullanılmıştır.  $0.34a$  ve  $0.17a$  yarıçapındaki çubuklar arasındaki boşluk yüksek iletim verimliliği elde etmek için  $0.09a$  olarak optimize edilmiş ve dalga kılavuzunun genişliği,  $w$ , ise  $8a$  olarak seçilmiştir. Yapının iletim spektrumunu analiz etmek için, çıkış dalga kılavuzuna detektör yerleştirilmiştir. Tasarlanan yapı geniş frekans aralığına sahip kaynak ile uyarıldığında, normalize iletim verimliliği Şekil 3.5(b)'deki gibi hesaplanmıştır. Düşük frekanslarda ( $a/\lambda=0.18$  altında), iletim spektrumunda güçlü modülasyonlar görülür. Ayrıca iletim spektrumunda gözlemlenen kayıplar, FK-dalga kılavuzu ara yüzeyindeki kayıplardan ve mod çevirici bölgede  $y$ -yönü boyunca sızan modların varlığından kaynaklanmaktadır. Buna ek olarak, asimetric ve simetric FK arasındaki etkin kırılma indisi uyumsuzluğundan dolayı meydana gelen yansımalar da iletim verimliliğini düşürmektedir. Ayrıca ara bölgedeki FK'nın iletim performansını tahmin etmek için çalışma frekanslarında iki dalga kılavuzu çeşidinin de alan profilleri hesaba katılmalıdır. Şekil 3.5(b)'deki normalize iletim verimliliği grafiğinde iletimin sıfır olduğu frekanslar, FK yapının yasaklı bant bölgesine karşılık gelmektedir. Yasaklı bant frekans aralığında FK'lar ayna gibi davranır: Gelen ışık dalgasının tamamı FK yapının ön yüzünden geri yansıtılır ve ışık tasarlanan FK yapı boyunca ilerleyemez. Bant boşluğu bölgeleri arasındaki izin verilen frekans aralığı Şekil 3.5(b)'de renklendirilmiştir ve bu kısım mod çevirme işleminin gerçekleştiği çalışma frekansı alanını da kapsamaktadır. Bu aralıktaki iletim spektrumunu daha ayrıntılı göstermek için Şekil 3.5(c)'de bölgenin yakınlaştırılmış hali verilmiştir. Odaklama ve öz-kolimasyon bölgeleri iki farklı renge boyanmıştır ve sırasıyla I ve II olarak gösterilmiştir. İki frekans bölgesinde de MDFK öz-kolimasyon özelliği gösterirken, normal FK ilk bölgede odaklama, ikinci bölgede ise öz-kolimasyon özelliği gösterir. Birinci (I) ve ikinci (II) bölgelerin frekansları sırasıyla  $a/\lambda=(0.281-0.300)$  ve  $a/\lambda=(0.300 - 0.340)$  aralıklarına karşılık gelmektedir. Bu frekans bölgeleri Şekil 3.2'deki  $n_p$  eğrilerine ve Şekil 3.2'deki eş-frekans eğrilerine göre seçilmiştir. Normalize iletim verimliliğinin odaklama bölgesindeki en iyi değeri yaklaşık olarak  $0.83$  (%83)'tür ve ikinci bölgedeki en iyi iletim değerinden (yaklaşık %58) daha

yüksektir. Çünkü odaklama bölgesinde  $y$ -yönü boyunca yayılan modlar yoktur ve bu da FK-dalga kılavuzu bağlantısını güçlendirir.



Şekil 3.5. (a) Tasarlanan mod çeviricisinin giriş ve çıkış dalga kılavuzları ile şematik gösterimi. (b) Normalize frekansa karşılık normalize iletim verimliliği. İletim verimliliğinin yüksek olduğu frekans aralığı boyanmıştır. (c) Boyanan kısmın daha yakından gösterimi. İlk bölge odaklama bölgesini gösterirken, ikinci bölge ise öz-kolimasyon bölgesini göstermektedir.

Tasarlanan yapının mod-mertebe çevirme performansını incelemek için Çizelge 3.1 hazırlanmıştır. Bu çizelgede belirli frekans değerleri için iletim verimliliği, çıkıştaki faz kaymaları ve  $y$ -yönü boyunca alınan kesitteki genlik bilgisinin bir referans duruma göre karşılaştırması sunulmuştur. Sunulan FK yapının mod çevirme performansı sadece iletim verimliliğine bağlı değildir. Aynı zamanda çıkıştaki dalganın üst ve alt kolları arasındaki faz farkı miktarına da bağlıdır. Çizelge 3.1’de görüldüğü gibi, en yüksek iletim değerleri  $a/\lambda=(0.290-0.297)$  frekans aralığında

gözlemlenirken,  $\pi$  faz kaymasına yakın değerler  $a/\lambda=(0.290-0.315)$  frekans aralığında ölçülmüştür. Elektrik alanın genlik profili açısından en iyi durumu (çalışma frekansında  $a/\lambda=0.310$ ) referans olarak alınmıştır ve diğer durumlar bu referans ile karşılaştırılmıştır. Üretilen modun genlik dağılımının doğruluğunu ölçmek için aşağıdaki denklem tanımlanmıştır:

$$\frac{\int (|E_z(y)| - |E_{z,ref}(y)|) dy}{\int |E_{z,ref}(y)| dy}$$

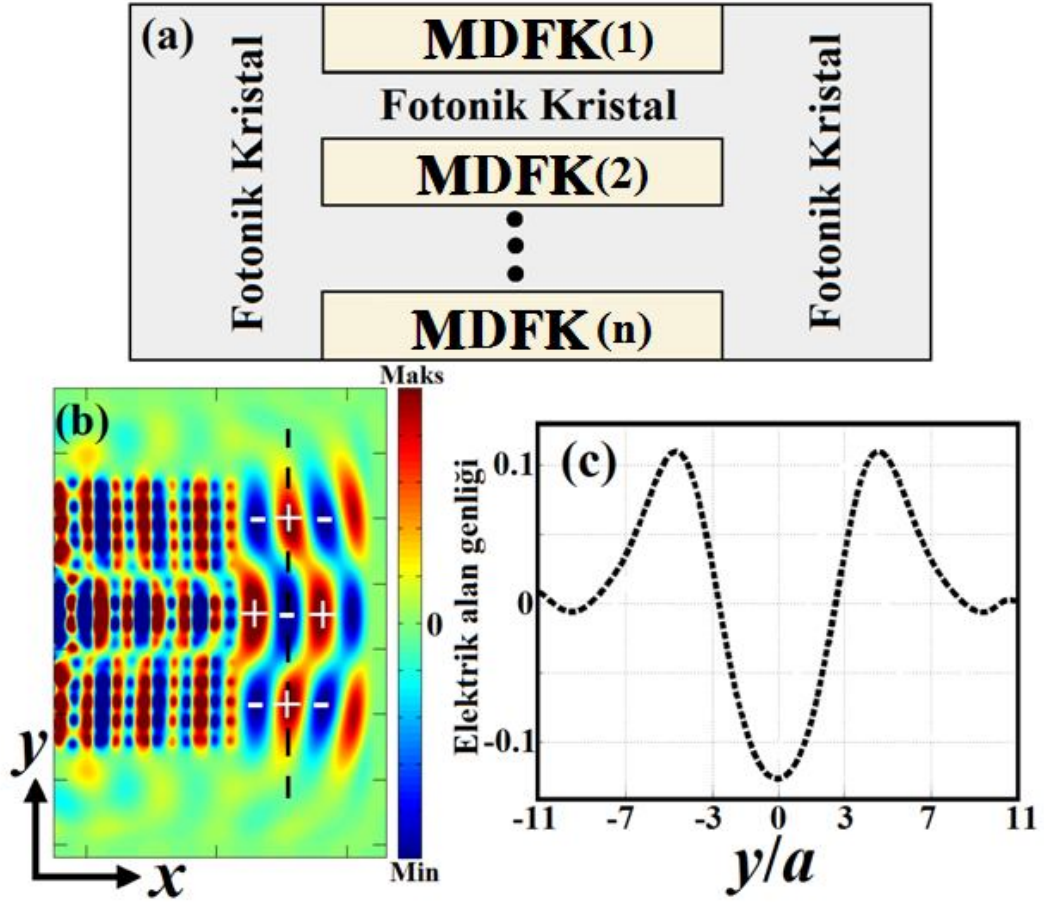
Burada,  $E_z(y)$  ve  $E_{z,ref}(y)$  üretilen ve referans ışık dalgasının  $y$ -yönündeki elektriksel alan genliklerini göstermektedir. Verilen ifadeden çıkarılan değerler Çizelge 3. 1’de listelenmiştir. İdeal durumdan uzaklaştıkça, genlik karşılaştırma değerleri artar. Bu da çevrilen modun genlik profilinin ideal durumdan daha fazla sapacağı anlamına gelir. İdeal mod çevirme işleminin hem faz kayması koşulunu hem de anti-simetrik alan formunu sağlaması gerekir. Bunun yanında, mod çevirme işlemi gerçekleştirilirken kayıpların da minimize edilmesi gerekmektedir.

Çizelge 3.1. Çalışma frekansı bölgesinde iletim verimliliği, faz kayması ve genlik karşılaştırması açısından mod çevirme performansı

Frekans ( $a/\lambda$ )	İletim (%)	Faz Kayması $\Delta\phi$ (rad)	Genlik Karşılaştırması
0.280	58.44	$0.637\pi$	0.3813
0.285	60.44	$0.719\pi$	0.3797
0.290	73.93	$0.881\pi$	0.3539
0.295	83.30	$0.926\pi$	0.3283
0.297	79.00	$1.000\pi$	0.3026
0.300	59.44	$0.971\pi$	0.2744

0.305	53.98	$0.913\pi$	0.1879
0.310	43.48	$0.893\pi$	0
0.315	31.85	$0.828\pi$	0.2734

Zaman düzlemindeki simülasyon sonuçları, tasarlanan FK yapısı ile temel  $TM_0$  modundan  $TM_1$  modunun başarılı bir şekilde elde edilebileceğini göstermiştir. Ayrıca, benzer yapı kullanılmasıyla  $TM_0$  modun daha yüksek mertebeli TM modlara çevrilmesi de mümkündür. Yüksek mertebeli modlar, Şekil 3.6(a)'daki sembolik çizimde görüldüğü gibi, asimetrik ve simetrik FK bloklarının yapı içerisinde farklı pozisyonlarda yerleştirilmesi çok-modlu çıkış dalgası oluşturulmasını sağlamaktadır. Tasarlanan konfigürasyonun çıkışında  $TM_2$  mod elde etmek için birinci ve ikinci asimetrik FK blokları kullanılabilir. Bu seçeneğin dışında FK yapının orta kısmına sadece bir tane asimetrik FK bloğu yerleştirerek de bunu başarmak mümkündür. Şekil 3.6(b)'de alan dağılımı verilen yapı böyle oluşturulmuştur ve sadece yapının son kısmındaki elektrik alan profili gösterilmiştir. Burada kullanılan kaynağın merkez frekansı diğerinde olduğu gibi ideal tek-modlu çıkış dalgasına en yakın bir sonuç veren  $a/\lambda=0.31$  olarak seçilmiştir. Yapının çıkışında ilerleyen ışık  $TM_2$  mod dağılımına sahiptir. Şekil 3.6(b)'de kesikli çizgiyle gösterilen konumdan kesit alındığında elektrik alan genlik profili Şekil 3.6(c)'deki gibi çizdirilir.



Şekil 3.6. (a) Mod çevirici yapının sembolik gösterimi. (b) Yapının orta kısmı MDFK'dan kenarları ise simetrik FK'dan oluştuğunda yapının zaman düzleminde elde edilen anlık görüntüsü. Bu konfigürasyon ile yapının çıkışında yüksek mertebeli ( $TM_2$ ) mod elde edilmiştir. Kırmızı (“+” ile gösterilen) ve mavi (“-” ile gösterilen) renkler maksimum ve minimum elektrik alanları gösterir. (c) Çıkış kanalında oluşan  $TM_2$  modun elektrik alan profili.

$TM_0$  modundan  $TM_2$  moduna çevirme işleminin başarılı bir şekilde gerçekleştirildiği Şekil 3.6(c)'den anlaşılmaktadır. Ayrıca  $TM_3$  mod profili de iki tane asimetrik ve iki tane simetrik FK bloklarının kullanılmasıyla elde edilebilir. Hatta bu blokların farklı birleşimleriyle yüksek mertebeli modların da ( $TM_4$ ,  $TM_5$ , ...) elde edilmesi mümkündür.

### 3.4. Sonuç

Bu bölümde, asimetric FK'lar mod-mertebe çeviricisi olarak ilk defa kullanılmıştır. Faz gecikmesi prensibine göre çalışan yapının mod çevirme verimliliğini göstermek için PWE ve FDTD metodundan faydalanılmıştır. Temel  $TM_0$  modundan yüksek mertebeli modlar elde etmek için birçok yapı çeşidi incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar yapının çıkışında temel modun yüksek iletim ile  $TM_i$  ( $i=1,2,3\dots$ ) moduna başarılı bir şekilde çevrilebileceğini göstermiştir. Önerilen konfigürasyon mevcut mod çevirme uygulamalarına alternatif bir çözüm olarak sayılabilir. Ayrıca, asimetric MDFK ve simetric FK'dan oluşan heteroyapı, Fotonik algılama uygulamaları için interferometre oluşturmak amacıyla kullanılabilir.



#### **4. DERECELENDİRİLMİŞ KIRILMA İNDİSLİ FOTONİK KRİSTALLER VE OPTİK UYGULAMALARI**

Dalga boyu bölme çoklayıcı sistemleri, yüksek kapasiteli optik devre tasarımında önemli bir yere sahiptir. Optik entegre devrelerde gelen sinyalin farklı dalga boylarına göre bölmek veya birleştirmek için çoklayıcı sistemlere ihtiyaç duyulur. Literatürde, optik çoklayıcı cihazların tasarımı için çeşitli teknikler sunulmuştur: Bragg ızgaraları [48], sıralı dalga kılavuz kafesleri [49], çok katmanlı ince filmler [50], Fotonik kristal fiberler [51], dereceli indis düzlemsel yapılar [52] optik çoklayıcı cihazların dizaynı için kullanılan bazı tekniklerdir.

FK'lar yapay olarak bir, iki ve üç boyutta üretilebilen periyodik yapılardır [33]. Bu yapılar belirli frekans aralıklarında yüksek dispersiyon özelliği sergilemektedirler. Süper-prizma ve süper-lens olayları [17] FK'ların içsel özelliklerinden bazılarıdır. Kompakt Fotonik entegre devrelerin gerçekleştirilmesi için FK kullanılarak tasarlanan dalga boyu bölme çoklayıcıları önemli bir bileşen olarak kabul edilebilir. Literatürde rezonatörlere [53], negatif kırıcı lenslere [54], dalga kılavuzu elemanlarına [55], süper-prizma [56] ve öz-kolimasyon etkisine [19] dayanan FK tabanlı dalga boyu bölme çoklayıcıları mevcuttur.

Derecelendirilmiş kırılma indisine sahip FK'lar (DKİ FK), dalga boyu seçici ortam tasarımı için farklı bir yaklaşım olarak göz önünde bulundurulabilir. Derecelendirilmiş kırılma indisine sahip FK yapılar, birim hücrenin doluluk oranını, kırılma indisini ya da kristal örgü periyodunu dereceli olarak değiştirerek elde edilebilir. Bu bölümde de belirtileceği gibi, derecelendirilmiş kırılma indisine sahip sürekli bir dielektrik ortam tüm dalga boylarını iletirken, derecelendirilmiş kırılma indisine sahip periyodik yapılar -dispersiyon özelliğinden dolayı- dalga boyu seçici gibi davranırlar. Derecelendirilmiş kırılma indisine sahip FK'lar ve optik uygulamaları, son zamanlarda çalışılan revaçta olan konulardandır [57-66].

Genellikle, derecelendirilmiş kırılma indisine sahip FK çalışmalarında, odaklanma ve bağlanma etkileri araştırılmıştır [59-64]. Gelen ışığın dikey eksen boyunca yayılma karakteristiği daha önce incelenmiştir. Fakat derecelendirilmiş kırılma indisine sahip

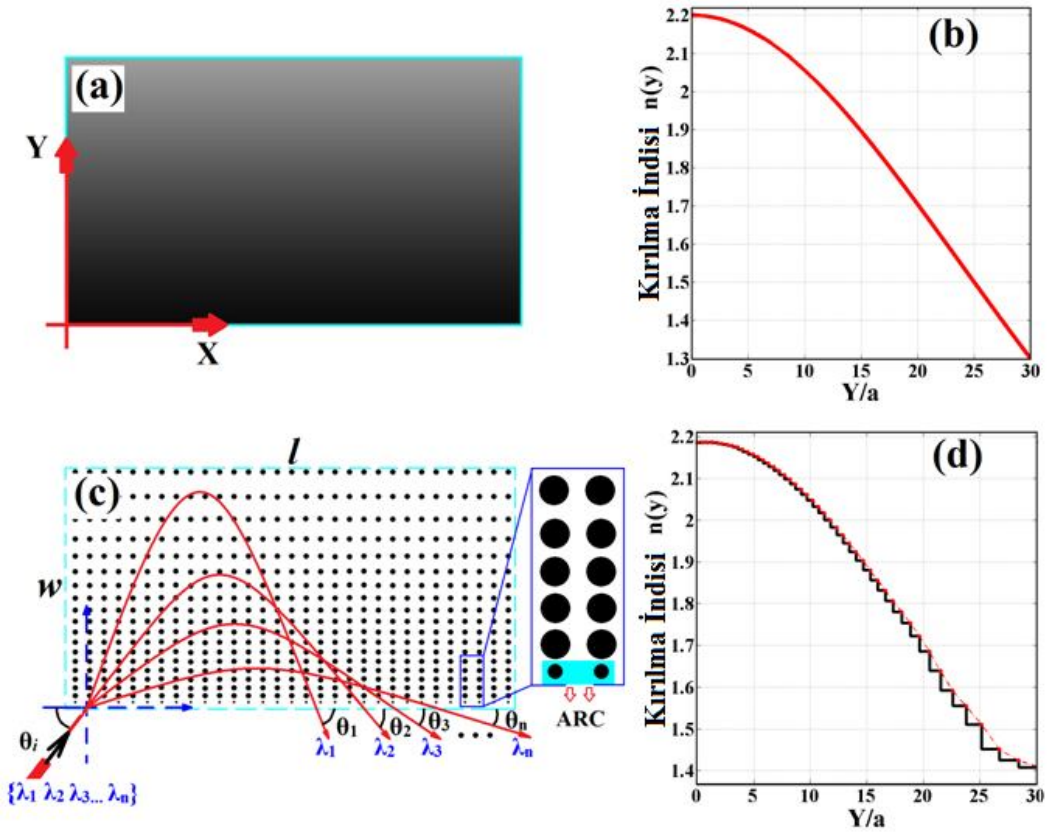
FK'larda dalga'nın yatay doğrultuda yayılması derinlemesine araştırılmamıştır. Bu çalışmada derecelendirilmiş kırılma indisine sahip FK'lar kullanılarak dalga boyu bölücü için orijinal bir çözüm önerilmiştir. Dizayn edilmiş yapı, yatay doğrultuda derecelendirilmiş ayna [67] görevi görmektedir. Bu sayede, yapıya gelen ışın, geniş bir bantta farklı derinliklerde yansır. Tasarlanan FK yapısı, kademeli olarak değişen kırılma indisine sahip olduğu için yapı içerisine nüfuz eden dalga sürekli kırılmaya uğrar ve kırılma açısının 90°'ye eşit olduğu yerde tam yansıma gerçekleşir. Farklı dalga boyları için tam yansıma farklı derinlikte gerçekleştiğinden ilerleyen dalga, yapıyı farklı çıkış açılarıyla terk eder. Tasarlanan yapının giriş kanalına gelen ışık, eğik bir açıyla girdiğinden dalga boyuna bağlı konumsal ayırım gerçekleşmektedir. Ayrıca FK'dan oluşan periyodik ortam, dağıtıcı özellik gösterdiği için fotonik kristal tabanlı tasarımlar oldukça dalga boyu seçicidir. Eğer tasarlanan periyodik ortamın indis dağılımı ve ışığın gelme açısı optimize edilirse, tasarlanan derecelendirilmiş kırılma indisine sahip FK yapı dalga boyu ayırıcı olarak kullanılabilir.

Sunulan çalışmada, yapının kristalli doğasından dolayı dalga boyuna bağlı konumsal kayma beklenmektedir. Derecelendirilmiş kırılma indisine sahip sürekli bir ortamda ise nümerik modellemede kullanılan malzemenin frekans bağımlılığı (dispersiyonu) göz önüne alınmadığı için, yapının dalga boyu değişimine farklı cevap vermesi beklenmez. Fotonik kristal yapının dağıtıcı özelliği, sürekli yapı ile ilerleyen kısımlarda karşılaştırılacaktır.

#### **4.1. Homojen ve Fotonik Kristalli Yapıların Geometrik Analizleri**

Bu çalışmada, sürekli ve FK'lardan oluşan derecelendirilmiş kırılma indisine sahip ortamlar geometrik olarak tasarlanmıştır ve dalga boyu seçicilik performansları karşılaştırılmıştır. Bu ortamlardan birincisi olan derecelendirilmiş kırılma indisine sahip sürekli bir ortam, Şekil 4.1(a)'da Şematik olarak gösterilmiştir ve Şekil 4.1(b)'de ise, ilgili kırılma indis profili çizilmiştir. Derecelendirilmiş kırılma indisine sahip sürekli ortamın kırılma indisi  $n(y) = n_0 \text{sech}(\alpha y)$ , formülü ile ifade edilen hiperbolik sekant profiline sahiptir. Bu ifadede,  $\alpha$  sabit bir sayı (Gradyan faktörü) ve  $n_0, y = 0$ 'daki (yapının alt yüzeyindeki) kırılma indisidir. Gradyan faktörü  $0.0373a^{-1}$  olarak seçilmiştir,  $a$  örgü sabitini ifade etmektedir ve optik eksenindeki kırılma indisi  $n_0=2.20$  alınmıştır. Yapının  $y$ -eksenindeki uzunluğu ise  $30a$ 'dır. Şekilde görüldüğü

gibi sadece dikey  $y$ - doğrultusunda indis değişimi mevcuttur.  $y$ -ekseni boyunca hareket edildiğinde yani yapının alt kısmından üst kısmına doğru etkin kırılma indisinin giderek azaldığı görülmektedir. Hiperbolik sekant indis profiline sahip sürekli ortam, Silika gibi malzemelerin katkılanması ile üretilebilir. Fakat fabrikasyon sürecinde indis dağılımındaki sınırlamalar ve yapı içerisinde homojen depozisyon gibi bazı sorunlar ortaya çıkabilir. Bu tip zorlukların üstesinden gelmek için FK tabanlı derecelendirilmiş kırılma indisine sahip yapılar alternatif bir çözüm olarak düşünülebilir.



Şekil 4.1. (a)Derecelendirilmiş kırılma indisine sahip sürekli ortamın şematik gösterimi ve (b) kırılma indis profili. (c) Tasarlanan DKİ FK yapısının şematik gösterimi. Farklı giriş dalga boylarına bağlı ışın yolu resimlenmiştir. (d) Ayrık Hiperbolik sekant profiline sahip DKİ FK ortamının kırılma indis profili.

Gelen ışık demetini farklı dalga boylarına ayırmak için önerilen DKİ FK yapı Şekil 4.1(c)'de şematik olarak gösterilmiştir. Ayrıca farklı dalga boylarının yapı içerisinde

izlediği yollar da aynı şekil üzerinde gösterilmiştir. DKİ FK yapıların sürekli ortamların etkin kırılma indis dağılımlarını taklit yeteneğine sahip olduğu bilinmektedir [57]. İstenen kırılma indis dağılımını elde etmek için uzun dalga boyu bölgesinde efektif ortam teorisi uygulanabilir. Bunun için dielektrik çubukların pozisyonları önceden tanımlanmış şekilde değiştirilerek istenen indis değişimi başarılı şekilde sağlanır. İlk olarak farklı yanal boyuta sahip FK birim hücrelerinin dispersiyon diyagramları PWE metodu kullanılarak elde edilir. Daha sonra ilgili dispersiyon eğrisinin eğimi kullanılarak her bandın etkin kırılma indisleri hesaplanır. Düşük frekans değerleri için bantlar birbirine oldukça yakındır bu yüzden bu frekansların grup indisinde küçük bir değişme olur. Son olarak efektif ortam teorisinin geçerli olduğu  $a/\lambda=0.10$  normalize frekansında istenen indis dağılımının ayarlanması ile yatay doğrultuda FK dielektrik çubukların pozisyonları elde edilir. Fotonik kristal yapının detaylı spektral analizi önceki çalışmalarımızda yapılmıştır [62].  $a/\lambda=0.10$  normalize frekansında tasarlanan FK yapının hiperbolik sekant indis profiline tahmini basamaklı versiyonu Şekil 4.1(d)'de gösterilmiştir. Fotonik kristal yapının kırılma indisi  $y$ - ekseninde periyodun artması sebebiyle yapının üst kısmına gidildikçe azalmaktadır. Bahsedilen algoritmaya uygun şekilde istenen derecelendirilmiş kırılma indisine sahip yapı, dikdörtgen-örgülü FK birim hücreleri kullanılarak elde edilmiştir. Dielektrik çubuklar hava ortamında iki boyutlu Kartezyen koordinatlarda yerleştirilmiştir. Çubuklar arası mesafe yatay  $x$ -ekseni boyunca  $1a$ 'da sabit tutulurken,  $y$ -ekseninde dereceli olarak değiştirilmiştir. Ek olarak, geri yansımaları azaltmak için yapının alt kısmına Şekil 4.1(c)'de gösterildiği gibi küçük yarıçaplı geri-yansıma önleyici tabaka yerleştirilmiştir [68]. Yansıma önleyici tabakadaki silindirlerin yarıçapı  $0.10a$  seçilirken, FK yapıdaki çubukların yarıçapları  $0.20a$ 'da sabitlenmiştir. Tasarlanan yapının genişliği  $30a$ , uzunluğu ise  $140a$  olarak belirlenmiştir. Frekans ve zaman alanında yapılan nümerik çalışmalarda dielektrik çubukların kırılma indisi 3.13 olarak alınmıştır (Alümina çubuklar). Tasarlanan yapının önemli diğer bir özelliği, sabit kırılma indisine sahip çubuklar kullanılarak etkin kırılma indisi  $n(y=0a)=2.20$ 'den  $n(y=30a)=1.40$ 'a değişen bir yapı elde edilebilmesidir. Önerilen DKİ FK yapı tasarım frekansı ( $a/\lambda = 0.10$ ) civarında çok katmanlı sürekli bir ortam gibi davranır. Dolayısıyla bu normalize frekans civarında yapı, dalga boyu seçici özelliği sergilemez. Fakat yüksek frekans

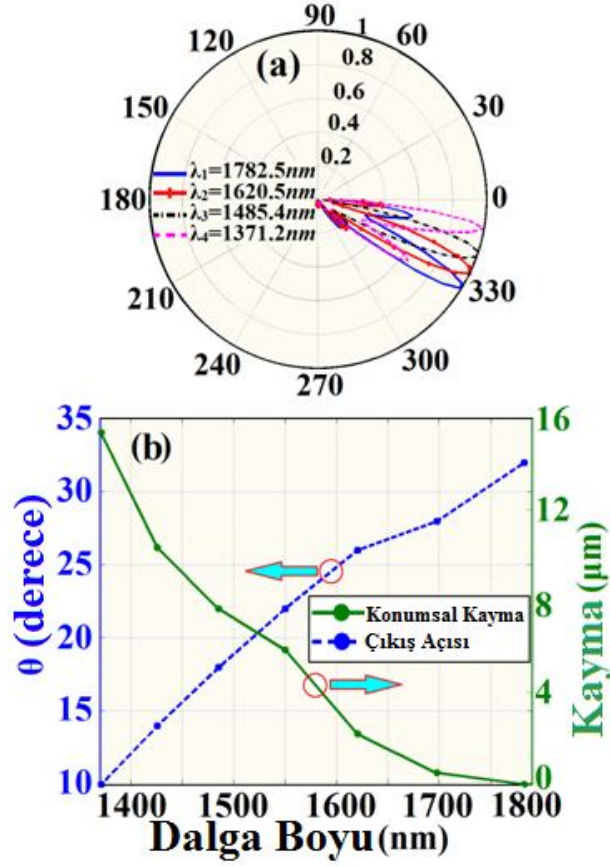
bölgelerine ( $a/\lambda > 0.20$ ) gidildikçe yapının kırılma indis profili, dalga boyuna bağlı olmaya başlar ve orijinal hiperbolik sekant profilinden sapar. Dielektrik doluluk oranını hesaplamak için  $D_{ff}(y) = \pi r^2/(\Delta y \times a)$  formülü kullanılmıştır. Burada  $r = 0.20a$  (dielektrik FK çubukların yarıçapı) ve  $\Delta y$  birim hücrenin yanal boyutudur. Bu ilişkiden çıkarılacağı gibi, yanal boyut  $\Delta y$  azaldıkça birim hücredeki dielektrik malzeme oranı Şekil 4.1(d)'de gösterilen kırılma indis profili ile benzer şekilde azalmaktadır. Dielektrik doluluk oranı analizinden yapı içine nüfuz eden ışığın aşamalı bir şekilde kırılarak tam yansıma uğrayacağı tahmin edilmektedir. Ayrıca önerilen Fotonik kristal yapı, frekans bağımlılığı olmayan malzeme içermesine rağmen tasarım dağıtıcı özellik yani dalga boyu seçici özelliği sergilemektedir. Fakat düzlemsel dalga kılavuzu yapıları farklı spektral bantları ayırmak için frekans bağımlılığı olan malzeme kullanırlar [52].

## **4.2. Tasarlanan Derecelendirilmiş Fotonik Kristal Yapısının Zaman**

### **Düzlemindeki Analizi**

Tasarlanan yapıların 2 boyutta nümerik analizi yapılmıştır ve FDTD metodu kullanılarak performansları incelenmiştir [46]. Yapının sonlu olmasından kaynaklanan geri yansımaları önlemek için hesaplama alanının sınırları PML katmanlar ile çevrilmiştir [47]. Sayısal analizler boyunca analiz çözünürlüğü,  $\Delta x = \Delta y = a/25$  olarak alınmıştır. Sürekli yapı ve FK yapı,  $\phi_i$  gelme açısı ile TM polarize ışıkla sol alt köşeden uyarılmıştır. Sıfıra eşit olmayan elektrik ve manyetik alan bileşenleri sırasıyla  $E_z$ ,  $H_x$  ve  $H_y$ 'dir. Uzun dalga boyu bölgesinde ( $a/\lambda < 0.10$ ), yayılan elektromanyetik dalgalar dielektrik çubuklarla anlamlı bir etkileşime girmeden yapı üzerinden geçerler. Yani gelen dalga yapıyı tasarım frekansı ( $a/\lambda = 0.10$ ) etrafında homojen ortam gibi algılar. Bundan dolayı yapının dalga boyu seçici özelliğinin ortaya çıktığı kısa dalga boyu bölgesinde ( $a/\lambda > 0.20$ ) çalışılmıştır. Ancak sürekli yapıda çıkış açısı, frekansa bağımlı bir farklılık göstermez. Çünkü modellemede Referans 52'teki gibi malzeme dispersiyonu göz önüne alınmamıştır. Referans 52'te Silikanın malzeme dispersiyon özelliği kullanılmıştır. Yapılan çalışmada ise frekans bağımlılığı, FK yapının kristalli doğasından dolayı ortaya çıkmaktadır.

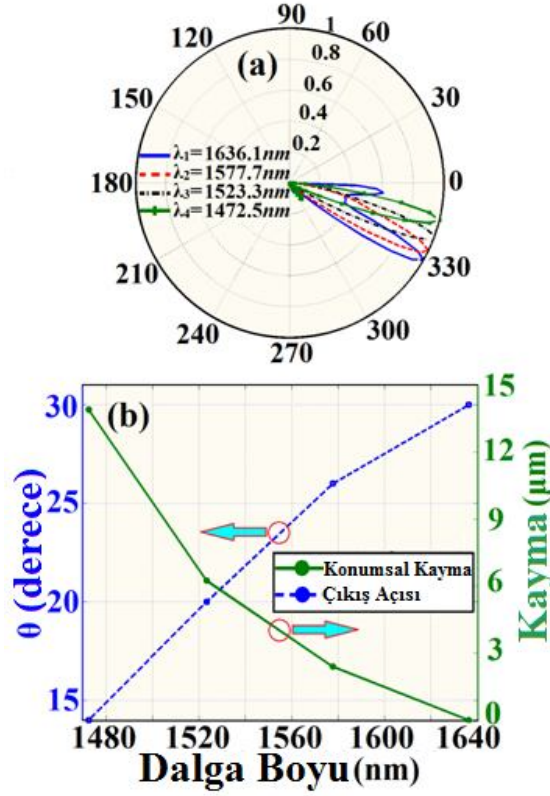
Fotonik kristal yapının dalga boyu seçicilik performansını görüntülemek için sürekli ortamın ve FK yapının elektriksel alan dağılımları elde edilmiştir. FK yapı, Gauss profiline sahip sürekli bir kaynak ile uyarılmıştır. Işık kaynağı, normalize frekansı 0.20 ile 0.35 arasında değişen sinyalleri içermektedir. Gelen ışık, yapıya  $\phi_i = 15^\circ$  lik gelme açısı ile gönderilmiştir. Bu açı  $8^\circ$  ile  $75^\circ$  arası bütün gelme açıları taranarak yapının çıkışındaki konumsal kaymanın en yüksek olduğu değerde optimize edilmiştir. Tasarlanan yapı, dalga boyu seçici özelliğinin ortaya çıktığı üç farklı frekans bölgesinde çalıştırılmıştır. İlk çalışma aralığı, 0.20 ile 0.26 ( $a/\lambda$ ) arası seçilmiştir. Bu aralığı Telekom dalga boylarına denk getirmek için örgü sabiti  $a=356.5\text{nm}$  olarak ayarlanmıştır. Böylece 0.20 ile 0.26 ( $a/\lambda$ ) arasında 0.01 ( $a/\lambda$ ) adımlarla değişen normalize frekans değerleri 1782.5nm ile 1371.2nm arasındaki dalga boyu değerlerine karşılık gelmiştir. Bu aralık Bölge-1 diye adlandırılmıştır. Şekil 4.2(a)'da bu bölgeden seçilen 4 dalga boyunun çıkış açıları verilmiştir. Farklı dalga boyları Şekil 4.1(c)'de gösterilen DKİ FK yapıdan farklı ilerleme açıları ile yansımıştır. Bu durum farklı dalga boyları için yapıdan çıktıktan sonra yatay  $x$ - ekseninde konumsal bir kaymaya sebep olmuştur. Ardışık dalga boyları arasındaki çıkış açısı farkı  $4^\circ$  olarak hesaplanmıştır. Şekil 4.2(b)'de görüldüğü gibi çıkış açısı  $32^\circ$  ile  $10^\circ$  arasında değişmektedir. Bu bölge için dispersiyon açı oranı  $\Delta\theta/\Delta\lambda = 0.05348$  (derece/nm)'e karşılık gelmektedir. Açısal koordinatta görülen ana loblar, yapı içerisindeki yansımalarından kaynaklanmaktadır. Farklı dalga boylarına karşılık gelen çıkış açıları bu ana loblar göz önünde bulundurularak hesaplanmıştır. Şekil 4.2(a)'dan anlaşılacağı gibi açısal koordinattaki yan loblar, yapının ön yüzünde meydana gelen yansımadan dolayı ortaya çıkmaktadır ve dalga seçiciliği analizinde hesaba katılmamışlardır.



Şekil 4.2. (a) Farklı dalga boylarında ilerleyen dalganın ana lob açılal koordinattaki güç akış şeması. Yedi farklı çalışma dalga boyundan dördü, sırasıyla, 1782.5nm, 1620.5nm, 1485.4nm ve 1371.2nm'dir. Örgü sabiti  $a=356.5nm$ 'ye sabitlenmiştir. (b) Çalışma dalga boyuna bağlı yatay eksendeki konumsal kayma (düz çizgi) ve çıkış açısı (kesikli çizgi) grafiği.

Bölge-2 olarak adlandırılan başka bir çalışma frekans aralığına geçildiğinde, yine Bölge-1'deki ile benzer şekilde analizler yapılmıştır. Bu bölgede frekans değerleri 0.27 ile 0.30 ( $a/\lambda$ ) arasında 0.01 ( $a/\lambda$ ) artışlarla değişmektedir. Çalışma aralığını telekom dalga boylarına ayarlamak için örgü sabiti  $a=441.8nm$  olarak seçilmiştir. Böylece ilgili frekans değerlerine karşılık gelen dalga boyları 1472.5nm ile 1636.1nm arasında değişmektedir. Şekil 4.3(a) farklı dalga boylarının açılal koordinat üzerinde güç akışını göstermektedir. Dalga boyuna göre ışığın yapıdan çıkış açısı ve yatay  $x$ -düzleminde konumsal kayması Şekil 4.3(b)'de gösterilmektedir. Bu bölge için çıkış açısı,  $\theta$ ,  $30^\circ$  ile  $14^\circ$  arasında değişmektedir ve

dispersiyon oranı  $\Delta\theta/\Delta\lambda= 0.098$  (derece/nm) olarak hesaplanmıştır. Şekil 4.3(a)'da görülen oldukça küçük yan lobların ana lob üzerindeki etkisi ihmal edilmiştir. Bu analizlerden DKİ FK yapısının dalga boyu değişimine farklı tepki verdiği görülmektedir. Sonuç olarak, önerilen yapı gelen ışığı farklı dalga boylarını ayırıcı olarak kullanılabilir.

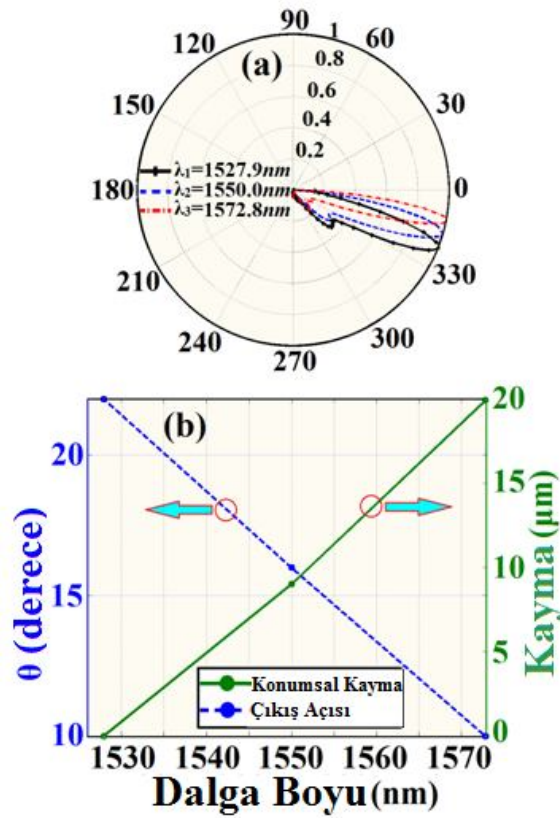


Şekil 4.3. (a) Farklı dalga boylarında ilerleyen dalganın ana lob açılal koordinattaki güç akış şeması. Farklı çalışma dalga boyları, sırasıyla, 1636.1nm, 1577.7nm, 1523.3nm ve 1472.5nm'dir. Örgü sabiti  $a=441.8nm$ 'ye sabitlenmiştir. (b) Çalışma dalga boyuna bağlı yatay eksendeki konumsal kayma (düz çizgi) ve çıkış açısı (kesikli çizgi) grafiği.

Son durumda, Bölge-3 olarak adlandırılan  $a/\lambda = 0.34-0.35$  frekans aralığında, tasarlanan DKİ FK yapısının performansı incelenmiştir. Örgü sabiti  $a=534.8nm$  seçilerek dalga boyu değerleri 1527.9 nm ile 1572.8 nm arasında ayarlanmıştır. Şekil 4.4(a)'da farklı dalga boyu değerlerinin çıkış güç akışı açılal koordinatta gösterilmiştir. Farklı dalga boylarının çıkış açıları ve bunlara karşılık gelen konumsal



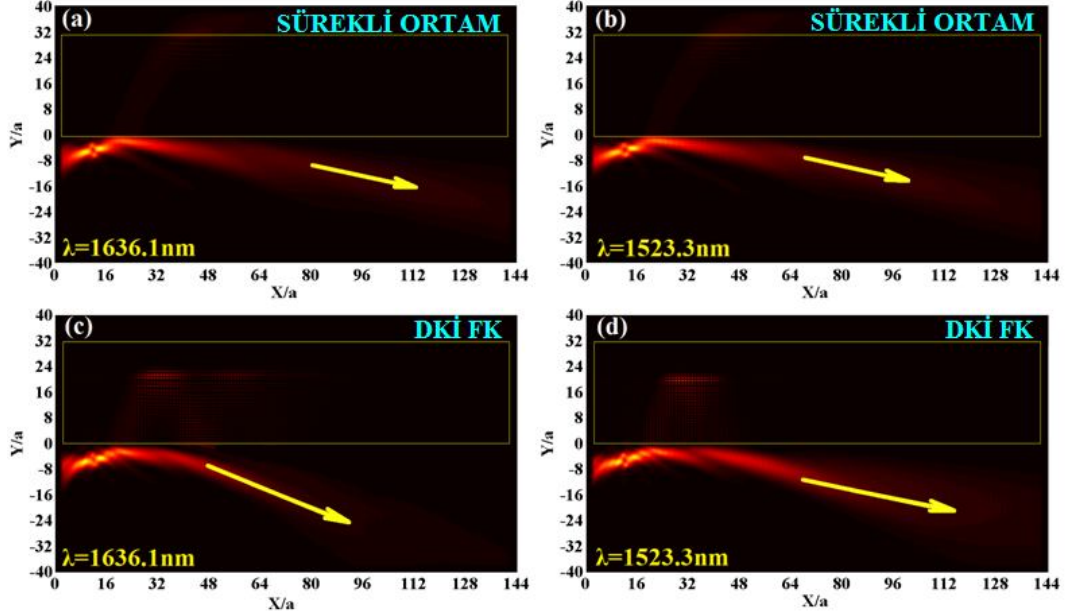
kaymalar Şekil 4.4(b)'de dalga boyu değişimine göre çizilmiştir. Çıkış açısı,  $\theta$ ,  $22^\circ$ 'den  $10^\circ$ 'ye değişmektedir. Bu bölge için dispersiyon oranı  $\Delta\theta/\Delta\lambda= 0.267$  (derece/nm) olarak hesaplanmıştır. Diğer bölgelere daha yüksek dispersiyon oranına sahip olması Bölge-3'ün dalga boyu değişimine daha hassas olduğunu göstermektedir. Fakat diğer bölgelere göre (Bölge-1 ve Bölge-2) daha dar bir bant genişliğine sahiptir. Bölge-1'den Bölge-3'e geçildiğinde normalize frekans değeri 1.34 katına çıkarken dalga boyu seçiciliğinin başarımlı ölçüsü 5 kat artmaktadır. Her bölgenin duyarlılığı derecelendirilmiş kırılma indisine sahip ortamın dispersiyon özelliğinden dolayı farklıdır. Sonuç olarak, dalga boyuna bağlı çıkış açısı ilişkisi en doğrusal olarak Bölge-3'te görülmektedir.



Şekil 4.4. (a) Farklı dalga boylarında ilerleyen dalganın ana lob açısıl koordinattaki güç akış şeması. Farklı çalışma dalga boyları, sırasıyla, 1572.8nm, 1550.0nm ve 1527.9nm'dir. Örgü sabiti  $a=534.8\text{nm}$ 'ye sabitlenmiştir. (b) Çalışma dalga boyuna bağlı yatay eksendeki konumsal kayma (düz çizgi) ve çıkış açısı (kesikli çizgi) grafiği.

### 4.3. Sürekli Yapı ile Fotonik Kristalli Yapının Sayısal Kıyaslaması

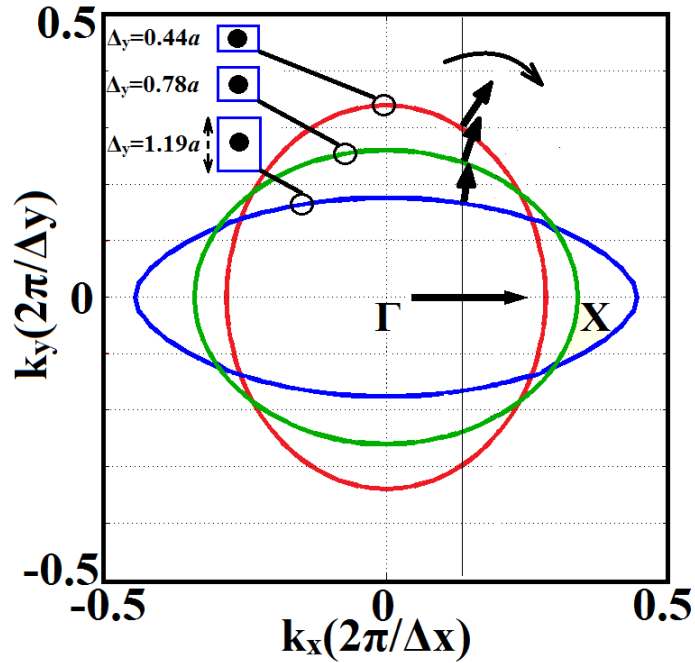
DKİ FK yapısı ve sürekli yapı için farklı dalga boylarında seçilen ışığın tepkisi karşılaştırılmıştır. Bölge-2 içerisinde seçilmiş iki farklı çalışma dalga boyu için karşılık gelen elektrik alan dağılımları Şekil 4.5'te gösterilmiştir. Şekil 4.5(a) ve 4.5(b) sırasıyla 1636.1nm (normalize frekans değeri  $a/\lambda = 0.27$ ) dalga boyu ve 1523.3 nm (normalize frekans değeri  $a/\lambda = 0.29$ ) dalga boyu için sürekli ortamdaki elektrik alan dağılımlarını göstermektedir. Sürekli ortamda iki dalga boyu değeri için de çıkış açısı  $15^\circ$  olarak hesaplanmıştır. Beklendiği gibi sürekli ortamın farklı dalga boylarına tepkisi aynı olmuştur. Farklı dalga boyları yapı içerisinde kırılarak yansımaya uğrar ve yapı içerisinde aynı yolu izleyerek yapıyı terk ederler. Böylece yapıdan çıkış açıları birbirine eşit olur. Periyodik DKİ FK yapısı kullanıldığında ise farklı dalga boyları, yapıyı farklı pozisyonlardan farklı çıkış açıları ile terk etmektedir. Sürekli yapı ve FK yapısı benzer indis dağılımına sahip olmasına rağmen yüksek frekans bölgesinde dalga boyu değişimine verdikleri cevap tamamen farklıdır. Şekil 4.5(c) ve 4.5(d)'den de görüleceği gibi, Fotonik kristalli yapıda ise 1636.1nm ve 1523.3nm dalga boyları için karşılık gelen çıkış açıları sırasıyla  $30^\circ$  ve  $20^\circ$ 'dir. Fakat bu dalga boyları için sürekli yapıdaki çıkış açıları ise birbirinin aynısıdır. Bu grafiklere dayanarak, tasarlanan DKİ FK yapısının gelen ışığın dalga boyu değişimlerine duyarlı olduğu açıkça görülmektedir. Bu sonuçlar, kristalli yapının dalga boyu seçici ortamın gerçekleştirilmesi için uygun olduğunu desteklemektedir.



Şekil 4.5. (a) 1636.1nm ve (b) 1523.3nm çalışma dalga boylarında derecelendirilmiş kırılma indisine sahip sürekli ortamın uzaysal elektrik alan dağılımı. (c) 1636.1nm ve (d) 1523.3nm çalışma dalga boylarında tasarlanan DKİ FK yapısının uzaysal elektrik alan dağılımı. Şekilde görülen FDTD analizi ile elde edilen elektrik alan dağılımları, Bölge-2 içinde yapılmıştır. Şekillerde görülen sarı işaretler, çıkış gücüne ait ana lobun ilerleme yönünü göstermektedir.

Işın teorisi açıklamasına ek olarak, tasarlanan Fotonik kristal yapının dalga boyu seçicilik özelliği eş frekans eğrilerinin yardımı ile de açıklanabilir. EFE'lerin elde edilmesinde PWE metodu kullanılmıştır [42]. Şekil 4.6,  $a/\lambda = 0.21$  normalize frekansı için birinci TM bantlarına karşılık gelen üç farklı EFE'leri göstermektedir. Üzerinde çalışılan birim hücre yapılandırmaları aynı şekilde şematik olarak verilmiştir. Karşılık gelen birim hücrelerin  $y$ - eksenindeki boyutları ( $\Delta_y$ ), sırasıyla,  $0.44a$ ,  $0.78a$  ve  $1.19a$ 'dır. Yatay  $x$ -eksenindeki örgü boyutu ( $\Delta_x$ ) ise  $1.0a$  olarak belirlenmiştir. Şekildeki dikey çizgi ilerleme yönünü (grup hızını) belirlemek için kullanılan yorumlama çizgisidir.  $\theta_i=15^\circ$ 'lik açı ile gelen ışık için eş frekans eğrileri ile yorumlama çizgisinin bir kesişme noktası vardır. Her birim hücrede, gelen ışığın ilerleme doğrultusu koyu renkli ok işaretleri ile gösterilmiştir. Grup hızı yavaş yavaş  $x$ - eksenine paralel bir hal alır ve böylece FK yapısı içerisinde yayılan ışığın kavisli bir yörünge izlediği anlaşılır. Şekil 4.6'da gösterilen ok işaretlerinin hareketine göre

birim hücrelerin örgü boyutundaki değişiklikler Fotonik kristal yapı içerisinde, gelen ışığın ilerleme doğrultusunu değiştirdiği söylenebilir. Böylelikle periyodik yapı içerisinde ilerleyen ışık bükülmeye maruz kalır. Bu olgu, serap etkisi kavramı ile uyumludur. Literatürde, iki boyutlu Fotonik kristal yapılarda serap etkisi ve süper bükme olayı 58, 73 ve 74 numaraları ile gösterilen Referanslarda çalışılmıştır. Dispersiyon bantlarındaki anizotropi özelliği ve frekans seçiciliği kullanılarak ışık bükme ve ışının yanal kaydırılması söz konusu çalışmalarda gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmaların hepsi negatif kırılma özelliğine dayanmaktadır. Ayrıca, farklı spektrum aralıkları için dalga boyu seçicilik özelliği ayrıntılı bir şekilde araştırılmamıştır. Sürekli yapı ve Fotonik kristal yapının frekans seçicilik performansları da karşılaştırılmamıştır. Yapılan bu çalışmada ise hiperbolik sekant indis dağılımına sahip Fotonik kristal yapı çalışılmıştır ve bu indis profilini elde etmek için dielektrik çubukların konumları belirlenmiştir. Tüm bu kavramlar, yapılan çalışmanın farklı ve yeni yönlerini ortaya koymaktadır.



Şekil 4.6. Farklı örgü büyüklüğüne ( $\Delta_y$ ) sahip FK birim hücreleri için tanımlanan birinci TM bandı eş-frekans eğrilerinin gösterimi.

#### **4.4. Sonuç**

Sonuç olarak, Fotonik kristallerin kullanımı yapısal dispersiyon özelliğinden dolayı olağanüstü fırsatlar sunmaktadır. Sürekli yapı, fiber optik teknolojisinde özellikle de medikal ürünlerde ve optik görüntüleme de kullanılan lenslerin bazı türlerinde kullanılmaktadır. Sürekli ortam, iyon değişim işlemi ve kimyasal buhar depozisyonu gibi fabrikasyon yöntemleri kullanılarak üretilebilir. Fakat daha önce belirtildiği gibi birçok zorlayıcı sorun ortaya çıkmaktadır. Bu tür zorlukların üstesinden gelmek için, sürekli ortam, farklı boyuttaki dikdörtgen FK birim hücrelerin kullanımı ile taklit edilebilir. DKİ FK yapısının diğer bir özelliği, kırılma indisi sabit dielektrik çubuklar kullanılarak istenen herhangi bir indis varyasyonu elde edilebilir. Fotonik kristalli yapılar, tek tip izotropik malzemedan oluşmasına rağmen düşük kayıplı performans yapının gerçekleştirilmesinde yüksek uygulanabilirlik sergiler. Ayrıca FK tabanlı derecelendirilmiş kırılma indisi sahip yapıların üstünlüğü, dalga boyu değişimine duyarlı olmasıdır. Bu durum dalga boyu seçici ortamların tasarımında FK'ların kullanımını güçlendirir. Yapay olarak tasarlanan derecelendirilmiş kırılma indisine sahip FK'lar, periyodik homojen olmayan ortamın frekans bağımlılığını ortaya çıkarmak için kısa dalga boyu aralığında uygulanmıştır.

## KAYNAKLAR

- [1] Yablonovitch, E., Inhibited spontaneous emission in Solid-state physics and electronics, *Physical Review Letters*, 58, 2059, 1987.
- [2] John, S., Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices, *Physical Review Letters*, 58, 2486, 1987.
- [3] Anderson, P. W., Absence of Diffusion in Certain Random Lattices, *Physical Review*, 109, 1492, 1958.
- [4] Megens, M., Wijnhoven, J., Lagendijk, A., Vos, W. L., Light sources inside photonic crystals, *Journal of Optical Society of America B*, 16, 1403, 1999.
- [5] Campbell, M., Sharp, D. N., Harrison, M. T., Denning, R. G., Turberfield, A. J., Fabrication of photonic crystals for the visible spectrum by holographic lithography, *Nature*, 404, 53, 2000.
- [6] Jiang, P., Bertone, J. F., Hwang, K. S., Colvin, V. L., Single-crystal colloidal multilayers of controlled thickness, *Chemical Materials*, 11, 2132, 1999.
- [7] Lee, W. M., Pruzinsky, S. A., Braun, P. V., Multi-photon polymerization of waveguide structures within three-dimensional photonic crystals, *Advanced Materials*, 14, 271, 2002.
- [8] Juarez, B. H., Ibisate, M., Palacios, J. M., Lopez, C., High-energy photonic bandgap in  $\text{Sb}_2\text{S}_3$  inverse opals by sulfidation processing, *Advanced Materials*, 15, 319, 2003.
- [9] Lee, Y. C., Kuo, T. J., Hsu, C. J., Su, Y. W., Chen, C. C., Fabrication of 3D macroporous structures of II-VI and III-V semiconductors using electrochemical deposition, *Langmuir*, 18, 9942, 2002.
- [10] Moroz, A., Three-dimensional complete photonic-band-gap structures in the visible, *Physical Review Letters*, 83, 5274, 1999.
- [11] Fleming, J. G., Lin, S. Y., El-Kady, I., Biswas, R., Ho, K. M., All-metallic three dimensional photonic crystals with a large infrared bandgap, *Nature*, 417, 52, 2002.
- [12] Garcia-Santamaria, F., Ibisate, M., Rodriguez, I., Meseguer, F., Lopez, C., Photonic band engineering in opals by growth of Si/Ge multilayer shells, *Advanced Materials*, 15, 788, 2003.

- [13] Fenollosa, R., Meseguer, F., Non-Close-Packed Artificial Opals, *Advanced Materials*, 15, 1282, 2003.
- [14] Ashcroft, N. W., Mermin N. D., *Solid State Physics*, Saunders College, Philadelphia, 1976.
- [15] Kittel, C., *Solid State Physics*, John Wiley & Sons, New York, 1986.
- [16] Hetch, E., Zajac, A., *Optics*, Addison-Wesley, 1974.
- [17] Luo, C. Y., Johnson, S. G., Joannopoulos, J. D., All-angle negative refraction in a three-dimensionally periodic photonic crystal, *Applied Physics Letter*, 81, 2352, 2002.
- [18] Kosaka, H.T., Tomita, A., Notomi, M., Tamamura, T., Sato, T., Kawakami, S., Superprism phenomena in photonic crystals, *Physical Review B*, 58, 10096, 1998.
- [19] Turduev. M., Giden, I. H., Kurt, H., Extraordinary wavelength dependence of self-collimation effect in photonic crystal with low structural symmetry, *Photonics and Nanostructures – Fundamentals and Applications*, 11, 241-252, 2013
- [20] Luo, C. Y., Johnson, S. G., Joannopoulos, J. D., All-angle negative refraction in a three-dimensionally periodic photonic crystal. *Applied Physics Letters*, 81, 2352, 2002,
- [21] Kurt, H., Giden, I. H., Ustun, K., Highly efficient and broadband light transmission in 90° nanophotonic wire waveguide bends, *Journal of the Optical Society of America B* 28, 495-501, 2011.
- [22] Kurt, H., Giden, I. H., Citrin, D. S., Design of T-shaped nanophotonic wire waveguide for optical interconnection in H-tree network, *Optics Express*, 19, 26827-26838, 2011.
- [23] Giden. I. H., Kurt H., Modified annular photonic crystals for enhanced band gap properties and iso-frequency contour engineering, *Applied Optics*, 51, 1287-1296, 2012.
- [24] Momeni, B., Adibi, A., Optimization of photonic crystal demultiplexers based on the superprism effect, *Applied Physics B*, 77, 555-560, 2003.

- [25] Deng, X. H., Fang, L. G., Liu, J. T., Zou, L. E., Liu, N. H., Multichannel filtering properties of photonic crystals containing single-negative materials, *Applied Physics B*, 99, 507-511, 2010.
- [26] Chen, Z.-H., Yu, Z.-Y., Liu, Y.-M., Lu, P.-F., Fu, Y., Multiple beam splitting to free space from a V groove in a photonic crystal waveguide, *Applied Physics B*, 102, 857-861, 2011.
- [27] Park, J. B., Yeo, D.-M., Shin, S.-Y., Variable optical mode generator in a multimode waveguide, *IEEE Photonics Technology Letters*, 18, 2084-2086, 2006.
- [28] Lee, B.-T., Shin, S.-Y., Mode-order converter in a multimode waveguide, *Optics Letters*, 28, 1660-1662, 2003.
- [29] Low, A. L. Y., Yong, Y. S., You, A. H., Chien, S. F., Teo, C. F., A five-order mode converter for multimode waveguide, *IEEE Photonics Technology Letters*, 16, 1673-1675, 2004.
- [30] Huang, Y., Xu, G., Ho, S.-T., An ultracompact optical mode order converter, *IEEE Photonics Technology Letters*, 18, 2281-2283, 2006.
- [31] Castro, J., Geraghty, D. F., Honkanen, S., Greiner, C. M., Iazikov, D., Mossberg, T. W., Demonstration of mode conversion using anti-symmetric waveguide Bragg gratings, *Optics Express*, 13, 4180-4184, 2005.
- [32] Pruessner, M. W., Khurgin, J. B., Stievater, T. H., Rabinovich, W. S., Bass, R., Boos, J. B., Urick, V. J., Demonstration of a mode-conversion cavity add-drop filter, *Optics Letters*, 36, 2230-2232, 2011.
- [33] Joannopoulos, J. D., Johnson, S. G., Winn, J. N., Meade, R. D., *Photonic Crystals: Molding the Flow of Light*, Second Edition, Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 2008.
- [34] Kurt, H., Turduev, M., Giden, I. H., Crescent shaped dielectric periodic structure for light manipulation, *Optics Express*, 20, 7184-7194, 2012.
- [35] Giden, I. H., Turduev, M., Kurt, H., Broadband super-collimation with low-symmetric photonic crystal, *Photonics and Nanostructures: Fundamentals and Applications*, 11, 132-138, 2013.
- [36] Turduev, M., Giden, I., Kurt, H., Modified annular photonic crystals with enhanced dispersion relations: polarization insensitive self-collimation and



- nanophotonic wire waveguide designs, *Journal of the Optical Society of America B*, 29, 1589-1598, 2012.
- [37] Matthews, A., Wang, X.-H., Kivshar, Y., Gu, M., Band-gap properties of two-dimensional low-index photonic crystals, *Applied Physics B*, 81, 189-192, 2005.
- [38] Chen, G., Kang, J. U., Waveguide mode converter based on two-dimensional photonic crystals, *Optics Letters*, 30, 1656-1658, 2005.
- [39] Happ, T. D., Kamp, M., Forchel, A., Photonic crystal tapers for ultracompact mode conversion, *Optics Letters*, 26, 1102-1104, 2001.
- [40] Liu, V., Miller, D. A. B., Fan, S., Ultra-compact photonic crystal waveguide spatial mode converter and its connection to the optical diode effect, *Optics Express*, 20, 28388-28397, 2012.
- [41] Feng, J., Chen, Y., Blair, J., Kurt, H., Hao, R., Citrin, D. S., Summers, C. J., Zhou, Z., Fabrication of annular photonic crystals by atomic layer deposition and sacrificial etching, *Journal of Vacuum Science and Technology B*, 22, 568-572, 2009.
- [42] Johnson, S., Joannopoulos, J., Block-iterative frequency-domain methods for Maxwell's equations in a planewave basis, *Optics Express*, 8, 173-190, 2001.
- [43] Hamam, R. E., Ibanescu, M., Johnson, S. G., Joannopoulos, J. D., Soljacić, M., Broadband super-collimation in a hybrid photonic crystal structure, *Optics Express*, 17, 8109-8118, 2009.
- [44] Notomi, M., Theory of light propagation in strongly modulated photonic crystals: Refraction-like behavior in the vicinity of the photonic band gap, *Physical Review B*, 62, 10696-10705, 2000.
- [45] Witzens, J., Loncar, M., Scherer, A., Self-collimation in planar photonic crystals, *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 8, 1246-1257, 2002.
- [46] Oskooi, A. F., Roundy, D., Ibanescu, M., Bermel, P., Joannopoulos, J. D., Johnson, S. G., MEEP: a flexible free-software package for electromagnetic simulations by the FDTD method, *Computer Physics Communications*, 181, 687-702, 2010.

- [47] Berenger, J. P., A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves, *Journal of Computational Physics*, 114, 185–200, 1994.
- [48] Keiser, G. E., A review of WDM technology and applications, *Optical Fiber Technologies*, 5, 3-39, 1999.
- [49] Takahashi, H., Suzuki, S., Nishi, I., Wavelength multiplexer based on SiO<sub>2</sub>–Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> arrayed-waveguide grating, *Journal of Lightwave Technology*, 12, 989–995, 1994.
- [50] Gerken, M., Miller, D. A. B., Multilayer thin-film structures with high spatial dispersion, *Applied Optics*, 42, 1330-1345, 2003.
- [51] Sharkawy, A., Shi, S., Prather, D. W., Multichannel wavelength division multiplexing with photonic crystals, *Applied Optics*, 40, 2247-2252, 2001.
- [52] Salameh, H. A. B., Irshid, M. I., Wavelength-division demultiplexing using graded-index planar structures, *Journal of Lightwave Technology*, 24, 2401-2408, 2006.
- [53] Fan, S., Villeneuve, P. R., Joannopoulos, J. D., Haus, H. A., Channel drop tunneling through localized States, *Physical Review Letters*, 80, 960-963, 1998.
- [54] Baba, T., Asatsuma, T., Matsumoto T., Negative refraction in photonic crystals, *MRS Bulletin*, 33, 927-930, 2008.
- [55] Koshiha, M., Wavelength division multiplexing and demultiplexing with photonic crystal waveguide couplers, *Journal of Lightwave Technology*, 19, 1970-1975, 2001.
- [56] Matsumoto, T., Fujita, S., Baba, T., Wavelength demultiplexer consisting of Photonic crystal superprism and superlens, *Optics Express*, 13, 10768-10776, 2005.
- [57] Kurt, H., Citrin, D. S., Graded index photonic crystals, *Optics Express*, 15, 1240-1253, 2007.
- [58] Centeno, E., Cassagne, D., Graded photonic crystals, *Optics Letters*, 30, 2278-2280, 2005.
- [59] Cakmak, O., Colak, E., Caglayan, H., Kurt, H., Ozbay, E., High efficiency of graded index photonic crystal as an input coupler, *Journal of Applied Physics*, 105, 103708-103712, 2009.

- [60] Kurt, H., Colak, E., Cakmak, O., Caglayan, H., Ozbay, E., The focusing effect of graded index photonic crystals, *Applied Physics Letters*, 93, 171108-171110, 2008.
- [61] Kurt, H., Citrin, D. S., A novel optical coupler design with graded-index photonic crystals, *IEEE Photonics Technology Letters*, 19, 1532-1534, 2007.
- [62] Kurt, H., Oner, B., Turduev, M., Giden, I., Modified Maxwell fish-eye approach for efficient coupler design by graded photonic crystals, *Optics Express*, 20, 22018-22033, 2012.
- [63] Vasic, B., Isic, G., Gajic, R., Hingerl, K., Controlling electromagnetic fields with graded photonic crystals in metamaterial regime, *Optics Express*, 18, 20321-20333, 2010.
- [64] Gauffillet, F., Akmansoy, E., Graded photonic crystals for graded index lens, *Optics Communication*, 285, 2638-2641, 2012.
- [65] Do, V. K., Roux, X. L., Caer, C., Morini, D. M., Izard, N., Vivien, L., Cassan, E., Wavelength demultiplexer based on a two-dimensional graded photonic crystal, *IEEE Photonics Technology Letters*, 23, 1094-1096, 2011.
- [66] Kurt, H., Yilmaz, D., Akosman, A. E., Ozbay, E., Asymmetric light propagation in chirped photonic crystal waveguides, *Optics Express*, 20, 20635-20646, 2012.
- [67] Matuschek, N., Kartner, F. X., Keller, U., Theory of double-chirped mirrors, *IEEE Journal of Selected Topics Quantum Electronics*, 4, 197-208, 1998.
- [68] Lee, S. G., Choi, J. S., Kim, J. E., Park, H. Y., Kee, C. S., Reflection minimization at two-dimensional photonic crystal interfaces, *Optics Express*, 16, 4270-4277, 2008.
- [69] Baba, T., Matsumoto, T., Resolution of photonic crystal superprism, *Applied Physics Letters*, 81, 2325-2327, 2002.
- [70] Wu, L., Mazilu, M., Karle, T., Krauss, T. F., Superprism phenomena in planar photonic crystals, *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 38, 915-918, 2002.
- [71] Momeni, B., Adibi, A., Optimization of photonic crystal demultiplexers based on the superprism effect, *Applied Physics B*, 77, 555-560, 2003.

- [72] Gerken, M., Miller, D. A. B., Wavelength demultiplexer using the spatial dispersion of multilayer thin-film structures, *IEEE Photonics Technology Letters* 15, 1097-1099, 2003.
- [73] Centeno, E., Cassagne, D., Albert, J-P., Mirage and superbending effect in two-dimensional graded photonic crystals, *Physical Review B*, 73, 235119-235123, 2006.
- [74] Lin, S. S., Huang, T. J., Acoustic mirage in two-dimensional gradient-index phononic crystals, *Journal of Applied Physics*, 106, 053529-053533, 2009.

## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : GİDEN, İbrahim Halil  
Uyruğu : T.C.  
Doğum tarihi ve yeri :01.08.1987 Şanlıurfa  
Medeni hali : Bekar  
Telefon : 0 (312) 292 40 00  
Faks : 0 (312) 292 40 91  
e-mail : [igiden@etu.edu.tr](mailto:igiden@etu.edu.tr)

### Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Lisans	Ortadoğu Teknik Üniversitesi	2010
Yüksek Lisans	TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi	2013

### İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2011-2013	TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi	Araştırma Görevlisi

### Yabancı Dil

İngilizce  
Arapça

### Yayımlar

- [1] H. Kurt, **I. H. Giden**, and K. Ustun, "Highly efficient and broadband light transmission in 90° nanophotonic wire waveguide bends," J. Opt. Soc. Am. B **28**, 495-501 (2011).
- [2] **I. H. Giden** and H. Kurt, "Modified annular photonic crystals for enhanced band gap properties and iso-frequency contour engineering," Appl. Opt. **51**, 1287-1296 (2012).

- [3] H. Kurt, M. Turduev, and **I. H. Giden**, "Crescent shaped dielectric periodic structure for light manipulation," *Opt. Express* **20**, 7184-7194 (2012).
- [4] H. Kurt, **I. H. Giden**, and D. S. Citrin, "Design of T-shaped nanophotonic wire waveguide for optical interconnection in H-tree network," *Opt. Express* **19**, 26827-26838 (2011).
- [5] M. Turduev, **I. H. Giden**, and H. Kurt, "Modified annular photonic crystals with enhanced dispersion relations: polarization insensitive self-collimation and nanophotonic wire waveguide designs," *J. Opt. Soc. Am. B* **29**, 1589-1598 (2012).
- [6] H. Kurt, B. B. Oner, M. Turduev, and **I. H. Giden**, "Modified Maxwell fish-eye approach for efficient coupler design by graded photonic crystals," *Opt. Express* **20**, 22018-22033 (2012).
- [7] B. B. Oner, M. Turduev, **I. H. Giden**, and H. Kurt, "Efficient Mode Converter Design by Asymmetric Graded Index Photonic Structures" *Opt. Lett.* **38**, 220-222 (2013)
- [8] **I. H. Giden**, M. Turduev, and H. Kurt, "Broadband super-collimation with low-symmetric photonic crystal" *Photonics and Nanostructures – Fundamentals and Applications* **11** (2013) 132–138.
- [9] D. Yilmaz, **I. H. Giden**, M. Turduev, and H. Kurt, "Design of Wavelength Selective Medium by Graded Index Photonic Crystals," accepted *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 49, no. 5, May 2013.
- [10] M. Turduev, B. B. Oner, **I. H. Giden**, and H. Kurt "Mode Transformation using Graded Photonic Crystals with axial asymmetry" *Journal of the Optical Society of America B* Vol. 30, Iss. 6, pp. 1569–1579 (2013).
- [11] M. Turduev, **I. H. Giden**, and H. Kurt, "Extraordinary wavelength dependence of self-collimation effect in photonic crystal with low structural symmetry" *Photonics and Nanostructures – Fundamentals and Applications*, Volume 11, Issue 3, August 2013, Pages 241–252.
- [12] **I. H. Giden**, D. Yilmaz, M. Turduev, and H. Kurt "Asymmetrical light transport in graded index photonic crystal waveguides" to be submitted in *Optics Letters* (2013).

- [13] N. Erim, **I. H. Giden**, M. Turduev, and H. Kurt, "Efficient Mode-order Conversion using Photonic Crystal Structure with Low Symmetry," to be submitted in *J. Opt. Soc. Am. B* (2013).
- [14] Kurt, H.; **Giden, I.H.**; , "Sharp corners and T-shape nano-photonic wire waveguide with high transmission efficiency," *Signal Processing and Communications Applications (SIU), 2011 IEEE 19th Conference on* , vol., no., pp.594-597 ( 2011).
- [15] **I. H. Giden**, M. Turduev, and H. Kurt, "Dispersion engineering of modified annular photonic crystals and their use in polarization independent optical devices" accepted for publication on 2012 Integrated Photonics Research, Silicon and Nano Photonics (IPR) Conference.
- [16] Turduev, M.; **Giden, I.H.**; Kurt, H.; , "Polarization insensitive photonic devices: Waveguides, splitter, and sharp bends," *Transparent Optical Networks (ICTON), 2012 14th International Conference on* , vol., no., pp.1-4, 2-5 July 2012
- [17] M. Turduev, **I. H. Giden**, H. Kurt, " Frequency Selective Graded Index Medium: Short and Long wavelength Regimes," The 12th Mediterranean Microwave Symposium (MMS 2012).
- [18] **I. H. Giden**, M. Turduev, and H. Kurt, "Broadband super-collimation with low-symmetric photonic crystal" 4th International Topical Meeting on Nanophotonics and Metamaterials (Nanometa 2013).
- [19] M. Turduev, **I. H. Giden**, and H. Kurt "Wavelength division demultiplexer design by star-shaped photonic crystals" 4th International Topical Meeting on Nanophotonics and Metamaterials (Nanometa 2013).
- [20] M. Turduev, B. B. Oner, H. Kurt, and **I. H. Giden** " Efficient coupling by GRIN photonic crystals: modified maxwell fish-eye lens approach" 4th International Topical Meeting on Nanophotonics and Metamaterials (Nanometa 2013).
- [21] B. B. Oner, M. Turduev, **I. H. Giden** and H. Kurt, "Enhancing Light Manipulation by Graded Index Photonic Crystal Media," XXI International Workshop on Optical Wave & Waveguide Theory and Numerical Modelling, University of Twente, Enschede, Netherlands, April 19-20, 2013.

