

**MODİFİYE EDİLMİŞ PERİYODİK FOTONİK YAPILARDA YÜZEY  
MODU VE MOD ÇEVİRİCİLER**

**NUR ERİM**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
ELEKTRİK VE ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ**

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

**TEMMUZ 2013**

**ANKARA**

Fen Bilimleri Enstitü onayı

---

Prof. Dr. Necip CAMUŞCU

Müdür

Bu tezin Yüksek Lisans derecesinin tüm gereksinimlerini sağladığını onaylarım.

---

Doç. Dr. Hamza KURT

Anabilim Dalı Başkanı

Nur ERİM tarafından hazırlanan MODİFİYE EDİLMİŞ PERİYODİK FOTONİK YAPILARDA YÜZEY MODU VE MOD ÇEVİRİCİLER adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

---

Doç. Dr. Hamza KURT

Tez Danışmanı

Tez Jüri Üyeleri

Başkan :Doç. Dr. Ali Cafer GÜRBÜZ

Üye : Doç. Dr. Hamza KURT

Üye : Yrd. Doç. Dr. Hatice DURAN

## **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.

Nur ERİM

**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 – Temmuz 2013

**Nur ERİM**

## **MODİFİYE EDİLMİŞ PERİYODİK FOTONİK YAPILARDA YÜZEY MODU VE MOD ÇEVİRİCİLER**

### **ÖZET**

Fotonik kristaller ışığın hareketini kontrol etmek için kullanılan periyodik dielektrik yapılardır. Son zamanlarda, birçok araştırmacı benzersiz bant boşluğu özelliklerinden dolayı fotonik kristal yapılarını araştırmaktadırlar. Bu tezde, sonlu farklar zaman düzlemi metodu ve düzlemsel dalga açılım metodu kullanılarak çeşitli kare örgü ve üçgen örgü fotonik kristaller incelenmiştir. Optik yüzey modlarının yavaş ışık özellikleri araştırılmıştır. Yüzeyin geometrik parametreleri değiştirilerek yapının grup kırılma indisi ve bant genişliği ayarlanabilir. Yüzey modu fotonik kristalin düşük grup hızı dispersiyon davranışı gösterilmiştir. Buna ek olarak, asimetric ve simetric fotonik kristallerden oluşan heteroyapı, mod-mertebe çevirimi amacıyla incelenmiştir. Önerilen yapının çalışma prensibi simetric ve asimetric fotonik kristallerin arasındaki faz kırılma indisi farkına dayanır. Tasarlanan konfigürasyonun yardımıyla belirli bir frekans bölgesinde, temel mod yüksek mertebeli modlara çevrilebilir. Ayrıca, yüzey mod fotonik kristaller kullanılarak polarizasyondan bağımsız dalga kılavuzu tasarlanmıştır. Önerilen dalga kılavuzu yapısı hem enine-elektrik hem de enine-manyetik polarizasyonlar için çalışır. Yüzey modunun frekans aralığına sahip olan ışık dalgası önerilen yapının yüzeyi boyunca düşük kayıp ile ilerleyebilir. Fotonik kristallerin diğer bir incelenen uygulaması biyosensör konfigürasyonudur. Kırılma indisi değişimini algılamak için, fotonik kristal yapının yüzeyi değişik şekillerde bozularak yüzey modları oluşturulmuştur. Bu sensör tasarımları ile çeşitli hassasiyet değerleri elde edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Fotonik kristaller, Optik yüzey modları, Dalga kılavuzları, Yavaş ışık, Faz kayması, Polarizasyondan bağımsız dalga kılavuzu, Sensörler

**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. – July 2013

**Nur ERİM**

**MODIFIED PERIODIC PHOTONIC STRUCTURES FOR SURFACE MODE  
AND MODE CONVERTERS**

**ABSTRACT**

Photonic crystals are periodic dielectric structures that can be used for controlling the propagation of light. Recently, many researchers explore photonic crystal structures for different purposes due to their unique bandgap properties. In this thesis, various square lattice and triangular lattice photonic crystals are investigated by utilizing finite difference time domain method and plane wave expansion method. Slow light properties of optical surface modes are explored. The group refractive index and bandwidth of the structure can be arranged by manipulating the geometrical parameters at the surface. The low group velocity dispersion behavior of the surface mode photonic crystal is demonstrated. Additionally, a heterostructure which consist of asymmetric and symmetric photonic crystals is examined for the mode-order conversion purpose. The operating principle of the proposed structure is based on the phase refractive index difference between symmetric and asymmetric photonic crystal. By the help of designed configuration, at a certain frequency region fundamental mode can be converted to higher order modes. Furthermore, polarization-independent waveguide is designed by using surface mode photonic crystals. The proposed waveguide structure works for both transverse-electric and transverse –magnetic polarizations. The light wave that has the frequency interval of surface mode can propagate with low loss along the surface of the proposed structure. The other investigated application of photonic crystals is bio-sensor configuration. In order to sense the refractive index change, surface modes are created by perturbing the surface of the photonic crystal structure in different ways. With these sensor designs, various sensitivity values are achieved.

**Keywords:** Photonic crystals, Optical surface modes, Waveguides, Slow light, Phase shift, Polarization-independent waveguide, Sensors

## TEŞEKKÜR

Çalıőmalarım boyunca bilgilerini ve engin deneyimlerini her zaman benimle paylaőan, değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren ve ayrıca hayata yaklaőımıyla bana örnek olan saygıdeğer hocam Doç. Dr. Hamza KURT'a, yine kıymetli tecrübelerinden faydalandığım TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerine teőekkürü bir borç bilirim.

Araőtırmalarım süresince bana her konuda yardımcı olan ve Nanofotonik Araştırma Laboratuvarı'nda birlikte çalıőtığım eőim Muhammed Necip ERİM'e ve laboratuvarda çalıőan diğer arkadaşlara teşekkür ederim.

Ayrıca, beni bugünlere getiren ve hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini benden esirgemeyen anne ve babama sonsuz minnet ve teőekkürlerimi sunarım.

Son olarak da yüksek lisans eğitimim boyunca sağladığı maddi desteğinden dolayı TÜBİTAK BİDEB'e teőekkürlerimi sunarım.

## İÇİNDEKİLER

	<b>Sayfa</b>
ÖZET	iii
ABSTRACT	iv
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER	vi
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	viii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	ix
KISALTMALAR	xii
SEMBOL LİSTESİ	xiii
1. GİRİŞ	1
1.1. Tanıtım.....	1
1.2. Kare Örgü Dağılımına Sahip İki Boyutlu Fotonik Kristaller.....	2
1.3. Üçgen Örgü Dağılımına Sahip İki Boyutlu Fotonik Kristaller.....	4
1.4. İki Boyutlu Periyodik Yapılar İçin PWE Metodu.....	5
1.5. İki Boyutlu Periyodik Yapılar için FDTD Metodu.....	7
2. İKİ BOYUTLU FOTONİK KRİSTAL YAPILARIN OPTİK YÜZEY MODLARI KULLANILARAK YAVAŞ IŞIK ELDE EDİLMESİ	10
2.1. Giriş.....	10
2.2. Yapının Tasarımı ve Frekans Alanında Analizi.....	11
2.3. Yavaş Işık Yüzey Modunun Zaman Düzleminde Analizi.....	18
2.4. Sonuçlar.....	23
3. MOD MERTEBE ÇEVİRİCİSİ İÇİN DÜŞÜK SİMETRİYE SAHİP FOTONİK KRİSTAL YAPI KULLANILMASI	25
3.1. Giriş.....	25
3.2. Asimetrik Fotonik Kristal Mod Çeviricisi ve Spektral Analizi.....	27

3.3. Yapının Zaman Düzlemindeki Analizi.....	31
3.4. Sonuçlar.....	39
4. FOTONİK KRİSTAL YÜZEY MODLARI İLE POLARİZASYONDAN BAĞIMSIZ DALGA KILAVUZU VE BİYONSENSÖR TASARIMI	40
4.1. Giriş.....	40
4.2. Yüzey Modu İle Polarizasyondan Bağımsız Dalga Kılavuzu Tasarımı.....	41
4.3. Yapının zaman düzleminde analizi.....	43
4.4. Etkin Ortam Teorisi.....	44
4.5. Fotonik Kristal Yüzey Modu Biyosensör Yapısının Tasarımı.....	45
4.6. Tasarlanan Optik Biyosensörün Algılama Mekanizması.....	46
4.7. Üçgen Örgü Dağılımına Sahip Fotonik Kristal ile Tasarlanan Optik Sensör Konfigürasyonu.....	47
4.8. Sonuçlar.....	49
5. SONUÇLAR	51
KAYNAKLAR	53
ÖZGEÇMİŞ	59



## ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Çalışma frekansı bölgesinde iletim, faz kayması ve genlik karşılaştırması açısından mod çevirme performansı	37

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil		Sayfa
Şekil 1.1.	(a) Hava ortamı üzerinde dielektrik çubuklardan oluşan kare örgü dağılımdaki fotonik kristal yapısı. Çubukların yarıçapı $r=0,20a$ 'dır. (b) Kare örgü dağılımı için indirgenemeyen Brillouin bölgesi.	2
Şekil 1.2.	Kare örgü dağılımındaki fotonik kristalin hem TM hem de TE polarizasyonlar için bant diyagramı. Dielektrik çubuğun yarıçapı $r=0,20a$ 'dır. Çubukların kırılma indisi 3,46 olarak alınmıştır.	3
Şekil 1.3.	Işığın dalga kılavuzu içerisinde ilerleyişi.	3
Şekil 1.4.	(a) Hava delikler ve dielektrik arka plandan oluşan üçgen örgü dağılımdaki fotonik kristal yapısı. Deliklerin yarıçapı $r=0,30a$ 'dır. (b) Üçgen örgü dağılımı için indirgenemeyen Brillouin bölgesi.	4
Şekil 1.5.	Üçgen örgü dağılımındaki fotonik kristalin hem TM hem de TE polarizasyonlar için bant diyagramı. Dispersiyon diyagramı hesaplatılırken deliklerin yarıçapı $r=0,30a$ ve arka planın kırılma indisi 3,46 olarak alınmıştır.	5
Şekil 2.1.	Önerilen yavaş ışık yapısının şematik gösterimi. Deliklerin çapı $d_1=0,60a$ ve örgü sabiti $a=380$ nm olarak seçilmiştir. Hava-fotonik kristal arayüzeyinin yanındaki deliklerin çapı ise $d_2=0,56a$ 'dır [6].	12
Şekil 2.2.	(a) Yüzeydeki deliklerin çapları $0,54a$ ve $0,72a$ arasında $0,02a$ aralıklarla değiştiğinde elde edilen bant diyagramlarından toplanan yüzey modlarının dispersiyon eğrileri. Şekilde gösterilen çizgiler yüzey modlarını temsil etmektedir. Deliğin çapı artırıldığında, yüzey modları daha yüksek frekanslara kaymaktadır. (b) Optik yüzey modlarının dispersiyon eğrilerinin büyütülmüş görüntüsü. PWE metodunda kullanılan süper hücre ise (a) ve (b) arasında gösterilmiştir.	13
Şekil 2.3.	Optik yüzey modlarının grup indisi dağılımları. Yüzeydeki deliklerin çapı artırıldığında, $n_g$ değerleri de artar. Şeklin üstündeki yeşil ok $d_2$ parametresinin artış yönünü göstermektedir.	14
Şekil 2.4.	(a) $d_2$ 'ye göre sabit grup indisi değişimi (b) Bant genişliğinin $d_2$ değerlerine olan bağımlılığı.	15
Şekil 2.5.	Yüzeydeki deliklerin çapının değişimine karşılık grup indisi ve bant genişliği çarpımı.	16
Şekil 2.6.	Seçilen iki durum (a) $d_2=0,56a$ ve (b) $d_2=0,66a$ için grup hızı dispersiyonunun grafikleri.	17
Şekil 2.7.	Seçilen iki durum (a) $d_2=0,56a$ ve (b) $d_2=0,66a$ için üçüncü dereceden dispersiyon grafikleri.	18
Şekil 2.8.	İki farklı $n_g$ değeri için ilerleme mesafesine göre zaman	

- gecikmesi bilgisi sunulmuştur. Grup indisi değerleri  $d_2=0,66a$  ve  $d_2=0,56a$  için sırasıyla 20,03 ve 9,93 olur. 19
- Şekil 2.9. (a) ve (b)  $d_2=0,56a$  için iki farklı ölçüm noktasındaki optik darbelerin zamansal gösterimleri. Benzer şekilde, (c) ve (d) de  $d_2=0,66a$  için zaman alanında gösterimleri. 20
- Şekil 2.10. (a) Kusur çapı  $d_2=0,56a$  için, yapının manyetik alan dağılımı. Bu dağılım PWE metodu kullanılarak elde edilmiştir. (b) Yavaş yüzey modunun uyarılmasından sonraki ışık hareketinin fotonik kristalin yüzeyi boyunca anlık görüntüsü.  $d_2=0,66a$  için frekans ve zaman düzleminde yapılan hesaplamalardan elde edilen manyetik alan yayılımları sırasıyla (c) ve (d)'de sunulmuştur. Kırmızı ve mavi renkler sırasıyla pozitif ve negatif manyetik alanları göstermektedir. 22
- Şekil 3.1. Modifiye edilmiş halka şeklindeki ve normal fotonik kristalin birim hücrelerinin geometrik tasarımları (a) ve (b)'de gösterilmiştir. (c) Asimetrik fotonik kristal için ilgili Brillouin bölgesinin gösterimi [73]. 27
- Şekil 3.2. (a) Modifiye edilmiş halka şeklindeki ve normal fotonik kristalin dispersiyon eğrileri ve (b) faz indis dağılımları. İki grafikte de eğriler asimetrik fotonik kristal için kırmızı düz çizgi ile gösterilirken, simetrik fotonik kristal için siyah kesikli çizgiyle gösterilmiştir. Çalışma frekansı aralığı cam göbeği rengine boyanmıştır. Normal fotonik kristal ve modifiye edilmiş fotonik kristalin ikinci bant eş-frekans konturları sırasıya (c) ve (d)'de gösterilmiştir. 30
- Şekil 3.3. Fotonik kristal heteroyapıya sahip olan mod-mertebe çeviricisinin şematik gösterimi. 31
- Şekil 3.4. (a) Fotonik kristal yapının ve (b) yapı yukarısına asimetrik fotonik kristaller 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 alan genlik profilleri (c)'deki gibi çizdirilmiştir. 33
- 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 kendiliğinden yönlenme bölgesini göstermektedir. 35
- Şekil 3.6. (a) Mod çevirici yapının sembolik çizimi. (b) Yapının orta kısmı modifiye edilmiş asimetrik fotonik kristalden kenarları ise simetrik fotonik kristalden 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) Çıkıştaki $TM_2$ modun elektrik alan profili.	38
Şekil 4.1.	Tasarlanan fotonik kristal dalga kılavuzu yapısının şematik gösterimi [82, 83].	42
Şekil 4.2.	Polarizasyondan bağımsız dalga kılavuzunun (a) TE ve (b) TM polarizasyon için dispersiyon diyagramlarının gösterimi. Hesaplamalarda kullanılan süper hücre diyagramlarının arasında gösterilmiştir.	42
Şekil 4.3.	(a) TM ve (b) TE polarizasyon için zaman düzlemindeki simülasyonlardan elde edilen sonuçlar.	43
Şekil 4.4.	(a) Fotonik kristal yüzey modu biyosensörün şematik gösterimi. Şekildeki oklar kaynaktan çıkan ışığın ilerleme yönünü göstermektedir. (b) İlgili yüzey modunun dispersiyon diyagramı. (c) Kesikli çizgi boyunca elektrik alan dağılımı. Kullanılan süper hücre grafiğin altında verilmiştir [3].	45
Şekil 4.5.	(a) Farklı kırılma indis değerleri için çıkış gücü. (b) Normalize frekansın kırılma indis değişimine göre çizimi.	47
Şekil 4.6.	(a) Üçgen örgü dağılımına ve yüzeyinde hava yarığa sahip olan fotonik kristal sensörün şematik gösterimi. (b) Tasarlanan üçgen örgü dağılımındaki fotonik kristal yapının dispersiyon diyagramı.	48
Şekil 4.7.	(a) Kırılma indisi değişimine bağlı olarak çıkış gücünün kayması. (b) Kırılma indisi değişimine göre normalize frekans grafiği.	49

## KISALTMALAR

### Kısaltmalar Açıklama

<b>FDTD</b>	Sonlu Farklar Zaman Düzlemi (Finite-Difference Time-Domain)
<b>PML</b>	Kusursuz uyuşan katman (Perfectly Matched Layer)
<b>PWE</b>	Düzlemsel Dalga Açılımı (Plane Wave Expansion)
<b>RIU</b>	Kırılma İndisi Birimi (Refractive Index Unit)
<b>TE</b>	Enine Elektrik (Transverse Electric)
<b>TM</b>	Enine Manyetik (Transverse Magnetic)

## SEMBOL LİSTESİ

Bu çalışmada kullanılmış olan simgeler açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklama</b>
$a$	Örgü sabiti
$c$	Işığın boşluktaki hızı
$d$	Çap
$E$	Elektrik alan
$G$	Ters örgü vektörü
$H$	Manyetik alan
$k$	Dalga vektörü
$L$	Yapı uzunluğu
$n$	Kırılma indisi
$n_g$	Grup kırılma indisi
$n_p$	Faz kırılma indisi
$R$	Yarıçap
$v_g$	Grup hızı
$W$	Yapı genişliği
$\beta_2$	Grup hızı dispersiyonu
$\beta_3$	Üçüncü dereceden dispersiyon
$\Delta n$	Kırılma indisi değişimi
$\Delta n_p$	Faz kırılma indisi farkı
$\Delta s$	Kayma miktarı
$\Delta \lambda$	Dalga boyu değişimi
$\Delta \phi$	Faz farkı
$\Delta \omega$	Frekans farkı
$\epsilon$	Dielektrik sabiti
$\lambda$	Dalga boyu
$\omega$	Açısal frekans

# 1. GİRİŞ

## 1.1. Tanıtım

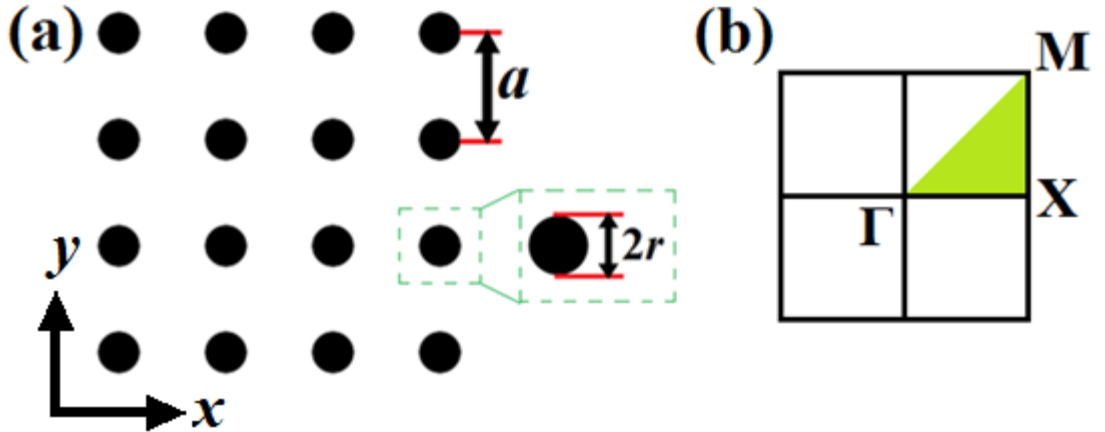
Fotonik kristaller fotonların hareketlerini kontrol edebilen ve fotonlara yön verebilen bir, iki veya üç boyuttaki periyodik dielektrik yapılardır [1]. Fotonik kristallerin en dikkat çekici özelliklerinden bir tanesi yasaklı bant aralığına sahip olmasıdır [2]. Yasaklı bant aralığında herhangi bir frekansa sahip olan ışık dalgası fotonik kristal yapıya geldiğinde geri yansıtılır ve ışık yapı boyunca ilerleyemez. Bu yasaklı bant aralığı özelliği, fotonik kristal sensörler [3-5], yavaş ışık [6, 7], dalga kılavuzları [8, 9] ve lazerler [10, 11] gibi birçok uygulama için kullanılmıştır. Fotonik kristal yapıların tasarlanması için fotonik bant boşluğunun genişliğinin ve yerinin yani bulunduğu frekans bölgesinin ayarlanması gerekmektedir. Bu da yapının çeşitli geometrik parametrelerinin veya kırılma indisinin değiştirilmesiyle mümkün olur.

Fotonik kristallerin periyodikliği çeşitli şekillerde bozularak yasaklı bant bölgesinde modlar oluşturulması mümkündür. Örneğin, yapıda çizgi kusuru oluşturarak dalga kılavuzu modu, nokta kusuru oluşturarak kavite modu veya yapı yüzeyinde bozukluk oluşturarak yüzey modu elde edilebilir. Dalga kılavuzu modunu oluşturmak için yapıdaki dielektrik çubuklar veya hava delikler çizgi boyunca ortadan kaldırılır ve yasaklı bant aralığında dalga kılavuzu modu oluşur. Oluşan modun frekans aralığına sahip olan ışık az kayıpla açılan yol boyunca ilerleyebilir. Bu sayede ışık dalgası fotonik bant boşluğu etkisi ile yönlendirilebilir. Yüzey modunu elde etmek için ise yapının yüzeyinin periyodikliği değişik şekillerde bozulabilir. Örneğin yapının yüzeyindeki çubukların veya deliklerin büyüklükleri veya kırılma indisleri değiştirilebilir. Bu durumda yasaklı bant bölgesinde yüzey modu oluşur ve yapının yüzeyine, doğru bir frekansta ışık gönderildiğinde bu ışık fotonik kristal-hava arayüzüne hapsolarak ilerler. Burada ışığın ilerlemesi fotonik kristal tarafından fotonik bant boşluğunun etkisi ile hava ortamı kısmında ise tam yansımanın etkisi ile sağlanır.

Fotonik kristal ile gerçekleştirilen tasarımlarda genellikle dielektrik çubukların hava ortamı üzerine kare örgü dağılımı ve hava deliklerin dielektrik arka plan üzerine üçgen örgü dağılımı konfigürasyonları kullanılır.

## 1.2. Kare Örgü Dağılımına Sahip İki Boyutlu Fotonik Kristaller

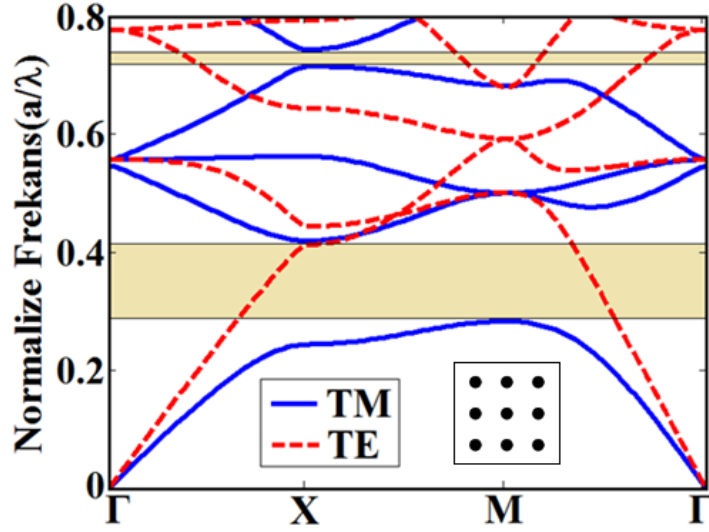
Hava ortamı üzerine kare örgü dağılımına sahip dielektrik çubuklardan oluşan fotonik kristal yapısı Şekil 1.1(a)'da gösterilmiştir. Fotonik kristal yapıların periyodikliği örgü sabiti  $a$  ile tanımlanmıştır ve birim hücreler arası mesafe  $a$  kadardır. Bu örgü sabiti fotonik kristal yapının fabrikasyon işleminde, çalışılmak istenen dalga boyuna göre ayarlanabilir. Şekildeki dielektrik çubukların kırılma indisi 3,46'dır ve yarıçapları ise  $r=0,20a$ 'dır.



Şekil 1.1. (a) Hava ortamı üzerinde dielektrik çubuklardan oluşan kare örgü dağılımdaki fotonik kristal yapısı. Çubukların yarıçapı  $r=0,20a$ 'dır. (b) Kare örgü dağılımı için indirgenemeyen Brillouin bölgesi.

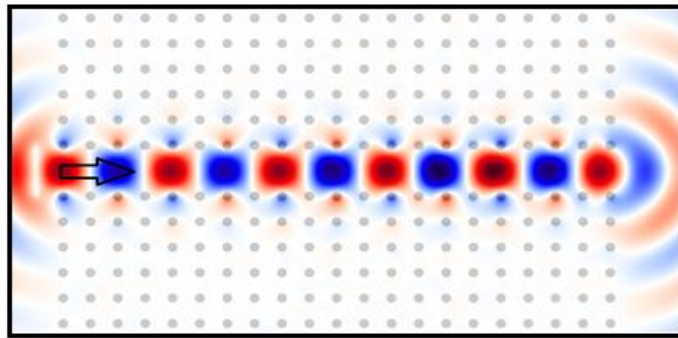
Kare örgü dağılımındaki fotonik kristal yapısı için indirgenemeyen Brillouin bölgesi Şekil 1.1(b)'de verilmiştir. Fotonik kristalin bant diyagramı şekilde gösterilen  $\Gamma$ -X-M- $\Gamma$  yönü boyunca hesaplatılmıştır.





Şekil 1.2. Kare örgü dağılımındaki fotonik kristalin hem TM hem de TE polarizasyonlar için bant diyagramı. Dielektrik çubuğun yarıçapı  $r=0,20a$ 'dır. Çubukların kırılma indisi 3,46 olarak alınmıştır.

Hesaplatılan dispersiyon diyagramları hem TM hem de TE polarizasyonlar için Şekil 1.2'de verilmiştir. Burada mavi düz çizgiler TM modu, kırmızı kesikli çizgiler ise TE modu göstermektedir. TM polarizasyon için oluşan fotonik bant boşlukları şekildeki gibi renklendirilmiştir. Bant yapısına bakıldığında, kare örgü dağılımına sahip dielektrik çubuklar için TM polarizasyonda yasaklı bant aralığı gözlemlenirken TE polarizasyonda yasaklı bant aralığı bulunmamaktadır. Bu yüzden dielektrik çubukların kare örgü dağılımına sahip fotonik kristallerle yapılan çalışmalarda genellikle TM polarizasyon tercih edilir.

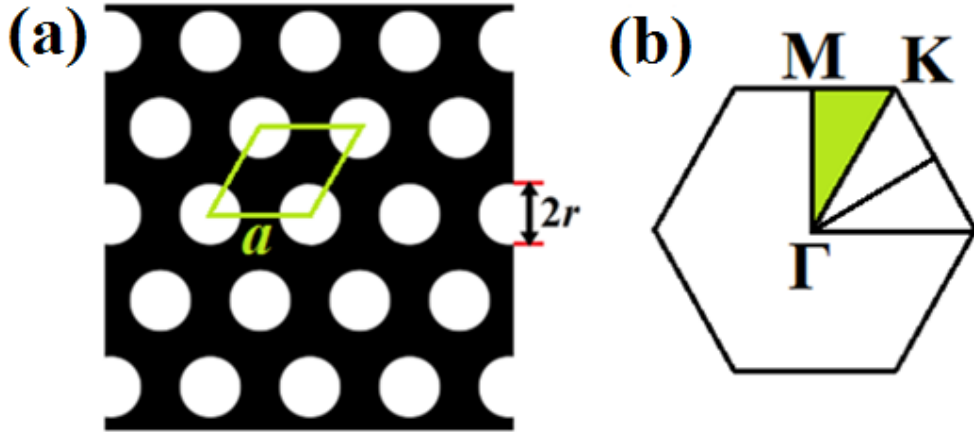


Şekil 1.3. Işığın dalga kılavuzu içerisinde ilerleyişi.

Şekil 1.1(a)'daki yapının periyodikliği çizgi kusuru oluşturarak bozulabilir. Fotonik kristalin  $x$ -yönünde bir sırasındaki dielektrik çubuklar kaldırıldığında dalga kılavuzu oluşur ve TM polarizasyon için yasaklı bant aralığında dalga kılavuzu modu elde edilir. Bu modun frekans aralığından seçilen bir frekansa sahip olan kaynaktan gönderilen ışık dalgası Şekil 1.3'deki gibi fotonik kristal yapı içerisine dağılmadan dalga kılavuzuna hapsolarak ilerler.

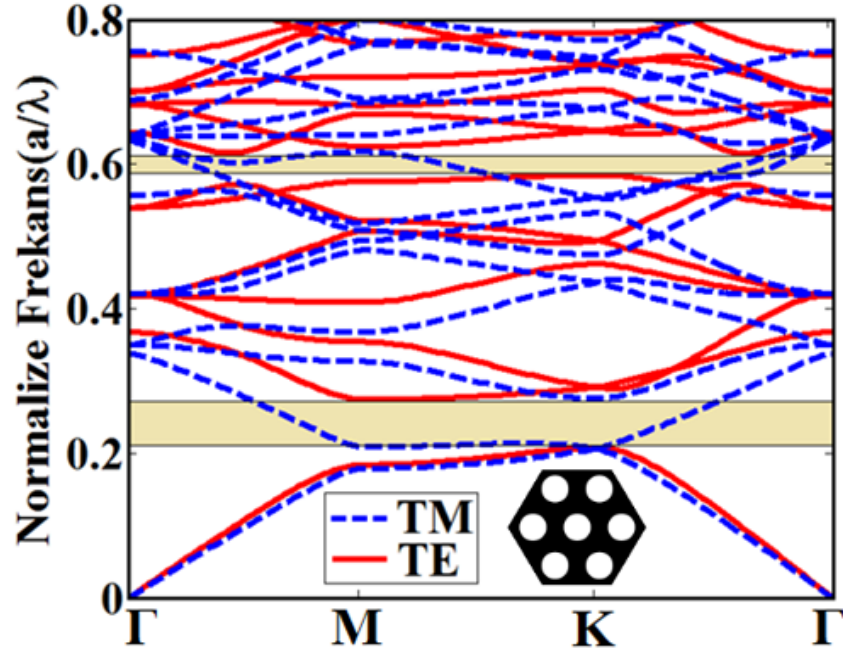
### 1.3. Üçgen Örgü Dağılımına Sahip İki Boyutlu Fotonik Kristaller

Dielektrik ortam üzerine hava boşluklardan oluşan üçgen örgü dağılımındaki fotonik kristal yapısı Şekil 1.4(a)'daki gibidir. Şekildeki hava deliklerin yarıçapı  $0,30a$ 'dır ve arka planın kırılma indisi ise  $3,46$ 'dır. Burada örgü sabiti  $a$ 'dır.



Şekil 1.4. (a) Hava delikler ve dielektrik arka plandan oluşan üçgen örgü dağılımındaki fotonik kristal yapısı. Deliklerin yarıçapı  $r=0,30a$ 'dır. (b) Üçgen örgü dağılımı için indirgenemeyen Brillouin bölgesi.

Üçgen örgü dağılımındaki fotonik kristal yapısı için indirgenemeyen Brillouin bölgesi ise Şekil 1.4(b)'de gösterilmiştir. Üçgen örgü fotonik kristalin bant yapısı  $\Gamma$ - $M$ - $K$ - $\Gamma$  yönü boyunca hesaplatılmıştır.



Şekil 1.5. Üçgen örgü dağılımındaki fotonik kristalin hem TM hem de TE polarizasyonlar için bant diyagramı. Dispersiyon diyagramı hesaplatılırken deliklerin yarıçapı  $r=0,30a$  ve arka planın kırılma indisi 3,46 olarak alınmıştır.

TM ve TE polarizasyonlar için elde edilen dispersiyon diyagramı Şekil 1.5'deki gibidir. Burada kırmızı düz çizgiler TE polarizasyonu, mavi kesikli çizgiler ise TM polarizasyonu göstermektedir. Band diyagramına bakıldığında, hava deliklerin yarıçapı  $0,30a$  ve arka kısmın kırılma indisi 3,46 olarak seçildiğinde, üçgen örgü fotonik kristal için TE polarizasyonda yasaklı bant aralığı olduğu görülürken, TM polarizasyon için bant boşluğu bulunmamaktadır. Bu nedenle, hava deliklerin üçgen örgü dağılımına sahip fotonik kristallerde genellikle TE polarizasyonda çalışılır.

#### 1.4. İki Boyutlu Periyodik Yapılar İçin PWE Metodu

İki boyutlu fotonik kristallerde dikey doğrultuda dielektrik sabiti değişmediği için, dalga vektörü,  $k$ ,  $z$ -yönünde herhangi bir bileşene sahip değildir. Bu durumda Maxwell denklemleri aşağıdaki şekilde ifade edilebilir [1].  $\vec{r} = xa_x + ya_y$  olarak kabul edildiğinde;

$$-\frac{1}{\varepsilon(r)} \left\{ \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right\} \vec{E}_z(r) = \frac{\omega^2}{c^2} \vec{E}_z(r) \quad (1.1)$$

$$\left\{ \frac{\partial}{\partial x} \frac{1}{\varepsilon(r)} \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \frac{1}{\varepsilon(r)} \frac{\partial}{\partial y} \right\} \vec{H}_z(r) = \frac{\omega^2}{c^2} \vec{H}_z(r) \quad (1.2)$$

denklemleri  $E_z$  ve  $H_z$  için elde edilir. Denklem 1.1 ve 1.2 de yer alan  $1/\varepsilon(r)$  fonksiyonunun Fourier açılımı,

$$\frac{1}{\varepsilon(r)} = \sum_G K_G \exp(j\vec{G} \cdot \vec{r}) \quad (1.3)$$

şeklinde ifade edilebilir. Denklem 1.3'te yer alan  $K_G$  ise,

$$K_G = \frac{1}{A} \iint_S \frac{1}{\varepsilon(r)} \exp(-j\vec{G} \cdot \vec{r}) dS \quad (1.4)$$

şeklinindedir. Denklem 1.4'teki  $S$  birim hücreyi,  $A$  ise fotonik kristal için birim hücrenin alanını ifade etmektedir.  $G$  ise ters örgü vektörüdür ve  $\vec{G} = g_1 x + g_2 y$  şeklinde ifade edilmektedir. Burada, kare örgü fotonik kristaller için  $g_1 = 2\pi m/a$  ve  $g_2 = 2\pi n/a$  şeklinde tanımlanırken, üçgen örgü fotonik kristaller için  $g_1 = \frac{2\pi}{a}(y + x\sqrt{3})/2$  ve  $g_2 = \frac{2\pi}{a}(y - x\sqrt{3})/2$  olarak ifade edilmektedir. Birim hücre vektörleri kare örgü dağılıma sahip fotonik kristal için  $\vec{a} = a\hat{x} + a\hat{y}$  ve üçgen örgü dağılıma sahip fotonik kristal için ise  $\vec{a} = a(\hat{y} + \hat{x}\sqrt{3})/2 + a(\hat{y} - \hat{x}\sqrt{3})/2$  şeklindedir.

$$\begin{aligned} \vec{H}_z(r) &= \sum_G h_{G,k} \exp[i(\vec{k} + \vec{G}) \cdot \vec{r}] \\ &= \exp(i\vec{k} \cdot \vec{r}) \sum_G h_{G,k} \exp(i\vec{G} \cdot \vec{r}) = \exp(i\vec{k} \cdot \vec{r}) v_k(\vec{r}) \end{aligned} \quad (1.5)$$

$$\begin{aligned}
\vec{E}_z(\vec{r}) &= \sum_G e_{G,k} \exp[i(\vec{k} + \vec{G}) \cdot \vec{r}] \\
&= \exp(i\vec{k} \cdot \vec{r}) \sum_G e_{G,k} \exp(i\vec{G} \cdot \vec{r}) = \exp(i\vec{k} \cdot \vec{r}) v_k(\vec{r})
\end{aligned} \tag{1.6}$$

olarak yazılabilmektedir. 1.5 ve 1.6 denklemlerinde yer alan  $h$  ve  $e$  sırasıyla manyetik ve elektrik alanların Fourier bileşenlerini göstermektedir. Bu denklemler 1.1 ve 1.2 denklemlerinde yerlerine yazıldığında öz değer denklemleri aşağıdaki gibi elde edilir.

$$-\sum_G K_G(\vec{G} - \vec{G}')(\vec{k} + \vec{G}') \times \{(\vec{k} + \vec{G}') \times \vec{E}_{z,kn}(\vec{G}')\} = \frac{\omega_{kn}^2}{c^2} \vec{E}_{z,kn}(\vec{G}) \tag{1.7}$$

$$-\sum_G K_G(\vec{G} - \vec{G}')(\vec{k} + \vec{G}') \times \{(\vec{k} + \vec{G}') \times \vec{H}_{z,kn}(\vec{G}')\} = \frac{\omega_{kn}^2}{c^2} \vec{H}_{z,kn}(\vec{G}) \tag{1.8}$$

Denklem 1.7 ve 1.8 nümerik olarak çözüldüğünde tasarlanan yapının bant diyagramı hesaplanabilmektedir.

### 1.5. İki Boyutlu Periyodik Yapılar için FDTD Metodu

Fotonik kristalin uzaysal örgüsünde yer alan herhangi bir nokta  $(i, j, k) = (i\delta, j\delta, k\delta)$  şeklinde tanımlanırsa, herhangi bir uzay ve zaman fonksiyonu da  $F^n(i, j, k) = F(i\delta, j\delta, k\delta, n\delta t)$  olarak tanımlanabilir. Burada  $\delta = \delta x = \delta y = \delta z$  terimleri uzaydaki artışı,  $\delta t$  terimi ise zamandaki artışı temsil etmektedir. Uzay ve zaman alanındaki türevler için sonlu fark ifadeleri sırasıyla yazılırsa [12, 13];

$$\frac{\partial F^n(i, j, k)}{\partial x} = \frac{F^n\left(i + \frac{1}{2}, j, k\right) - F^n\left(i - \frac{1}{2}, j, k\right)}{\delta} + O(\delta^2) \tag{1.9}$$

$$\frac{\partial F^n(i, j, k)}{\partial t} = \frac{F^{n+1/2}(i, j, k) - F^{n-1/2}(i, j, k)}{\delta t} + O(\delta t^2) \quad (1.10)$$

ifadeleri elde edilir. Bu metodun Maxwell denklemlerine uygulanması amacıyla;

$$\frac{\partial H_x}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left( \frac{\partial E_y}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial y} \right) \quad (1.11)$$

$$\frac{\partial E_x}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left( \frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} - \sigma E_x \right) \quad (1.12)$$

denklemleri kullanılacaktır. Denklem 1.9 ve 1.10'da yer alan ifadeler denklem 1.11 ve 1.12'de manyetik alan ve elektrik alan için uygulandığında;

$$H_x^{n+1/2} \left( i, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2} \right) = H_x^{n-1/2} \left( i, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2} \right) + \frac{\delta t}{\mu \left( i, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2} \right) \delta} \left[ \begin{array}{l} E_y^n \left( i, j + \frac{1}{2}, k + 1 \right) - E_y^n \left( i, j + \frac{1}{2}, k \right) + \\ E_z^n \left( i, j, k + \frac{1}{2} \right) - E_z^n \left( i, j + 1, k + \frac{1}{2} \right) \end{array} \right] \quad (1.13)$$

$$E_x^{n+1} \left( i + \frac{1}{2}, j, k \right) = \left[ 1 - \frac{\sigma \left( i + \frac{1}{2}, j, k \right) \delta t}{\varepsilon \left( i + \frac{1}{2}, j, k \right)} \right] E_x^n \left( i + \frac{1}{2}, j, k \right) + \frac{\delta t}{\varepsilon \left( i + \frac{1}{2}, j, k \right) \delta} \left[ \begin{array}{l} H_z^{n+1/2} \left( i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}, k \right) - H_z^{n+1/2} \left( i + \frac{1}{2}, j - \frac{1}{2}, k \right) + \\ H_y^{n+1/2} \left( i + \frac{1}{2}, j, k - \frac{1}{2} \right) - H_y^{n+1/2} \left( i + \frac{1}{2}, j, k + \frac{1}{2} \right) \end{array} \right] \quad (1.14)$$

ifadeleri elde edilmektedir. Elde edilen 1.13 ve 1.14 denklemlerinin nümerik olarak çözülmesi ile fotonik kristallerin zaman alanındaki analizleri yapılabilmektedir.

Hesaplanan sonuçların doğruluğunu garantilemek için  $\delta$  değeri, minimum dalgaboyunun küçük bir kısmı kadar alınmalıdır. Böylelikle elektromanyetik alan uzaysal artışa bağlı olarak fazla değişmez. Ayrıca  $\delta t$ 'nin 1.15 ile verilen koşulu sağlaması gerekmektedir.

$$v_{maks} \delta t \leq \left( \frac{1}{\delta x^2} + \frac{1}{\delta y^2} + \frac{1}{\delta z^2} \right)^{-1/2} \quad (1.15)$$

İfadedeki  $v_{maks}$  dalganın maksimum faz hızını göstermektedir.

FDTD hesaplamalarında, yapının kenar kısımlarındaki geri yansımaları engellemek için yapının etrafına PML konulmalıdır.

## 2. İKİ BOYUTLU FOTONİK KRİSTAL YAPILARIN OPTİK YÜZEY MODLARI KULLANILARAK YAVAŞ IŞIK ELDE EDİLMESİ\*

### 2.1. Giriş

Periyodik dielektrik yapılar olan fotonik kristaller bir optik darbenin grup hızını ayarlamak için sıklıkla kullanılırlar [7, 14]. Farklı kırılma indislerine sahip dielektrik malzemelerin bir, iki veya üç boyuttaki periyodik modülasyonları ile ortamlarla kuvvetli bir şekilde etkileşime giren optik modlar elde edilmesi mümkündür [1]. Optik darbenin ortamlarla etkileşim süresinin artırılması grup hızındaki azalma miktarını artırır. Fotonik kristaller, yapısal parametreleri değiştirilerek veya yeni konfigürasyonlar oluşturularak yavaş dalga oluşumunu desteklerler.

Düşük grup hızına sahip bir ışık dalgası, doğrusal ve doğrusal olmayan optik etkilerden faydalanılması açısından büyük önem taşımaktadır. Bant diyagramındaki bantların uç kısımlarında grup kırılma indisi ( $n_g$ ) değeri hızlı bir şekilde sonsuza doğru gider. Yavaş ışık elde edilirken grup hızının frekansa ne kadar bağımlı olduğunu gösteren grup hızı dispersiyonu göz önünde bulundurulmalıdır. Bir optik darbenin yapı içerisinde ilerlerken şeklinde bozulma olmaması ve biçimini koruması gerekir. Bu yüzden, yavaş ışık elde etmek için oluşturulan yapılarda esas hedef fotonları başarılı bir şekilde yavaşlatıp, durdurup ve salıverirken bunu düşük grup hızı dispersiyonu ile başarmaktır. Yavaş ışık ve düşük grup hızı dispersiyonu etkileri araştırmacıları yüksek simetri noktalarından uzak düz eğriler elde etmek için yeni konfigürasyonlar aramaya yöneltir.

İki boyutlu fotonik kristaller kullanılarak yavaş ışık elde edilmesi için yapılan çalışmalar üç kategoriye ayrılabilir. Fotonik kristal yapıların periyodikliği simetri doğrultusunda bozularak dalga kılavuzu oluşturulur. Bu dalga kılavuzuna ait olan mod ayarlanarak yavaş ışık elde edilmesi sağlanabilir [15-33]. İkinci durumda ise

---

\* Kurt, H., Erim, N., Üstün, K., Slow light based on optical surface modes of two-dimensional photonic crystals, Journal of the Optical Society of America B, 29, 1187-1193, 2012.

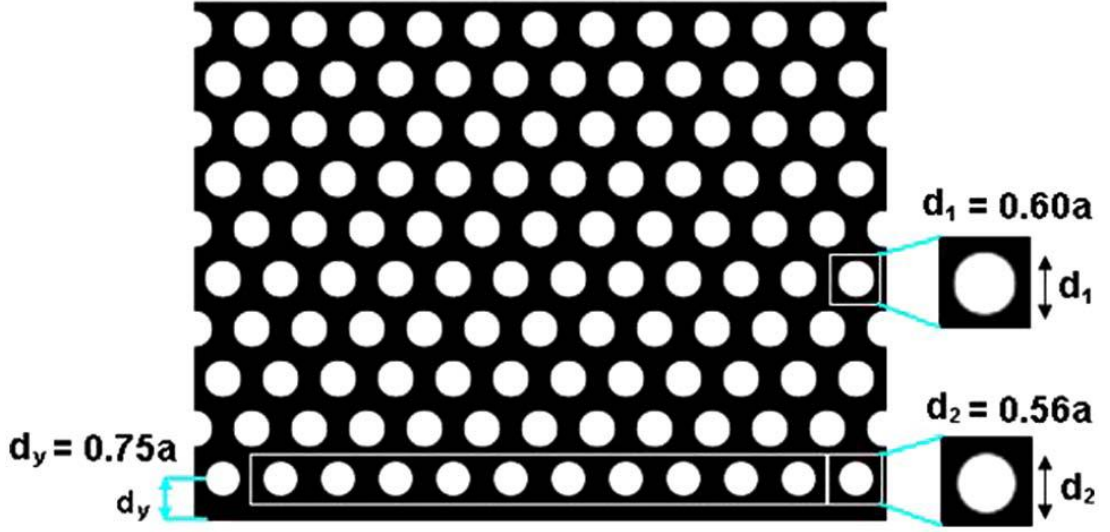


başka bir çeşit olan birleşik rezonatör optik dalga kılavuzları kullanılır [34-36]. Her bir kusur bölgesi arasındaki zayıf etkileşim optik darbeler için büyük gecikme ortaya koyar. Bu durum küçük grup hızı açısından yorumlanabilir [37]. Son kategori ise birleşik kavitelerin dikkatli bir şekilde fotonik kristal dalga kılavuzlarına yerleştirilmesi durumudur [38].

Tezin bu bölümünde, yüzey modlarını kullanan yavaş ışık fotonik yapısı önerilmiştir. İki farklı ortamın arayüzeyi uygun bir şekilde tasarlanarak ışığın burada ilerlemesi sağlanmıştır. Tasarlanan yapının bir kısmını yarı-sonsuz fotonik kristal oluştururken, diğer kısmını ise homojen hava oluşturmaktadır. Yapının bir tarafı yasaklı bant mekanizmasının etkisiyle yüzey modunu yönlendirirken, diğer kısımda ise tam yansıma gerçekleşir. Bu durum arayüzeyde ışığın kuvvetli bir şekilde hapsolmesini sağlar ve ışık darbesinin dağılımı yapısal parametrelere karşı duyarlı hale gelir. Sonuç olarak bant diyagramındaki eğrinin eğimi yapısal modifikasyonlar ile ayarlanabilir. Ayrıca fotonik kristallerde yüzey modunu çeşitli amaçlar için inceleyen birçok çalışma vardır [39-47]. Yüzey modlarının cihaz uygulamaları bakımından, lazer, kavite ve kırılma indisi sensörleri incelenmiştir [45-47].

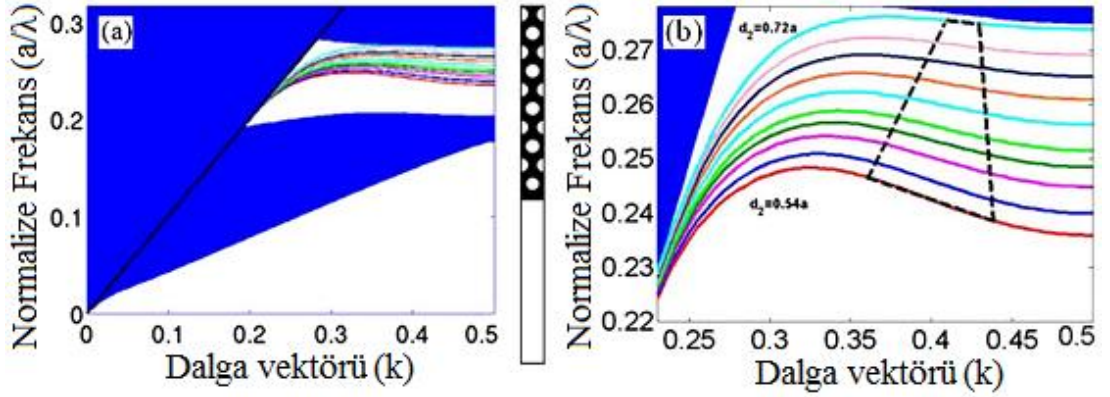
## **2.2. Yapının Tasarımı ve Frekans Alanında Analizi**

Tasarlanan fotonik kristal yapı dielektrik arka plan üzerinde üçgen örgü dağılımına sahip silindirik hava deliklerinden oluşmaktadır. Oluşturulan yapı Şekil 2.1'deki gibidir. Arka malzemenin dielektrik sabiti  $\epsilon = 12$  olarak alınmıştır ve ortamda optik soğurulma olmadığı varsayılmıştır. Örgüyü genel anlamda oluşturan deliklerin çapı  $d_1=0,60a$  olarak seçilmiştir ve buradaki  $a$  örgü sabitidir. Yüzeydeki deliklerin çapı  $d_2=0,56a$ 'dır. Yüzeydeki deliklerin merkezi ve yüzeydeki arayüz arasındaki uzaklık  $d_y$  ile gösterilmiştir ve  $0,75a$ 'ya eşittir. Bu değer  $d_2$ 'nin parametrik taraması için sabit tutulmuştur.



Şekil 2.1. Önerilen yavaş ışık yapısının şematik gösterimi. Deliklerin çapı  $d_1=0,60a$  ve örgü sabiti  $a=380$  nm olarak seçilmiştir. Hava-fotonik kristal arayüzeyinin yanındaki deliklerin çapı ise  $d_2=0,56a$ 'dır [6].

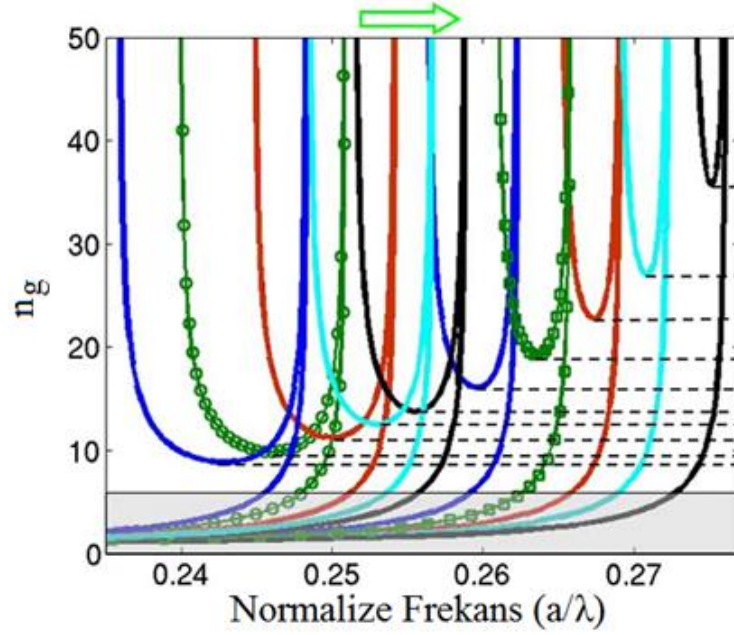
Yarı-sonsuz fotonik kristalin homojen hava ortamı tarafından sınırlandırıldığı varsayılmıştır. Bu çalışmada ışığın polarizasyonu TE olarak seçilmiştir. Yani manyetik alan periyodik düzleme diktir. PWE yönteminin [48] kullanılmasıyla  $d_2$ 'nin  $0,54a$  ve  $0,72a$  arasındaki farklı değerleri için yüzey modlarının dispersiyon diyagramları elde edilmiştir. Fotonik kristal dalga kılavuzunda hapsolmuş modlar incelenirken dikkat edilmesi gereken önemli bir husus ışık-çizgisi kavramıdır. Işık-çizgisinin üstünde kalan frekanslar yüzey boyunca hapsolmezler. Bu yüzden dispersiyon diyagramındaki bu modlar Şekil 2.2(a) ve Şekil 2.2(b) 'den de görüldüğü gibi dikkate alınmamıştır. İlgili yüzey modunun frekansları göz önüne alındığında ışık-çizgisinin altında ve yasaklı bant aralığında yer aldığı görülmektedir. Şekil 2.2(b)'deki bantların düz kısımları kesikli çizgili dörtgenle gösterilmiştir. PWE süper hücre metodunda kullanılan düzlem dalga sayısı 19456'dır ve hesaplamalarda kullanılan süper hücre ise Şekil 2.2'nin orta kısmında verilmiştir.



Şekil 2.2. (a) Yüzeydeki deliklerin çapları  $0,54a$  ve  $0,72a$  arasında  $0,02a$  aralıklarla değiştiğinde elde edilen bant diyagramlarından toplanan yüzey modlarının dispersiyon eğrileri. Şekilde gösterilen çizgiler yüzey modlarını temsil etmektedir. Deliğin çapı artırıldığında, yüzey modları daha yüksek frekanslara kaymaktadır. (b) Optik yüzey modlarının dispersiyon eğrilerinin büyütülmüş görüntüsü. PWE metodunda kullanılan süper hücre ise (a) ve (b) arasında gösterilmiştir.

Yüzeydeki deliklerin çapı  $0,54a$ 'dan artırılmaya başlandığında, dalga kılavuzu kısmındaki dielektrik malzeme miktarı azalmış olur. Yapılan bu değişiklik beklenildiği gibi kılavuzlu yüzey modlarının frekans ekseninde daha yukarılara hareket etmesini sağlar. Modların kayması ile birlikte bantların eğimleri azalır ve bantların düz kısımlarında da azalma meydana gelir. Bu gözlenen değişikliklerin nicel sonuçları grup hızını veya grup kırılma indisini hesaplarken listelenecek ve uygun bir başarımlı ölçüsü tanımlanacaktır.

İlgili modların grup hızları, frekansın dalga vektörüne (hareket sabiti,  $k$ ) göre türevi  $v_g = \partial\omega(k)/\partial k$ , alınarak hesaplanır. Grup kırılma indisi değerlerine ise  $n_g(\omega) = c/v_g$  formülü kullanılarak ulaşılır. Burada  $c$  ışığın boşluktaki hızıdır. Formüller kullanılarak elde edilen grup indisi spektrumlarının sonuçları  $d_2$ 'nin  $0,54a$  ve  $0,72a$  arasındaki farklı değerleri için Şekil 2.3'deki gibidir. Şekilden de görüldüğü gibi, grup indisi eğrisi belirli bir frekans aralığında U-şeklinde bir forma sahiptir. Bu durum U-şeklindeki bandın alt kısmında dikkate değer bir bant genişliği ile düşük grup hızı dispersiyonu olduğunu doğrulamaktadır. Yatay kesik çizgiler ise her bir özel durum için minimum grup kırılma indisi değerlerini göstermektedir.



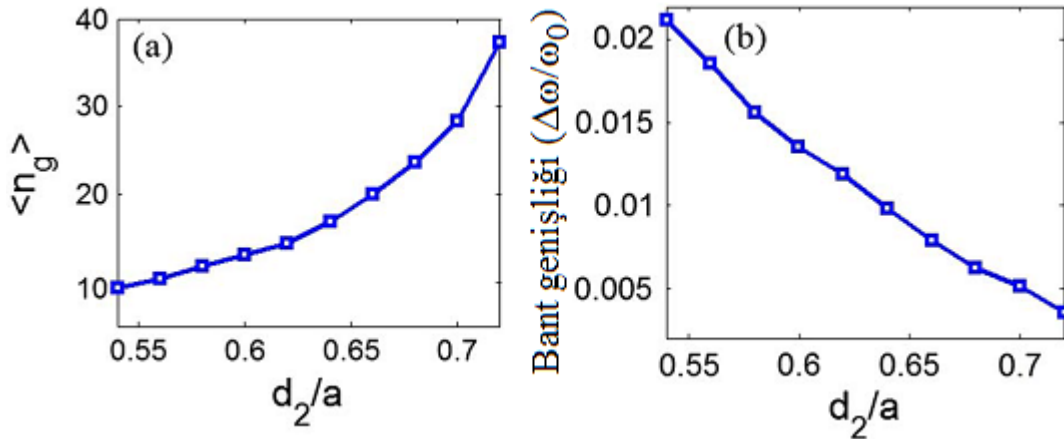
Şekil 2.3. Optik yüzey modlarının grup indisi dağılımları. Yüzeydeki deliklerin çapı artırıldığında,  $n_g$  değerleri de artar. Şeklin üstündeki yeşil ok  $d_2$  parametresinin artış yönünü göstermektedir.

Bant genişliği ve grup indisi arasındaki ilişki Şekil 2.3’de görülmektedir [49]. Şekildeki ok yönünde minimum grup indisi değeri artarken, bant genişliği ise azalmaktadır. Ayrıca bir frekans değerine karşılık gelen iki tane grup indisi değeri vardır. Birinci  $k$ -noktası küçük grup indisini (hızlı mod) desteklerken, ikinci  $k$ -noktası ise yavaş ışık çalışma bölgesi için hedeflenen daha büyük grup indisini (yavaş mod) destekler. Yavaş modun varlığı fotonik kristal-hava arayüzeyinde hızlı modu uyarabilir. Yavaş ve hızlı mod arasındaki grup indisi farkı belirli bir mesafe ilerledikten sonra uzaysal olarak ayrılmalarına olanak sağlar. Yavaş modun, hızlı modun varlığından dolayı herhangi bir zorluk yaşanmadan etkili bir şekilde uyarılabileceği zaman düzlemindeki analizlerde gösterilecektir. Bant genişliği azaldıkça veya sabit grup indisi değeri arttıkça, bandın U-şeklindeki kısmı ve dispersiyonlu kısım arasındaki ayrılma artar. Bu değişim  $d_2$  değeri  $0,54a$ ’dan  $0,72a$ ’ya doğru gittiğinde gerçekleşir.

Şekil 2.2’deki ışık-çizgisinin altındaki dispersiyon eğrileri özel şekle sahiptir. Brillouin bölgesinin kenarından uzaktaki belirli bir  $k$ -noktasında dönme noktaları

vardır. Bu dönme noktasının iki tarafı da ortak bir frekans aralığını paylaşırlar. Bu iki kısmın eğimleri eşit değildir ve zıt işaretlere sahiptir. Daha küçük  $k$  değerlerinin olduğu kısım dispersiyonlu davranışa ve küçük grup indisine sahip olurken, daha büyük  $k$ -değerlerinin olduğu ikinci kısım ise sabit grup indisi aralığına ve daha az dispersiyonlu davranışa sahiptir.

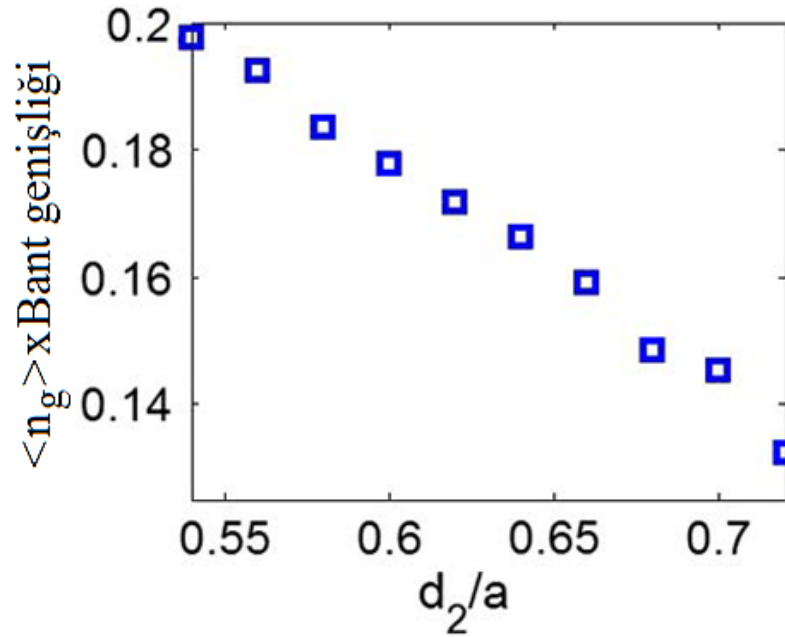
Minimum  $n_g$  ve bant genişliği Şekil 2.3'ten çıkarılmıştır. Bant genişliği  $\Delta\omega/\omega_0$  olarak gösterilmiştir. Burada  $\Delta\omega$  minimum  $n_g$  değerinin %10 aralığına karşılık gelen frekans bölgesini ve  $\omega_0$  ise sabit grup indisi eğrisinin merkez frekansını göstermektedir. Sabit grup indisi ve bant genişliği parametreleri Şekil 2.4(a) ve 4(b)'de sırasıyla sunulmuştur. Grafiklerden görüldüğü gibi,  $n_g$  değeri eksponansiyel olarak artarken, bant genişliği de  $d_2$ 'ye göre eksponansiyel olarak azalmaktadır. Grup indisi ve bant genişliğinin çarpımı ise başarımlı ölçüsü olarak tanımlanmıştır ve Şekil 2.5'de gösterilmiştir [50].



Şekil 2.4. (a)  $d_2$ 'ye göre sabit grup indisi değişimi (b) Bant genişliğinin  $d_2$  değerlerine olan bağımlılığı.

Grup indisinin artma ve bant genişliğinin azalma oranları eşit olmadığından,  $d_2$  değeri arttıkça grup indisi ve bant genişliğinin çarpım değeri azalır. Tanımlanan başarımlı ölçüsüne göre, yapının yavaş ışık kapasitesini artırma bakımından tercih edilen  $d_2$  değeri küçük olmalıdır. Ayrıca, mevcut yapıdaki yüzey modunu oluşturma mekanizmasının ayarlanmasıyla farklı grup indisi ve bant genişliği çarpım değerlerinin elde edilmesi mümkündür. Kabul edilen başarımlı ölçüsü tanımlaması

yavaş ışık çalışmalarında yaygın olarak kullanılır [7, 14, 17]. Bant genişliği dikkate alınmadan, oldukça yüksek grup indisi değeri elde edilebilir. Bu durumda mevcut bant genişliği çok dar olur. Sonuç olarak, farklı yavaş ışık yaklaşımları arasında adil bir karşılaştırma yapmak için, bant genişliği ve grup indisi arasındaki ilişki göz önünde bulundurulmalıdır. Bant genişliğinin çok önemli olmadığı durumlarda, optik darbenin gecikme miktarı önemli ölçüde artırılabilir. Genellikle optik haberleşme geniş bantlara ihtiyaç duyarken, bazı durumlarda dar bant genişliği de kabul edilebilir. Örneğin, kimyasal sensörler, optik filtreler ve kaviteler gibi oldukça yüksek seçici ve hassas frekans uygulamaları dar bant mekanizmaları arasında sayılabilir.

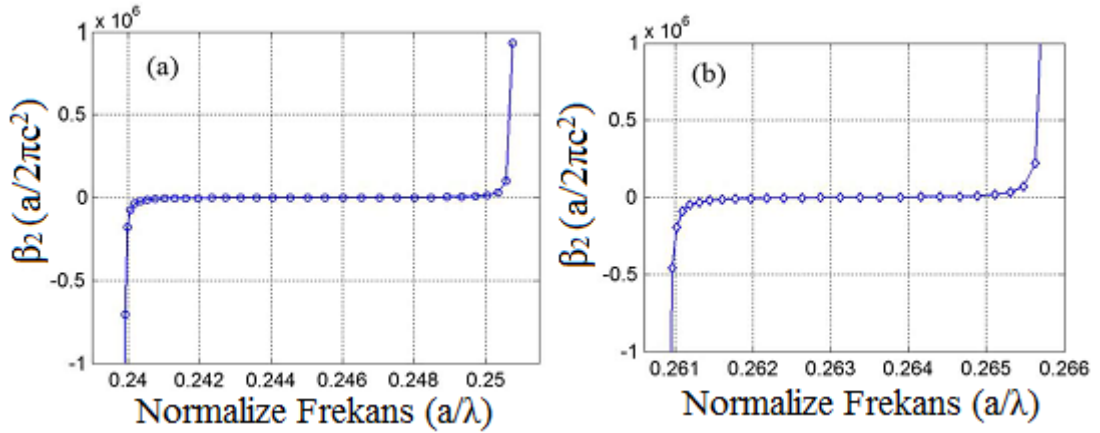


Şekil 2.5. Yüzeydeki deliklerin çapının değişimine karşılık grup indisi ve bant genişliği çarpımı.

Dispersiyon eğrisi (açısal frekans  $\omega$  ve dalga vektörü  $k$  arasındaki ilişki)  $\omega(k) = \omega(k_0) + \beta_1(k-k_0) + \beta_2(k-k_0)^2 + \beta_3(k-k_0)^3 + \dots$  olarak ifade edilebilir. Bu açılımda üçüncü dereceye kadar olan terimler sunulmuştur ve daha yüksek derecedeki terimler ihmal edilmiştir. Burada  $\beta_1$  grup hızını gösterirken,  $\beta_2$  ise grup hızı dispersiyonunu göstermektedir. Verilen ifadedeki son katsayı  $\beta_3$  ise üçüncü dereceden dispersiyonu temsil etmektedir. Grup hızı dispersiyonu ve üçüncü dereceden dispersiyonun

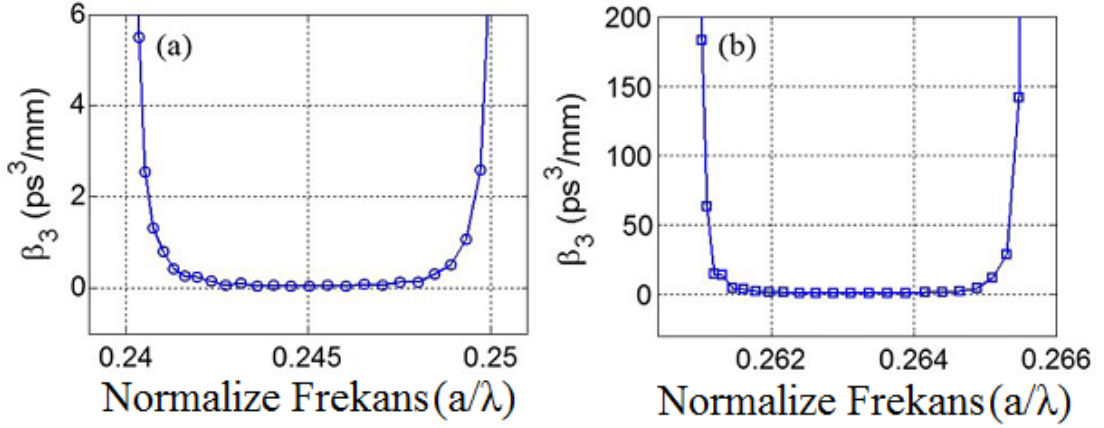
olmaması, ilgili katsayıların sıfır veya ihmal edilebilecek kadar küçük olması demektir. Sonuç olarak, bilgi taşıyan optik darbe simetrik veya asimetrik bozulma ve dağılma olmadan hareket edebilir. Bu durumda yukarıdaki ifadede sadece sabit ve birinci dereceden terimler kalır ve dispersiyon eğrisi istenildiği gibi düz banda karşılık gelir. Zamansal darbe genişlemesinin olmaması ışık hareketinin dispersiyonsuz olduğunun göstergesidir.

İki tane örnek durum  $d_2=0,56a$  ve  $d_2=0,66a$  için, dalga vektörü  $k$ 'nın  $\omega$ 'ya göre ikinci dereceden türevi  $\partial^2 k/\partial \omega^2$  hesaplanarak grup hızı dispersiyonu grafikleri Şekil 2.6(a) ve 6(b)'deki gibi elde edilir. Grup kırılma indisinin, minimum  $n_g$  değerinin %10'unu geçmediği frekans aralığında,  $d_2=0,56a$  ve  $d_2=0,66a$  için maksimum grup hızı dispersiyon değerleri sırasıyla  $0,861 \text{ ps}^2/\text{mm}$  ve  $3,817 \text{ ps}^2/\text{mm}$  olarak çıkarılmıştır. Bu durum grup hızı dispersiyonunun mutlak değerinin bu değerlerle üstten sınırlı olduğu anlamına gelir. Ayrıca dispersiyon eğrilerinin negatif değerlere de sahip olduğu Şekil 2.6(a) ve 6(b)'den görülmektedir. Bu özellik, optik darbelerin dispersiyon kompanzasyonu için kullanılabilir.



Şekil 2.6. Seçilen iki durum (a)  $d_2=0,56a$  ve (b)  $d_2=0,66a$  için grup hızı dispersiyonunun grafikleri.

Şekil 2.7(a) ve 7(b),  $\partial^3 k/\partial \omega^3$  bağıntısı kullanılarak çizdirilen üçüncü dereceden dispersiyon eğrilerini göstermektedir. Grafiklerden çıkarılan minimum değerler  $d_2=0,56a$  ve  $d_2=0,66a$  için sırasıyla  $0,0327 \text{ ps}^3/\text{mm}$  ve  $0,149 \text{ ps}^3/\text{mm}$ 'dir.



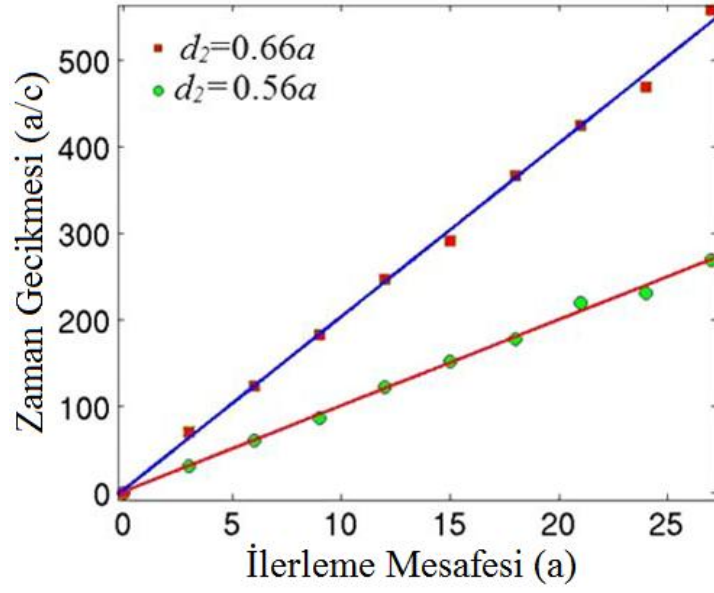
Şekil 2.7. Seçilen iki durum (a)  $d_2=0,56a$  ve (b)  $d_2=0,66a$  için üçüncü dereceden dispersiyon grafikleri.

Şekil 2.6 ve 7'den görüldüğü üzere, grup hızı azaldığında, beklenildiği gibi hem grup hızı dispersiyonu hem de üçüncü dereceden dispersiyon artar. Bu dispersiyonların genlikleri yeterince küçük olduğunda, optik darbenin bozulmadan başarılı bir şekilde ilerlemesi sağlanabilir.

### 2.3. Yavaş Işık Yüzey Modunun Zaman Düzleminde Analizi

Fotonik kristal-hava arayüzeyindeki yavaş ışık yüzey modunun zaman düzleminde karakteristiğini incelemek için FDTD metodu [51] uygulanmıştır. Hesaplama alanının sınırlarından gelen yansımaları engellemek için, soğurucu sınır koşulu olarak PML kullanılmıştır [52]. Bu katmanın kalınlığı  $2,5a$  olarak alınmıştır. Yüzey modlarının grup indisi spektrumlarını çıkarmak için, yapının sol tarafından optik darbe gönderilmiştir ve yüzey kusurları boyunca eşit aralıklarla yerleştirilen farklı ölçüm noktalarında darbe merkezlerinin zaman gecikmesi görüntülenmiştir. Darbenin spektrumu sabit grup indisi frekans bölgesinde olduğu takdirde giriş sinyali bozulmadan ilerleyebilir. Birbirinden  $3a$  mesafe uzaklıkta 10 tane ölçüm noktası kullanılmıştır. İki farklı durum  $d_2=0,56a$  ve  $d_2=0,66a$  için elde edilen sonuçlar Şekil 2.8'de gösterilmiştir.

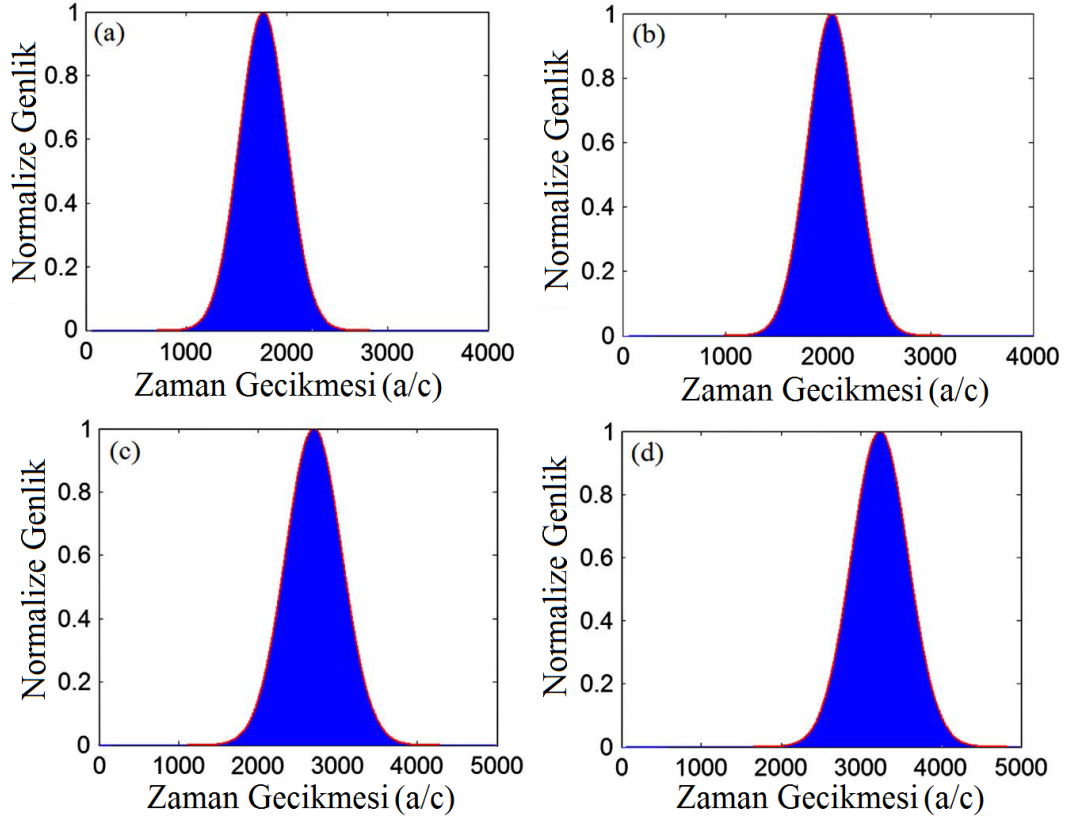




Şekil 2.8. İki farklı  $n_g$  değeri için ilerleme mesafesine göre zaman gecikmesi bilgisi sunulmuştur. Grup indisi değerleri  $d_2=0,66a$  ve  $d_2=0,56a$  için sırasıyla 20,03 ve 9,93 olur.

Zaman gecikmeleri pozisyon verilerine göre doğrusal eğrilerle çizdirilerek, grup indisi değerleri iki durum için yaklaşık olarak sırasıyla 10 ve 20 olarak bulunmuştur. Bu değerler frekans alanında yapılan hesaplamalardan elde edilen sonuçlar ile tutarlıdır.

Yavaş ışık yüzey modlarının düşük dispersiyon özelliklerinin doğrulanması için iki farklı ölçüm noktasında ışık darbesinin formları Şekil 2.9'da gösterilmiştir. Bu ölçüm noktaları arasındaki mesafe  $27a$ 'dır. Giriş sinyalinin bant genişliği, grup indisi değerlerine göre ayarlanmıştır. Şekil 2.9(a) ve 9(b)'de,  $d_2=0,56a$  için sırasıyla başlangıçtaki darbe ve  $27a$  mesafe ilerledikten sonraki darbe gösterilmiştir. Aynı karşılaştırma  $d_2=0,66a$  için Şekil 2.9(c) ve 9(d)'de yapılmıştır.



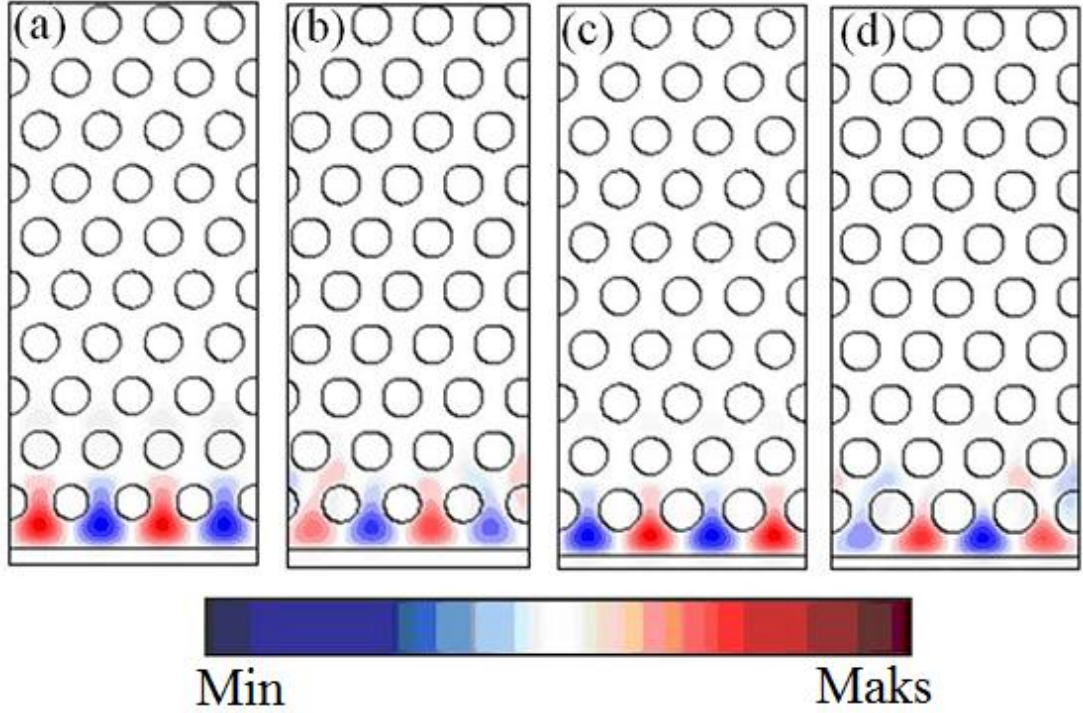
Şekil 2.9. (a) ve (b)  $d_2=0,56a$  için iki farklı ölçüm noktasındaki optik darbelerin zamansal gösterimleri. Benzer şekilde, (c) ve (d) de  $d_2=0,66a$  için zaman alanında gösterimleri.

İki farklı bölgede (birbirine  $27a$  mesafe uzaklıktaki noktalar) gözlemlenen dalga formlarına bakıldığında, yüzey modunun düşük dispersiyon özellikleri açık ve net olarak görülür. Ayrıca, Şekil 2.9'da kırmızı çizgi ile gösterilen optik darbeler yapay olarak oluşturulmuştur. Burada amaç, iki durum ( $\sim 10$  ve  $20$  grup kırılma indisleri) için ilk ölçüm noktalarında ışığın zamansal formunu taklit etmektir. Daha sonra, aynı darbe ikinci gözlem noktalarında algılanan darbelerin üstüne çizdirilmiştir. Dispersiyon etkisinin varlığında, ölçülen (ilerlemeye maruz kalanlar) ve eklenen eğriler (ilerlemeye maruz kalmayanlar) arasında uyumsuzluk olur. Ancak, Şekil 2.9(b) ve (d)'de görüldüğü gibi, yapay olarak oluşturulan darbeler, ilerleyen optik darbelerin zarfı ile iyi eşleşmektedir. Darbelerin zarfı neredeyse hiç değişmemektedir ve dispersiyon hemen hemen hiç yoktur. Maksimumun yarısındaki tam genişlik

değeri iki algılama noktasında aynı kalır. Bu gözlem, darbe ilerlemesinin dispersiyon olmadan gerçekleştiğini gösterir.

Şekil 2.9(a) ve 9(c), iki farklı durum (iki farklı grup kırılma indisleri) için başlangıç darbelerini göstermektedir. Grup indisi değeri arttığında, bant genişliği azalır. Yavaş ışık bölgesini uygun bir şekilde uyararak için, Şekil 2.9(c)'de, 9(a)'dakine göre daha dar bant genişliğine sahip darbe gönderilmiştir. Bu durumda kaynak daha uzun sürede sinyal üretir ve sinyal daha geç ulaşır. Ayrıca, Şekil 2.9(c)'deki darbenin zarfı Şekil 2.9(a)'dakinden daha geniş zaman alanı işgal eder. Farklı bant genişliği ve merkez frekanslarına sahip iki giriş kaynağı algılama noktasına farklı zamanda ulaşırlar. Bu durum Şekil 2.9(b) ve 9(d)'de görülebilir. Tüm ölçüm noktaları eşit miktarda kaydırılmıştır ve böylece ilk detektör orijinde kalmıştır. Detektörler dalga kılavuzu bölgesinin içerisinde kaldığı ve giriş ve çıkış arayüzeylerinden uzakta olduğu sürece, bu durum grup indisi değerlerini çıkarmada herhangi bir sorun oluşturmaz.

Son olarak, frekans ve zaman düzlemindeki hesaplamalardan ayrı ayrı bulunan alan dağılımları karşılaştırılabilir. Bu karşılaştırma, zaman alanında yavaş ışık yüzey modunun uygun bir şekilde uyarıldığını garanti etmek için gereklidir. Bu yüzden,  $d_2=0,56a$  için, yapı boyunca manyetik alan dağılımları Şekil 2.10(a) ve 10(b)'de gösterilmiştir. Benzer alan dağılımları, dispersiyon diyagramındaki yavaş modların zaman alanında başarılı bir şekilde uyarıldığını göstermektedir. Alan profilleri arasındaki küçük farklılığın nedeni frekans alanındaki hesaplamalardan elde edilen alan dağılımı tek bir frekansa (monokromatik durum) aitken, zaman alanında sistemin Gaussian darbe ile uyarılmasıdır. Benzer karşılaştırma  $d_2=0,66a$  için de Şekil 2.10(c) ve 10(d)'deki gibi hazırlanmıştır. Aynı yorum bu durum için de geçerlidir.



Şekil 2.10. (a) Kusur çapı  $d_2=0,56a$  için, yapının manyetik alan dağılımı. Bu dağılım PWE metodu kullanılarak elde edilmiştir. (b) Yavaş yüzey modunun uyarılmasından sonraki ışık hareketinin fotonik kristalin yüzeyi boyunca anlık görüntüsü.  $d_2=0,66a$  için frekans ve zaman düzleminde yapılan hesaplamalardan elde edilen manyetik alan yayılımları sırasıyla (c) ve (d)'de sunulmuştur. Kırmızı ve mavi renkler sırasıyla pozitif ve negatif manyetik alanları göstermektedir.

Fotonik kristal yapılarda yavaş ışık ile ilgili en önemli konulardan bir tanesi fabrikasyon bozukluklarıdır. Fabrikasyon aşamasında yavaş ışık fotonik yapılarda istenilmeyen yapısal bozukluklar meydana gelebilir. Yapıda bozukluk oluşunca, dalga kılavuzu kanalı boyunca hareket eden ışık miktarı önemli ölçüde düşer ve tasarlanan mod artık hedeflenen mod olmayabilir. Yavaş ışık cihazlarının bu yönü göz önüne alındığında, çalışmada önerilen yapının yarısı homojen havadan oluştuğu için üretim hatalarına daha dayanıklı olduğu söylenebilir.

Periyodik dielektrik yapılardaki yüzey modları, fotonik yasaklı bant malzeme kavramı literatüre kazandırıldıktan kısa bir süre sonra çalışılmıştır [1, 39]. O zamandan beri, yüzey modlarının dalga kılavuzu, kaviteler ve lazerler gibi çeşitli uygulamaları incelenmiştir [42, 45-47]. Fakat bilindiği kadarıyla iki boyutlu fotonik

yapılarda yüzey modunu kullanarak yavaş dalga hareketini araştıran girişimler olmamıştır. Bu çalışma, büyük grup indisi ve bozulma olmadan darbe ilerlemesi gibi yavaş ışıkla alakalı durumları göz önüne alarak ve yüzey modlarından faydalanarak gerçekleştirilen optik darbe hareketini ilk defa göstermiştir. Kaynak [43] dispersiyon eğrilerini inceleyerek yüzey modlarında yavaş ışıktan çok kısa bahsetmiştir. Fakat o çalışmada yavaş ışığın zaman alanında analizi, dispersiyon özelliği ve darbe gecikmesi gibi yönlerden incelemesi yapılmamıştır.

Tasarlanan yapının grup indisi ve bant genişliği çarpım değerleri daha önce bildirilen değerlerle karşılaştırıldığında bu değerlerin onlarla aynı seviyede olduğu görülür. Diğer yandan, yüzey modlarının, yavaş dalga uygulamaları bakımından bazı farklılıkları vardır. Örneğin, yavaş ışık malzeme ile daha uzun süre etkileşime girdiği için yavaş yüzey modları yüksek hassasiyete sahip biyokimyasal sensörler için kullanılabilirler. Önerilen yapının bir tarafı homojen ortamdan oluştuğu için algılanacak malzemelerin yapı içerisine yerleştirilmesi nispeten kolay olacaktır. Fotonik yapının özel konfigürasyonu, ışığın yavaş ışık yüzey modu içerisine kolay enjeksiyonuna olanak sağlar. Harici bir kaynaktan çıkan optik sinyalin yapıya yan bağlantısının (serbest uzay bağlantısı) yapılması mümkündür. Ayrıca yapının bir tarafının homojen olması fabrikasyon bozukluklarından kaynaklanan kayıpları kabul edilebilir bir seviyeye kadar azaltabilir.

Mevcut yapının geometrisi ayarlanarak grup indisi ve bant genişliğinin artırılması mümkündür. Bu çalışma büyük grup indislerini araştırmak yerine makul grup indisi değerlerini kullanarak yüzey modlarının yavaş ışık uygulamaları için kullanılabilmesini göstermeyi amaçlamaktadır.

## **2.4. Sonuçlar**

Bu çalışmada, yüzey modlarına dayalı yeni bir yavaş ışık dalga kılavuzu yapısı önerilmiştir. Yüzey modunun dispersiyonunun ayarlanmasının yavaş ışık elde etmek açısından dikkate değer bir öneme sahip olduğu gösterilmiştir. Yapının bant diyagramı PWE metodu kullanılarak elde edilmiştir. Dispersiyon bantlarının kolay

ayarlanması yüzeyi bozulmuş fotonik kristal yapısının yavaş ışık özelliğini ortaya çıkarmıştır. Düşük grup hızı dispersiyonu ile birlikte yavaş ışık özelliği düz bantların tasarlanması ile başarılmıştır. Tasarım parametreleri ve çalışma frekansının doğru seçilmesi ile yüksek dereceden dispersiyonların, farklı grup hızlarında optik darbenin şekli üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığı gösterilmiştir. Frekans düzlemindeki analizlerden elde edilen sonuçlar zaman düzleminde gerçekleştirilen simülasyonlar ile doğrulanmıştır. Hızlı ve yavaş ışık bölgelerinin frekans çakışması olmasına rağmen, yavaş ışık uyarımı etkili bir şekilde başarılmıştır. Aynı zamanda yavaş ışığın uygun uyarımı, zaman ve frekans düzleminde elde edilen alan dağılımlarının karşılaştırılması ile gösterilmiştir. Yüzey modu yavaş ışık yapılarının lineer ve lineer olmayan optik etkilerini anlamak için önemli bir potansiyele sahip olması beklenmektedir. Optik algılama mekanizmaları, yavaş ışık konseptinden yararlanan uygulamalardan bir tanesi olabilir. Örneğin, başlangıçta hava ile doldurulan yapının yarısı dielektrik sabiti bilinmeyen ve algılanmak istenen belirli bir sıvı malzeme ile doldurulabilir. Diğer taraftan, yavaş ışık fotonik kristal yapılar doğrusal olmayan optik yöntemlerin verimliliğini artırma açısından da kullanılabilirler [53, 54].

### 3. MOD MERTEBE ÇEVİRİCİSİ İÇİN DÜŞÜK SİMETRİYE SAHİP FOTONİK KRİSTAL YAPI KULLANILMASI<sup>†</sup>

#### 3.1. Giriş

Işık akışını kontrol etmek ve ilerleyen ışığın modunun mertebesini ayarlamak özellikle optik haberleşme ve tüm optik sinyal işleme sistemlerinde önemli rol oynar. Genelde dar dielektrik dalga kılavuzu sistemleri sadece temel modu desteklerken, yüksek mertebeli modları desteklemezler. Ancak farklı çok modlu uygulamalarda özellikle tümleşik optik devrelerde yüksek mertebede moda sahip ışığa ihtiyaç duyulabilir. Bu durumda mod filtreleme, mod ayrışımı ve mod çevirme gibi mod kontrol tekniklerinin tüm çeşitlerinin gelişimi önemli hale gelir [55-57]. Şimdiye kadar çok modlu dalga kılavuzlarında birçok mod çevirme teknikleri çalışılmıştır [58-61]. Önerilen mod kontrol cihazlarının çalışma prensibi çok modlu dalga kılavuzu esasına dayanır ve bu cihazlar mod-ayırıcı, mod-birleştirici ve çok kanallı konik dalga kılavuzlarından oluşur. Mod-ayırıcısı, giriş modlarını ayırmak için mod-mertebe çeviricisinin ilk kısmına yerleştirilir. Mod-birleştiricisi ise ayrılan modları birleştirmek için kullanılır. Konik dalga kılavuzları özel olarak seçilmiş dallardaki kaydırmalardan dolayı faz geciktiricisi olarak çalışırlar ve çıkış kanalında mod-mertebesinin çevrilmesini sağlarlar. Mod çevirme işlemi gerçekleştirilmek için başka bir yaklaşım ise eğik Bragg-ızgara yapılar kullanılmasıdır [62]. Bu anti-simetrik yapılarda, ışık yapı boyunca ilerlerken ızgara bölgesinde güçlü yansımalar meydana gelir. Bu durum, yapının çıkışında mod çevirme işlemi sağlar. Modun mertebesini çevirmek için başka bir seçenek de ekle-çıkar filtreleme bloklarının kullanımınıdır [63].

Fotonik kristaller belirli frekans bölgelerinde yasaklı bantlara (fotonik bant boşluğu) sahip olmasından dolayı ışık hareketinin özelliklerini kontrol etmek için güçlü bir araç olarak kullanılabilirler [1]. Normal fotonik kristaller genellikle simetrikler

---

<sup>†</sup> Erim, N., Giden, I. H., Turduev, M., Kurt, H., Efficient Mode-order Conversion using Photonic Crystal Structure with Low Symmetry, Journal of the Optical Society of America B, Manuscript is submitted for publication.

yani öteleme simetrisi ve dönele simetri bozulmamıştır. Dönele veya öteleme simetrisinin bozulması asimetrik fotonik kristal çeşidini ortaya çıkarır. Normal fotonik kristal yapıyı asimetrik hale getirmek, gelişmiş ve zengin spektral özellikler sağlar. Fotonik kristaller bu yönden daha önceden çalışılmıştır [64-68]. Normal fotonik kristallerle yapı içerisine çizgi-kusuru yerleştirerek kompakt dalga kılavuzları tasarlamak mümkündür [1]. Ayrıca, fotonik kristal dalga kılavuzu ile mod-mertebe çeviricileri tasarlayan çalışmalar vardır [69-71].

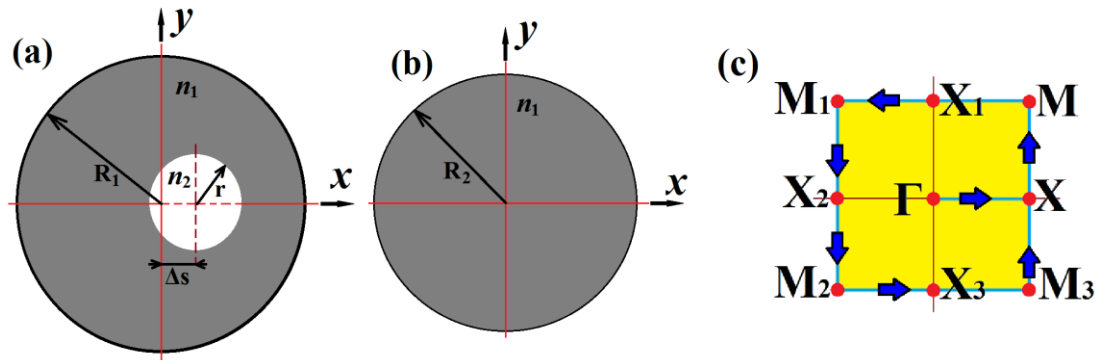
Mod-mertebe çevirme işlemi, modifiye edilmiş halka şeklindeki fotonik kristal olarak adlandırılan asimetrik fotonik kristaller ile ilk defa bu çalışmada gerçekleştirilmiştir. Dielektrik çubuk içerisine merkezden uzakta  $x$ -yönünde hava delik açılarak oluşturulan asimetrik fotonik kristaller daha önce başka amaçlar için çalışılmıştır [66, 67]. Asimetrik fotonik kristallerin yasaklı bant özellikleri ve eş-frekans eğrileri üzerinde çalışılmış ve ortak yasaklı bant aralığı için yüksek değerler elde edilmiştir [66]. Başka bir çalışmada da modifiye edilmiş halka şeklindeki fotonik kristaller kullanılarak polarizasyona duyarlı dalga kılavuzları teorik olarak tasarlanmıştır [67]. Mevcut çalışmada ise asimetrik fotonik kristal yapı, mod-mertebe çeviricisi oluşturmak için kullanılmıştır. Asimetrik fotonik kristaller, herhangi bir fotonik yapı tasarlamak için geometrik parametreler açısından sıradan fotonik kristallerden daha ilgi çekicidirler. Mod çeviricisi olarak önerilen fotonik kristal yapı, elektron demeti litografisi ve atomik katman kaplama gibi modern mikro fabrikasyon teknikleriyle gerçekleştirilebilir [72].

Bu çalışmada öncelikle, modifiye edilmiş halka şeklindeki fotonik kristal ve normal fotonik kristal konfigürasyonları kullanılarak oluşturulan heteroyapıdaki mod çeviricisinin tasarımı anlatılmıştır. Daha sonra ise iletim spektrumu gibi zaman düzlemindeki hesaplamalar ve yüksek mertebeli modların oluşturulması hakkında bilgiler sunulmuştur.



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

Optik mod-mertebe çeviricisi oluşturmak için farklı çeşitteki fotonik kristallerden oluşan heteroyapı sunulmuştur. Önerilen tasarım, kare örgüye sahip içlerinde merkezden uzakta delikler açılmış dielektrik çubuklar ve normal simetrik fotonik kristaller olmak üzere iki bölümden oluşmaktadır. Asimetrik ve simetrik fotonik kristalin şematik gösterimleri geometrik parametrelerle birlikte sırasıyla Şekil 3.1(a) ve 1(b)'de sunulmuştur. Modifiye edilmiş halka şeklindeki fotonik kristalin deliğinin yarıçapı  $r$  ile gösterilmiştir ve merkezden  $x$ -yönünde kaydırılmıştır. Bu kaydırma parametresi Şekil 3.1(a)'da görüldüğü gibi  $\Delta s$  ile gösterilmiştir. Halka şeklindeki asimetrik fotonik kristalin dielektrik çubuk kısmının yarıçapı ve simetrik fotonik kristalin yarıçapı ise sırasıyla  $R_1$  ve  $R_2$  olarak simgelenmiştir. Yapının arka planı ve asimetrik fotonik kristalin iç deliği havadır, yani  $n_2 = 1,0$ 'dır. Dielektrik fotonik kristaller silikondan oluşur ve kırılma indisi  $n_1 = 3,46$ 'dır. Konfigurasyonda, içteki deliğin konumu kaydırılarak örgünün dönele ve ayna simetrisi kırılmıştır. Bu yüzden, tasarlanan kare-örgü yapının fotonik bant hesaplamalarında Şekil 3.1(c)'de gösterilen Brillouin bölgesinin tüm kenarları hesaba katılmalıdır.

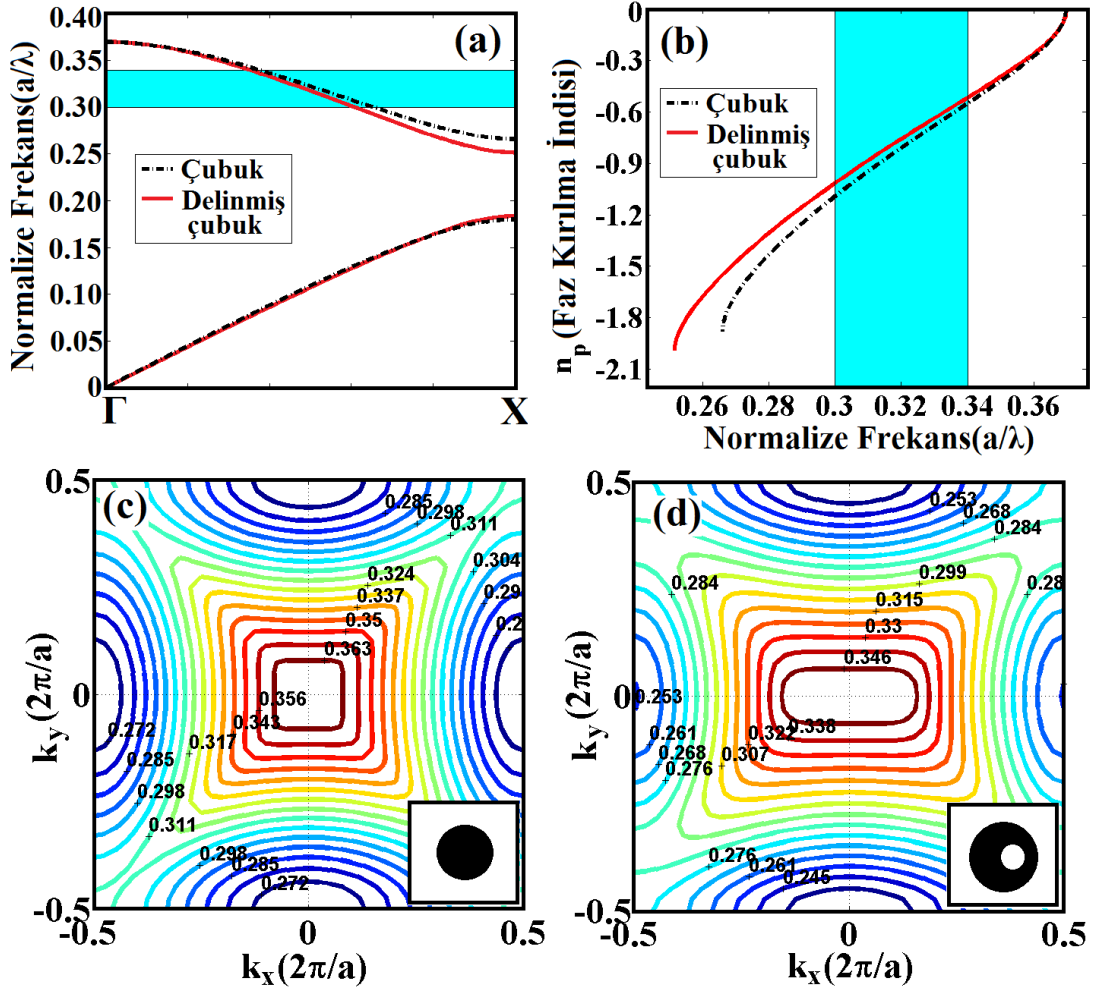


Şekil 3.1. Modifiye edilmiş halka şeklindeki ve normal fotonik kristalin birim hücrelerinin geometrik tasarımları (a) ve (b)'de gösterilmiştir. (c) Asimetrik fotonik kristal için ilgili Brillouin bölgesinin gösterimi [73].

Mod-mertebe çevirici yapılar fotonik uygulamaların önemli çeşitlerinden bir tanesi olarak sayılabilir. Düşük güç kayıpları ve yüksek mod çevirme verimliliği, mod çevirici cihazların performans analizi için gerekli koşullardır. Bu yüzden, ışık

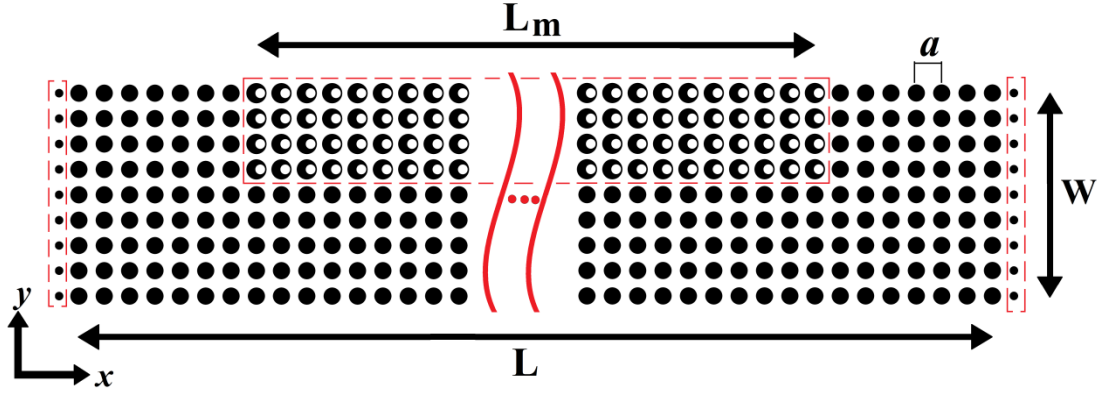
ilerlemesinin düşük kayıpla olması için çalışma frekansının kendiliğinden yönlenme bölgesine (gelen ışığın yapı içerisinde neredeyse hiç kırınım olmadan ilerlediği frekans aralığı) göre ayarlanmalıdır. Kendiliğinden yönlenme özelliği aynı zamanda çıkışta pürüzsüz ve düz faz önyüzleri elde etmek için de kullanılır. Bu özellik, önerilen konfigürasyonun yüksek iletim verimliliği ile mod çevirme işlemini sağlaması için göz önünde bulundurulmuştur. Bu yüzden, yapısal parametreler her iki fotonik kristalin kendiliğinden yönlenme frekans bölgeleri maksimum şekilde üst üste gelecek şekilde ayarlanmıştır. Modifiye edilmiş halka şeklindeki fotonik kristal birim hücrenin bütün yapısal parametreleri frekans bölgesi üzerinde etkilidir. Tanımlanan geometrik parametreler, kendiliğinden yönlenme 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 dış kısmın yarıçapı ise  $R_1=0,40a$  olarak optimize edilmiştir. Sonra ise frekans bölgelerinin maksimum şekilde çakışmasını sağlamak için normal fotonik kristalin yarıçapı  $R_2=0,34a$  olarak seçilmiştir. Tasarlanan asimetric ve simetric fotonik kristal yapının dispersiyon bağıntılarını incelemek için PWE yöntemi kullanılmıştır [48]. Her iki fotonik kristal 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 elektrik alan düzleme diktir. Şekil 3.2(a)'da, ikinci bantların boyanmış kısmında dalga-vektörüne göre her iki fotonik kristal için de belirli frekans aralığında doğrusal bir davranış (hemen hemen sabit eğim) gözlemlenir [74]. Bu lineer bölge  $a/\lambda=(0,30-0,34)$  frekans aralığını kapsar. Bant diyagramlarından faydalanarak, modifiye edilmiş halka şeklindeki ve normal fotonik kristal 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  $k=2\pi/\lambda$ 'dır. Ayrıca verilen ifadede  $\omega$  ve  $k$  parametreleri sırasıyla dalga vektörü ve açısal frekansı göstermektedir. İlgili ikinci TM bantlar artan hareket sabitine göre azalan frekans davranışı göstermesinden dolayı iki fotonik kristal çeşidi için de faz kırılma indisleri negatiftir [75]. Şekil 3.2(b)'deki grafiklerden  $n_p$  değerlerinin iki fotonik kristal türü için aynı olmadığı görülür. Bu farklılık, önerilen heteroyapı boyunca ilerleyen ışığın faz gecikmesine maruz kalmasına neden olur. Normal fotonik kristal ve modifiye

edilmiş halka şeklindeki fotonik kristal'in  $a/\lambda=0,31$  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 elde edilir. 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 özellik, önerilen yapının mod-mertebe çevirme amacı için kullanılabilceğini gösterir. Bunlara ek olarak, simetrik fotonik kristalin ve modifiye edilmiş halka şeklindeki fotonik kristalin kendiliğinden yönlenme özelliklerini incelemek için ikinci TM bantlarının eş-frekans konturları sırasıyla Şekil 3.2(c) ve 2(d)'de verilmiştir. Gelen dalganın hareket doğrultusu eş-frekans eğrilerine diktir ve enerji akışı grup hızı ile aynı yönde gerçekleşir [1]. İkinci bantların eş-frekans konturları Şekil 3.2(c) ve 2(d)'de gösterildiği gibi düz-kare şekline sahiptir ve bu durum kendiliğinden yönlenme özelliğinin göstergesidir [76]. Ortak bir frekans bölgesinde her iki fotonik kristal konfigürasyonu için de düz konturlar gözlemlenir.



Şekil 3.2. (a) Modifiye edilmiş halka şeklindeki ve normal fotonik kristalin dispersiyon eğrileri ve (b) faz indis dağılımları. İki grafikte de eğriler asimetric fotonik kristal için kırmızı düz çizgi ile gösterilirken, simetric fotonik kristal için siyah kesikli çizgiyle gösterilmiştir. Çalışma frekansı aralığı cam göbeği rengine boyanmıştır. Normal fotonik kristal ve modifiye edilmiş fotonik kristalin ikinci bant eş-frekans konturları sırasıya (c) ve (d)'de gösterilmiştir.

Daha önce belirtilen iki fotonik kristal çeşidi kare örgü düzeninde Şekil 3.3'deki gibi birleştirilmiştir. Faz indis farkı kullanılarak kendiliğinden yönlenme bölgesinde (geniş frekans aralığında  $a/\lambda=(0,30-0,34)$ ) mod çevircisi oluşturulmuştur. Komşu çubuklar arası mesafe  $a$  olarak ayarlanmıştır. Burada  $a$  örgü sabitidir ve haberleşme dalgaboyunda 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. Fotonik kristal heteroyapıya sahip olan mod-mertebe çeviricisinin şematik gösterimi.

İlerleyen ışıkta faz indisi farkının yardımıyla faz gecikmesi sağlamak için, modifiye edilmiş halka şeklindeki fotonik kristal bölümü konfigürasyona ilave edilmiştir.  $\pi$  faz kayması elde etmek için asimetrik fotonik kristal 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 fotonik kristal arasındaki faz kırılma indisi farkını göstermektedir. Ayrıca,  $k$  ise daha önce bahsedildiği gibi dalga vektörüne karşılık gelmektedir. Verilen ifadeye göre, asimetrik fotonik kristal 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 fotonik kristal bölge yapının üst kısmına yerleştirilmiştir. Yapının diğer kısımları ise fotonik kristal dielektrik çubuklardan oluşmaktadır. Ayrıca, hava-fotonik kristal arayüzündeki geri yansımaların etkisini azaltmak için, fotonik kristal dalga kılavuzunun ön ve arka yüzüne  $0,17a$  yarıçapında dielektrik çubuklar konulmuştur.

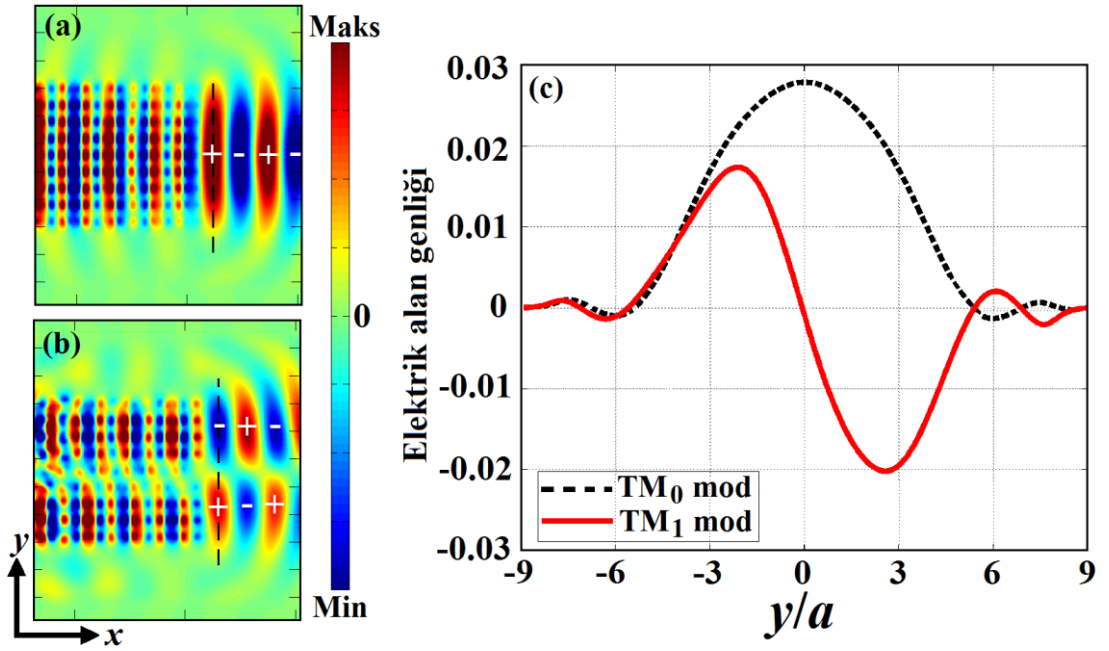
### 3.3. Yapının Zaman Düzlemindeki Analizi

Mod çevirme işlemi ve tasarlanan yapının iletim verimliliğini göstermek için iki boyutlu FDTD analizi gerçekleştirilmiştir [51]. Zaman düzlemindeki hesaplamalarda, hesaplama alanının sınırlarındaki yansımaları yok etmek için konfigürasyonun etrafına PML konulmuştur [52]. Tasarlanan yapı, merkez frekansı  $n_p$  grafiğine göre

seçilen ve  $a/\lambda=0,31$  olan temel TM mod ( $TM_0$ ) ile uyarılmıştır. Gelen dalganın genliği Gauss dağılımına sahiptir.

Kare örgü dağılımına sahip fotonik kristal yapının mod-mertebe çevirme bölgesi modifiye edilmiş halka şeklindeki fotonik kristal kullanımı ile oluşturulmuştur. Yapıya yerleştirilen asimetric fotonik kristal bölgenin mod çevirme performansı üzerindeki etkisini incelemek için, normal fotonik kristal 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 fotonik kristalden oluşmaktadır ve yapının son kısmı için elektrik alan profili Şekil 3.4(a)'da verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi ilerleyen ışık 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 modifiye edilmiş halka şeklindeki fotonik kristal bölgesiyle karşılaştığında birbirine paralel iki ayrı kola ayrılır. Simetrik ve asimetric fotonik kristaller 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. İki parça arasındaki faz değişim değeri asimetric fotonik kristalden oluşan kısmın uzunluğuna doğrudan bağlıdır (doğrusal etki). Eğer bu kısmın uzunluğu artırılrsa, ortaya çıkan faz farkı da artar. Uzunluk optimum 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. Bu durum tasarlanan konfigürasyonun mod-mertebe çeviricisi olarak kullanılabilmesi fikrini destekler. Şekil 3.4(a) ve 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 fotonik kristal yapı içerisine modifiye edilmiş halka şeklindeki fotonik kristal bölgesinin yerleştirilmesiyle temel çift mod ( $TM_0$ ),  $TM_1$  moda başarılı bir şekilde çevirilmiştir.



Şekil 3.4. (a) Fotonik kristal yapının ve (b) yapı yukarısına asimetrik fotonik kristaller 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 alan genlik profilleri (c)’deki gibi çizdirilmiştir.

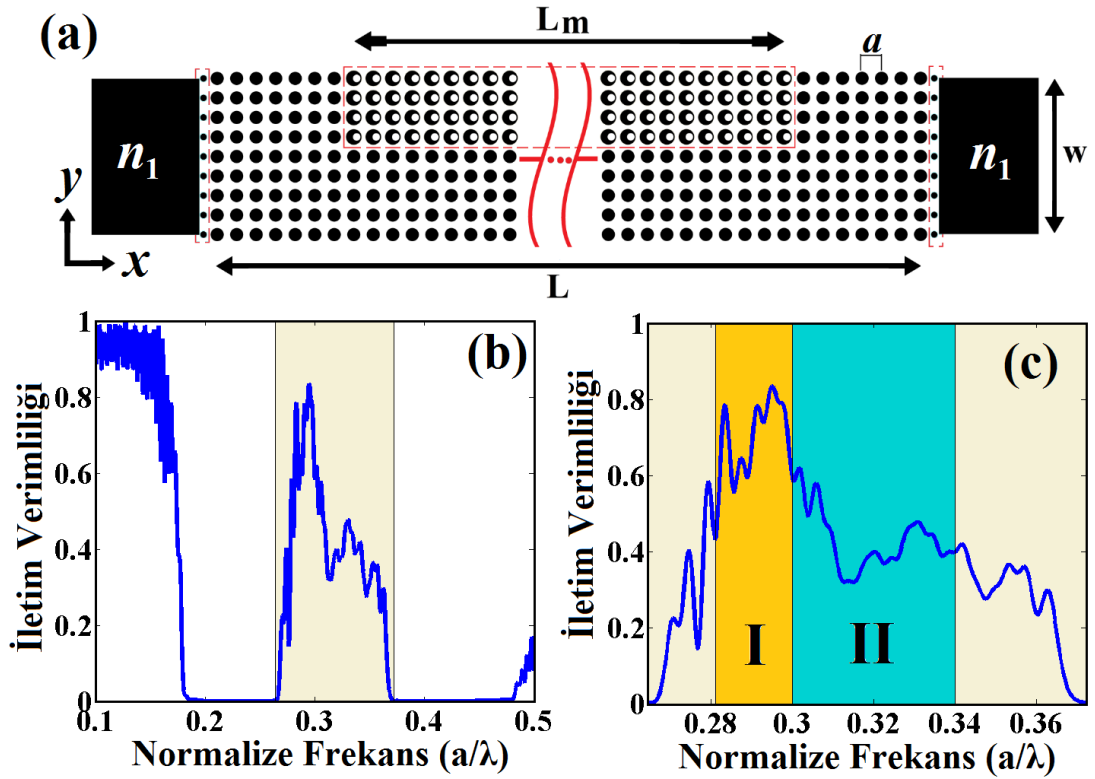
Fotonik kristalden oluşan bileşenlerin klasik optik bileşenlerle yarışabilmesi için kayıpların etkisi dikkate alınmalıdır. Tasarımdaki kayıplar, yapı içerisindeki yayılım kayıpları ve dalga kılavuzu ve fotonik kristal bölgesi arasındaki bağlantı kayıplarıdır. Bu çalışmada, iki boyutlu fotonik kristaller dikkate alındığından  $z$ -ekseni boyunca oluşan kayıplar ihmal edilmiştir. Giriş/çıkış dielektrik dalga kılavuzları ve fotonik kristal dalga kılavuzu arasında ışığın bağlantısı çok kritiktir. Sadece bir katmandan oluşan arayüzey tanımlamak yerine daha iyi bir bağlantı stratejileriyle bağlantı

kayıpları azaltılabilir. Tasarlanan yapıda ışığın fotonik kristal dalga kılavuzuna bağlantısı için kullanılan dielektrik dalga kılavuzu Şekil 3.5(a)'daki gibidir. Ayrıca, eklenen dielektrik dalga kılavuzu ve fotonik kristal dalga kılavuzu arayüzündeki empedans uyumsuzluğundan kaynaklanan geri yansımalar da ışığın bağlantısını zayıflatmaktadır.

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, fotonik kristal-dalga kılavuzu arayüzündeki kayıplardan ve mod çevirici bölgede  $y$ -yönü boyunca sızan modların varlığından kaynaklanmaktadır. Buna ek olarak, asimetric ve simetric fotonik kristal arasındaki etkin kırılma indisi uyumsuzluğundan dolayı meydana gelen yansımalar da iletim verimliliğini düşürmektedir. Ayrıca ara bölgedeki fotonik kristalin iletim performansını tahmin etmek için çalışma frekanslarında iki dalga kılavuzu çeşidinin de alan profilleri hesaba katılmalıdır. Gelen dalga genellikle hareket yönünde klasik dielektrik dalga kılavuzunda yönlendirilebilir. Fakat tasarlanan fotonik kristal yapı belirli modları destekler ve böylece mod çeviricisi Şekil 3.5(b)'deki iletim spektrumunun boyalı kısmında görüldüğü gibi belirli bir frekans aralığında  $a/\lambda=(0,266-0,370)$  çalışır. İletimin sıfır olduğu frekanslar fotonik kristal yapının yasaklı bant bölgesine karşılık gelmektedir. Yasaklı bant frekans aralığında olan ışık dalgasının tamamı fotonik kristal yapının ön yüzünden geri yansıtılır ve ışık tasarlanan fotonik kristal 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 kendiliğinden yönlendirme bölgeleri iki farklı renge boyanmıştır ve



sırasıyla I ve II olarak gösterilmiştir. İki frekans bölgesinde de modifiye edilmiş halka şeklindeki fotonik kristal kendiliğinden yönlendirme özelliği gösterirken, normal fotonik kristal ilk bölgede odaklama, ikinci bölgede ise kendiliğinden yönlendirme 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 eş-frekans çizimlerine 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 fotonik kristal-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 kendiliğinden yönlendirme 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. Önerilen fotonik kristal yapının mod çevirme performansı sadece iletim verimliliğine bağlı değildir. Aynı zamanda çıkıştaki ışığın 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 ifade tanımlanmıştır:

$$\frac{\int (|E_z(y)| - |E_{z,ref}(y)|) dy}{\int |E_{z,ref}(y)| dy} \quad (3.1)$$

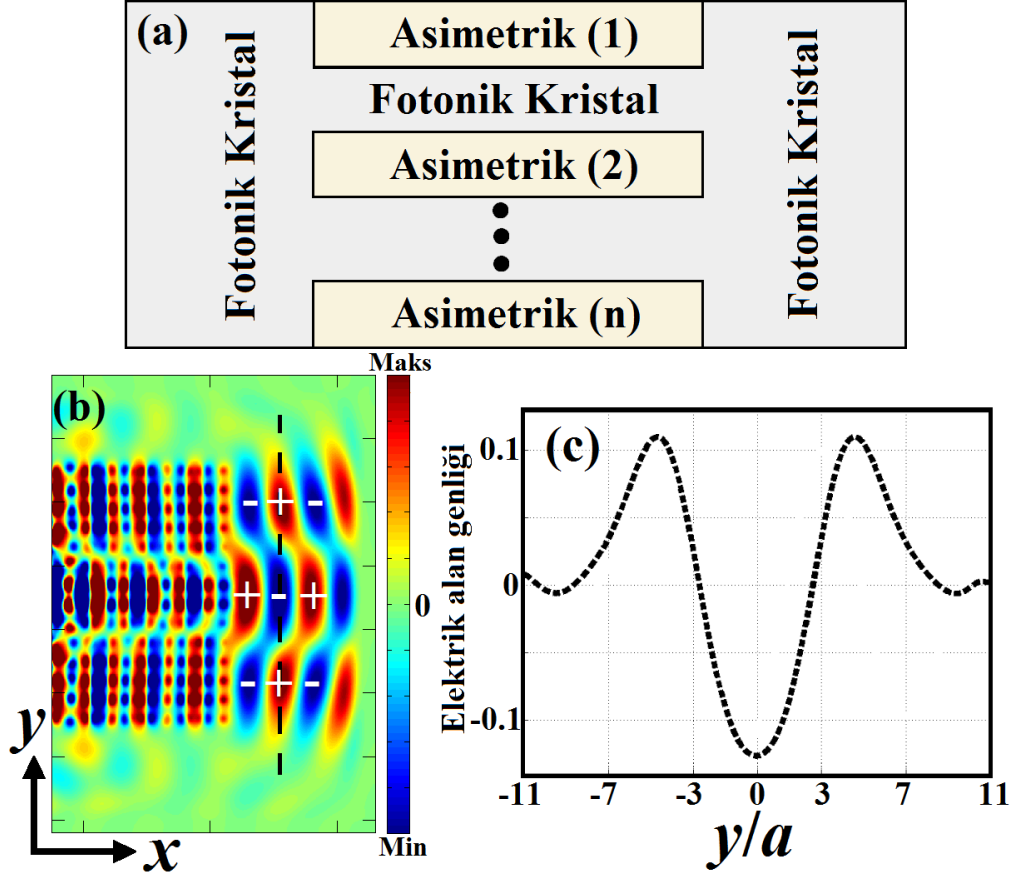
Denklem 3.1’de  $E_z(y)$  ve  $E_{z,ref}(y)$  üretilen ve referans ışık dalgasının kesitsel alan genliklerini göstermektedir. Verilen denklemden çıkarılan değerler Çizelge 3. 1’de listelenmiştir. İdeal durumdan uzaklaştıkça, genlik karşılaştırma değerleri artar. Bu da çevrilen modun genlik profilinin 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, 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 fotonik kristal yapı 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)'da sembolik çizimde görüldüğü gibi asimetric ve simetric fotonik kristal bloklarının yapı içerisinde farklı pozisyonlarda yerleştirilmesi ile elde edilebilir. Tasarlanan konfigurasyonun çıkışında  $TM_2$  mod elde etmek için birinci ve ikinci asimetric fotonik kristal blokları kullanılabilir. Bu seçeneğin dışında fotonik kristal yapının orta kısmına sadece bir tane asimetric fotonik kristal 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  $a/\lambda=0,31$  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 çizimi. (b) Yapının orta kısmı modifiye edilmiş asimetrik fotonik kristalden kenarları ise simetrik fotonik kristalden 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) Çıkıştaki  $TM_2$  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 fotonik kristal bloklarının kullanılmasıyla elde edilebilir. Hatta bu blokların farklı kombinasyonlarıyla daha yüksek mertebeli modlar ( $TM_4$ ,  $TM_5$ , ...) elde edilmesi mümkündür.

### 3.4. Sonuçlar

Bu çalışmada, modifiye edilmiş halka şeklindeki (asimetrik) fotonik kristaller 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 konfigurasyon 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 konfigurasyon mod çevirme uygulamaları için alternatif bir çözüm olarak sayılabilir. Gelecekte, modifiye edilmiş halka şeklindeki ve normal fotonik kristalden oluşan heteroyapı, fotonik algılama uygulamaları için interferometre oluşturmak amacıyla kullanılabilir.

## 4. FOTONİK KRİSTAL YÜZEY MODLARI İLE POLARİZASYONDAN BAĞIMSIZ DALGA KILAVUZU VE BİYOSENSÖR TASARIMI<sup>‡</sup>

### 4.1. Giriş

Fotonik kristaller optik filtreler, optik biyosensörler ve lazerler gibi çeşitli uygulamalar için kullanılırlar [1, 77]. Fotonik kristallerin periyodikliği, dalga kılavuzu elde etmek için çizgi kusuru veya kavite elde etmek için nokta kusuru oluşturarak bozulabilir. Bu dalga kılavuzu ve kavite modları dışında yüzey modları da fotonik kristal yapının yüzeyindeki periyodikliğin bozulması ile elde edilebilir [1]. Yüzey modunun bulunduğu frekans aralığına sahip olan ışık, fotonik kristal yapı ve hava ortamı arasındaki arayüze hapsolüp bu arayüz boyunca ilerleyebilir.

Bu çalışmada, hem TE hem de TM polarizasyonlarda çalışabilen, polarizasyondan bağımsız dalga kılavuzları tasarlamak için fotonik kristal yüzey modları kullanılmıştır. Fotonik kristal yüzey modlarını, biyosensörler [3, 78], yavaş ışık [6], dalga kılavuzu [42], lazerler [45] ve kaviteler [46] gibi farklı amaçlar için kullanan çalışmalar vardır. Işığın polarizasyondan bağımsız olması bazı fotonik uygulamalar için gereklidir [79-81]. Dalga kılavuzu boyunca ilerleyen optik sinyalin polarizasyonu ışığın hareketi boyunca değişebilir. Bu yüzden, hem TE hem de TM polarizasyon için modlara sahip fotonik kristal dalga kılavuzları tasarlanmıştır. TE ve TM modlar için ortak bir frekans aralığı bulmak kolay değildir. Yani hem TE hem de TM modları destekleyen dalga kılavuzu oluşturmak uğraştırıcıdır.

---

<sup>‡</sup> Kurt, H., Erim, M. N., Erim, N., Various photonic crystal bio-sensor configurations based on optical surface modes, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 165, 68-75, 2012.

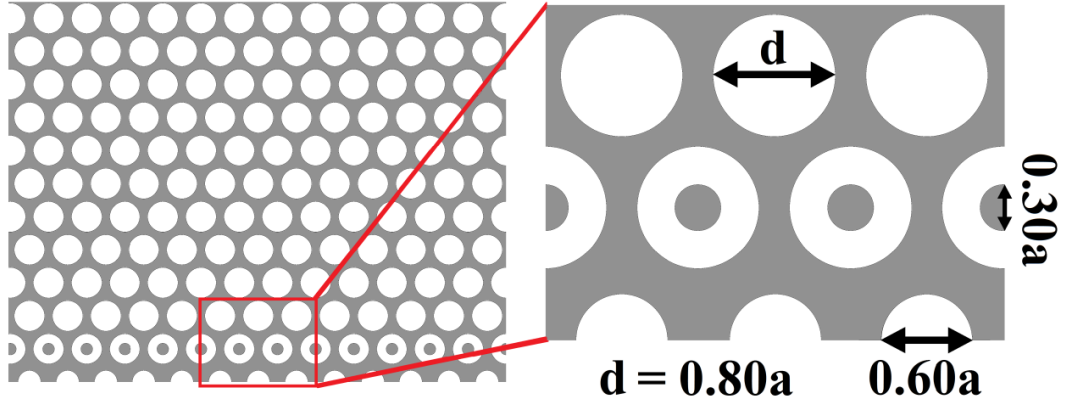
Erim, N., Erim, M. N., Kurt, H., Polarization-Insensitive Waveguide with Optical Surface States, *12th Mediterranean Microwave Symposium (MMS 2012)*, İstanbul, Türkiye, Eylül 2012.

Erim, M. N., Erim, N., Kurt, H., Optical surface modes of photonic crystals for dual-polarization waveguide, *Photonics and Nanostructures: Fundamentals and Applications*, 11, 123-131, 2013.

Polarizasyondan bağımsız dalga kılavuzuna ek olarak yüzey modu ile fotonik kristal biyosensör tasarımı da gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan sensörün algılama kriteri, çıkış gücünün rezonans dalga boyunun kırılma indisi değişimine göre kayma miktarına dayanır. Işık malzeme ile güçlü bir şekilde etkileşime girdiğinde, malzemenin kırılma indisinde meydana gelen herhangi bir değişim iletilen ışığın güç spektrumu incelenerek gözlemlenebilir. Önerilen sensör yapısı, algılanacak olan malzeme küçük delikler ve hava-yarık bölgesine konulduğundan az algılama alanına ihtiyaç duyar. Ayrıca, yüzey modları kullanılarak tasarlanan fotonik kristal sensörün hassasiyeti geniş kırılma indisi aralığında doğrusal bir davranış gösterir. Kare örgü ve üçgen örgü dağılımındaki fotonik kristal yüzey modu sensörlerin elde edilen maksimum hassasiyet değerleri sırasıyla 93 ve 396 nm/RIU'dur.

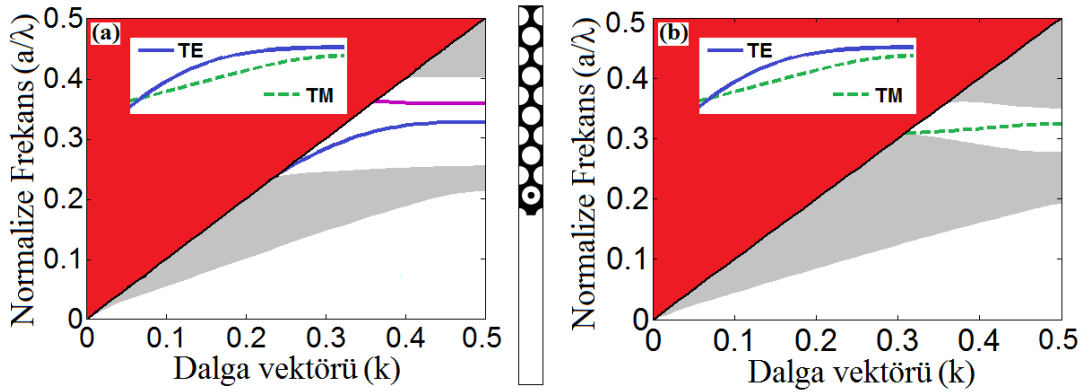
#### **4.2. Yüzey Modu İle Polarizasyondan Bağımsız Dalga Kılavuzu Tasarımı**

Fotonik kristaller genellikle kare ve üçgen olmak üzere iki çeşit örgü dağılımına sahiptir. Polarizasyondan bağımsız dalga kılavuzu tasarımı için hava deliklerin üçgen örgü konfigürasyonu kullanılmıştır. Tasarlanan yapı Şekil 4.1'de gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi yapının genelini oluşturan hava deliklerin çapı  $0,80a$  ve fotonik kristal yapının yüzeyine yerleştirilen dielektrik çubukların çapı ise  $0,30a$ 'dır. Ayrıca yapının uç kısmına çapı  $0,60a$  olan yarım dairesel delikler oluşturulmuştur. Dielektrik arka planın kırılma indisi 3,46 olarak seçilmiştir. Bu tasarım parametrelerinin değerleri TE ve TM polarizasyonunun frekans aralığı çakışacak şekilde seçilmiştir. Simülasyon sonuçlarına göre yüzey deliklerinin içine dielektrik çubuklar yerleştirilmediğinde TE ve TM polarizasyon için ortak bir frekans bölgesi bulunmazken, dielektrik çubuklar yerleştirildiğinde ise ortak frekans bölgesi ortaya çıkar. Buna ek olarak, frekans aralığının çok iyi bir şekilde eşleşmesi için yapının yüzeyine yarım daireler konulmuştur.



Şekil 4.1. Tasarlanan fotonik kristal dalga kılavuzu yapısının şematik gösterimi [82, 83].

Yüzey boyunca gerçekleştirilen değişikliklerden sonra, tasarlanan yüzey modu fotonik kristal yapısı hem TE hem de TM polarizasyonu desteklemektedir. PWE metodu [48] kullanılarak, TE ve TM polarizasyon için bant diyagramları sırasıyla Şekil 4.2(a) ve 2(b)'deki gibi elde edilmiştir. Ayrıca dispersiyon diyagramlarının çıkarımında kullanılan süper hücre, grafiklerin orta kısmına yerleştirilmiştir ve çakışan frekans bölgesi ise şekillerin üst kısmında verilmiştir.



Şekil 4.2. Polarizasyondan bağımsız dalga kılavuzunun (a) TE ve (b) TM polarizasyon için dispersiyon diyagramlarının gösterimi. Hesaplamalarda kullanılan süper hücre diyagramların arasında gösterilmiştir.

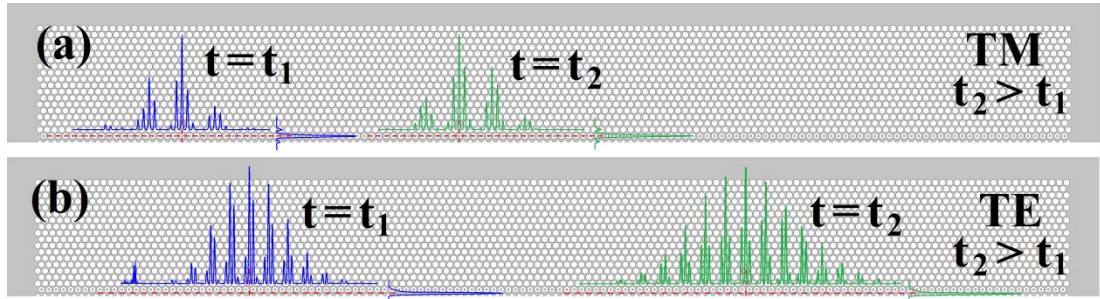
Elde edilen dispersiyon diyagramlarına göre yüzey modundan faydalanılarak oluşturulan polarizasyondan bağımsız dalga kılavuzunun bant genişliği yaklaşık olarak % 4.6'dır. Hesaplanan bant genişliği literatür ile karşılaştırılabilir bir



seviyededir [79, 80]. Bu yüzden tasarlanan yapı polarizasyondan bağımsız dalga kılavuzu olarak kullanılabilir.

### 4.3. Yapının zaman düzleminde analizi

Polarizasyondan bağımsız yüzey modu dalga kılavuzunun iletim karakteristiğini incelemek için FDTD metodu kullanılmıştır [51]. Burada giriş kaynağından dalga kılavuzuna geçerken oluşan bağlantı kayıpları ihmal edilmiştir. Bu bakış açısı ile TM ve TE modlar için Şekil 4.3(a) ve 3(b) hazırlanmıştır. Şekilden de görüldüğü gibi ışık tasarlanan yapıya girdikten sonra, istenilen yüzey modunu oluşturur ve neredeyse ışığın tamamı iletilir. Işığın yüzeyde herhangi kayıp veya bozulmaya uğramadan ilerlediği söylenebilir. Çünkü TE ve TM polarizasyonlar için ortak frekans aralığında, optik darbe hareketi boyunca eşit genliğe sahiptir ve dispersiyonlu bir davranış sergilemez.



Şekil 4.3. (a) TM ve (b) TE polarizasyon için zaman düzlemindeki simülasyonlardan elde edilen sonuçlar.

Bunlara ek olarak, TE mod alan profili  $t_2$  zamanında çok az dispersiyonlu davranış gösterir. Ayrıca, TE polarizasyonlu ışık dalgası TM polarizasyonlu dalga ile karşılaştırıldığında daha büyük grup hızına sahiptir. Şekil 4.3'e göre, TM modun grup indisi yaklaşık olarak 10 iken, TE modun grup indis değeri yaklaşık olarak 5,6'dır. TM modun zaman alanındaki ve frekans alanındaki simülasyon sonuçları birbirini ile tutarlıdır. Fakat TE mod için dispersiyon özelliğinden kaynaklanan küçük farklılık vardır.

#### 4.4. Etkin Ortam Teorisi

Zaman ve frekans düzlemindeki analizlere ek olarak, tasarlanan yapının iki boyutlu özelliğinin etkisi de ele alınmıştır. Bu yapının performansı hakkında daha doğru bilgi elde etmek için üç boyutlu analizin yapılması gerekmektedir. Fakat bunun yerine daha çabuk ve hızlı bir yöntem olan iki boyutlu etkin ortam teorisi kullanılabilir. TE ve TM modların ışık çizgisinin altında kalmalarından dolayı bazı kayıplar ihmal edilebilir olsa da, fotonik kristalin sınırlı plaka kalınlığından kaynaklanan diğer etmenler vardır.

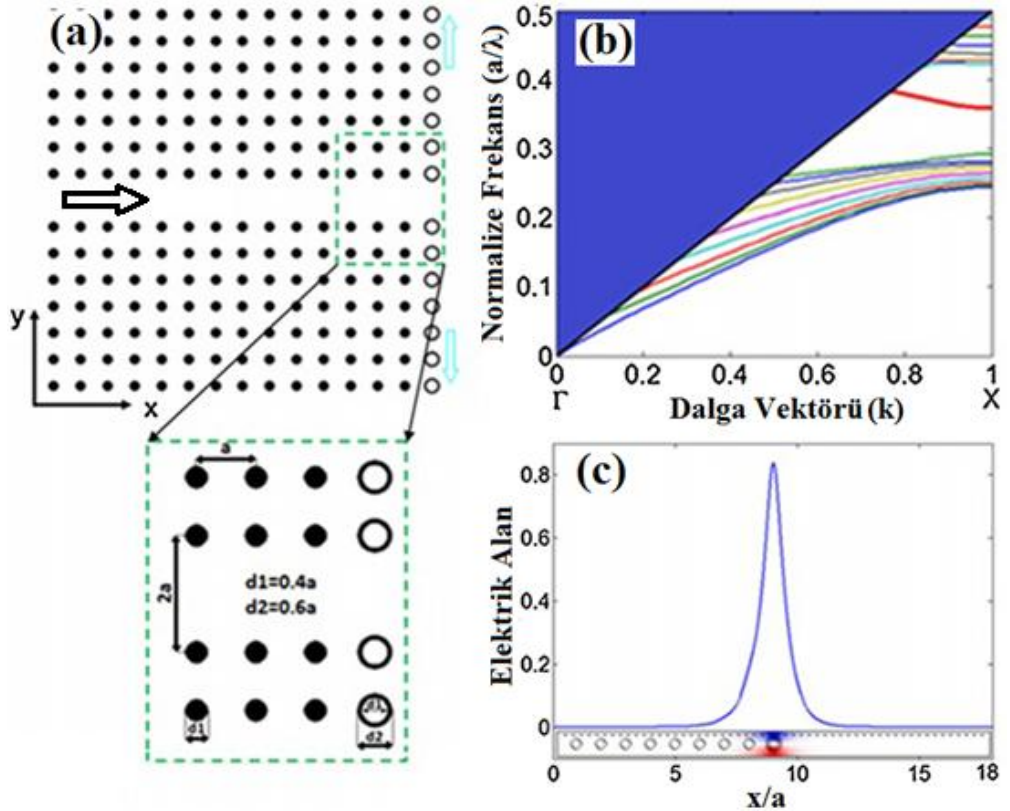
Tasarlanan dalga kılavuzu yapısı için iki boyutlu etkin ortam teorisini uygulamak amacıyla kullanışlı ve kolay özelliklerinden dolayı doğrusal olmayan denklem metodu [84] kullanılmıştır. TE ve TM modun aynı etkin kırılma indisine ve aynı frekansa sahip olmaları için üç boyutta farklı yüksekliklere sahip olmaları gerekmektedir. Fakat tasarlanan polarizasyondan bağımsız dalga kılavuzu kendine özgü yapısından dolayı, aynı yükseklikte olmalıdır. Ayrıca ortak bir frekans aralığına sahip olmak için TE ve TM polarizasyonların açısız frekansları da aynı olmalıdır. Bu yüzden, esnek olan parametre etkin kırılma indisidir. Yapının yüksekliği  $0,75a$  olarak seçilmiştir ve hesaplamalarda bu değer kullanılarak etkin dielektrik sabiti TE ve TM polarizasyonlar için sırasıyla 10,17 ve 8,887 olarak bulunmuştur. Diğer yandan, bu değişiklikler uygulandıktan sonra TE ve TM modları ortak bir frekans bölgesinde çakışmamaktadırlar.

TE ve TM modların frekans aralıklarını eşleştirmek için fotonik kristal yapıda bazı değişiklikler yapılmıştır. İlk olarak, yapının yüzeyindeki deliklerin çapı istenilen frekans çakışmasına sahip olmak için  $0,80a$ 'dan  $0,90a$ 'ya artırılmıştır. Ayrıca, yüzeydeki deliklerin içine yerleştirilen çubukların çapı da  $0,34a$  olarak değiştirilmiştir. Yapının diğer parametreleri aynen korunmuştur. Yapılan bu değişikliklerden sonra TE ve TM modlar için ortak bir frekans aralığı oluşturulmuştur. Fakat polarizasyondan bağımsız dalga kılavuzunun bant genişliği %4.6'dan %3'e düşmüştür ve ortak frekans bölgesi de eski duruma göre daha yüksek frekanslara kaymıştır. Bant genişliğindeki düşüş, plakanın yüksekliğinin optimize

edilmesiyle düzeltilebilir [85]. Fotonik kristal plakalar TE ve TM modlar için optimum bant boşluğunu farklı yüksekliklerde sağlarlar. TE mod nispeten ince plakaya gereksinim duyarken, TM mod geniş bant boşluğuna sahip olmak için kalın plakaya ihtiyaç duyar.

#### 4.5. Fotonik Kristal Yüzey Modu Biyosensör Yapısının Tasarımı

Yüzey modu biyosensörün yapısal parametrelerini göstermek için Şekil 4.4(a) hazırlanmıştır. Tasarlanan yapı kare örgü dağılımına sahip dielektrik çubuklardan oluşmaktadır. Çubukların kırılma indisi 3,46'dır ve arka plan havadır. Örgü sabiti,  $a$ , 500 nm olarak alınmıştır ve çubukların çapı 200 nm'dir.

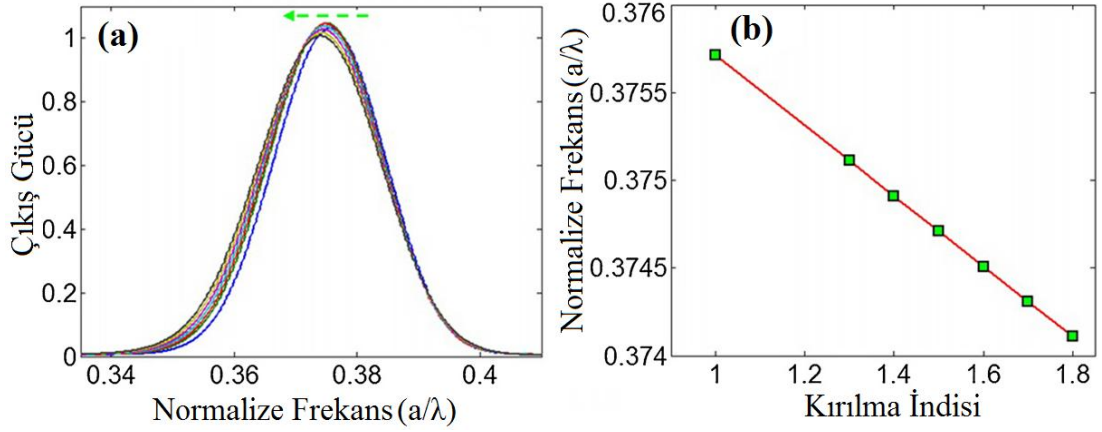


Şekil 4.4. (a) Fotonik kristal yüzey modu biyosensörün şematik gösterimi. Şekildeki oklar kaynaktan çıkan ışığın ilerleme yönünü göstermektedir. (b) İlgili yüzey modunun dispersiyon diyagramı. (c) Kesikli çizgi boyunca elektrik alan dağılımı. Kullanılan süper hücre grafiğinin altında verilmiştir [3].

Fotonik kristal-hava arayüzeyinde belirli bir bozukluk oluşturarak yüzey modu desteklenebilir. Biyokimyasal sensör uygulamaları göz önünde bulundurularak, yüzeydeki çubuklar önce büyütülmüş daha sonra ise delinmiştir ve halka şeklini almıştır. Bu halka şeklindeki yapının iç ve dış çapları sırasıyla 200nm ve 300nm olarak seçilmiştir. Bu modifiye edilmiş çubuklar, yüzey modunu destekler ve ışık dalgası bu arayüze doğru bir frekansla geldiği zaman elektrik alan güçlü bir şekilde yüzeye hapsolür. Fotonik yapının dispersiyon diyagramı PWE metodu [48] ile hesaplanmıştır ve elde edilen sonuçlar Şekil 4.4(b)'de gösterilmiştir. Kalın ve kırmızı renkteki çizgi yüzey modunu temsil etmektedir ve yüzey modu diğer bantlardan iyi izole olmuştur. Bu durum arayüzeyde elektrik alanın güçlü bir şekilde yoğunlaşacağını göstermektedir. Yüzey modunun elektrik alan dağılımı çizdirildiğinde Şekil 4.4(c)'deki gibi elde edilir ve maksimum değerine delinmiş çubuğun merkezinde ulaşır.

#### **4.6. Tasarlanan Optik Biyosensörün Algılama Mekanizması**

Fotonik kristal sensör yapısının performansını ölçmek için, dalga kılavuzunun farklı kırılma indisi değerleri için iletim spektrumu oluşturulmuştur. Yüzey modunun uyarılması için bant genişliği doğru frekans aralığına (dispersiyon diyagramından seçilen yüzey modunu kapsayan frekans bölgesi) sahip Gauss darbesi kullanılmıştır ve kaynak fotonik kristal dalga kılavuzunun girişine konulmuştur. Işık dalgası standart dalga kılavuzu boyunca ilerler ve sona geldiğinde eşit olarak ikiye ayrılır. Yüzeye hapsolan ve daha sonra sona ulaşan ışık miktarını ölçmek için delinmiş yüzey çubuklarının çıkışına detektör yerleştirilmiştir. Kırılma indisi değerleri 1,0 'dan 1,8'e kadar 0,1 adımlarla artırılmış ve bu değerler için çıkış gücü normalize frekansa göre Şekil 4.5(a)'daki gibi çizdirilmiştir. Kırılma indisi değeri arttıkça her bir darbe rezonans frekansına göre daha düşük frekanslara kaymaktadır. Frekansın kırılma indisine bağımlılığı Şekil 4.5(b)'de verilmiştir. Darbenin rezonans frekansının kayması ile kırılma indisi değişimi arasında doğrusal bir ilişki gözlemlenir.



Şekil 4.5. (a) Farklı kırılma indis değerleri için çıkış gücü. (b) Normalize frekansın kırılma indis değişimine göre çizimi.

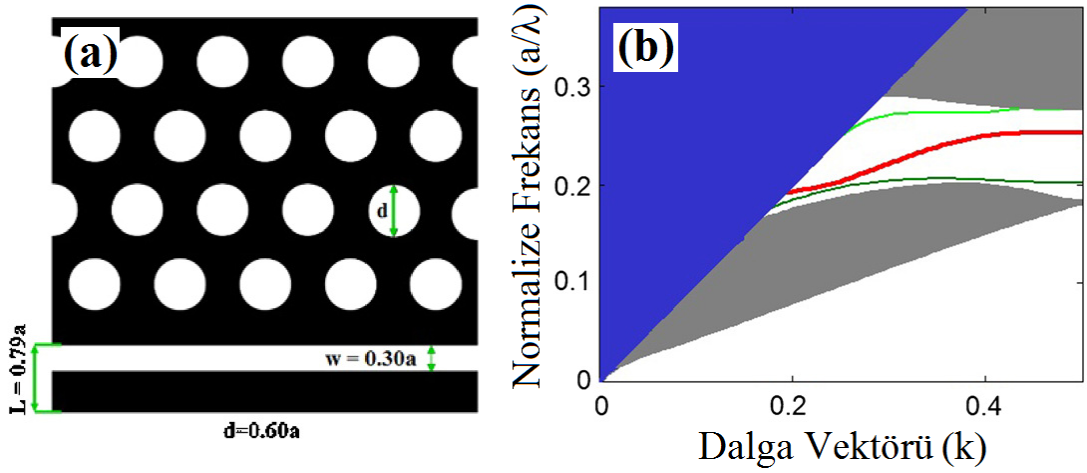
Tasarlanan fotonik kristal yüzey modu sensör yapısının performansını değerlendirmek için  $\Delta\lambda/\Delta n$  (hassasiyet) bağıntısı kullanılmıştır. Burada  $\Delta\lambda$  ve  $\Delta n$  parametreleri sırasıyla dalga boyu ve kırılma indisi değişimini göstermektedir. Şekil 4.5(b)'deki grafikten hassasiyet değeri 7,957 nm/RIU olarak hesaplanmıştır. Mevcut yapının hassasiyet değeri yüzeydeki delinmiş çubukların yerleri veya büyüklükleri ayarlanarak artırılabilir. Yüzeydeki delik çubuklar  $y$ -yönünde  $0,25a$ ,  $0,50a$  ve  $0,75a$  kaydırıldığında elde edilen yeni hassasiyet değerleri öncekine göre 2-3 kat daha yüksek olur. Buna ek olarak yüzeydeki delinmiş çubuklar üçlü gruplara ayrılarak bunların iç ve dış yarıçapları sırasıyla  $0,30a$  ve  $0,40a$  olarak değiştirildiğinde ve sadece bu büyük olan delikler malzeme ile doldurulduğunda elde edilen hassasiyet değeri yaklaşık olarak 93 nm/RIU olur.

#### 4.7. Üçgen Örgü Dağılımına Sahip Fotonik Kristal ile Tasarlanan Optik Sensör Konfigürasyonu

Üçgen örgü dağılımına sahip fotonik kristal sensör konfigürasyonu yarıçapı  $0,30a$  olan hava deliklerden ve dielektrik arka plandan oluşmaktadır. Burada yüzey modunun elde edilmesi için yüzeydeki deliklerin yarıçapları büyütülerek  $0,40a$  yapılmıştır ve algılanmak istenen malzeme bu deliklerin içerisine konulmuştur. Deliklerin kırılma indisi değiştikçe çıkış gücünün merkez frekansı da kaymıştır. Bu

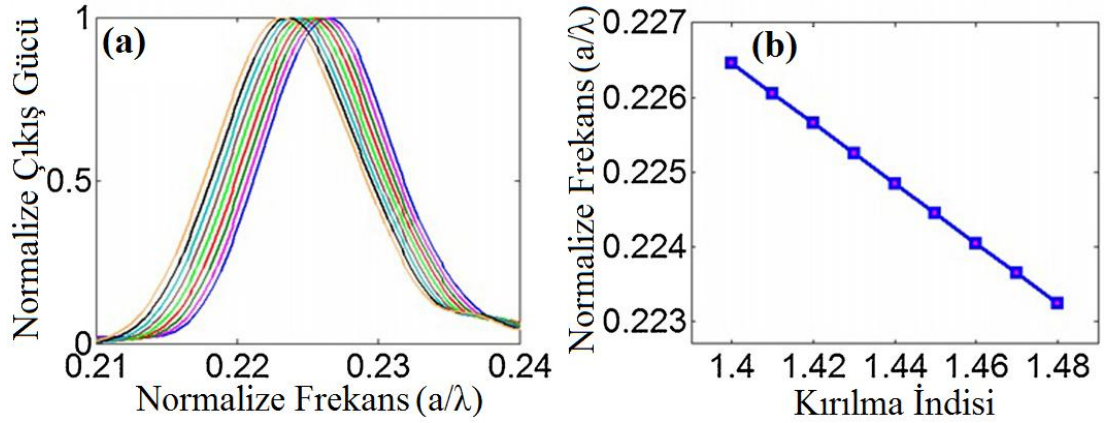
kayma miktarı ölçülerek tasarlanan sensörün hassasiyeti 117 nm/RIU olarak hesaplanmıştır.

Diğer bir üçgen örgü dağılımındaki fotonik kristal sensör çeşidi de Şekil 4.6(a)'daki gibidir. Bu konfigürasyonda yüzey modu, yapının yüzeyine hava delikler yerine hava yarık yerleştirilerek elde edilmiştir. Yüzeydeki yarığın genişliği  $0,30a$ 'dır. Tasarlanan yapının dispersiyon diyagramı Şekil 4.6(b)'deki gibidir ve kırmızı çizgi yüzey modunu göstermektedir.



Şekil 4.6. (a) Üçgen örgü dağılımına ve yüzeyinde hava yarığa sahip olan fotonik kristal sensörün şematik gösterimi. (b) Tasarlanan üçgen örgü dağılımındaki fotonik kristal yapının dispersiyon diyagramı.

Yapı yüzeyindeki yarığın farklı kırılma indisi değerleri için elde edilen çıkış gücünün spektrumu Şekil 4.7(a)'da verilmiştir. Bu çıkış gücünün frekans bilgisinden faydalanılarak Şekil 4.7(b)'deki hassasiyet eğrisi elde edilmiştir. Buradan hesaplanan hassasiyet değeri 396 nm/RIU olarak bulunmuştur.



Şekil 4.7. (a) Kırılma indisi değişimine bağlı olarak çıkış gücünün kayması. (b) Kırılma indisi değişimine göre normalize frekans grafiği.

Üçgen örgü dağılımına sahip fotonik kristal kullanılarak oluşturulan sensör yapıları kare örgü dağılımına sahip olandan daha büyük hassasiyet değerine sahiptir. Bu fark dispersiyon dağılımlarındaki yüzey modlarının eğimlerinin farklı olmasından kaynaklanmaktadır. Üçgen örgü dağılımına sahip fotonik kristal yüzey modunun eğimi daha küçüktür ve bu da ışığın malzeme ile daha uzun süre etkileşime girdiğini gösterir.

#### 4.8. Sonuçlar

Bu çalışmada, fotonik kristallerin yüzey modları kullanılarak polarizasyondan bağımsız dalga kılavuzu tasarlanmıştır. Dalga kılavuzunun bant genişliği karşılaştırılabilir bir değer olan %4.6 olarak elde edilmiştir. Yüzeydeki deliklerin veya çubukların çapı optimize edilerek bu değer daha da artırılabilir. Tasarlanan fotonik kristal yapısının zaman düzlemindeki ve frekans düzlemindeki analizleri yapılmıştır. Frekans düzlemindeki simülasyonlar yüzey dalga kılavuzu modlarının hem TE hem de TM polarizasyon için ışık-çizgisinin altında kaldığını göstermiştir. Ayrıca bu iki mod farklı alan dağılımlarına ve farklı dispersiyon karakteristiklerine sahiptir. Çünkü TM mod yüzeyde zayıf bir şekilde ilerlerken, TE mod ise yüzeye güçlü bir şekilde hapsolmüştür. Aynı zamanda doğrusal olmayan denklem metodu kullanılarak iki boyutlu etkin ortam teorisi başarılı bir şekilde uygulanmıştır.

Polarizasyondan bağımsız dalga kılavuzuna ek olarak, yüzey modları kullanılarak oluşturulan fotonik kristal biyosensör konfigürasyonları da incelenmiştir. İlk yapı kare örgü dağılımındaki dielektrik çubuklardan oluşmaktadır. Fotonik kristal ve hava arayüzeyi boyunca yer alan delinmiş çubuklar yüzey modunu oluşturmaktadır. Bu delinmiş çubukların kırılma indisleri değiştirilerek frekans kayması gözlemlenmiştir. İkinci durumda ise üçgen örgü dağılımına sahip fotonik kristaller kullanılmıştır. Burada yüzey modu oluşturmak için hava delikler ve hava yarıktan faydalanılmıştır. Farklı yüzey modu mekanizmaları ile çeşitli hassasiyet değerleri (8, 93, 117 ve 396 nm/RIU) elde edilmiştir.



## 5. SONUÇLAR

Bu tez için yapılan çalışmalarda, yavaş ışık elde edilmesi, mod-mertebe çevirici, polarizasyondan bağımsız dalga kılavuzu ve biyosensör tasarımı için fotonik kristal yapılar kullanılmıştır ve bu yapıların performanslarının değerlendirilmesi amacıyla tasarlanan konfigürasyonların FDTD ve PWE metotları ile analizleri gerçekleştirilmiştir.

Tezin ilk kısmında, yavaş ışık elde etmek amacıyla fotonik kristal yüzey modları kullanılmıştır. Üçgen örgü dağılımından oluşan fotonik kristal yapının yüzeyindeki hava deliklerin büyüklükleri değiştirilerek dispersiyon diyagramları oluşturulmuştur. Bu dispersiyon diyagramlarından faydalanılarak normalize frekansa karşılık grup kırılma indisi grafiği çizdirilmiştir. Bu grafikten, yüzeydeki hava deliklerin çapı arttıkça  $n_g$  değerinin arttığı, bant genişliğinin ise azaldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, tasarlanan yapının  $n_g$  ve bant genişliği çarpımı hesaplatılmıştır. Yapının grup hızı dispersiyonu ve üçüncü dereceden dispersiyon özellikleri incelenmiştir. Grup indisinin yaklaşık olarak sabit olduğu frekans aralığında dispersiyon etkisinin ihmal edilebilecek kadar az olduğu görülmüştür. Frekans düzleminde elde edilen sonuçlar zaman düzlemindeki analizlerle desteklenmiştir. Tasarlanan yapının frekans düzleminde yapılan hesaplamalarda elde edilen  $n_g$  değerinin zaman düzleminde gerçekleştirilen ölçümler sonucunda elde edilen  $n_g$  değeri ile tutarlı olduğu görülmüştür. Ayrıca frekans ve zaman düzlemindeki manyetik alan dağılımları karşılaştırılmıştır.

İkinci kısımda ise, asimetrik ve simetrik fotonik kristal yapılar mod çevirme amacıyla incelenmiştir. Bu fotonik kristallerin dispersiyon diyagramları oluşturulmuş ve bu diyagramlardan faz kırılma indisi eğrileri elde edilmiştir. Faz kırılma indisi eğrilerine bakıldığında simetrik ve asimetrik fotonik kristaller için faz indisi değerlerinin birbirinden farklı olduğu gözlemlenmiştir. Bu faz kırılma indisi farkından faydalanılarak simetrik ve asimetrik fotonik kristaller birlikte kullanılmış ve mod merteye çeviricisi tasarlanmıştır. Tasarlanan yapının iletim verimliliği ve faz kayması gibi yönlerden performans analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen

sonuçlar temel modun yüksek mertebeli modlara başarılı bir şekilde çevrildiğini göstermiştir.

Tezin son kısmında ise, fotonik kristal yüzey modları kullanılarak polarizasyondan bağımsız dalga kılavuzu ve biyosensör tasarımı gerçekleştirilmiştir. Dalga kılavuzunun hem TE hem de TM polarizasyonda çalışması için periyodik fotonik kristal yapının yüzeyinde değişiklik meydana getirerek TE ve TM modların ortak bir frekans bölgesinde çakışması sağlanmıştır. Zaman düzleminde, iki polarizasyon çeşidi için de aynı frekansa sahip optik darbe, yüzey modu dalga kılavuzuna gönderilerek ışığın burada ilerlemesi gözlemlenmiştir. Buna ek olarak fotonik kristalin yüzeyi değişik şekillerde bozularak farklı hassasiyet değerlerine sahip olan sensör yapıları tasarlanmıştır. Tasarlanan yapıların dispersiyon diyagramları incelenmiştir. Ayrıca hassasiyet değerlerinin llmesi için, yapıdaki algılama alanlarının farklı kırılma indisi değerleri için çıkış gücünün merkez frekansındaki kayma gözlemlenmiştir. Tasarlanan sensör konfigürasyonları kullanılarak elde edilen en yüksek hassasiyet değeri 396 nm/RIU'dur.

## KAYNAKLAR

- [1] 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.
- [2] Yablonovitch, E., Inhibited Spontaneous Emission in Solid-State Physics and Electronics, *Physical Review Letters*, 58, 2059-2062, 1987.
- [3] Kurt, H., Erim, M. N., Erim, N., Various photonic crystal bio-sensor configurations based on optical surface modes, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 165, 68-75, 2012.
- [4] Scullion, M. G., Krauss, T. F., Falco, A. D., Slotted Photonic Crystal Sensors, *Sensors*, 13, 3675-3710, 2013.
- [5] Nair, R. V., Vijaya, R., Photonic crystal sensors: An overview, *Progress in Quantum Electronics*, 34, 89-134, 2010.
- [6] Kurt, H., Erim, N., Üstün, K., Slow light based on optical surface modes of two-dimensional photonic crystals, *Journal of the Optical Society of America B*, 29, 1187-1193, 2012.
- [7] Baba, T., Slow light in photonic crystals, *Nature Photonics*, 2, 465-473, 2008.
- [8] Li, J., Liu, Z., Tu, Y., Ho, S., Jung, I., Ocola, L., Wessels, B., Photonic Crystal Waveguide Electro-Optic Modulator With a Wide Bandwidth, *Journal of Lightwave Technology*, 31, 1601-1607, 2013.
- [9] Jafarpour, A., Chow, E., Reinke, C.M., Huang, J.D., Adibi, A., Grot, A., Mirkarimi, L.W., Girolami, G., Lee, R.K., Xu, Y., Large-bandwidth ultra-low-loss guiding in bi-periodic photonic crystal waveguides, *Applied Physics B*, 79, 409-414, 2004.
- [10] Park, H. G., Kim, S.H., Kwon, S.H., Ju, Y.G., Yang, J.K., Baek, J.H., Kim, S.B., Lee, Y.H., Electrically Driven Single-Cell Photonic Crystal Laser, *Science*, 305, 1444-1447, 2004.
- [11] Altug, H., Vučković, J., Photonic crystal nanocavity array laser, *Optics Express*, 13, 8819-8828, 2005.
- [12] Yee, K. S., Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 14, 302-307, 1966.
- [13] Taflove, A., Brodwin, M. E., Numerical solution of steady-state electromagnetic scattering problems using the time-dependent Maxwell's equations, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 23, 623-630, 1975.
- [14] Krauss, T. F., Why do we need slow light, *Nature Photonics*, 2, 448-450, 2008.
- [15] Hamachi, Y., Kubo, S., Baba, T., Slow light with low dispersion and nonlinear enhancement in a lattice-shifted photonic crystal waveguide, *Optics Letters*, 34, 1072-1074, 2009.
- [16] Khayam, O., Benisty, H., General recipe for flatbands in photonic crystal waveguides, *Optics Express*, 17, 14634-14648, 2009.
- [17] Dai, L., Jiang, C., Ultrawideband low dispersion slow light waveguides, *Journal of Lightwave Technology*, 27, 2862-2868, 2009.
- [18] Ma, J., Jiang, C., Demonstration of ultraslow modes in asymmetric line-defect photonic crystal waveguides, *IEEE Photonics Technology Letters*, 20, 1237-1239, 2008.

- [19] Hou, J., Wu, H., Citrin, D. S., Mo, W., Gao, D., Zhou, Z., Wideband slow light in chirped slot photonic-crystal coupled waveguides, *Optics Express*, 18, 10567–10580, 2010.
- [20] Petrov, A. Y., Eich, M., Zero dispersion at small group velocities in photonic crystal waveguides, *Applied Physics Letters*, 85, 4866–4868, 2004.
- [21] Mori, D., Baba, T., Dispersion-controlled optical group delay device by chirped photonic crystal waveguides, *Applied Physics Letters*, 85, 1101–1103, 2004.
- [22] Povinelli, M. L., Johnson, S. G., Joannopoulos, J. D., Slow-light band-edge waveguides for tunable time delays, *Optics Express*, 13, 7145–7159, 2005.
- [23] Frandsen, L. H., Lavrinenko, A. V., Fage-Pedersen, J., Borel, P. I., Photonic crystal waveguides with semi-slow light and tailored dispersion properties, *Optics Express*, 14, 9444–9450, 2006.
- [24] Li, J., White, T. P., O’Faolain, L., Gomez-Iglesias, A., Krauss, T. F., Systematic design of flat band slow light in photonic crystal waveguides, *Optics Express*, 16, 6227–6232, 2008.
- [25] Rawal, S., Sinha, R. K., De La Rue, R. M., Slow light miniature devices with ultra-flattened dispersion in silicon-on-insulator photonic crystal, *Optics Express* 17, 13315–13325, 2009.
- [26] Ebnali-Heidari, M., Grillet, C., Monat, C., Eggleton, B. J., Dispersion engineering of slow light photonic crystal waveguides using microfluidic infiltration, *Optics Express* 17, 1628–1635, 2009.
- [27] Saynatjoki, A., Mulot, M., Ahopelto, J., Lipsanen, H., Dispersion engineering of photonic crystal waveguides with ringshaped holes, *Optics Express*, 15, 8323–8328, 2007.
- [28] Liang, J., Ren, L-Y., Yun, M-J., Han, X., Wang, X-J., Wideband ultraflat slow light with large group index in a W1 photonic crystal waveguide, *Journal of Applied Physics*, 110, 063103, 2011.
- [29] Wang, D., Zhang, J., Yuan, L., Lei, J., Chen, S., Han, J., Hou, S., Slow light engineering in polyatomic photonic crystal waveguides based on square lattice, *Optics Communications*, 284, 5829–5832, 2011.
- [30] Dai, L., Li, T., Jiang, C., Wideband ultralow high-order-dispersion photonic crystal slow-light waveguide, *Journal of the Optical Society of America B*, 28, 1622–1626, 2011.
- [31] Baba, T., Kawasaki, T., Sasaki, H., Adachi, J., Mori, D., Large delay-bandwidth product and tuning of slow light pulse in photonic crystal coupled waveguide, *Optics Express*, 16, 9245–9253, 2008.
- [32] Matzen, R., Jensen, J. S., Sigmund, O., Systematic design of slow-light photonic waveguides, *Journal of the Optical Society of America B*, 28, 2374–2382, 2011.
- [33] Notomi, M., Yamada, K., Shinya, A., Takahashi, J., Takahashi, C., Yokohama, I., Extremely large group-velocity dispersion of line-defect waveguides in photonic crystal slabs, *Physical Review Letters*, 87, 253902, 2001.
- [34] Scheuer, J., Paloczi, G. T., Poon, J. K. S., Yariv, A., Coupled resonator optical waveguides: toward the slowing and storage of light, *Optics and Photonics News*, 16, 36–40, 2005.

- [35] Khurgin, J. B., Expanding the bandwidth of slow-light photonic devices based on coupled resonators, *Optics Letters*, 30, 513–515, 2005.
- [36] Cooper, M. L., Gupta, G., Schneider, M. A., Green, W. M. J., Assefa, S., Xia, F., Gifford, D. K., Mookherjea, S., Waveguide dispersion effects in silicon-on-insulator coupled-resonator optical waveguides, *Optics Letters*, 35, 3030–3032, 2010.
- [37] O’Brien, D., Settle, M. D., Karle, T., Michaeli, A., Salib, M., Krauss, T. F., Coupled photonic crystal heterostructure nanocavities, *Optics Express*, 15, 1228–1233, 2007.
- [38] Üstün K., Kurt, H., Ultra slow light achievement in photonic crystals by merging coupled cavities with waveguides, *Optics Express*, 18, 21155–21161, 2010.
- [39] Meade, R. D., Brommer, K. D., Rappe, A. M., Joannopoulos, J. D., Electromagnetic Bloch waves at the surface of a photonic crystal, *Physical Review B*, 44, 10961–10964, 1991.
- [40] Ramos-Mendieta, F., Halevi, P., Surface electromagnetic waves in two-dimensional photonic crystals: effect of the position of the surface plane, *Physical Review B*, 59, 15112–15120, 1999.
- [41] Enoch, S., Popov, E., Bonod, N., Analysis of the physical origin of surface modes on finite-size photonic crystals, *Physical Review B*, 72, 155101, 2005.
- [42] Rahachou, A. I., Zozoulenko, I. V., Waveguiding properties of surface states in photonic crystals, *Journal of the Optical Society of America B*, 23, 1679–1683, 2006.
- [43] Chen, H., Tsia, K. K., Poon, A. W., Surface modes in two-dimensional photonic crystal slabs with a flat dielectric margin, *Optics Express*, 14, 7368–7377, 2006.
- [44] Che, M., Li, Z-Y., Analysis of surface modes in photonic crystals by a plane-wave transfer-matrix method, *Journal of the Optical Society of America A*, 25, 2177–2184, 2008.
- [45] Lu, T-W., Lu, S-P., Chiu, L-H., Lee, P-T., Square lattice photonic crystal surface mode lasers, *Optics Express*, 18, 26461–26468, 2010.
- [46] Xiao, S., Qiu, M., Optical microcavities based on surface modes in two-dimensional photonic crystals and silicon-on-insulator photonic crystals, *Journal of the Optical Society of America B*, 24, 1225–1229, 2007.
- [47] Lu, T., Hsiao, Y., Ho, W., Lee, P-T., High-index sensitivity of surface mode in photonic crystal hetero-slab-edge microcavity, *Optics Letters*, 35, 1452–1454, 2010.
- [48] Johnson, S., Joannopoulos, J., Block-iterative frequency-domain methods for Maxwell’s equations in a planewave basis, *Optics Express*, 8, 173–190, 2001.
- [49] Kurt, H., Üstün, K., Ayas, L., Study of different spectral regions and delay bandwidth relation in slow light photonic crystal waveguides, *Optics Express* 18, 26965–26977, 2010.
- [50] Üstün, K., Kurt, H., Slow light structure with enhanced delay-bandwidth product, *Journal of the Optical Society of America B*, 29, 2403–2409, 2012.
- [51] 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.
- [52] Berenger, J. P., A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves, *Journal of Computational Physics*, 114, 185–200, 1994.
- [53] Monat, C., de Sterke, M., Eggleton, B. J., Slow light enhanced nonlinear optics in periodic structures, *Journal of Optics*, 12, 104003, 2010.
- [54] Monat, C., Ebnali-Heidari, M., Grillet, C., Corcoran, B., Eggleton, B. J., White, T. P., O’Faolain, L., Li, J., Krauss, T. F., Four-wave mixing in slow light engineered silicon photonic crystal waveguides, *Optics Express* 18, 22915–22927, 2010.
- [55] Momeni, B., Adibi, A., Optimization of photonic crystal demultiplexers based on the superprism effect, *Applied Physics B*, 77, 555-560, 2003.
- [56] 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.
- [57] 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, *Appl. Phys. B*, 102, 857-861, 2011.
- [58] 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.
- [59] Lee, B.-T., Shin, S.-Y., Mode-order converter in a multimode waveguide, *Optics Letters*, 28, 1660-1662, 2003.
- [60] 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.
- [61] Huang, Y., Xu, G., Ho, S.-T., An Ultracompact Optical Mode Order Converter, *IEEE Photonics Technology Letters*, 18, 2281-2283, 2006.
- [62] 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.
- [63] 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.
- [64] Kurt, H., Turduev, M., Giden, I. H., Crescent shaped dielectric periodic structure for light manipulation, *Optics Express*, 20, 7184-7194, 2012.
- [65] 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.
- [66] 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.
- [67] 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.

- [68] 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.
- [69] Chen, G., Kang, J. U., Waveguide mode converter based on two-dimensional photonic crystals, *Optics Letters*, 30, 1656-1658, 2005.
- [70] Happ, T. D., Kamp, M., Forchel, A., Photonic crystal tapers for ultracompact mode conversion, *Optics Letters*, 26, 1102-1104, 2001.
- [71] 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.
- [72] 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 & Technology B*, 22, 568-572, 2009.
- [73] Erim, N., Giden, I. H., Turduev, M., Kurt, H., Efficient Mode-order Conversion using Photonic Crystal Structure with Low Symmetry, *Journal of the Optical Society of America B*, Manuscript is submitted for publication.
- [74] 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.
- [75] Notomi, M., Theory of light propagation in strongly modulated photonic crystals: Refractionlike behavior in the vicinity of the photonic band gap, *Physical Review B*, 62, 10696–10705, 2000.
- [76] Witzens, J., Loncar, M., Scherer, A., Self-collimation in planar photonic crystals, *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 8, 1246-1257, 2002.
- [77] Prasad, P. N., Introduction to Biophotonics, *Wiley*, New Jersey, 2003.
- [78] Liscidini, M., Sipe, J., Analysis of Bloch-surface-wave assisted diffraction-based biosensors, *Journal of the Optical Society of America B*, 26, 279-289, 2009.
- [79] Cicek, A., Ulug, B., Polarization-independent waveguiding with annular photonic crystals, *Optics Express*, 17, 18381-18386, 2009.
- [80] Lidorikis, E., Povinelli, M. L., Johnson, S. G., Joannopoulos, J. D., Polarization-independent linear waveguides in 3D photonic crystals, *Physical Review Letters*, 91, 023902, 2003.
- [81] Hou, J., Gao, D., Wu, H., Zhou, Z., Polarization insensitive self-collimation waveguide in square lattice annular photonic crystals, *Optics Communications*, 282, 3172-3176, 2009.
- [82] Erim, N., Erim, M. N., Kurt, H., Polarization-Insensitive Waveguide with Optical Surface States, 12th Mediterranean Microwave Symposium (MMS 2012), İstanbul, Türkiye, Eylül 2012.
- [83] Erim, M. N., Erim, N., Kurt, H., Optical surface modes of photonic crystals for dual-polarization waveguide, *Photonics and Nanostructures: Fundamentals and Applications*, 11, 123-131, 2013.
- [84] Gao, D., Zhou, Z., Nonlinear equation method for band structure calculations of photonic crystal slabs, *Applied Physics Letters*, 88, 163105, 2006.

- [85] Johnson, S. G., Fan, S., Villeneuve, P. R., Joannopoulos, J. D., Guided modes in photonic crystal slabs, *Physical Review B*, 60, 5751, 1999.



## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel Bilgiler

Soyadı, Adı : ERİM, Nur  
Uyruğu : T.C.  
Doğum tarihi ve yeri : 11.02.1988 Şefaatli  
Medeni hali : Evli  
Telefon : 0 (507) 652 02 65  
Faks : 0 (312) 292 40 91  
e-mail : [nerim@etu.edu.tr](mailto:nerim@etu.edu.tr)

### Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Lisans	TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Elektrik-Elektronik Müh.	2011
Y.Lisans	TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Elektrik-Elektronik Müh.	2013

### İş Deneyimi

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

### Yabancı Dil

İngilizce  
Rusça

### Yayımlar

#### Uluslar arası hakemli dergilerde yayınlanan makaleler

Kurt, H., Erim, M. N., Erim, N., Various photonic crystal biosensor configurations based on optical surface modes, Sensors and Actuators B: Chemical, 165, 68–75, 2012.

Kurt, H., Erim, N., Üstün, K., Slow light based on optical surface modes of two-dimensional photonic crystals, Journal of the Optical Society of America B, 29, 1187-1193, 2012.

Erim, M. N., Erim, N., Kurt, H., Optical surface modes of photonic crystals for dual-polarization waveguide, Photonics and Nanostructures - Fundamentals and Applications, 11, 123-131, 2013.

**Uluslar arası bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitabında (Proceeding) basılan bildiriler**

Erim, N., Erim, M. N., Kurt, H., Polarization-Insensitive Waveguide with Optical Surface States, 12th Mediterranean Microwave Symposium (MMS 2012), İstanbul, Türkiye, Eylül 2012.

**Ulusal bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitabında basılan bildiriler**

Kurt, H., Erim, M. N., Erim, N., A novel surface mode photonic crystal bio-sensor, 7. Türkiye Nanobilim ve Nanoteknoloji Konferansı (NANOTR), İstanbul, Türkiye, Haziran 2011.