

**ÖZGÜN FOTONİK DALGA KILAVUZLARININ IŞIĞIN HIZINI  
YAVAŞLATMAK GAYESİYLE TASARIMI VE BU TASARIMLARIN  
BİYOSENSÖR ALANINA UYARLANMASI**

**LOKMAN AYAS**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**ELEKTRİK VE ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ**

**TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ**

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ARALIK 2011**

**ANKARA**

Fen Bilimleri Enstitü onayı

---

Prof. Dr. Ünver KAYNAK  
Müdür

Bu tezin Yüksek Lisans derecesinin tüm gereksinimlerini sağladığını onaylarım.

---

Doç. Dr. Hamza Kurt  
Anabilim Dalı Başkanı

Lokman AYAS tarafından hazırlanan ÖZGÜN FOTONİK DALGA KILAVUZLARININ IŞIĞIN HIZINI YAVAŞLATMAK GAYESİYLE TASARIMI VE BU TASARIMLARIN BİYOSENSÖR ALANINA UYARLANMASI adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

---

Doç. Dr. Hamza KURT  
Tez Danışmanı

Tez Jüri Üyeleri

Başkan :Doç. Dr. Hamza KURT

Üye : Yrd. Doç. Dr. Ali Cafer GÜRBÜZ

Üye : Yrd. Doç. Dr. A. Murat ÖZBAYOĞLU

## **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.

Lokman AYAS

**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 –Aralık 2011

**LOKMAN AYAS**

**ÖZGÜN FOTONİK DALGA KILAVUZLARININ IŞIĞIN HIZINI  
YAVAŞLATMAK GAYESİYLE TASARIMI VE BU TASARIMLARIN  
BİYOSENSÖR ALANINA UYARLANMASI**

**ÖZET**

Son yılların popüler konuları arasında yer alan fotonik kristallerle ilgili dünya genelinde birçok araştırmacı tarafından araştırmalar yapılmaktadır. Işığın hızı, yönü, fazı gibi özelliklerinin değiştirilebildiği fotonik kristaller bu özellikleri sayesinde haberleşme, tıp alanı, elektronik devreler gibi bir çok alanda kullanılmaya uygundurlar. Günümüzdeki elektronik elemanlardan ısınma probleminin olmaması, çok daha hızlı veri iletişiminin gerçekleştirilmesi, oda sıcaklığında çalışabilmeleri ve çok küçük boyutlara sahip olmaları gibi birçok üstün özelliğe sahip olan fotonik kristallerin gelecekte elektronik elemanların yerini alması bekleniyor.

Bu tez çalışmasında, kare ve üçgen örgü yapısındaki fotonik kristallerin özellikleri sonlu farklar zaman düzlemi (FDTD) metodu ve düzlemsel dalga açılım metodu (PWEM) kullanılarak incelenmiştir. Kare örgü fotonik kristal ortasına çift taraflı simetrik oluklu dielektrik levha yerleştirilmiştir. Oluşturulan yapının bant diyagramında bulunan keskin rezonans özelliği kullanılarak belli bir frekanstaki tek mod profiline sahip ışığın yerelleşmesi sağlanmıştır. Yapının pratikte kullanılabilmesi için çift modu tek moda dönüştüren bir yapı yapının tek tarafında bulunan oluk yarıçapları değiştirilerek oluşturulmuştur. Çalışmanın başka bir aşamasında kare örgü yapısında fotonik kristal ortasına tek taraflı oluklu fotonik kristal yerleştirilmiş yapının özellikleri analiz edilmiştir. Yapılan analizlerle yapının küçük yasaklı bant aralığının olduğu görülmüştür. Buna bağlı olarak iletim bandında 4nm gibi dar bir dalga boyu aralığında 30 dB düşüşün olduğu gözlenmiştir. Ortaya çıkan bu özelliklerle oluşturulan yapının farklı oluk yarıçap değerleri için farklı

frekans aralıklarını doğru bir şekilde ayırabilmektedir. Barındırdığı bu özellikleri sayesinde yapının DEMUX olarak tasarlanabileceği gösterilmiştir. Yukarıdakilere ilave olarak yaptığımız bir çalışmada ise üçgen örgü fotonik kristal kullanılarak dalga kılavuzu komşuluğundaki ve zemin üzerindeki hava boşluk yarıçap parametreleri taranmıştır. Yapılan çalışmayla yüksek grup hızı, düşük grup hızı dağılımı ve yüksek bant genişliğine sahip yapı tasarlanması için bir yol gösterilmiştir. Analizler sonucunda dalga kılavuzu komşuluğundaki ve diğer hava boşluklarının yüksek yarıçap değerlerinde grup indeksi ile bant genişliği çarpım değeri 0.30 değerine kadar yükseltilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Fotonik Kristal, Fotonik Kristal Dalga Kılavuzu, Kare Örgü Fotonik Kristal, Üçgen Örgü Fotonik Kristal, Işığın Yerelleşmesi, Keskin Rezonans, Mod Dönüşümü, Oluklu Dielektrik Dalga Kılavuzu, Küçük Yasaklı Bant Aralığı, DEMUX, Yavaş Işık, Parametre Taraması, Grup Hızı Dağılımı

**University** : **TOBB Economics and Technology University**  
**Institute** : **Institute of Natural and Applied Sciences**  
**Science Programme** : **Electrical and Electronics Engineering**  
**Supervisor** : **Associate Professor Hamza KURT**  
**Degree Awarded and Date** : **M.Sc. – December 2011**

**LOKMAN AYAS**

**DESIGNING NOVEL PHOTONIC WAVEGUIDES FOR SLOW LIGHT AND  
BIOSENSOR APPLICATIONS**

**ABSTRACT**

Photonic crystals (PCs) are one of the most famous topics in recent years and many researchers all around the world are engaged in research on this topic. Thanks to control the properties like velocity, direction and phase of the light PCs can be used in the field of optical telecommunication, medical applications and electronic circuit elements. PCs have many advantages from the recent electronic components. A few of them are lack-of warm-up problem, high speed data transfer, can be working in room temperature and have small dimensions. With these advantages PCs may replace place of electronic components in the future.

In this thesis, properties of square and triangular lattice PCs are investigated by finite difference time domain (FDTD) method and plane wave expansion method (PWEM). A symmetrically corrugated slab placed at the center of the square lattice PC and investigated its features. In its dispersion diagram at photonic band gap (PBG) a sharp resonance point has detected in an odd mode. Using this mode light can be localized inside the PC at the corresponding sharp resonance frequency. In real life there aren't an odd mode source so to use the property found with the PC in real life an even to odd mode converter has to be designed. Mode converter part designed with changing air holes radii at one side of the corrugated dielectric slab. In the second part of this study a single sided corrugated dielectric slab placed at the center of square lattice PC and investigated its features. Mini-stop band (MSB) property has found in the PC's dispersion diagram. At the edge of the MSB region we found 30dB drop in transmission in a 4nm wavelength interval. According to this property PC can split different frequencies which can propagate inside PC with different corrugation radius. From these results a DEMUX design has shown in the study. In the third part of this study using triangular lattice photonic crystal, a way to

obtain large bandwidth, constant group index and low group velocity dispersion (GVD) for slow light applications has shown. After changing the radius of air holes at the sides of the waveguide and at the background, figure of merit raise up to approximately 0.30 for appropriate air hole radius values.

**Key words:** Photonic Crystals, Photonic Crystal Waveguides, Light Localization, Sharp Resonance, Mode Converter, Corrugated Dielectric Slab Waveguide, Mini-stop Band, DEMUX, Slow Light, Group Velocity Dispersion, Biosensor,

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tezım boyunca her zaman yaptığı pozitif yönlendirmelerle konuya olan ilgi ve isteğimi hep güncel tutmamı sağlayan, tutumu ve davranışlarıyla sadece araştırma alanımda değil hayatımda da örnek aldığım, hayatım boyunca unutmayacağım önemli bilgilendirmelerinden dolayı değerli hocam Hamza KURT'a ve başta araştırmacı olarak çalışmaya başladığım ilk günlerde yardımlarıyla ve tecrübeleriyle bana destek olan Ali Cafer Gürbüz olmak üzere tüm Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerine teőekkürlerimi sunarım.

Ayrıca farklı fikir ve görüşleriyle çalışmalarıma katkı sağlayan değerli arkadaşlarım Kadir ÜSTÜN ve Mehmet Ali ağrı TUNCER ile birlikte tüm Elektromanyetik Laboratuvarı arkadaşlarıma teőekkürlerimi sunarım.

Bugünlere gelmemde şüphesiz en büyük paya sahip olan aileme de sonsuz teőekkürlerimi sunarım.

Bu çalışmanın bir kısmı TÜBİTAK (Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu) tarafından 108T717 kodlu proje kapsamında desteklenmiştir.



## İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xi
1. GİRİŞ	1
1.1 Tanıtım	1
1.2 Fotonik Yasaklı Bant Aralığı	5
1.2.1 2 Boyutlu Yapılar İçin PWEM	5
1.2.2 FDTD metodu	10
2. OPTİK DALGANIN TEK BİR FOTONİK KRİSTAL DALGA KILAVUZU İÇERİSİNDE MODUNUN DEĞİŞTİRİLMESİ VE YERELLEŞMESİ	15
2.1 Giriş	15
2.2 Yapının Oluşturulması ve Analizleri	17
2.2.1 Asimetrik Yapı Kullanılarak Yapının Oluşturulması ve Mod Dönüşümü	24
2.2.2 Işığın Yerelleştirilmesi	27
2.3 Sonuç	31
3. KARE ÖRGÜ YAPISINA SAHİP FOTONİK KRİSTAL İLE KÜÇÜK YASAKLI BANT ÖZELLİĞİ KULLANILARAK FREKANS AYRIŞMASI	33
3.1 Giriş	33
3.2 Yapının Oluşturulması ve Analizleri	35
3.3 Sonuç	45

4. FOTONİK KRİSTAL DALGA KILAVUZLARINDA GRUP İNDEKS İLE BANT GENİŞLİĞİ ARASINDAKİ İLİŞKİ	48
4.1 Giriş	48
4.2 Yapının Oluşturulması ve Analizleri	49
4.3 Sonuç	55
5. SONUÇ	56
5.1 Sonuçlar	56
5.2 Gelecekte Yapılabilecek Çalışmalar	59
REFERANSLAR	61

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1 Fotonik kristallerin 1 boyutlu 2 boyutlu ve 3 boyutlu durumlarına örnekler [3].	1
Şekil 1.2 Üçgen örgü yapısına sahip fotonik kristal levha örneği[4].	2
Şekil 1.3 (a) W1 tipi 1 sıra (b) W2 tipi 2 sıra (c) W3 tipi 3 sıra periyodikliğin bozulmasıyla oluşturulmuş fotonik kristal dalga-kılavuzları[3].	3
Şekil 1.4 Morfo kelebeğinin (a) kanadının elektron mikroskobu kullanılarak elde edilmiş görüntüsü (b) kanadının kesit alanının elektron mikroskobu kullanılarak elde edilmiş görüntüsü gösterilmiştir[5].	4
Şekil 1.5 Tavus kuşunun tüyündeki (a) yeşil ve (b) kahverengi renklerin ortaya çıkmasını sağlayan fotonik kristal yapısının elektron mikroskobuyla görüntülenmiş halleri[6].	4
Şekil 1.6 (a) kare örgü yapısında ve (b) üçgen örgü yapısında fotonik kristaller. Fotonik kristallerin analizleri iki yöntem ile yapılır. Birincisi frekans düzleminde hesaplama yapan PWEM. İkincisi ise zaman düzleminde çalışan FDTD metodudur.	5
Şekil 1.7 Kare ve Üçgen örgü yapılarında ters örgü vektörleri.	7
Şekil 1.8 Kare ve üçgen örgü yapısında Brillouin alanları. $\Gamma$ -X-M ve $\Gamma$ -K-M çizgiler üzerinde hareket edilecek doğrultuları göstermektedir.	8
Şekil 1.9 Figürde Şekil.5(b) de görülen yapının band diyagramı verilmiştir. Sürekli çizgiler TE modları, kesikli çizgiler de TM modları göstermektedir. TE modunda yasaklı bant aralığı soluk dikdörtgenle taranmış olarak gösterilmiş bölgedir.	9
Şekil 1.10 FDTD kullanılarak elde edilmiş sonuçlar küçük yuvarlaklarla gösterilmiştir. Düz çizgiler ise PWEM ile hesaplanmıştır. Bulunan iki sonucun bir biriyle örtüştüğü görülmektedir[3].	10
Şekil 1.11 Elektrik ve manyetik alanların denklemlere uygun şekilde yapılmış dizilimi gösterilmiştir. Zaman düzlemindeki hesaplamalar küp üzerinde belirlenen bu değerlere göre yapılmaktadır[9].	12
Şekil 2.1 Kullanılan Fotonik Kristal Dalga-kılavuzu yapısının asimetric ve simetric kısımları yakınlştırılarak parametreler belirtilmiştir.	18
Şekil 2.2 Şeklin sağ alt köşesinde gösterilmiş olan $r=0.3a$ yarıçaplı dielektrik çubuklara sahip kare örgü yapısındaki Fotonik Kristal dalga kılavuzunun bant diyagramı.	19
Şekil 2.3 (a)Kare örgü yapısına sahip Fotonik Kristalin ortasına oluklu dielektrik levha yerleştirildikten sonra elde edilen bant diyagramı (b) B noktasının üzerinde bulunduğu tek modun bant şeklinin yakından görünümü ve (c) (a)şeklinde gösterilen A ve B noktalarının mod profilleri gösterilmiştir.	20

Şekil 2.4	Dalga vektörüne, $k$ karşılık grup indeksi grafiği, dönüm noktasında grup hızının ani değişimi görülmektedir. Keskin rezonans değerinin sağ tarafında en düşük grup indeks değerine göre sol tarafında keskin rezonanstan belirli bir uzaklığa göre seçilen noktaların grup indeks değerleri görülmektedir.	21
Şekil 2.5	(a) Oluklu hava boşluklarının simetrik olarak $d$ miktarında kaydırılması, (b)-(c) grafiklerinde $a$ cinsinden kaydırma miktarının grup indeksine karşılık grafikleri gösterilmiştir.	22
Şekil 2.6	(a)'da görülen yapının $w=0.7a$ ve $r=0.175a$ değeri için (b)'de $w=0.9a$ ve $h=0.225a$ değerleri için dalga vektörü grup indeks grafiği (c)'de gösterilmiştir.	23
Şekil 2.7	Simetrisi bozulan kısmın oluk yarıçapı $0.28a$ olduğu durumda bant diyagramında elde edilen küçük yasaklı bant aralığı ve yapının şekli gösterilmiştir. Küçük yasaklı bant aralığının üst bandının kıvrım noktası yaklaşık yerelleşme frekansı olan $a/\lambda=0.27426$ değerine karşılık gelmektedir.	25
Şekil 2.8	Yapıya gönderilen kıvrım bölgesindeki frekansın çift moda tek moda dönüşümünün tetiklenmesi.	26
Şekil 2.9	Yapının asimetric bölgesi çıkarılarak normalize frekansı $a/\lambda=0.27426$ olan Gauss dalga gönderilmiş ve gönderilen dalgada hiçbir değişim olduğu gösterilmiştir.	26
Şekil 2.10	$15a$ uzunluğunda yapıya tek mod profilinde $a/\lambda=0.27426$ merkez frekanslı Gauss dalga gönderildiğinde dalganın yerelleştiği görülmektedir. Gauss dalganın yapıyla etkileşimini incelemek için FDTD yöntemi kullanılmıştır.	27
Şekil.2.11	Tek mod profiline sahip dalganın yapıya girişinin şematik bir görünümü.	28
Şekil 2.12	$0.27426a/\lambda$ frekansında gönderilen yapı giriş kısmında görüldüğü gibi, çift mod profiline sahip dalganın (a) mod dönüşümüne uğraması ve (b) yerelleşmesi.	29
Şekil 2.13	Gönderilen Gauss dalganın yapıyla etkileşimi sonucu yerelleşen dalganın yapı üzerinde genliğe bağlı dağılımı gösterilmiştir.	30
Şekil 3.1	Dielektrik çubuk üzerindeki oluk yarıçapları $0.2a$ iken PWEM ile hesaplanmış bant diyagramı ve yapının küçük bir görünümü.	36
Şekil.3.2	Ortaya çıkan küçük yasaklı bant aralığını oluşturan modların PWEM kullanılarak bulunmuş oluk yarıçapıyla değişim grafikleri (a) alt modlar (b) üst modlar.	38
Şekil 3.3	$55a$ uzunluğunda farklı oluk yarıçap değerleri için yapıya gönderilen gauss dalgalarının iletim grafikleri. Yakınlaştırılmış görselde $r=0.20a$ ve $0.21a$ değerlerine sahip yapının iletim grafikleri yakından gösterilmiştir.	39
Şekil 3.4	Oluk yarıçapı değerinin $0.2a$ olduğu değer için kaynaktan gönderilen gauss dalgasının dB cinsinden iletim oranları.	40

Şekil 3.5	(a)Oluşturulan yapıda oluk yarıçaplarının arttığı noktalar çizgi ile gösterilmiştir. Yapının inceltilen kısmında görülen çizgi ayrıca taşma bölgesinin hesaplama alanını da göstermektedir. (b)Farklı uzunluktaki taşma bölgelerinde frekansa göre taşan dalganın genlik grafikleri gösterilmektedir. Kaynak olarak 0.260 normalize frekansına sahip $0.08a/\lambda$ bant genişliğinde gauss dalga gönderilmiştir.	42
Şekil 3.6	Başlangıç oluk yarıçapları $0.26a$ ve $0.27a$ olan iki farklı yapının $40a$ uzunluğundaki taşma bölgesinde frekansları süzmeleri gösterilmiştir.	43
Şekil 3.7	$w0.26a-w0.27a$ dalga kılavuzuna gönderilen dalganın taşma bölgesinden ve yapı sonundan frekansa göre çıkış genlik değerleri verilmiştir. $w0.26a$ ile $w0.27a$ arasındaki bölgede küçük yasaklı bant aralığı bilgisine Şekil.27'den ulaşılmış ve $0.265$ ile $0.267$ arasında olduğu görülmüştür.	44
Şekil 3.8	(a) $r0.26a-r0.27a$ yapısına gönderilen merkez frekansı $a/\lambda=0.2660$ bant genişliği $\Delta a/\Delta \lambda=0.0020$ olan dalganın yapı içerisinde ilerlemesi ve taşma bölgesinden taşması (b) taşma bölgesinin yakından görünümü.	45
Şekil 3.9	Yapıya gönderilen $w_1, w_2$ ve $w_3$ frekans aralıklarına sahip dalganın yapının farklı oluk yarıçapı değerlerine sahip yerlerinden çıkışı. Gönderilen dalgaların frekans aralıkları sırasıyla $0.257 < w_1 < 0.2585$ , $0.2585 < w_2 < 0.2595$ ve $0.2595 < w_3 < 0.2605$ olarak belirlenmiştir. Şekil.27'de görüldüğü üzere her bir frekansın çıkış noktaları farklı oluk yarıçapındaki yapılara karşılık gelmektedir.	46
Şekil 4.1	Yapının tüm hava boşlukları $0.3a$ yarıçap değerine sahip olduğu durumda görünümü, $r_b$ yarıçapı değiştirilmeyen hava boşlukları, $r_d$ yarıçapı değiştirilen hava boşluklarını göstermektedir.	50
Şekil 4.2	Şekil.34'de gösterilen yapının bant diyagramı. Kesikli çizgi tek, düz çizgi çift mod profiline sahip modu göstermektedir.	50
Şekil 4.3	Dalga kılavuzu komşuluğundaki hava boşluklarının yarıçap değerlerinin, $r_b$ değerleri $0.3a$ değerinde sabitken, $0.20a$ ile $0.4750a$ arasında değiştirilmesiyle ilgili bandın değişimi.	51
Şekil 4.4	(a) Dalga kılavuzu kenarında bulunan hava boşluklarının yarıçapının değişimine göre (a) bant genişliği (b) grup indeks (c) grup indeks ile bant genişliğinin çarpımı grafikleri.	52
Şekil 4.5	Oluşturulmuş $300a$ uzunluğunda yapıya gönderilen merkez frekansı $a/\lambda=0.2452$ normalize bant genişliği $0.001$ değerine sahip gauss dalganın yapıya gönderilmesiyle yapı başından itibaren $32a, 96a, 160a$ ve $224a$ uzaklıklarda algılanan dalga şekilleri gösterilmiştir.	53
Şekil 4.6	(a) Hava boşlukları $r_d$ ve $r_b$ değişimleri sonucunda elde edilmiş grup indeks ile bant genişliği çarpım haritası verilmiştir. Zemin yarıçapları $r_b=0.36a$ değerinde sabit tutulduğunda $r_d$ değerlerinin değişimine göre (b) grup indeks (c) bant genişliği değişim grafikleri gösterilmiştir.	54
Şekil 5.1	$\epsilon_1$ dielektrik sabitli maddenin hava zemini yerine yerleştirilmesiyle biyosensör olarak kullanılmak için tasarlanmış yapı.	58

## KISALTMALAR

### Kısaltmalar Açıklama

<b>FDTD</b>	Sonlu Farklar Zaman Düzlemi ( Finite Difference Time Domain)
<b>PWEM</b>	Düzlemsel Dalga Açılım Metodu ( Plane Wave Expansion Method)
<b>PML</b>	Kusursuz uyuşan katman ( Perfectly Matched Layer )
<b>TE</b>	Enine Elektrik
<b>TM</b>	Enine Manyetik

## SEMBOL LİSTESİ

Bu çalışmada kullanılmış olan simgeler açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklama</b>
<b><i>a</i></b>	Yapı sabiti
<b><i>c</i></b>	Işık hızı ( $3 \times 10^8$ m/s)
<b><i>E</i></b>	Elektrik alan
<b><i>H</i></b>	Manyetik alan
<b><i>B</i></b>	Manyetik akı yoğunluğu
<b><math>\Delta t</math></b>	Zaman aralıkları
<b><math>\Delta \omega</math></b>	Bant genişliği
<b><math>\omega</math></b>	Frekans
<b><math>\epsilon_0</math></b>	Boşluğun dielektrik sabiti
<b><math>\epsilon_r</math></b>	Bağıl dielektrik sabiti
<b><i>G</i></b>	Ters örgü vektörü
<b><i>n</i></b>	Kırılma indisi
<b><i>k</i></b>	Dalga vektörü ( $2\pi/a$ )
<b>exp</b>	<i>e</i> üssü ( $\exp(2)=e^2$ )

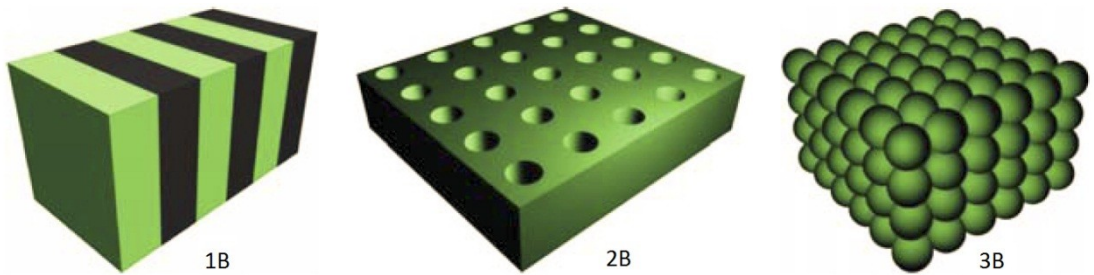
## BÖLÜM 1

### 1.GİRİŞ

#### 1.1. Tanıtım

Fotonik kristaller fotonların hızı, hareket doğrultusu gibi bazı özelliklerini güçlü ışık madde etkileşimiyle kontrol edebilen periyodik optik yapılardır. Fotonik kristaller bu özelliklerinden dolayı optik haberleşme, optik hafıza, optik sinyal işleme gibi birçok alanda kullanılabilirler. Birçok alanda kullanılabilir olmalarından dolayı fotonik kristallerle ilgili birçok araştırma yapılmakta ve araştırmacı sayısı da hızlı bir şekilde artmaktadır.

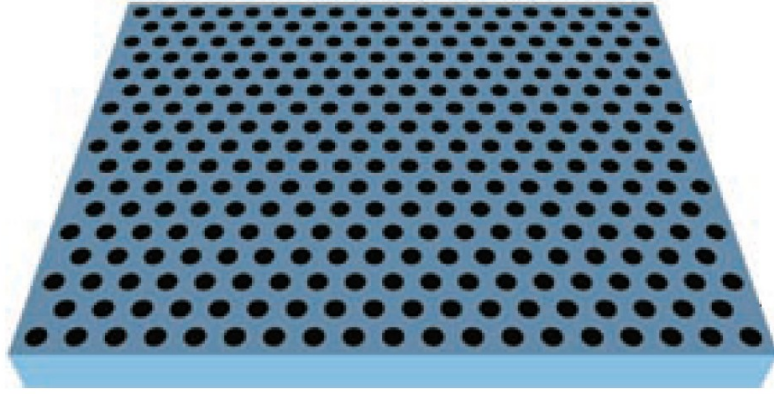
Fotonik kristallerin en önemli özelliği belli frekansları iletmemeleri yani fotonik yasaklı bant aralığına sahip olmalarıdır. Fotonik yasaklı bant aralığına sahip yapılar ilk olarak 1887 de Lord Rayleigh tarafından 1 boyutlu olarak keşfedilip sunulmuştur[1]. Eli Yablonovitch'in yasaklı bant aralığına sahip 2 boyutlu ve 3 boyutlu periyodik yapıları 1989 yılında yayınlayıp [2] bu yapıları Fotonik Kristal ismini verene kadar 1 boyutlu yapılar üzerinde birçok araştırma yapılmıştır. Bazı araştırmacılar 1 boyutlu yapılardan da fotonik kristaller olarak bahsetmektedirler. Fotonik kristallerin 1 boyutlu, 2 boyutlu ve 3 boyutlu örnek yapıları Şekil 1.1'de gösterilmiştir.



Şekil 1.1 Fotonik kristallerin 1 boyutlu 2 boyutlu ve 3 boyutlu durumlarına örnekler [3].



Bu yapılara alternatif bir yapı Fotonik kristal levha yapılarıdır. Fotonik kristal levha yapıları genellikle bir yarı iletken ve yalıtkan bir tabaka üzerine kolay bir şekilde fabrikasyonu yapılabildiği için pratikte daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Fotonik kristal levhalara ait bir şekli Şekil 1.2 göstermektedir.



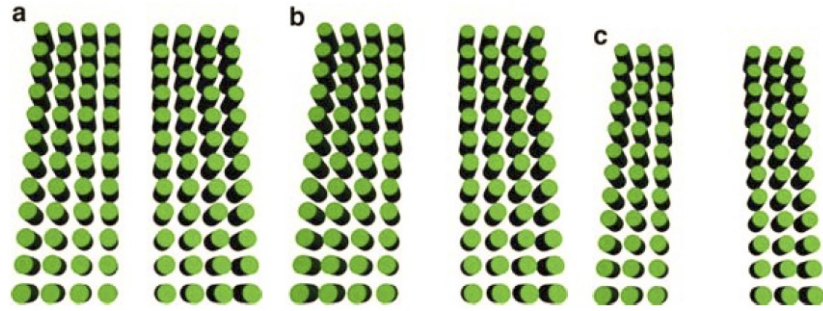
Şekil 1.2 Üçgen örgü yapısına sahip fotonik kristal levha örneği[4].

Üzerinde küçük değişiklikler yapılarak farklı özelliklere sahip yapılar elde edilebilmesi de fotonik kristallerin önemli bir özelliğidir. Fotonik kristallerde periyodikliği belirten en küçük birime birim hücre denir. Birim hücreler arasındaki uzaklık yapı sabiti " $a$ " olarak kabul edilir ve yapının özellikleri yarıçap, yapının boyu, yapının genişliği gibi yapıyla ilgili tüm uzaklıklar ve ölçüler " $a$ " ile bağıntılı olarak belirtilir. Bunun sonucunda yapının frekans düzleminde çıkan sonuçları " $a$ " ile bağıntılı olur. Yasaklı bant aralığı elektromanyetik dalga frekanslarının " $a$ " ile bağıntılı olması " $a$ " değerini değiştirerek farklı frekans aralıklarını veya daha geniş frekans aralığındaki elektromanyetik dalgaları kapsamakta büyük bir kolaylık sağlar.

Değiştirilebilir yarıçap değerlerine sahip olmasıyla ve istenilen kısımların çıkarılabilmesiyle fotonik kristal yapısı üzerinde birçok modifikasyon yapılabilmektedir. Bu modifikasyonlar sonucunda sonsuz sayıda farklı yapı oluşturulabilmektedir. Fotonik kristal yapının ortasından boyu boyunca bir sıra veya

birkaç sıra periyodik yapı çıkarılarak oluşturulan yapılara fotonik kristal dalga kılavuzları denir.

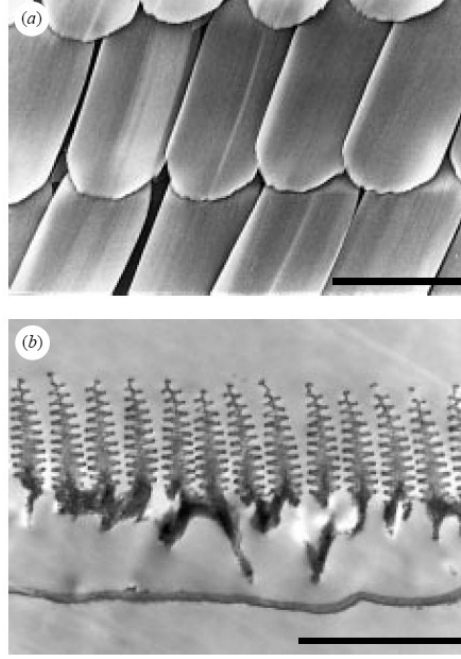
Dalga kılavuzu dalgaları yönlendirmeye yarayan yapılardır. Bu yapılarla ses dalgaları ve radyo dalgaları, fotonlar gibi elektromanyetik dalgaların taşınması ve yönlendirilmesi yapılabilmektedir. Fotonik Kristallerle de dalga kılavuzu yapmanın birçok yolu vardır. Bunlardan en yaygın kullanılanı Fotonik Kristal yapı ortasında periyodik yapının çıkarılmasıyla oluşturulan dalga kılavuzudur. Bu şekilde oluşturulan dalga kılavuzundan 1 sıra, 2 sıra ya da 3 sıra periyodikliğin bozulması  $W1$ ,  $W2$  ve  $W3$  ifadesiyle gösterilen dalga kılavuzu örnekleri Şekil 1.3'de gösterilmiştir. Bu yöntemle normal fotonik kristal örgü yapısında yasaklı bant aralığı olan bölgede bazı modların varlığı orta çıkmaktadır. Bu modlar oluşturulan yapının içerisinde ilerleyebilecek modları ve frekans değerlerini gösterir. Dalga kılavuzu kenarlarındaki periyodik yapı içerisinde yasaklı bant aralığına karşılık geldikleri için ilerleyemeyen modlar sadece dalga kılavuzu içerisinde yol alabilmektedir. Bu tip yapılara fotonik kristal dalga-kılavuzu denilir ve bu yapılarla fotonların yönleri kontrol edilebilir.



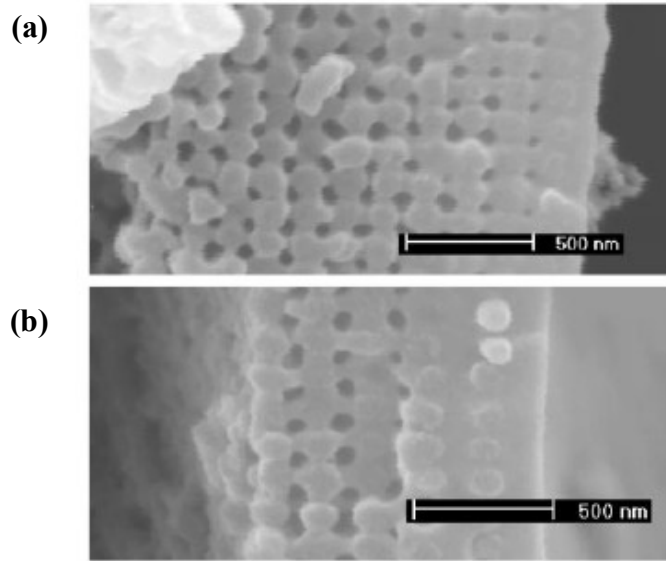
Şekil 1.3 (a)  $W1$  tipi 1 sıra (b)  $W2$  tipi 2 sıra (c)  $W3$  tipi 3 sıra periyodikliğin bozulmasıyla oluşturulmuş fotonik kristal dalga-kılavuzları[3].

Doğadaki bazı optik olayları da doğal fotonik kristallerin varlığıyla açıklanabilmektedir. Bazı kelebek türlerinin kanatlarında, sinek türlerinin sırt bölgesinde, bazı alglerde, opallerde ve tavus kuşunun tüylerinde ortaya çıkan parlak ve değişken renkli yapılarda fotonik kristallerin varlığı tespit edilmiştir. Alglerde tespit edilen fotonik kristallerin özelliği ise diğer canlılardan farklı olarak gözle

görülemeyen ultraviyole ışınları yansıtıcıdır. Morfo kelebeğindeki ve tavus kuşu kanadındaki fotonik kristal yapıların elektron mikroskobuyla elde edilmiş görüntüleri Şekil 1.4 ve Şekil 1.5’de gösterilmiştir.



Şekil 1.4 Morfo kelebeğinin (a) kanadının elektron mikroskobu kullanılarak elde edilmiş görüntüsü (b) kanadının kesit alanının elektron mikroskobu kullanılarak elde edilmiş görüntüsü gösterilmiştir[5].



Şekil 1.5 Tavus kuşunun tüyündeki (a) yeşil ve (b) kahverengi renklerin ortaya çıkmasını sağlayan fotonik kristal yapısının elektron mikroskobuyla görüntülenmiş halleri[6].

Fotonik Kristaller günümüzde birçok alanda kullanılmaya başlanmıştır. Fotonik kristal fiberler, fiber optik kablonun merkezinde bir boşluk kalacak şekilde etrafına Fotonik Kristal yapı yerleştirilmesiyle oluşturulan yapılardır. Bu yapılar kullanılarak kanserli dokular yüksek enerjili fotonlar gönderilerek yakılmakta, cerrahi bir yöntem kullanılmadan kolayca ortadan kaldırılabilir. Yine fotonik kristaller kullanılarak güneş enerjisi pillerinin verimliliği artırılmıştır. Güneş enerjisi pilinin içerisine Fotonik Kristal yapı yerleştirilmiş içeriye giren ışığın fotonik kristal yapı içerisinde tutularak yapıyla etkileşimi artırılmış ve enerji verimliliği sağlanmıştır[78].

## 1.2. Fotonik Yasaklı Bant Aralığı

Fotonik kristaller üzerine yapılan araştırmaların çoğunluğunda üçgen ve kare örgü yapıları kullanılmıştır. Üçgen ve kare örgü yapılarını 2 boyutlu olarak Şekil 1.6 göstermektedir.



Şekil 1.6 (a) kare örgü yapısında ve (b) üçgen örgü yapısında fotonik kristaller. Fotonik kristallerin analizleri iki yöntem ile yapılır. Birincisi frekans düzleminde hesaplama yapan PWEM. İkincisi ise zaman düzleminde çalışan FDTD metodudur.

### 1.2.1. 2 Boyutlu Yapılar İçin PWEM

Dikey doğrultuda dielektrik sabitinin değişmediği yani  $\frac{\partial}{\partial z} = 0$  ( $\partial / \partial z$ ) = 0 olan 2 boyutlu bir fotonik kristal için hesaplamalar gösterilmiştir. Bu durumda  $k$ , dalga vektörü, dikey  $z$  yönünde herhangi bir bileşene sahip değildir. Bu değerlere göre Maxwell denklemleri  $E_z$  ve  $H_z$  bileşenlerine göre aşağıdaki gibi yazılabilir [7].

$\vec{r} = xa_x + ya_y$  olarak alındığında

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

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

Elektromanyetik dalgalar polarizasyon tiplerine göre üç sınıfa ayrılırlar. Dalganın x,y düzleminde ilerlediği düşünülürse. Bunlardan birincisi TM polarizasyonu olarak bilinen manyetik alanın  $z$  eksenine paralel olduğu durumdur. İkincisi TE polarizasyonu olarak bilinen elektrik alanın  $z$  eksenine paralel olduğu durumdur. Üçüncüsü ise dalganın ilerleme yönünde elektrik ve manyetik alanın olmadığı, elektrik alan vektörü, manyetik alan vektörü ve dalganın ilerleme yön vektörünün,  $k$ , birbirine dik olduğu durumdur. Formül 1.1 ve 1.2'de görülen iki denklemlerle TM ve TE polarizasyonlu iki mod çıkarılmıştır.

Periyodik fonksiyonların Fourier açılımlarının yapılabildiği bilinmektedir. Burada 1.1 formülündeki  $\frac{1}{\varepsilon(r)}$  fotonik kristal yapı sonsuz olarak kabul edildiği için Bloch teoremine göre yapının periyodik olması modları da periyodik olmasına sebep olur. Periyodik olan  $\frac{1}{\varepsilon(r)}$  fonksiyonunun açılımında çıkan özfonksiyonlar modlara, özdeğerler ise hareket sabitine karşılık gelmektedir. Buna göre  $\frac{1}{\varepsilon(r)}$ 'nin Fourier açılımı[7];

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

Şeklinde dir.

$\kappa_G$  değerinin açılımı da [ 4];

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

Formülde  $S$  birim hücreyi  $A$  ise birim hücrenin alanını temsil etmektedir.  $\vec{G}$  ters örgü vektörünü göstermektedir.  $G$ 'nin formülde tanımlanmış değeri  $\vec{G} = g_1x + g_2y$ 'dir.

Kare örgü yapısı için  $g_1 = \frac{2\pi m}{a}$  ve  $g_2 = \frac{2\pi n}{a}$ 'dir. Üçgen örgü yapısı için ise  $g_1 = \frac{2\pi}{a}(y + x\sqrt{3})/2$  ve  $g_2 = \frac{2\pi}{a}(y - x\sqrt{3})/2$  şeklinde olur. Kare ve üçgen örgü yapıları için birim hücre vektörleri sırasıyla  $\vec{a} = ax + ay$  ve  $\vec{a} = a(y + x\sqrt{3})/2 + a(y - x\sqrt{3})/2$  şeklindedir.

En basit ters örgü yapısında  $m$  ve  $n$  değerleri 1 olarak alınır. Şekil 1.7'de 2 boyutlu kare ve üçgen örgü yapısı için ters örgü yapıları gösterilmiştir.



Şekil 1.7 Kare ve Üçgen örgü yapılarında ters örgü vektörleri.

Fotonik kristal yapı sonsuz olarak kabul edildiği için Ez ve Hz sonsuz sayıdaki düzlem dalgaların toplamı olarak yazılabilmektedir[7].

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

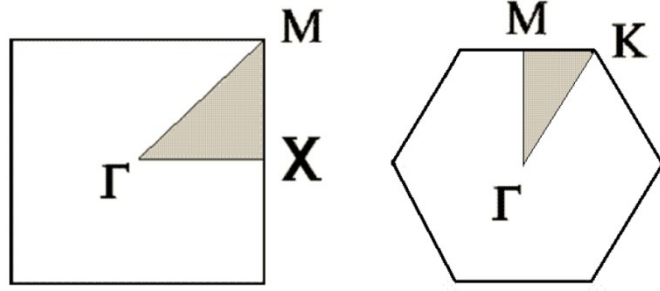
$$\begin{aligned}
\vec{E}_z(r) &= \sum_G e_{G,k} \exp(i(\vec{k} + \vec{G}) \cdot \vec{r}) \\
&= \exp(i\vec{k} \cdot \vec{r}) \sum_G e_{G,k} \exp(i\vec{G} \cdot \vec{r}) = \exp(i\vec{k} \cdot \vec{r}) v_k(\vec{r})
\end{aligned} \tag{1.6}$$

Formüllerdeki  $h$  ve  $e$  sırasıyla manyetik ve elektrik alanların Fourier bileşenlerini belirtmektedir. Oluşturulan denklemler 1.1 ve 1.2'de yerine konularak özdeğer denklemleri elde edilmektedir

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

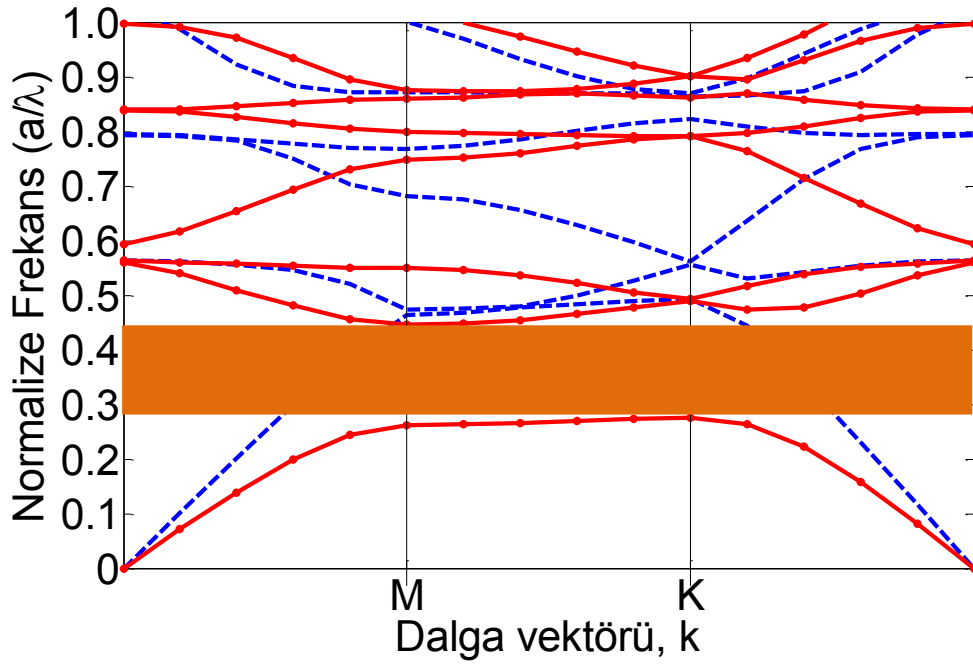
$$-\sum_G \kappa_G (\vec{G} - \vec{G}') (\vec{k} + \vec{G}') \times \{ (\vec{k} + \vec{G}') \times \vec{H}_{z,kn}(\vec{G}') \} = \frac{-\kappa n}{c^2} \vec{H}_{z,kn}(\vec{G}) \tag{1.8}$$

Bu iki denklemden herhangi biri çözülerek yapının bant grafiği oluşturulabilir. Yapının bant grafiği  $k$  vektörü yönünde sonsuz uzunlukta olabilir. Ancak 1.5 ve 1.6 denklemlerine bakıldığında ise  $k$  dalga vektörlü bir mod ve  $k+G$  dalga vektörüne sahip modun periyodiklikten dolayı aynı olduğu görülür. Bu nedenden dolayı  $k$  vektörü ilk Brillouin alanı denilen  $G$ 'den küçük bir bölgeye sınırlandırılabilir. İlk Brillouin alanı çizgileri üzerinde hareket edildiğinde bütün yapının bant diyagramının çıkarılabileceği birim hücredeki alanı temsil eder. Kare ve üçgen örgü yapıları için Brillouin alanları Şekil 1.8'de gösterilmiştir.



Şekil 1.8 Kare ve üçgen örgü yapısında Brillouin alanları.  $\Gamma$ -X-M ve  $\Gamma$ -K-M çizgiler üzerinde hareket edilecek doğrultuları göstermektedir.

PWEM kullanılarak oluşturulan üçgen örgü yapısının  $r=0.2a$  yarıçaplı silindir değerlerine göre hesaplanmış bant diyagramı Şekil 1.9’da gösterilmiştir.



Şekil 1.9 Figürde Şekil 1.5(b) de görülen yapının bant diyagramı verilmiştir. Sürekli çizgiler TE modları, kesikli çizgiler de TM modları göstermektedir. TE modunda yasaklı bant aralığı dikdörtgenle taranmış olarak gösterilmiş bölgedir.

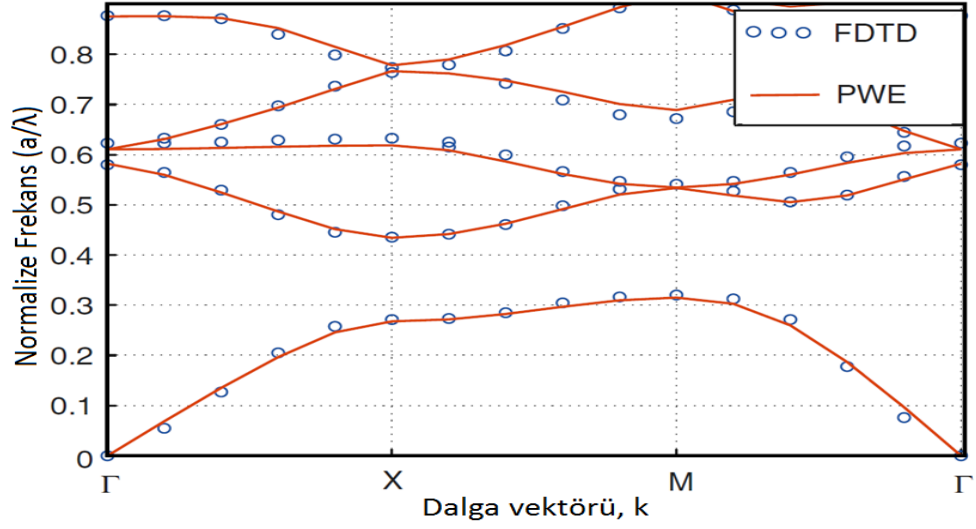
Şekil 1.6’da üçgen örgü yapısı için TE polarizasyonunda dalga vektörü  $k$  ya karşılık frekansın  $a/\lambda$  cinsinden bant diyagramı görülmektedir. Bu aralığın genişliği veya frekans aralığı her yapıya göre farklılık gösterebilir. Yapı sabiti olan  $a$  değeri



çalışılmak istenen frekansa göre belirlenir. Örneğin genellikle telekomda haberleşme frekansı olarak kullanılan 1555nm dalga boyu seçilecek olursa  $f=a/\lambda$  formülünden  $f$  dağılım diyagramındaki değer ve  $\lambda$  1555nm alınırsa  $a$  değeri kolaylıkla ortaya çıkar.

### 1.2.2. FDTD Metodu

FDTD metodu yapının zaman düzleminde analizini yapabilmek için kullanılmaktadır. FDTD metodunda yapının  $a$  birim uzaklığı  $x,y$  ve  $z$  düzleminde eşit aralıklarla istenildiği kadar noktaya bölünebilir. Ortaya çıkan her bir noktada Maxwell denklemleri kullanılarak hesaplama yapılır ve dalganın yapıyla etkileşimi analiz edilir. Analizler sonucunda yapının frekansları iletim oranları elde edilebilir. Yasaklı bant aralığına karşılık gelen frekanslar yapı içerisinde iletilmeyeceğinden bu bölgelerde iletim oranı çok düşük olmaktadır. Bu değerlerden de yapının yasaklı bant aralığı tespit edilebilmektedir. FDTD metodu kullanılarak bant diyagramı çıkarımı da yapılabilmektedir. Şekil 1.10 FDTD metodu kullanılarak çıkarılmış bir bant diyagramını göstermektedir. Elde edilen sonuçlar PWE metodu ile hesaplanmış bant diyagramlarıyla karşılaştırılmış ve değerlerin bir birini doğruladığı görülmüştür. FDTD metoduyla ayrıca dalganın yapı içerisindeki ilerlemesi zamana bağlı olarak izlenebilmekte ve video görüntüsü olarak da oluşturulabilmektedir. Sonlu büyüklükte olan yapının kenar kısımlarından geri yansımaları engellemek için yapının kenarlarına elektromanyetik dalgayı tamamen emebilen kusursuz uyuşan katman (PML) eklenir.



Şekil 1.10 FDTD kullanılarak elde edilmiş sonuçlar küçük yuvarlaklarla gösterilmiştir. Düz çizgiler ise PWEM ile hesaplanmıştır. Bulunan iki sonucun bir biriyle örtüştüğü görülmektedir[3].

FDTD metodu algoritma olarak Yee algoritmasını kullanmaktadır. Yee algoritması adını Kane S. Yee'den almıştır. Bu metotla Yee Maxwell denklemlerini sonlu fark denklemlerine çevirmiş, sonlu fark denklemlerinden oluşan bir denklem setiyle de eğer elektrik ve manyetik alan noktaları uygun seçilirse mükemmel iletkenler için bile sınır koşullarına uygulanabileceğini göstermiştir [8].

Dikdörtgen koordinatlarda Maxwell denklemlerinin kıvrım operatörlerinin karşılıkları aşağıdaki gibidir[9]:

$$\frac{\partial H_x}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left( \frac{\partial E_y}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial y} \right) \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left( \frac{\partial E_z}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial z} \right) \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left( \frac{\partial E_x}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial x} \right) \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial E_x}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left( \frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} - \sigma E_x \right) \quad (2.4)$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left( \frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} - \sigma E_y \right) \quad (2.5)$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left( \frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} - \sigma E_z \right) \quad (2.6)$$

Alanda düzlemler üzerindeki noktalar şu şekilde tanımlanmıştır:

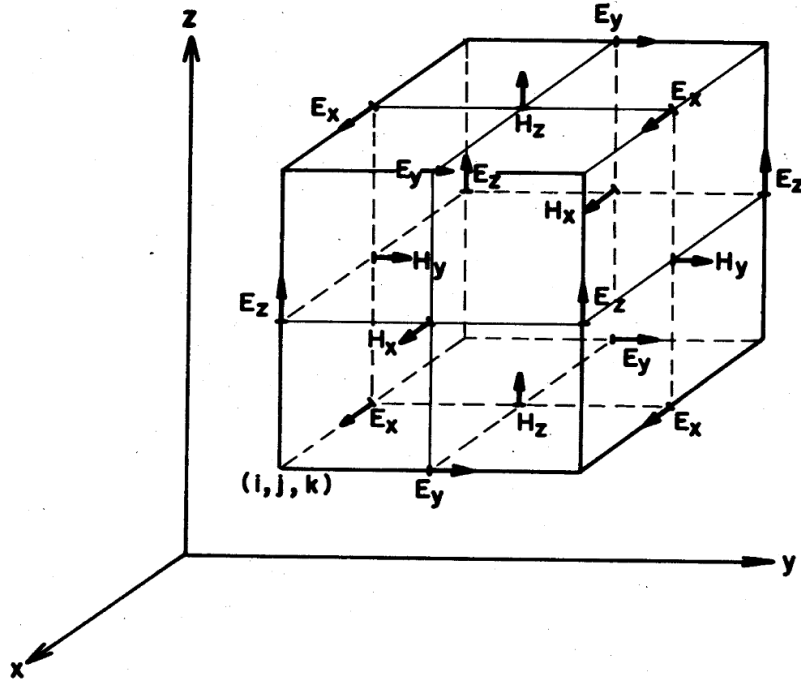
$$(i, j, k) = (i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z) \quad (2.7)$$

Zamanın ve alanın tüm fonksiyonları da  $F(i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z, n\Delta t) = F^n(i, j, k)$  şeklinde tanımlanmıştır. Alan artırım birimleri hesaplamalar ve birim küplerin oluşturulabilmesi için  $\Delta = \Delta x = \Delta y = \Delta z$  olarak seçilir. F fonksiyonundan görüldüğü üzere zaman aralıkları  $\Delta t$  'nin katları olarak tanımlanmıştır. Şekil 1.11'den Elektrik alan için  $t = n\Delta t$ , manyetik alan için ise  $t = (n+1/2)\Delta t$  noktalarında hesaplamalar yapılmıştır. Alan artırımlı  $\Delta x, \Delta y$  veya  $\Delta z$  ve zaman artırımlı  $\Delta t$  'ye bağımlı  $F$  fonksiyonu aşağıda verilmiştir.

$$\frac{\partial F^n(i, j, k)}{\partial x} = \frac{F^n(i + \frac{1}{2}, j, k) - F^n(i - \frac{1}{2}, j, k)}{\Delta} \quad (2.8)$$

$$\frac{\partial F^n(i, j, k)}{\partial t} = \frac{F^{n+1/2}(i, j, k) - F^{n-1/2}(i, j, k)}{\Delta t} \quad (2.9)$$

Denklemlerin doğruluğunu ve 2.1-2.6'ya uyumluluğunu sağlamak için Yee elektrik ve manyetik alanların birim küp üzerindeki dağılımını Şekil 1.11'deki gibi yapmıştır.



Şekil 1.11 Elektrik ve manyetik alanların denklemlere uygun şekilde yapılmış dizilimi gösterilmiştir. Zaman düzlemindeki hesaplamalar küp üzerinde belirlenen bu değerlere göre yapılmaktadır[9].

Şekil 1.11’de elektrik ve manyetik alan dağılımlarının bir Yee küpünde nasıl olduğu gösterilmiştir. Elektrik alan noktaları kenarların orta noktasında, manyetik alan noktaları ise yüzeylerin merkezindedir. Elektrik alan ve manyetik alan dağılımları yarım zaman aralığı ( $\Delta t/2$ ) kadar farklarla hesaplanmıştır.

Denklem 2.8 ve 2.9 örnek olarak 2.1 ve 2.4’de yerine konulursa[9]

$$\begin{aligned}
 H_x^{n+1/2}(i, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2}) &= H_x^{n-1/2}(i, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2}) \\
 + \frac{\Delta t}{\mu(i, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2})\Delta} &\left[ \begin{aligned} &E_z^n(i+1, j, k + \frac{1}{2}) - E_z^n(i+1, j, k - \frac{1}{2}) \\ &+ E_x^n(i + \frac{1}{2}, j, k) - E_x^n(i + \frac{1}{2}, j, k+1) \end{aligned} \right] \quad (2.10)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
E_x^{n+1}(i+\frac{1}{2}, j, k) = & \left[ 1 - \frac{\sigma(i+\frac{1}{2}, j, k)\Delta t}{\varepsilon(i+\frac{1}{2}, j, k)} \right] E_x^n(i+\frac{1}{2}, j, k) \\
& + \frac{\Delta t}{\varepsilon(i+\frac{1}{2}, j, k)\Delta} \left[ \begin{aligned} & H_z^{n+1/2}(i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}, k) - H_z^{n+1/2}(i+\frac{1}{2}, j-\frac{1}{2}, k) \\ & + H_y^{n+1/2}(i+\frac{1}{2}, j, k-\frac{1}{2}) - H_y^{n+1/2}(i+\frac{1}{2}, j, k+\frac{1}{2}) \end{aligned} \right]
\end{aligned} \tag{2.11}$$

$H_y$ ,  $H_z$  denklemleri  $H_x$  ile benzer şekilde,  $E_y$  ve  $E_z$  denklemleri ise  $E_x$  ile benzer şekilde yazılabilirler.

FDTD yönteminin kararlı çalışabilmesi için hesaplanacak noktalar arası birim uzaklık değiştiğinde elektromanyetik alanın önemli bir değişim göstermemesi gerekmektedir. Bu koşulu sağlamak için birim uzaklık değerinin dalga boyunun yalnızca bir kısmı kadar olması gerekmektedir[8].

$$\left( \frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} + \frac{1}{\Delta z^2} \right)^{\frac{1}{2}} \geq v_{\max} \Delta t \tag{2.12} \quad [9]$$

Formülde  $v_{\max}$  dalganın maksimum faz hızını temsil etmektedir. Bu kıstas göz önünde bulundurularak yapılan FDTD hesaplamaları fotonik kristallerin tüm analizlerinin yapılmasına imkan sağlamaktadır.

## BÖLÜM 2

### 2. OPTİK DALGANIN TEK BİR FOTONİK KRİSTAL DALGA KILAVUZU İÇERİSİNDE MODUNUN DEĞİŞTİRİLMESİ VE YERELLEŞTİRİLMESİ

#### 2.1. Giriş

Fotonik Kristaller güçlü ışık-madde etkileşimiyle fotonlara ev sahipliği yapabilir şekilde tasarlanabilen mekânsal periyodik optik yapılardır. Fotonik Kristal yapılar ışığın hareket yönünü kontrol edebilmesi ve grup hızını manipüle edebilme özelliğinden dolayı son yıllarda yaygın olarak çalışılmaktadır. Bu iki özellikten ikincisi bu yapıların optik gecikme hatları, optik mantık kapıları ve tamamen optik sinyal işleme gibi birçok alanda kullanılmasına imkân sağlamaktadır. Bu doğrultuda ışık dalgalarını hapsetmek, yerelleştirmek ve depolamak için özgün yaklaşımlar ve metotlar önemli bir araştırma konusu haline gelmiştir. Işığı hapsedebilmek için birçok yapılandırma denenmiştir. Yapısal dağılma yönetimine dayalı olarak yavaş grup hızına sahip ışık dalgalarını elde etmenin birçok yolu vardır. Yapısal parametreleri derecelendirilmiş bir dalga kılavuzu uygulaması kayma frekansını kaydırarak ışığı yerelleştirmek için [10]'de kullanılmıştır. Kusurlar fotonları hapsetmek ve yerelleştirmek için Fotonik Kristal Dalga kılavuzu boyunca yerleştirilmiştir [11]. Başka bir çalışmada kendi içerisinde özdeş dielektrik dalga kılavuzunun koaksiyel Thue-Morse çok katmanla çevrili oyuk çekirdeklerle birlikte bir tasarım yapılmıştır [12]. Bu yöntemle farklı frekanslar yönlendirilebilmekte ve ayrıştırılabilmektedir. Bunun sonucunda dalga kılavuzu içinde gökkuşağı hapsedilebilmektedir. Benzer bir foton manipülasyonu [13]'de belirtilmiştir.

Bu çalışmada kare örgü yapısına sahip fotonik kristal kullanılmıştır. Kare örgü yapıdan bir sıra dielektrik çubuk silinerek oluşturulan dalga kılavuzları genellikle sadece çift modu destekler [7]. Burada silinen dielektrik çubukların yerine değiştirilebilir genişlik ve oluk derinliği parametrelerine sahip oluklu levha yapının ortasına eklemiştir. Eklenen yapıyla yapının bant diyagramında hem çift hem de tek modun ortaya çıktığı görülmüştür. Çift mod indeks güdümlü iken tek mod bant

diyagramında dönme noktasına (bandın pozitif eğimden negatif eğime geçiş noktası) sahip boşluk güdümlü bir moddur. Yapının ön kısmına asimetrik yapı eklenmiş ve bu yapının özelliklerinden yararlanılarak çift moddan tek moda dönüşüm yapılmıştır. Tek moddan çift moda dönüşüm fotonikte ele alınması gereken önemli bir konudur. Dikkatler asıl olarak çift modu amaca uygun kullanmaya yöneltmişse de mod dönüştürücüler üzerine çalışan gruplar da vardır. Çift modu tek moda, tek modu da çift moda dönüştürmek için anti-simetrik ızgaraları  $\pi$ -faz farkıyla dalga kılavuzunun ortasına yerleştirilerek yapılmış bir çalışma [14] ile gösterilmiştir. Tek modun oluşması iki şekilde olabilir, birincisi çift moddan tek moda dönüşümle ikincisi ise kaynak tarafından direk oluşturma yöntemiyle. Ancak tek moda sahip bir kaynak yapmak günümüzde mümkün olmadığı için bu şekilde bir çalışma pratikte mümkün görünmemektedir. Bu nedenle mod dönüşümünü sağlayan yapılar önem kazanmaktadır.

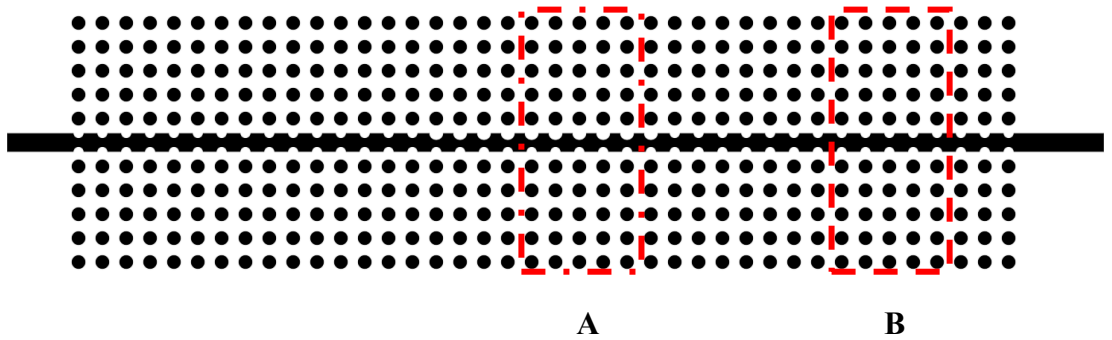
Yapının içine giren ışık grup indeksi oranında yavaşlayacaktır. Işığın yavaşlamasından dolayı yapı içerisinde ilerleyen Gauss profiline sahip ışığın başlangıç kısmı ile bitiş kısmı arasındaki mesafe kısalmaktadır. Enerjinin korunumu yasasından enerjinin kaybolmayacağı bilinmektedir. Bu koşullar göz önünde bulundurularak yapılan çalışmalarda T.F.Krauss yavaşlayan ışığın genliğinin artarak enerjisini koruduğunu belirtmiştir[15]. Bu çalışmada da üzerinde çalışılan yapının bant diyagramında görülen tek modun eğiminin pozitiften negatife dönmesi bu noktada yapıya gönderilen dalgayı yavaşlatarak yerelleştirmektedir. Bu yerelleşmenin sonucunda gönderilen dalğanın genliğinde oluşan artış FDTD sonuçları ile gözlemlenmiş, yavaş ışık kavramına uygunluğu görülmüştür.

Fotonik Kristallerde dalğanın bir bölgede ne kadar uzun süre sabitlenebildiği kalite faktörü(Q) denilen bir parametreyle belirtilir. Bu parametre ne kadar büyükse dalğanın sabitlenmesi de o kadar uzun süreli olmaktadır. Yapılan literatür taramasında kalite faktörünün genel olarak dalga kılavuzuyla taşınan bir dalğanın yapısal bozulmaya uğramış yapının başka bir kısmına transfer olmasıyla elde edilmiş yapılarda hesaplandığı görülmüştür [16-20]. Bu çalışmada kullanılan yapı kendi içinde çift modu tek moda dönüştürmesi, dönüşen dalgayı yerelleştirmesi ve uzun bir

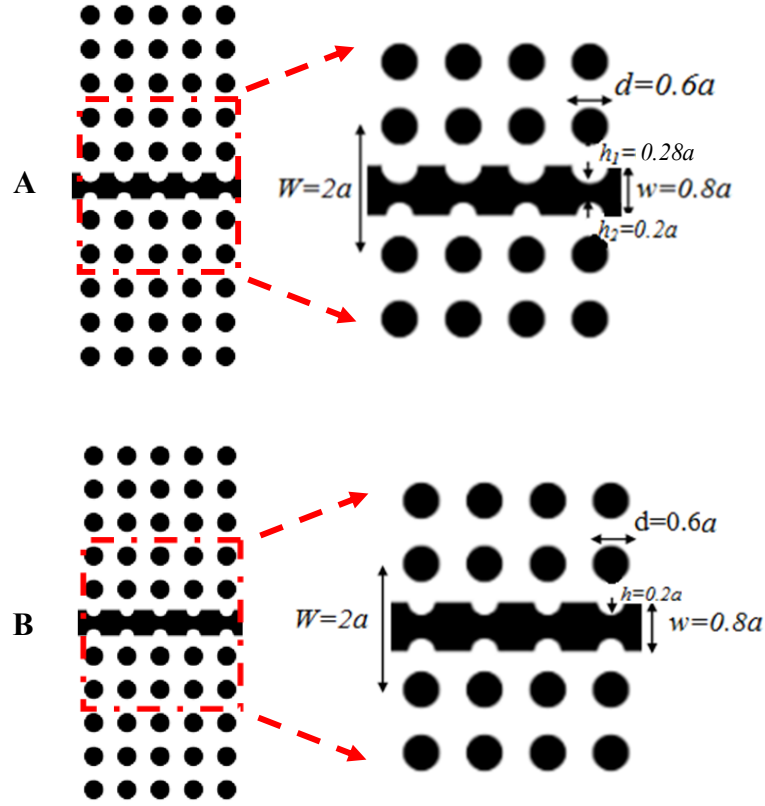
süre içinde tutabilmesi açısından özgün özelliklere sahiptir. Tüm bu özelliklerin analizleri frekans düzleminde PWEM ve zaman düzleminde FDTD kullanılarak yapılmış ve gösterilmiştir.

## 2.2. Yapının Oluşturulması

Bu çalışmada ortasında oluklu dielektrik levha yerleştirilmiş iki boyutlu kare örgü Fotonik Kristal yapı kullanılmıştır. Oluklu dielektrik levha dalga kılavuzu bant diyagramını manipüle edebileceğimiz ek özellikler getirmektedir. Ayarlanabilir parametreler Şekil 2.1’de gösterildiği gibi levhanın genişliği,  $w$  ve olukların derinliği,  $h$  olarak belirtilmiştir. Olukların periyodu Fotonik Kristallerin periyodu,  $a$  ile aynı tutulmuştur. Levhanın genişliği  $0.45a < w < 1.2a$  aralığında taranmış ve olukların derinliği buna göre ayarlanmıştır. Her bir durumda dispersiyon diyagramı gözlemlenmiş, uygun güdümlü modların oluşumu takip edilmiş ve yapısal parametreler belirlenmiştir. Buna göre dielektrik daire yarıçapları  $0.28a$ , oluklu dielektrik levhanın genişliği  $w=0.8a$  olarak belirlenmiştir. Oluklu dielektrik levhanın başlangıç kısmında bulunan asimetric hava dairelerinin yarıçapları üst kısımda  $h_1=0.28a$  ve alt kısımda  $h_2=0.2a$  olarak belirlenmiştir. Oluklu levhanın bitiş kısmında bulunan simetrik hava dairesi yarıçapları ise  $h=0.2a$  olarak belirlenmiştir. Kırılma indisi 3.46 ve ışığın polarizasyonu enine manyetik (TM), elektrik ve manyetik alan bileşenleri sıfır olmayan, sırasıyla  $E_z$ ,  $H_x$  ve  $H_y$  olarak alınmıştır.



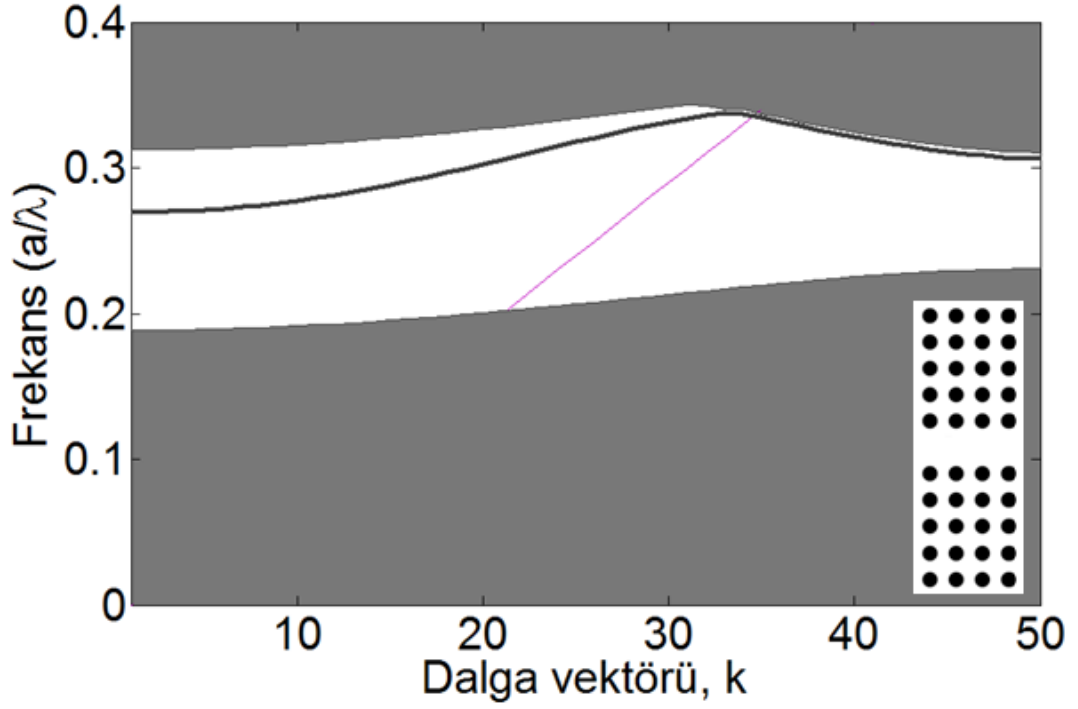




Şekil 2.1 Kullanılan Fotonik Kristal Dalga-kılavuzu yapısının asimetrik ve simetrik kısımları yakınlaştırılarak parametreler belirtilmiştir.

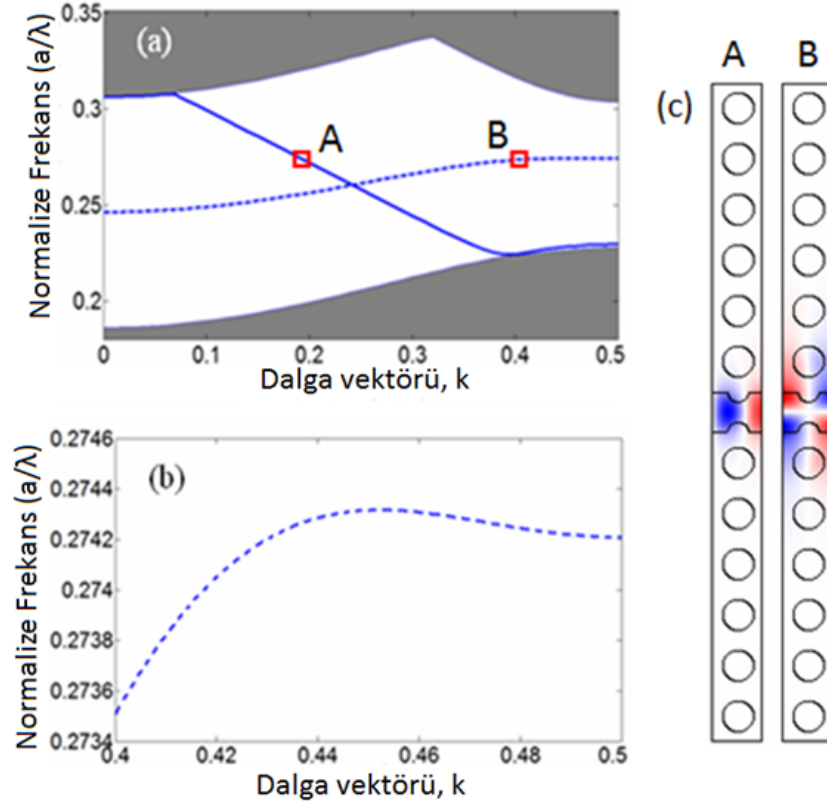
Yapıya eklenen oluklu dielektrik levha ile yeni özellikler kazanılmaktadır. Bunları görebilmek için öncelikli olarak ortasında çizgi boyunca bir sıra dielektrik çubukların kaldırılmasıyla oluşturulan standart W1 dalga kılavuzuna sahip kare örgü Fotonik Kristalin bant diyagramı Şekil 2.2’de gösterilmiştir. Giriş kısmında belirtildiği gibi bu tip dalga kılavuzları Şekil 2.2’de de görüleceği gibi genelde sadece çift modu destekler.

Şekil 2.2’de bant diyagramını ortasından çaprazlama bölen bir çizgi görünmektedir. Bu çizgiye ışık çizgisi denilmekte ve hangi modların dağılımdan etkilendiğini belirtmektedir. Işık çizgisinin üstünde kalan modlar yapıya dik doğrultuda düzlem dışı saçılıma uğramakta ve hızla sönmektedirler. Işık çizgisinin altında kalan modlar ise düzlem dışı saçılıma uğramamakta ve yapıda kolaylıkla ilerleyebilmektedirler.



Şekil 2.2 Şeklin sağ alt köşesinde gösterilmiş olan  $r=0.3a$  yarıçaplı dielektrik çubuklara sahip kare örgü yapısındaki Fotonik Kristal dalga kılavuzunun bant diyagramı.

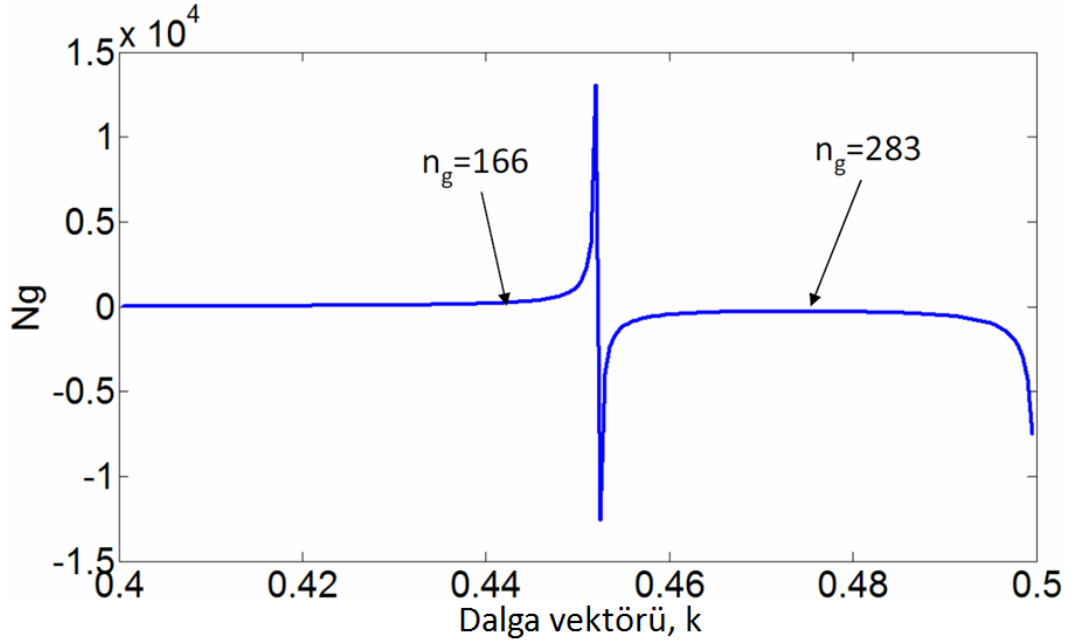
Silinen dielektrik çubukların yerine simetrik oluklu levha eklendiği zaman yapının bant diyagramında hem çift hem de tek modun ortaya çıktığını Şekil 2.3(a) göstermektedir. Şekilde görülen A kutucuğunun üzerinde olduğu bant çift modu B kutucuğunun üzerinde olduğu bant ise tek modu göstermektedir. Çift mod indeks güdümlü iken tek mod Şekil 2.3'de görüldüğü gibi bant diyagramında dönme noktasına(bandın pozitif eğimden negatif eğime geçiş noktası) sahip boşluk güdümlü bir moddur. Modun indeks güdümlü olması fotonik kristal yapı içerisinde rahat bir şekilde ilerleyebildiğini, ilerlerken dışarıya taşmaların az olacağını belirtmektedir.



Şekil 2.3 (a) Kare örgü yapısına sahip Fotonik Kristalin ortasına oluklu dielektrik levha yerleştirildikten sonra elde edilen bant diyagramı (b) B noktasının üzerinde bulunduğu tek modun bant şeklinin yakından görünümü ve (c) (a) şeklinde gösterilen A ve B noktalarının mod profilleri gösterilmiştir.

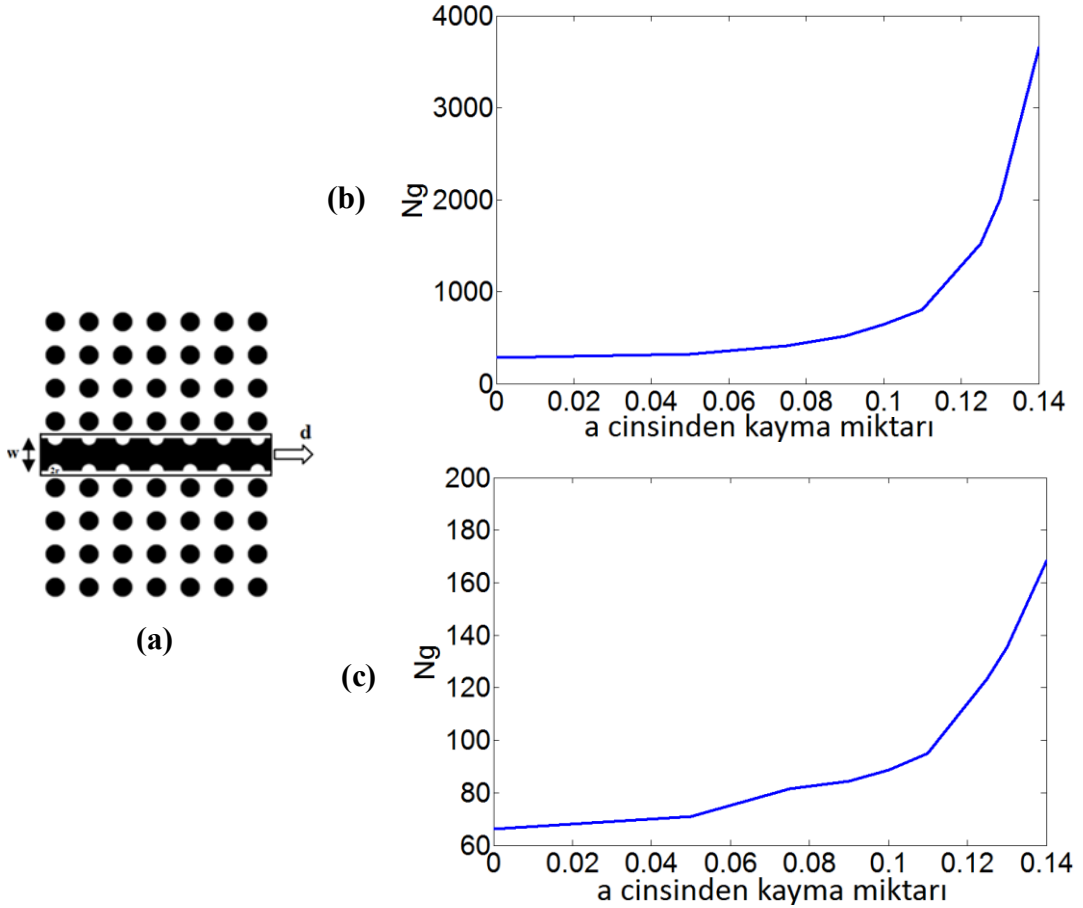
Oluklu dielektrik levhanın yapıya kazandırdığı önemli bir özellik de modların ışık çizgisine göre konumlarının değişmesidir. Yapıya oluklu dielektrik levha eklenmeden önce yapının bant diyagramında ortaya çıkan dalga modu ışık çizgisinin üstünde olmasından dolayı bir dezavantaja sahiptir. Bu mod kullanılarak gönderilen ışın dalga kılavuzu içerisinde düzlem dışı yüksek dağılımdan dolayı göreceli olarak uzun mesafeler ilerleyememektedir. Bunu engellemek için ışık çizgisinin altında bulunan modlar seçilmektedir. Oluklu dielektrik levha eklenmesiyle yapıda çıkan Şekil 2.3(b)'de gösterilen mod ışık çizgisinin altında kalmaktadır ve düzlem dışı dağılımdan etkilenmemektedir.

Fotonik kristallerde grup hızı  $v_g = \partial\omega / \partial k$  ve grup indeksi  $n_g = c / v_g$  formülleriyle hesaplanmaktadır. Buradan bir yapının  $n_g$  değeri ne kadar yüksek ise ışığında o oranda yavaşladığı anlaşılmaktadır. Simetrik oluklu dielektrik levhanın eklenmesiyle elde edilen tek modun dalga vektörü,  $k$  üzerindeki dönme noktasına sahip olması yapının önemli bir özelliğidir. Dönüm noktasında çok küçük bir aralıkta grup indeksi çok hızlı bir şekilde değişmekte ve pozitif ve negatif grup hızı değerleri birbirine yaklaşık olarak eşit olmaktadır. Bu durum Şekil 2.4’de görülmektedir. Dalga vektörü,  $k$ ’nın küçük bir aralıktaki bu hızlı değişimi optik dalgayı dondurarak, yerelleşmesine sebep olmaktadır. Şekil 2.4’de keskin rezonans noktasının sağ tarafında en küçük grup indeksine sahip noktanın değeri ve sol tarafında keskin rezonansın belli bir uzaklığında bulunan noktanın grup indeks değerleri gösterilmiştir.



Şekil 2.4 Dalga vektörüne,  $k$  karşılık grup indeksi grafiği, dönüm noktasında grup hızının ani değişimi görülmektedir. Keskin rezonans değerinin sağ tarafında en düşük grup indeks değerine göre sol tarafında keskin rezonansın belirli bir uzaklığa göre seçilen noktaların grup indeks değerleri görülmektedir.

Yapılan modifikasyonlara ek olarak yapının simetrik olan hava olukları  $x$  eksenini boyunca  $d$  ( $0 \leq d \leq 0.5a$ ) simetrik olarak kaydırılmıştır. Yapılan işlem sonucunda grup indeksiyle kayma miktarının küçük bir aralığı ( $0 \leq d \leq 0.15a$ ) arasında bir bağıntı olduğu bulunmuştur. Oluklu hava boşluklarının kaydırma işlemi yapıldığında keskin rezonans noktasının sağa doğru hareket ettiği gözlenmiştir. Grup indeks değerinin keskin rezonans ile bant kenarı arasında kalan bölge için değişimini Şekil 2.5(b) göstermektedir. Keskin rezonansın solunda kalan sabit uzaklıktaki nokta için grup indeks değeri ise Şekil 2.5(c) ile gösterilmiştir.

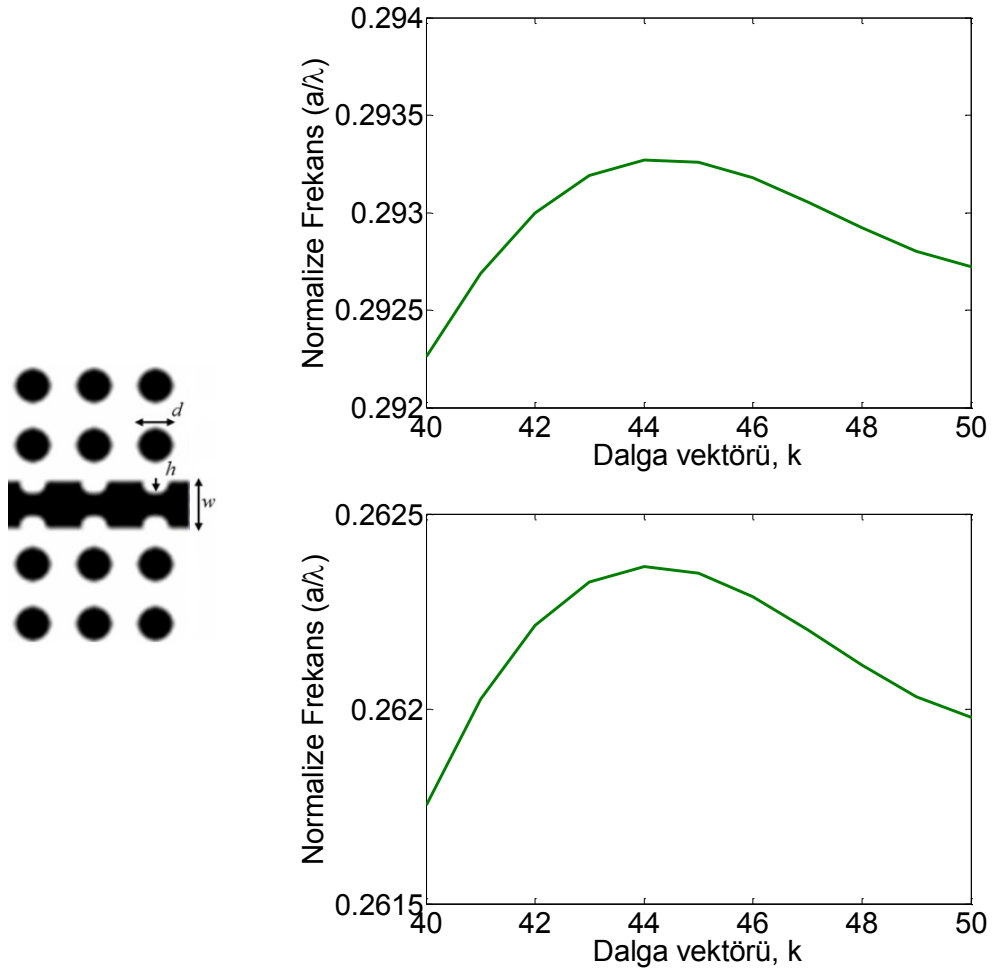


Şekil 2.5 (a) Oluklu hava boşluklarının simetrik olarak  $d$  miktarında kaydırılması, (b)-(c) grafiklerinde  $a$  cinsinden kaydırma miktarının grup indeksine karşılık grafikleri gösterilmiştir.

Olukların simetrik olarak kaydırılmasıyla bant kenarına yaklaşan dönüm noktasıyla bant kenarı arasında kalan bölgedeki eğim azalmıştır. Grup hızı formülünden eğim

azaldığında grup hızının da azalacağı ve bununla bağlantılı olarak da grup indeks değerinin artacağı görülmektedir. Kaydırma miktarının  $d > 0.15a$  değerleri için ise dönüm noktası bant kenarından dışarıya taşıdığı için özelliğini kaybetmektedir.

Yapı üzerinde yapılabilecek değişikliklerden bir tanesi de oluklu dielektrik dalga kılavuzunun genişlik ve hava oluklarının yarıçaplarının değiştirilmesidir. Yapının dielektrik çubuklarının yarıçap değerleri sabit tutularak dalga kılavuzu genişlikleri için oluk yarıçap değerleri tarandı. Tarama sonucunda  $w$ 'nun  $0.7a$  ve  $0.9a$  değerleri için simetrik oluk yarıçaplarının,  $h$  toplamının 2 katı ( $2h/w=0.5$ ) olduğu durumlarda oluşturulan yapıların bant diyagramları çizdirildiğinde keskin rezonans özelliğinin ortaya çıktığı gözlemlendi. Yapılan incelemeler Şekil 2.6 ile gösterilmiştir.



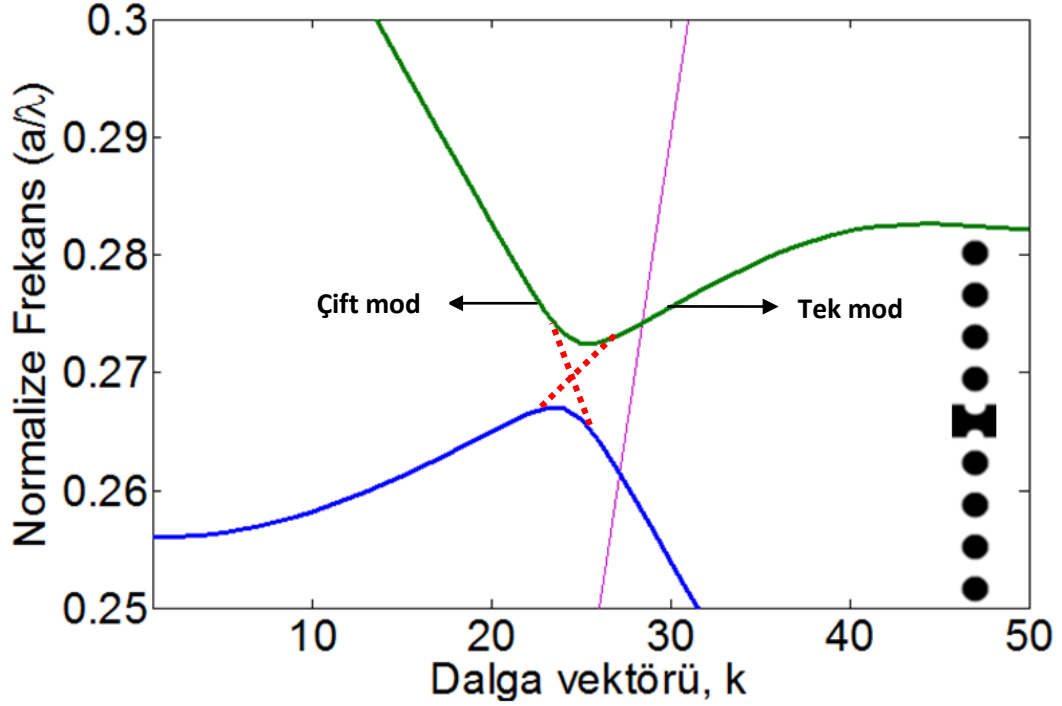
Şekil 2.6 (a)'da görülen yapının  $w=0.7a$  ve  $r=0.175a$  değeri için (b)'de  $w=0.9a$  ve  $h=0.225a$  değerleri için dalga vektörü grup indeks grafiği (c)'de gösterilmiştir.

Keskin rezonansın oluşma şartları belirlendikten sonra yapının ayrıntılı incelemesi Şekil 2.1’de gösterilen yapı üzerinde yapılmıştır. Bu yapıda belli bir frekansta ışık gönderilmiştir. Gönderilen ışığın yapının asimetric kısmında modunun değiştiği, simetric kısımlarda ise mod değişimine uğrayan ışığın yerleştiği görülmüştür.

### **2.2.1. Asimetric Yapı Kullanılarak Mod Dönüşümü ve Yapının Özellikleri**

Üzerinde çalışmalar yapılan bant Şekil 2.3(c)’de görüldüğü üzere tek mod profiline sahiptir. Bundan dolayı yapının bulunan özelliklerinin pratik açıdan anlamlı hale gelebilmesi için tek mod profiline sahip bir dalga ile uyarılması gerekmektedir. Tek mod profiline sahip dalga üretebilen bir kaynak günümüzde olmadığı için çift moddan tek moda mod dönüşümünü sağlayan bir yapıya ihtiyaç ortaya çıkmaktadır. Literatürde mod dönüşümü üzerine yapılan çalışmalar tarandığında farklı grupların çalışmalarına rastlanmıştır[14].

Çalışılan yapıda simetric oluklu hava boşluklarının simetrisinin yarıçaplar artırılarak bozulması kolaylıkla yapılabilmektedir. Yapının bu özelliğinden dolayı asimetri özelliği kullanılarak mod dönüşümünün sağlanması üzerine çalışmalar yapılmıştır. Simetric oluklu hava boşluklarından birinin yarıçapı sabit kalmak şartıyla diğerinin yarıçapı 0.25a ile 0.32a arasında değiştirilerek asimetric yapılar oluşturulmuştur. Oluşturulan asimetric yapıların analizleri PWEM ile yapılarak yapıların bant diyagramları çıkarılmıştır. Çıkan bant diyagramlarında asimetricinin belli değerleri için oluşturulan yapının küçük yasaklı bant aralıklarına sahip olduğu görülmüştür. Elde edilen bant diyagramlarından simetrisi bozulan kısmın 0.28a oluk yarıçapına sahip olduğu durumda kıvrım noktasının yaklaşık olarak yerleşmede kullanılan  $a/\lambda=0.27426$  frekans değerine karşılık geldiği görülmüştür. Küçük yasaklı bant aralığının kıvrım noktası iki farklı profilde dalgayı birleştirmektedir. Bu özelliğinden dolayı kıvrım noktasında gönderilen frekans bu iki mod arasında çapraz geçiş yapabilmektedir. Küçük yasaklı bant aralığının bu özelliği ve asimetric yapı özelliği kullanılarak çift modun tek moda dönüştürülme işlemi yapılmıştır.

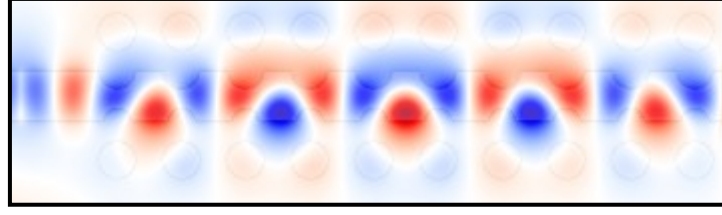


Şekil 2.7 Simetrisi bozulan kısmın oluk yarıçapı  $0.28a$  olduğu durumda bant diyagramında elde edilen küçük yasaklı bant aralığı ve yapının şekli gösterilmiştir. Küçük yasaklı bant aralığının üst bandının kıvrım noktası yaklaşık yerleşme frekansı olan  $a/\lambda=0.27426$  değerine karşılık gelmektedir.

Küçük yasaklı bant aralığının önemli bir özelliği Şekil 2.7’de görüldüğü gibi bandın kıvrılma noktasında mod profilinin değişmesidir. Şekil üzerinde küçük yasaklı bant aralığı bölgesinde gösterilen çapraz şekilde konumlanmış kesikli çizgiler modların çapraz geçişini göstermektedir. Bu özellik sayesinde kıvrılma noktasına karşılık gelen frekans değerinde yapıya bir dalga gönderildiği zaman gönderilen dalga yapıyla etkileşime girdiğinde mod profilini değiştirmektedir.

İlgili grafiğin  $r=0.28a$  yarıçap değerine sahip olan yapı ile ortaya çıktığının görülmesiyle yapıda dönüşümün gerçekleşip gerçekleşmediğini tespit edebilmek için zaman düzleminde yapıya ilgili bandın kıvrım bölgesine karşılık gelen  $a/\lambda=0.27426$  frekans değerinde dalga gönderilmiş ve dönüşümün olduğu gözlemlenmiştir. Elde edilen grafiksel sonuçlar Şekil 2.8’de görülmektedir.

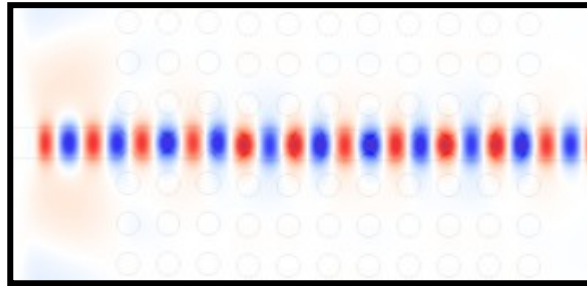




Şekil 2.8 Yapıya gönderilen kıvrım bölgesindeki frekansın çift moda tek moda dönüşümünün tetiklenmesi.

Yarıçap değerlerinin belirlenmesiyle uygun yapı uzunluğunu da belirlemek için FDTD de analizler yapılmıştır. Yapının uzunluğunun optimum değerinin bulunması için yapı uzunluğu  $1a$  ile  $15a$  arasında değiştirilerek dalganın dönüşmesi izlenmiştir. Dalga dönüşümünün maksimum olduğu değeri bulmak için asimetrik yapı arkasına simetrik yapı eklenerek dalganın yerelleşmesi sağlanmış ve yerelleşen dalganın maksimum genliğine bakılmıştır.

Yapıya eklenen asimetrik, küçük yasaklı bant aralığına sahip yapının mod dönüşümünü sağladığını göstermek amacıyla yapı kaldırılmış, sadece simetrik kısmı bırakılarak yapıya aynı normalize frekansta Gauss dalga gönderilmiştir. Yapılan işlem sonucunda gönderilen dalganın Şekil 2.9'da gösterildiği gibi hiçbir değişime uğramadan yapı içerisinden geçtiği görülmüştür.



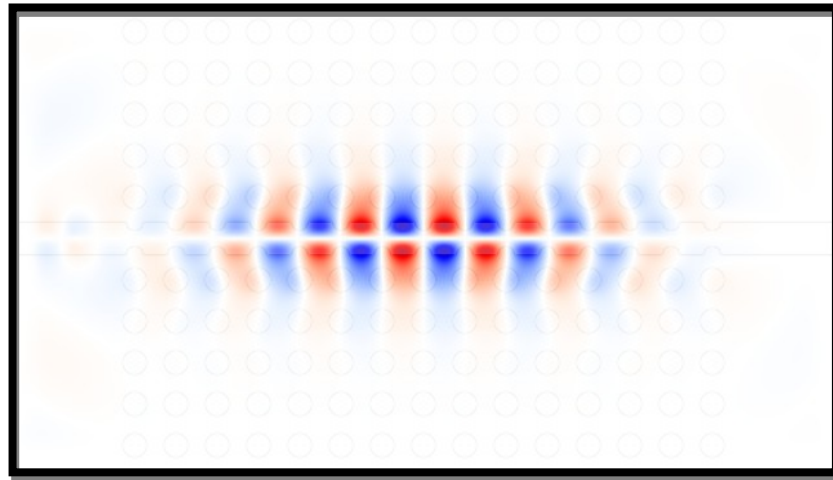
Şekil 2.9 Yapının asimetrik bölgesi çıkarılarak normalize frekansı  $a/\lambda=0.27426$  olan Gauss dalga gönderilmiş ve gönderilen dalgada hiçbir değişim olmadığı gösterilmiştir.

Dielektrik levha üzerinde simetrik oluklu hava boşluklarına sahip yapının tek tarafındaki olukların arttırılmasıyla simetrisi bozulan yapı kullanılarak yapıya gönderilen çift mod profiline sahip dalganın mod profili değiştirilmiştir. Yapının

mod profilinin değiştiği şekillerle gösterilmiştir. Bu dönüşüm oluşturulan asimetriden ve buna bağlı ortaya çıkan küçük yasaklı bant aralığının kıvrım noktasında meydana gelen çapraz geçiş özelliğinden faydalanılarak gerçekleştirilmiştir.

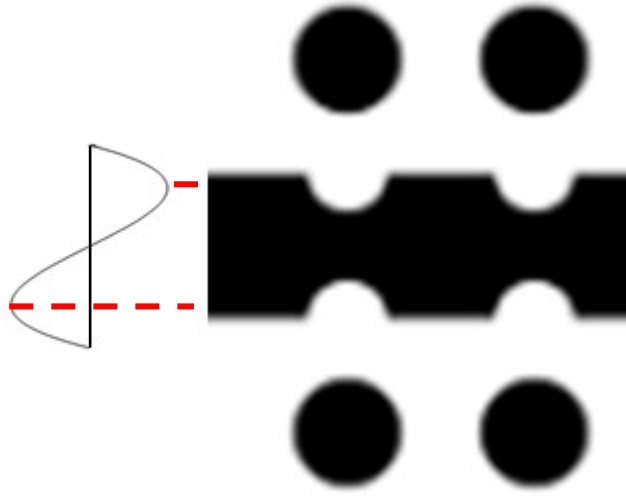
### 2.2.2. Işığın Yerelleşmesi

Keskin rezonans özelliğinden dolayı işığın hızının yavaşlayarak yerelleşmesi yapının en önemli özelliğidir. Yapıya zaman düzleminde bandın kırılma noktası olan  $a/\lambda = 0.27426$  frekansında bir dalga gönderilmiş gönderilen dalganın yapıyla etkileşimi incelenmiştir. ıkan sonuçlar incelendiğinde gönderilen dalganın yapının içine girdiği ancak yapı dışına çıkamayarak yerelleştiği görülmüştür. Bu zellik gönderilen frekansın komşuluklarında dalga gönderilerek gözlenmiş ve aynı belirginlikte bir davranışa rastlanmamıştır. Dalganın yapı içerisinde yerelleşmesinin yapının uzunluğuyla olan ilişkisi FDTD metodu kullanılarak incelenmiştir. Yapı uzunluğu  $5a$  ile  $50a$  arasında  $5a$  aralıklarıyla değiştirilmiş ve lokalizasyonun genliğine bakılmıştır. Elde edilen sonuçlarda yapının  $15a$  uzunluk değerini için dalganın genliğinin en yüksek değerine ulaştığı görülmüştür. Bu uzunluğa sahip yapı içerisinde yerelleşmiş dalganın FDTD ile elde edilmiş görünümü şekil 2.10'da gösterilmiştir.



şekil 2.10  $15a$  uzunluğuunda yapıya tek mod profilinde  $a/\lambda = 0.27426$  merkez frekanslı Gauss dalga gönderildiğinde dalganın yerelleştiği görülmektedir. Gauss dalganın yapıyla etkileşimini incelemek için FDTD yöntemi kullanılmıştır.

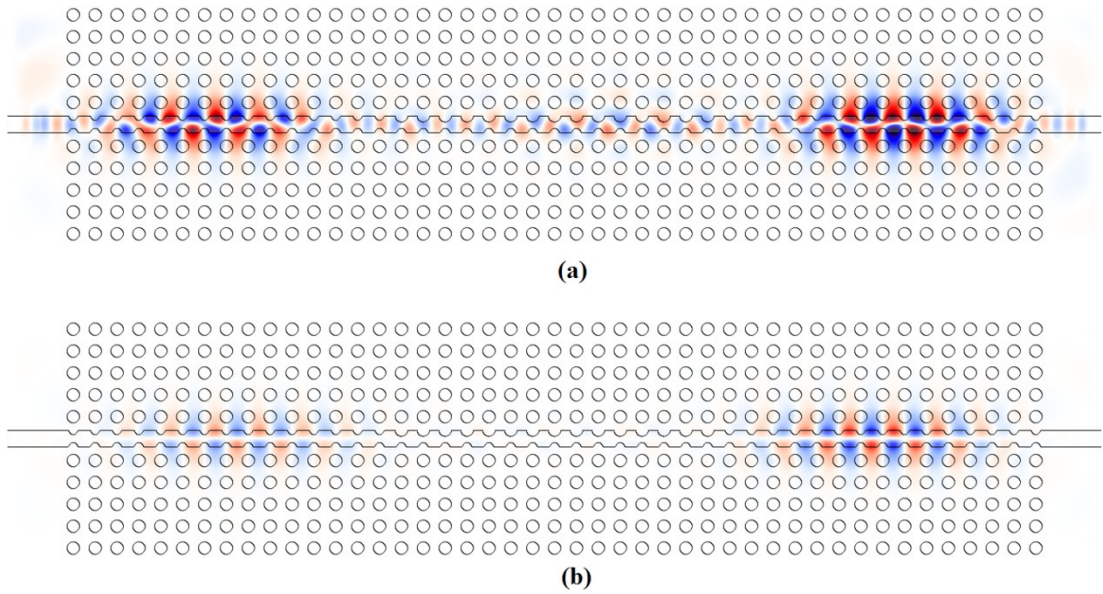
Tek mod profiline sahip bir dalğanın dalga profili Şekil 2.11’de gösterilmiştir. Görüldüğü gibi tek mod dalğanın genliği merkezinde sıfır kenarlarında ise maksimum olmaktadır. Bunun sonucunda dalğanın genliğinin maksimum olduğu bölgeler yapının kenarlarındaki sık yerleştirilmiş oluklu hava boşluklarıyla daha fazla etkileşime girmektedir. Bu etkileşim nedeniyle tek mod profiline sahip dalga oluklu hava boşlukları arasına sıkışmakta ve hareket edemeyerek yerelleşmektedir.



Şekil 2.11 Tek mod profiline sahip dalğanın yapıya girişinin şematik bir görünümü.

Yapı ilk olarak giriş kısmı mod dönüşümünü sağlayan asimetric kısım, çıkış kısmı ise ışığın yerelleşmesini sağlayan simetric kısım olmak üzere iki birleşik yapıdan oluşturulmuştur. Yapılan analizler sonucunda yerleşen ışığın yapının asimetric kısmından geriye doğru az da olsa ilerleyebildiği burada yerleşme özelliğini olumsuz etkilediği gözlemlenmiştir. Simetric yapının içerisindeki ışığı dışarı bırakmama özelliği olduğundan dolayı yapının ön kısmına da simetric kısım eklenmiş ve bu sayede geriye doğru hareket eden dalgaların yapı dışarısına kaçarak kaybolması önlenmiştir. Bu nedenden dolayı yapı üç kısımdan oluşmaktadır. Işığın yerleşmesi yapının içerisinde asimetric kısmın iki tarafındaki simetric kısımlarda olmaktadır. Bu yerleşmeler kendi içlerinde birbirlerini kısmen beslemektedirler. Ortaya çıkarılan yeni yapıyla kayıplar azaltıldığı için yerleşen dalğanın genliği yüksek olmakta ve dalğanın yapı dışına çıkışı simetric dalga kılavuzlarıyla engellendiğinden dolayı daha uzun bir süre yapı içerisinde tutulabilmektedir.

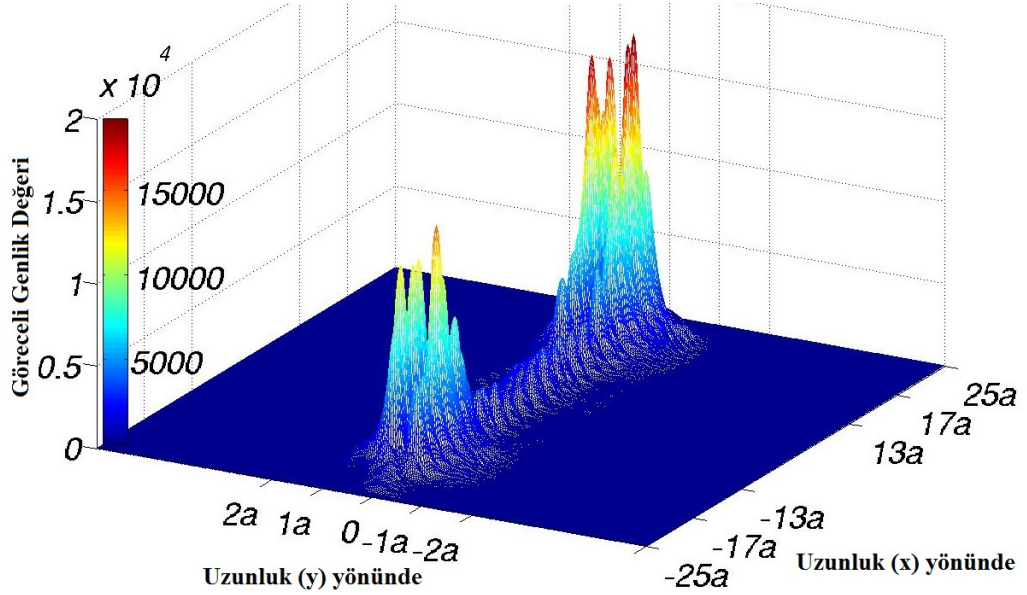
Işığın mod dönüşümü ve yerleşme özellikleri ayrı ayrı elde edildikten sonra ikisinin bir arada kullanılabilmesi için Şekil 2.1 ile gösterilmiş oluk yarıçapları, dielektrik levha kalınlığı ve dielektrik çubuk yarıçapları belirlenmiş yapıya belirlenen  $0.27426a/\lambda$  frekansında dalga gönderilmiştir. Yapılan incelemeler sonucunda gönderilen dalganın yapının asimetric kısmında çift moddan tek moda dönüştüğü, asimetric kısmın yan taraflarında bulunan iki simetric kısımda ise mod dönüşümüne uğrayan dalganın yerleştiği gözlenmiştir. Yapının ön kısmında bulunan simetric kısımda yerleşme olmasının iki sebebi vardır. Birincisi asimetric kısımda mod dönüşümüne uğrayan ışığın yine asimetric kısımda geri yansımastır. İkincisi asimetric kısmın arkasında yer alan simetric kısımda yerleşen ışığın asimetric yapı içerisinde ilerleyerek geri kaçmasıdır. Mod dönüşümü ve ışığın yerleşmesi olayları Şekil 2.12 (a) ve (b) ile gösterilmiştir.



Şekil 2.12  $0.27426a/\lambda$  frekansında gönderilen yapı giriş kısmında görüldüğü gibi, çift mod profiline sahip dalganın (a) mod dönüşümüne uğraması ve (b) yerleşmesi.

Yapının içerisine giren ışık, hızının yavaşlaması ve yerleşmesinden dolayı mekânsal olarak sıkışmaktadır[15]. Gönderilen dalganın ön kısmı yapıyla etkileşime girdiği için hızı yavaşlamakta, yapıyla henüz etkileşime girmemiş olan dalganın arka kısmı ise daha hızlı hareket etmektedir. Dalganın ön ve arka kısmında oluşan bu hız

farkından dolayı dalganın arka kısmı ile ön kısmı arasındaki mesafe kısalmaktadır. Bu şekilde oluşan yeni dalga, zaman ve frekans düzlemindeki özellikleri değiştirilmeden mekanda sıkışmaktadır. Dalganın yapıya girdiği kısımda enerji kaybının da olmadığını düşünürsek aynı oranda enerji daha küçük bir alana sıkıştırılmıştır. Bunun sonucunda da dalganın genliği artmaktadır[15]. Yapılan çalışmada yapı içerisinde yerleşen dalganın genliği FDTD ile gözlenmiş ve yerleşme noktasında genliğin giriş Gauss dalgasına göre yaklaşık 30 kat arttığı görülmüştür. Analizler sonucunda elde edilmiş genliğin yapıya 3 boyutlu dağılımı Şekil 2.13 ile gösterilmiştir.



Şekil 2.13 Gönderilen Gauss dalganın yapıyla etkileşimi sonucu yerleşen dalganın yapı üzerinde genliğe bağlı dağılımı gösterilmiştir.

Yerleşen dalganın yapı içerisinde ne kadar uzun süre hapsediği yapı için önemli bir veridir. Elde edilen yapıda ışığın yerleşme özelliğinin anlık olmadığını göstermek açısından fotonik kristal kovuklar için kullanılan Q değeri hesaplaması yapılmıştır. FDTD den elde edilen sonuçlardan dalganın elektrik alanının zamana göre değişimi gözlenmiş, bu verilerin Fourier dönüşüm işlemleri yapılmasıyla ortaya çıkan Lorentzian tepe noktasına uygun eğri bulunarak derecesi hesaplanmıştır. Yapılan işlemler sonucunda Q değerinin 32000 olduğu bulunmuştur.

### 2.3. SONUÇ

Yapılan çalışmayla kare örgü yapısına sahip fotonik kristalin oluklu dielektrik levha eklenmesiyle kazandığı özellikler üzerinde durulmuştur. Hava boşluklu dalga kılavuzuna sahip olan yapının bant diyagramı verilmiş ve oluklu dielektrik dalga kılavuzuna sahip olan yapının bant diyagramıyla karşılaştırılmıştır. Standart W1 tipi dalga kılavuzunda ortaya bir çift mod çıkmıştır. Ortaya çıkan mod ışık çizgisinin üstünde olmasından dolayı düzlemsel dalga dağılımına maruz kalmaktadır. Oluklu dielektrik levha eklenmesiyle kare örgü yapısının yasaklı bant aralığında ortaya bir çift ve bir tek mod çıkmaktadır. Bu durum kare örgü yapısına sahip fotonik kristallerde sık görülmemektedir. Ayrıca ortaya çıkan tek mod ışık çizgisinin altında yer aldığından düzlem dışı dağılımdan etkilenmemektedir. Ortaya çıkan bu modlardan tek mod profiline sahip olanı bant diyagramında kıvrım noktasına sahiptir. Bu özelliğinden dolayı dalga vektörünün kısa bir aralığında kırılma indisi hızlı bir şekilde değişmektedir. Bu değişimin ışığın hızını azaltarak yerelleştirdiği görülmüştür. Kıvrım bölgesinin ortaya çıkması için gerekli koşullar incelenmiş ve oluklu hava bölgelerinin yarıçapları toplamının levhanın genişliğinin yarısı ( $2h/w=1/2$ ) kadar olduğunda kıvrım bölgesinin elde edilebildiği gösterilmiştir.

Kıvrım bölgesinin üzerinde olduğu bant tek mod profiline sahiptir. Bu moddan pratikte de yararlanabilmek için tek mod profiline sahip dalganın oluşturulması gerekmektedir. Tek mod profilinde dalga oluşturabilmek için asimetrik yapı ve küçük yasaklı bant aralığının kıvrım bölgesinde gönderilen dalganın çapraz geçiş ile mod değiştirmesi özelliğinden yararlanıldı. Bunun için oluklu hava boşluklarından birinin yarıçapı değiştirilerek oluşturulan asimetrik yapının uygun değerleri bulunarak ilgili bandın kıvrım bölgesinde gönderilen dalganın yapıyla etkileşmesi sonucu mod profilini değişmesi sağlandı.

Keskin rezonans frekansı olan  $w=0.27426$  değerinde yapıya çift mod profiline sahip bir dalga gönderildiğinde asimetrik bölgede ışığın tek moda dönüştüğü. Dönüşen dalganın yapı içerisinde yavaşlayarak yerleştiği gözlemlendi. Işığın hızının azalmasıyla mekanda daralması ve genliğinin artması grafiklerle gösterilmiştir.

Yerleşen dalğanın yapı içerisinde yerleşme süresini belirten Q değeri analizler sonucunda yaklaşık 32000 olarak bulundu.

Bulunan yapı ışığa içerisinde hem mod dönüşümü sağlaması hemde ışığı sabitlemesi açısından özgün bir yapıdır. Bu özellikleri sayesinde oluşturulan yapı optik haberleşme ve optik hafıza gibi alan uygulamalarında kullanılabilir.

## BOLÜM 3

### 3. KARE ÖRGÜ YAPISINA SAHİP FOTONİK KRİSTAL İLE KÜÇÜK YASAKLI BANT ÖZELLİĞİ KULLANILARAK FREKANS AYRIŞMASI

#### 3.1. Giriş

Fotonik yasaklı bant aralığı fotonik kristallerin önemli bir özelliğidir. Bu özelliğinden dolayı elektromanyetik dalga fotonik kristal dalga kılavuzu içerisinde saçılma uğramadan kolaylıkla ilerleyebilmektedir[21,22]. Farklı genişlik ve özelliklerde fotonik kristal dalga kılavuzları oluşturularak küçük yasaklı bant aralıkları elde edilebilmektedir. Küçük yasaklı bant aralığı, farklı derecelerdeki güdümlü modlar arasında oluşan küçük boşluklardır. Mod küçük bir frekans aralığı sıfır iletme geçtikten sonra iletimine devam etmektedir. Bu özellik güdümlü modların iletimini bant diyagramının küçük noktalarında kesmektedir. Literatürde yüksek dielektrik ve hava zeminlerine sahip farklı genişlikteki fotonik kristal dalga kılavuzları üzerinde detaylı incelemeler yapılmış, küçük yasaklı bant özellikleri gösterilmiştir[23,24]. Belli bir merkezi frekans ve bant genişliğine sahip gauss dalga gönderilerek oluşturulan iletim grafiğinde de küçük yasaklı bant aralıkları görülebilir. Küçük yasaklı bant aralıklarının bantı iletimden bloke duruma geçirmesinin keskin olması da önemli bir özelliktir. Bu ani değişim oluşturulan yapının filtreleme, anahtarlama, algılama gibi uygulamalarda kullanılmasına imkan verir. Keskin iletim bant kenarı özelliğine sahip farklı yapılar üzerinde çalışmalar yapılmıştır[25,26]. Yapının keskin iletim bant aralığına sahip olması yapının hassasiyetini arttırarak kullanılan maddenin kırılma indisindeki değişimleri, yapıda kullanılan daire veya çubukların yarıçaplarının değişimleri veya yapının periyodikliğindeki değişimi algılamasını kolaylaştırır. Yapılan bir çalışmada bandın iletimindeki keskin değişim kullanılarak dalga kılavuzunun kırılma indisinin sıcaklık değişimlerinden etkilenmesini ve boşluk yarıçapının nanometre boyutlarındaki değişimini algılayabilen hassas bir fotonik kristal dalga kılavuzu tasarımı gösterilmiştir[27]. Başka bir çalışmada iletim bandının keskin değişim özelliğinden faydalanılarak dalga kılavuzu genişliğinin küçük değişimleri için küçük yasaklı bant



aralığının değişimleri gözlenmiş ve sıcaklık değişimlerinden etkilenmesi incelenmiştir[28].

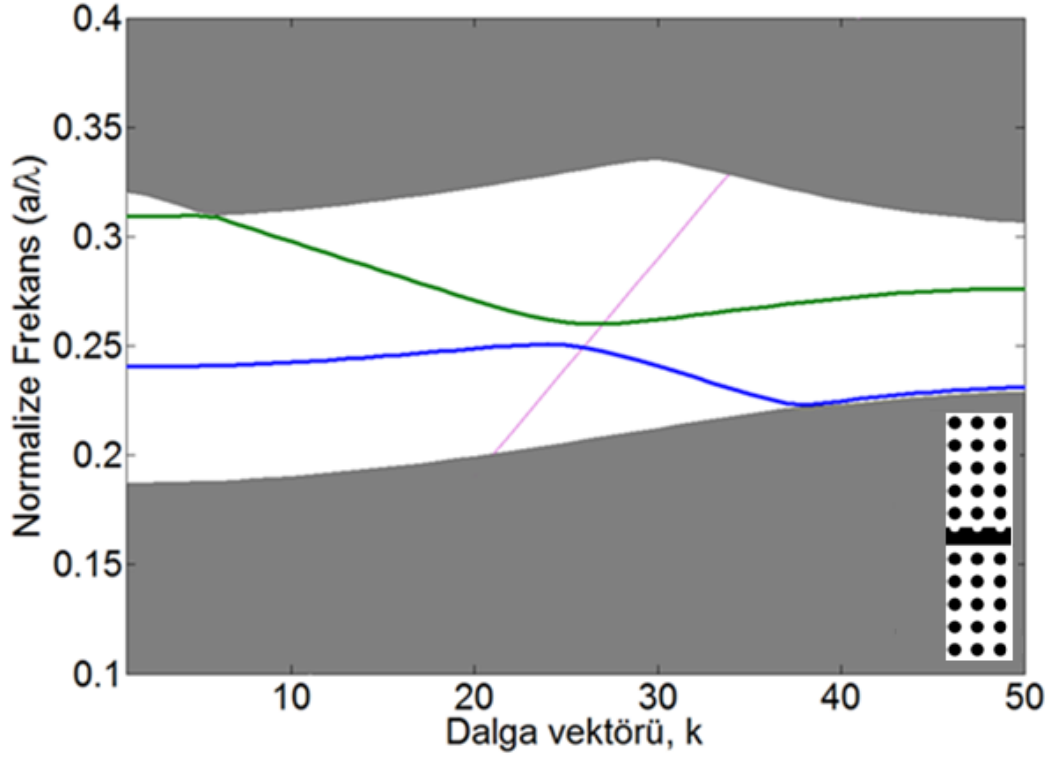
Yapılan çalışmalarda genellikle çok modlu dalga kılavuzu kullanılmıştır. Bu yapılarla temel modun yüksek dereceli modlara transferi sağlanmıştır[27, 29, 30, 31]. Yüksek derecedeki moda dönüşümün avantajı bu modların yapı içerisinde dağılımının daha yüksek oranlarda olması bununla birlikte yapı dışarısına kolayca çıkabilmeleridir. Yüksek dağılımın yanında derecesi değişen mod iki bantta farklı grup hızlarına sahiptir. Ortaya çıkan bu hız farkından dolayı da gönderilen ve ilerleyen dalgalar ayrışabilmektedir. Ancak çok modlu dalga kılavuzlarının bugüne kadar yapılan çalışmalarında bulunan küçük yasaklı bant aralığı ışık çizgisinin üstünde olduğu için düzlem dışı dağılımdan dolayı yapı içerisinde kullanımı dezavantajlı olmaktadır. Bu nedenden dolayı zemini yüksek dielektrik sabitine sahip fotonik kristaller kullanılmaya çalışılmıştır[27]. Başka bir çalışmada üçgen örgü yapısı kullanılarak oluşturulan GaAs zemine sahip fotonik kristalde yapı uzunluğu ve hava dolgu oranının küçük yasaklı bant oluşumuna ve gönderilen dalganın dışarı çıkması üzerine etkileri gözlenmiştir[29]. Gönderilen dalganın belli frekansları küçük yasaklı bant aralığından dolayı iletilemeyerek dışarı çıkması bu özelliğe sahip fotonik kristallerin optik haberleşmede DEMUX olarak kullanılabilceğini akıllara getirmiş ve bazı araştırmalara konu yapmıştır. Konuyla ilgili ilk çalışmada küçük yasaklı bant özelliği sayesinde yüksek dereceli modlara transfer olan dalganın dışarı çıkması için fotonik kristal dalga kılavuzunun bir tarafındaki çubuklar ve dalga kılavuzu genişliği gittikçe azaltılarak küçük yasaklı bant özelliği kaydırılmış ve yapı içerisinde farklı yerlerden çıkan dalgalar foto diyotlarla algılanmıştır[32]. Farklı bir çalışmada dalga kılavuzu genişliği belirli aralıklarla sabit olarak azaltılmış ve farklı frekansların farklı bölgelerden çıkması sağlanarak DEMUX olarak kullanılabilceği gösterilmiştir[33]. Farklı frekansların yapının farklı bölümlerinden çıkmasını sağlayan fotonik kristal yapı tasarımları da mevcuttur[34].

Bu çalışmada küçük yasaklı bantların elde edilmesinde yaygın olarak kullanılan aksine kare örgü yapısına sahip fotonik kristal yapısı üzerinde çalışılmıştır. Kare örgü yapısının ortasına değişken yarıçaplı hava boşluklarına sahip tek tarafı oluklu

dielektrik levha eklenmiştir. Yapılan bu değişimle bant diyagramında tekmod özelliğine sahip küçük yasaklı bant aralığı elde edilmiştir. Bulunan küçük yasaklı bant aralığı ışık çizgisine çok yakın olması açısından düzlem dışı dağılımdan daha az etkilenme avantajına sahiptir. Yapı ortasında dielektrik levha olması ve dalganın buradan ilerlemesinden dolayı da düzlem dışı dağılım yönünden avantajlıdır. Bu özelliklerinden dolayı oluşturulan yapı daha önce çalışılanlara göre özgündür ve avantajlı özelliklere sahiptir. Yapının analizleri PWEM ve FDTD kullanılarak yapılmıştır.

### **3.2. Yapının Oluşturulması ve Analizleri**

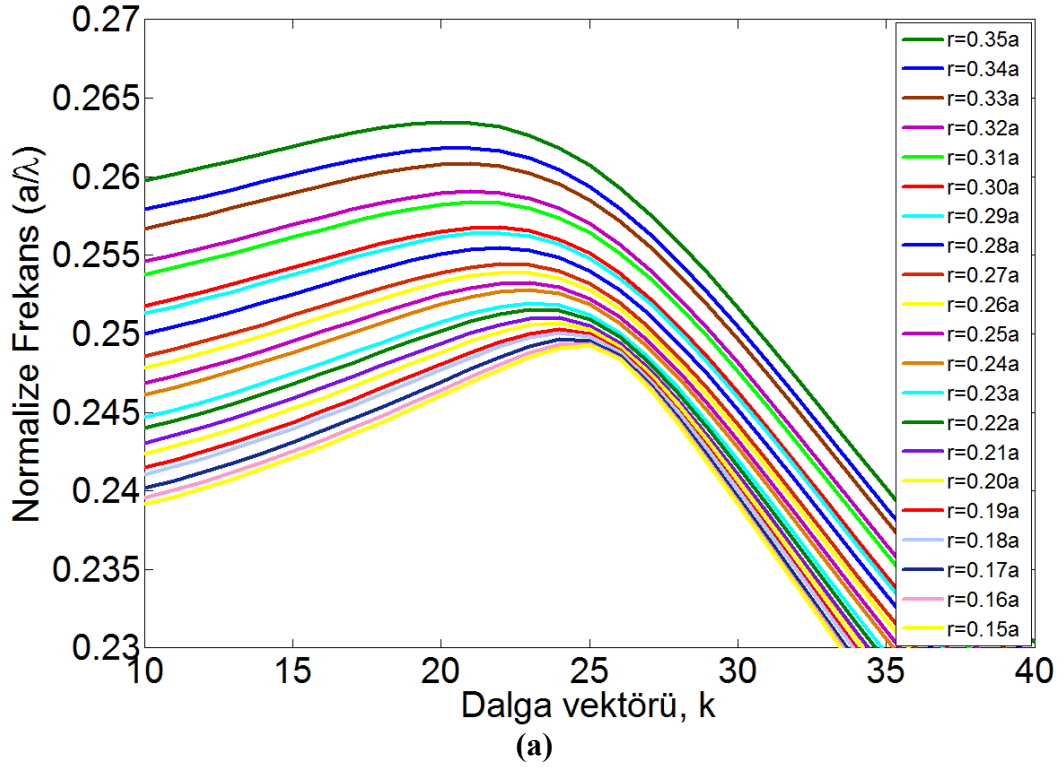
Bu çalışmada küçük yasaklı bant aralıklarının özellikleri kare örgü yapısına sahip iki boyutlu fotonik kristal ortasına tek tarafı oluklu dielektrik levha eklenmesiyle oluşturulan yapıyla incelenmiştir. Hava zemini üzerine oluşturulan yapıya eklenen dielektrik çubukların ve yapı ortasına yerleştirilen dielektrik levhanın kırılma indisleri 3.46 olarak seçilmiştir. Yapının ortasına dielektrik levha eklenmesiyle içerisinde ilerleyen dalganın düzlem dışı dağılımdan etkilenmesi azaltılmıştır [35-37]. Ortaya çıkan yapının analizleri yapıldığında TM modlarında bant aralığına sahip olduğu görülmüştür. Oluşturulan yapı ve bant diyagramı Şekil 3.1’de gösterilmiştir. Yapıya eklenen tek tarafı oluklu asimetrik dielektrik levha üzerindeki hava boşlukları yapıyla aynı periyodikliğe sahiptir. Hava boşluk yarıçaplarının  $r=0.10a$  ile  $0.40a$  arasındaki değerler için incelemeler yapılmıştır. Yapı ortasındaki dielektrik levhanın kalınlığı ise  $w=0.8a$  olarak alınmıştır.

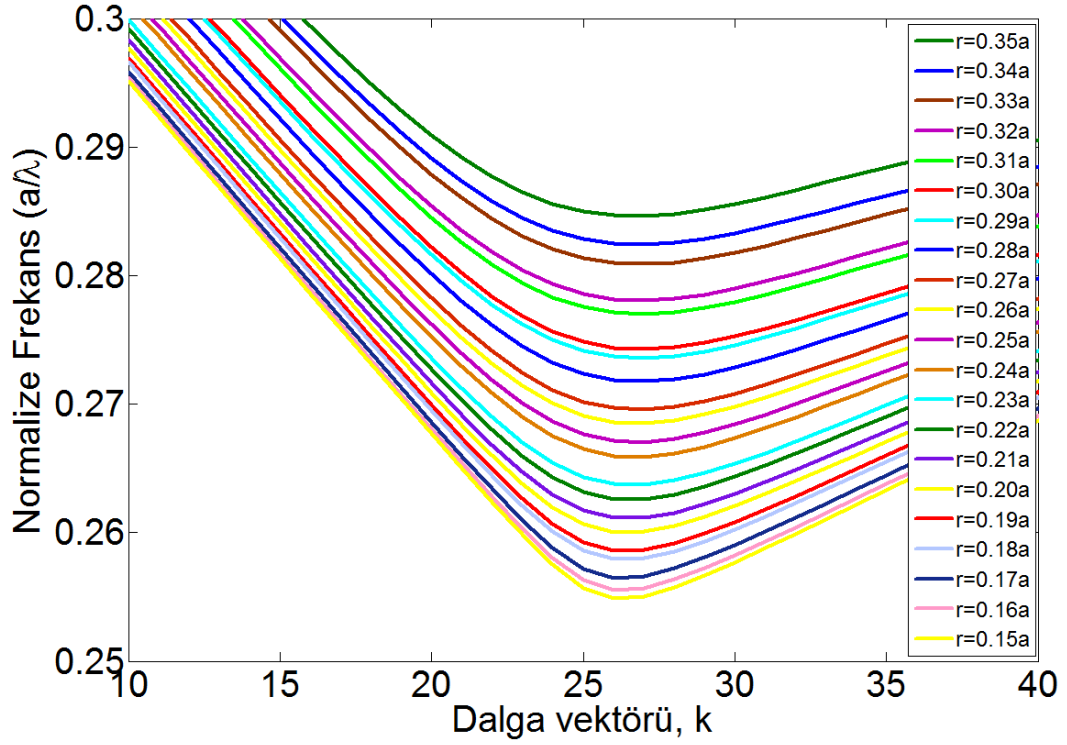


Şekil 3.1 Dielektrik çubuk üzerindeki oluk yarıçapları  $0.2a$  iken PWEM ile hesaplanmış bant diyagramı ve yapının küçük bir görünümü.

Kare örgü yapısındaki fotonik kristale tek tarafı oluklu dielektrik levha eklenmesiyle elde edilen küçük yasaklı bant aralığı yaygın olarak çalışılan yapılara göre farklılıklara ve avantajlara sahiptir. Yaygın olarak çalışılan yapılarda çokmodlu üçgen örgü yapıları üzerine çalışmalar yapılmıştır[28-33]. Kullanılan yapılarda çalışılan bölge ışık çizgisinin çok üzerinde olmasından dolayı gönderilen dalga düzlem dışı dağılımdan yüksek oranda etkilenmektedir[7]. Ayrıca çokmodlu dalga kılavuzunda çalışılması çalışmayı zorlaştırmaktadır. Bu çalışmada Şekil 3.1’de görüldüğü gibi kullanılan yapıda ışık çizgisinin hemen üzerinde bir bölgede çalışılması ve tekmodlu dalga kılavuzu olması açısından avantajlara sahiptir. Kullanılan yapının bir diğer avantajı gönderilen dalganın dielektrik levha içerisinde ilerlemesinden dolayı düzlem dışı dalga yayılımının azalmakta olmasıdır.

Yapılan çalışmalarda farklı frekansların farklı bölgelerden çıkabilmesi için dalga kılavuzunun genişliği giderek azaltılmış ve dalga kılavuzuna eğimli bir görünüm verilmiştir. Değiştirilen dalga kılavuzu genişliğiyle küçük yasaklı bant aralığının yeri değiştirilerek farklı frekansların farklı bölgelerde ayrışması sağlanmıştır. Bu tür bir yapıda eğimin sağlanabilmesi için bir taraftaki tüm periyodik yapı bu eğime uyum sağlayacak şekilde kaydırılmalıdır[32]. Bu çalışmada oluşturulan yapıda ise yapının periyodikliğinde hiçbir değişim yapılmayarak sadece oluklu dielektrik levha üzerindeki hava boşluklarının yarıçapları değiştirilmiş ve küçük yasaklı bant aralığının kayması sağlanmıştır. Küçük yasaklı bant aralıklarının olukların yarıçapına göre değişimi Şekil 3.2’de gösterilmiştir.

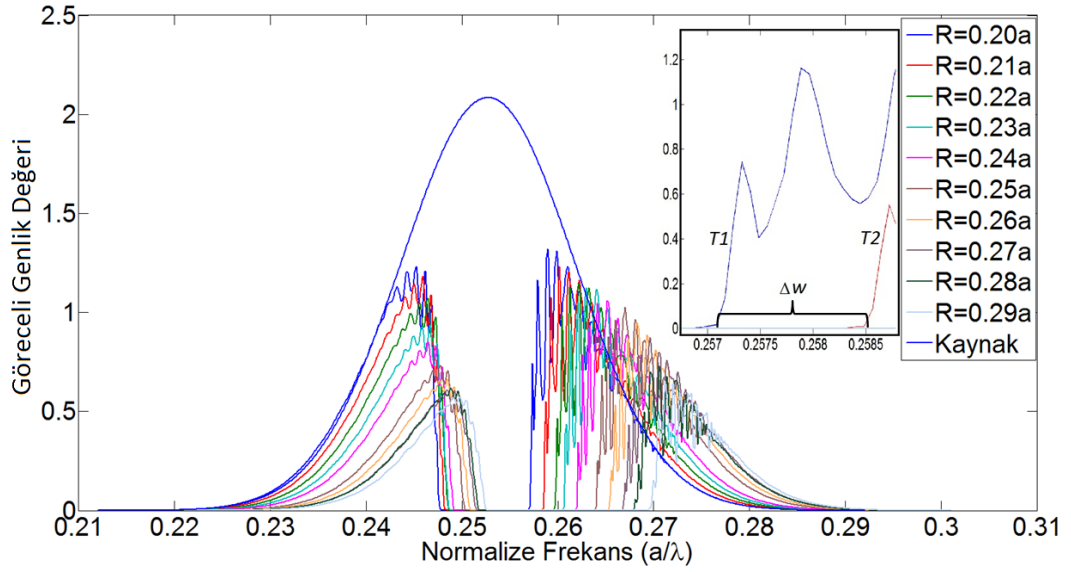




(b)

Şekil 3.2 Ortaya çıkan küçük yasaklı bant aralığını oluşturan modların PWEM kullanılarak bulunmuş oluk yarıçapıyla değişim grafikleri (a) alt modlar (b) üst modlar.

Bant diyagramları elde edilen yapılarda sonuçların tutarlılığını saptamak için zaman düzleminde FDTD kullanılarak hesaplamalar yapılmıştır. Küçük yasaklı bant aralığına sahip yapılarda uzunluğun iletim ile ilişkisi incelenmiş ve uzunluğun artmasıyla daha doğru iletim grafikleri elde edildiği gösterilmiştir[29]. Bu çalışma dikkate alınarak iletim grafiklerinin hesaplanmasında yapı uzunluğu  $55a$  olarak alınmıştır. Bant grafiği çıkarılan her bir oluk yarıçap değeri için uzunluğu  $55a$  olan yapıya merkez frekansı küçük yasaklı bant aralığının orta noktasına karşılık gelen frekansta ve bant genişliği frekans düzleminde  $0.08a/\lambda$  olan TM polarizasyona sahip bir gauss dalgası gönderilmiş ve iletim grafiklerine bakılmıştır. Elde edilen iletim grafikleri Şekil 3.3'de gösterilmiştir. Ayrıca Oluk yarıçap değerinin  $0.2a$  olduğu durumda gönderilen gauss dalgası gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi gönderilen dalga ile iletilen dalga birbiriyle örtüşmektedir. Bu örtüşme farklı oluk yarıçapı değerlerinde de aynı şekilde olmaktadır.



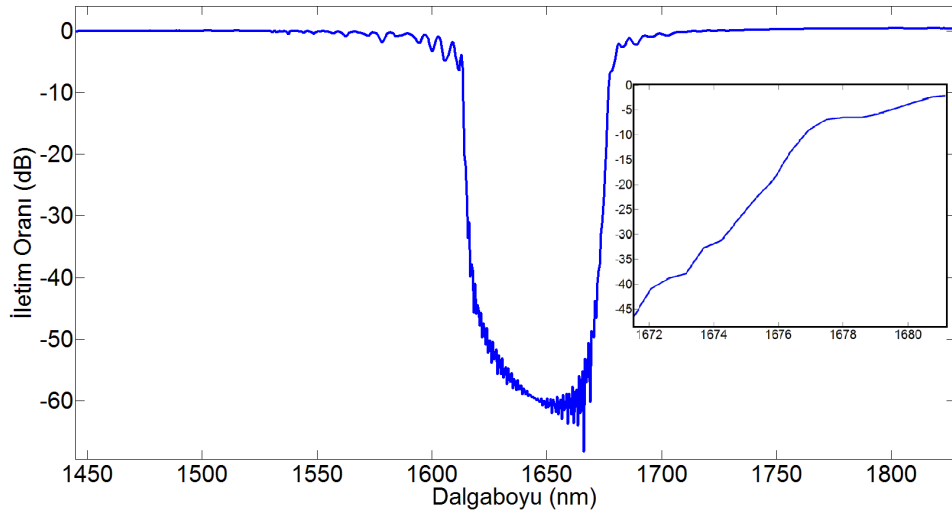
Şekil 3.3  $55a$  uzunluğunda farklı oluk yarıçap değerleri için yapıya gönderilen gauss dalgalarının iletim grafikleri. Yakınlaştırılmış görselde  $r=0.20a$  ve  $0.21a$  değerlerine sahip yapının iletim grafikleri yakından gösterilmiştir.

Şekil 3.3’de görülen iletim grafiklerinin küçük yasaklı bant aralığı bölgesindeki iki ardışık  $r$  değerlerinde ortak düşük iletim bölgesine sahip olduğu görülmektedir. Bu nedenden dolayı farklı frekansta dalgaların ayrıştırılması için küçük yasaklı bant aralığının Şekil 3.3 ile yakınlaştırılmış olarak görülen iki iletim grafiği arasında kalan bölgesi kullanılmaktadır. Bu bölgede dalganın iletimi bir  $r$  değerinde çok düşük ardışık diğer  $r$  değerinde ise yüksek olmaktadır. Eğer Şekil 3.3 üzerinde gösterilen  $\Delta w$  frekans aralığına sahip bir dalga yapıya gönderilirse karşılık gelen frekans aralığında yüksek iletim değerindeki T1 iletim grafiğine sahip  $r=0.20a$  oluk yarıçaplı yapı içerisinde iletilebilecek ancak T2 iletim grafiğine sahip  $r=0.21a$  oluk yarıçapına sahip yapı içerisinde iletilemeyecektir. Bu iletim farkının sonucunda da dalgaların ayrıştırılabileceği çalışmanın devamında gösterilmiştir.

Elde edilen Şekil 3.3 grafiğinden oluk yarıçapının  $0.01a$  kadar değişimi için küçük yasaklı bant aralığının normalize frekans düzleminde ortalama  $0.0015a/\lambda$  kadar kaydığı görülmüştür. Optik haberleşmede kullanılan dalga boyu  $1555\text{nm}$  mertebesinde alınmaktadır. Bu çalışmada küçük yasaklı bantların ortaya çıktığı oluk yarıçapı aralığı ise  $0.15a$  ile  $0.35a$  aralığındaki değerlerdir. Çalışılan yarıçap

değerlerinin orta noktası olan  $r=0.25a$  değerinin üst bandının kıvrım noktasına karşılık gelen normalize frekans değeri  $0.2670a/\lambda$  değeridir. Bu frekans değeri  $1555\text{nm}$ 'ye karşılık gelecek şekilde ayarlanarak yapılan hesaplamalarda  $a/1555=0.2670$  eşitliğinden  $a$  değeri çekilerek yapı sabiti  $a=415\text{nm}$  bulunur. Yapı sabiti bulunduktan sonra normalize frekanslara karşılık gelen dalga boyları bulunabilir. Her bir  $r$  değerinin küçük yasaklı bant aralığının üst bandı referans alınarak Şekil 3.3'de  $\Delta w$  olarak gösterilen bant genişliği hesaplanırsa her bir oluk yarıçapı değerinde yaklaşık  $10\text{nm}$  bant genişliği elde edildiği görülür. Verilere göre tüm yapılar ardışık olarak kullanılırsa yaklaşık  $200\text{nm}$  bant genişliği elde edilebilmektedir.

Oluşturulan yapının filtreleme, mod ayrıştırma ve algılama gibi özelliklerde kullanılabilmesi için  $30\text{dB}$  oranında bir iletim kaybının olması öngörülmektedir. Burada da gönderilen dalganın iletim oranlarını görmek için  $r=0.2a$  oluk yarıçapına sahip yapıda yapının iletim grafiği ile kaynaktan gönderilen dalganın iletim oranlarına  $\text{dB}$  cinsinden bakılmış ve frekansa karşılık kayıp grafiği çizdirilerek Şekil 3.4'de verilmiştir.

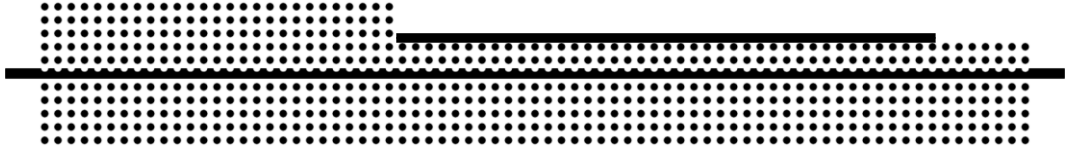


Şekil 3.4 Oluk yarıçapı değerinin  $0.2a$  olduğu değer için kaynaktan gönderilen gauss dalgasının  $\text{dB}$  cinsinden iletim oranları.

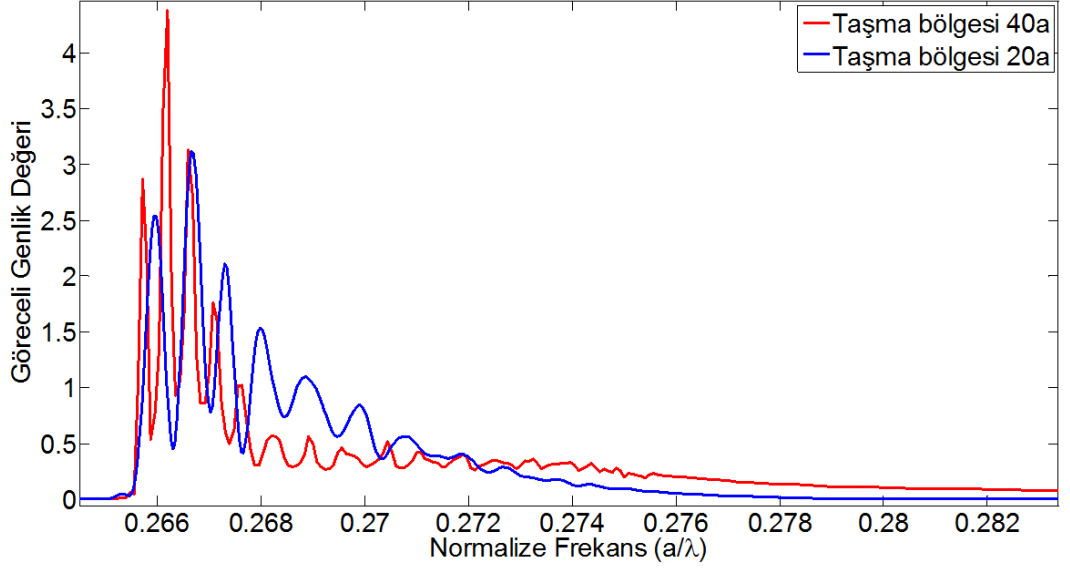
Oluşturulan iletim oranı grafiğinde iletimin ne kadar sert bir şekilde düştüğü yapının kullanım alanları için önemli bir parametredir. Yapılan bir çalışmada bunun üzerine dikkat çekilmiş ve yapının kenarında bulunan periyodik yapının sırasının sayısı arttırılarak bu keskinliğe etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Bulunan sonuçlarda yapı uzunluğu  $120a$  iken yapı kenarına on iki sıra periyodik yapı yerleştirildiğinde  $4\text{nm}$  dalga boyu değişiminde  $30\text{dB}$  bir düşüşün olduğu gözlenmiştir[27]. Burada üzerinde çalışılan yapıda ise yapı uzunluğu  $55a$  alınmış yapının bir kenarında iki sıra diğer kenarında beş sıra periyodik yapı yerleştirilmiştir. Oluşturulan yapı ile toplamda  $60\text{dB}$  bir iletim kaybı elde edilmiştir. İletim grafiğinin keskin düşüş noktası Şekil 3.4’de yakınlştırılmış olarak görülmektedir. Buradan görüldüğü üzere üzerinde çalışılan yapı  $4\text{nm}$  dalga boyu değişiminde  $30\text{dB}$  kayıp elde edilmiş,  $8\text{nm}$  dalga boyu değişiminde ise  $45\text{dB}$  oranında bir düşüş elde edilmiştir. Bulunan sonuçlar fabrikasyona bağlı olarak değişiklikler gösterebilirler ancak yapılan başka bir çalışmada küçük yasaklı bant bölgesi için yapılan 2 boyutlu FDTD hesaplamalarının deneysel sonuçlarla birebir uyum sağladığı gösterilmiştir[28].

Analizler sonucunda elde edilen verilere göre fotonik kristalin küçük yasaklı bant aralığı özelliğini kullanarak frekans seçimleri incelenmiştir. Bunun için öncelikle Şekil 3.5’te görüldüğü gibi dalganın kolaylıkla yapı dışına çıkabilmesi için yapının olukların olduğu bölümdeki fotonik kristal yapısı inceltilmiştir. İnceltme işlemi olukların yarıçaplarının değişiminin başladığı noktadan başlayarak fotonik kristalden periyodik üç sıra silinip iki sıra bırakılarak yapılmıştır. Yapının bir kenarı inceltildikten sonra küçük yasaklı bant aralığına gelen frekansların dışarıya taşabilmeleri için olukların yarıçaplarının hangi hızda değişmesi gerektiği üzerine çalışılmıştır. Yapılan çalışmalarda oluk yarıçaplarındaki  $0.01a$  değerinde artışın kaç  $a$  uzunluğunda gerçekleşmesi gerektiğini bulmak için yapının taşma kısmının uzunluğu  $5a$  ile  $40a$  arasında değiştirilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda oluk yarıçap değeri  $0.26a$  ile başlayarak yapı sonunda  $0.01a$  artışla  $0.27a$  olan yapı için taşma bölgesinin  $20a$  ve  $40a$  olduğu değerler için elde edilen grafikler Şekil 3.5(b)’de verilmiştir.





(a)

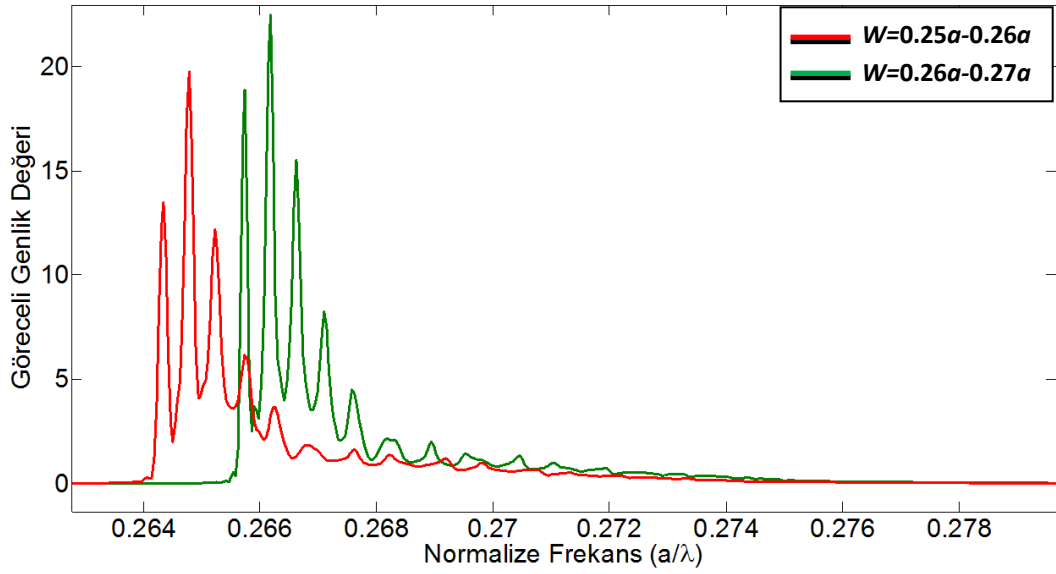


(b)

Şekil 3.5 (a)Oluşturulan yapıda oluk yarıçaplarının arttığı noktalar çizgi ile gösterilmiştir. Yapının inceltilen kısmında görülen çizgi ayrıca taşma bölgesinin hesaplama alanını da göstermektedir. (b)Farklı uzunluktaki taşma bölgelerinde frekansa göre taşan dalganın genlik grafikleri gösterilmektedir. Kaynak olarak 0.260 normalize frekansına sahip  $0.08a/\lambda$  bant genişliğinde gauss dalga gönderilmiştir.

Grafiklerin sonucunda  $40a$  uzunluğunda taşma bölgesinin frekansların ayrıştırılması için yeterli olduğu görülmüştür. Konu üzerine yapılan deneysel bir çalışmada  $300a$  uzunluğunda giriş kısmı genişliği  $w_1=4.1a \sqrt{3}/2$  çıkış kısmının genişliği ise  $w_2=3.9a \sqrt{3}/2$  olan eğimli bir yapı oluşturulmuştur[32]. Oluşturulan yapının  $40a$  uzunluğunda olan kısmında periyodik yapının kayma oranı karşılaştırma amaçlı olarak hesaplanmış ve  $0.02a$  olarak bulunmuştur. İki yapıda çalışılan dalga boyu mertebeleri de aynı düzeyde olduğu için karşılaştırma sonucunda üzerinde çalışılan yapının fabrikasyona uygun olduğu görülmüştür.

Kullanılan yapının iki farklı frekansı ayırt edebilme özelliğinin incelenmesi için oluk yarıçap değeri  $0.25a$  ile başlayıp  $0.26a$  ile biten ve  $0.26a$  ile başlayıp  $0.27a$  ile biten iki farklı yapı kullanılmıştır. Yapılara merkez frekansı küçük yasaklı bant aralığı bölgesinin orta noktasına karşılık gelen  $0.08a/\lambda$  bant genişliğinde Gauss dalgalar gönderilmiştir. Taşma bölgesi  $40a$  alınarak taşan dalgalar FDTD yöntemiyle hesaplanmış, elde edilen sonuçlar Şekil 3.6’da gösterilmiştir.

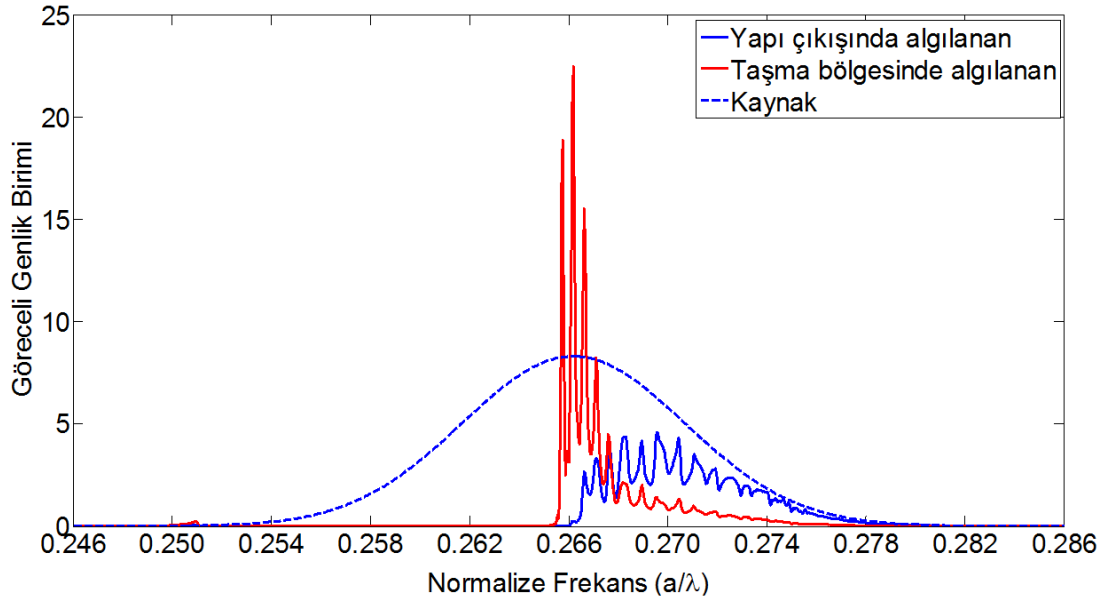


Şekil 3.6 Başlangıç oluk yarıçapları  $0.25a$  ve  $0.26a$  olan iki farklı yapının  $40a$  uzunluğundaki taşma bölgesinde frekansları süzmeleri gösterilmiştir.

Grafikten görüldüğü üzere  $0.265$  normalize frekansında  $0.25a-0.26a$  yapısında iletim olurken  $0.26a-0.27a$  yapısında iletim yok denecek seviyededir. Kırmızı ile yeşil iletim grafiklerinden yapılan hesaplamalar sonucunda  $0.264a/\lambda$  ile  $0.265a/\lambda$  arasında  $30\text{dB}$  bir fark olduğu görülmüştür. Bu durumda yapıya  $0.265$  normalize frekansına sahip bir dalga gönderildiğinde rahatlıkla süzülebildiği anlaşılmaktadır.

Küçük yasaklı bant aralıklarında modun dışarı taşması gönderilen dalganın modunun yüksek dereceli modlara dönüştürülerek hızının yavaşlatılması ve dağılımının arttırılmasıyla olmaktadır. Yapılan simülasyonlarda da bunun etkisi görülmektedir. Oluşturulan  $w0.26a-w0.27a$  dalga kılavuzuna  $0.266$  normalize frekansında gauss dalgası gönderilmiş taşma bölgesinden ve yapı sonundan çıkış frekanslarının

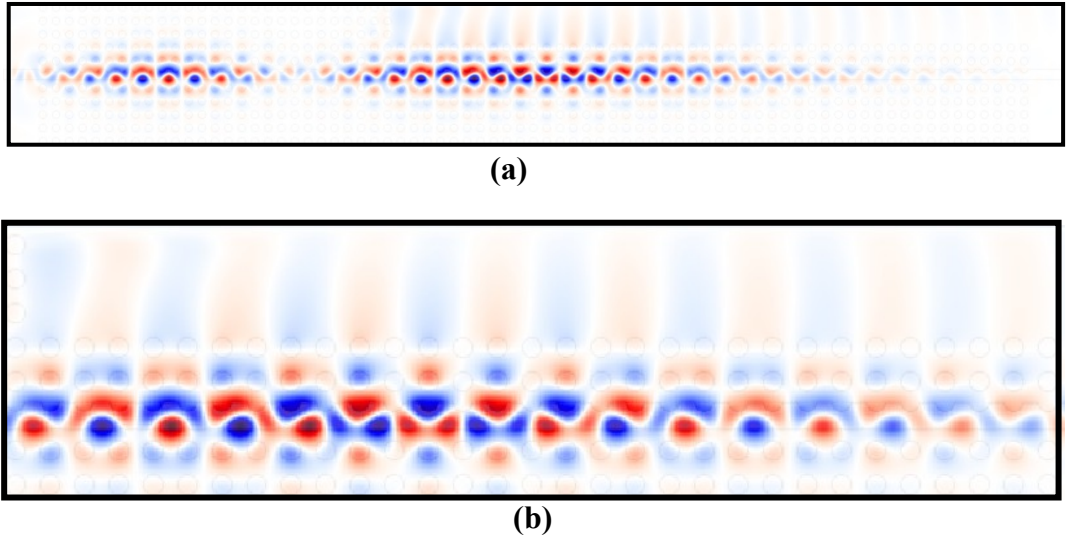
genlikleri hesaplanmıştır. Hesaplamalar sonucunda yapının küçük yasaklı bant aralığı bölgesinde modunun değişmesiyle hızı yavaşlamıştır. Yavaşlayan ışığın genliğinin artması beklenmektedir[15]. Çalışılan yapı da bu konsept ile uyum içerisindedir. Yapıya gönderilen dalganın küçük yasaklı bant aralığı frekansların taşma bölgesinde yapılan hesaplamalardan genliğinin arttığı görülmüş ve Şekil 3.7’de gösterilmiştir.



Şekil 3.7  $w0.26a-w0.27a$  dalga kılavuzuna gönderilen dalganın taşma bölgesinden ve yapı sonundan frekansa göre çıkış genlik değerleri verilmiştir.  $w0.26a$  ile  $w0.27a$  arasındaki bölgede küçük yasaklı bant aralığı bilgisine Şekil 3.3’den ulaşılmış ve 0.265 ile 0.267 arasında olduğu görülmüştür.

Yavaş ışık özelliğinden dolayı dalganın genliğinde artış olması taşma bölgesinden dışarıya çıkan dalganın algılanmasını da kolaylaştırmaktadır. Gönderilen dalganın çıkış bölgesinde algılanan kısmı ise şekilde görüldüğü gibi kaynaktan gönderilen gauss dalgayla uyum içerisindedir. Küçük yasaklı bant bölgesi olan 0.265 ile 0.267 normalize frekans aralığının bitiş bölgesinden itibaren yüksek dereceli modlara dönüşüm olmadığı için gönderilen dalga yavaşlamamakta ve genliği de değişmemektedir. Bunun sonucu olarak normalize frekansın 0.267 olduğu değerden itibaren taşma bölgesinde algılanan ve yapı çıkış bölgesinde algılanan genlik değerleri toplandığında gauss dalganın genliğine yaklaşık olarak eşit olmaktadır. Bu da sonuçların tutarlılığını doğrulamaktadır.

Şekil 3.7’de taşma bölgesinde dalganın çıkış değerleri gösterilmiş olan yapı ve aynı dalga parametreleriyle yapıya gauss dalga gönderilmiş ve yapı içerisinde ilerleyişi izlenmiştir. Gönderilen dalganın beklendiği gibi yapı sonuna iletilmediği ve taşma bölgesinden taşıdığı görülmüş, Şekil 3.8’de gösterilmiştir.

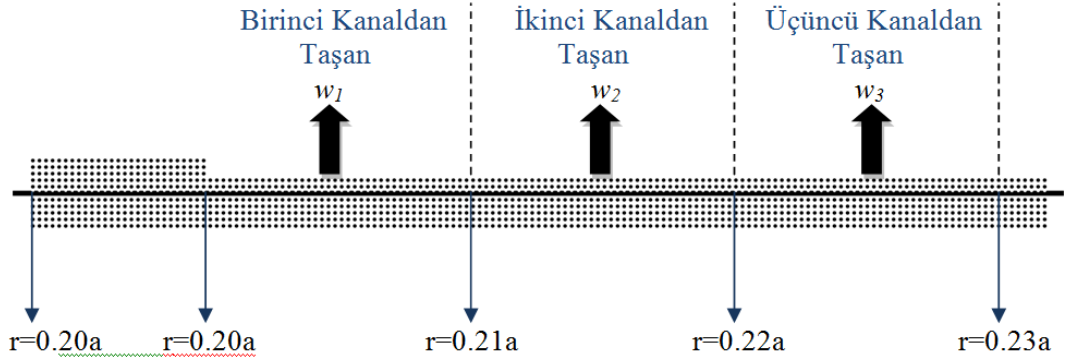


Şekil 3.8 (a)  $r0.26a-r0.27a$  yapısına gönderilen merkez frekansı  $a/\lambda=0.2660$  bant genişliği  $\Delta a/\Delta\lambda=0.0020$  olan dalganın yapı içerisinde ilerlemesi ve taşma bölgesinden taşması (b) taşma bölgesinin yakından görünümü.

### 3.3 Sonuç

Kare örgü yapısındaki fotonik kristale tek tarafı oluklu dielektrik levha eklenmesiyle oluşturulan yeni yapıya önemli özellikler kazandırılmıştır. Yapının önemli özelliklerinden biri küçük yasaklı bant aralığında iletim bandındaki ani düşüştür. Şekil 3.4’de görüldüğü gibi 4 nm dalga boyu değişiminde iletimde 30 dB düşüş görülmektedir. Bu oranda bir düşüşün olması yapının 4 nm dalga boyu farka sahip iki dalgayı birbirinden ayırabileceğini göstermektedir. Bu özelliği sayesinde oluşturulan yapı biyosensör olarak kullanılabilir hassas algılayıcılar ve optik filtre yapılmasına imkan sağlamaktadır. Elde edilen bu yükseklikte bir düşüşe son yapılan çalışmalarda rastlanmıştır ve öneminden bahsedilmiştir[27]. Yapının bir diğer özelliği

değişken oluk yarıçapı değerine göre farklı frekansları birbirinden ayırabilmesi ve farklı noktalardan çıkarabilmesidir. Farklı frekansların farklı noktalardan çıkması biyosensör olarak farklı frekansların çıkış noktalarına koyulan farklı materyalleri veya benzer materyallerin farklı özelliklerini ayırt etmekte kullanılabilir. Bu özelliğe sahip yapılar genel olarak optik haberleşmede DEMUX olarak kullanılmak üzere tasarlanmıştır[32]. Üzerinde çalışılan yapı da farklı oluk yarıçapı değerleri için farklı frekans aralıklarını ayırabilmesi özelliğinden dolayı DEMUX olarak kullanılabilir durumdadır. DEMUX olarak kullanılmak üzere tasarlanmış şematik bir yapı Şekil 3.9’da gösterilmiştir.



Şekil 3.9 Yapıya gönderilen  $w_1, w_2$  ve  $w_3$  frekans aralıklarına sahip dalganın yapının farklı oluk yarıçapı değerlerine sahip yerlerinden çıkışı. Gönderilen dalgaların frekans aralıkları sırasıyla  $0.257 < w_1 < 0.2585$ ,  $0.2585 < w_2 < 0.2595$  ve  $0.2595 < w_3 < 0.2605$  olarak belirlenmiştir. Şekil 3.3 de görüldüğü üzere her bir frekansın çıkış noktaları farklı oluk yarıçapındaki yapılara karşılık gelmektedir.

Şekilde üç farklı dalganın farklı bölgelerden çıkışı gösterilmiştir. Yapıya gönderilen frekans aralıkları Şekil 3.3 üzerine konulursa  $w_1$  frekans aralığının  $r=0.22a$  oluk yarıçapına sahip yapı içerisinde ilerleyemeyeceği görülür. Aynı şekilde  $w_2$  frekans aralığına sahip dalganın  $r=0.22a$  ve  $w_3$  frekans aralığına sahip dalganın da  $r=0.23a$  oluk yarıçapına sahip yapı içerisinde ilerleyemeyeceği görülmektedir. Şekil 3.9’de şematik olarak gösterilen durumda yapı dışarısına çıkan frekans aralığı sayısı, analizleri yapılan  $0.15a \leq r \leq 0.35a$  aralığındaki tüm farklı  $r$  değerleri için arttırılabilir. Bunun sonucunda 21 farklı frekans aralığı benzer yapı kullanılarak ayrıştırılabilir.

Birçok aralığı ayırt edebilmesi, geniş bant aralığına sahip olması, iletim bandında keskin düşüşün olması ve geniş bant aralığına sahip olması açısından oluşturulan yapı birçok avantajlara sahiptir ve özgündür.

## BÖLÜM 4

### 4. FOTONİK KRİSTAL DALGA KILAVUZLARINDA GRUP İNDEKS İLE BANT GENİŞLİĞİ ARASINDAKİ İLİŞKİ

#### 4.1. Giriş

Işığın hızının yavaşlatılması hızlı haberleşmeye engel gibi görünse de bazı koşullarda avantajlı bir duruma yol açmaktadır. Işığın hızının kontrollü olarak düşürülmesi veya istenilen seviyeye getirilmesi ışığın maddeyle olan etkileşimini arttırdığı ve yavaş ışığı uzaysal düzlemde sıkıştırdığı için lineer olmayan optik, optik hafıza ve optik gecikme hatları gibi alanlarda avantaj olarak kullanılabilir[38-43]. Bu özelliklerinden dolayı yavaş ışık kavramı birçok araştırmacı tarafından ilgi odağı olmuştur. Yavaş ışık konusunda en ilgi çekici çalışmalardan biri yavaş ışığın hızının 17m/s gibi çok düşük bir hıza düşürülmesidir[44]. Yapılan çalışmadaki iki önemli dezavantaj yavaşlatılan ışığın bant genişliğinin çok küçük olması ve ışığın yavaşlatılması için özel ortamların gerekliliğidir[45].

Işığı yavaşlatmanın farklı bir yolu da dielektrik materyalleri kullanmaktır. Fotonik kristaller periyodik dielektrik yapılardan oluşturulmuş ışığın hızı, polarizasyonu, mod profili gibi özelliklerinin değiştirilebildiği optik yapılardır. Bu periyodik yapılar kullanılarak ışığın hızı henüz 17m/s gibi rekor bir hıza düşürülemez de yüksek oranlarda azaltılabilmektedir. Işığın hızının fotonik kristaller kullanılarak azaltılmasının güzel yanı kolaylıkla şekillendirilebilmeleri ve kompleks yapılara sahip olmamalarıdır. Fotonik kristal yapılarda yavaş ışık yapının bant diyagramında düz bantlara sahip olmasıyla elde edilmektedir. Ancak yapı içerisinde belli bir frekansın hızının yavaşlatılmasının yanında yapı içerisinde ilerlerken dağılmaması da gerekmektedir. Bunun için çalışılan frekansın ışık çizgisinin altında olması ve Brillouin alanlarının,  $(k_x, k_y) = (0, 0)2\pi/a$  veya  $(0, 0.5)2\pi/a$ , kenarlarında olmaması gerekmektedir. Bu bölgelerde olan dalga ikinci dereceden bir davranış içinde olmasından dolayı yüksek yapı içi dağılıma ve çok küçük bant genişliğine sahiptir.

Ortaya çıkan bu sorunu çözerek yavaş ışık elde etmenin yollarında biriside bant diyagramında sabit eğime sahip düz bantları elde etmektir.

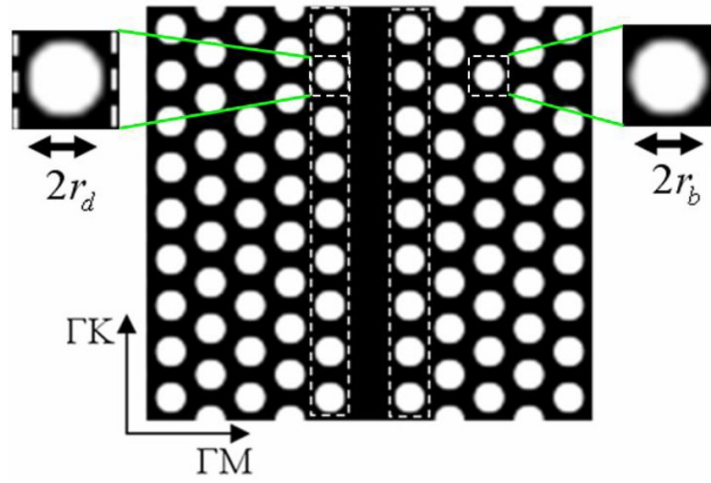
Bu çalışmada üçgen örgü yapısına sahip fotonik kristal kullanılarak büyük ve sabit grup indekse sahip yüksek bant genişliği olan modlar elde edilmiştir. Önceki çalışmalarda grup indeks ile bant genişliği arasındaki ilişkiye değinilmiş ancak parabolik bir bağıntı olduğu belirtilmemiştir. Yapılan çalışmada üçgen örgü yapısındaki fotonik kristal ortasındaki dielektriğin ortasından bir sıra boyunca oluklar açılmayarak dalga kılavuzu oluşturulmuştur. Oluşturulan dalga kılavuzunun komşuluğunda bulunan periyodik hava deliklerinin yarıçapları arttırılmış geri kalan hava deliklerinin yarıçap değerleri sabit bırakılmıştır. Farklı yarıçap değerleri için bant diyagramları çıkarılmış, bant genişliği ve grup indeks( $n_g$ ) değerlerinin yarıçap değişimine göre grafikleri çizdirilmiş, grup indeks değeri ile bant genişliğinin çarpım değerinin nasıl değiştiği gözlenmiştir. Yapı parametrelerinin belli bir değeri için yapıya gauss dalga gönderilmiş ve yapı içerisinde ilerleyişi izlenmiştir. Son olarak yapıda yarıçap değerleri değiştirilmeyen hava deliklerinin de yarıçap değerleri değiştirilerek grup indeks değeri ile bant genişliğinin çarpım değerinin değişimi incelenmiştir. Yapının analizleri yapılırken frekans düzleminde PWEM, zaman düzleminde ise FDTD kullanılmıştır.

#### **4.2. Yapının Oluşturulması ve Analizleri**

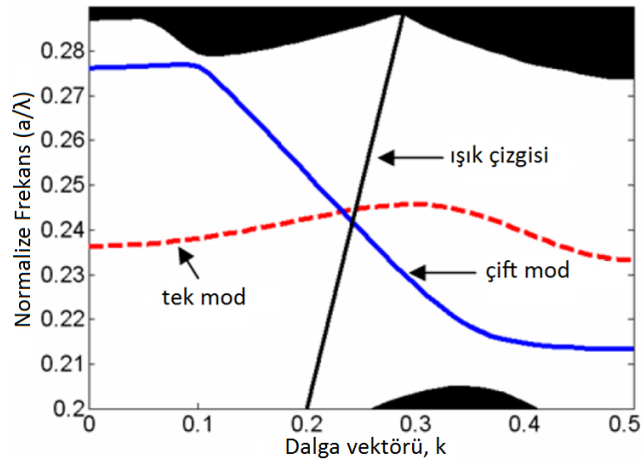
Üçgen örgü yapısına sahip fotonik kristalin kullanıldığı bu çalışmada yapı dielektrik zemin üzerine hava boşlukları açılarak oluşturulmuştur. Yapı ortasında bir sıra boyunca hava boşluğu açılmayarak dalga kılavuzu görevi görmesi sağlanmıştır. Oluşturulan dalga kılavuzu komşuluğundaki hava boşluklarının yarıçapları  $0.20a$  ile  $0.4750a$  arasında değiştirilerek yapının karakteristiğinde meydana getirdiği değişiklikler gözlenmiştir. Şekil 4.1'de yapının tüm hava boşlukları  $0.3a$  değerinde iken yapının oluşturulmuş görünümünü ve Şekil 4.2 oluşturulan yapının TE modlarının bant diyagramını göstermektedir. Yapının bant diyagramında kesikli çizgilerle gösterilen mod tek mod profiline sahip modu, sürekli çizgilerde çift mod profiline sahip modu göstermektedir.



Yapı dışı dağılımdan etkilenmemek için çalışma bölgesi olarak ışık çizgisinin altında kalan bölge seçilmiştir. Bu bölge dalga vektörünün  $k=0.25(2\pi/a)$  değerinden bant kenarına kadar olan bölgeye karşılık gelmektedir. Üzerinde çalışılan mod olan çift modun bu bölgede kalan kısmında Şekil 4.2’de görüldüğü gibi sabit eğime sahip düz bir bölge bulunmaktadır. Çift modun bu özelliğinden dolayı sabit grup indeks değeri ve çok düşük grup hızı dağılımı elde edilebilmektedir.

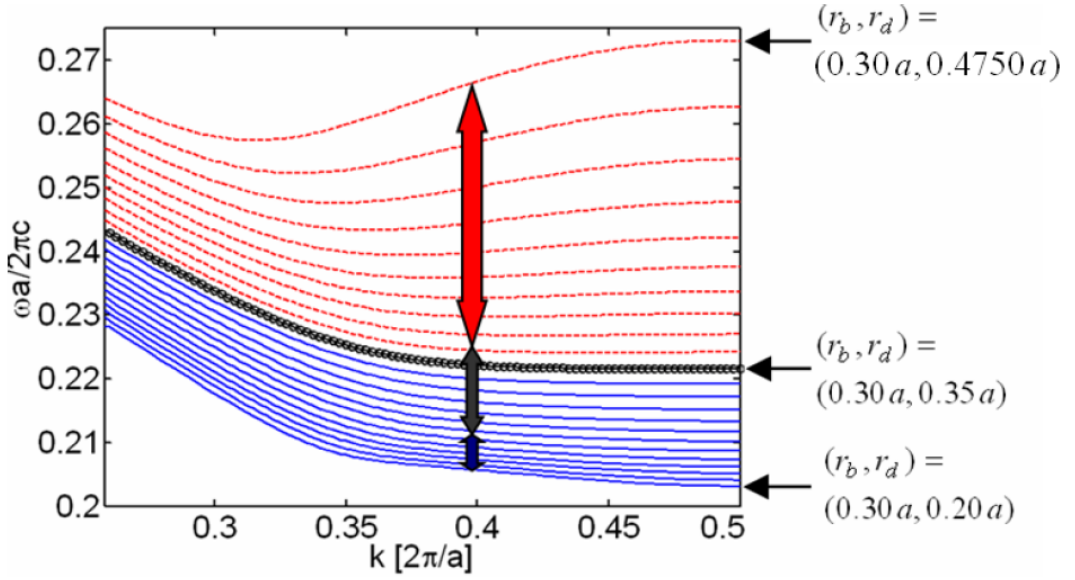


Şekil 4.1 Yapının tüm hava boşlukları  $0.3a$  yarıçap değerine sahip olduğu durumda görünümü,  $r_b$  yarıçapı değiştirilmeyen hava boşlukları,  $r_d$  yarıçapı değiştirilen hava boşluklarını göstermektedir[46].



Şekil 4.2 Şekil 4.1’de gösterilen yapının bant diyagramı. Kesikli çizgi tek, düz çizgi çift mod profiline sahip modu göstermektedir.

Yapıya gönderilen dalganın alan dağılımı dalga kılavuzu komşuluğunda bulunan periyodik yapıdan ikinci ve üçüncü sırada bulunan periyodik yapılara göre daha fazla etkilenmektedir. Bu nedenden dolayı bu çalışmada dalga kılavuzu komşuluğundaki hava boşluklarının yarıçap değerleri dalga kılavuzu boyunca simetrik olarak değiştirilmiştir. Her bir yarıçap değeri için bant diyagramları çıkarılmış ve ilgili bandın karakteristiği incelenmiştir. Yapılan çalışma sonucunda bantların değişimi Şekil 4.3'te gösterilmiştir.

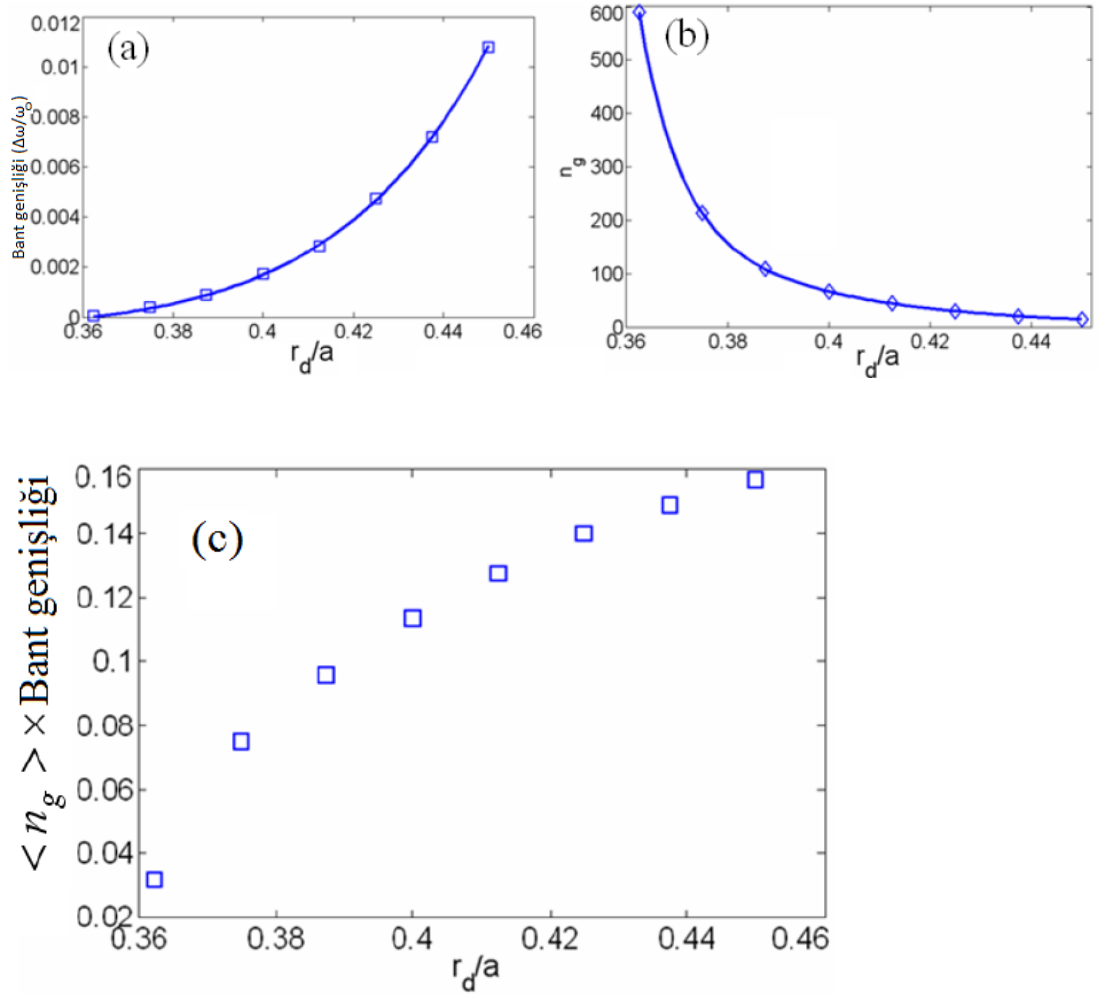


Şekil 4.3 Dalga kılavuzu komşuluğundaki hava boşluklarının yarıçap değerlerinin,  $r_b$  değerleri  $0.3a$  değerinde sabitken,  $0.20a$  ile  $0.4750a$  arasında değiştirilmesiyle ilgili bantın değişimi.

Elde edilen bantın değişim diyagramında  $r_d$  değerleri  $0.0125a$  adımlarla artırılmıştır. Yapılan taramalar sonucunda dalga kılavuzu komşuluğunda bulunan hava boşluklarının yarıçaplarının  $0.36a$  ve üst değerleri için bant diyagramında düz bant bölgesinin oluştuğu gözlenmiştir. Bant diyagramının ikinci düz bant bölgesi ise  $r_d$  değerinin  $0.20a$  etrafındaki değerlerde ortaya çıkmaktadır. Grafik üzerinde gösterilen iki uçlu oklar bant diyagramlarının ayrıldığı bölümleri göstermektedir. En üstte en altta olan iki uçlu ok yavaş ışığın elde edilebileceği bölgeleri göstermektedir. Ortada bulunan ok ise sabit eğime sahip olmayan dağılımlı bölgeyi göstermektedir. Değiştirilen  $r_d$  değerleriyle düz bant bölgesinin frekans düzleminde kaydığı

görülmektedir. Bu kayma sayesinde farklı frekanslar aynı grup indekse sahip olabilmekte ve geniş frekans aralığında sinyaller yavaşlatılabilmektedir.

Grup indeks değeriyle bant genişliği arasındaki ilişkiyi incelemek için  $r_b$  değerleri 0.30a olarak sabit tutulmuş  $r_d$  değerinin değişimine göre bant genişliği ile grup indeks değerlerinin değişimleri gözlenmiştir. Elde edilen sonuçlarla bant genişliği ile grup indeks değerinin çarpımının nasıl değiştiği görülmüş Şekil 4.4'te gösterilmiştir.

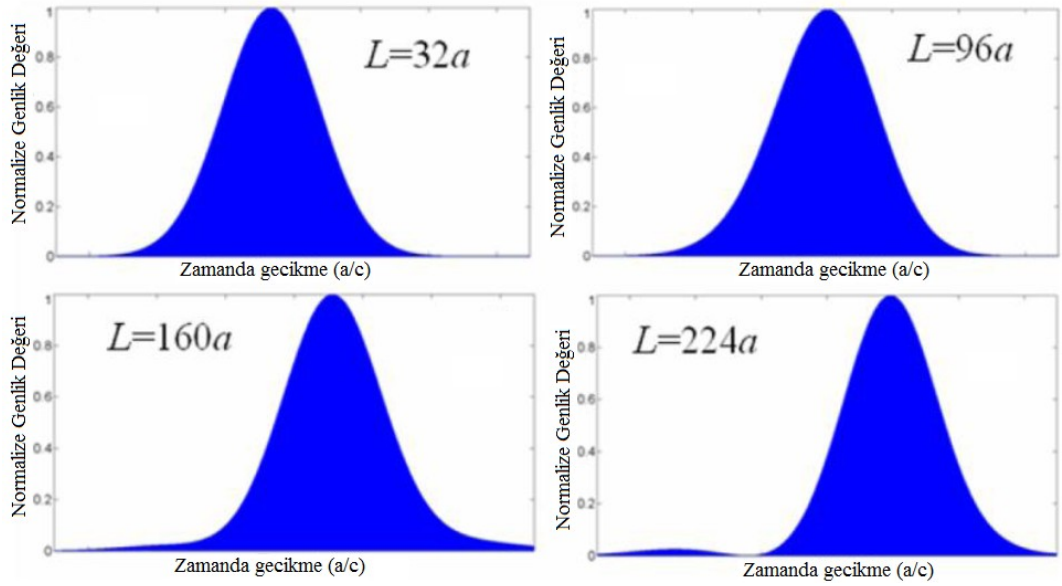


Şekil 4.4 (a) Dalga kılavuzu kenarında bulunan hava boşluklarının yarıçapının değişimine göre (a) bant genişliği (b) grup indeks (c) grup indeks ile bant genişliğinin çarpımı grafikleri.

Şekilden görüldüğü gibi grup indeks değeri bant genişliği ile ters orantılı ve  $r_d$  hava boşluğu yarıçap değerlerinin 0.3625a değerinden 0.45a değerine kadar artırılmasıyla

grup indeks ile bant genişliği çarpım değeri yaklaşık 5 kat artmıştır. Grafiklerden de görüleceği gibi bant genişliğinin değişen yarıçap değerine göre artış oranı, grup indeks değerinin düşüş oranından yüksektir. Aralarındaki bu bağıntıdan dolayı bu iki değer çarpım sonucunun yarıçap değerlerinin artmasıyla yükseldiği görülmüştür.

Oluşturulan yapının yavaş ışık uygulamalarında kullanılabilirliğini denetlemek açısından  $300a$  uzunluğunda yapının içerisine belli  $L$  aralıklarla algılama noktaları konulmuştur. Dalga kılavuzu kenarındaki hava boşluklarının yarıçap değerleri  $0.4375a$  alınmıştır. Merkez frekansı  $a/\lambda=0.2452$  normalize bant genişliği  $0.001$  olan gauss dalga yapıya gönderilmiş, algılama noktalarında sonuçlara bakılmıştır. Gönderilen dalganın yapı içerisindeki algılama noktalarında zaman düzleminde görünümü Şekil 4.5'te gösterilmiştir.

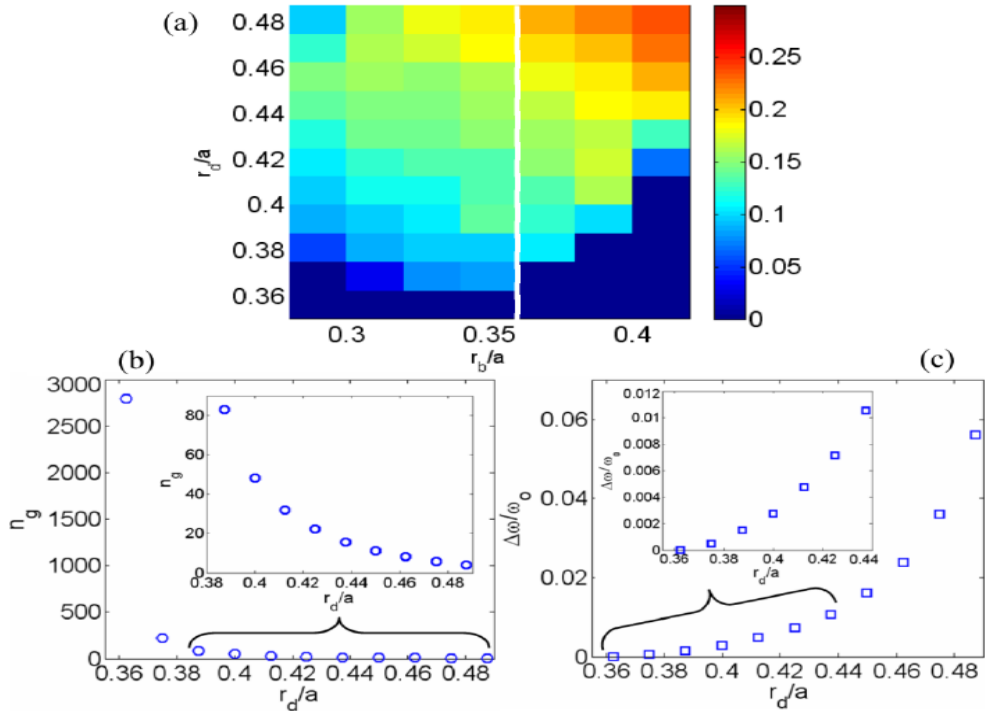


Şekil 4.5 Oluşturulmuş  $300a$  uzunluğunda yapıya gönderilen merkez frekansı  $a/\lambda=0.2452$  normalize bant genişliği  $0.001$  değerine sahip gauss dalganın yapıya gönderilmesiyle yapı başından itibaren  $32a, 96a, 160a$  ve  $224a$  uzaklıklarda algılanan dalga şekilleri gösterilmiştir.

Grup indeks hesaplamaları için her bir algılama noktasında zaman düzleminde algılanan gauss dalganın tepe noktası referans alınmıştır. İki tepe noktası arasındaki zaman farkının noktalar arası uzaklığa bölünmesiyle grup indeks değeri

hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucunda grup indeks değeri yaklaşık olarak 22 bulunmuştur. Elde edilen sonuçlar dalganın yapı içerisinde yavaşladığını ve uzun mesafeler boyunca grup hızı dağılımından etkilenmeden ilerleyebildiğini göstermektedir.

Yüksek grup indeks ile bant genişliği çarpım değerine sahip noktada yapılan çalışmada olumlu sonuçlar elde edildikten sonra yapılan diğer bir çalışmada, grup indeks değeriyle bant genişliğinin çarpım değerinin sonucu  $r_b$  ve  $r_d$  yarıçap değerleri değiştirilerek incelenmiştir. Zemin yarıçap değerleri olan  $r_b$  değerleri dalga kılavuzu komşuluğundaki hava boşlukları  $r_d$  ile aynı aralıkta değiştirilmiş ve grup indeks ile bant genişliğinin çarpım sonucunun haritası çıkarılmıştır. Oluşturulan harita Şekil 4.6(a) da gösterilmiştir. Şekil 4.6(b) ve (c) grafiklerinde  $r_b$  değeri  $0.36a$  olarak sabit alınmış, grup indeksin ve bant genişliğinin  $r_d$  yarıçap değerlerine göre değişimi gösterilmiştir.



Şekil 4.6 (a) Hava boşlukları  $r_d$  ve  $r_b$  değişimleri sonucunda elde edilmiş grup indeks ile bant genişliği çarpım haritası verilmiştir. Zemin yarıçapları  $r_b=0.36a$  değerinde sabit tutulduğunda  $r_d$  değerlerinin değişimine göre (b) grup indeks (c) bant genişliği değişim grafikleri gösterilmiştir.

Grup indeks değeri ile bant genişliğinin Şekil 4.6 ile gösterilen çarpım haritasında çarpım değeri haritanın sağ üst köşesinde  $r_b$  ve  $r_d$  değerlerinin sırasıyla  $0.42a$  ve  $0.48a$  olduğunda  $0.3$  değerine kadar yükselmektedir. Şekil 4.6 (b) ve (c) grafiklerinde sabit  $r_b$  için üzerinde çalışılan grup indeks ve bant genişliği değerlerinin değişimi gösterilmiştir. Değişimlerin görülebilmesi için grafiklerin belirli bölgeleri yakınlştırılarak gösterilmiştir. Yavaş ışık kavramı çalışılan yapılarda yüksek grup indeks değeri elde etmek bant diyagramında daha düz bir bant elde etmekle olmaktadır. Bunun sonucunda bant genişliği düşmektedir. Bu nedenden dolayı yüksek grup indeks ile bant genişliği çarpım değeri elde etmek yavaş ışık çalışmalarında önemli bir göstergedir.

### 4.3. Sonuç

Yapılan çalışmada üçgen örgü fotonik kristal yapısı kullanılarak grup indeks ve bant genişliği değerleri yapının parametreleri değiştirilerek ayarlanmıştır. Grup indeks ile bant genişliği arasındaki bağıntı incelenmiş ve parabolik bir bağıntı oluğu görülmüştür. Yapılan detaylı incelemede çarpım değerinin  $0.3$  değerine kadar ulaştığı belirlenmiştir. Zaman düzleminde yapılan çalışmalarda grup indeks değerinin  $22$  olduğu görülmüştür. Yapıya gönderilen dalganın  $300a$  gibi uzun bir mesafe boyunca grup hızı dağılımından etkilenmediği gözlenmiştir. Yapılan çalışmayla yapı parametreleri taranarak yüksek grup indeks, düşük grup hızı dağılım ve yüksek bant genişliğine sahip yapıların oluşturulması için izlenebilecek bir yol gösterilmiştir.

## BÖLÜM 5

### 5. SONUÇ

#### 5.1 Sonuçlar

Yapılan tez çalışmasında 2 boyutlu kare ve üçgen örgü fotonik kristaller kullanılarak optik haberleşmede DEMUX, optik hafıza, optik filtre, tıp alanında biyosensör olarak kullanılabilen özgün fotonik kristal yapıları sunulmuştur.

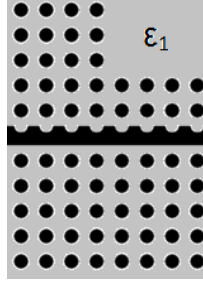
Birinci kısımda kare örgü fotonik kristal ortasına simetrik oluklu dielektrik levha yerleştirilmiştir. Standart hava boşluklu kare örgü fotonik kristal dalga kılavuzu yapısının bant diyagramının yasaklı bant bölgesinde sadece çift mod ortaya çıkmaktadır. Ortaya çıkan bu çift mod ışık çizgisinin altında olduğu için düzlem dışı dağılımdan dolayı kullanımı dezavantajlıdır. Yapıya eklenen dielektrik levha ile bant diyagramının yasaklı bant bölgesinde hem çift hem tek modlar ortaya çıkmıştır. Ortaya çıkan modlar ışık çizgisinin altında olmasından dolayı düzlem dışı dağılımdan etkilenmemekte ve yapı içerisinde uzun mesafeler boyunca ilerleyebilmektedir. Ortaya çıkan tek mod frekans ekseninde dönüm noktasına sahiptir. Bu özelliği dalga vektörü-grup indeks grafiğinde dalga vektöründe keskin rezonans oluşturmaktadır. Ortaya çıkan bu keskin rezonans özelliği kullanılarak yapıya keskin rezonansa karşılık gelen frekansta gönderilen dalga yavaşlatılmış ve yerleştirilmiştir. Ayrıca olukların dielektrik levhanın bir tarafında bulunanların yarıçapları değiştirilmiştir. Ortaya çıkan küçük yasaklı bant aralığı ve asimetric yapı özelliği ile çift modan tek moda mod dönüşümü sağlanmıştır. Dönüşen dalganın yapı içerisinde yerleşmesi izlenmiş ve Q değeri hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucunda Q değeri 32000 bulunmuştur. Yapıda ışığın yerleşmesiyle gönderilen dalganın genliğinin artması da incelenmiştir. Yapıya keskin rezonans frekansında tek mod profilinde dalga gönderilmiş genlik artışı gözlenmiştir. Genlik haritası 3Boyutlu olarak gösterilmiştir. Oluşturulan yapıyla yapılan incelemeler sonucu ortaya çıkan özellikleriyle optik haberleşme alanında, optik hafıza ve optik gecikme hatları gibi geniş bir alanda kullanıma uygundur. Yapı küçük yasaklı bant aralığı ve asimetric

özelliğiyle mod dönüşümünü sağlaması, dönüşen modu yerelleştirmesi ve bunları tek bir yapı içerisinde yapması açısından özgün ve yeni bir yapıdır.

İkinci kısımda kare örgü fotonik kristal yapısı içerisine tek tarafı oluklu asimetrik dielektrik levha yerleştirilmiştir. Yapıya yapılan eklemeye küçük yasaklı bant aralığı elde edilmiştir. Yapılan oluk yarıçapı taramasında oluk yarıçapı  $0.01a$  arttırılmış,  $0.15a$  ile  $0.35a$  arasındaki değerlerinde kullanılabilir küçük yasaklı bant aralıkları elde edilmiştir. Ortaya çıkan küçük yasaklı bant aralıkları iletim grafiğinde  $4\text{nm}$  dalga boyunda  $30\text{dB}$  düşüşe sahip olmasıyla iki farklı dalga boyunu rahatça filtreleyebilecek özellikte olmasından dolayı optik filtre olarak kullanılmaya uygundur. Tasarlanan yapıyla iki farklı frekans aralığını hangi uzunlukta taşma bölgesiyle ayırdığı incelenmiştir. Oluk yarıçapının  $0.01a$  artışının ne kadar uzunlukta olması gerektiği üzerine taşma bölgesinde dışarı taşan dalga hesaplanmış belirlenen frekans aralığının süzülüp süzülemediğine bakılmıştır. Yapılan hesaplamalarda  $40a$  uzunluğunun ayırıştırma için yeterli olduğu bulunmuştur. Taşma uzunluğunun  $40a$  belirlenmesiyle oluşturulan yapıya farklı frekanslar gönderilerek taşma bölgesinden çıkışlar incelenmiş ve iki frekansın başarılı bir şekilde ayrımının yapılabildiği görülmüştür. Küçük yasaklı bant aralığının özelliği olan kıvrım noktasında modlar arası çapraz geçiş ile yüksek dereceli moda dönüştürülmesi ve dönüştürülen modun hızının yavaşlaması yapılan işlemlerde görülmüştür. Dönüşen modun yapı içi dağılımı arttığı için yapı dışına taşmış ve taşma bölgesinde algılanan dalga yavaşlayan ışığın genliğinin artması özelliğine de uyum sağlayarak genliğini arttırdığı görülmüştür. Son olarak  $w0.26a-w0.27a$  yapısına gönderilen merkez frekansı  $a/\lambda=0.2660$  bant genişliği  $\Delta a/\Delta \lambda=0.0020$  olan dalganın yapı içerisinde ilerlemesi ve taşma bölgesinden taşması zaman düzleminde izlenmiş ve yapının dışarı taşması gözlenmiştir. Elde edilen sonuçlarla oluşturulan yapı DEMUX olarak kullanılmak üzere şematik olarak tasarlanmıştır. Literatürde çalışılan yapılara göre ışık çizgisinin altında olması,  $40a$  gibi kısa bir aralıkta dalgayı dışarı çıkarabilmesi, yüksek bant genişliğine sahip olması, iletim grafiğinde keskin düşüşe sahip olması gibi özelliklerinden dolayı üzerinde çalışılan yapı birçok avantaja sahiptir.



Oluşturulan yapının hava zemini Şekil 5.1 ile gösterildiği gibi farklı dielektrik sabitine sahip maddelerle doldurularak yapının biyosensör olarak kullanılıp kullanılmayacağı analiz edilmiştir.



Şekil 5.1  $\epsilon_1$  dielektrik sabitli maddenin hava zemini üzerine doldurulmasıyla biyosensör olarak kullanılmak için tasarlanmış yapı.

Oluşturulan yeni yapıda oluk yarıçap değerinin değişimiyle yapının bant diyagramında küçük yasaklı bant aralığını belirleyen üst bandın kayması incelenmiştir. Yapının farklı yarıçap değerleri için farklı dielektrik sabiti bölgelerine duyarlı hale geldiği görülmüştür. Oluk yarıçap değeri  $r=0.25a$  alındığında yapının dielektrik sabitinin 0.02 birimlik değişikliklerinde üst bandın yaklaşık 6 nm kaydığı görülmüştür. Bu özelliğinden dolayı oluşturulan yapı zeminin dielektrik sabiti değiştirilerek biyosensör olarak kullanılabilir özelliktedir. DEMUX olarak düzenlenen Şekil 3.9 ile gösterilen yapı oluk yarıçapları gerekli değerlere ayarlanarak bir sıvı ya da madde içerisindeki birçok parametreyi aynı anda tespit edebilmek için de kullanılabilir. Yapının dielektrik sabitine duyarlı olmasından dolayı gerekli parametre ayarları yapıldıktan sonra biyosensör uygulamalarında da kullanılabileceği görülmüştür.

Üçüncü kısımda üçgen örgü yapısı üzerinde yavaş ışık ve grup indeks ile bant genişliğinin çarpım değerinin üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Oluşturulan yapıda dalga kılavuzu komşuluğundaki hava boşluklarının yarıçapları değiştirilmiş ve kullanılabilir, yüksek grup indeksi, düşük grup hızı dağılımı ve yüksek bant genişliğine sahip yapı elde etmek için bir yol gösterilmiştir. Yapılan çalışmada kullanışlı yavaş ışığın nasıl elde edileceği yapısal parametre taramalarıyla

gösterilmiş, grup indeks ile bant genişliğinin çarpım değeri 0.30 değerine kadar yükseltilmiştir.

Yapılan çalışmalarla ışığı kendi içinde mod dönüşümünü sağlayarak yerelleştiren, küçük yasaklı bant aralığı özelliğini kullanarak hassas algılayıcı tasarımlarına imkân veren özgün yapı çalışması ve yavaş ışık elde etmek için izlenebilecek bir yol gösteren farklı bir çalışmayla, çalışılan alanlara yenilikler getirmesi ve özgün biyosensör tasarımı yapılması açısından tez amacına ulaşmıştır.

## 5.2 Gelecekte Yapılabilecek Çalışmalar

Bölüm 2’de yapılan ışığın modunun değiştirilmesi ve yerelleşmesi çalışmasında oluşturulan yapı farklı uygulamalar için kullanılabilirliğine bakılabilir. Yapı içerisinde belli bir frekansı yerelleşmesine içinde bulunan hava zemini değiştirilerek ortamın etkisi incelenebilir. Bu şekilde oluşturulan yapı etrafında bulunan ortamı algılayan ya da bulunduğu ortamın dielektrik katsayısı gibi değerleri algılanabilir. Yapı içerisinde yerleşen dalgaın genliği 30 kat gibi yüksek bir oranda arttığı için bu değer ölçülerek yapı içi bozuklukların bu değere etkisi incelenebilir. Hesaplamalar sonucunda elde edilmiş Q değerini arttırmak için yapı giriş ve çıkış noktalarında bulunan dielektrik çubukların yarıçap değerleri değiştirilerek Q değerine etkisi incelenebilir. Yapının asimetrik kısmı kullanılarak çift moddan tek moda dönüşüm yapılmıştır. Bu dönüşümün tersinin (tek moddan çift moda dönüşüm) olması için yarıçap değerleri değiştirilebilir. Yerleşen dalgaın belli bir yönde çıkışı sağlanarak oluşturulan yapı Q değerine bağlı olarak yavaş ışık uygulamalarında kullanılabilir. Konuyla ilgili son olarak  $w=0.7a$  ve  $w=0.9a$  değerlerinde elde edilen kırım noktalarında yapının aynı özellikleri çıkartılabilir.

Bölüm 3’de yapılan küçük yasaklı bant özelliği kullanılarak frekans ayrışması çalışmasında yapının daha kullanışlı hale getirilmesi için çalışmalar yapılabilir. Yapının iletim bandındaki keskin düşüşünü arttırmak için yapı kenarlarında bulunan dielektrik çubuk sayısı artırılabilir. İletim bandının keskin düşüşünü arttırmak daha yakın iki dalga boyunu ayırt edebilmeye yarayacağı için önemli bir gelişme olacaktır.

Dielektrik levha üzerinde yarıçapları arttırılan olukların yarıçapları sürekli olarak değil dereceli olarak ( $10a$  uzunluğunda  $0.0025a$ ) arttırılarak dalga çıkışına olan etkisi incelenebilir. Uzun bir yapı oluşturularak DEMUX tasarımı simülasyon ortamında çalıştırılabilir ve yapının frekans ayrıştırma özelliği optik haberleşme uygulamalarında kullanılabilirliği açısından incelenebilir. Dalganın dışarı taşma bölgesinde dalga toplanabilir ve farklı frekanslar taşınabilir. Bölüm 2’de gösterilen yerelleşme yapısı taşma bölgesine uyumlu bir şekilde eklenirse ve küçük yasaklı bant aralığı yerelleşme frekansına gelecek şekilde oluk yarıçap değeri ayarlanırsa iki yapı birbiriyle bütünleşmiş şekilde hem dalgayı süzebilir hem de süzülen dalgayı yerelleştirebilir. Oluşturulan yeni yapıyla ayrıştırılan ve yerelleştirilen frekanslar daha hassas algılamalar için kullanılabilir.

Oluşturulan yapıların iyileştirilmesi için birçok araştırmanın daha yapılması gerekmektedir. Böylelikle elde edilecek sonuçlarla yapılar uygulama alanları açısından .

## REFERANSLAR

- [1] Lord Rayleigh. *Phil. Mag.* S.5, 24(147), 145-59 (Aug. 1887).
- [2] E. Yablonovitch, *Phys. Rev. Lett.* 58, 2059 (1987).
- [3] Igor A. Sukhoivanov and Igor V. Guryev, *Photonic Crystals Physics and Practical Modeling*, Springer Press, 2009
- [4] M. Notomi, "Manipulating Light by Photonic Crystals", *NTT Technical Review* Vol. 7, No.9, 2009.
- [5] Vukusic, P., Sambles, J.R., Lawrence, C.R. & Wootton, R.J. (1999). Quantified interference and diffraction in single Morpho butterfly scales. *Proc. R. Soc. Lond B* 266: 1403-1411.
- [6] Jian Zi et al, "Coloration strategies in peacock feathers", *PNAS* 2003;100 12576-12578
- [7] J. D Joannopoulos, R D Meade, and J N Winn, *Molding the Flow of Light*, Princeton University Press, 1990
- [8] Kane Yee (1966). "Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media". *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 14 (3): 302–307.
- [9] A. Taflove and M. E. Brodwin (1975). "Numerical solution of steady-state electromagnetic scattering problems using the time-dependent Maxwell's equations". *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* 23 (8): 623–630.
- [10] T. Baba, D. Mori, K. Inoshita, and Y. Kuroki, "Light localization in line defect photonic crystal waveguides," *IEEE J. Quantum Electron.* vol. 10, no. 3, pp. 484-491, 2004.
- [11] S. Noda, A. Chutinan, and M. Imada, "Trapping and emission of photons by a single defect in a photonic bandgap structure," *Nature*, vol. 407, pp. 608-610, 2000.
- [12] Q. Hu, J-Z Zhao, R-W Peng, F. Gao, R-L Zhang, and M. Wang "Rainbow trapped in a self-similar coaxial optical waveguide," *Appl. Phys. Lett.* vol. 96, no. 16, pp. 161101 (1-3) 2010.
- [13] V. N. Smolyaninova, I. I. Smolyaninov, A. V. Kildishev, and V. M. Shalaev, "Experimental observation of the trapped rainbow," *Appl. Phys. Lett.* vol. 96, no. 21, pp. 211121 (1-3) 2010.

- [14] J. Castro, D. F. Geraghty, S. Honkanen, C. M. Greiner, D. Iazikov, and T. W. Mossberg, "Demonstration of mode conversion using anti-symmetric waveguide Bragg gratings." *Opt. Express*, vol. 13, no. 11, pp. 4180-4184, 2005.
- [15] T.F Krauss, "Slow light in photonic crystal waveguides" *J.Phys.D: Appl. Phys.* 40 2666-2670, 2007.
- [16] Qiang Liu, Zhengbiao Ouyang, and Sacharia Albin "Coupled photonic crystal micro-cavities with ultra-low threshold power for stimulated Raman scattering" *Optics Express*, Vol. 19, Issue 5, pp. 4795-4804 (2011).
- [17] Soon-Hong Kwon, Thomas Sünner, Martin Kamp, and Alfred Forchel "Optimization of photonic crystal cavity for chemical sensing" *Optics Express*, Vol. 16, Issue 16, pp. 11709-11717 (2008).
- [18] A. R. A. Chalcraft, S. Lam, D. O'Brien, T. F. Krauss, M. Sahin, D. Szymanski, D. Sanvitto, R. Oulton, M. S. Skolnick, A. M. Fox, D. M. Whittaker, H.-Y. Liu, and M. Hopkinson "Mode structure of the L3 photonic crystal cavity" *Appl. Phys. Lett.* 90, 241117 (2007).
- [19] Edo Waks and Jelena Vuckovic "Coupled mode theory for photonic crystal cavity-waveguide interaction" *Optics Express*, Vol. 13, Issue 13, pp. 5064-5073 (2005).
- [20] Gary Shambat, Bryan Ellis, Arka Majumdar, Jan Petykiewicz, Marie A. Mayer, Tomas Sarmiento, James Harris, Eugene E. Haller and Jelena Vuckovic "Ultrafast direct modulation of a single-mode photonic crystal nanocavity light-emitting diode" *Nature Communications* Vol. 2, 593 (2011)
- [21] T.Baba, N.Fukaya and Y.Yonekuva, *Electron. Lett.* 35, 654 (1999).
- [22] M.Tokushima, H.Kosaka, A.Tomika and H.Yamada, *Appl.Phys.Lett.* 76, 952 (2000).
- [23] H.Benisty, *J. Appl. Phys.* 79, 7483 (1996)
- [24] A. Mekis, S. Fan, and J.D. Joannopoulos, *Phys. Rev. B* 58, 4809 (1998).
- [25] A.Talneau, I.Sagnes, R.Gabet, Y.Jaouen and H.Benistry, *Appl. Phys. Lett.* 97, 191115 (2010).
- [26] K.Cui, Y.Huang, G.Zhang, Y.Li, X.Tang, X.Mao, Q.Zhao, W.Zhang and J.Penglo, *Appl. Phys. Lett.* 95, 191901 (2009).
- [27] N.Shahid, N.Speijsken, S.Naureen, M.Y.Li, M.Swilllo and S.Anand, *App. Phys. Lett.* 98, 081112 (2011).

- [28] N.Shahid, M.Amin, S.Naureen, M. Swillo and S.Anand “Junction-type photonic crystal waveguides for notch- and pass-band filtering” *Opt. Express*, 19, No.21, 21074 (2011).
- [29] M.AgioandC.M.Soukoulis, *Phys. Rev. E*, 64, 055603 (2001).
- [30] L. Martinelli, H. Benisty, O. Drisse, E. Derouin, F. Pommereau, O. Legouézigou, and G. H. Duan, “Fine impact of lithographic grid irregularity assessed on photonic crystal device selectivity” *IEEE Photon.Technol. Lett.*, vol. 19, no. 5, pp. 282–284, Mar. (2007).
- [31] H. Benisty, C. Cambournac, F.V. Laere and D.V. Thourhout “Photonic-crystal demultiplexer with improved crosstalk by second-order cavity filtering.” *J.Lightw. Technol.*, vol.28, no.8, (2010).
- [32] E. Viasnoff-Schwoob, C. Weisbuch, H. Benisty, C. Cuisin, E. Derouin, O. Drisse, G.-H. Duan, L. Legouézigou, O. Legouézigou, F. Pommereau, S. Golka, H. Heidrich, H. J. Hensel, and K. Janiak, “Compact wavelength monitoring by lateral outcoupling in wedged photonic crystal multimode waveguides” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 86, no. 10, p. 101 107, Mar. (2005).
- [33] L. Martinelli, H. Benisty, O. Khayam, G.-H.Duan, H. Heidrich and K. Janiak, “Analysis and Optimization of compact demultiplexer monitor based on photonic-crystal waveguide” *J.Lightw. Technol.*, vol.25, no.9, pp.2385-2394 (2007).
- [34] Van Khanh Do, X. Le Roux, C. Caer, D. Marris-Morini, N. Izard, L. Vivien, E. Cassan, “Wavelength Demultiplexer Based on a Two-Dimensional Graded Photonic Crystal” *Photonic Technology Letters*, IEEE 23360, 2011.
- [35] D. Labilloy, H. Benisty, C. Weisbuch, T. F. Krauss, R. M. De La Rue, V. Bardinal, R. Houdré, U. Oesterle, D. Cassagne, and C. Jouanin “Quantitative Measurement of Transmission, Reflection, and Diffraction of Two-Dimensional Photonic Band Gap Structures at Near-Infrared Wavelengths” *Phys. Rev. Lett.* 79, 4147–4150 (1997)
- [36] A. Chutinan and S. Noda “Waveguides and waveguide bends in two-dimensional photonic crystal slabs” *Phys. Rev. B* 62, 4488–4492 (2000).
- [37] Steven G. Johnson, Shanhui Fan, Pierre R. Villeneuve, and J. D. Joannopoulos “Guided modes in photonic crystal slabs” *Phys. Rev. B* 60, 5751–5758 (1999).
- [38] E. Kuramochi, M. Notomi, S. Hughes, A. Shinya, T. Watanabe, and L. Ramunno, “Disorder-induced scattering loss of line-defect waveguides in photonic crystal slabs,” *Phys. Rev. B* 72(16), 161318 (2005).

- [39] T. F. Krauss, "Why do we need slow light," *Nat. Photonics* 2(8), 448–450 (2008).
- [40] T. Baba, "Slow light in photonic crystals," *Nat. Photonics* 2(8), 465–473 (2008).
- [41] T. Tanabe, M. Notomi, S. Mitsugi, A. Shinya, and E. Kuramochi, "Fast bistable all-optical switch and memory on a silicon photonic crystal on-chip," *Opt. Lett.* 30(19), 2575–2577 (2005).
- [42] M. Notomi, A. Shinya, S. Mitsugi, E. Kuramochi, and H. Ryu, "Waveguides, resonators and their coupled elements in photonic crystal slabs," *Opt. Express* 12(8), 1551–1561 (2004).
- [43] C. Liu, Z. Dutton, C. H. Behroozi, and L. V. Hau, "Observation of coherent optical information storage in an atomic medium using halted light pulses," *Nature* 409(6819), 490–493 (2001).
- [44] L. Hau, S. Harris, Z. Dutton, and C. Behroozi, "Light speed reduction to 17 metres per second in an ultracold atomic gas," *Nature* 397(6720), 594–598 (1999).
- [45] Y. Hamachi, S. Kubo, and T. Baba, "Slow light with low dispersion and nonlinear enhancement in a latticeshifted photonic crystal waveguide," *Opt. Lett.* 34(7), 1072–1074 (2009).
- [46] H. Kurt, K. Üstün, and L. Ayas, "Study of different spectral regions and delay bandwidth relation in slow light photonic crystal waveguides," *Opt. Express*, vol. 18, pp. 26965-26977, 2010.
- [47] S. Johnson and J. Joannopoulos, "Block-iterative frequency-domain methods for Maxwell's equations in a planewave basis", *Opt. Express* 8, 173(2001).
- [48] J. B. Khurgin, "Slow light in various media: a tutorial," *Adv. Opt. Photon.* vol. 2, no. 3, pp. 287-318, 2010.
- [49] R. W. Boyd, D. J. Gauthier, and A. L. Gaeta, "Applications of slow light in telecommunications," *Opt. Photon. News*, vol. 17, no. 4, pp. 18-23, 2006.
- [50] J. B. Khurgin, "Optical buffers based on slow light in electro-magnetically induced transparent media and coupled resonator structures: Comparative analysis," *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 22, no. 5, pp. 1062-1074, 2005.
- [51] R. S. Tucker, P-C. Ku, and C. J. Chang-Hasnain, "Slow-light optical buffers-capabilities and fundamental limitations," *J. Lightwave Technol.* vol. 23, no. 12, pp. 4046-4066, 2005.

- [52] F. Xia, L. Sekaric, and Y. Vlasov, "Ultracompact optical buffers on a silicon chip," *Nature Photon.* vol. 1, no.1, pp. 65-71, 2007.
- [53] T. Baba and D. Mori, "Slow light engineering in photonic crystals," *J. Phys. D: Appl. Phys.* vol. 40, pp. 2659–2665, 2007.
- [54] 10. S. Rawal, R. K. Sinha, and R. M. De La Rue, "Slow light miniature devices with ultra-flattened dispersion in silicon-on-insulator photonic crystal," *Opt. Express*, vol. 17, no. 16, pp. 13315–13325, 2009.
- [55] K. Ustun and H. Kurt, "Ultra slow light achievement in photonic crystals by merging coupled cavities with waveguides," *Opt. Express*, vol. 18, no. 20, pp. 21155-21161, 2010.
- [56] M. Ebnali-Heidari, C. Grillet, C. Monat, and B. J. Eggleton, "Dispersion engineering of slow light photonic crystal waveguides using microfluidic infiltration," *Opt. Express*, vol. 17, no. 3, pp. 1628–1635, 2009.
- [57] R. Hao, E. Cassan, H. Kurt, J. Hou, X. Le Roux, D. Marris-Morini, L. Vivien, G. Dingshan, Z. Zhou and X. Zhang, "Novel Kind of Semislow Light Photonic Crystal Waveguides With Large Delay-Bandwidth Product," *IEEE Photon. Technol. Lett.* vol. 22, no. 11, pp. 844-846, 2010.
- [58] F. Wang, J. Ma and C. Jiang, "Dispersionless slow wave in novel 2-D photonic crystal line defect waveguides," *J. Lightwave Technol.* vol. 26, no. 11, pp. 1381-1386, 2008.
- [59] O. Khayam and H. Benisty, "General recipe for flatbands in photonic crystal waveguides," *Opt. Express*, vol. 17, no. 17, pp. 14634-14648, 2009.
- [60] E. Yablonovitch and T.J. Gmitter. *Phys. Rev. Lett.* 63, 1950 (1989).
- [61] J. Castro, D. F. Geraghty, S. Honkanen, C. M. Greiner, D. Iazikov, and T. W. Mossberg, "Demonstration of mode conversion using anti-symmetric waveguide Bragg gratings." *Opt. Express*, vol. 13, no. 11, pp. 4180-4184, 2005.
- [62] A. F. Oskooi, D. Roundy, M. Ibanescu, P. Bermel, J. D. Joannopoulos, and S. G. Johnson, "MEEP: A flexible free-software package for electromagnetic simulations by the FDTD method," *Computer Physics Communications*, vol. 181, no. 3, pp. 687-702, 2010.
- [63] J. Ma, and C. Jiang, "Demonstration of Ultraslow Modes in Asymmetric Line-Defect Photonic Crystal Waveguides," *IEEE Photon. Technol. Lett.* 20(14), 1237–1239 (2008).



- [64] J. Hou, D. Gao, H. Wu, R. Hao, and Z. Zhou, “Flat Band Slow Light in Symmetric Line Defect Photonic Crystal Waveguides” *IEEE Photon. Technol. Lett.* 21(20), 1571–1573 (2009).
- [65] J. Li, T. P. White, L. O’Faolain, A. Gomez-Iglesias, and T. F. Krauss, “Systematic design of flat band slow light in photonic crystal waveguides,” *Opt. Express* 16(9), 6227–6232 (2008).
- [66] R. Hao, E. Cassan, H. Kurt, X. Le Roux, D. Marris-Morini, L. Vivien, H. Wu, Z. Zhou, and X. Zhang, “Novel slow light waveguide with controllable delay-bandwidth product and ultra-low dispersion,” *Opt. Express* 18(6), 5942–5950 (2010).
- [67] L. Dai, and C. Jiang, “Ultrawideband Low Dispersion Slow Light Waveguides,” *J. Lightwave Technol.* 27(14), 2862–2868 (2009).
- [68] L. Dai, and C. Jiang, “Photonic crystal slow light waveguides with large delay-bandwidth product,” *Appl. Phys. B* 95(1), 105–111 (2009).
- [69] J. Ma, and C. Jiang, “Flatband slow light in asymmetric line-defect photonic crystal waveguide featuring low group velocity and dispersion,” *IEEE J. Quantum Electron.* 44(8), 763–769 (2008).
- [70] A. Petrov, M. Krause, and M. Eich, “Backscattering and disorder limits in slow light photonic crystal waveguides,” *Opt. Express* 17(10), 8676–8684 (2009).
- [71] T. Baba, “Slow light in photonic crystals,” *Nat. Photonics* 2(8), 465–473 (2008).
- [72] M. Notomi, K. Yamada, A. Shinya, J. Takahashi, C. Takahashi, and I. Yokohama, “Extremely large group velocity dispersion of line-defect waveguides in photonic crystal slabs,” *Phys. Rev. Lett.* 87(25), 253902 (2001).
- [73] L. H. Frandsen, A. V. Lavrinenko, J. Fage-Pedersen, and P. I. Borel, “Photonic crystal waveguides with semislow light and tailored dispersion properties,” *Opt. Express* 14(20), 9444–9450 (2006).
- [74] M. D. Settle, R. J. P. Engelen, M. Salib, A. Michaeli, L. Kuipers, and T. F. Krauss, “Flatband slow light in photonic crystals featuring spatial pulse compression and terahertz bandwidth,” *Opt. Express* 15(1), 219–226 (2007).
- [75] A. Yu. Petrove, and M. Eich, “Zero dispersion at small group velocities in photonic crystal waveguides,” *Appl. Phys. Lett.* 85(21), 4866–4868 (2004).

- [76] H. Kurt, H. Benisty, T. Melo, O. Khayam, and C. Cambournac, "Slow-light regime and critical coupling in highly multimode corrugated waveguides," *J. Opt. Soc. Am. B* 25(12), C1–C14 (2008).
- [77] Stefan Guldin, Sven Hüttner, Matthias Kolle, Mark E. Welland, Peter Müller-Buschbaum, Richard H. Friend, Ullrich Steiner, and Nicolas Te'treault "Dye-Sensitized Solar Cell Based on a Three-Dimensional Photonic Crystal" *Nano Lett.*, 10 (7), pp 2303–2309, 2010.
- [78] E. Hallynck and P. Bienstman "Photonic crystal biosensor based on angular spectrum analysis" *Optics Express*, Vol. 18, Issue 17, pp. 18164-18170 (2010).
- [79] N. Skivesen, A. Têtu, M. Kristensen, J. Kjems, L. H. Frandsen, and P. I. Borel "Photonic-crystal waveguide biosensor" *Optics Express*, Vol. 15, Issue 6, pp. 3169-3176 (2007).
- [80] M. El Beheiry, V. Liu, S. Fan, and O. Levi "Sensitivity enhancement in photonic crystal slab biosensors" *Optics Express*, Vol. 18, Issue 22, pp. 22702-22714 (2010).

## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : AYAS, Lokman  
Uyruğu : T.C.  
Doğum tarihi ve yeri : 05.06.1987 Trabzon  
Medeni hali : Bekar  
Telefon : 0 (532) 562 39 07  
Faks : 0 (312) 292 40 91  
e-mail : ayaslokman@hotmail.com

### Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Lisans	Hacettepe Üniversitesi / Elektrik Elektronik Mühendisliği	2009

### İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2009-2011	TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi	Araştırma Görevlisi
2011-	TAV Esenboğa Havalimanı	Elk.Eln. Mühendisi

### Yabancı Dil

İngilizce

### Yayınlar

H. Kurt, K. Üstün, and L. Ayas, "Study of different spectral regions and delay bandwidth relation in slow light photonic crystal waveguides," *Opt. Express*, vol. **18**, pp. 26965-26977, 2010.