

**FOTONİK KRİSTALLERDE YAVAŞ IŞIK TEMELLİ
SENSÖR TASARIMI**

Ezel Yağmur ZEYDAN



T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FOTONİK KRİSTALLERDE YAVAS ISI K TEMELLİ SENSÖR TASARIMI

Ezel Yağmur Zeydan
0000-0003-4996-5359

Prof. Dr. Atilla Aydınlı
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2021
Her Hakkı Saklıdır

TEZ ONAYI

Ezel Yağmur Zeydan tarafından hazırlanan “Fotonik Kristallerde Yavas Isık Temelli Sensör Tasarımı” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Atilla Aydınlı

Başkan : Doç. Dr. Nihan Kosku Perkgöz
0000-0003-1331-0959
Eskişehir Teknik Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi,
Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza



U.Ü. Üye : Prof. Dr. Atilla Aydınlı
0000-0001-5952-5993
Bursa Uludağ Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi,
Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza



Üye : Doç. Dr. Umut Aydemir
0000-0001-5396-4610
Bursa Uludağ Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi,
Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza



Yukarıdaki sonucu onaylarım

Prof. Dr. Hüseyin Aksel EREN
Enstitü Müdürü
16/02/2021

Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

16/02/2021



Ezel Yağmur ZEYDAN

ÖZET

Yüksek Lisans

FOTONİK KRİSTALLERDE YAVAŞ IŞIK TEMELLİ SENSÖR TASARIMI

EZEL YAĞMUR ZEYDAN

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Atilla Aydınlı

Işığın yayılımını denetlemek ve yönetmek optik ve fotonik alanının önemli konularından biridir. Işığın birçok özelliği yüksek hassasiyette sensör tasarımlarını mümkün kılmaktadır. Bu sensör tasarımlarında son yıllarda fotonik kristallerin kullanımı yaygınlaşmıştır. Fotonik kristaller, dielektrik sabitinin bir, iki veya üç boyutta periyodik olarak değiştiği, yarı iletkenlerdeki elektronik bant aralığına benzer olarak fotonik bant aralığına sahip olan yapılardır. Bu fotonik bant aralığı belirli dalga boylarının kristal içerisinde ilerlemesini sağlarken belirli dalga boylarını geri yansıtarak kristalin içinde ilerlemesini engellemektedir. Fotonik kristal yapılarda oluşturulan bilinçli kusurlarla fotonik bant aralığında kusur kipleri elde edilir. Bu kusur kiplerinin dalga kılavuzu içerisinde ilerlerken grup hızının azalması sonucu artan madde-alan etkileşimi sensör hassasiyetini de arttırmaktadır.

Tez çalışmasında kare örgülü fotonik kristallerin tasarımı yapılmış ve bilinçli olarak yapılan kusurların fotonik kristallerin özellikleri üzerindeki değişimleri incelenmiştir. Fotonik kristalin örgü simetrisinde yapılan çeşitli değişimler sayesinde ışığın grup hızı azaltılmış ve bunun sonucunda madde-alan etkileşimi artırılmıştır. Yapılan tasarım ile sensör olarak kullanılan dalga boyu aralığında ışığın grup hızı $0,13 \cdot c$ olarak hesaplanmış ve sensör hassasiyeti 212 nm/RIU olarak elde edilmiştir. Yüksek dereceden kiplerin sensör hassasiyetine etkisinin incelenmesi amacıyla yapılan ikinci tasarımda iki farklı kip incelenmiştir. İkinci tasarımda birinci kiple 166 nm/RIU ve ikinci kiple 181 nm/RIU sensör hassasiyetine ulaşılmıştır. Bu tasarımda yüksek dereceden kiplerin azalan dalgasının (evanescent field) dielektrik çubuklar üzerinde yoğunlaşmasının sensör hassasiyetini arttırdığı gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Fotonik kristal, fotonik kristal dalga kılavuzu, yavaş ışık, sensör.

2021, xii + 92 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

SENSOR DESIGN BASE ON SLOW LIGHT IN PHOTONIC CRYSTALS

EZEL YAĞMUR ZEYDAN

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Electronic Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Atilla Aydınlı

Controlling and managing the propagation of light is one of the important issues in optics and photonics. Many properties of light enable high precision sensor designs. The use of photonic crystals in these sensor designs has become widespread in recent years. Photonic crystals are structures that have a photonic band gap, similar to the electronic band gap in semiconductors, where the dielectric constant changes periodically in one, two, or three dimensions. While this photonic band gap allows certain wavelengths to travel through the crystal, it prevents certain wavelengths from moving through the crystal by reflecting them back. With the intentional defects created in photonic crystal structures, defect modes in the photonic bandgap are obtained. As these defect modes travel through the waveguide, the increasing substance-field interaction as a result of the decrease in the group velocity increases the sensitivity of the sensor.

In this thesis study, the design of square lattice photonic crystals is made and the changes on the properties of the photonic crystals are investigated. The group velocity of the light is reduced by various changes made in the lattice symmetry of the photonic crystal, and as a result, the matter-field interaction is increased. With the design, the group velocity of the light is calculated as $0,13 * c$ and the sensor sensitivity is obtained as $212 \text{ nm} / \text{RIU}$. Two different modes are examined in the second design, which is designed to investigate the effect of higher-order modes on sensor sensitivity. In the second design, $166 \text{ nm} / \text{RIU}$ sensor sensitivity is reached with the first mode and $181 \text{ nm} / \text{RIU}$ with the second mode. In this design, it has been shown that the concentration of the evanescent field on the dielectric rods increases the sensitivity of the sensor.

Key words: Photonic crystal, photonic crystal waveguide, slow light, sensor.

2021, xii + 92 pages.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tezim boyunca bilgi ve tecrübesiyle beni yönlendiren, başarıya ulaşabilmem için hiçbir zaman desteğini esirgemeyen, bilimsel araştırma ruhunu kazanmamda büyük katkıları olan, hem eğitim hem meslek hayatımda kullanacağım engin bilgileri edinmemde bana katkı sağlayan değerli danışman hocam Prof. Dr. Atilla AYDINLI'ya teşekkürü borç bilirim.

Tez çalışmamda bana bilgi ve tecrübeleriyle rehber olan ve tez çalışmasında büyük katkıları bulunan değerli çalışma arkadaşım Sercan Keskinden'e teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca her zaman yanımda olan ve desteğini hiç esirgemeyen, öğrencilik hayatım boyunca başarılı olmamda sonsuz katkıları bulunan canımdan çok sevdiğim değerli aileme sevgi ve şükranlarımı sunarım.

Ezel Yağmur Zeydan
16/02/2021

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	ii
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
2.KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	10
2.1 Elektromanyetizma ve Maxwell Denklemleri	10
2.2 Fotonik kristallerde tedirgeme kuramı	14
2.3. İki Boyutlu Fotonik Kristaller ve Bant Yapıları	15
2.4. Bloch Kuramı ve Fotonik Kristal Bant Aralığı.....	22
3.MATERYAL VE YÖNTEM	25
3.1 Düzlem Dalga Açılım Yöntemi	27
3.2. Bant Diyagramlarının Elde Edilmesi	30
3.3. Zaman Domeninde Sonlu Farklar Yöntemi	35
3.4. Işığın İlerlemesinin Nümerik Hesaplanması.....	38
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	47
4.1 Kare Örgülü Fotonik Kristaller	47
4.2 Kare Örgülü Fotonik Kristallerde Işığın Yavaşlatılması	57
4.3. Yavaş Işık Temelli Sensör Tasarımı	70
KAYNAKLAR	89
ÖZGEÇMİŞ	92

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
H	Manyetik alan
H_x, H_y, H_z	Manyetik alan bileşenleri
E	Elektrik alan
E_x, E_y, E_z	Elektrik alan bileşenleri
ϵ_0	Boşluğun elektriksel geçirgenliği
$\epsilon(x)$	Ortamın konuma bağlı dielektrik sabiti
$L_{çift}$	Çiftlenme uzunluğu
n	Kırılma indisi
n_g	Grup indisi
V_g	Grup Hızı
ω	Açısal frekans
t	Zaman
V	Potansiyel enerji
x	Konum

D	Deplasman vektörü
μ_0	Boşluğun manyetik geçirgenliği
∇	Rotasyonel
c	Işık hızı
λ	Dalga boyu
η	Çiftlenme verimi
a	Örgü sabiti (periyot)

Kısaltmalar	Açıklama
PWE	Düzlem Dalga Genişlemesi
FDTD	Zamanda Sonlu Farklar
PML	Mükemmel Uyumlu Katman
PBC	Periyodik Sınır Koşulları

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. XY düzleminde iki boyutlu fotonik kristal yapıları. (a) Kare örgü simetrisine sahip fotonik kristalin birim vektörleri. (b) Üçgen örgü simetrisine sahip fotonik kristalin birim vektörleri.....	16
Şekil 2.2. İki boyutlu kare örgü simetrisine sahip fotonik kristal yapısı. Dielektrik çubukların yarıçapı r ve örgü sabiti a ile gösterilmiştir. Malzeme z düzlemi boyunca homojendir ve yapı x,y düzlemlerinde a örgü sabiti ile periyodiktir	17
Şekil 2.3. (a) İki boyutlu kare örgü simetrisine sahip fotonik kristalin gerçek örgü uzayındaki birim vektör hücreleri (b) İki boyutlu kare örgü simetrisine sahip fotonik kristalin ters örgü uzayındaki birim vektör hücreleri (c) Ters örgü uzayının birim hücrelerinin alanı Brillion bölgesini oluşturur.....	18
Şekil 2.4. (a) İki boyutlu kare örgü simetrisine sahip fotonik kristal yapısı (b) İki boyutlu kare örgü simetrisine sahip fotonik kristalin ters örgü uzayındaki indirgenemez Brillion Bölgesi (X, Γ, M indirgenemez Brillion bölgesinin özel noktalarıdır.), k ($= 2\pi a$) dalga vektörüdür.	19
Şekil 2.5. İki boyutlu üçgen örgü simetrisine sahip fotonik kristal yapısı. Tasarım dielektrik sabiti yüksek bir tabaka üzerine deliklerin açılması ile elde edilmiştir. Delik yarıçapı r ve örgü sabiti a olarak verilmiştir. Deliklerin dielektrik sabiti $\epsilon d = 1$ olarak verilmiştir. Sol taraftaki çerçeve ile gösterilen alan üçgen örgülü fotonik kristal yapısının birim hücrelerini ifade eder	20
Şekil 2.6. (a) İki boyutlu üçgen örgü simetrisine sahip fotonik kristalin gerçek örgü uzayındaki birim vektör hücreleri (b) İki boyutlu üçgen örgü simetrisine sahip fotonik kristalin ters örgü uzayındaki birim vektör hücreleri (c) Ters örgü uzayının birim hücrelerinin alanı Brillion bölgesini oluşturur. İndirgenemez Brillion bölgesi mor renkle gösterilmiştir.	20
Şekil 2.7. (a) İki boyutlu üçgen örgü simetrisine sahip fotonik kristal yapısı (b) İki boyutlu üçgen örgü simetrisine sahip fotonik kristalin ters örgü uzayındaki indirgenemez Brillion Bölgesi (X, Γ, M indirgenemez Brillion bölgesinin özel noktalarıdır.), k dalga vektörüdür. İndirgenemez Brillion bölgesi yeşil renkle gösterilmiştir.	21
Şekil 3.1. İki boyutlu üçgen örgü simetrisine sahip kusursuz fotonik kristal yapısı. Kırmızı ile gösterilen dielektrik çubukların etkin kırılma indisi $n=3,46$ ve arka plan hava olup $n=1$ olarak verilmiştir. Kristalin periyodu(örgü sabiti) $a= 1\mu m$ ve yarıçapı $r = 0,2*a$ olarak seçilmiştir.	30
Şekil 3.2. Benzetim parametrelerinin kontrol edildiği pencere. Bu pencere üzerinden nümerik çözüm yöntemi, Brillion bölgesi, polarizasyon ve çözünürlük ayarları yapılabilmektedir.....	31
Şekil 3.3. Bandsolve yazılımı benzetim parametrelerinin kontrol edildiği pencere. Bu alandan hesaplamaların yapılacağı birim hücre vektör parametreleri seçilir.	32
Şekil 3.4. Super hücre parametreleri ($1,1,1$) seçilen XZ düzlemindeki iki boyutlu kusursuz fotonik kristal yapısına ait birim hücre görüntüsü	32
Şekil 3.5. Çeşitli süper hücre parametreleri seçilerek elde edilen hesaplama alanları gösterilmiştir. Süper hücre alanları (1,1,1), (2,1,2), (2,1,1) ve (2,1,3) olarak ayarlanmıştır.	33
Şekil 3.6. İki boyutlu kusursuz fotonik kristal yapısı için TE polarizasyonda elde edilen bant aralığı. ($a = 1 \mu m$ ve $r = 0,2*a$ olarak seçilmiştir, süper hücre alanı (1,1,1) olarak ayarlanmıştır.)	34

Şekil 3.7. İki boyutlu kusursuz fotonik kristal yapısı için TM polarizasyonda elde edilen bant aralığı. ($a = 1 \mu\text{m}$ ve $r = 0,2*a$ olarak seçilmiştir, süper hücre alanı (1,1,1) olarak ayarlanmıştır.)	35
Şekil 3.8. Yee hücresi olarak da adlandırılan FDTD birim hücre yapısı. Bu birim hücre kübik uzaysal bir örgüyü gösterir, elektrik ve manyetik alanları belirli bir uzay konumunda örnekleyerek, örnekleme zaman adımının yarısı kadar gecikmeli anlar için bu alanların çözümünü sağlar.....	36
Şekil 3.9. Hesap penceresi üzerinden oluşturulan kusursuz 11x7 boyutunda kare örgü simetrisine sahip fotonik kristal yapısı.($a = 0,6\mu$ ve $r = 0,18*a$ olarak tanımlanmıştır. Fotonik kristalin fon indisi $n_{\text{fon}} = 1$ olarak verilmiştir. Yapı dielektrik çubuklar ile oluşturulmuştur, dielektrik çubukların etkin indisi $n_{\text{etkin}} = 2,4$ olarak hesaplanmıştır. 41	
Şekil 3.10. Fulwave benzetim aracı temel parametrelerinin girildiği pencere. Bu pencere üzerinden yapının arka plan indisi, indis farkı, fotonik kristalin genişliği ve yapılan tasarımın hangi boyutta olacağı seçilir.....	41
Şekil 3.11. Kusursuz kare örgü simetrisine sahip iki boyutlu fotonik kristal yapısının kırılma indisi dağılım profili. Pembe renk ile temsil edilen alan havayı göstermekte ve $n_{\text{arka}} = 1$ olarak tanımlanmaktadır. Kırmızı renkle gösterilen alan dielektrik çubukları ifade eder, kırılma indisi $n_{\text{etkin}} = 2,4$ olarak hesaplanmaktadır.	42
Şekil 3.12. Işığın zamana bağlı yayılımının izlenilmesini sağlayan zaman monitörlerinin parametre ayarlarının yapıldığı pencere. Frekans analizi hızlı Fourier dönüşümü (FFT) yöntemi ile yapılır.	43
Şekil 3.13. Yapı içerisinden ilerleyen ışığın özelliklerinin ayarlandığı pencere.	43
Şekil 3.14. Parametrelerin ayarlandığı pencere. Bu pencere üzerinden zaman adım sayısı, benzetim zaman uzunluğu ve FDTD hesaplamasının yapılacağı benzetim alanı parametreleri girilir.	44
Şekil 3.15. TE polarizasyona sahip ışığın yapı içerisinde ilerlerken frekansa bağlı olarak normalize güç yoğunluğunun değişiminin gösteriliği grafik.	45
Şekil 3.16. TM polarizasyona sahip ışığın yapı içerisinde ilerlerken frekansa bağlı olarak normalize güç yoğunluğunun değişiminin gösteriliği grafik.	45
Şekil 4.1. (a) İki boyutlu kusursuz kare örgü simetrisine sahip fotonik kristal yapısı. Kırmızı ile gösterilen dielektrik çubukların etkin kırılma indisi $n_{\text{dielektrik}} = 3,46$, kalan yerler ise boşluk, $n_{\text{arka}} = 1$, olarak belirlenmiştir. ($a = 0,5\mu\text{m}$ ve $r = 0,2*a$) (b) Fotonik kristalin ilk Brillion bölgesi.	48
Şekil 4.2. İki boyutlu kusursuz kare örgü simetrisine sahip fotonik kristal yapısı için ışığın TE polarizasyonunda elde edilen bant diyagramı. ($a = 0,5 \mu\text{m}$ ve $r = 0,2*a$ olarak ayarlanmıştır.)	48
Şekil 4.3. İki boyutlu kusursuz kare örgü simetrisine sahip fotonik kristal yapısı için TE fotonik bant genişliğinin dielektrik çubuk yarıçapına bağlı değişimi. ($a = 0,5 \mu\text{m}$ olarak seçilmiştir.).....	49
Şekil 4.4. İki boyutlu kusursuz kare örgü simetrisine sahip fotonik kristal yapısı için TE fotonik bant genişliğinin kırılma indisi farkına bağlı olarak değişimi. ($a = 0,5 \mu\text{m}$ ve $r = 0,2*a$ olarak seçilmiştir.)	50
Şekil 4.5. İki boyutlu kusursuz kare örgü simetrisine sahip fotonik kristal yapısı için ışığın TM polarizasyonunda elde edilen bant diyagramı. Işığın TM polarizasyonu için fotonik bant aralığı elde edilmemiştir. ($a = 0,5 \mu\text{m}$, $r = 0,2*a$ olarak ayarlanmıştır.)	51
Şekil 4.6. (a) İki boyutlu kusursuz kare örgü simetrisine sahip fotonik kristal yapısı. Mavi ile gösterilen alan silisyum tabaka olup etkin kırılma indisi $n_{\text{dielektrik}} = 3,46$, gri ile	

gösterilen deliklerin (hava boşluğu) kırılma indisi $n_{\text{delik}} = 1$ olarak verilmiştir. ($a = 0,5 \mu\text{m}$, $r = 0,2*a$)	
Şekil 4.7. İki boyutlu kusursuz kare örgü simetrisine sahip fotonik kristal yapısında ışığın TE polarizasyonu için elde edilen bant diyagramı. ($a = 0,5 \mu\text{m}$, $r = 0,2*a$)	51
Şekil 4.8. İki boyutlu kusursuz kare örgü simetrisine sahip fotonik kristal yapısında ışığın TM polarizasyonu için elde edilen bant diyagramı. ($a = 0,5 \mu\text{m}$, $r = 0,2*a$)	52
Şekil 4.9. (a) İki boyutlu çizgi kusurlu kare örgü simetrisine sahip fotonik kristal yapısı. Kırmızı ile gösterilen dielektrik çubukların etkin kırılma indisi $n_{\text{dielektrik}} = 3,46$, fon indisi $n_{\text{arka}} = 1$ olarak seçilmiştir. ($a = 0,5 \mu\text{m}$, $r = 0,2*a$)	
(b) Fotonik kristalin XZ düzlemindeki benzetim birim hücre alanı.	53
Şekil 4.10. İki boyutlu çizgi kusurlu kare örgü simetrisine sahip fotonik kristal yapısına ait bant diyagramı ve kusur kipi. Kusur kipinin dalga boyu $1,19 \mu\text{m} - 1,66 \mu\text{m}$ aralığındadır. ($a = 0,5 \mu\text{m}$ ve $r = 0,2*a$ olarak verilmiştir.)	54
Şekil 4.11. İki boyutlu kusursuz kare örgü simetrisine sahip fotonik kristal yapısına ait normalize iletim grafiği. Işığın giriş ve çıkış profilleri ayrı renklerde üst üste çizdirilmiştir. ($a = 1 \mu\text{m}$ ve $r = 0,2*a$ olarak verilmiştir.)	55
Şekil 4.12. İki boyutlu kusursuz kare örgü simetrisine sahip fotonik kristal yapısına ait normalize iletim grafiği. Yapının $1,2 \mu\text{m}$ ile $2 \mu\text{m}$ dalga boyu aralığında bant aralığına sahip olduğu görülür. ($a = 0,5 \mu\text{m}$ ve $r = 0,2*a$ olarak verilmiştir.)	55
Şekil 4.13. İki boyutlu çizgi kusurlu kare örgü simetrisine sahip fotonik kristal yapısına ait normalize iletim grafiği. Grafikte bant aralığında $1,2 \mu\text{m} - 1,63 \mu\text{m}$ dalga boyu aralığında kusur kipinin oluştuğu görülmektedir. ($a = 0,5 \mu\text{m}$ ve $r = 0,2*a$ olarak verilmiştir.)	56
Şekil 4.14. İki boyutlu çizgi kusurlu kare örgü simetrisine sahip fotonik kristal yapısına ait kusur kipinin dispersiyon eğrisi. Dispersiyon eğrisinde dalga vektörünün değeri arttıkça grup hızının azaldığı elde edilmiştir. ($a = 0,5 \mu\text{m}$ ve $r = 0,2*a$ olarak verilmiştir.)	58
Şekil 4.15. İki boyutlu çizgi kusurlu kare örgü simetrisine sahip fotonik kristal yapısına ait kusur kipinin farklı normalize frekans için elde edilen ışığın yavaşlama oranını gösteren grafik. Dispersiyon eğrisinde normalize frekans değeri arttıkça grup hızının azaldığı elde edilmiştir. ($a = 0,5 \mu\text{m}$ ve $r = 0,2*a$ olarak verilmiştir.)	58
Şekil 4.16. Çizgi kusurlu fotonik kristal yapısındaki dielektrik çubukların yarıçaplarının azaltılması elde edilen yeni kusur kiplerine ait dispersiyon eğrileri. Yarıçapın azaltılması kusur kipinin dispersiyon eğrilerinin bant diyagramında yüksek frekansa doğru kaymasına sebep olmuştur.	59
Şekil 4.17. Çizgi kusurlu fotonik kristal yapısındaki dielektrik çubukların yarıçaplarının artırılmasıyla elde edilen yeni kusur kiplerine ait dispersiyon eğrileri. Yarıçapın artırılması kusur kipinin dispersiyon eğrilerinin bant diyagramında düşük frekansa doğru kaymasına sebep olmuştur.	60
Şekil 4.18. Çizgi kusurlu fotonik kristal yapısındaki dielektrik çubukların yarıçaplarının değiştirilmesi ile $k = 0,01$ noktasındaki (bant kenarındaki) normalize frekansın değişimi. ($a = 0,5 \mu\text{m}$ olarak verilmiştir.)	61
Şekil 4.19. Çizgi kusurlu fotonik kristal yapısında elde edilen kusur kipinin artan dielektrik yarıçapına bağlı olarak grup hızının değişiminin grafiği. Yarıçap değeri arttıkça grup hızı azalmış ve $k=0,01$ noktasında $r = 0,3*a$ yarıçap değeri ışığın grup hızı $0,02*c$ olarak elde edilmiştir.	62
Şekil 4.20. İki boyutlu çizgi kusurlu kare örgü simetrisine sahip fotonik kristal yapısı. Çizgi kusuruna ek olarak gri ile gösterilen dielektrik çubukların yarıçapı $r_s = 0,9*r - 1,5*r$	

aralığında değiştirilmiştir. Dielektrik çubukların etkin kırılma indisi $n_{\text{dielektrik}} = 3,46$, fon indisi $n_{\text{arka}} = 1$ olarak seçilmiştir. ($a = 0,5 \mu\text{m}$ ve $r = 0,3*a$ olarak verilmiştir.)	63
Şekil 4.21. Tasarlanan fotonik kristal yapısında kusur yarıçapının değişiminin grup hızına etkisi gösterilmiştir. Kusur yarıçapı arttıkça grup hızı azalmış ve yarıçap değerinin $1,5*r$ olduğu değer için grup hızı $Vg = 0,01*c$ olarak elde edilmiştir.	64
Şekil 4.22. İki boyutlu çizgi kusurlu kare örgü simetrisine sahip fotonik kristal yapısı. Çizgi kusuruna ek olarak kılavuz genişliği wg azaltılmıştır. Dielektrik çubukların etkin kırılma indisi $n_{\text{dielektrik}} = 3,46$, arka plan indisi $n_{\text{arka}} = 1$ olarak seçilmiştir. ($a = 0,5 \mu\text{m}$ ve $r = 0,3*a$ olarak verilmiştir.)	65
Şekil 4.23. Çizgi kusurlu fotonik kristal dalga kılavuzunun kılavuz genişliğinin $0,1*a$ oranında daraltılmasıyla elde edilen yeni kristal yapısının kusur kiplerinin dispersiyon eğrileri. Yeni kristal yapısında iki tane kusur kipi elde edilmiştir. ($a = 0,5 \mu\text{m}$ ve $r = 0,3*a$ olarak verilmiştir.).....	65
Şekil 4.24. Çizgi kusurlu fotonik kristal dalga kılavuzunun kılavuz genişliğinin $0,1*a$ - $0,3*a$ aralığında $0,1*a$ adımlarla daraltılmasıyla elde edilen yeni kristal yapısının birinci kusur kipinin dispersiyon eğrileri. ($a = 0,5 \mu\text{m}$ ve $r = 0,3*a$ olarak verilmiştir.).....	66
Şekil 4.25. Çizgi kusurlu fotonik kristal dalga kılavuzunun kılavuz genişliğinin $0,1*$ - $0,4*a$ aralığında $0,1*a$ adımlarla daraltılmasıyla elde edilen yeni kristal yapısında ikinci kusur kipinin dispersiyon eğrileri. ($a = 0,5 \mu\text{m}$ ve $r = 0,3*a$ olarak verilmiştir.).....	67
Şekil 4.26. Çizgi kusurlu fotonik kristal dalga kılavuzunun kılavuz genişliğinin $0,1*$ - $0,4*a$ aralığında $0,1*a$ adımlarla daraltılmasıyla elde edilen yeni kristal yapısında birinci kusur kipinin grup hızının genişliğe bağlı olarak değişimi. ($a = 0,5 \mu\text{m}$ ve $r = 0,3*a$ olarak verilmiştir.).....	68
Şekil 4.27. Çizgi kusurlu fotonik kristal dalga kılavuzunun kılavuz genişliğinin $0,1*$ - $0,4*a$ aralığında $0,1*a$ adımlarla daraltılmasıyla elde edilen yeni kristal yapısında ikinci kusur kipinin grup hızının kılavuz genişliğine bağlı olarak değişimi. ($a = 0,5 \mu\text{m}$ ve $r = 0,3*a$ olarak verilmiştir.).....	69
Şekil 4.28. Fotonik kristal dalga kılavuzu sensör tasarımı. Fotonik kristal yapısında çizgi kusuruna ek olarak yarıçap kusuru oluşturulmuş ve kusur yarıçapı $r_s = 1,5*r$ olarak tanımlanmıştır. ($a = 0,5 \mu\text{m}$ ve $r = 0,3*a$ olarak verilmiştir.).....	70
Şekil 4.29. Fotonik kristal dalga kılavuzu sensör tasarımı. Fotonik kristal yapısında çizgi kusuruna ek olarak yarıçap kusuru oluşturulmuş ve kusur yarıçapı $r_s = 1,5*r$ olarak tanımlanmıştır. Fotonik kristal içerisine ışığın etkin bir şekilde eşlenmesi için çiftleyici tasarımı yapılmıştır. Çiftleyici genişliği $w_{\text{çift}} = 0,35 \mu\text{m}$ olarak seçilmiştir. ($a = 0,5 \mu\text{m}$ ve $r = 0,3*a$ olarak verilmiştir.).....	71
Şekil 4.30. Çiftleyici genişliğine bağlı olarak çiftleyici verimini gösteren grafik. Çiftleyici genişliği azaldıkça ışık fotonik kristal içerisine daha etkin bir şekilde eşlenmiştir. Genişlik değeri için optimum değer $w_{\text{çift}} = 0,35 \mu\text{m}$ olarak elde edilmiştir. (Dalga boyu $\lambda = 2,04 \mu\text{m}$).....	71
Şekil 4.31. Kırılma indisi farkını temel alarak tasarlanan sensör yapısında, $\Delta n = 0,33$ indis farkına karşılık maksimum iletimin sağlandığı dalga boyundaki kayma miktarı. .	72
Şekil 4.32. Dalga kılavuzu genişliğinin $0,3*a$ oranında daraltılması ile elde edilen fotonik kristal dalga kılavuzu sensör tasarımı. Işığın etkin bir şekilde kristal içerisine çiftlenmesi için çiftleyici tasarımı yapılmıştır. Çiftleyici uzunluğu ve genişliği en büyük çiftlenme verimi için optimize edilmiştir. ($r = 0,3*a$, $a = 0,5 \mu\text{m}$ olarak seçilmiştir.).....	73
Şekil 4.33. Dalga kılavuzu genişliğinin $0,3*a$ oranında daraltılması ile elde edilen fotonik kristalde kılavuzlanan birinci kusur kipinin dispersiyon eğrisi. Birinci kusur kipinin $k = 0$	

– 0,2 aralığında 0,29 – 0,31 normalize frekans bandında kılavuzlandığı görülmektedir. ($r = 0,3*a$, $a = 0,5 \mu\text{m}$ olarak seçilmiştir.).....	74
Şekil 4.34. Dalga kılavuzu genişliğinin $0,3*a$ oranında daraltılması ile elde edilen fotonik kristalde kılavuzlanan ikinci kusur kipinin dispersiyon eğrisi. İkinci kusur kipinin $k = 0 – 0,5$ aralığında 0,19 – 0,24 normalize frekans bandında kılavuzlandığı görülmektedir. ($r = 0,3*a$, $a = 0,5 \mu\text{m}$ olarak seçilmiştir.).....	74
Şekil 4.35. Birinci kusur kipinin elektrik alan yoğunluğunu gösteren grafik. Elektrik alan yoğun bir şekilde fotonik kristal dalga kılavuzu içerisinde ilerlemektedir. Ayrıca ışığın yavaşlaması ile ışığın ortam ile etkileşimi artmış birinci ve ikinci sıra dielektrik çubuklar üzerinde yüksek elektrik alan yoğunluğu oluşmuştur.....	75
Şekil 4.36. Birinci kusur kipinin elektrik alan yoğunluğunun XZ düzleminde gösterilmesi. Elektrik alan yoğun bir şekilde fotonik kristal dalga kılavuzu içerisinde ilerlemektedir. Ayrıca ışığın yavaşlaması ile ışığın ortam ile etkileşimi artmış birinci ve ikinci sıra dielektrik çubuklar üzerinde yüksek elektrik alan yoğunluğu oluşmuştur.....	75
Şekil 4.37. İkinci kusur kipinin elektrik alan yoğunluğunu gösteren grafik. Işık dielektrik çubuklar ile daha yoğun bir şekilde etkileşim halindedir, bu sebeple elektrik alan yoğunluğu dielektrik çubuklar üzerinde artış göstermiştir.....	76
Şekil 4.38. İkinci kusur kipinin elektrik alan yoğunluğunu XZ düzleminde gösteren grafik. Işık dielektrik çubuklar ile daha yoğun bir şekilde etkileşim halindedir.....	76
Şekil 4.39. Birinci kusur kipinin fotonik kristal içerisine çiftlenmesi için gereken optimum çiftlenme uzunluğunu gösteren grafik. Grafik, çiftlenme uzunluğuna karşılık çiftlenme verimini gösterir. Birinci kusur kipinin maksimum çiftlenme verimi %29 olarak elde edilmiştir. ($\lambda = 1,675 \mu\text{m}$).....	77
Şekil 4.40. Birinci kusur kipi için kırılma indisi farkını temel alarak tasarlanan sensör yapısında, $n = 0,33$ indis farkına karşılık maksimum iletimin sağlandığı dalga boyundaki kayma miktarı.....	78
Şekil 4.41. İkinci kusur kipinin fotonik kristal içerisine çiftlenmesi için gereken optimum çiftlenme uzunluğunu gösteren grafik. Çiftlenme uzunluğuna bağlı olarak çiftlenme veriminin değişimini ifade eder. İkinci kusur kipinin maksimum çiftlenme verimi %68 olarak elde edilmiştir. (Dalga boyu $2,52 \mu\text{m}$).....	79
Şekil 4.42. İkinci kusur kipi için kırılma indisi farkını temel alarak tasarlanan sensör yapısında, $n = 0,33$ indis farkına karşılık maksimum iletimin sağlandığı dalga boyundaki kayma miktarı.....	80
Şekil 4.43. Birinci kusur kipinin dalga boyuna bağlı olarak ışığın yavaşlama oranını gösteren grafik.....	81
Şekil 4.44. İkinci kusur kipinin dalga boyuna bağlı olarak ışığın yavaşlama oranını gösteren grafik.....	81
Şekil 4.45. Birinci kusur kipinin ışığın $0,13*c$ grup hızındaki elektrik alan dağılımının grafiği.....	82
Şekil 4.46. İkinci kusur kipinin ışığın $0,13*c$ grup hızındaki elektrik alan dağılımının grafiği.....	82
Şekil 4.47. Dalga kılavuzu genişliğinin daraltılması ile elde edilen fotonik kristal dalga kılavuzu sensör tasarımı. Işığın etkin bir şekilde kristal içerisine çiftlenmesi için çiftleyici tasarımı yapılmıştır. ($r = 0,3*a$, $a = 0,5 \mu\text{m}$ olarak seçilmiştir.).....	83
Şekil 4.48. Dalga kılavuzu genişliğinin $0,4*a$ oranında daraltılması ile elde edilen fotonik kristalde kılavuzlanan ikinci kusur kipinin dispersiyon eğrisi. İkinci kusur kipinin $k = 0 – 0,5$ aralığında 0,2 – 0,24 normalize frekans bandında kılavuzlandığı görülmektedir. ($r = 0,3*a$, $a = 0,5 \mu\text{m}$ olarak seçilmiştir.).....	84

Şekil 4.49. İkinci kusur kipinin fotonik kristal içerisine çiftlenmesi için gereken optimum çiftlenme uzunluğunu gösteren grafik. Çiftlenme uzunluğuna bağlı olarak çiftlenme veriminin değişimini ifade eder. İkinci kusur kipinin maksimum çiftlenme verimi %27 olarak elde edilmiştir. (Dalga boyu 2,46 μm) 85

1. GİRİŞ

Optik, ışığın davranışlarını ve özelliklerini inceleyen fizik dalıdır. Genellikle görünür, ultraviyole ve kızılötesi ışığın davranışını tanımlar (Ziegel ve Parker 1991). Birçok optik olay ışığın elektromanyetik tanımı kullanılarak açıklanır. 19.yy'da elektromanyetik teorideki ilerleme, ışık dalgalarının aslında elektromanyetik radyasyon olduğunun keşfine yol açmıştır. Fiziksel bazı olaylar, ışığın hem dalga hem de parçacık özelliğine sahip olmasıyla açıklanır. 1900'lerde yapılan kırınım, girişim gibi deneyler ışığın dalga özelliklerini açıklarken, siyah cisim ışıması, fotoelektrik etki gibi deneyler onun parçacık özelliklerini ortaya koyuyordu. Işık parçacıklarına yakıştırılan foton ismi G.N. Lewis (1926) kuantum alanlar teorisinde elektromanyetik alanın kuantum parçacığı olarak ortaya çıkar. Bu nedenle ışık, fotonlar adı verilen parçacıklardan oluşur. Fotonların üretimi, algılanması ve iletimi konularında çalışan bilim dalına fotonik denir. Fotonik; kuantum mekaniği, optomekanik, elektro-optik, optoelektronik ve kuantum elektroniği ile yakından ilişkilidir. Fotonik biliminin temel amacı ışığın salım, iletim, modülasyon, sinyal işleme, anahtarlama, yükseltgeç ve algılama yoluyla yönetilmesini sağlamaktır (Chai Yeh 2015).

Işığın yayılımının kontrol ve yönetilmesi geçmişten günümüze fotonik alanının önemli araştırma konularından biri olmuştur (Yariv ve Yeh 1984). Işığın üzerinde sağlanan bu kontrol ise çeşitli fotonik aygıtların tasarlanmasına olanak sağlamıştır. Işık yayan diyotlar (LED'ler), süper parlak diyotlar, lazerler gibi yarı iletken tabanlı ışık kaynakları, fiberler, fotonik kristaller, fotonik kristal fiberler gibi ışığı istenilen bir yol boyunca yönlendirmek için kullanılan tasarımlar, optik yükseltgeçler, fotodedektörler ve optik modülatörler ışık üzerinde sağlanan bu kontrolün sonucu üretilen aygıtlardır. Bu tasarımlar iletişim, sağlık, savunma, bilgi işleme, sensör uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır.

Tümleşik optik, birden fazla optik bileşen içeren, fotodedektörler, optik filtreler, yükseltgeçler, modülatörler ve lazerler vb., entegre optik cihazların üretim teknolojilerini konu alan bilim dalıdır. Sensör olarak tasarlanan fotonik aygıtların çalışma prensiplerinin çoğu temeli tümleşik optiğe dayanır. Fotonik sensör olarak adlandırılan bu tasarımlar; algılamada kırılma indisi, soğurma katsayısı ve floresans olmak üzere üç temel değişkeni esas alır (Correa-Mena ve ark. 2017).

Kırılma indisi sensörü temel olarak ışık girişimine dayanır. Dalga kılavuzu ve fiber optik sensörler, Fabry-Perot ve Mach Zehnder girişimölçer sensörleri bu temeli esas alarak tasarlanan yaygın sensör çeşitleridir. Bu sensörler sıcaklık, PH, titreşim, gerinim (stres) gibi fiziksel nicelikleri ölçmek için kullanılır. Literatürde bu kapsamda yapılmış çok sayıda çalışma mevcuttur. Fabricius ve ark. (1992) yılında yaptıkları çalışmada Mach-Zender girişimölçer tabanlı kırılma indisi sensörü tasarlayıp gaz bileşiklerinin ölçümlerini gerçekleştirmişlerdir. Tian ve ark. (2008) yılında fiber tabanlı Mach-Zender girişimölçerini temel alarak orta bölümle ayrılmış iki tek kipli fiber koniğin (tapper) birleştirilmesiyle oluşan kırılma indisi sensörü tasarlamışlardır. Kao ve Taylor (1996) yılında tasarlamış oldukları Fabry-Perot girişimölçer tabanlı fiber basınç sensörüyle gerilime karşı oluşan faz farkı ölçümünün analizini sunmuşlardır. Tümleşik optik temel alınarak tasarlanan sensörlerden bir diğeri ise halka çınlaçlardır (rezonatörler) . White ve ark. (2006) yılında yaptıkları çalışmada sıvı çekirdekli bir optik halka çınlaçına (LCORR) dayanan sensör mimarisi tasarlamıştır. Tasarlanan bu yapı ile yüksek hassasiyet, daha az yer kaplama ve düşük numune tüketimi sağlanmıştır. Tsigaridas (2017) yılında yapmış olduğu optik mikro halka kırılma indisi sensörü tasarımının biyosensör olarak uygulamalarını incelemiştir. Tasarlanan sensör $\Delta n/n = 0,0003$ kırılma indisi farkı için algılama sağlamıştır. Xu ve ark. (2013) yılında bir fiber optik kırılma indisi sensör sistemi tasarlamışlardır. Bu sistem bir optik kaynak, iki fiber algılayıcı ucu, iki adet 2x2 optik bağlayıcı (coupler) ve 1x2 optik anahtardan oluşmaktadır. Sensör, Fresnel yansıtma yoğunluğuna dayalı olarak çalışmaktadır. Tasarlanan sensör ile 1550 nm dalga boyunda benzen, etanol, metanol, aseton ve gliserol gibi kimyasal sıvıların kırılma indisleri ölçülmüştür. Bu sensör sistemi düşük maliyetli, basit kullanımlı ve yüksek hassasiyete sahiptir. Kumar ve ark. (2016) yılında yapmış olduğu çalışmada çok kipli girişime dayalı ultra yüksek hassasiyetli entegre optik dalga kılavuzu kırılma indisi sensörü tasarlamıştır. Tasarlanan sensörün hassasiyeti, 1550 nm iletişim dalga boyu için 1,33 ile 1,44 arasında değişen kırılma indisi farklarında TM (TE) polarize giriş ışığı için 1370 (1160) ile 33850 (26050) nm/RIU olarak elde edilmiştir.

Optik sensörlerin algılamada esas aldığı diğerk bir değişken soğurma katsayısıdır. Işık, elektron gibi elektrik yükü taşıyan herhangi bir parçacık tarafından soğurulabilir. Soğurulan ışık, enerjisinin ve momentumunun yüklü parçacığa aktarılması ile yok olur. Soğurulan enerji, yüklü parçacığın kinetik enerjisini, potansiyel enerjisini veya her ikisini

birden arttırarak ısıtma ve atomik geçişler gibi etkilere yol açar. Soğurma katsayısı, belirli bir dalga boyunda gelen ışığın soğurulmadan önce bir malzemeye ne kadar nüfuz ettiğini belirlemek için kullanılan bir terimdir. Paul ve Kychakoff (1986) yılında çok kipli bir optik fibere dayalı azalan dalga alanı soğurma sensörü (EFA) tasarlamışlardır. Tasarlanan sensörde, azalan dalga alanı soğurulması fiber optik kılıfın (cladding) ve soğurulma katsayısının bir fonksiyonu olarak ölçülmüştür. Tüm fiber türlerinden bir yoğunluk sensörü oluşturulmuş ve performansı analiz edilmiştir. EFA sensörleri, çok kipli fiber teknolojisini kullanır bu sebeple kompakt, ucuz ve dayanıklıdır. 1994 yılında konik fiber temel alınarak tasarlanan EFA sensörlerin karşılaştırılmalı çalışması yapılmıştır. Sensörlerin hassasiyetinin; fiberin sayısal açıklığına, incelmeye oranına (taper) ve soğuran sıvının kırılma indisine bağlı olduğu gösterilmiştir. Yüksek sensör hassasiyetinin sıvının fonksiyonel kırılma indis aralığını azalttığı saptanmıştır (Gupta ve Singh 1994). 2000 yılında yapılan U şekilli proba dayalı EFA sensöründeki prop bükülme oranının hassasiyete etkisi incelenmiştir. Çalışmada farklı çekirdek çaplarına ve sayısal açıklıklara sahip fiberler kullanılmıştır. Sensör hassasiyeti, probun bükülme yarıçapının optimum değerine ulaşmaya kadar artmış ve bükülme yarıçapı değeri küçüldükçe azalmıştır. Bu çalışmada optimum bükülme yarıçapının, fiberin çekirdek yarıçapına bağlı olduğu bulunmuştur ve sayısal açıklık değeri ne kadar büyükse optimum bükülme yarıçapının o derecede büyük olduğu gösterilmiştir (Khijwania ve Gupta 2000). Armin ve ark. (2011) yılında yaptığı sarmal şekilli plastik optik fiber sensör tasarımı ile azalan dalga alanı soğurma katsayısı, metilen-mavi boyanın varlığında ölçülmüştür. Azalan dalga alanının şiddeti (evanescent field), boya derişiminin doğrusal olmayan bir fonksiyonu olarak ifade edilmiştir. Azalan dalga alanı, soğurma katsayısının PH düzeyine bağımlılığı araştırılmış ve yüksek PH değerleri için fonksiyonda doğrusal olmayan artışlar meydana gelmiştir.

Çoğu fotonik sensörlerde temel alınan yaygın parametre floresans değeridir. Floresans, bir fotonun atom veya molekül tarafından soğurulduğu ve daha düşük bir enerjide (daha uzun bir dalga boyunda) yeniden yayıldığı süreçtir. Düşük enerjili fotonun emisyonu genellikle nano ve piko saniyelik zaman ölçeğinde meydana gelir ve dalga boyundaki değişim Stokes kayması olarak adlandırılır. Floresans kuvantum verimi, yayılan uzun dalga boylu fotonların sayısının soğurulan kısa dalga boylu foton sayısına oranı ile elde edilir. Bu verim işlemin gerçekleştirildiği ortam ile değiştirilebilir. Fuh ve ark. (1988) yılında yaptığı tek kipli fiber optik floresans sensör ile algılama işlemi

gerçekleştirmişlerdir. Penisilaz, floresan PH boyasının bağlı olduğu gözenekli cam üzerindeki ince bir glurldhit membrana çapraz bağlanarak tek kipli fiber optik sensör ile ölçülmüştür. Penisilin çözeltisi, prob yüzeyinde enzimatik olarak penisiloid aside dönüştürülmüş, bu da boyanın floresan yoğunluğundaki azalma ile PH düşüşüne neden olmuştur. Bir argon iyon lazeri, floresanı uyarmak için kullanılmış ve floresan radyasyonu bir bağlantı cihazı aracılığıyla detektöre iletilmek üzere fiberde toplanmıştır. Algılama sınırı (Limit of detection) 0,1 mM penisilin olarak elde edilmiştir.

Son yıllarda, fotonik sensörler, savunma, sağlık, güvenlik, uzay, otomotiv, çevre, gıda kalite kontrolü gibi birçok alanda artan algılama uygulamaları nedeniyle büyük bir gelişme sağladı. Fotonik sensörler son on yılda çeşitli biyolojik ve kimyasal numunelerin hassas tespitinde kullanıldı (Goyal ve Pal 2015). Mikroakışkan ve fotonik teknolojisindeki gelişime paralel olarak sensör hassasiyeti ve algılama sınırı (LOD) arttı. Sensör hassasiyetinin ve algılama limitinin artması (LOD) ile daha düşük numune tüketimi, daha hızlı tespit süresi ve ölçüm başına daha düşük toplam tespit maliyeti konularında ciddi gelişmeler yaşandı (Troia ve ark. 2013). Çeşitli çalışma prensipleri bulunan fotonik sensörlerin bu tez kapsamında ele alınan bir başka çeşidi ise fotonik kristal dalga kılavuzu sensörleridir.

Fotonik kristaller ortamın dielektrik sabitinin periyodik olarak değiştirilmesi ile oluşturulmaktadır ve katı hal fiziğinde uzun yıllardır üzerinde çalışma yapılan yarı iletken malzemeler ile bazı benzer özellikler göstermektedir. Yarı iletken malzemelerde atomların periyodik olarak dizilmesi sonucu yasak enerji bant aralığı oluşmakta ve elektronlar belirli enerji değerlerine sahip olabilirken, belirli enerji değerlerine ise sahip olamamaktadır. Fotonik kristaller ise tıpkı yarı iletken malzemelerde atomların örgü modeline benzer şekilde periyodik olarak dizildiği gibi ortamın kırılma indisinin (dielektrik sabitinin) bir, iki veya üç dikey doğrultuda periyodik değişimin yapıldığı yapılardır. Bir boyutlu fotonik kristaller diğer bir deyişle çok katmanlı yapılardır. Bunlar; bir yönde periyodik olarak değişen, diğer iki yönde homojen olan, farklı kırılma indisli malzemelere sahip katmanlardan oluşur. Bragg ızgarası bu yapının bir örneğidir. İki boyutlu fotonik kristaller, kırılma indisinin xy düzleminde her iki yönde de periyodik olarak değiştiği yapılardır. Bu yapılar, yüksek kırılma indisli bir malzeme üzerine üçgen veya kare örgü yapısına sahip periyodik delikler açılarak ya da hava üzerine herhangi bir

dielektrik sabitine sahip silindirlerin periyodik olarak dizilmesiyle elde edilir (Akahane ve ark. 2003). Üç boyutlu fotonik kristaller, kırılma indisinin uzayın üç yönünde de periyodik değiştiği yapılardır (Zbay ve ark. 1994). Xy düzleminde değişim gösteren iki boyutlu kristal yapılara benzer olarak hava yerine z yönünde de periyodik olarak dizilen dielektrik malzemelerin istiflenmesiyle oluşturulur. Kırılma indisi bilinen bir ortamda periyodik kırılma indisi artışları veya azalışları olarak ortaya çıkan fotonik kristallerde, iki boyuttaki (örneğin;SOI kristallerinde silisyum kırılma indisi) malzemenin kırılma indisine fon indisi (background index) denir. Bu durumda kırılma indisi azalışları, örneğin silisyumda deliklere veya indis artışları da dikmelere (pillar) karşılık gelir.

Çok farklı yapılarda oluşturulan bu fotonik kristaller ise tıpkı yarı iletken malzemeler gibi yasak enerji bant aralığına sahip olmaktadır. Fotonik kristallerin sahip olduğu fotonik bant aralığı olarak adlandırılan bu yasak bant, belirli dalga boylarının kristal içerisinde ilerlemesini sağlarken yasak enerji aralığına denk gelen belirli dalga boylarını ise geri yansıtarak kristalin içinde ilerlemesini engellemektedir.

Bir fotonik kristal bant aralığı, temel olarak kristalin içerisinde ışığın yayılmasının yasak olduğu frekans aralığını tanımlar. Mükemmel bir kristal yapısında, kusurlar olmadıkça, bu bant aralığında ışığın fotonik kristalden geçişi mümkün olmamaktadır. Bir kusur, bu aralıktaki şekilleri ve özellikleri kusurun yapısı ile yönlendirilen fotonik durumlara yol açar. Bu fotonik durumlar, kusur kipleri olarak adlandırılır. Yamada ve ark. (2002) yılında yaptığı çalışmada, tek kipli silisyum tabanlı fotonik kristal dalga kılavuzu yapısı için ışığın iletimi incelenmiştir. Çizgi kusurları fotonik kristalde bir veya birden fazla periyodik yapının kaldırılmasıyla elde edilir. Üçgen örgü simetrisine sahip fotonik kristal dalga kılavuzu için bant diyagramları incelenmiş ve çizgi kusuru oluşturularak kusur kiplerinin fotonik bant aralığındaki davranışı incelenmiştir. Ayrıca çizgi kusuru ile oluşturulan kusur kiplerinin bu kusur aralığının genişliğinin azaltılması ile değişimi elde edilmiştir. Fotonik kristallerde kusur kiplerinin oluşmasını sağlayan diğer bir yöntem nokta kusurları oluşturmaktır. Nokta kusurları periyodik indis dağılımında bir noktanın indis farkının kaldırılmasıyla elde edilir. Dissanayake ve Wijewardena Gamalath (2015) yılında yapmış olduğu çalışmalar ile farklı fotonik kristal yapılarda oluşturulan nokta kusurları ile kusur kiplerinin değişimini incelemişlerdir. Bu çalışmanın ilk safhasında, GaAs ve havanın alternatif katmanlarından oluşan tek boyutlu fotonik kristal dalga

kılavuzunun merkezindeki GaAs katmanı kaldırılarak yapay bir kusur kipi oluşturulmuştur. Tasarlanan kusurlu fotonik kristal dalga kılavuzu yapısı için bant diyagramları ve kip alanı elde edilmiştir. Çalışmanın ikinci safhasında 0,16a yarıçap değerinde hava üzerine periyodik olarak dizilen GaAs çubuklardan oluşan iki boyutlu fotonik kristal yapısı tasarlanmış, aynı yapının merkezindeki GaAs çubuğu kaldırılmasıyla kusur kipi elde edilmiştir. Ayrıca merkezdeki GaAs çubuğun yarıçapı artırılarak bu kusur kiplerinin yarıçap ile değişimi elde edilmiştir.

Bir kristalin periyodikliği diğer bir değişle örgü sabiti değiştirilerek de yasak bant aralığı istenilen dalga boyu aralığına ayarlanabilmektedir. Bunun sonucu olarak en basit şekilde bu yapılar birer dalga boyu filtresi olarak da kullanılabilir. Costa ve ark. (2003) yılında kare örgü yapısına sahip iki boyutlu bir fotonik kristalde tek sıra kusur oluşturarak yapmış oldukları dizayn ile bant geçiren bir filtre tasarımı yapmışlardır. Chen ve ark. (2007) yılında hava üzerine dielektrik çubukların kare örgü simetrisine sahip yerleştirildiği iki boyutlu fotonik kristal yapısını tek sıra kusur oluşturmaya ek olarak dalga kılavuzunun her iki tarafında birbirine komşu olan dielektrik çubukların yarıçapını alternatif farklı yarıçaplar ile değiştirip bant geçiren filtre tasarımı yapmışlardır. Ayrıca yaptıkları çalışmayla farklı yarıçaplar için dalga boyu aralığının değişimini karakterize etmişlerdir. Dalga boyu filtresi olarak kullanılabilen bu fotonik kristal yapıları ayrıca sensör olarak da çok yaygın olarak kullanılmaktadır (Dinodiya ve ark.ve ark. 2018)

Chow ve ark. (2004) yılında tasarladıkları iki boyutlu fotonik kristal mikrovuk (mikrovukite) ile ultra kompakt sensör dizayn etmişlerdir. Hasek ve ark. (2006) yılında subterahertz aralığında sıvı tespiti için polietilen levha üzerine hava deliklerinin üçgen örgü simetrisi oluşturacak şekilde yerleştirilmesi ile fotonik kristal dalga kılavuzu tasarlamışlardır. Fotonik kristal dalga kılavuzunu dolduran çözeltinin kırılma indisine bağlı olarak farklı iletim spektrumları elde edilmiş ve durdurma bandı bölgesi derinliği incelenerek farklı kırılma indislerine sahip sıvılar ayırt edilmiştir. Lee ve Fauchet (2007) yılında ultra hassas iki boyutlu bir fotonik kristal mikrovuk tasarlamışlardır. Sensör yalıtkan bir silisyum tabakası üzerinde üretilmiş üzerine üçgen örgü simetrisi oluşturacak şekilde silindir boşluklar oluşturulmuştur. Sensör iç yüzeyinin farklı boyutlardaki proteinlerle kaplanması ile kesim dalga boyu kayma göstermiş ve 2,5 fg kadar küçük bir toplam kütleyle sahip molekül tabakası tespit edilebilmiştir. Sünner ve ark. (2008)

yılındaki çalışmalarında fotonik kristal kovuğun ortam kırılma indisine bağlı olarak değişimini incelemiş, farklı gaz ortamlarında ve basınçlarda kesim dalga boyundaki kayma miktarındaki değişimin ortamın kırılma indisıyla doğrusal bir bağımlılığa sahip olduğunu göstermişlerdir. Kırılma indisinin 0,0001 çözünürlüğündeki değişimine karşılık kesim dalga boyunda 8 pm kayma elde edilmiştir. Kang ve ark. (2010) yılında yaptıkları çalışma ile etiketsiz algılama (label free detection) için kullanılabilir yüzey alanını arttırmak amacıyla fotonik kristal dalga kılavuzu yapısı üzerinde çok delikli çeşitli kusur yapıları kullanmış ve yüzey temelli tespit hassasiyetinin artırılmasında önemli bir yol kat edilmiştir. Sensör hassasiyetini, kullanılan fotonik kristal yapıları ve bu yapıların üzerinde oluşturulan modifikasyonların dışında etkileyen diğer bir önemli faktör ise yavaş ışık etkisidir. Üstün ve Kurt (2010) yılında yapmış oldukları çalışmalar ile özel olarak tasarlanmış fotonik kristal dalga kılavuzunun yavaş ışık davranışını incelemiş, sayısal teknikler kullanılarak yapısal değişimleri ele almıştır. Üstün ve Kurt tarafından önerilen yapı yandan bağlanmış boşluklarla (side-coupled cavities) entegre kare örgü simetrisine sahip fotonik kristal dalga kılavuzundan oluşur. Bu yapıda ışığın grup hızı yüksek oranda azaltılmış ve $V_g = 0,0008c$ olarak elde edilmiştir. Işığın grup hızının yüksek oranda azaltılmasıyla elde edilen bu başarı doğrusal olmayan optikler, optik tamponlar (buffer) ve düşük eşikli lazerler için yeni bir çığır açmaktadır. Buna ek olarak ışığın yavaşlatılmasıyla sensör hassasiyetinin önemli ölçüde arttığına dair bulgular literatürde mevcuttur (Gharsallah ve ark. 2019). Bu tip sensörlerin performans özelliklerini belirleyen parametreler hassasiyet ve algılama limitidir.

Boşluktaki ışığın hızının yaklaşık 3×10^8 m/s olduğu herkes tarafından bilinen bir gerçektir. Yüksek hızlı optik iletişimde faydalarını gördüğümüz bu hızı azaltmaya çalışmak her ne kadar çelişkili gibi görünse de ışığın yavaşlatılması ile sağlanan yüksek madde-alan etkileşimi sayesinde sensör hassasiyeti önemli ölçüde artırılabilir. Hosseinibalam ve ark. (2012) yılında yaptıkları çalışma ile bir fotonik kristal platformunda optofluidik yavaş ışık dalga kılavuzuna bağlanmış halka boşluğundan oluşan sensör tasarlamışlardır. Sensör hassasiyeti yavaş ışık etkisiyle artan madde-alan etkileşimi sonucu 293 nm/RIU gibi yüksek bir hassasiyet değerine ulaşmıştır. Gharsallah ve ark. (2019) yılındaki çalışmaları ile sensör hassasiyetini ve kalite faktörünü arttırmak için yavaş ışık temelli fotonik kristal dalga kılavuzu dizaynı gerçekleştirmiştir. Bu fotonik dalga kılavuzundaki birim hücre yapıları küre yerine eliptik seçilmesi düşük oranda

dispersiyon oluşmasını sağlamıştır. İdrardaki üreyi tespit etmek üzere tasarlanan bu biyosensör idrar ve kandaki diğer bileşenlerin ölçülmesinde de kullanılabilir. Üre sensörünün duyarlılığı yavaş ışık kullanılarak 550 nm/RIU dan 650 nm/RIU'ya yükseltilmiştir.

Tezin ikinci bölümünde fotonik kristallerin teorik temelleri ele alınmıştır. Işığın fotonik kristal içerisinde yayılması elektromanyetizma ve onun temellerini oluşturan dört ana Maxwell denklemi ile belirlenir. Tez kapsamında iki boyutlu kare örgülü fotonik kristal yapılar kullanılmıştır. Bu kristaller, dielektrik sabitin xy doğrultusunda periyodik olarak değiştiği, z yönünde sabit olduğu yapılardır. Dielektrik sabitin z yönünde sabit olması, $(\partial/\partial z = 0)$, dalga vektörü k 'nın z yönünde bileşeni olmadığını ifade eder (Joannopoulos ve ark. 2008). Maxwell denklemleri E_z ve H_z bileşenine göre yeniden düzenlenir ve elektromanyetik dalga olan ışığın iki adet polarizasyonu, TE ve TM, için iki ayrı denklem yazılır. Konum vektörü (\mathbf{r}) örgünün iki boyutta periyodik olması sebebiyle x ve y bileşenleri ile ters örgü uzayında yeniden ifade edilir. Periyodik dielektrik fonksiyonu Fourier serilerine açılır. Fotonik kristal yapısı teoride sonsuz kabul edilirse aslında elektrik ve manyetik alanlar sonsuz sayıdaki düzlem dalganın toplamı olarak gösterilebilir. Fourier serisi toplamı şeklinde gösterilen bu ifade, TE ve TM polarizasyon için yazılan iki ayrı denklemde yerine bırakılıp özdeğer denklemleri elde edilir. Bu açımdan elde edilen özfonksiyonlar kipleri ve özdeğerler hareket sabitini tanımlar (Joannopoulos ve ark. 2008). TE ve TM polarizasyon için oluşturulan iki adet denklemden herhangi biri çözümlenerek ışığın farklı polarizasyonları için bant yapıları elde edilebilir. Fotonik kristalin sonsuz uzunlukta ifade edilmesi \mathbf{k} 'da sonsuz uzunlukta olduğunu ifade eder. Bant yapısı aslında denklem çözümünde elde edilen her \mathbf{k} dalga vektörüne karşılık gelen özdeğer yani öz frekansın hesaplanmasıyla elde edilen diyagramdır. Yapının periyodik olması sonsuz uzunlukta kabul edilen kristalin ilk Brillion bölgesi olarak adlandırılan ter örgü uzayının tek periyodunda çözülebilmesini sağlar. İlk Brillion bölgesindeki k değerleri için elde edilen bant yapısı kristalin bütün bant yapısına karşılık gelir (Ayas 2011).

Tezin üçüncü bölümünde ışığın fotonik kristal içerisinde ne kadar etkin ilerlediğinin hesabının yapıldığı zamanda sonlu farklar yöntemi ve fotonik kristalin bant diyagramlarının hesaplamalarının yapıldığı düzlem dalga açılımı yöntemi ele alınmıştır.

Bölüm 2’de fotonik kristal teorik temelleri anlatılmış ve dalga çözümünde kullanılacak denklemler belirlenmiştir. Denklemlerin nümerik bant çözümleri için düzlem dalga açılımı yöntemini kullanan bir ve iletim grafiklerinin hesaplanması için zamanda sonlu farklar yöntemini kullanan ikinci bir ticari benzetim yazılımı kullanılmıştır (Rsoft 2006). Bu benzetim yazılımının arayüzleri ve hesaplamaları yaparken kullandığı yöntemlerin teorik alt yapısı bu bölümde incelenmiş ve elde edilen çıktılar sunulmuştur.

Tezin dördüncü bölümünde iki boyutlu kare örgülü fotonik kristaller incelenmiş, bu yapılar için elde edilen bant diyagramları ve iletim grafikleri gösterilmiştir. Fotonik kristalin dielektrik çubuk yarıçapı, kristalin periyodu (örgü sabiti) gibi parametrelerinin bant yapısına ve ışığın kristal boyunca yayılımının etkinliğine etkisi incelenmiştir. Fotonik kristallerde çizgi kusurları oluşturulmuş ve bu kusurlar sonucu oluşan kusur kiplerinin dispersiyon eğrileri incelenmiştir. Dispersiyon eğrileri üzerinden ışığın grup hızı hesabı yapılmış ve ışığın çeşitli fotonik kristal dalga kılavuzu yapılarındaki yavaşlama oranı elde edilmiştir. Bu fotonik kristal dalga kılavuzu yapıları sensör olarak kullanılmış ve kimyasal madde algılamasındaki hassasiyet değeri belirlenmiştir. Işığın yavaşlamasının sensör hassasiyetine etkisi gösterilmiş ve daha hassas sensör yapılarının tasarımı için dikkat edilecek hususlar belirtilmiştir.

Tezin beşinci bölümünde elde edilen sonuçlar özetlenmiş ve tasarımı yapılan üç farklı fotonik kristal sensörün karşılaştırılması sunulmuştur.

2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1 Elektromanyetizma ve Maxwell Denklemleri

Elektromanyetizma, elektrik yüklü parçacıklar arasındaki etkileşimleri açıklayan kuramsal bir yaklaşımdır. Elektromanyetizma, etkileşimler sırasında ortaya çıkan elektromanyetik dalgaların davranışını da açıklar. Elektromanyetik spektrumun ultraviyolede mikrodalgaya kadar olan bölgesini ışık olarak adlandırırsak, onun bir fotonik kristal içerisinde yayılmasını elektromanyetizma ve onun temellerini oluşturan dört ana Maxwell denklemi belirler. Maxwell denklemleri aşağıda gösterilmiştir.

$$\begin{aligned}\nabla \cdot \mathbf{B} &= 0 & \nabla \times \mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} &= 0 \\ \nabla \cdot \mathbf{D} &= \rho & \nabla \times \mathbf{H} - \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} &= \mathbf{J}\end{aligned}\tag{2.1}$$

Denklem 2.1’de verilen eşitliklerde \mathbf{E} elektrik alan, \mathbf{B} manyetik alan vektörünü ifade eder. \mathbf{D} deplasman vektörünü, \mathbf{H} manyetik alan yoğunluğunu gösterir. Ayrıca yük yoğunluğu ρ ve akım yoğunluğu \mathbf{J} olarak verilmiştir.

Işık; serbest yüklerin ve akımların olmadığı (dielektrikler), yapının da zamanın değil konum vektörünün bir fonksiyonu olarak değiştiği, homojen dielektrik malzeme bölgelerinin bileşimi olan bir ortamda ilerlediğinde, \mathbf{D} ile \mathbf{E} arasındaki ilişkiyi, denklem 2.2’de verilen güç serileri toplamı şeklinde yazabiliriz (Bloembergen 1965).

$$D_i / \varepsilon_0 = \sum_j \varepsilon_{ij} E_j + \sum_j X_{ijk} E_j E_k + O(E^3)\tag{2.2}$$

Malzemenin yük kutuplayabilme özelliğini tanımlayan dielektrik sabit denklem 2.2’de ε ile ifade edilmiştir. Katsayıları küçük olduğu için, alan büyüklüklerinin küçük olduğu varsayımı yapılırsa, denklemden doğrusal olmayan terimler çıkarılabilir. Ayrıca dielektrik malzemenin makroskopik ve izotropik olduğu kabul edilirse, \mathbf{D} ile \mathbf{E} arasındaki bağıntı denklem 2.3’te verildiği gibi skaler bir dielektrik sabiti ile ilişkilendirilebilir.

$$\mathbf{D} = \varepsilon(\mathbf{r}) \mathbf{E} \quad (2.3)$$

Denklem 2.3'te verilen dielektrik sabiti gerçek ve frekanstan bağımsızdır. Ayrıca \mathbf{B} ile \mathbf{H} arasındaki ilişki denklem 2.4'te verilmiştir.

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (2.4)$$

Denklem 2.4'te verilen μ sabiti, manyetik geçirgenliği ifade eder. Pratikte kullanılan çoğu dielektrik malzeme için manyetik geçirgenlik bire eşittir. Elde edilen yeni ifade denklem 2.5'te verilmiştir.

$$\mathbf{B} = \mathbf{H} \quad (2.5)$$

Denklem 2.1'de verilen Maxwell denklemleri akımın ve serbest yüklerin olmadığı kabul edilerek yeniden yazılırsa \mathbf{H} 'a bağlı olarak aşağıda verildiği gibi yazılır:

$$\nabla \times \frac{1}{\varepsilon(\mathbf{r})} \nabla \times \mathbf{H}(\mathbf{r}) = \frac{1}{c} \frac{\partial^2 \mathbf{H}(\mathbf{r})}{\partial t^2} \quad (2.6)$$

Denklem 2.6'da verilen eşitliklerde c ile gösterilen sabit, ışık hızını ifade eder. Dielektrik fonksiyon ve manyetik alan konuma bağlı olduğu için denklem 2.6'da verildiği gibi sırasıyla $\varepsilon(\mathbf{r})$, $\mathbf{H}(\mathbf{r})$ olarak ifade edilir.

Dielektrik geçirgenlik sabiti ve manyetik geçirgenlik sabiti arasındaki ilişki denklem 2.7'de gösterilmiştir.

$$c = \sqrt{\varepsilon\mu} \quad (2.7)$$

Denklem 2.6'da verilen eşitlik kuantum mekaniğinde tanımlanan Schrödinger denkleminde benzerdir. Denklem 2.6'da eşitliğin sol tarafında verilen $\nabla \times \frac{1}{\varepsilon(r)} \nabla \times$ operatörü Hamiltonyen operatörü olarak adlandırılır ve Schrödinger denkleminde tanımlanan $\nabla^2 + V$ operatörüne karşılık gelir. Denklemin sağ tarafında yer alan $\frac{\partial^2}{\partial t^2}$ zaman türevi ifadesi Schrödinger denklemindeki $i \frac{\partial}{\partial t}$ türev ifadesinin yerini almaktadır (Johnson 2001).

Schrödinger denklemindeki V potansiyel fonksiyonunun yerini fotonik kristaller yapılarında denklem 2.6'da $\frac{1}{\varepsilon(r)}$ olarak ifade edilen dielektrik fonksiyon almaktadır. Denklem 2.6'da verilen eşitlik karşılık koşulu sahiptir. Karşılık koşulu (transversality), olası tüm öz çözümlerin bir alt uzayında çalışıldığını ifade eder (Johnson 2001).

Denklem 2.6'da verilen eşitlik doğrusal olduğundan, $\frac{\partial}{\partial t}$ yerine $e^{-i\omega t}$ yazılarak elde edilen zaman harmoniği formu, elde edilebilecek tüm olası çözümleri içerir (Johnson 2001). Denklem zaman harmoniği formunda yazılırsa,

$$\nabla \times \frac{1}{\varepsilon(r)} \nabla \times \mathbf{H}(\mathbf{r}) = \left(\frac{\omega}{c}\right)^2 \mathbf{H}(\mathbf{r}) \quad (2.8)$$

denklem 2.8'de verilen Helmholtz eşitliği elde edilir. Denklem 2.8'de ifade edilen Helmholtz eşitliği kullanılarak $\mathbf{H}(\mathbf{r})$ fonksiyonu üzerinde bir dizi işlem gerçekleştirildiğinde $\mathbf{H}(\mathbf{r})$ 'nin elektromanyetik bir kipi, yine aynı şekilde orijinal $\mathbf{H}(\mathbf{r})$ fonksiyonunun sabit bir katı olacaktır (Joannopoulos ve ark. 2008). Bu durum özdeğer problemi olarak adlandırılır. Eğer bir fonksiyonun üzerindeki işlemin sonucu, sadece bir sabitle çarpılan fonksiyonun kendisine eşitse, elde edilen fonksiyona bu operatörün öz fonksiyonu veya öz vektörü denir. Çarpma sabiti ise özdeğer olarak adlandırılır.

Temel eşitliğin sol tarafını, genel özdeğer problemi şeklinde ifade edebilmek için $\mathbf{H}(\mathbf{r})$ 'yi üzerine etki eden bir fark operatörü $\hat{\Theta}$ ile yeniden tanımladığımızda denklem 2.9 elde edilir (Joannopoulos ve ark. 2008).

$$\hat{\Theta}\mathbf{H}(\mathbf{r}) = \left(\frac{\omega}{c}\right)^2 \mathbf{H}(\mathbf{r}) \quad (2.9)$$

Denklem 2.9’da verilen eşitlik rotasyonele tabi tutulup dielektrik sabite bölünüp yeniden rotasyoneli alınırsa denklem 2.10’da verilen eşitlik elde edilir.

$$\hat{\Theta}\mathbf{H}(\mathbf{r}) \cong \nabla \times \left(\frac{1}{\varepsilon(r)} \nabla \times \mathbf{H}(\mathbf{r}) \right) \quad (2.10)$$

Özvektörler $\mathbf{H}(\mathbf{r})$ harmonik kiplerinin uzamsal profilini ve özdeğerler $\left(\frac{\omega}{c}\right)^2$ harmonik kiplerin öz frekanslarını ifade eder.

Denklem 2.8’de verilen eşitlik her ω öz frekansı için bir dalga vektörüne sahiptir. Daha sonraki bölümlerde anlatılan fotonik kristallerin bant diyagramının hesaplanması, aynı zamanda momentum uzayında k olarak gösterilen dalga vektörüne karşılık gelen enerji durumlarının hesaplanmasını içerir. Bu sebeple denklem 2.8’de gösterilen Hermisyen özdeğer problemi fotonik kristallerin bant aralıklarının ve bant yapılarının hesaplanmasında kullanılan ana denklemi ifade eder.

Denklem 2.8’de verilen $\nabla \times \frac{1}{\varepsilon(r)} \nabla$ operatörü Hermisyendir yani karmaşık eşleniğinin transpozesi (devriği) kendisine eşittir. Bu sebeple bu operatörün oluşturmuş olduğu matris kare bir matristir ve köşegenleri üzerinde bulunan değerler gerçek bir sayıdır. Bu sebeple dielektrik fonksiyonun ve özdeğer denkleminin sonucunda elde edilen özdeğerler yani öz frekanslar gerçek bir sayı değeri olmaktadır.

Fotonik kristaldeki birim uzunluk a ile ifade edilir ve tüm uzunluklar periyodun katları şeklinde gösterilir. Ayrıca frekans değerleri ω ‘nın $2\pi c/a$ katları şeklinde verilir ve bu ifade a/λ ile özdeştir, λ ışığın dalga boyunu gösterir.

2.2 Fotonik Kristallerde Tedirgeme Kuramı

Kuantum mekaniğinde tedirgeme kuramı (pertürbasyon teorisi), karmaşık bir kuantum sistemini daha basit bir sistemle ifade etmek için doğrudan matematiksel bir pertürbasyonla ilgili bir dizi yaklaşımdır. Tedirgeme yaklaşımında çözümleri bilinen basit bir sistemle başladıktan sonra fiziksel olguyu ifade edecek diferansiyel denklemlere küçük terimler ilave edilir ve tedirgen (perturbed) olan sistemi ifade eden fiziksel nicelikler, basit sistemin çözümlerine düzeltmeler olarak bulunur. Burada tedirgeme küçük olmalıdır. Fotonik kristallere uygulandığında, mükemmel doğrusal ve kayıpsız bir fotonik kristal basit sistemi oluşturur. Ancak, gerçek fotonik kristaller için bu, idealin sadece bir yaklaşımıdır. Doğrusal Hermisyen özdeğer problemlerinde küçük doğrusalsızlıkları ifade etmek için kullanılan tedirgeme kuramı; elektromanyetik kuramda dielektrik fonksiyonundaki küçük değişimlerin, kiplerin ve frekansların üzerindeki etkisini yaklaşık olarak değerlendiren bir yöntemdir (Joannopoulos ve ark. 2008).

Kuantum mekaniğinden ödünç alınan kavramlardan birisi de Hamiltonyen operatörüdür. Sistemin toplam enerjisini ifade eden bu kavram sistemin toplam enerjisinin ölçümüyle elde edilecek enerji durumlarını (özdeğerleri) belirlememizde temel bir kavramdır. Fiziksel niceliklerin gerçek değerler olması Hamilton operatörlerin Hermisyen olmasını gerektirir. Maxwell denklemlerinden yola çıkarak, $\hat{\Theta} = \nabla \times \frac{1}{\epsilon(r)} \nabla \times$ olarak tarif edeceğimiz Hermisyen bir diferansiyel operatörün, (denklem 2.11a) az miktarda değişimi (tedirgemesi) $\Delta\hat{\Theta}$ ile ifade edilir. Oluşan yeni operatörün özdeğerleri ve özvektörleri, tedirgeme miktarına bağlı olarak seri açılımı şeklinde yazılabilir. Elde edilen yeni denklem, tedirgemeye uğramamış operatörün öz kipleri kullanılarak sırasıyla çözülür. Dielektrik ortam üzerindeki değişimler ile ilgilendiğimiz için, denklem 2.11a'ya tedirgeme kuramı uygulanarak oluşan frekans kayması denklem 2.11b'de gösterilen varyasyonel problemi ile ifade edilir (Joannopoulos ve ark. 2008).

$$\nabla \times \frac{1}{\varepsilon(\mathbf{r})} \nabla \times \mathbf{H}(\mathbf{r}) = \left(\frac{\omega}{c}\right)^2 \mathbf{H}(\mathbf{r}) \quad (2.11a)$$

$$\nabla \omega = -\frac{\omega}{2} \frac{\int d^3r \Delta \frac{1}{\varepsilon(\mathbf{r})} |\mathbf{H}(\mathbf{r})|^2}{\int d^3r \frac{1}{\varepsilon(\mathbf{r})} |\mathbf{H}(\mathbf{r})|^2} + O\left(\Delta \left(\frac{1}{\varepsilon(\mathbf{r})}\right)^2\right) \quad (2.11b)$$

Burada ω zaten bilindiğinden, $\Delta\omega$ bulmak, çözümleri verir. Denklem 2.11a ve 2.11b 'de verilen ω ve \mathbf{H} mükemmel doğrusal ve kayıpsız yani pertürbe edilmemiş dielektrik fonksiyonunun frekans ve kip profilidir.

Kırılma indisi $n = \sqrt{\varepsilon}$ olarak ifade edilir ve tedirgin edilen yapıda kırılma indisi de aynı şekilde küçük miktarlarda değişime uğrar, bu değişim de Δn olarak ifade edilir. $\Delta n/n$ oranının tüm tedirgin edilen alan için aynı olduğu varsayılırsa, denklem 2.11b'deki karmaşık eşitlik, denklem 2.12'de gösterilen basit yaklaşıma dönüşür (Joannopoulos ve ark. 2008).

$$\frac{\Delta\omega}{\omega} \approx -\frac{\Delta n}{n} \cdot \left(\int \frac{1}{\varepsilon} |\mathbf{H}|^2 \right) \quad (2.12)$$

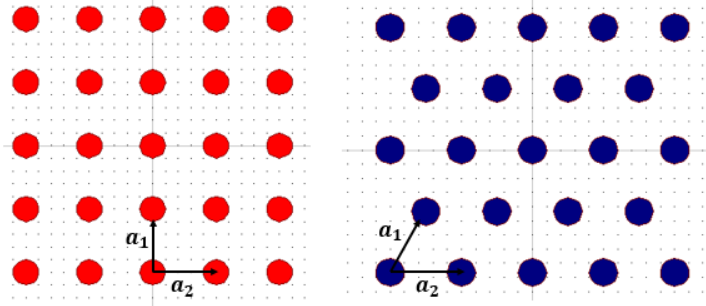
Frekanstaki küçük değişim, denklem 2.12'de gösterildiği gibi kırılma indisindeki değişimin tedirgin bölge içindeki manyetik alanın büyüklüğü ile ilişkilidir.

2.3. İki Boyutlu Fotonik Kristaller ve Bant Yapıları

İki boyutlu fotonik kristal yapılar, üçgen örgü veya kare örgü simetrisine göre bir plaka üzerine dielektrik çubukların ya da dielektrik sabiti yüksek bir plaka üzerine deliklerin periyodik olarak yerleştirilmesi ile elde edilir. İki boyutlu fotonik kristal yapılar, alan polarizasyonunu destekleme özelliğine göre enine elektrik yani TE ya da enine manyetik

TM bant aralıklarına sahip olurlar. Sadece TM ya da TE bant aralıklarına sahip fotonik kristal yapılar dışında her iki alan polarizasyonunu da destekleyen tasarımlar da mümkündür. Bu tasarımın en yaygın örneği yüksek dielektrik tabaka üzerine açılan deliklerin üçgen örgü simetrisine göre periyodik olarak yerleştirilmesi ile elde edilen fotonik kristal tasarımlarıdır.

Dielektrik geçirgenliği ϵ_a olan dielektrik çubukların z eksenine paralel olduğu varsayılırsa bu çubukların xy düzlemi ile kesişme yerleri iki boyutlu bir örgü oluşturur. Bu örgüler simetrilerine göre üçgen ya da kare olarak adlandırılır. Şekil 2.1’de kare örgü ve üçgen örgü simetrisine sahip fotonik kristal yapıları ve birim vektörleri verilmiştir (Morton 2002).



Şekil 2.1. XY düzleminde iki boyutlu fotonik kristal yapıları. (a) Kare örgü simetrisine sahip fotonik kristalin birim vektörleri. (b) Üçgen örgü simetrisine sahip fotonik kristalin birim vektörleri.

Şekil 2.1’de verilen fotonik kristallerin örgülerinin birim hücresi aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$r = l a_1 + m a_2 \quad (2.13)$$

Denklem 2.13’te verilen eşitlikte yer alan a_1, a_2 örgünün iki ilkel (temel) örgü vektörüdür ve l, m herhangi iki tam sayı değeridir.

Örgü sabiti a olan bir kare örgü yapısı için,

$$a_1 = a [1,0] \quad (2.14)$$

$$a_2 = a [0,1] \quad (2.15)$$

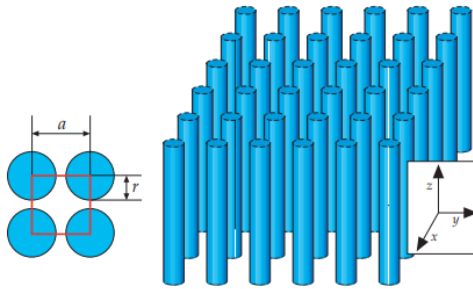
örgü vektörleri a_1 , a_2 denklem 2.14 ve denklem 2.15'te verilmiştir.

Örgü sabiti a olan üçgen örgü yapısı için örgü vektörleri, denklem 2.16 ve 2.17'de verilmiştir.

$$a_1 = a \left[\frac{\sqrt{3}}{2}, \frac{1}{2} \right] \quad (2.16)$$

$$a_2 = a \left[-\frac{\sqrt{3}}{2}, \frac{1}{2} \right] \quad (2.17)$$

Kare örgü simetrisine göre dielektrik çubukların periyodik olarak dizilmesiyle oluşturulan fotonik kristal yapısı Şekil 2.2'de gösterilmiştir.

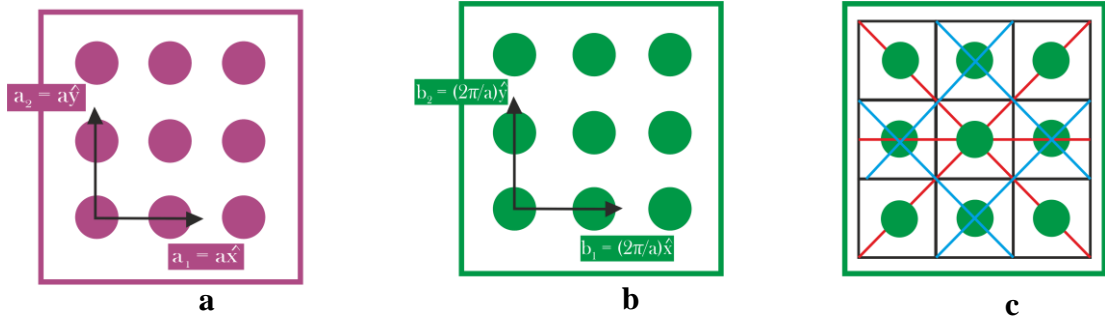


Şekil 2.2. İki boyutlu kare örgü simetrisine sahip fotonik kristal yapısı. Dielektrik çubukların yarıçapı r ve örgü sabiti a ile gösterilmiştir. Malzeme z düzlemi boyunca homojendir ve yapı x,y düzlemlerinde a örgü sabiti ile periyodiktir (Joannopoulos ve ark. 2008).

Şekilde mavi ile gösterilen dielektrik çubuklar yüksek dielektrik geçirgenliğe sahiptir ve ϵ_a ile gösterilmiştir. Fonun dielektrik geçirgenliği düşüktür ve ϵ_b ile gösterilmiştir.

Yoğun madde fiziğinde ideal kristallerdeki periyodik potansiyel altında Schrödinger denkleminin çözümleri frekans ω ile dalga vektörü, k arasındaki ilişkiyi verir. Kristallerin periyodik yapısı için tarif edilen gerçek örgünün (konum uzayı) Fourier dönüşümü ters örgüyü (momentum uzayı) verir. Ters örgü uzayı, periyodik yapıların analitik çalışmasında ve özellikle kırınım teorisinde önemlidir. Bir kristalin benzersiz özelliklerini tanımlamak için kullanılan Wigner-Seitz hücresi, sonsuz sayıda birim hücreye sahip kristalin, örgü noktasına diğer örgü noktalarından daha yakın olan hücreyi tanımlar. Bu hücre, ayrık öteleme simetrisinin tanımlandığı temel alandır. Ters örgünün Wigner-Seitz hücresi ilk Brillion bölgesi olarak adlandırılır.

Kare örgü simetrisine sahip fotonik kristal yapısının gerçek örgü uzayı ve ters örgü uzayındaki birim vektör hücreleri Şekil 2.3'te verilmiştir.



Şekil 2.3. (a) İki boyutlu kare örgü simetrisine sahip fotonik kristalin gerçek örgü uzayındaki birim vektör hücreleri (b) İki boyutlu kare örgü simetrisine sahip fotonik kristalin ters örgü uzayındaki birim vektör hücreleri (c) Ters örgü uzayının birim hücresinin alanı Brillion bölgesini oluşturur.

Gerçek örgüde, Bravais örgüsü, örgü Weigner-Seitz hücrelerine ayrılır. Ters örgü uzayının benzersiz birim hücresi Brillion bölgesidir. Brillion bölgesinin önemi, periyodik dalgaları tanımlamak için kullanılan Bloch teoreminden gelir. Periyodik fotonik kristal yapısını, ilk Brillion bölgesinde çözmek aslında tüm kristal yapısını karakterize etmektir.

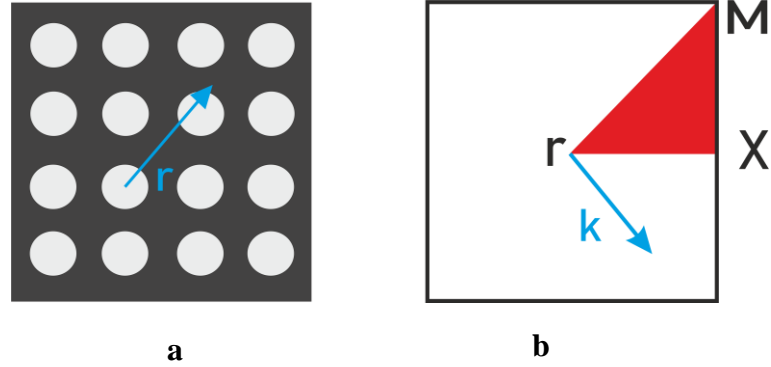
İlk Brillion bölgesinin diğere bir tanımı, momentum uzayında Bragg düzlemini geçmeden oluşturulabilecek noktalar kümesidir. İlk Brillion bölgesinin tüm simetrier tarafından indirgenmesiyle oluşan alan indirgenemez Brillion bölgesidir. Genişletilmiş Brillion bölgesi (n.Brillion Bölgesi) , n-1 adet Bragg düzlemini geçerek ulaşılan noktalar kümesidir. Bu bölgelerin (n adet Brillion Bölgesi) hepsi aynı alana sahiptir.

Şekil 2.3c’de ters örgü uzayında genişletilmiş Brillion Bölgesi gösterilmiştir. Brillion bölgesinin indirgenemez kısmı mavi taralı alan içerisinde gösterilmiştir. İndirgenemez Brillion bölgesinin k uzayındaki yüksek simetriye sahip noktaları $\vec{X}, \vec{\Gamma}, \vec{M}$ ile gösterilir ve bu noktaların konumları örgü sabiti, a cinsinden aşağıda verilmiştir (Morton 2002):

$$\vec{\Gamma} = \frac{2\pi}{a} [0, 0] \quad (2.18)$$

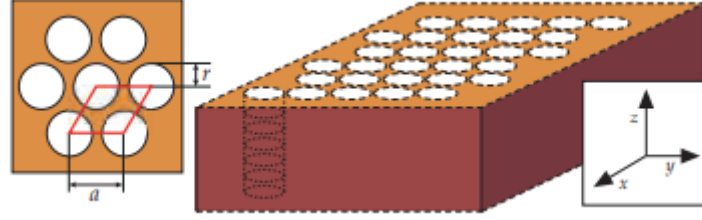
$$\vec{M} = \frac{2\pi}{a} \left[\frac{1}{2}, \frac{1}{2} \right] \quad (2.19)$$

$$\vec{X} = \frac{2\pi}{a} \left[\frac{1}{2}, 0 \right] \quad (2.20)$$



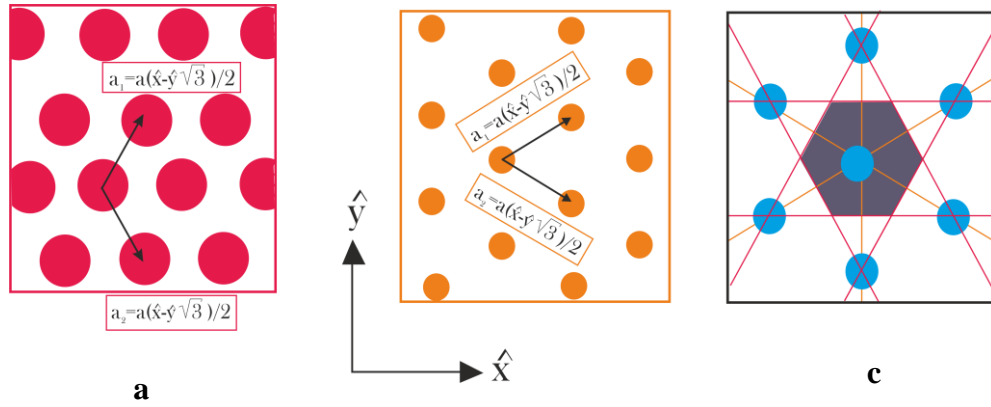
Şekil 2.4. (a) İki boyutlu kare örgü simetrisine sahip fotonik kristal yapısı **(b)** İki boyutlu kare örgü simetrisine sahip fotonik kristalin ters örgü uzayındaki indirgenemez Brillion Bölgesi ($\vec{X}, \vec{\Gamma}, \vec{M}$ indirgenemez Brillion bölgesinin özel noktalarıdır.), k ($= \frac{2\pi}{a}$) dalga vektörüdür.

Dielektrik çubuk dizilimine benzer şekilde, dielektrik bir tabaka üzerinde üçgen örgü simetrisine uygun olarak deliklerin periyodik olarak yerleştirilmesi ile elde edilen fotonik kristal tasarımı Şekil 2.5’te verilmiştir.



Şekil 2.5. İki boyutlu üçgen örgü simetrisine sahip fotonik kristal yapısı. Tasarım dielektrik sabiti yüksek bir tabaka üzerine deliklerin açılması ile elde edilmiştir. Delik yarıçapı r ve örgü sabiti a olarak verilmiştir. Deliklerin dielektrik sabiti $\epsilon_d = 1$ olarak verilmiştir. Sol taraftaki çerçeve ile gösterilen alan üçgen örgülü fotonik kristal yapısının birim hücrelerini ifade eder (Joannopoulos ve ark. 2008).

Şekil 2.5’te turuncu ile gösterilen dielektrik plaka yüksek dielektrik geçirgenliğe sahiptir ve ϵ_p ile gösterilmiştir. Deliklerin (boşlukların) dielektrik geçirgenliği düşüktür ve ϵ_d ile gösterilmiştir.



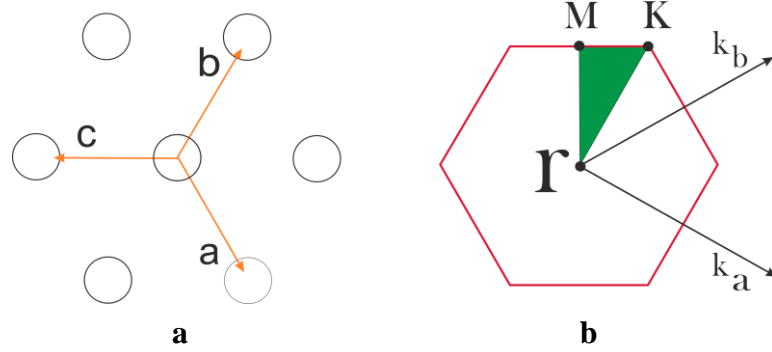
Şekil 2.6. (a) İki boyutlu üçgen örgü simetrisine sahip fotonik kristalin gerçek örgü uzayındaki birim vektör hücreleri (b) İki boyutlu üçgen örgü simetrisine sahip fotonik kristalin ters örgü uzayındaki birim vektör hücreleri (c) Ters örgü uzayının birim hücrelerinin alanı Brillion bölgesini oluşturur. İndirgenemez Brillion bölgesi mor renkle gösterilmiştir.

Şekil 2.6’da üçgen örgülü fotonik kristal yapısına ait birim hücrelerin gerçek örgü uzayı ve ters örgü uzayındaki birim hücre vektörleri gösterilmiştir. Şekil 2.6c’de ters örgü uzayında genişletilmiş Brillion Bölgesi gösterilmiştir. Brillion bölgesinin indirgenemez kısmı mor renkle gösterilmiştir. İndirgenemez Brillion Bölgesinin yüksek simetriye sahip k uzayı noktaları $\vec{X}, \vec{\Gamma}, \vec{M}$ ile gösterilir ve bu noktaların konumları örgü sabiti, a cinsinden aşağıda verilmiştir (Morton 2002):

$$\vec{\Gamma} = \frac{2\pi}{a} [0, 0] \quad (2.21)$$

$$\vec{M} = \frac{2\pi}{a} \left[\frac{\sqrt{3}}{3}, 0 \right] \quad (2.22)$$

$$\vec{X} = \frac{2\pi}{a} \left[\frac{\sqrt{3}}{3}, \frac{1}{3} \right] \quad (2.23)$$



Şekil 2.7. (a) İki boyutlu üçgen örgü simetrisine sahip fotonik kristal yapısı **(b)** İki boyutlu üçgen örgü simetrisine sahip fotonik kristalin ters örgü uzayındaki indirgenemez Brillion Bölgesi ($\vec{X}, \vec{\Gamma}, \vec{M}$ indirgenemez Brillion bölgesinin özel noktalarıdır.), k dalga vektörüdür. İndirgenemez Brillion bölgesi yeşil renkle gösterilmiştir.

İlk Brillion bölgesi, fotonik kristal bant yapısı hesaplanırken izlenen k alanı yörüngesini tanımlar. İlk Brillion bölgesi dışındaki diğer tüm k noktaları için bant yapısı, Brillion bölgesinin simetrisinden yararlanılarak bulunur.

2.4. Bloch Kuramı ve Fotonik Kristal Bant Aralığı

Bloch kuramı, yoğun madde fiziğinde Schrödinger denkleminin periyodik potansiyel altında çözümlerinin de periyodik olduğunu belirtir. Bu çözümler $\psi(r) = e^{ik \cdot r} f(r)$ şeklinde ifade edilir ve ψ dalga fonksiyonu, $f(r)$ de konuma bağlı periyodik bir fonksiyondur (Kittel 2004).

Konuma bağlı periyodik bir fonksiyon olan $f(r)$, örgünün birim vektörü olan \mathbf{R}_i kadar ötelenirse $f(\mathbf{r} + \mathbf{R}_i) = f(\mathbf{r})$ olacaktır. Fotonik kristaller bir, iki, üç boyutta periyodik olabilir. Kristalin ilkel örgü vektörleri \mathbf{R}_i her boyut için tanımlanabilir. Bloch kuramının sonucu olarak dalga vektörü k korunur. Denklem 2.8'de verilen ana eşitlik periyodik bir $\epsilon(r)$ fonksiyonu için Bloch kuramı uygulanarak yeniden tanımlanırsa fotonik kristallerde manyetik alan ifadesi denklem 2.24'teki şekilde yazılabilir (Johnson 2001).

$$\mathbf{H}(\mathbf{r}) = e^{i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t)} \mathbf{H}_{\mathbf{k}}(\mathbf{r}) \quad (2.24)$$

Manyetik alan ifadesi denklem 2.24'teki periyodik forma dönüşür. Denklem 2.24'te gösterilen $\mathbf{H}_{\mathbf{k}}(\mathbf{r})$ konumun bir fonksiyonudur. Denklem 2.24'te verilen periyodik alan ifadesi, denklem 2.6'da yerine bırakılırsa $\mathbf{H}_{\mathbf{k}}(\mathbf{r})$ fonksiyonunun indirgenmiş Hermisyen bir özdeğer problemini karşıladığı görülür ve ifade denklem 2.25'te verilen eşitlik ile ifade edilir (Johnson 2001).

$$(\nabla + i\mathbf{k}) \times \frac{1}{\epsilon} (\nabla + i\mathbf{k}) \times \mathbf{H}_{\mathbf{k}}(\mathbf{r}) = \left(\frac{\omega}{c}\right)^2 \mathbf{H}_{\mathbf{k}}(\mathbf{r}) \quad (2.25)$$

$\mathbf{H}_{\mathbf{k}}(\mathbf{r})$ periyodik bir fonksiyon olduğu için, denklem 2.25'te ifade edilen özdeğer problemi örgü birim hücresi olarak adlandırılan sınırlı bir alan içerisinde çözülebilir. Sınırlı bir alanda çözülen özdeğer problemleri ayrık özdeğerler kümesi üretir. Bu sebeple ω öz frekansları, $\omega_n(\mathbf{k})$ ile ifade edilir, n tam sayı değerlerini ifade eder. Dalga vektörü k 'ya karşılık öz frekansların elde edilmesi ile kristalin bant diyagramı oluşturulur.

Bir boyutlu fotonik kristal örneği için, örgü periyodu a olarak verilirse, yapının dielektrik fonksiyonu $\epsilon(\mathbf{r} + a) = \epsilon(\mathbf{r})$ olarak gösterilir. Denklem 2.25'te verilen özdeğer problemini $k = 0, \frac{2\pi}{a}$ aralığında çözmek yeterlidir. Dalga vektörü k 'nın $0, \frac{2\pi}{a}$ aralığındaki sınırlı bölgesi ilk Brillion Bölgesi olarak adlandırılır. Ayrıca simetrielerin varlığı göz önüne alınarak bu aralık $0, \frac{\pi}{a}$ aralığına sınırlandırılabilir. Simetri ile sınırlandırılmış bu bölge indirgenemez Brillion Bölgesi olarak adlandırılır (Johnson 2001).

Fotonik bant aralığını tanımlayabilmek için iki temel kurala değinmek gerekir. Öncelikle özdeğerlere karşılık gelen özfonksiyonlar ortogonal olmalıdır yani denklem 2.26'da gösterilen eşitlikte belirtildiği gibi iç çarpımları sıfır olmalıdır (Johnson 2001).

$$\int \mathbf{H}_k^{(m)*} \mathbf{H}_k^{(n)} = 0 \quad (2.26)$$

Denklem 2.26'da verilen m ve n iki tam sayıdır ve belirli bir \mathbf{k} noktasında $m \neq n$ olmalıdır. İkincisi, en düşük enerjiye sahip bant değeri denklem 2.27'de verilen bir varyasyonel problem olarak çözülür (Johnson 2001).

$$\omega_1(\mathbf{k})^2 = \min_{\mathbf{H}_k(\mathbf{r})} \frac{\int |(\nabla + i\mathbf{k}) \times \mathbf{H}_k(\mathbf{r})|^2 / \epsilon}{\int |\mathbf{H}_k(\mathbf{r})|^2} c^2 \quad (2.27)$$

Kuantum mekaniğinde varyasyonel yaklaşım, en düşük enerjili öz durumlara yaklaşıklık bulma yöntemidir (Cline 2017). Yöntemin temeli matematikte ifade edilen varyasyonel ilkeye dayanır. Varyasyon fonksiyonların minimum ve maksimum noktalarını bulmak için fonksiyonlardaki küçük değişimleri ifade eder. Varyasyonel çözümde, bir ya da birden fazla parametreye bağlı olarak deneme amaçlı bir dalga fonksiyonu seçilir ve bu fonksiyon en düşük enerji seviyesi için hesaplanır (Cline 2017). Bu yaklaşımda deneme amaçlı kullanılan dalga fonksiyonunun sistemin en küçük frekansından (enerjisinden) daha büyük olduğu var sayılarak bunu ifade eden fonksiyon en küçük değeri indirgenir. Böylece en küçük frekans çözümü ve oradan yola çıkılarak izin verilen daha yüksek frekanslar bulunur. Denklem 2.27'de verilen eşitlik ile en düşük öz frekans değeri karşılık gelen bant değeri hesaplanır. Denklem 2.26'da verilen ortogonalite şartı ile aynı

varyasyonel problem takip edilerek ikinci ve diğer bant değerleri hesaplanır (Johnson 2001).

Denklem 2.27’de verilen varyasyonel problemini en küçük değerine indigemek için iki koşul gereklidir. Birincisi, tedirgeme kuramında anlatıldığı gibi değişimlerin yavaş olması yani en düşük bandın alan değeri küçük değişimler içermelidir. İkincisi, elektrik veya manyetik alanın rotasyoneli yüksek dielektrik sabiti olan bölgelerde yoğunlaşmalıdır. İlk bant gibi diğer bantlar da düşük alan değişimlerine sahip olmalı ve yüksek dielektrik sabite sahip bölgelerde yoğunlaşmalıdır. Birbirlerini izleyen tüm bantlar ortogonalite şartı kullanılarak bulunur. (Johnson 2001).

Homojen bir ortamda ışık hızı, kırılma indisi ile azalır. Bantlar ışık çizgisi boyunca uzanır ve ilk Brillion bölgesi dışında kristal kendisini tekrar edeceği için dalga vektörü $k=0$ ’dan $k= k + 2\pi/a$ ile sınırlandırılır. Düşük frekanslardaki bantlar enerjilerini yüksek dielektrik bölgelerde yoğunlaştırırken, yüksek frekanslardaki bantlar enerjilerini düşük dielektrik bölgelerde yoğunlaştırır. Yüksek ve düşük frekans bantlarının arasında belirli bir frekans boşluğu oluşur ve bu bant boşluğu dielektrik kontrast arttıkça artar. Bu bant boşluğu fotonik bant aralığı olarak adlandırılır (Joannopoulos ve ark. 2008).

Fotonik kristallerin sahip olduğu bant aralığının yeri ve büyüklüğü yapılacak tasarımlar açısından önemlidir. Bant aralığı, fotonik kristal içerisinde ışığın hangi dalga boyunda ilerleyeceğini veya geri yansıyacağını belirtir. Fotonik kristallerin, bant aralığının frekans seçiciliği göz önüne alındığında bu tasarımların dalga boyu filtresi olarak kullanılabilmesi görülür.

Bölüm 2’de kuramsal temelleri anlatılan fotonik kristallerin bant aralıkları ve bant yapılarının nümerik olarak hesaplanması düzlem dalga açılımı yöntemini temel alan Rsoft (2006) ticari yazılımı kullanılarak yapılmış ve düzlem dalga açılımı yönteminin açıklamaları Bölüm 3’te ayrıntılandırılmıştır.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Fotonik kristaller, son zamanlarda üzerinde en çok durulan ve birçok alanda özel tasarımların yapıldığı periyodik yapılardır. Fotonik kristaller, katı hal fiziğinde uzun yıllardır üzerinde çalışma yapılan yarı iletken malzemeler ile bazı benzer özellikler göstermektedir. Yarı iletken malzemelerde atomların periyodik olarak dizilmesi sonucu yasak bant aralığı oluşmakta ve elektronlar belirli enerji değerlerine sahip olurken, belirli enerji değerlerine ise sahip olamamaktadır. Fotonik kristaller ise tıpkı yarı iletken malzemelerde atomların örgü modeline göre periyodik olarak dizildiği gibi ortamın kırılma indisinin (dielektrik sabitinin) bir, iki veya üç dikey doğrultuda periyodik değişimin yapıldığı yapılardır.

Çok farklı yapılarda oluşturulan bu fotonik kristaller tıpkı yarı iletken malzemeler gibi yasak bant aralığına sahip olmaktadır. Fotonik kristallerin sahip olduğu fotonik bant aralığı olarak adlandırılan bu yasak bant boşluğu belirli dalga boylarının kristal içerisinde ilerlemesini sağlarken belirli dalga boylarını ise geri yansıtarak kristalin içinde ilerlemesini engellemektedir. Fotonik kristallerin bu yasak bant aralığı, ışığın yapı içerisinde kontrol edilmesini sağlamaktadır. Ayrıca fotonik kristal yapılarda çeşitli kusurlar oluşturularak elde edilen fotonik kristal dalga kılavuzlarında ışığın yavaşlatılması sağlanmaktadır. Işığın yapı içerisinde yavaşlatılması ile özellikle sensör teknolojilerinde daha hassas sensörlerin elde edilmesi sağlanmaktadır. Fotonik kristallerin bant aralığı çeşitli yazılımlar kullanılarak nümerik yöntemler ile hesaplanmaktadır. Tez kapsamında kullanılan yazılımla bant diyagramları hesaplanmış ve fotonik kristal dalga kılavuzlarında yasak bant aralığında oluşan kusur kiplerinin dispersiyon eğrileri elde edilmiştir. Bu yöntemde bant diyagramı hesaplanırken düzlem dalga açılımı yöntemi kullanılmıştır.

Düzlem dalgalar, homojen Helmholtz denkleminin periyodik ortamdaki alan dağılımlarını temsil eden çözümleridir. Vektör Helmholtz denklemi, bant diyagramlarının hesaplanmasında kullanılan temel eşitliktir. Helmholtz eşitliğine Bloch teoreminin uygulanıp, çözüm Helmholtz denkleminde yerine koyulursa bir özdeğer eşitliği elde edilir. Özdeğer eşitliğini çözmek için Maxwell denklemlerinin varyasyonel fonksiyoneli kullanılır. Bu fonksiyoneli minimize eden fonksiyon aynı zamanda en düşük frekansta

elde edilen özvektördür. Bir sonraki kipe ortagonel olma şartı ile hesaplanır. Fotonik kristal yapısı sonsuz uzunlukta kabul edilirse, elektrik ve manyetik alanlar düzlem dalgaların toplamı şeklinde ifade edilebilir (Joannopoulos 2008). Elde edilen kipe fonksiyonunda, bilinmeyen alanlar ters örgüden düzlemsel dalgalar kullanılarak Fourier serisine açılır. Nümerik uygulamasında, bu toplama işlemi makul bir çözünürlükte kesilir ve varyasyonel fonksiyonelinin hesaplanması iterative yöntemlerin kullanıldığı, matris problemine dönüşür. Bu yöntemle düzlem dalga açılımı yöntemi denir.

Düzlem dalga açılımı yöntemi, periyodik dielektrik yapılardaki kiplerin hesaplanmasında oldukça etkilidir. Fotonik kristallerin bant yapısının hesaplanmasında uygulanmasının kolaylığı açısından tercih edilir. Düzlem dalga açılımı yönteminden indis farkı yüksek olduğunda veya problem metaller dahil edildiğinde daha az verimli sonuçlar elde edilir (Rsoft 2006).

Tez kapsamında ışığın fotonik kristal dalga kılavuzunda ne kadar etkin ilerlediğini gösteren normalize güç, elektrik alan grafiklerinin elde edilmesi için nümerik çözümler kullanılmıştır. Işığın fotonik kristal içerisindeki iletimini gösteren grafikler, zamanda sonlu farklar yöntemi (FDTD) kullanılarak elde edilmiştir.

FDTD yöntemi zaman düzleminde kristal yapısının analizini mümkün kılar. Kristal yapının a olarak tanımlanan birim uzunluğu x,y,z düzleminde istenilen aralıklara bölünür. Bu aralıklarda elektrik ve manyetik alan bileşenlerinin Maxwell denklemleri kullanılarak yapılan hesaplaması ile ışığın kristal yapıyla etkileşimi ve iletimi hesaplanır (Ayas 2011). Düzlem dalga açılımı yöntemi kullanılarak elde edilen bant diyagramlarında gözlemlenen bant aralığı, FDTD yöntemi kullanılarak da elde edilir. Bu yöntem kullanılarak elde edilen iletim grafiklerinde ışığın iletiminin çok az ya da hiç olmadığı dalga boyu (frekans) aralığı bant diyagramında elde edilen bant aralığına karşılık gelir.

İlk kez 1996 yılında matematikçi ve elektrik mühendisi olan Kane S. Yee tarafından bulunan Yee algoritmasını temel alan FDTD yöntemiyle, Maxwell denklemleri sonlu fark denklemleri olarak ifade edilir. Elektrik ve manyetik alanlar, sonlu farklar denklemlerinden oluşan denklem sistemi olarak gösterilir (Ayas 2011).

Yee, fark denklemlerindeki elektrik ve manyetik alanların dağılımını Yee kafesi olarak adlandırdığı bir hücre içerisinde tanımlar. Bu kafeste, elektrik alan noktaları kenarların orta noktasında ve manyetik alan noktaları yüzeylerin merkezinde gösterilmiştir. Bu hesaplamalarda iterasyon $\Delta t/2$ aralıklarla gerçekleştirilir.

3.1 Düzlem Dalga Açılım Yöntemi

Fotonik kristallerin öz kipleri, Maxwell denklemlerinin bir çözümüdür ve bu kipler öteleme simetrisi özelliği gösterir. Kırılma indisi ve geometrisi tüm kristal yapı içerisinde aynı olduğu için bir kiplin periyot boyunca ötelenmesi değişim yaratmaz. Örgü vektörü \mathbf{R} ile ifade edilirse öteleme operatörü \hat{T}_R ile gösterilir. Zaman harmoniği şeklinde yazılan manyetik alan ifadesi öteleme simetrisi sebebiyle ayrı ayrı hesaplanan tüm alanların toplamı şeklinde yazılır. Bu toplam ifadesi denklem 3.1’de verilmiştir (RSoft 2006).

$$\mathbf{H}(\mathbf{r}) = e^{(i\mathbf{k}\mathbf{r})} \sum c_j \hat{\epsilon}_j e^{(i\mathbf{G}_j\mathbf{r})} \quad (3.1)$$

Denklem 3.1, ters örgü uzayında $\mathbf{H}(\mathbf{r})$ ’nin ters örgü vektörlerindeki Fourier serisiyle çarpılan düzlem dalgası olarak ifade edilmesini gösterir. Denklemde verilen c_j , Fourier katsayılarını, $\hat{\epsilon}_j$ polarizasyon vektörünü ifade eder. $\mathbf{H}(\mathbf{r})$ üzerine öteleme operatörünün uygulanması ile denklem 3.2 elde edilir (RSoft, 2006).

$$\begin{aligned} \hat{T}_R \mathbf{H}(\mathbf{r}) &= \sum c_j \hat{\epsilon}_j e^{[i(\mathbf{k}+\mathbf{G}_j)\mathbf{R}]} e^{[i(\mathbf{k}+\mathbf{G}_j)\mathbf{r}]} \\ &= \sum c_j \hat{\epsilon}_j e^{(i\mathbf{k}\mathbf{R})} e^{[i(\mathbf{k}+\mathbf{G}_j)\mathbf{r}]} \\ &= e^{(i\mathbf{k}\mathbf{R})} e^{(i\mathbf{k}\mathbf{r})} \sum c_j \hat{\epsilon}_j e^{(i\mathbf{k}\mathbf{R})} e^{(i\mathbf{G}_j\mathbf{r})} \end{aligned} \quad (3.2)$$

$$= e^{(ikR)} \mathbf{H}(\mathbf{r})$$

Denklem 3.2’de elde edilen eşitlik Bloch kuramının bir sonucudur. Denklem 3.2’de verilen temel eşitlik manyetik alanın, kristal örgünün periyodu ve düzlem dalganın çarpımı şeklinde gösterilebileceğini ifade eder ve denklem 3.3’te gösterilir.

$$\mathbf{H}(\mathbf{r}) = e^{(ikr)} \mathbf{u}_k(\mathbf{r}) \quad (3.3)$$

Denklemden verilen $\mathbf{u}_k(\mathbf{r})$ periyodik bir fonksiyondur ve tüm \mathbf{R} örgü vektörleri için $\mathbf{u}_k(\mathbf{r}) = \mathbf{u}_k(\mathbf{r} + \mathbf{R})$ olarak ifade edilir. Kristal periyodik olduğu için bant diyagramları hesaplanırken sadece ilk Brillion bölgesindeki k aralığı için özdeğerler (frekanslar) elde edilir. \mathbf{G} ters örgü vektörünü ifade eder ve ters örgüde dalga vektörü $\mathbf{k}' = \mathbf{k} + \mathbf{G}$ olarak gösterilir. Bu özellikler dikkate alınarak denklem 3.3’te verilen manyetik alan ifadesi ters örgü uzayı için yeniden düzenlenerek denklem 3.4 elde edilir (Rsoft 2006).

$$\begin{aligned} \mathbf{H}(\mathbf{r}) &= e^{(ik'r)} \mathbf{u}_{k'}(\mathbf{r}) \\ &= e^{(ikR)} e^{(iGr)} \mathbf{u}_{k'}(\mathbf{r}) \\ &= e^{(ikR)} [e^{(iGr)} \mathbf{u}_{k'}(\mathbf{r})] \\ &= e^{(ikR)} \mathbf{u}_{k'}(\mathbf{r}) \end{aligned} \quad (3.4)$$

Denklem 3.4’te verilen $e^{(iGr)}$ örgü periyoduna, a , sahip periyodik bir fonksiyonu temsil eder ve ilk Brillion bölgesi dışındaki k değerleri için elde edilen öz (frekans) değerleri; ilk Brillion bölgesi içindeki farklı bir bant değerinin öz frekansına karşılık gelir (Rsoft 2006).

Bölüm 2’de denklem 2.8’de Maxwell denklemlerinin kombinasyonundan elde edilen Helmholtz eşitliği ifade edilmiş ve bant diyagramlarının elde edilmesinde kullanılacak olan temel eşitlik tanımlanmıştır. Denklem 2.8’de verilen Helmholtz denkleminin Bloch teoreminin uygulanmasıyla elde edilen eşitlik aşağıda gösterilmiştir:

$$\hat{\mathbf{L}}\mathbf{u}_{\mathbf{k}} = (\nabla + i\mathbf{k}) \times \left(\frac{1}{\varepsilon(\mathbf{r})} (i\mathbf{k} + \nabla) \right) \times \mathbf{u}_{\mathbf{k}} = \bar{\omega}^2 \mathbf{u}_{\mathbf{k}} \quad (3.5)$$

Burada $\hat{\mathbf{L}}$ operatörü $(\nabla + i\mathbf{k}) \times \left(\frac{1}{\varepsilon(\mathbf{r})} (i\mathbf{k} + \nabla) \right)$ dir. Denklem 3.5’de verilen eşitlikte $\bar{\omega} = \omega/c$ ışık hızına normalize edilmiş frekansı gösterir. Bant hesaplamalarına temel teşkil eden denklem 3.5’te verilen eşitliktir. Denklemde yer alan $\bar{\omega}$ öz değerleri yani öz frekansları, $\mathbf{u}_{\mathbf{k}}$ bu öz değerlere karşılık gelen öz vektörleri ve \mathbf{k} dalga vektörünü gösterir.

Denklem 3.5’te verilen özdeğer denkleminin, her \mathbf{k} değerine karşılık gelen $\bar{\omega}$ ve $\mathbf{u}_{\mathbf{k}}$ için çözülmesi ile bant diyagramı elde edilir. Düzlem dalga açılım yöntemi, Maxwell denklemlerinin varyasyonel ifadesini kullanır. Operatör $\hat{\mathbf{L}}$ Hermisyendir (Rsoft 2006).

$$E[\mathbf{u}_{\mathbf{k}}(\mathbf{r})] = \frac{\int d\mathbf{r}^3 \mathbf{u}_{\mathbf{k}}^* [\hat{\mathbf{L}}\mathbf{u}_{\mathbf{k}}]}{\int d\mathbf{r}^3 \mathbf{u}_{\mathbf{k}} \mathbf{u}_{\mathbf{k}}^*} \quad (3.6)$$

Denklem 3.6’da verilen $\hat{\mathbf{L}}$ operatörünün Hermisyen olması $\mathbf{u}_{\mathbf{k}}$ periyodik manyetik alan fonksiyonu için hesaplanan $E[\mathbf{u}_{\mathbf{k}}(\mathbf{r})]$ değerlerinin gerçek ve pozitif olmasını sağlar. $E[\mathbf{u}_{\mathbf{k}}(\mathbf{r})]$ öz frekanslara karşılık gelen öz vektörlerin oluşturduğu bandın enerjisini ifade eder. $E[\mathbf{u}_{\mathbf{k}}(\mathbf{r})]$ en küçük öz frekans değeri için hesaplanır. Hesaplanmak istenilen diğer en düşük frekanstaki bant, hesaplanan banda ortogonal olmak zorundadır. Bu şekilde birbirini takip eden bantların hepsi hesaplanır ve bu ayırık öz frekanslarda hesaplanan bantların toplamı fotonik kristal bant diyagramını oluşturur.

Denklem 3.6’da bilinmeyen kip fonksiyonu $\mathbf{u}_{\mathbf{k}}$, ters örgü uzayında düzlem dalgalar ile oluşturulan bir Fourier serisi olarak denklem 3.7’de gösterilmiştir.

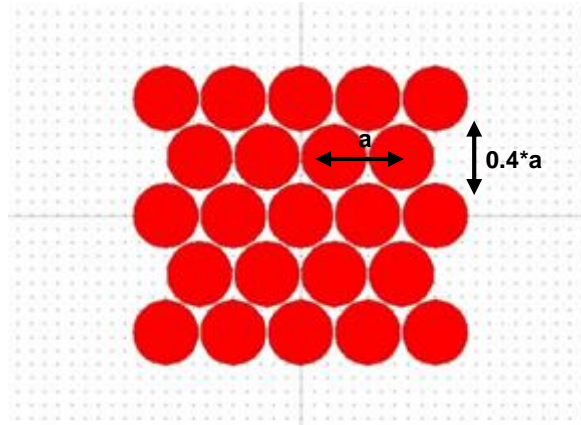
$$\mathbf{u}_k = \sum_{G,\sigma} c_G \mathbf{e}_{G,\sigma} e^{iGr} \quad (3.7)$$

Denklem 3.7’de verilen G ters örgü vektörlerini, σ polarizasyon durumlarını, $\mathbf{e}_{G,\sigma}$ birim polarizasyon vektörünü temsil eder (Rsoft 2006).

3.2. Bant Diyagramlarının Elde Edilmesi

Bu çalışmada, bant hesaplamalarını gerçekleştirmek için düzlem dalga açılımı yöntemi kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar k uzayındaki frekanslara karşı çizilerek elektromanyetik alanların grafiksel görüntüsünü elde edilmiştir.

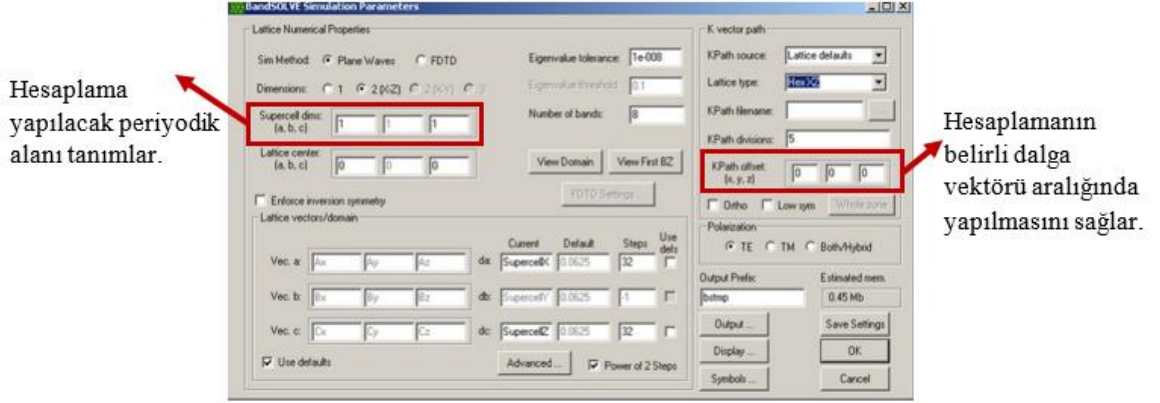
Şekil 3.1’de iki boyutlu üçgen örgü simetrisine sahip kusursuz fotonik kristal yapısı verilmiştir.



Şekil 3.1. İki boyutlu üçgen örgü simetrisine sahip kusursuz fotonik kristal yapısı. Kırmızı ile gösterilen dielektrik çubukların etkin kırılma indisi $n=3,46$ ve arka plan hava olup $n=1$ olarak verilmiştir. Kristalin periyodu(örgü sabiti) $a= 1\mu\text{m}$ ve yarıçapı $r = 0,2*a$ olarak seçilmiştir.

Şekil 3.1’de verilen kusursuz fotonik kristal yapısının periyodu (örgü sabiti) $a=1\mu\text{m}$ ve yarıçapı $r = 0,2*a$ olarak seçilmiştir. Fotonik kristal yapısında kırmızı renkle gösterilen dielektrik çubuklar silisyum malzemeden yapılmış olup etkin kırılma indisi $n = 3,46$ olarak hesaplanmıştır.

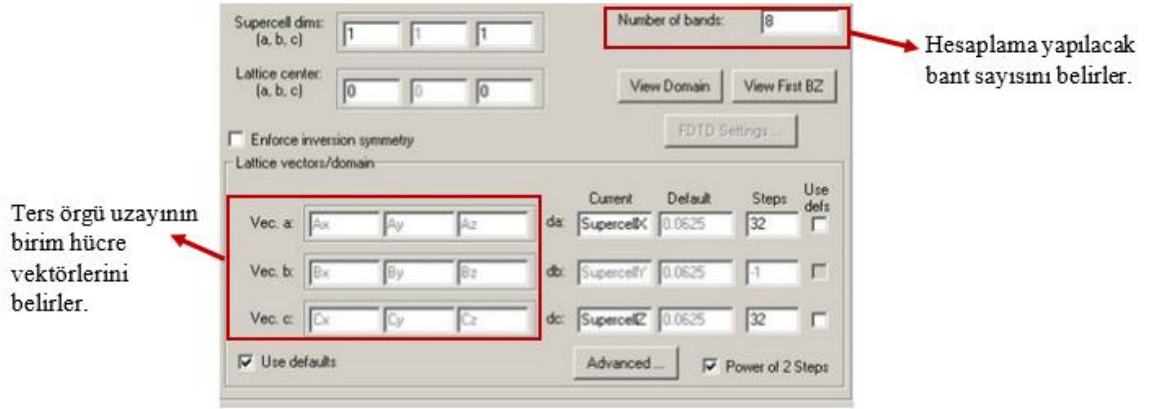
Fotonik kristallerin bant diyagramlarının hesaplanması için gerekli benzetim parametreleri Şekil 3.2’de gösterilen pencere üzerinden girilir. Bir, iki ve üç boyutlu fotonik kristalin dispersiyon eğrileri elde edilir. Benzetim penceresinden hesaplamanın kaç boyutta yapılacağı belirlenir ve nümerik analizin hangi algoritma ile yapılacağı yine bu pencereden belirlenir.



Şekil 3.2. Benzetim parametrelerinin kontrol edildiği pencere. Bu pencere üzerinden nümerik çözüm yöntemi, Brillouin bölgesi, polarizasyon ve çözünürlük ayarları yapılabilmektedir.

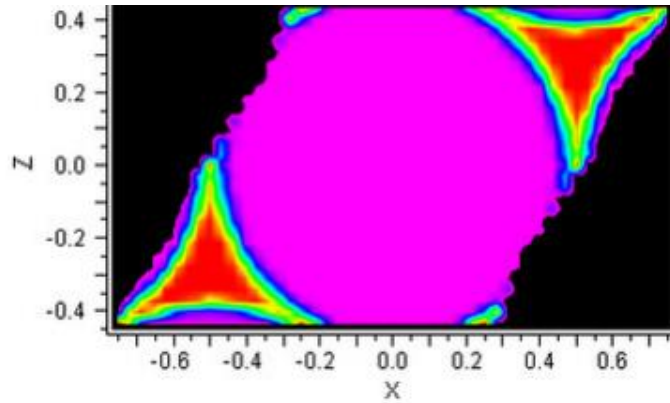
Benzetim penceresinden nümerik analizin hangi yöntemle yapılacağı öncelikle belirlenmelidir. Bant aralıkları FDTD veya PWE yöntemi kullanılarak hesaplanabilir. FDTD yönteminin kullanılabilmesi için, temel davranışı belirleyen düzlem dalgası yöntemi ile ön hesaplamaların yapılması gereklidir. Ayrıca FDTD yöntemiyle sadece iki ve üç boyuttaki fotonik kristal yapıların analizi mümkündür fakat PWE yöntemi için böyle bir kısıtlama yoktur (Rsoft 2006).

Fotonik kristal bant aralığı hesaplamalarında tez kapsamında düzlem dalga açılımı yöntemi kullanılmıştır. Bunun sebebi bant hesaplamalarında düzlem dalga açılımı yönteminin daha hızlı ve doğru sonuçlar vermesidir. Benzetim parametrelerinden ikincisi hesaplamanın yapılacağı periyodik alanı belirleyen süper hücre genişliği parametresidir. Şekil 3.1’de verilen fotonik kristal yapısı kusursuz ve periyodik olduğu için sadece bir birim hücre alanı için hesaplama yapmak yeterli olacaktır.



Şekil 3.3. Bandsolve yazılımı benzetim parametrelerinin kontrol edildiği pencere. Bu alandan hesaplamanın yapılacağı birim hücre vektör parametreleri seçilir.

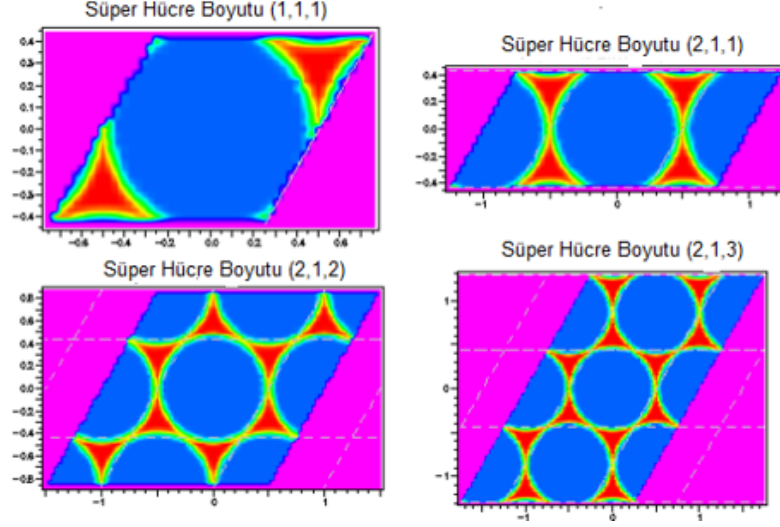
Vec a, Vec b, Vec c olarak ifade edilen parametreler hesaplama yapılacak sayısal kafesin birim hücre vektörlerini ifade eder. Üçgen örgü simetrisine sahip fotonik kristalin hesaplama yapıldığı birim hücresindeki görüntüsü Şekil 3.4’de verilmiştir.



Şekil 3.4. Super hücre parametreleri (1,1,1) seçilen XZ düzlemindeki iki boyutlu kusursuz fotonik kristal yapısına ait birim hücre görüntüsü

Süper hücre boyutu, hesaplama yapılacak birim hücre sayısını belirleyen parametredir yani diğer bir deyişle x veya z yönünde tekrar eden birim hücre sayısını belirler. Şekil 3.1’de verilen fotonik kristal yapısı kusursuz olduğu için tek bir birim hücrede hesaplama yapmak yeterli olacaktır. Şekil 3.5’te çeşitli süper hücre parametreleri için elde edilen

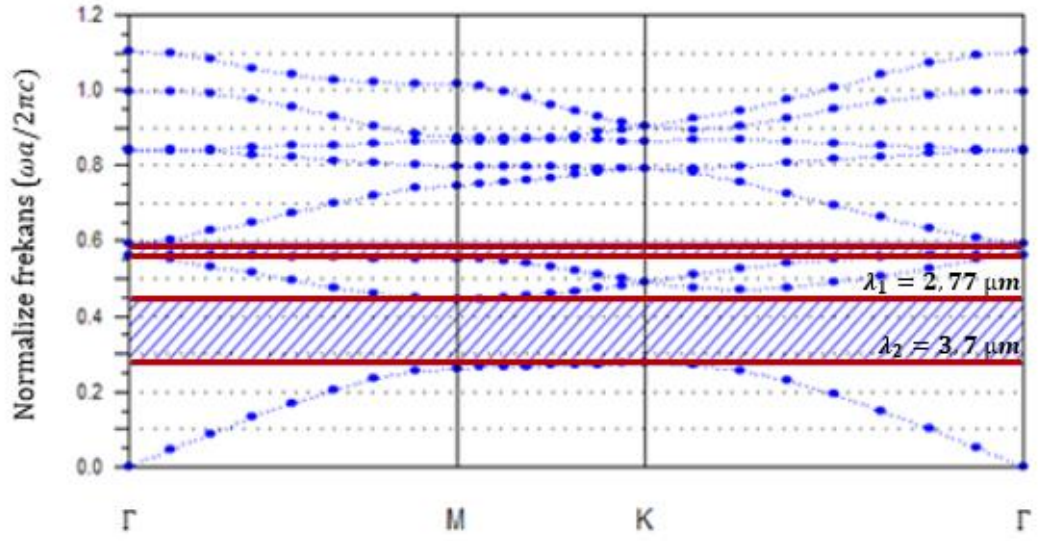
hesaplama alanları gösterilmiştir. Fotonik kristal yapısı iki boyutlu olup X ve Z düzleminde hesaplamalar yapılmıştır.



Şekil 3.5. Çeşitli süper hücre parametreleri seçilerek elde edilen hesaplama alanları gösterilmiştir. Süper hücre alanları (1,1,1), (2,1,2), (2,1,1) ve (2,1,3) olarak ayarlanmıştır.

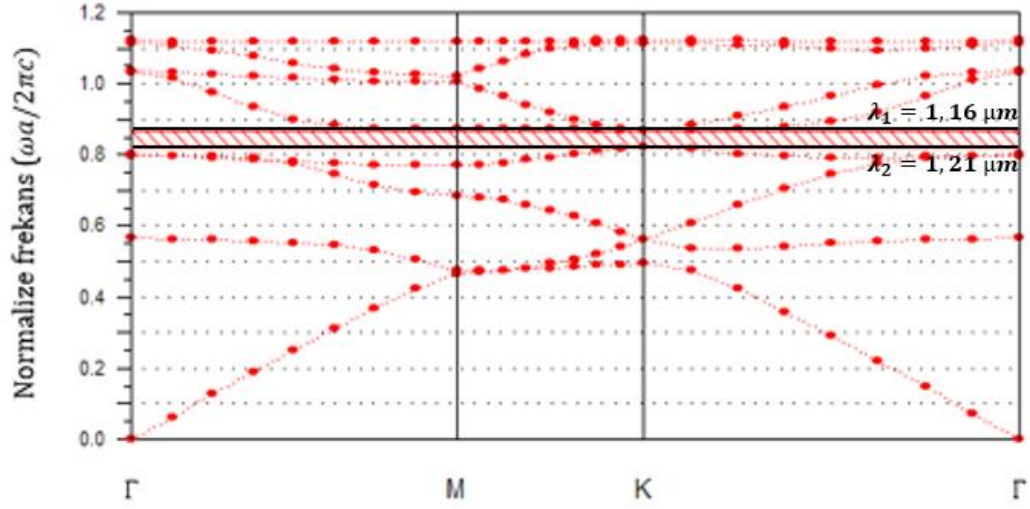
Hesaplama yaparken, en düşük frekansı temsil eden öz değerlerden başlayarak yüksek frekanslara doğru bantlar hesaplanır. Hesaplanacak öz değerlerin sayısı bant sayısı parametresi ile belirlenir. Süper hücre boyutu arttıkça hesaplama yapılacak bant sayısı da artacaktır. Ayrıca benzetim penceresinden polarizasyon ayarı da yapılabilir. Üç boyutlu fotonik kristal yapılar için, vektör Helmholtz denklemi farklı polarizasyonlara ayrılamaz fakat iki boyutlu fotonik kristal yapılarında aynı denklem TE ve TM polarizasyonlarını ayrı ayrı destekler. Bu sayede yalnızca TE ya da TM polarizasyonda bant yapılarının hesaplaması mümkün olur. Ayrıca her iki polarizasyon için melez bir hesaplama yapılması da mümkündür (Rsoft 2006).

Şekil 3.6 ve Şekil 3.7’de üçgen örgü simetrisine sahip fotonik kristal yapısı için elde edilen bant diyagramları gösterilmiştir. Süper hücre parametreleri (1,1,1) olarak ayarlanmıştır yani X ve Y yönünde tek bir birim hücre alanında hesaplama yapılmıştır.



Şekil 3.6. İki boyutlu kusursuz fotonik kristal yapısı için TE polarizasyonda elde edilen bant aralığı. ($a = 1 \mu\text{m}$ ve $r = 0,2*a$ olarak seçilmiştir, süper hücre alanı (1,1,1) olarak ayarlanmıştır.)

Şekil 3.6’da görüldüğü gibi elektrik alan bileşenin z düzlemine paralel olduğu TE polarizasyonda farklı frekanslarda iki adet bant aralığı bulunmaktadır. Fotonik kristal yapısı içinde ışığın hangi dalga boylarında iletilmeyeceği $\lambda = a/\omega$ eşitliği kullanılarak hesaplanır. Yapının yasak frekans aralığının 0,27 ile 0,44 arasında olduğu görülmektedir. Bu değerler dalga boyu olarak $2,27 \mu\text{m}$ ile $3,70 \mu\text{m}$ değer aralığına karşılık gelir. Ayrıca yapıda 0,56-0,59 gibi dar bir aralıkta ikinci bir bant aralığı da mevcuttur. Bu yasak frekans aralığı dalga boyu olarak $1,69 \mu\text{m}$ - $1,78 \mu\text{m}$ aralığına denk gelir. Fotonik kristal yapısı içerisinde $2,27\mu\text{m}$ - $3,70 \mu\text{m}$ ile $1,69 \mu\text{m}$ - $1,78\mu\text{m}$ dalga boyları arasında ışığın iletimi mümkün olmayacaktır. Fakat fotonik kristal içerisinde oluşturulan çeşitli kusurlar ile yasak bant aralığında kusur kipleri oluşmakta ve ışığın belirli dalga boylarında bant aralığından geçişi mümkün olmaktadır (Li ve ark. 2008). Fotonik kristallerde çeşitli kusurlar oluşturularak elde edilen fotonik kristal dalga kılavuzu yapıları ve bu yapılara ait ayrıntılı incelemelere Bölüm 4’te yer verilmiştir.



Şekil 3.7. İki boyutlu kusursuz fotonik kristal yapısı için TM polarizasyonda elde edilen bant aralığı. ($a = 1 \mu\text{m}$ ve $r = 0,2*a$ olarak seçilmiştir, süper hücre alanı (1,1,1) olarak ayarlanmıştır.)

Fotonik kristal yapısının desteklediği, manyetik alan bileşenin ışığın ilerleme yönüne (z) paralel olduğu TM polarizasyon için elde edilen bant diyagramı Şekil 3.7’de gösterilmiştir. Yapı için elde edilen fotonik bant aralığı 0,82-0,86 frekans aralığına denk gelir ve bu yasak frekans aralığının dalga boyu olarak karşılığı $1,16\mu\text{m}$ - $1,21\mu\text{m}$ olarak hesaplanır.

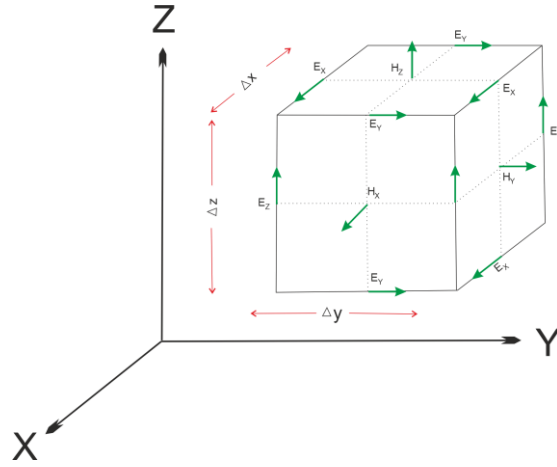
Özetle, nümerik olarak bir, iki, üç boyutta; üçgen ve kare örgü simetrisine sahip çeşitli fotonik kristal tasarımlarının bant diyagramlarının analizi yapılabilmektedir. Bir fotonik kristalin bant yapısı incelenerek ışığın geçmeyeceği frekans ve dalga boyu aralıkları, kusur oluşturularak elde edilen kusur kipleri ve kusur kiplerinin yavaşlama oranları gibi birçok önemli bilgi elde edilir. Tez kapsamında yapılan çeşitli fotonik kristal yapılarının bant diyagramlarının ayrıntılı analizi Bölüm 4’te incelenmiştir.

3.3. Zaman Domeninde Sonlu Farklar Yöntemi

Zaman domeninde sonlu farklar yöntemi, diferansiyel formdaki Maxwell denklemlerinin zaman domeninde ayrıklaştırılıp çözülmesi esasına dayanır. Zamana bağlı rotasyonel Maxwell denklemleri, alanların belirli bir zamanda bilindiği varsayılırsa sürekli olarak başlangıç değerlerine göre benzersiz çözümlere sahip olan hiperbolik kısmi diferansiyel denklem sistemidir. Sonlu farklar yönteminin, kısmi diferansiyel denklemlere

uygulanması Courant, Friedrichs, Lewy'nin bilimsel çalışmalarına dayanır (Courant ve ark. 1986). Sonlu farklar ilk defa 1966 yılında Kane S. Yee'nin çalışmalarında Maxwell rotasyonel denklemlerine uygulanmıştır (Yee 1966). Başlangıçta FDTD terimi Yee tarafından geliştirilmiş yöntem için kullanılmış olsa da bugün Maxwell rotasyonel denklemlerindeki türevlerin tamamını veya bir kısmını ayırmak için sonlu farklar yöntemini kullanan sayısal tekniklerin bütününe verilen isimdir.

Zamana bağlı olarak değişen Maxwell denklemleri denklem 2.1'de verilmiştir. FDTD yöntemi, Yee algoritmasını temel alır ve Maxwell denklemlerini sonlu farklar denklemleri olarak ifade eder. Yee, manyetik ve elektrik alanların Yee kafesi olarak adlandırılan FDTD birim hücresinde belirli aralıklarla örneklenmesini temel alır. Yee kafesi, ortagonal kübik uzaysal bir örgüyü tanımlar, alanlar belirli bir uzay konumunda örneklenerek, örnekleme zaman adımının yarısı kadar gecikmeli zamanlarda elde edilir. (RSOFT 2007). Elektrik ve manyetik alanların x,y,z düzleminde örneklendiği Yee kafesinin gösterimi Şekil 3.8'de verilmiştir.



Şekil 3.8. Yee hücresi olarak da adlandırılan FDTD birim hücre yapısı. Bu birim hücre kübik uzaysal bir örgüyü gösterir, elektrik ve manyetik alanları belirli bir uzay konumunda örnekleyerek, örnekleme zaman adımının yarısı kadar gecikmeli anlar için bu alanların çözümünü sağlar.

Şekil 3.8'de verilen Yee hücresi üzerinde E_x , E_y , E_z olarak verilen elektrik alan bileşenleri ve manyetik alan bileşenleri (H_x , H_y , H_z) her yönde yarım örgü adımı ile örneklenir. Δx , Δy , Δz örgü adımlarını ifade eder.

Alanların tanımlandığı düzlem üzerindeki noktalar üç boyutta i, j, k olarak ifade edilir ve $i, j, k = (i \Delta x, j \Delta y, k \Delta z)$ olarak gösterilir. Elektrik alan hesaplamaları için $t = n \Delta t$, manyetik alanlar için $t = (n + \frac{1}{2}) \Delta t$ olarak örneklendirilir. Denklemlerde gösterilen Δt hesaplama zaman aralığını, t hesap süresini ve n hesaplamaların zaman düzleminde kaç adımda yapılacağını ifade eder. Elektrik alan ve manyetik alan bileşenlerinin x düzlemindeki hesaplamaları yapılırsa aşağıda verilen denklemler elde edilir:

$$\begin{aligned}
\mu(i, j, k) & \frac{\mathbf{H}_x^{n+\frac{1}{2}}\left(i, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2}\right) - \mathbf{H}_x^{n-\frac{1}{2}}\left(i, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2}\right)}{\Delta t} \\
& = \left[\frac{\mathbf{E}_y^n\left(i, j + \frac{1}{2}, k + 1\right) - \mathbf{E}_y^n\left(i, j + \frac{1}{2}, k\right)}{\Delta z} \right. \\
& \quad \left. - \frac{\mathbf{E}_z^n\left(i, j + 1, k + \frac{1}{2}\right) - \mathbf{E}_z^n\left(i, j, k + \frac{1}{2}\right)}{\Delta y} \right]
\end{aligned} \tag{3.8}$$

$$\begin{aligned}
\varepsilon(i, j, k) & \frac{\mathbf{E}_z^n\left(i, j, k + \frac{1}{2}\right) - \mathbf{E}_z^{n-1}\left(i, j, k + \frac{1}{2}\right)}{\Delta t} \\
& = \left[\frac{\mathbf{H}_y^{n-\frac{1}{2}}\left(i + \frac{1}{2}, j, k + \frac{1}{2}\right) - \mathbf{H}_y^{n-\frac{1}{2}}\left(i - \frac{1}{2}, j, k + \frac{1}{2}\right)}{\Delta x} \right. \\
& \quad \left. - \frac{\mathbf{H}_x^{n-\frac{1}{2}}\left(i, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2}\right) - \mathbf{H}_x^{n-\frac{1}{2}}\left(i, j - \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2}\right)}{\Delta y} \right] \\
& + \sigma(i, j, k) \mathbf{E}_z^{n-\frac{1}{2}}\left(i + \frac{1}{2}, j, k\right)
\end{aligned} \tag{3.9}$$

Denklem 3.8 ve denklem 3.9’da verilen alan ifadeleri merkezi fark eşitlikleri şeklinde yazılmış Maxwell denklemleridir.

FDTD tekniğinde, zaman adımı parametresi örgü adımları $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ ile ilişkilidir. Bu ilişki Courant kriteri olarak adlandırılır. Bu ilişki;

$$\Delta t \leq \frac{1}{c \sqrt{\left(\frac{1}{\Delta x}\right)^2 + \left(\frac{1}{\Delta y}\right)^2 + \left(\frac{1}{\Delta z}\right)^2}} \quad (3.10)$$

Şeklide ifade edilir. FDTD iterasyonunun kararlı olabilmesi için, seçilen zaman adımında, dalganın maksimum ilerlemesi hücre boyutundan büyük olmamalıdır. Bu sebeple zaman adımı yeterince küçük seçilmelidir (Ayas 2011).

3.4. Işığın İlerlemesinin Nümerik Hesaplanması

Işığın fotonik kristalde ilerlemesinin çözümünde zamanda sonlu farklar yaklaşımı kullanıldı. Bu yöntem, rotasyonel Maxwell denklemlerinin çözümünü içerir ve tümleşik optikte yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. FDTD, Maxwell rotasyonel denklemlerine doğrudan bir çözüm sağladığı için ışığın yayılımının hesaplanması için kullanılan diğer yaklaşım yöntemlerinden daha etkin bir çözüm sağlar (RSOFT 2007).

Fulwave yazılımında kullanılan FDTD algoritmasını kullanmak için öncelikle fiziksel ve sayısal birçok parametrenin tanımlanması gereklidir. Kullanılan fiziksel parametreler, uzay veya frekansın bir fonksiyonu olan elektrik geçirgenlik $\varepsilon(r, \omega)$ ve manyetik geçirgenlik $\mu(r, \omega)$ gibi malzeme parametreleri ile elektromanyetik alan uyarımıdır. Elektromanyetik uyarım, kristal içerisinde ilerleyen ışığın profilini, genliği ve polarizasyonu gibi temel parametreleri içerir.

Bir yapıdaki ışığın yayılımının hesaplanmasında FDTD algoritmasının kullanılabilmesi için gereken fiziksel malzeme parametreleri $\varepsilon(r, \omega)$, $\mu(r, \omega)$ olarak verilmiştir. Bu fonksiyonlara bağlı olarak malzeme özelliklerini belirlemek için algoritma, denklem 3.11’de verilen formülleri kullanır.

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}$$

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H} + \mathbf{M} \quad (3.11)$$

Denklem 3.11’de verilen \mathbf{P} polarizasyon vektörünü, \mathbf{M} manyetizma vektörünü ifade eder. \mathbf{P} ve \mathbf{M} vektörlerinin ifadesi denklem 3.12’de gösterilmiştir.

$$\mathbf{P} = \varepsilon_0 \left[\chi(\omega) \mathbf{E} + \chi^2 \mathbf{E}^2 + \chi^3(\omega) \frac{1}{1 + cI} |\mathbf{E}|^2 \mathbf{E} \right] \quad (3.12)$$

$$\mathbf{M} = \varepsilon_0 \left[\chi(\omega) \mathbf{H} + \chi^2 \mathbf{H}^2 + \chi^3(\omega) \frac{1}{1 + dI} |\mathbf{H}|^2 \mathbf{H} \right]$$

Denklem 3.12’de verilen ilk terim sistemin doğrusal kırılma indisini dikkate alır. İkinci ve üçüncü terimler doğrusal olmayan terimlerdir ve izotropik olmayan ortam etkilerini ifade etmeyi sağlar. Ortamın izotropik olduğu varsayıldığı için doğrusal olmayan terimler ihmal edilir.

Işığın yapı içerisinde ilerlemesinin benzetimini yapabilmek için $t=0$ anındaki başlangıç koşulu φ_L olarak gösterilen elektromanyetik uyarıma ihtiyaç vardır. Fotonik kristale dışardan uyguladığımız, uzamsal (spatial) ve zamansal (temporal) bir ışık kaynağı olan bu ifade denklem 3.13’te gösterilmiştir (RSOFT 2007).

$$\varphi_L(r, t) = f(r_0) g(t) \quad (3.13)$$

Buna kısaca uyarım fonksiyonu diyeceğiz. Denklem 3.13’te gösterilen $f(r_0)$ düzlemdeki uzamsal uyarım ve $g(t)$ zamansal uyarımı ifade eder.

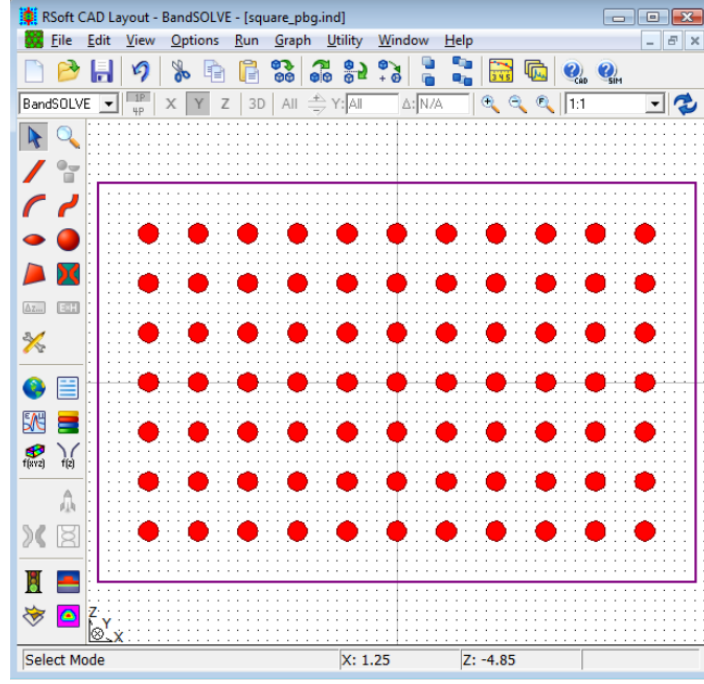
FDTD algoritmasının kullanılabilmesi için gereken nümerik parametreler aşağıda verilmiştir:

- Sonlu bir hesaplama alanı $\{ x \in (x_{\min}, x_{\max}) \}, \{ y \in (y_{\min}, y_{\max}) \}, \{ z \in (z_{\min}, z_{\max}) \}$.
- Sınır koşulları
- Uzamsal örgü aralıkları $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$
- Zamansal örgüsündeki (zaman adımı) Δt ve benzetim zaman uzunluğu.

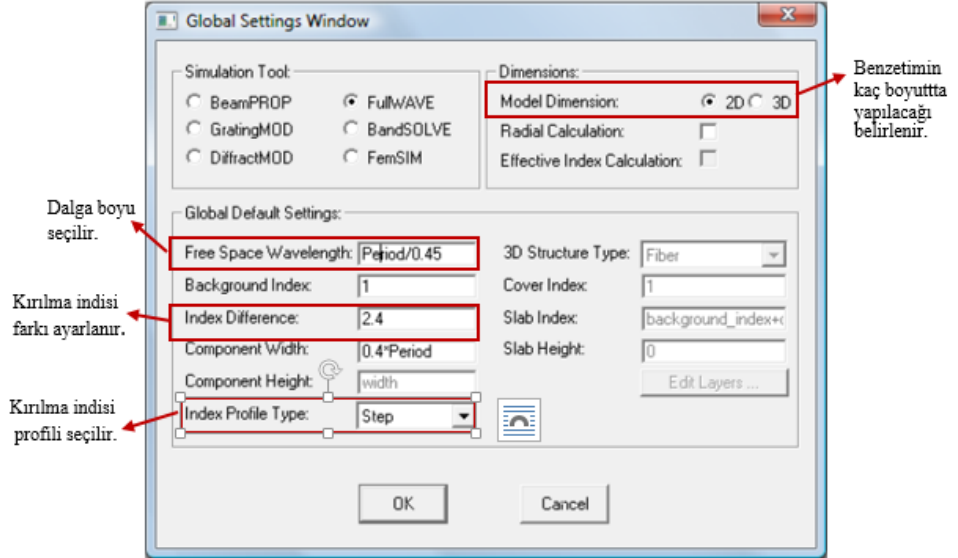
Işığın yapı içerisinde ilerlemesinin doğru ve etkin şekilde hesaplanabilmesi için önemli bir nümerik parametre olan sınır koşulları her yapı için farklı olarak seçilir. Genellikle düz bir dalga kılavuzunda ışığın ilerlemesi ele alınacaksa PML (perfectly matching layer) olarak adlandırılan mükemmel uyumlu tabaka sınır koşulu seçilir. PML, elektrik ve manyetik iletkenliklerin, dalga empedansının sabit kalacağı ve enerjiyi tamamen soğuracağı şekilde sisteme dahil edildiği sınır koşuludur. Bu koşulda hesap yapılan alanın sınırlarına kadar gelen elektromanyetik dalgalar geri yansımaz. İkinci bir sınır koşulu olan PBC yani periyodik sınır koşulları, tekrarlanan temel hesaplama alanından oluşan sonsuz bir yapının çözümünde kullanılır (RSOFT 2007).

Tez kapsamında fotonik kristal yapı içerisinde ışığın ilerlemesi inceleneceği için hem PML hem de PBC sınır koşulları beraber çözüm için kullanılmıştır.

Bölüm 3.2’de fotonik kristallerin bant diyagramlarının hesaplanması incelenmiştir. Fotonik kristaller; bir, iki, veya üç boyutta periyodik yapılar olup hesap penceresinde istenilen boyutta fotonik kristalin dizin şeklinde tanımlanması mümkündür.



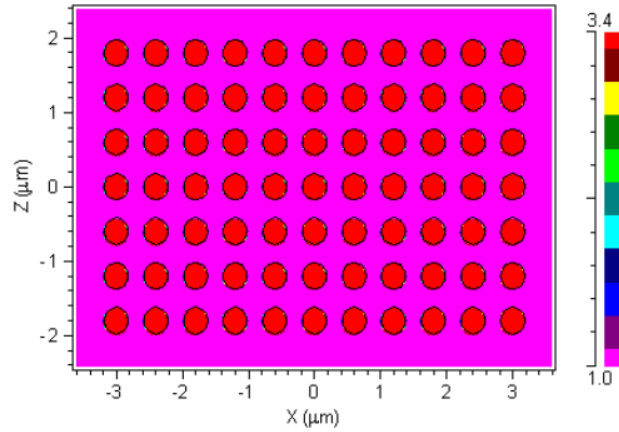
Şekil 3.9. Hesap penceresi üzerinden oluşturulan kusursuz 11x7 boyutunda kare örgü simetrisine sahip fotonik kristal yapısı.($a = 0,6\mu$ ve $r = 0,18*a$ olarak tanımlanmıştır. Fotonik kristalin fon indisi $n_{fon} = 1$ olarak verilmiştir. Yapı dielektrik çubuklar ile oluşturulmuştur, dielektrik çubukların etkin indisi $n_{etkin} = 2,4$ olarak hesaplanmıştır.



Şekil 3.10. Fulwave benzetim aracı temel parametrelerinin girildiği pencere. Bu pencere üzerinden yapının arka plan indisi, indis farkı, fotonik kristalin genişliği ve yapılan tasarımın hangi boyutta olacağı seçilir.

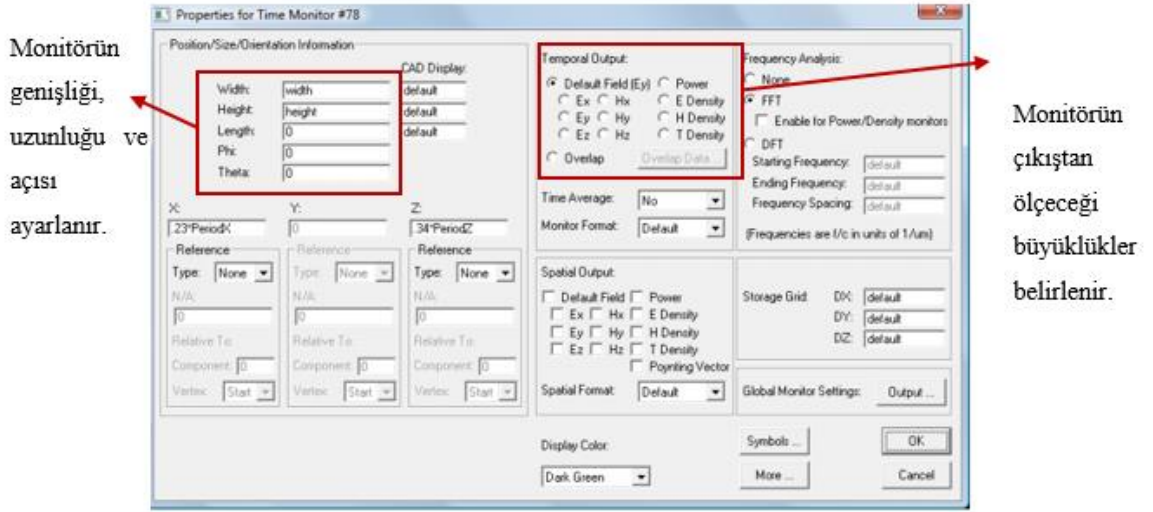
Işığın fotonik kristalde ilerlemesi için FDTD kullanıldığında tasarım için temel parametrelerin girilmesi gerekir. Bu parametrelerin girildiği pencere Şekil 3.10’da gösterilmiştir. Bu pencereden fotonik kristalin genişliği, tasarımın hangi boyutta yapılacağı, kırılma indisi farkı ve fon indisi gibi temel parametrelerin seçimi yapılır.

Temel parametreler girildikten sonra elde edilen kırılma indisi profili Şekil 3.11’de verilmiştir.

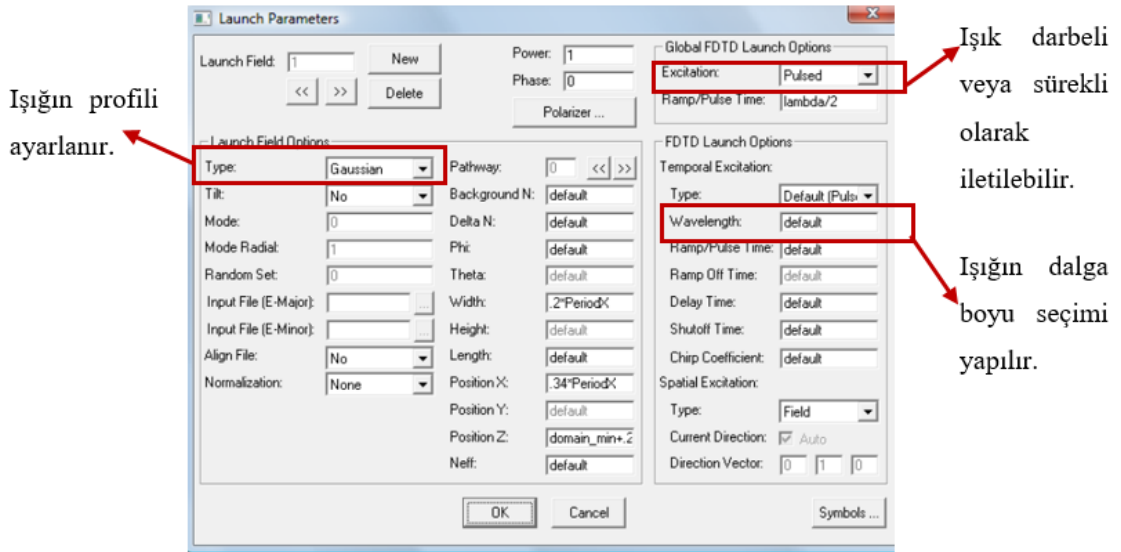


Şekil 3.11. Kusursuz kare örgü simetrisine sahip iki boyutlu fotonik kristal yapısının kırılma indisi dağılım profili. Pembe renk ile temsil edilen alan havayı göstermekte ve $n_{arka} = 1$ olarak tanımlanmaktadır. Kırmızı renkle gösterilen alan dielektrik çubukları ifade eder, kırılma indisi $n_{etkin} = 2,4$ olarak hesaplanmaktadır.

Şekil 3.12’de gösterilen parametre penceresinden ışığın yayılımının ölçülmesini sağlayan monitörlerin parametreleri ayarlanır. Fotonik kristal yapısının çıkışına bırakılan bir monitör yardımıyla hangi dalga boylarında ışığın iletilip hangi dalga boylarında ise ışığın geri yansıdığı belirlenir.

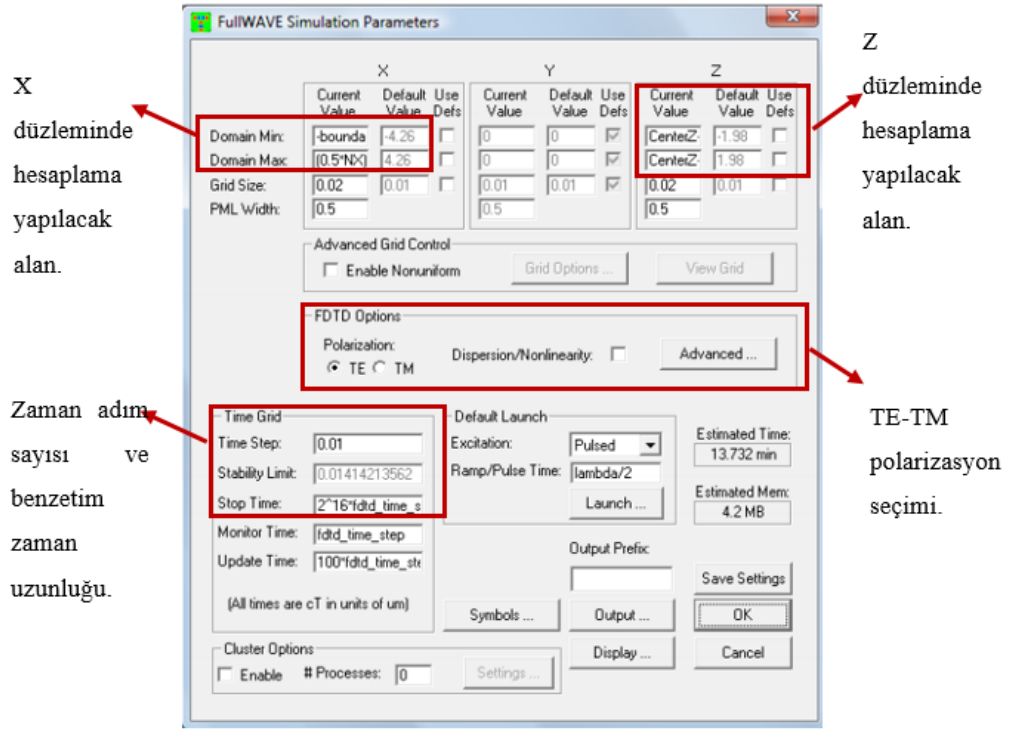


Şekil 3.12. Işığın zamana bağlı yayılımının izlenilmesini sağlayan zaman monitörlerinin parametre ayarlarının yapıldığı pencere. Frekans analizi hızlı Fourier dönüşümü (FFT) yöntemi ile yapılır.



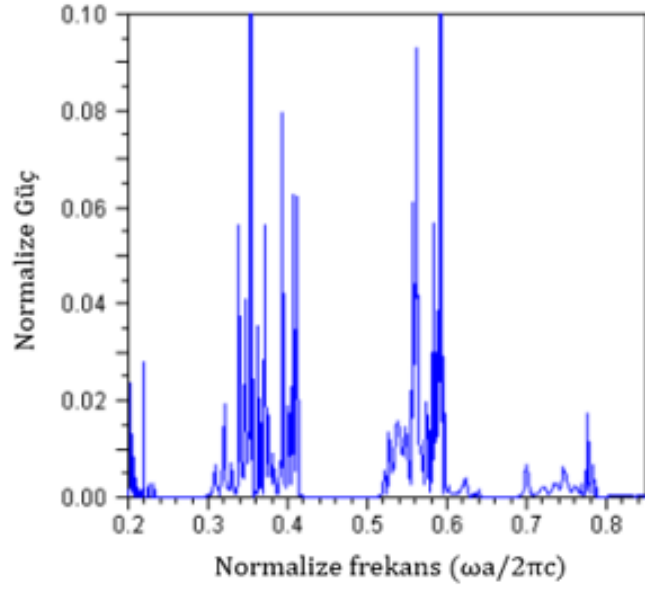
Şekil 3.13. Yapı içerisinde ilerleyen ışığın özelliklerinin ayarlandığı pencere.

Fotonik kristal içerisinde ilerleyecek ışığın profili Gauss veya dikdörtgen olabilir. Bunun dışında ışığın ilerleyeceği bir dalga kılavuzu tasarımı yapılar, tasarlanan yapıda ilerleyen kiplerin profili de seçilebilir. Temel benzetim parametreleri ayarlandıktan sonra ışığın yayılmasının hesaplamalarının yapıldığı FDTD algoritması için gerekli parametreler Şekil 3.14'te verilen pencere üzerinden girilir.

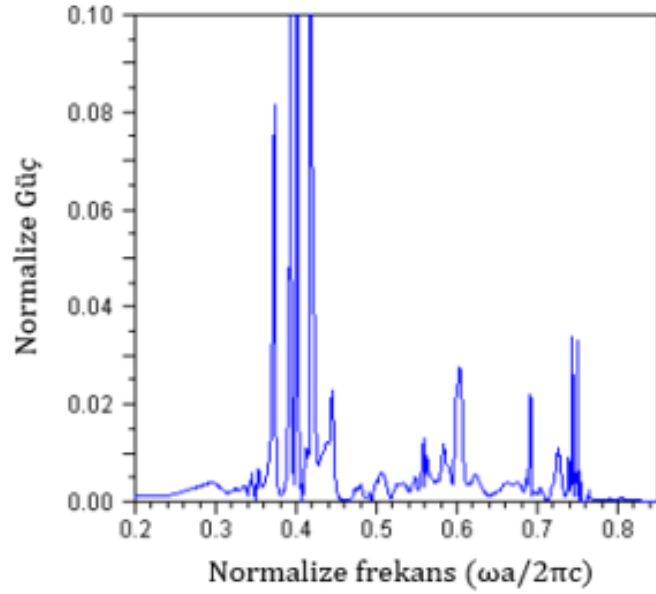


Şekil 3.14. Parametrelerin ayarlandığı pencere. Bu pencere üzerinden zaman adım sayısı, benzetim zaman uzunluğu ve FDTD hesaplamasının yapılacağı benzetim alanı parametreleri girilir.

Şekil 3.11’de verilen kare örgü simetrisine sahip kusursuz fotonik kristal yapısı için FDTD algoritması ile hesaplamalar yapıldığında TE ve TM polarizasyonlarda ışığın iletimine dair grafikler Şekil 3.15 ve Şekil 3.16’da verilmiştir.



Şekil 3.15. TE polarizasyona sahip ışığın yapı içerisinde ilerlerken frekansa bağlı olarak normalize güç yoğunluğunun değişiminin gösteriliği grafik(RSOFT 2007).



Şekil 3.16. TM polarizasyona sahip ışığın yapı içerisinde ilerlerken frekansa bağlı olarak normalize güç yoğunluğunun değişiminin gösteriliği grafik(RSOFT 2007).

Şekil 3.16’da verilen normalize güç grafiği incelendiğinde kristal yapısında TM polarizasyon için bir bant aralığı oluşmadığı gözlemlenmektedir. Bu kare örgü simetrisine sahip kusursuz kristal yapısı tüm k dalga vektörleri için TM polarizasyonda bir frekans değerine sahiptir. Ayrıca iletim grafikleri incelendiğinde yapı içerisinde ilerleyen ışığın

normalize gücünün düşük olduğu görölmektedir. Işığın yapı içerisinde daha etkin bir şekilde ilerlemesi ve normalize güç yoğunluğunun artırılması için uygun çiftleyici tasarımlarının yapılması gerekmektedir. Çeşitli fotonik kristal yapılar için iletim grafiklerinin elde edilmesi ve uygun çiftleyici tasarımları Bölüm 4'te ayrıntılı bir şekilde anlatılacaktır.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

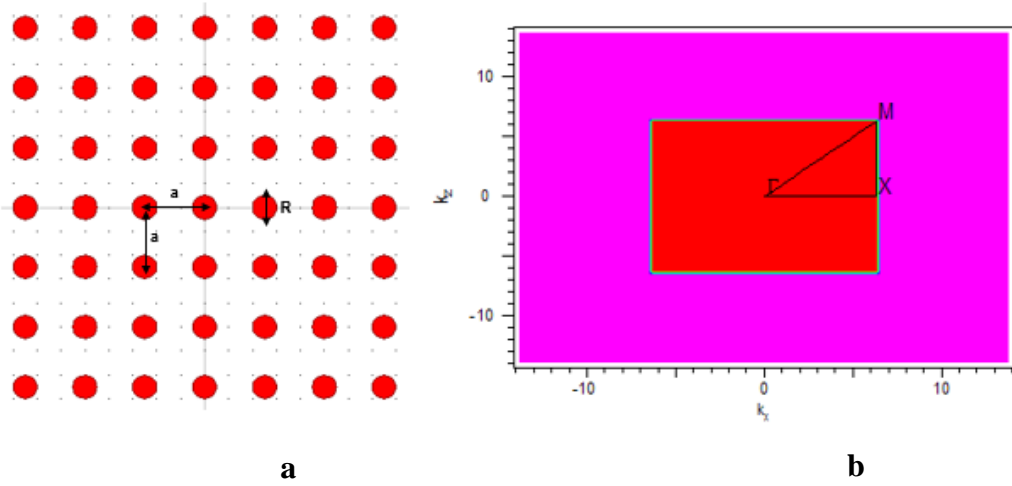
Fotonik kristaller ortamın dielektrik dağılımının periyodik olarak değiştirilmesi ile oluşturulmaktadır. Kare örgü, üçgen örgü gibi çeşitli örgü desenleri ile oluşturulan fotonik kristaller aynı zamanda sensör olarak da kullanılmaktadır. Biyolojik malzemelerin belirlenmesinden çeşitli malzemelerin kırılma indisinin elde edilmesine kadar farklı alanlarda sensör uygulamaları mevcuttur.

Aynı zamanda bu örgülerin periyodik yapısında yapılan değişimler ile de istenilen dalga boyları filtrelenebilmektedir. Temel olarak kare ya da üçgen örgü simetrisinden oluşan fotonik kristallerde kasıtlı olarak oluşturulacak kusurlar ile de ışığın yüksek mertebelerde yavaşlatılması mümkündür. Işığın yavaşlatılması ise ışığın ortam ile etkileşimini artırarak sensör hassasiyetini artırmaktadır.

Tez kapsamında kare örgü simetrisine sahip fotonik kristal yapılar üzerinde çalışılmış ve çeşitli fotonik kristal tasarımların bant diyagramları hesaplanmıştır. Kusursuz fotonik kristal yapılarda kasıtlı kusurlar yaratılarak ışığın ilerlemediği fotonik bant aralığında belli dalga boyları için kusur kipleri elde edilmiştir. Bu kusur kiplerinin dispersiyon eğrileri incelenerek ışığın kristal içerisinde yavaşlama oranı hesaplanmıştır. Tasarlanan sensör yapılarının hassasiyetlerinin grup hızına bağlı olarak değişimi incelenmiştir.

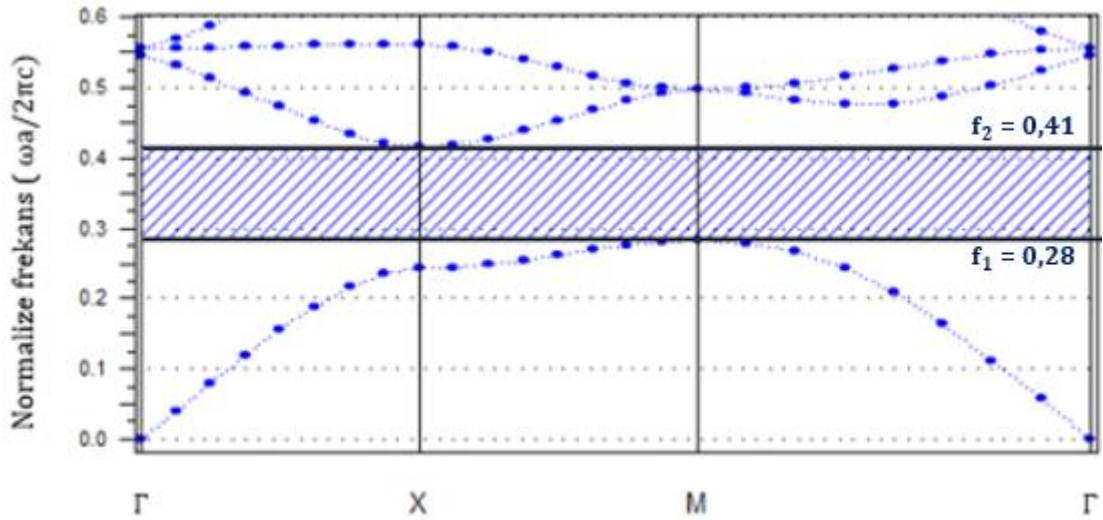
4.1 Kare Örgülü Fotonik Kristaller

Kare örgülü fotonik kristallerin geometrik yapısı Şekil 4.1'de verildiği gibidir. Böyle bir örgüde çalışmalar iki farklı yapı üzerinde gerçekleştirilebilmektedir. Bu yapılar periyodik olarak dizilmiş ve kırmızı renk ile gösterilen daire şeklindeki dielektrik çubuklar silisyum vb. yarı iletken malzemedan oluşabileceği gibi bir yarı iletken malzeme üzerinde delikler açılması yolu ile de oluşturulabilmektedir. Bu periyodikliğin delikler ya da bir yarı iletken malzeme ile oluşturulması farklı özelliklerin elde edilmesini sağlamaktadır.



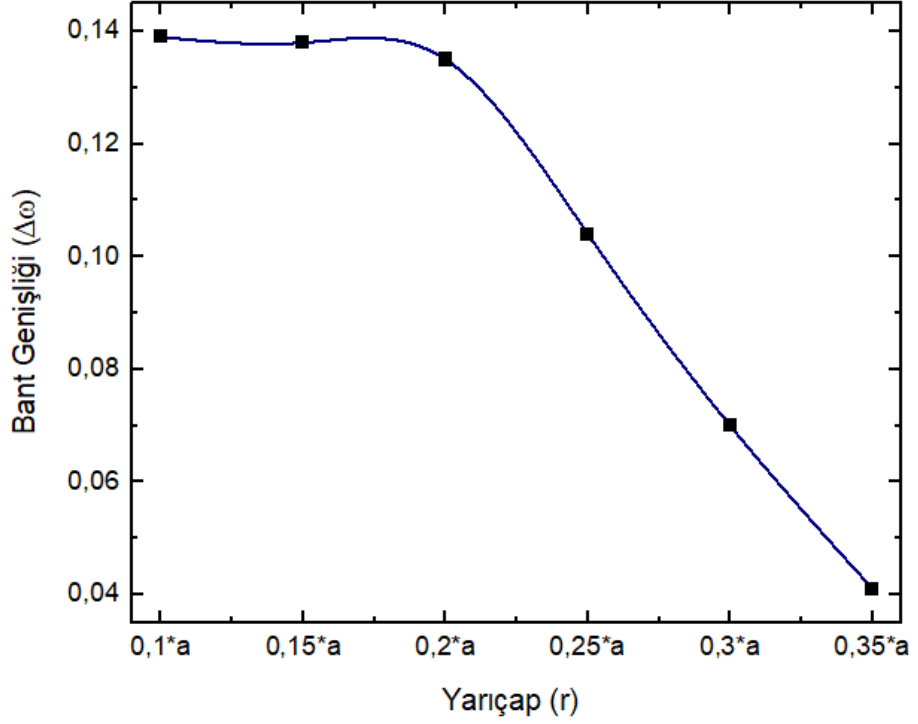
Şekil 4.1. (a) İki boyutlu kusursuz kare örgü simetrisine sahip fotonik kristal yapısı. Kırmızı ile gösterilen dielektrik çubukların etkin kırılma indisi $n_{\text{dielektrik}} = 3,46$, kalan yerler ise boşluk, $n_{\text{arka}} = 1$, olarak belirlenmiştir. ($a = 0,5\mu\text{m}$ ve $r = 0,2*a$) (b) Fotonik kristalin ilk Brillouin bölgesi.

Şekil 4.1’de örgü sabiti diğer adıyla periyodu $a = 0,5 \mu\text{m}$ ve yarıçapı $r = 0,2*a$ olan silisyum çubuklardan oluşturulmuş kusursuz bir fotonik kristal yapısı verilmiştir. Böyle bir yapıdaki fotonik kristale ait bant diyagramları enine elektrik (TE) ve enine manyetik (TM) polarizasyon için hesaplanmıştır. Hesaplamalara ait sonuçlar Şekil 4.2 ve Şekil 4.5’te verilmiştir.



Şekil 4.2. İki boyutlu kusursuz kare örgü simetrisine sahip fotonik kristal yapısı için ışığın TE polarizasyonunda elde edilen bant diyagramı. ($a = 0,5 \mu\text{m}$ ve $r = 0,2*a$ olarak ayarlanmıştır.)

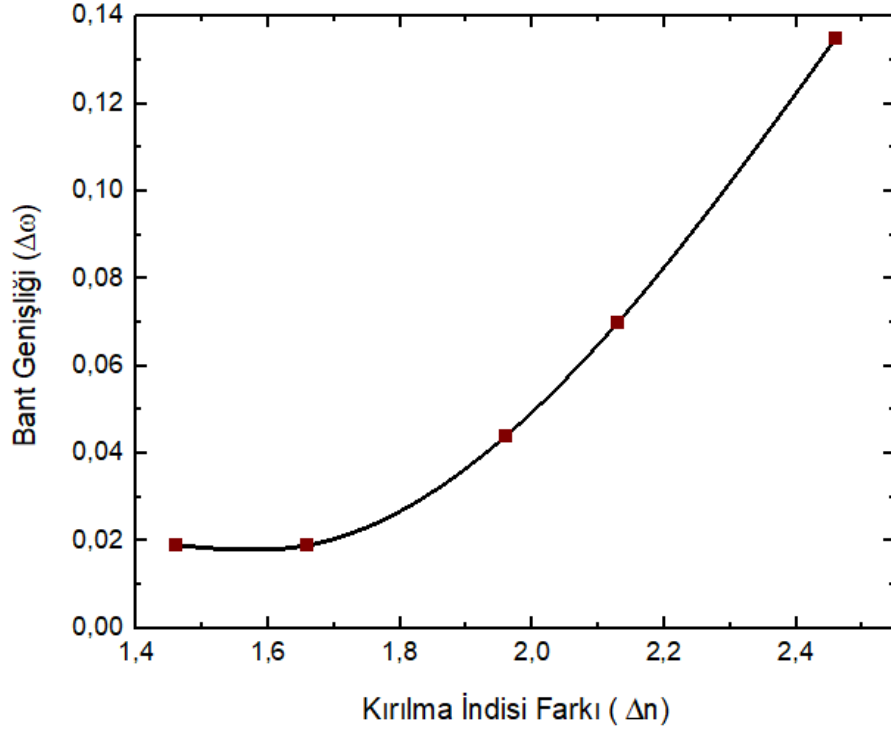
Şekil 4.2’de ışığın TE polarizasyonu için elde edilen bant diyagramı verilmiştir. Kristalin TE polarizasyonu için bant diyagramı incelendiğinde 0,28 – 0,41 normalize frekansları aralığında fotonik bir bant aralığına sahip olduğu görülür. Dielektrik çubuğun yarıçap değeri $r = 0,2*a$ olarak seçilirse fotonik bant genişliği ($\Delta\omega$) 0,13 olarak elde edilir. Bant genişliğinin dielektrik yarıçap değerine bağlı olarak değişimi Şekil 4.3’te verilmiştir.



Şekil 4.3. İki boyutlu kusursuz kare örgü simetrisine sahip fotonik kristal yapısı için TE fotonik bant genişliğinin dielektrik çubuk yarıçapına bağlı değişimi. ($a = 0,5 \mu\text{m}$ olarak seçilmiştir.)

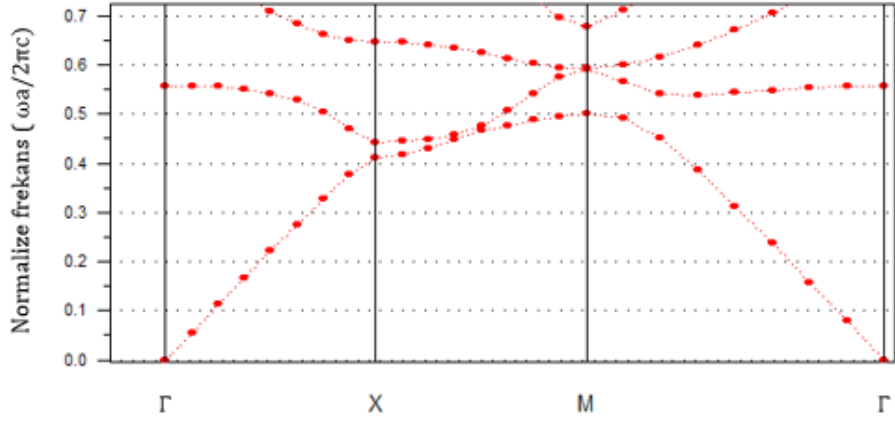
Şekil 4.3’te $a = 0,5 \mu\text{m}$ değerinde fotonik bant aralığının, yarıçapa bağlı olarak değişimi verilmiştir. Şekil 4.1’de verilen kristal yapısı için $r = 0,2*a$ dielektrik yarıçap değerinde periyot $0,5 \mu\text{m} - 1 \mu\text{m}$ aralığında $0,1 \mu\text{m}$ aralıklara değiştirilmiş ve bant genişliğinin değişimi incelenmiştir. Fotonik kristal değişkenleri periyoda bağlı olarak tanımlandığı için periyodun değişimine bağlı olarak tüm değişkenler orantılı değişmiş ve fotonik bant aralığında bir değişim elde edilmemiştir.

Şekil 4.1’de verilen kristal tasarımında fon hava olarak seçilmiş ve kırılma indisi $n= 1$ olarak alınmıştır. Silisyum çubukların dizildiği fon malzemesi değiştirilerek dielektrik kontrast farkı azaltılmış ve bunun bant genişliğine etkisi Şekil 4.4’te verilmiştir.



Şekil 4.4. İki boyutlu kusursuz kare örgü simetrisine sahip fotonik kristal yapısı için TE fotonik bant genişliğinin kırılma indisi farkına bağlı olarak değişimi. ($a = 0,5 \mu\text{m}$ ve $r = 0,2*a$ olarak seçilmiştir.)

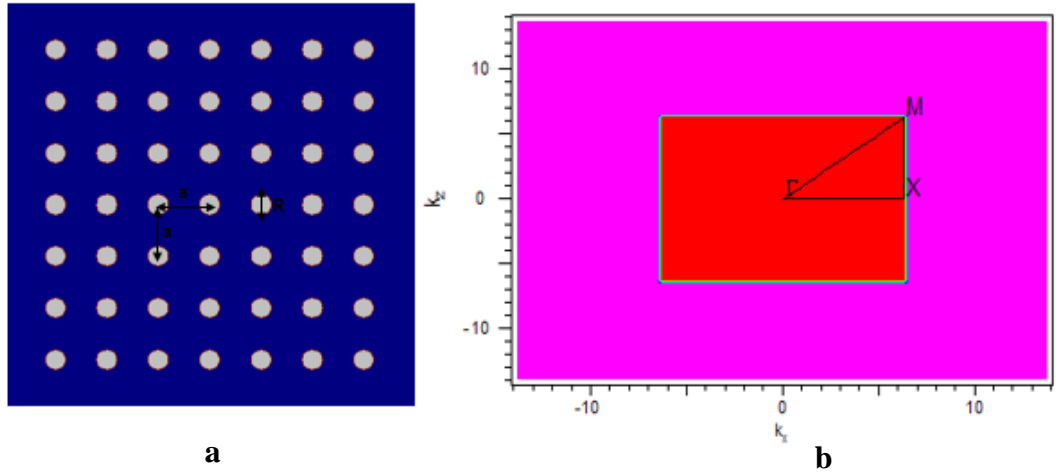
Şekil 4.4’te verilen grafik incelendiğinde fon kırılma indisinin artmasının yani kırılma indisi farkının azalmasının bant genişliğini daralttığı görülmektedir. Şekil 4.1’de verilen kristal yapı içinde ışığın ilerlemeyeceği dalga boyu aralığı $\omega = a/\lambda$ eşitliğinden yararlanılarak $1,2 \mu\text{m} - 1,78 \mu\text{m}$ olarak hesaplanmıştır. İleriki kısımlarda aktarılacağı gibi böyle bir yapıda kasıtlı kusurlar oluşturularak kusur kiplerinin yaratılması ve sonuç olarak ışığın bu yasak bant aralığında dar bir dalga boyu aralığında kristal içinde ilerlemesi hedeflenmektedir. Kristal yapının periyodu değiştirilerek çalışılacak frekans ya da dalga boyu aralığının ayarlanabilmesi mümkündür. Periyot (örgü sabiti) $a= 0,5 \mu\text{m}$ olarak seçilmiştir.



Şekil 4.5. İki boyutlu kusursuz kare örgü simetrisine sahip fotonik kristal yapısı için ışığın TM polarizasyonunda elde edilen bant diyagramı. Işığın TM polarizasyonu için fotonik bant aralığı elde edilmemiştir. ($a = 0,5 \mu\text{m}$, $r = 0,2*a$ olarak ayarlanmıştır.)

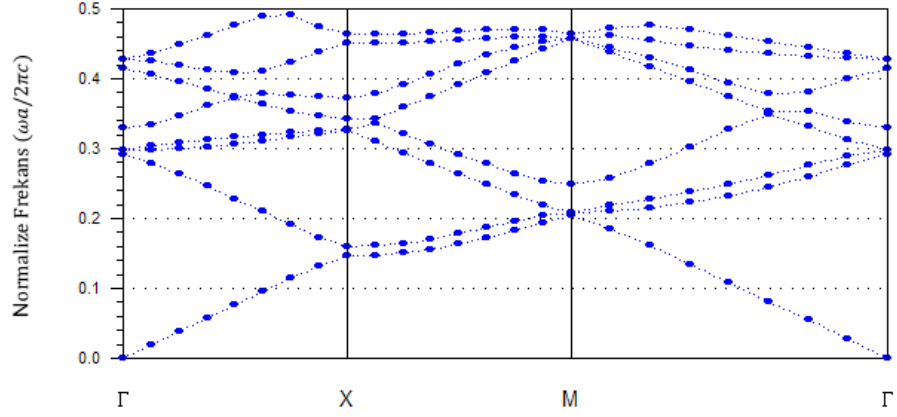
Şekil 4.1’de verilen fotonik kristal yapısı incelendiğinde ışığın TM polarizasyonu için fotonik bant aralığının oluşmadığı görülmektedir. Böyle bir durum fotonik kristalde TM polarizasyona sahip bir ışığın, Şekil 4.5’te görülen kırmızı bant eğrileri üzerinde yer alan tüm dalga boyu ve frekans değerlerinde iletilebileceği anlamını taşır.

Şekil 4.6’da iki boyutlu kare örgü simetrisine sahip fotonik kristallerin diğer bir yapısı olan silisyum bir levha üzerine delikler açılarak elde edilen kristal yapısı gösterilmiştir.

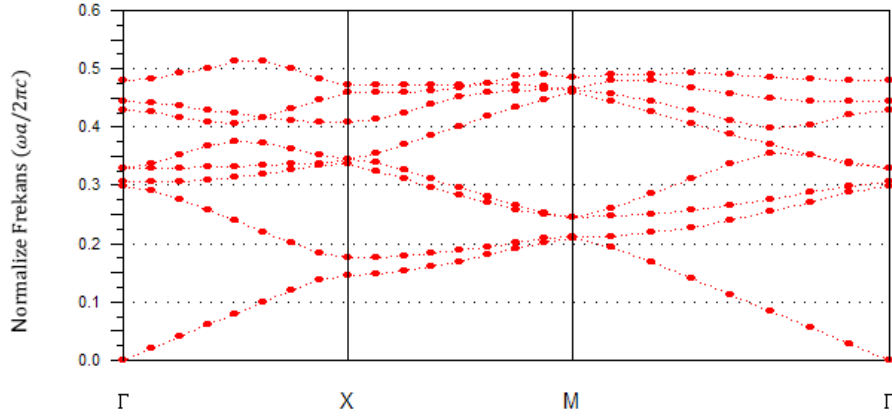


Şekil 4.6. (a) İki boyutlu kusursuz kare örgü simetrisine sahip fotonik kristal yapısı. Mavi ile gösterilen alan silisyum tabaka olup etkin kırılma indisi $n_{\text{dielektrik}} = 3,46$, gri ile gösterilen deliklerin (hava boşluğu) kırılma indisi $n_{\text{delik}} = 1$ olarak verilmiştir. ($a = 0,5 \mu\text{m}$, $r = 0,2*a$) **(b)** Fotonik kristalin ilk Brillouin bölgesi.

Şekil 4.6’da verilen fotonik kristal yapısının periyodu $a = 0,5 \mu\text{m}$ ve delik yarıçapı $r = 0,2*a$ olarak seçilmiştir. Bu periyot ve yarıçap değerlerinde bant diyagramlarının hesaplaması yapıldığında ışığın TM ve TE polarizasyonu için elde edilen bant yapıları Şekil 4.7 ve 4.8’de gösterilmiştir.



Şekil 4.7. İki boyutlu kusursuz kare örgü simetrisine sahip fotonik kristal yapısında ışığın TE polarizasyonu için elde edilen bant diyagramı. ($a = 0,5 \mu\text{m}$, $r = 0,2*a$)



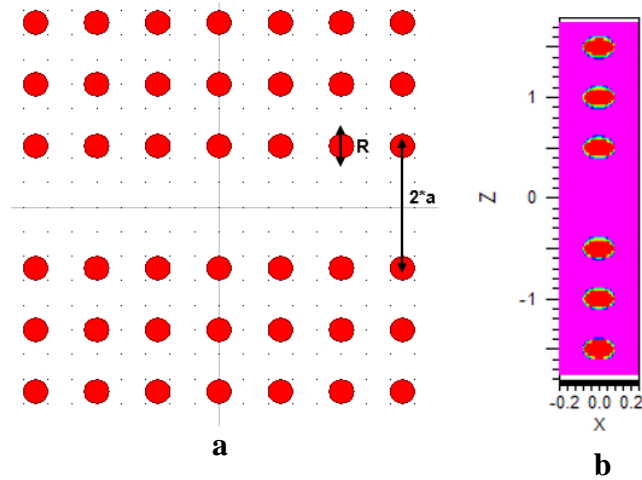
Şekil 4.8. İki boyutlu kusursuz kare örgü simetrisine sahip fotonik kristal yapısında ışığın TM polarizasyonu için elde edilen bant diyagramı. ($a = 0,5 \mu\text{m}$, $r = 0,2*a$)

Şekil 4.7 ve 4.8’de verilen bant diyagramları incelendiğinde bu tasarımda ışığın TE ve TM polarizasyonu için bir bant aralığının elde edilemediği görülmüştür. Tez çalışmasında fotonik kristallerde çeşitli kusurlar oluşturulmuş, elde edilen kusur kipleri incelenmiş ve

sensör hassasiyetlerine etkisi ele alınmıştır. Bu sebeple tez kapsamında kare örgü simetrisine sahip sensör uygulamalarında Şekil 4.1’de verilen tasarım temel alınmıştır.

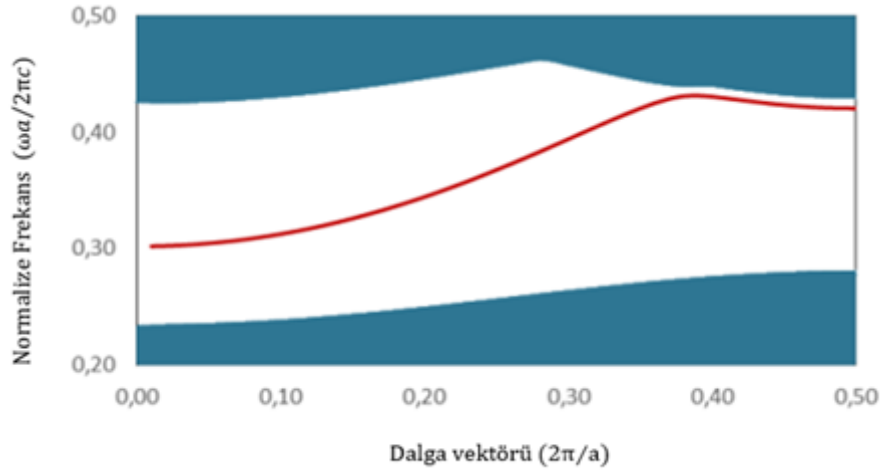
Daha önce Şekil 4.1’de verilen kusursuz kare örgülü fotonik kristalin bant aralığında $1,2 \mu\text{m} - 1,78 \mu\text{m}$ dalga boyu aralığında ışığın geçişinin mümkün olmadığı gösterilmişti. Bu kısımda aynı yapı üzerinde kasıtlı olarak oluşturulacak kusurların (Örgü üzerindeki deliklerin (çubukların) çaplarının değiştirilmesi, örgü üzerindeki bazı deliklerin (çubukların) kaldırılması veya yerlerinin değiştirilmesi vb. işlemler) bant diyagramında oluşturacağı kusur kipleri sayesinde yasak bant aralığında ışık iletiminin mümkün olabileceği ve bu kusur kiplerinin özellikleri gösterilmiştir.

Şekil 4.1’de verilen kusursuz kristal yapısında merkezden tek sıra silisyum çubuklar kaldırılarak bir çizgi kusuru oluşturulmuştur. Merkezden tek sıra çubukların kaldırılmasıyla elde edilen yapıda kusur kipleri bu çizgi içerisinde ilerleyeceği için aynı zamanda bir dalga kılavuzu özelliği oluşturacaktır. Bu yapı Şekil 4.9’da gösterilmiştir.



Şekil 4.9. (a) İki boyutlu çizgi kusurlu kare örgü simetrisine sahip fotonik kristal yapısı. Kırmızı ile gösterilen dielektrik çubukların etkin kırılma indisi $n_{\text{dielektrik}} = 3,46$, fon indisi $n_{\text{arka}} = 1$ olarak seçilmiştir. ($a = 0,5 \mu\text{m}$, $r = 0,2 \cdot a$) **(b)** Fotonik kristalin XZ düzlemindeki benzetim birim hücre alanı.

Şekil 4.9’da gösterilen çizgi kusurlu fotonik kristal yapısı, normalize k aralığı olarak tanımlanan 0-0,5 aralığında hesaplanmış, TE polarizasyon için elde edilen bant diyagramı ve kusur kipi Şekil 4.10’da gösterilmiştir.



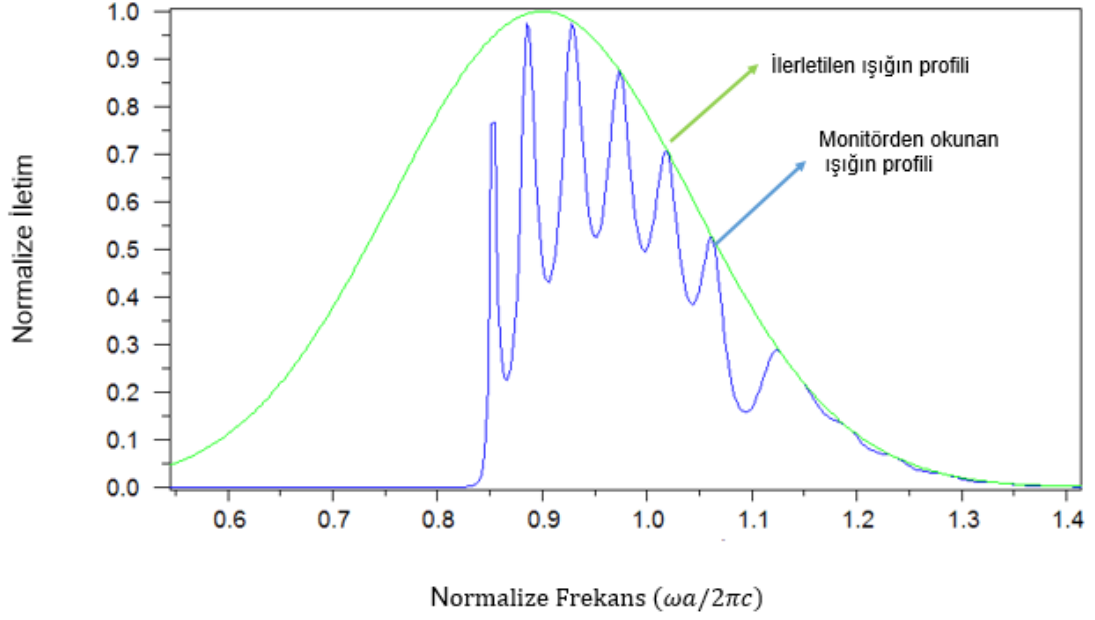
Şekil 4.10. İki boyutlu çizgi kusurlu kare örgü simetrisine sahip fotonik kristal yapısına ait bant diyagramı ve kusur kipi. Kusur kipinin dalga boyu $1,19 \mu\text{m} - 1,66 \mu\text{m}$ aralığındadır. ($a = 0,5 \mu\text{m}$ ve $r = 0,2*a$ olarak verilmiştir.)

Şekil 4.10'da gösterilen kusur kipinin normalize frekans aralığı 0,3 -0,42 olarak elde edilmiştir. Bu frekans aralığının dalga boyu karşılığı $1,19 \mu\text{m} - 1,66 \mu\text{m}$ olarak hesaplanmıştır. Şekilde kırmızı eğriyle gösterilen kusur kipinin dispersiyon eğrisidir ve daha sonraki bölümlerde ışığın grup hızının yavaşlatılması temeline dayalı tasarlanan sensörler için; ışığın grup hızı, grup indisi parametreleri bu dispersiyon eğrileri kullanılarak hesaplanmıştır.

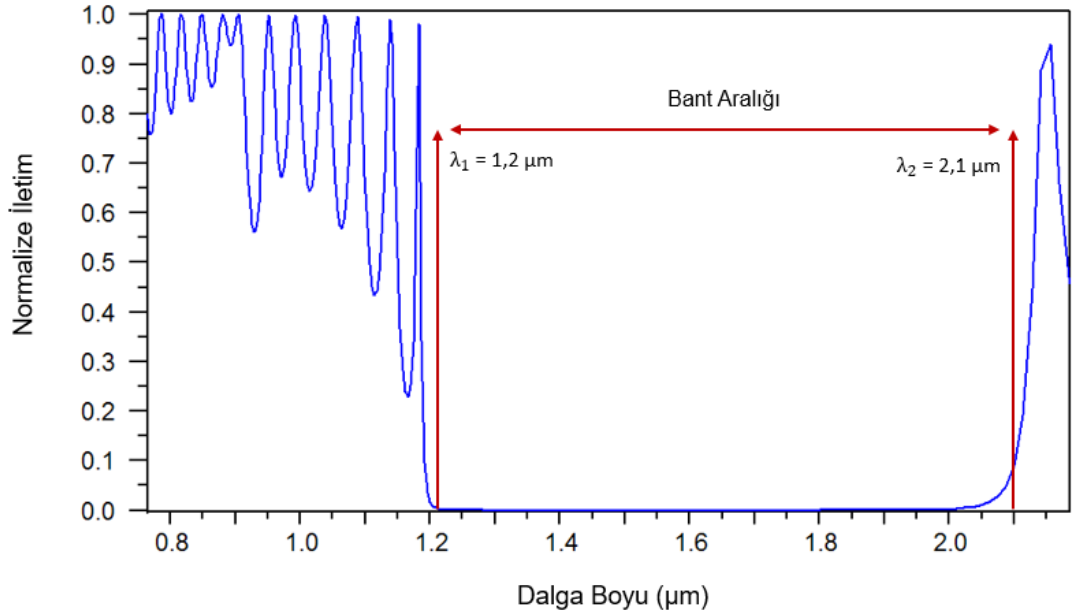
Işığın fotonik kristal içerisinde ilerlemesinin benzetimi Rsoft Fulwave kullanılarak elde edilmiştir. Fulwave yazılımı FDTD yöntemini kullanarak ışığın ilerleme benzetimlerini yapmaktadır.

Şekil 4.1'de verilen kusursuz ve Şekil 4.9'da gösterilen çizgi kusurlu fotonik kristal yapısında ışığın ilerlemesinin benzetimi yapılmış ve elde edilen normalize iletim grafikleri Şekil 4.12 ve 4.13'te gösterilmiştir. Benzetim yazılımında tanımlanması gereken temel parametreler dalga boyu ve iletim benzetiminde kullanılacak ışığın profilidir. Işık profili olarak Gaussian bir profile sahip ışık ilettilmiş ve merkez dalga boyu $\text{Period}/0,45$ olarak tanımlanmıştır. Ayrıca sınır şartları olarak x yönünde periyodik sınır şartları (PBC) ve z yönünde mükemmel uyumlu katman (PML) sınır şartı seçilmiştir.

Işığın iletim benzetimi sonucunda ilerletilen ışık ve fotonik kristal çıkışına bırakılan monitörden okunan ışığın iletim profili üst üste Şekil 4.11’de gösterilmiştir.

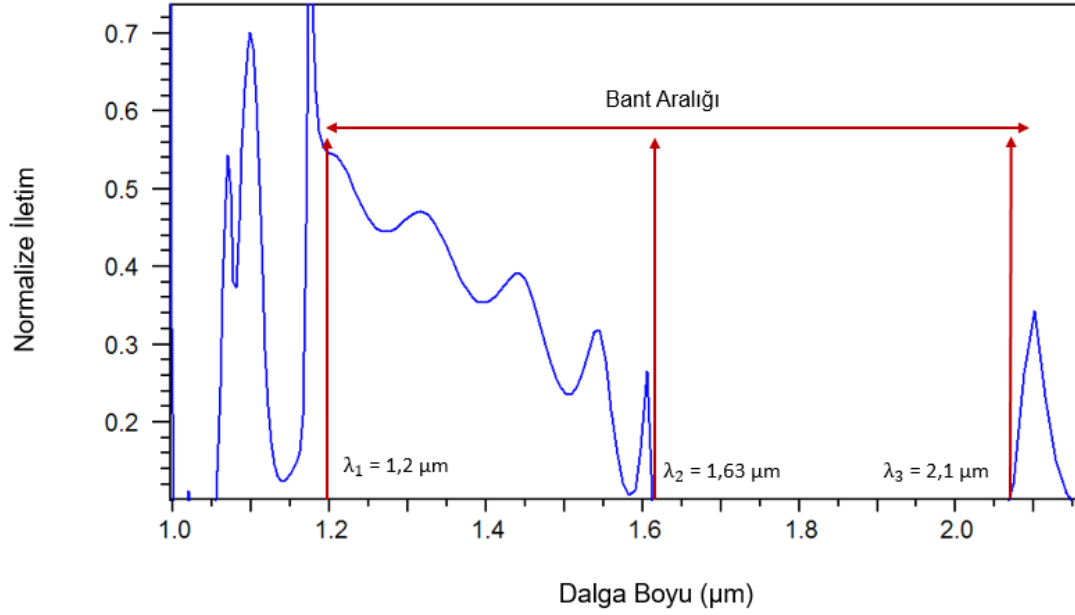


Şekil 4.11. İki boyutlu kusursuz kare örgü simetrisine sahip fotonik kristal yapısına ait normalize iletim grafiği. Işığın giriş ve çıkış profilleri ayrı renklerde üst üste çizdirilmiştir. ($a = 1 \mu\text{m}$ ve $r = 0,2*a$ olarak verilmiştir.)



Şekil 4.12. İki boyutlu kusursuz kare örgü simetrisine sahip fotonik kristal yapısına ait normalize iletim grafiği. Yapının $1,2 \mu\text{m}$ ile $2 \mu\text{m}$ dalga boyu aralığında bant aralığına sahip olduğu görülür. ($a = 0,5 \mu\text{m}$ ve $r = 0,2*a$ olarak verilmiştir.)

Şekil 4.12’de verilen kusursuz fotonik kristalin iletim grafiği incelendiğinde 1,2 μm – 2,1 μm dalga boyu aralığında bir fotonik bant aralığı olduğu görülmüştür. Şekil 4.13 incelendiğinde kusursuz yapıda iletimin olmadığı dalga boyu aralığında iletimin gerçekleştiği görülmektedir. Bu durumun nedeni ise bant diyagramlarında belirtildiği gibi kasıtlı oluşturulan kusurların neden olduğu kusur kipidir.



Şekil 4.13. İki boyutlu çizgi kusurlu kare örgü simetrisine sahip fotonik kristal yapısına ait normalize iletim grafiği. Grafikte bant aralığında 1,2 μm – 1,63 μm dalga boyu aralığında kusur kipinin olduğu görülmektedir. ($a = 0,5 \mu\text{m}$ ve $r = 0,2*a$ olarak verilmiştir.)

Kare örgülü fotonik kristal yapılar için bant diyagramları ve iletim grafikleri incelendiğinde düzlem dalga açılımı yöntemiyle frekans düzleminde yapılan bant diyagramı hesaplamalarının, zaman düzleminde hesaplamaları yapılan iletim grafikleri ile tutarlı olduğu görülmektedir. Fotonik kristallerin yapısında kasıtlı kusurlar oluşturularak elde edilen kusur kiplerinin dispersiyon eğrileri bant diyagramı hesaplamaları ile elde edilmiş ve daha sonraki bölümlerde bu eğriler ışığın grup hızının hesaplanmasında kullanılmıştır.

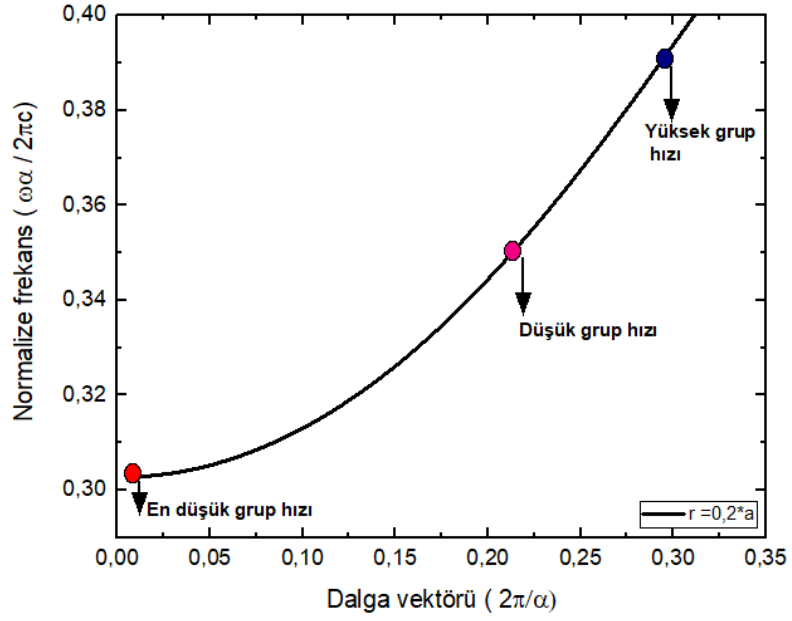
4.2 Kare Örgülü Fotonik Kristallerde Işığın Yavaşlatılması

Fotonik kristaller, yüksek kırılma indisi kontrastına sahip, tek veya çok boyutlu periyodik yapılardır. Işığı, belirli dalga boylarında geri yansıtarak yasak bir frekans aralığı oluşturur ve bu frekans aralığı, fotonik bant aralığı olarak adlandırılır. Bu bant aralığında, kasıtlı kusurlar oluşturularak ışığın belirli dalga boylarında geçişine izin verilir ve bu dalga boyu aralığına sahip kip, kusur kipi olarak adlandırılır. Kusursuz fotonik kristallerde çeşitli kusurların oluşturulması ile elde edilen yeni tasarım fotonik kristal dalga kılavuzu olarak adlandırılır. Bu dalga kılavuzu yapısı ile ışığın polarizasyonunun kontrolü ve ışığın grup hızının manipülasyonu sonucu daha düşük grup hızına sahip tasarımların elde edilmesi mümkündür (Kurt 2013).

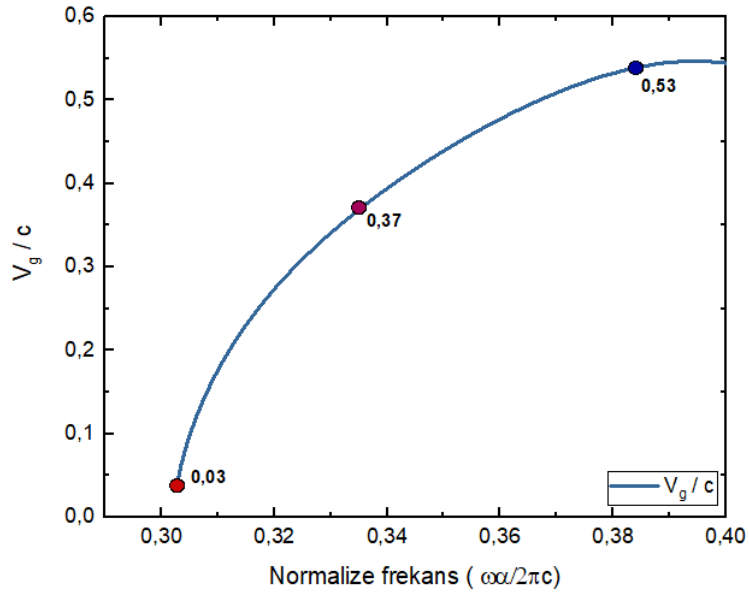
Işığın boşluktaki yayılma hızı $c = 3 \times 10^8$ m/s olarak bilinmektedir, ışığın bu hızı yüksek hızlı optik iletişimde büyük faydalar sağlar. Bu sebeple, ışığın grup hızının yavaşlatılması her ne kadar çelişkili görünse de yavaşlayan ışığın madde alan etkileşimini arttırması kompakt tasarımları mümkün kılmıştır (Parra ve Lowell 2007). Işığın hızının yavaşlatılması ile daha hassas sensör tasarımları mümkün hale gelmiştir (Lai ve ark. 2013).

Periyodik yapıya sahip fotonik kristal tasarımları ışığın grup hızının düzenlenmesine olanak sağlar. Işığın grup hızının yavaşlatılması ayrıca elektrik ve manyetik alanın lokalize olmasını sağlayarak genliklerini büyük ölçüde arttırır, bu özellikten yararlanarak düşük giriş gücü tüketen doğrusal olmayan optik uygulamaları gerçekleştirilebilir (Kurt 2013).

Işığın grup hızı, farklı faz hızlarına sahip dalga paketinin bütününün sahip olduğu hızın tanımıdır. Işığın grup hızı ve grup indisi birbiriyle ters bir ilişkiye sahiptir. Grup indisi n_g ve grup hızı V_g olarak ifade edilir. Işığın boşluktaki yayılma hızı olarak gösterilen c sabittir ve $n_g * V_g = c$ olarak ifade edilir. Işığın grup hızı, $v_g = \frac{\partial k}{\partial \omega}$ olarak ifade edilir ve dispersiyon eğrisinin teğetinin eğimi hesaplanarak elde edilir. Şekil 4.9’da gösterilen fotonik kristal dalga kılavuzu tasarımından elde edilen kusur kipinin dispersiyon eğrisi ve kipin grup hızı hesaplamaları Şekil 4.14 ve Şekil 4.15’te verilmiştir.



Şekil 4.14. İki boyutlu çizgi kusurlu kare örgü simetrisine sahip fotonik kristal yapısına ait kusur kipinin dispersiyon eğrisi. Dispersiyon eğrisinde dalga vektörünün değeri arttıkça grup hızının arttığı gözlemlenmiştir. ($a = 0,5 \mu\text{m}$ ve $r = 0,2*a$ olarak verilmiştir.)

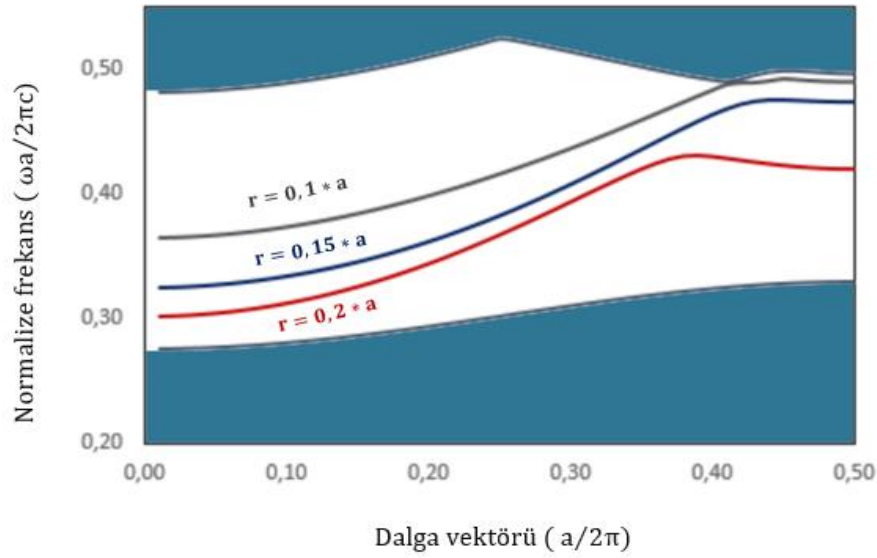


Şekil 4.15. İki boyutlu çizgi kusurlu kare örgü simetrisine sahip fotonik kristal yapısına ait kusur kipinin farklı normalize frekans için elde edilen ışığın yavaşlama oranını gösteren grafik. Dispersiyon eğrisinde normalize frekans değeri arttıkça grup hızının arttığı gözlemlenmiştir. ($a = 0,5 \mu\text{m}$ ve $r = 0,2*a$ olarak verilmiştir.)

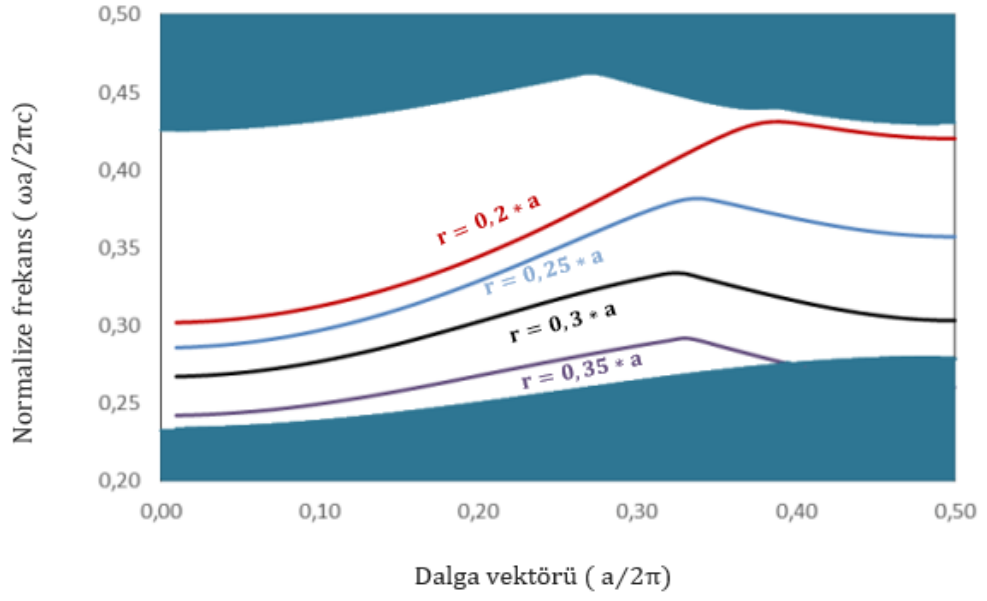
Şekil 4.14'te gösterilen farklı normalize frekans değerleri için ışığın grup hızı hesaplanmış ve elde edilen değerler Şekil 4.15'te verilen grafikte gösterilmiştir.

Şekil 4.15'te gösterilen grafik incelendiğinde ışığın en fazla $k = 0,01$ noktasında yani bant kenarında yavaşladığı elde edilmiş, yavaşlama oranı V_g/c olarak tanımlanmış ve grup hızı $k = 0,01$ 'de $V_g = 0,03*c$ olarak hesaplanmıştır.

Şekil 4.9'da verilen çizgi kusurlu fotonik kristal yapısındaki dielektrik çubukların yarıçapları $0,1*a-0,35*a$ arasında $0,05$ adımlarla artırılmış ve elde edilen yeni kristal yapılara ait bant diyagramları ve kusur kiplerinin dispersiyon eğrileri Şekil 4.16 ve 4.17'de gösterilmiştir.



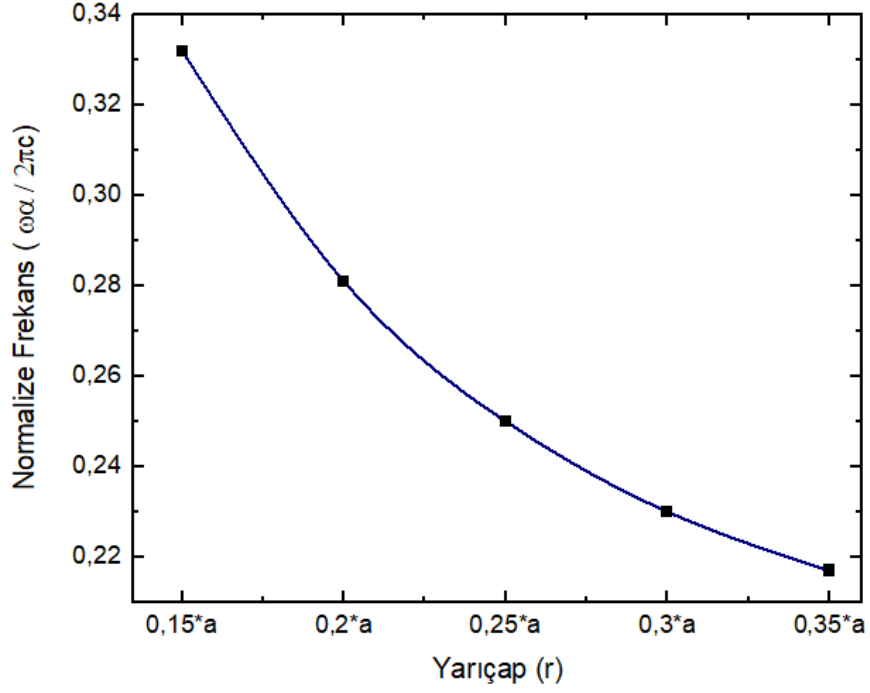
Şekil 4.16. Çizgi kusurlu fotonik kristal yapısındaki dielektrik çubukların yarıçaplarının azaltılması elde edilen yeni kusur kiplerine ait dispersiyon eğrileri. Yarıçapın azaltılması kusur kiplerinin dispersiyon eğrilerinin bant diyagramında yüksek frekansa doğru kaymasına sebep olmuştur.



Şekil 4.17. Çizgi kusurlu fotonik kristal yapısındaki dielektrik çubukların yarıçaplarının arttırılmasıyla elde edilen yeni kusur kiplerine ait dispersiyon eğrileri. Yarıçapın arttırılması kusur kipinin dispersiyon eğrilerinin bant diyagramında düşük frekansa doğru kaymasına sebep olmuştur.

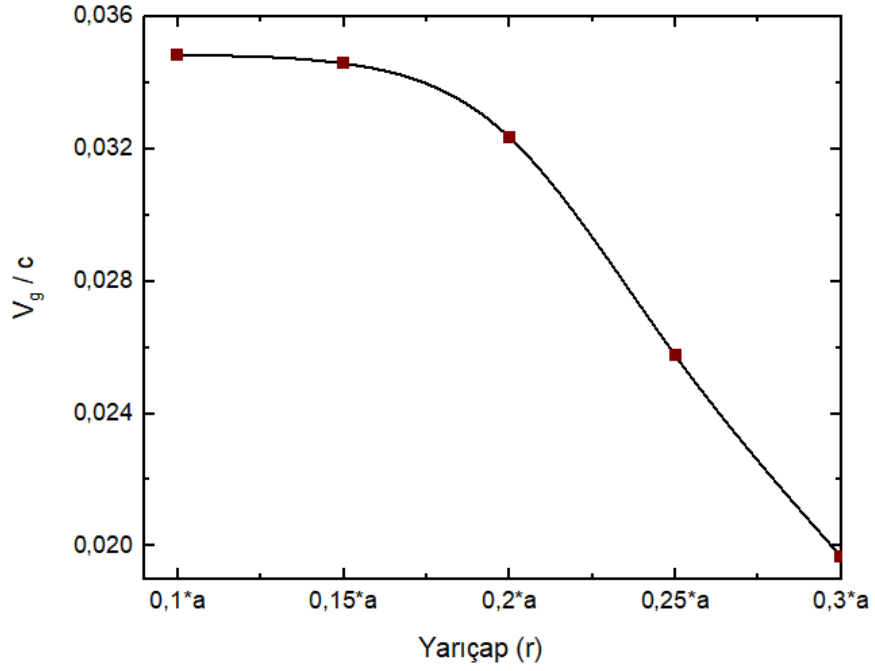
Şekil 4.16 ve 4.17’de verilen grafikler incelendiğinde $r = 0,2*a$ ’da hesaplanan kusur kipinin normalize frekans aralığının yarıçap değerleri azaldıkça yüksek frekanslara doğru kaydığı gözlemlenmektedir.

Şekil 4.18’de farklı yarıçap değerlerinde elde edilen kusur kiplerinin $k = 0,01$ noktasında yarıçap değişimine karşılık normalize frekansının değişimi verilmiştir.



Şekil 4.18. Çizgi kusurlu fotonik kristal yapısındaki dielektrik çubukların yarıçaplarının değiştirilmesi ile $k = 0,01$ noktasındaki (bant kenarındaki) normalize frekansın değişimi. ($a = 0,5 \mu\text{m}$ olarak verilmiştir.)

Şekil 4.18’de verilen grafik incelendiğinde yarıçap $0,35*a$ olarak seçildiğinde kusur kipinin normalize frekansının $0,2$ değerine düştüğü görülmektedir. Yarıçap arttıkça kusur kipi düşük frekans aralığına kaymış ve $r = 0,35*a$ değerinde kusur kipi alt seviyedeki bant sınırı seviyesine çok fazla yaklaşmıştır. Bu sebeple $r = 0,35*a$ değerinde çok küçük bir dalga vektörü aralığında kusur kipi oluşmuştur. Yarıçap değerinin $r = 0,35*a$ değerinden daha büyük yarıçap değerleri için bant aralığında elde edilen kusur kipinin bant içinde kaybolduğu gözlemlenmiştir. Bu sebeple artırılan yarıçap için en optimum değer $0,3*a$ olarak elde edilmiştir. Çizgi kusurlu fotonik kristal yapısında elde edilen kusur kipinin dispersiyon eğrileri incelenmiş ve kusur kipinin grup hızındaki azalmanın dielektrik çubuk yarıçap değerine karşılık değişimi Şekil 4.19’da gösterilmiştir.

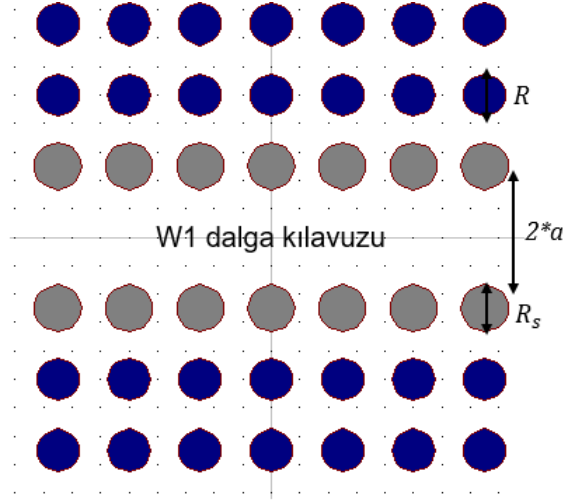


Şekil 4.19. Çizgi kusurlu fotonik kristal yapısında elde edilen kusur kipinin artan dielektrik yarıçapına bağlı olarak grup hızının değişiminin grafiği. Yarıçap değeri arttıkça grup hızı azalmış ve $k=0,01$ noktasında $r = 0,3*a$ yarıçap değeri ışığın grup hızı $0,02*c$ olarak elde edilmiştir.

Şekil 4.19’da çizgi kusurlu fotonik kristal dalga kılavuzundaki dielektrik çubukların yarıçapının artırılmasına karşılık $k=0,01$ noktasındaki grup hızındaki azalma değerinin değişimi gösterilmiştir. Grup hızı, yarıçap değerinin artmasına paralel olarak azalış göstermiştir. Yarıçap değerinin $0,3*a$ değerinden daha büyük olduğu yapılarda kusur kipi bant aralığından düşük frekans bandına kaydığı için kusur kipi elde edilememektedir. Bu sebeple ileriki bölümlerde anlatılacak olan sensör tasarımında kullanılacak dielektrik yarıçap değeri $0,3*a$ olarak belirlenmiştir. Dielektrik yarıçap değerinin $r = 0,3*a$ olduğu değer için ışığın grup hızı $0,02*c$ olarak hesaplanmıştır.

Işığın fotonik kristal içerisinde yavaşlamasının sensör hassasiyetini artıracak daha önce belirtilmişti. Bu sebeple fotonik kristal içerisinde ışığı daha yüksek mertebelerde yavaşlatmak amacıyla Şekil 4.9’da verilen fotonik kristal yapısında çizgi kusuruna ek olarak iki farklı kusur çeşidi daha oluşturulmuş ve bu kusurlar sonucu kusur kipinin dispersiyon eğrisinde meydana gelen değişimler incelenmiştir.

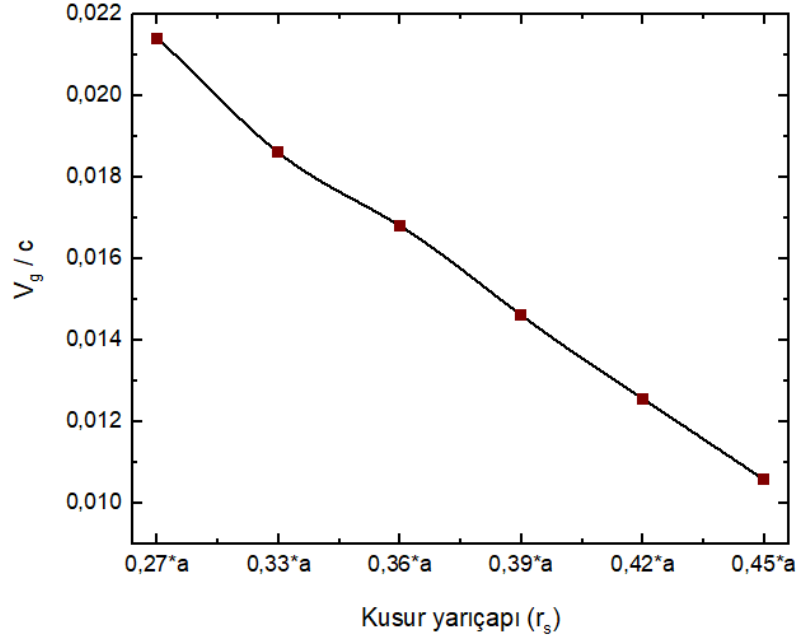
Şekil 4.9’da verilen fotonik kristal yapısında çizgi kusurunun üst ve alt ilk sırasındaki dielektrik çubukların yarıçapları değiştirilmiş, yeni fotonik kristal tasarımı Şekil 4.20’de gösterilmiştir.



Şekil 4.20. İki boyutlu çizgi kusurlu kare örgü simetrisine sahip fotonik kristal yapısı. Çizgi kusuruna ek olarak gri ile gösterilen dielektrik çubukların yarıçapı $r_s = 0,9*r - 1,5*r$ aralığında değiştirilmiştir. Dielektrik çubukların etkin kırılma indisi $n_{\text{dielektrik}} = 3,46$, fon indisi $n_{\text{arka}} = 1$ olarak seçilmiştir. ($a = 0,5 \mu\text{m}$ ve $r = 0,3*a$ olarak verilmiştir.)

Şekil 4.20’de verilen fotonik kristal tasarımında kusur yarıçapı olarak adlandırılan r_s ; $0,9*r - 1,5*r$ aralığında 0,1 adımlarla değiştirilmiş ve kusur yarıçapı değişiminin grup hızına etkisi incelenmiştir. Artan kusur yarıçapına bağlı olarak $k=0,01$ noktasındaki grup hızının değişimi Şekil 4.21’de gösterilmiştir.

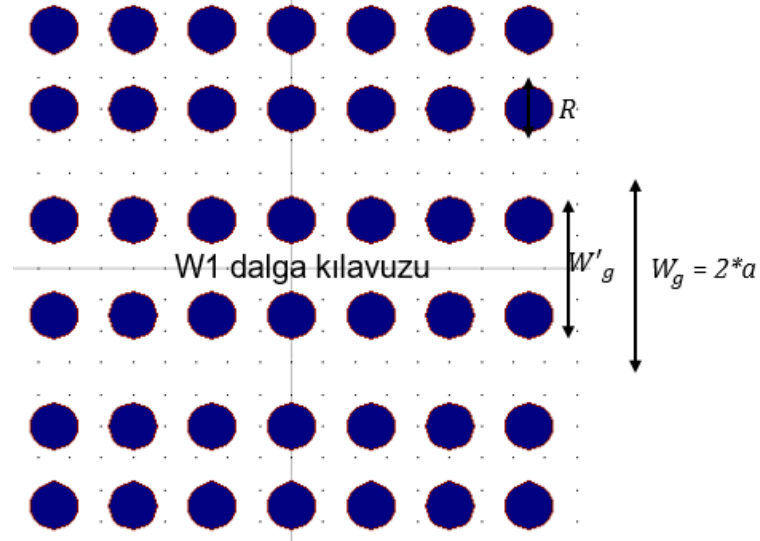
Kusur yarıçapının arttırılmasıyla $k=0,01$ noktasında yani bant kenarındaki grup hızında azalış gözlemlenmiştir. Kusur yarıçapı değeri $1,5*r$ değerinden daha büyük değerlere çıkarıldığında tasarım yapılacak frekans bandındaki kusur kipi farklı frekans aralıklarına kaymaktadır. Bu sebeple sensör uygulamasında kullanılacak ilk tasarım Şekil 4.20’de verilen kusurlu fotonik kristal dalga kılavuzu yapısıdır. Tasarlanacak sensör için kullanılan kristal parametreleri $r = 0,3*a$, $a = 0,5 \mu\text{m}$ ve $r_s = 1,5*r$ olarak seçilmiştir.



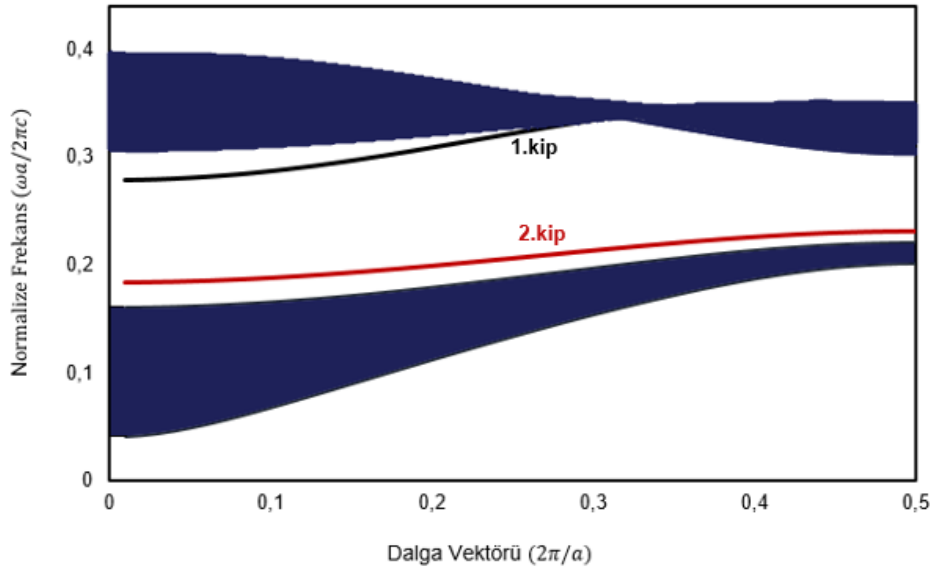
Şekil 4.21. Tasarlanan fotonik kristal yapısında kusur yarıçapının değişiminin grup hızına etkisi gösterilmiştir. Kusur yarıçapı arttıkça grup hızı azalmış ve yarıçap değerinin $1,5*a$ olduğu değer için grup hızı $V_g = 0,01*c$ olarak elde edilmiştir.

Şekil 4.9’da verilen fotonik kristal yapısında yapılabilecek diğer bir değişiklik ise çizgi kusurlu fotonik kristal dalga kılavuzunun kılavuz genişliğini azaltmaktır. Çizgi kusuruna ek olarak kristal dalga kılavuzu genişliğinin azaltılmasıyla elde edilen yeni tasarım Şekil 4.22’de verilmiştir.

Şekil 4.22’de verilen çizgi kusurlu fotonik kristal yapısında kılavuz genişliği w_g $0,1*a$ - $0,4*a$ aralığında $0,1*a$ adımlarla azaltılmış ve bu değişimin grup hızına etkisi incelenmiştir. Fotonik kristalin kılavuz genişliğinin $0,1*a$ oranında daraltılmasıyla elde edilen yeni bant diyagramı ve kusur kiplerinin dispersiyon eğrisi Şekil 4.23’te gösterilmiştir. Fotonik kristal dalga kılavuzunun, çizgi kusuruna ek olarak kılavuz genişliğinin daraltılması yeni bir kusur kipinin oluşmasına sebep olmuştur.



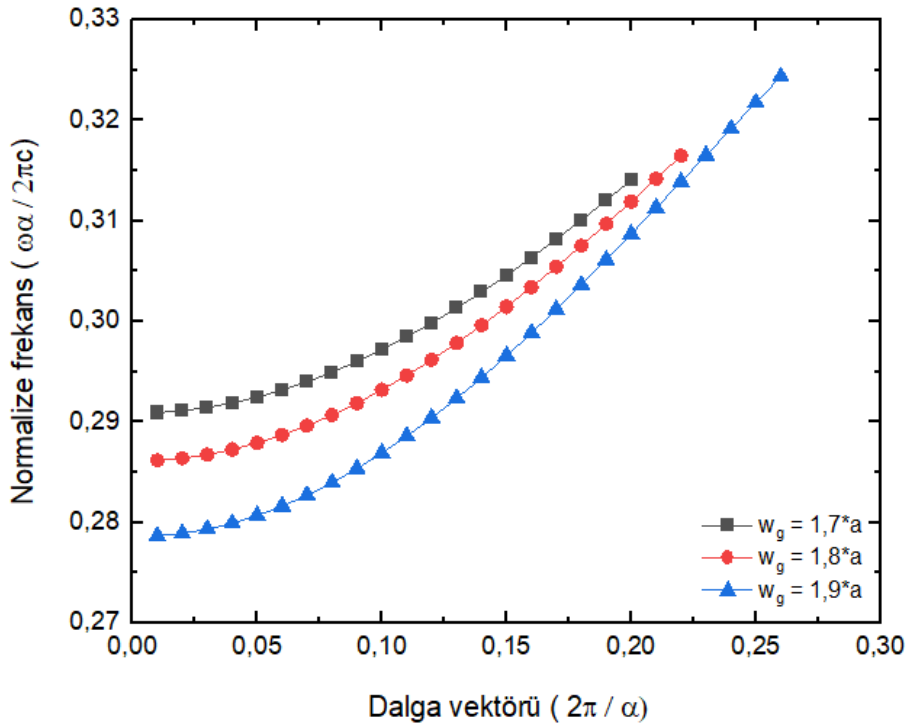
Şekil 4.22. İki boyutlu çizgi kusurlu kare örgü simetrisine sahip fotonik kristal yapısı. Çizgi kusuruna ek olarak kılavuz genişliği w_g azaltılmıştır. Dielektrik çubukların etkin kırılma indisi $n_{\text{dielektrik}} = 3,46$, arka plan indisi $n_{\text{arka}} = 1$ olarak seçilmiştir. ($a = 0,5 \mu\text{m}$ ve $r = 0,3*a$ olarak verilmiştir.)



Şekil 4.23. Çizgi kusurlu fotonik kristal dalga kılavuzunun kılavuz genişliğinin $0,1*a$ oranında daraltılmasıyla elde edilen yeni kristal yapısının kusur kiplerinin dispersiyon eğrileri. Yeni kristal yapısında iki tane kusur kipi elde edilmiştir. ($a = 0,5 \mu\text{m}$ ve $r = 0,3*a$ olarak verilmiştir.)

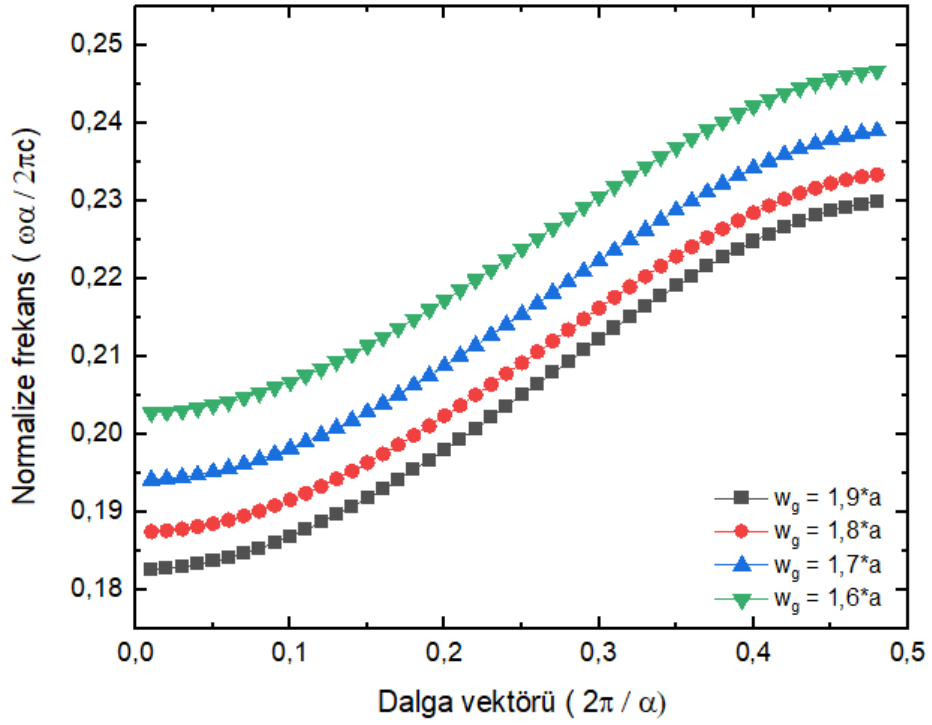
Şekil 4.23'te verilen bant diyagramı incelendiğinde fotonik kristal dalga kılavuzunun kılavuz genişliğinin daraltılmasının bant aralığında yeni bir kusur kipi oluşturduğu görülmektedir. Bant aralığında birinci kip olarak adlandırılan kusur kipi Şekil 4.17'de

yarıçap değerinin $r = 0,3*a$ olarak seçildiği fotonik kristal yapısında oluşan kusur kipi ile aynı kiptir. Kılavuz genişliğinin daralması ile bu kipi yüksek frekans bölgesine doğru kaydığı ve daha dar bir k aralığında kipi oluştuğu gözlemlenmiştir. Şekil 4.23'te verilen bant diyagramında ikinci kip olarak adlandırılan kusur kipi, kılavuzun daraltılmasıyla oluşan yeni bir kusur kipi. Bu kusur kiplerinin dispersiyon eğrilerinin kılavuz genişliğinin daraltılmasıyla elde edilen değişimini gösteren grafik Şekil 4.24 ve Şekil 25'te verilmiştir.



Şekil 4.24. Çizgi kusurlu fotonik kristal dalga kılavuzunun kılavuz genişliğinin $0,1*a$ - $0,3*a$ aralığında $0,1*a$ adımlarla daraltılmasıyla elde edilen yeni kristal yapısının birinci kusur kipi dispersiyon eğrileri. ($a = 0,5 \mu m$ ve $r = 0,3*a$ olarak verilmiştir.)

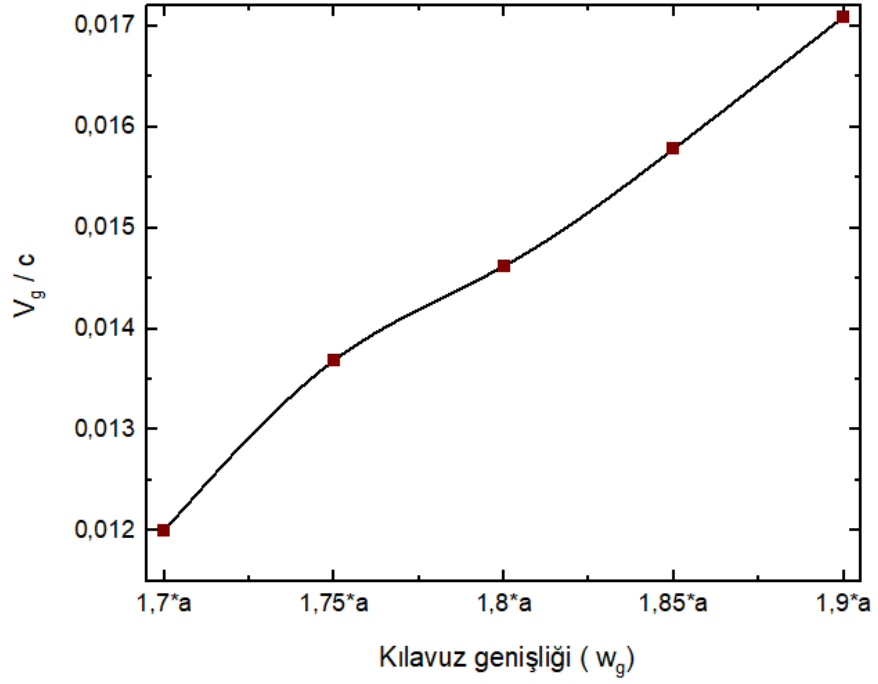
Şekil 4.24'te verilen birinci kusur kipi dispersiyon eğrisi incelendiğinde kusur kipi dalga kılavuzunun genişliğinin azalması ile daraldığı ve kılavuz genişliğinin $1,7*a$ 'dan daha dar olduğu değerlerde bant içinde kaybolduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.25. Çizgi kusurlu fotonik kristal dalga kılavuzunun kılavuz genişliğinin $0,1*a$ - $0,4*a$ aralığında $0,1*a$ adımlarla daraltılmasıyla elde edilen yeni kristal yapısında ikinci kusur kipinin dispersiyon eğrileri. ($a = 0,5 \mu\text{m}$ ve $r = 0,3*a$ olarak verilmiştir.)

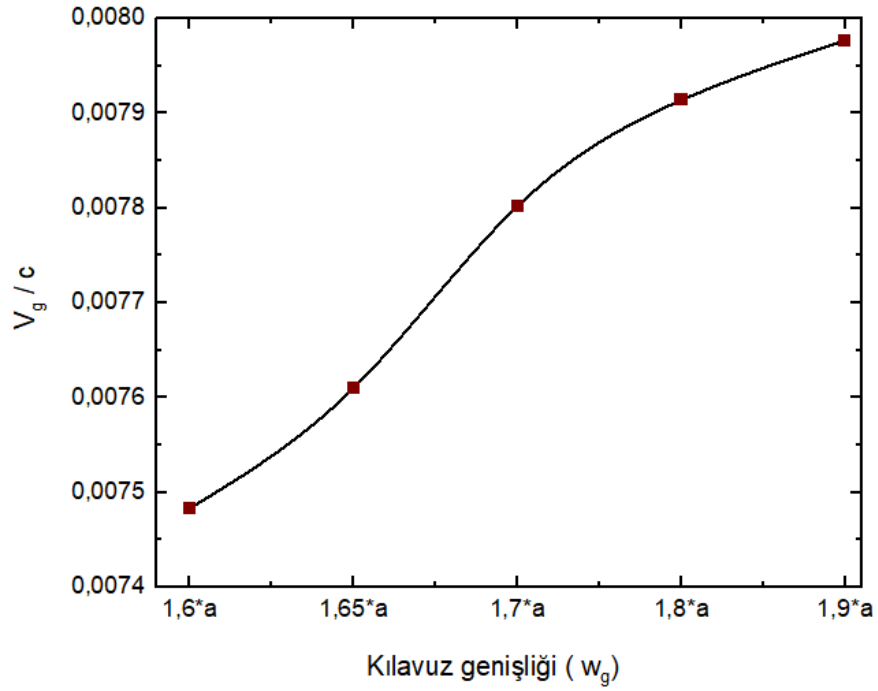
Şekil 4.25'te ikinci kusur kipinin fotonik kristal dalga kılavuzu genişliğinin daraltılmasına karşılık dispersiyon eğrisinin değişimi verilmiştir. Grafik incelendiğinde ikinci kusur kipinin daha geniş bir k aralığında oluştuğu görülmüştür. Kılavuz genişliğinin daraltılması kusur kipinin normalize frekansının daha yüksek frekans değerlerine kaymasına sebep olmuştur.

Şekil 4.24 ve Şekil 4.25'te verilen birinci ve ikinci kusur kipine ait dispersiyon eğrilerinin incelenmesiyle grup hızı değerleri elde edilmiştir. İki adet kusur kipinin dalga kılavuzu genişliğine bağlı olarak grup hızının değişimi ayrı ayrı incelenmiş ve bu değişim aşağıdaki grafiklerde verilmiştir:



Şekil 4.26. Çizgi kusurlu fotonik kristal dalga kılavuzunun kılavuz genişliğinin $0,1^* - 0,4^*a$ aralığında $0,1^*a$ adımlarla daraltılmasıyla elde edilen yeni kristal yapısında birinci kusur kipinin grup hızının genişliğe bağlı olarak değişimi. ($a = 0,5 \mu\text{m}$ ve $r = 0,3^*a$ olarak verilmiştir.)

Şekil 4.26'da birinci kusur kipinin grup hızının dalga kılavuzu genişliğine bağlı olarak değişimi verilmiştir. Grafik incelendiğinde kılavuzun daralmasının grup hızını azalttığı gözlemlenmiştir. Fotonik kristal dalga kılavuzunun $w_g = 1,7^*a$ genişliğinde ve $k = 0,01$ noktasında grup hızı değeri en yavaş seviyeye ulaşmış ve $0,012^*c$ olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.27. Çizgi kusurlu fotonik kristal dalga kılavuzunun kılavuz genişliğinin $0,1^*a$ - $0,4^*a$ aralığında $0,1^*a$ adımlarla daraltılmasıyla elde edilen yeni kristal yapısında ikinci kusur kipinin grup hızının kılavuz genişliğine bağlı olarak değişimi. ($a = 0,5 \mu\text{m}$ ve $r = 0,3^*a$ olarak verilmiştir.)

Şekil 4.27’de ikinci kusur kipinin grup hızının dalga kılavuzu genişliğine bağlı olarak değişimi verilmiştir. Grafik incelendiğinde kılavuzun daralmasının grup hızını azalttığı gözlemlenmiştir. Fotonik kristal dalga kılavuzunun $w_g = 1,6^*a$ genişliğinde ve $k = 0,01$ noktasında grup hızı değeri en yavaş seviyeye ulaşmış ve $0,074^*c$ olarak elde edilmiştir.

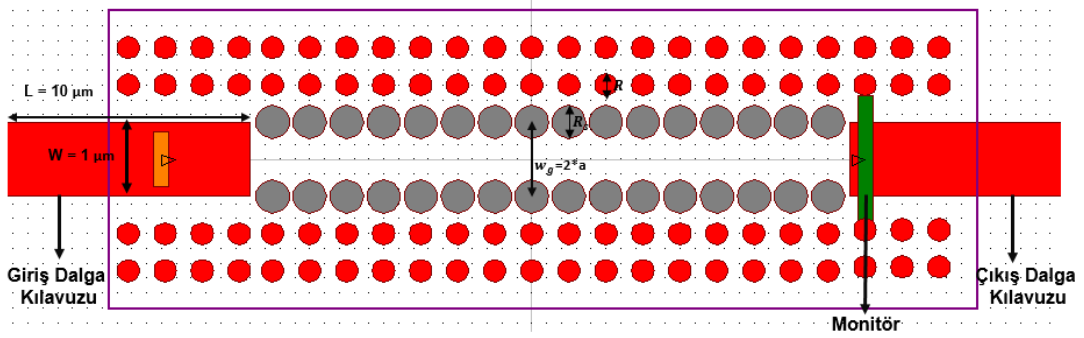
Şekil 4.22’de verilen fotonik kristal dalga kılavuzu tasarımı ile iki adet farklı frekans aralığında çalışan kusur kipi elde edilmiştir. Bölüm 4.3’te bu iki kusur kipinin sensör tasarımı uygulamalarındaki kullanımı ve sensör tasarımları verilmiştir.

Işığın grup hızının yavaşlamasıyla artan madde-alan etkileşimine bağlı olarak sensör hassasiyeti artacaktır. Bu sebeple sensör tasarımlarında ışığın en fazla yavaşladığı tasarım parametreleri temel alınmıştır. İkinci sensör tasarımı olarak iki adet kusur kipini destekleyen Şekil 4.22’de verilen tasarım kullanılmış ve kusur kiplerinin elektrik alan dağılımları elde edilmiş, ışığın fotonik kristal yapısındaki dielektrik çubuklarla etkileşimi incelenmiştir. Ayrıca ışığın yavaşlaması ile sensör hassasiyetinin değişimi elde edilmiştir.

Sensör tasarımlarına ait parametrelerin detaylı anlatımı ve ışığın etkin bir şekilde fotonik kristal içerisine eşlenmesini sağlayan çiftleyici tasarımları Bölüm 4.3'te detaylandırılmıştır.

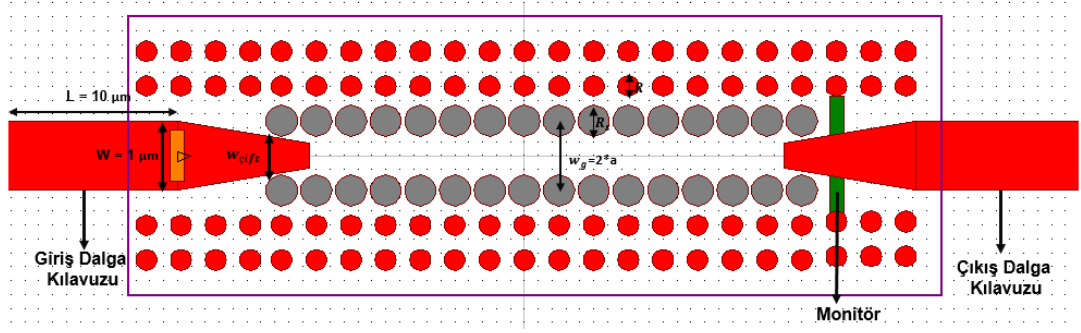
4.3. Yavaş Işık Temelli Sensör Tasarımı

Şekil 4.28'de çizgi kusurlu fotonik kristal yapısındaki alt üst tek sıra dielektrik çubukların yarıçap büyüklüklerinin arttırılması ile elde edilen yeni kristal yapısı daha önceki bölümde gösterilmişti. Bu fotonik kristal dalga kılavuzu yapısı ayrıca fotonik sensör tasarımı olarak kullanılmış ve sensör parametreleri olarak ışığın en fazla yavaşladığı kusur yarıçap değeri olan $r_s = 1,5*r$ olarak seçilmiştir. Sensör yapısındaki dielektrik çubukların yarıçap değeri $r = 0,3*a$ olarak verilmiştir.



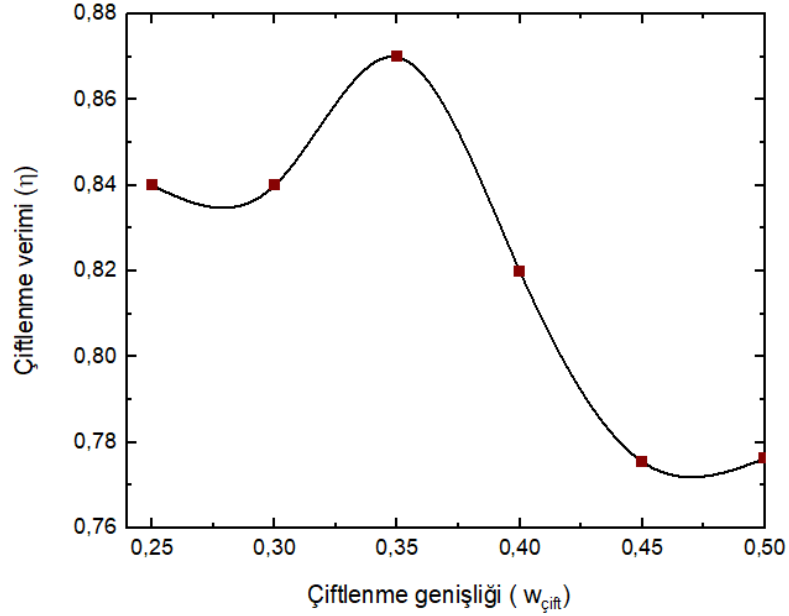
Şekil 4.28. Fotonik kristal dalga kılavuzu sensör tasarımı. Fotonik kristal yapısında çizgi kusuruna ek olarak yarıçap kusuru oluşturulmuş ve kusur yarıçapı $r_s = 1,5*r$ olarak tanımlanmıştır. ($a = 0,5 \mu\text{m}$ ve $r = 0,3*a$ olarak verilmiştir.)

Fotonik kristal içerisine ışık bir dalga kılavuzu aracılığıyla taşınır. Şekil 4.28'de verilen sensör tasarımında ışık, $10\mu\text{m}$ uzunluğunda ve $1 \mu\text{m}$ genişliğinde giriş dalga kılavuzu ile fotonik kristal içerisine taşınır. Dalga kılavuzu ve fotonik kristal arasında $2,46$ değerinde kırılma indisi farkı mevcuttur. Bu sebeple ışık doğrudan dalga kılavuzundan kristal içerisine etkin bir şekilde çiftlenemez. Dalga kılavuzu içerisinde taşınan ışığın fotonik kristal içerisine etkin bir şekilde ilerletilmesi doğru bir çiftleyici tasarımı ile mümkün olmaktadır. Dalga kılavuzundan iletilen ışık çiftleyici tasarımı yapılmadan ancak %45 verimle kristal içerisine eşlenebilmektedir. Çiftlenme verimini arttırmak için dalga kılavuzu inceltirilerek ışık, kristal içerisine eşlenir. Şekil 4.29'da tasarlanan çiftleyicinin yapısı gösterilmiştir.



Şekil 4.29. Fotonik kristal dalga kılavuzu sensör tasarımı. Fotonik kristal yapısında çizgi kusuruna ek olarak yarıçap kusuru oluşturulmuş ve kusur yarıçapı $r_s = 1,5*r$ olarak tanımlanmıştır. Fotonik kristal içerisine ışığın etkin bir şekilde eşlenmesi için çiftleyici tasarımı yapılmıştır. Çiftleyici genişliği $w_{cift} = 0,35 \mu\text{m}$ olarak seçilmiştir. ($a = 0,5 \mu\text{m}$ ve $r = 0,3*a$ olarak verilmiştir.)

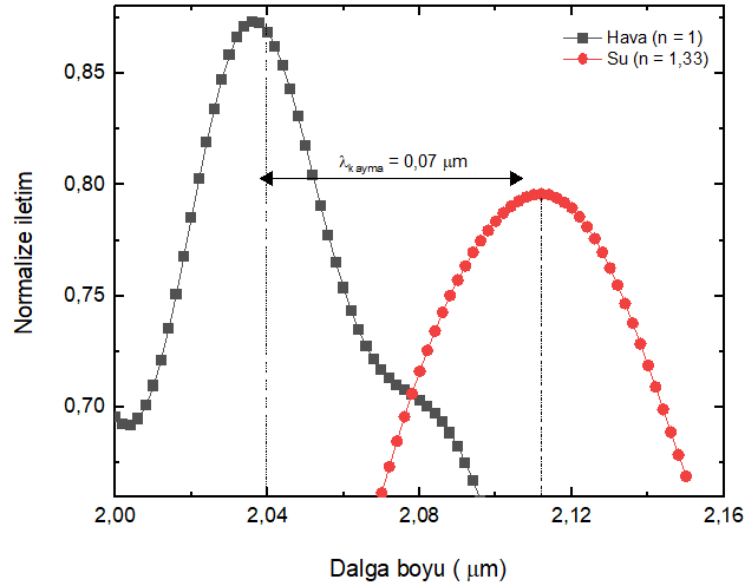
Çiftleyici genişliğine bağlı olarak çiftleyici veriminin değişimini gösteren grafik Şekil 4.30'da gösterilmiştir.



Şekil 4.30. Çiftleyici genişliğine bağlı olarak çiftleyici verimini gösteren grafik. Çiftleyici genişliği azaldıkça ışık fotonik kristal içerisine daha etkin bir şekilde eşlenmiştir. Genişlik değeri için optimum değer $w_{cift} = 0,35 \mu\text{m}$ olarak elde edilmiştir. (Dalga boyu $\lambda = 2,04 \mu\text{m}$)

Şekil 4.30’da verilen grafik incelendiğinde $w_{\text{çift}} = 0,35 \mu\text{m}$ çiftleyici genişliği değeri için, ışığın %87 oranında bir verimle fotonik kristal içerisine eşlendiği görülür. Fotonik kristal içerisine ışık, çiftleyici kullanmadan eşlenirse bu verim %45 değerine düşer. Çiftleyici genişliği değeri azaltılarak verim arttırılmış ve optimum değer çiftleyici genişliğinin $w_{\text{çift}} = 0,35 \mu\text{m}$ olduğu değer olarak saptanmıştır. Işığın dalga boyunun $\lambda = 2,04 \mu\text{m}$ ve $w_{\text{çift}} = 0,35 \mu\text{m}$ olduğu değerler için ışığın çiftlenme verimi %87 olarak ölçülmüştür. Kusur yarıçapı değerinin $1,5 \cdot r$ olduğu kusur için dispersiyon eğrisinden kusur kipinin dalga boyu aralığı $1,98 \mu\text{m} - 2,16 \mu\text{m}$ olarak elde edilmiştir.

Şekil 4.29’da verilen sensör tasarımında fon kırılma indisi $n = 1$ ‘den $n = 1,33$ ’e çıkarılmış ve $1,98 \mu\text{m} - 2,1 \mu\text{m}$ dalga boyu aralıklarındaki iletim grafikleri elde edilmiştir. Tasarlanan kırılma indisi sensörü, farklı malzemelerin algılanmasını sağladığı gibi basınç, sıcaklık ve harekete de duyarlı olarak çalışabilmektedir.

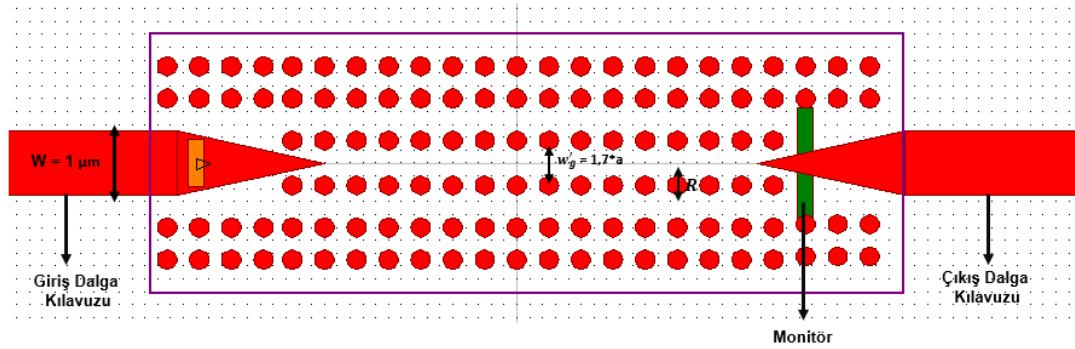


Şekil 4.31. Kırılma indisi farkını temel alarak tasarlanan sensör yapısında, $\Delta n = 0,33$ indis farkına karşılık maksimum iletimin sağlandığı dalga boyundaki kayma miktarı.

Şekil 4.31’de verilen iletim grafiği incelendiğinde arka plan kırılma indisinin $n = 1$ değeri için maksimum iletimin olduğu dalga boyu $\lambda = 2,04 \mu\text{m}$ ve iletim miktarı %87 olarak ölçülmüştür. Arka plan kırılma indisi $n = 1,33$ olduğunda maksimum iletimin olduğu dalga boyu $\lambda = 2,11 \mu\text{m}$ değerine kayma göstermiştir ve iletim değeri %80’e düşmüştür. Maksimum iletim noktaları arasındaki dalga boyu farkı $0,07 \mu\text{m}$ olarak ölçülmüştür. Şekil

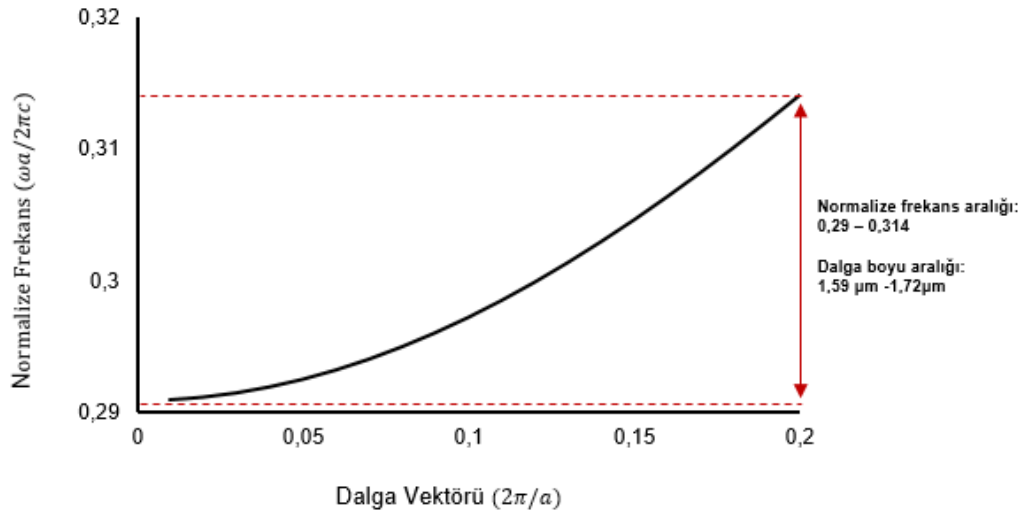
4.29’da verilen fotonik kristal sensör tasarımının hassasiyet değerini ifade eden formül $S = ((\lambda_1 - \lambda_2)/(n_1 - n_2)) \text{ nm / RIU}$ olarak tanımlanır. S hassasiyeti temsil eder ve birim kırılma indisi başına değişen kesim dalga boyu miktarının oranına eşittir. Şekil 4.29’da verilen sensör tasarımının hassasiyet değeri $S = ((2,11 - 2,04)/(1,33 - 1)) = 212 \text{ nm/RIU}$ olarak elde edilmiştir. Işığın grup hızının değeri $\lambda = 2,04 \text{ }\mu\text{m}$ değeri için $0,18 \cdot c$ olarak hesaplanmıştır.

Tez çalışması kapsamında yapılan diğer bir çalışma fotonik kristal dalga kılavuzunun kılavuz genişliğinin daraltılması ile elde edilen sensör tasarımıdır. Fotonik kristal dalga kılavuzu sensör tasarımına ilişkin parametre ayrıntıları Şekil 4.32’de verilmiştir.

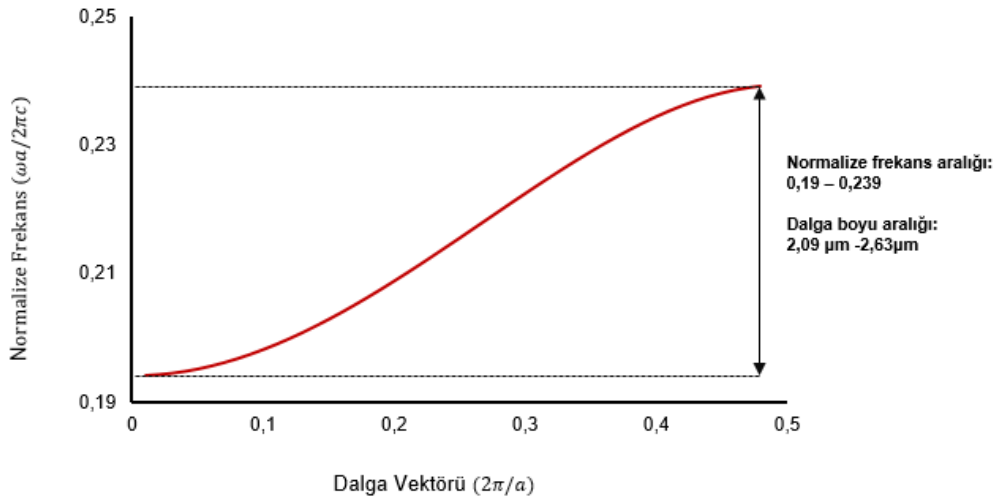


Şekil 4.32. Dalga kılavuzu genişliğinin $0,3 \cdot a$ oranında daraltılması ile elde edilen fotonik kristal dalga kılavuzu sensör tasarımı. Işığın etkin bir şekilde kristal içerisine çiftlenmesi için çiftleyici tasarımı yapılmıştır. Çiftleyici uzunluğu ve genişliği en büyük çiftlenme verimi için optimize edilmiştir. ($r = 0,3 \cdot a$, $a = 0,5 \text{ }\mu\text{m}$ olarak seçilmiştir.)

Şekil 4.32’de verilen fotonik kristal tasarımı iki adet farklı frekans bandındaki kusur kipini desteklemektedir. Bu kusur kiplerinin dispersiyon eğrileri aşağıda verilmiştir:

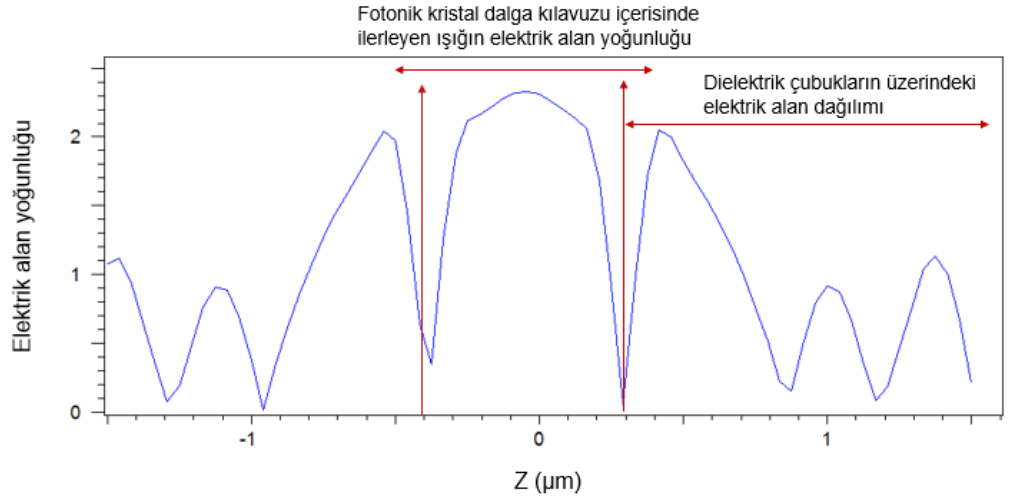


Şekil 4.33. Dalga kılavuzu genişliğinin $0,3*a$ oranında daraltılması ile elde edilen fotonik kristalde kılavuzlanan birinci kusur kipinin dispersiyon eğrisi. Birinci kusur kipinin $k = 0 - 0,2$ aralığında $0,29 - 0,31$ normalize frekans bandında kılavuzlandığı görülmektedir. ($r = 0,3*a$, $a = 0,5 \mu\text{m}$ olarak seçilmiştir.)

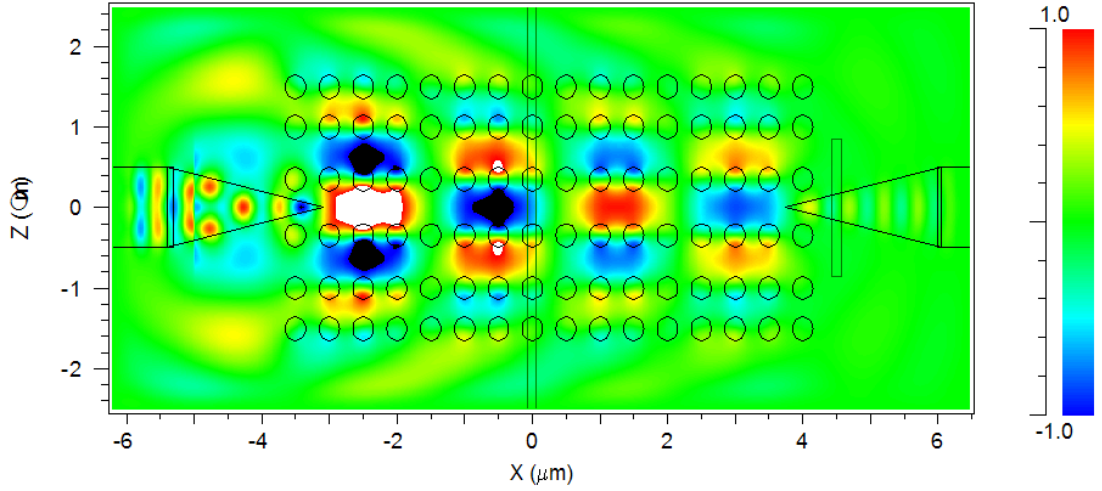


Şekil 4.34. Dalga kılavuzu genişliğinin $0,3*a$ oranında daraltılması ile elde edilen fotonik kristalde kılavuzlanan ikinci kusur kipinin dispersiyon eğrisi. İkinci kusur kipinin $k = 0 - 0,5$ aralığında $0,19 - 0,24$ normalize frekans bandında kılavuzlandığı görülmektedir. ($r = 0,3*a$, $a = 0,5 \mu\text{m}$ olarak seçilmiştir.)

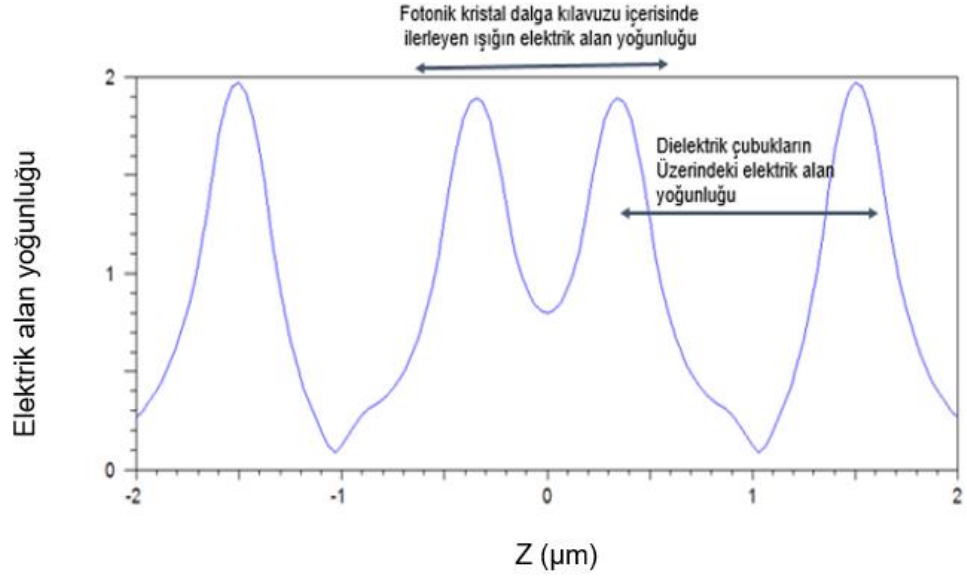
Şekil 4.33 ve Şekil 4.34 incelendiğinde fotonik kristal dalga kılavuzunun kılavuz genişliğinin $w = 1,7*a$ olduğu değerde iki farklı kusur kipi elde edilmiş ve bu sensör tasarımı ile farklı frekans bandında çalışma olanağı elde edilmiştir. Bu iki kusur kipinin XZ ve Z düzlemindeki elektrik alan dağılımları aşağıda verilmiştir:



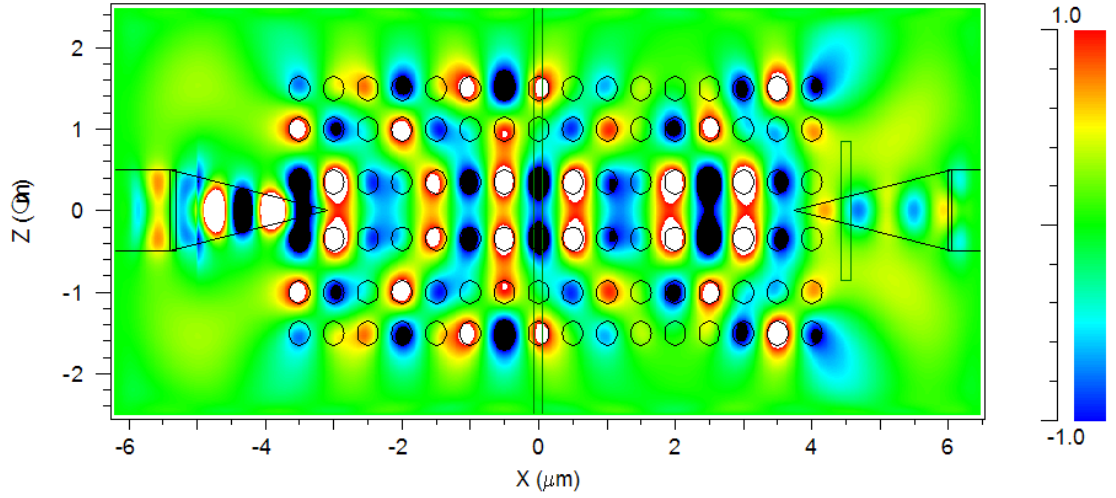
Şekil 4.35. Birinci kusur kipinin elektrik alan yoğunluğunu gösteren grafik. Elektrik alan yoğun bir şekilde fotonik kristal dalga kılavuzu içerisinde ilerlemektedir. Ayrıca ışığın yavaşlaması ile ışığın ortam ile etkileşimi artmış birinci ve ikinci sıra dielektrik çubuklar üzerinde yüksek elektrik alan yoğunluğu oluşmuştur.



Şekil 4.36. Birinci kusur kipinin elektrik alan yoğunluğunun XZ düzleminde gösterilmesi. Elektrik alan yoğun bir şekilde fotonik kristal dalga kılavuzu içerisinde ilerlemektedir. Ayrıca ışığın yavaşlaması ile ışığın ortam ile etkileşimi artmış birinci ve ikinci sıra dielektrik çubuklar üzerinde yüksek elektrik alan yoğunluğu oluşmuştur.



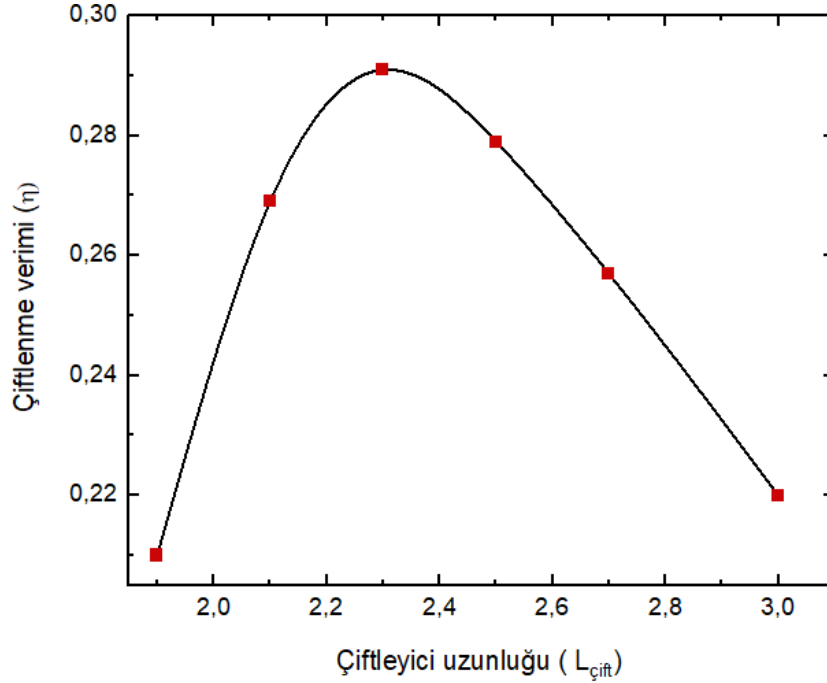
Şekil 4.37. İkinci kusur kipinin elektrik alan yoğunluğunu gösteren grafik. Işık dielektrik çubuklar ile daha yoğun bir şekilde etkileşim halindedir, bu sebeple elektrik alan yoğunluğu dielektrik çubuklar üzerinde artış göstermiştir.



Şekil 4.38. İkinci kusur kipinin elektrik alan yoğunluğunu XZ düzleminde gösteren grafik. Işık dielektrik çubuklar ile daha yoğun bir şekilde etkileşim halindedir.

Yukarıda verilen birinci ve ikinci kipin elektrik alanlarının dağılımını gösteren grafikler incelendiğinde ikinci kipin dielektrik çubuklarla daha yoğun etkileşim halinde olduğunu göstermektedir. Bu nedenle ışığın yavaşlamasıyla sensör hassasiyetinin artmasına ek olarak, ikinci kipin dielektrik çubuklarla daha yoğun etkileşim halinde olması da sensör hassasiyetinin artmasını sağlamaktadır.

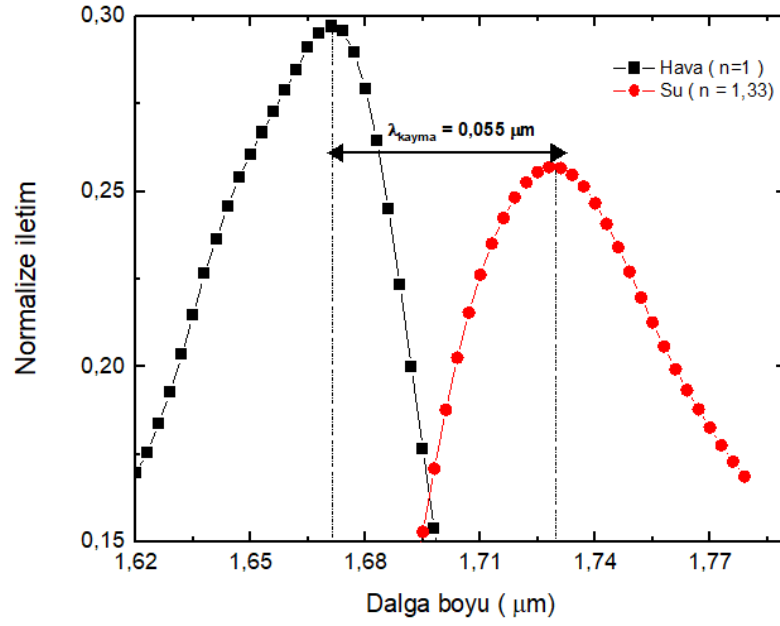
Bu iki kipi çiftlenme veriminin maksimum seviyeye çıkarılması için uygun çiftleyici tasarımları yapılmış ve elde edilen optimum değerler aşağıda verilmiştir:



Şekil 4.39. Birinci kusur kipi için fotonik kristal içerisine çiftlenmesi için gereken optimum çiftlenme uzunluğunu gösteren grafik. Grafik, çiftlenme uzunluğuna karşılık çiftlenme verimini gösterir. Birinci kusur kipi için maksimum çiftlenme verimi %29 olarak elde edilmiştir. ($\lambda = 1,675 \mu\text{m}$)

Şekil 4.39'da verilen grafik incelendiğinde maksimum çiftlenme veriminin $\lambda = 1,675 \mu\text{m}$ dalga boyunda $L_{çift} = 2,3 \mu\text{m}$ değerinde olduğu görülür. Grafik incelendiğinde ışığın fotonik kristal içerisindeki birinci kipi maksimum verimde eşlenmesi gereken en uygun çiftleyici parametreleri, $L_{çift} = 2,3 \mu\text{m}$ olarak elde edilir. Şekil 4.32'de verilen sensör tasarımındaki çiftleyicinin üçgen bir yapıda olduğu görülmektedir.

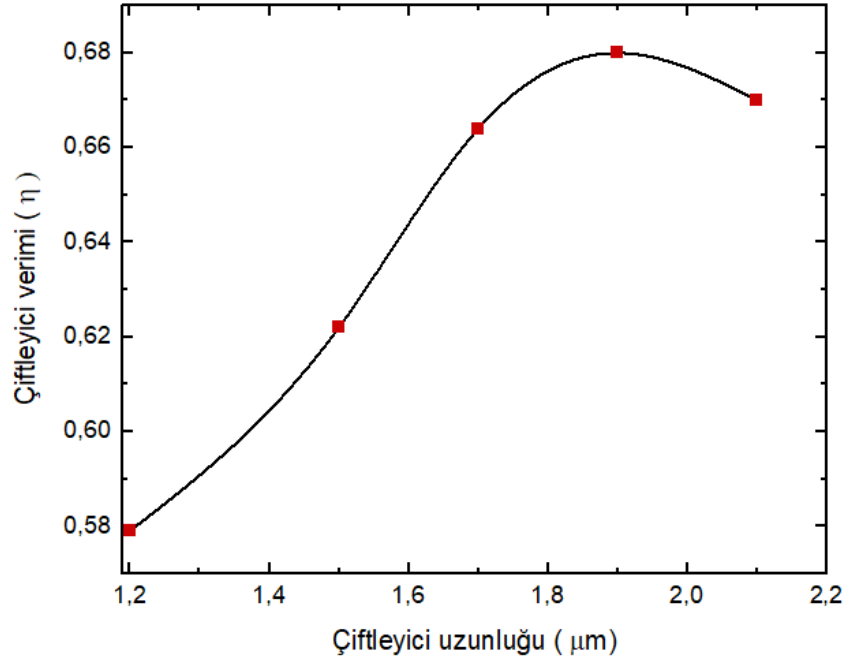
Şekil 4.32'de verilen sensör tasarımında fon kırılma indisi $n=1$ 'den $n = 1,33$ 'e çıkarılmış ve $1,6 \mu\text{m} - 1,8 \mu\text{m}$ dalga boyu aralıklarındaki iletim grafikleri elde edilmiştir. Şekil 4.32'de verilen sensör tasarımında fon kırılma indisinin $n=1$ 'den $n = 1,33$ 'e çıkarılması ile $1,6 \mu\text{m} - 1,8 \mu\text{m}$ dalga boyu aralığında elde edilen iletim grafikleri ve iletimin maksimum olduğu dalga boyundaki kayma miktarı Şekil 4.40'da verilen grafikte gösterilmiştir.



Şekil 4.40. Birinci kusur kipi için kırılma indisi farkını temel alarak tasarlanan sensör yapısında, $\Delta n = 0,33$ indis farkına karşılık maksimum iletimin sağlandığı dalga boyundaki kayma miktarı.

Şekil 4.40’da verilen iletim grafiği incelendiğinde arka plan kırılma indisinin $n = 1$ değeri için maksimum iletimin olduğu dalga boyu $\lambda = 1,675 \mu\text{m}$ ve iletim miktarı %29 olarak ölçülmüştür. Fon kırılma indisi $n = 1,33$ olduğunda maksimum iletimin olduğu dalga boyu $\lambda = 1,73 \mu\text{m}$ değerine kayma göstermiştir ve iletim değeri %26’ya düşmüştür. Maksimum iletim noktaları arasındaki dalga boyu farkı $0,055 \mu\text{m}$ olarak ölçülmüştür. Şekil 4.32’de verilen fotonik kristal sensör tasarımının birinci kusur kipi için hassasiyet değeri $S = ((1,73 - 1,675)/(1,33 - 1)) = 166 \text{ nm/RIU}$ olarak elde edilmiştir. Şekil 4.32’de verilen tasarımda kılavuzlanan birinci kipi $\lambda = 1,675 \mu\text{m}$ noktasındaki grup hızı değeri $0,13 \cdot c$ olarak hesaplanmıştır.

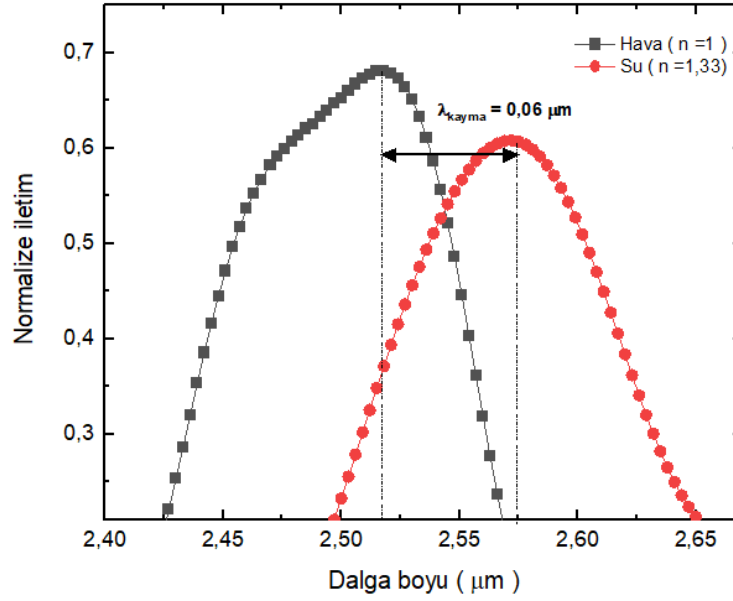
Şekil 4.32’de verilen sensör yapısında ışığın ikinci kipe maksimum verimle çifflenmesi için gereken en uygun çiftleyici tasarım parametlerini gösteren grafik Şekil 4.41’de verilmiştir.



Şekil 4.41. İkinci kusur kipinin fotonik kristal içerisine çiftlenmesi için gereken optimum çiftlenme uzunluğunu gösteren grafik. Çiftlenme uzunluğuna bağlı olarak çiftlenme veriminin değişimini ifade eder. İkinci kusur kipinin maksimum çiftlenme verimi %68 olarak elde edilmiştir. (Dalga boyu $2,52 \mu\text{m}$)

Şekil 4.41, ışığın dalga boyunun $2,52 \mu\text{m}$ olduğu değer için çiftlenme veriminin çiftlenme uzunluğuna bağlı olarak değişimini ifade eder. Grafik incelendiğinde ışığın fotonik kristal içerisinde %68 oranında çiftlendiği ve bu maksimum değer için çiftleyici uzunluğu $1,9 \mu\text{m}$ olarak elde edildiği görülmektedir. Çiftleyici geometrisi üçgen bir yapıya sahiptir.

Şekil 4.32’de verilen sensör tasarımında fon kırılma indisi $n=1$ ‘den $n=1,33$ ’e çıkarılmış ve ikinci kusur kipi için $2,47 \mu\text{m} - 2,65 \mu\text{m}$ dalga boyu aralıklarındaki iletim grafikleri elde edilmiştir. Şekil 4.32’de verilen sensör tasarımında fon kırılma indisinin $n=1$ ‘den $n=1,33$ ’e çıkarılması ile $2,47 \mu\text{m} - 2,65 \mu\text{m}$ dalga boyu aralığında elde edilen iletim grafikleri ve iletimin maksimum olduğu dalga boyundaki kayma miktarı Şekil 4.42’de verilen grafikte gösterilmiştir.

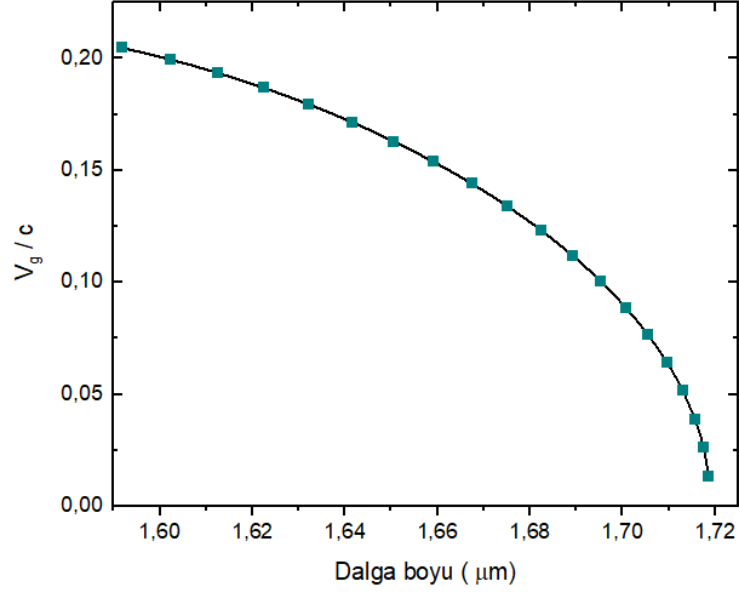


Şekil 4.42. İkinci kusur kipi için kırılma indisi farkını temel alarak tasarlanan sensör yapısında, $\Delta n = 0,33$ indis farkına karşılık maksimum iletimin sağlandığı dalga boyundaki kayma miktarı.

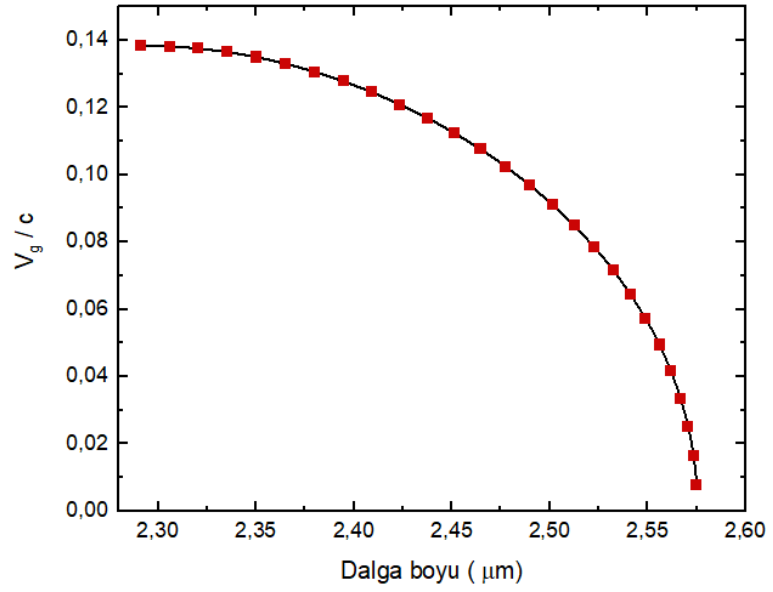
Şekil 4.42’de verilen iletim grafiği incelendiğinde fon kırılma indisinin $n = 1$ değeri için maksimum iletimin olduğu dalga boyu $\lambda = 2,52 \mu\text{m}$ ve iletim miktarı %68 olarak ölçülmüştür. Arka plan kırılma indisi $n = 1,33$ olduğunda maksimum iletimin olduğu dalga boyu $\lambda = 2,58 \mu\text{m}$ değerine kayma göstermiştir ve iletim değeri %61’e düşmüştür. Maksimum iletim noktaları arasındaki dalga boyu farkı $0,06 \mu\text{m}$ olarak ölçülmüştür. Şekil 4.32’de verilen fotonik kristal sensör tasarımının ikinci kusur kipi için hassasiyet değeri $S = ((2,58 - 2,52)/(1,33 - 1)) = 181 \text{ nm/RIU}$ olarak elde edilmiştir. İkinci kusur kipinin $\lambda = 2,52 \mu\text{m}$ değerindeki grup hızı değeri $0,08 \cdot c$ olarak hesaplanmıştır.

Şekil 4.40 ve Şekil 4.42’te verilen iletim grafikleri incelendiğinde iki farklı kusur kipinin farklı grup hızındaki dalga boylarında elde edilen sensör hassasiyetleri gözlemlenmiştir. Grup hızının azalması ile madde-alan etkileşimi artmış ve sensör hassasiyeti ikinci kip için daha yüksek değerlere ulaşmıştır.

Işığın grup hızının birinci ve ikinci kip için dalga boyuna bağlı değişimi aşağıda verilmiştir:

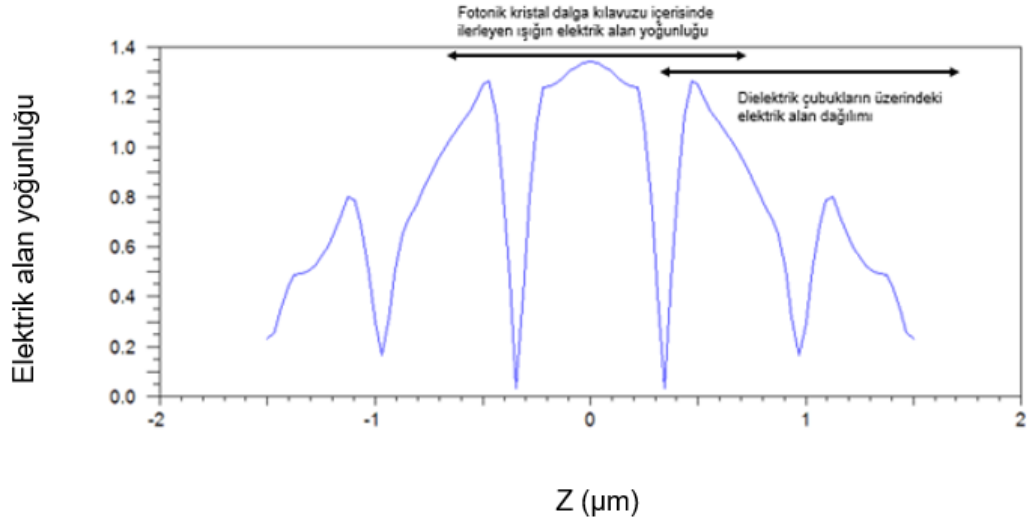


Şekil 4.43. Birinci kusur kipinin dalga boyuna bağlı olarak ışığın yavaşlama oranını gösteren grafik.

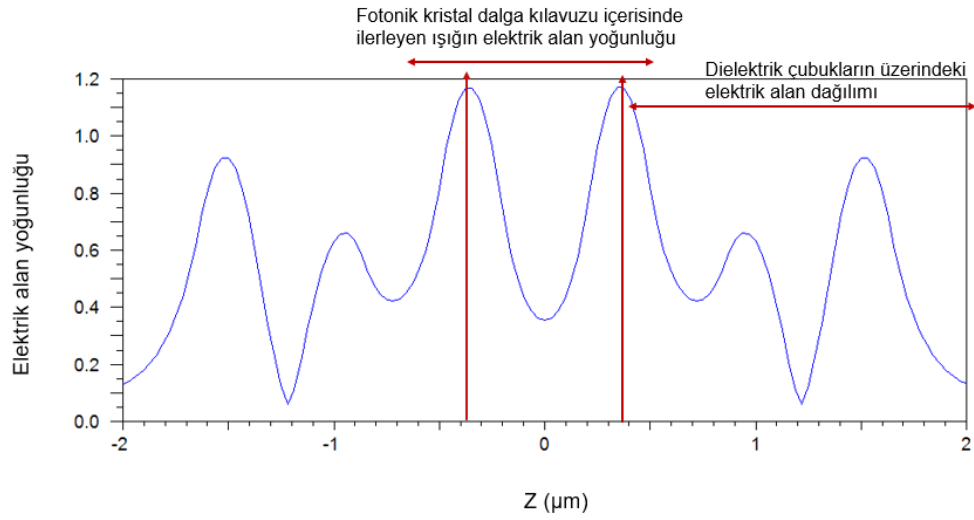


Şekil 4.44. İkinci kusur kipinin dalga boyuna bağlı olarak ışığın yavaşlama oranını gösteren grafik.

Birinci ve ikinci kusur kipinin $0,13 \cdot c$ grup hızı değeri için elde edilen Z düzlemindeki elektrik alan dağılımları aşağıda verilmiştir:



Şekil 4.45. Birinci kusur kipinin ışığın $0,13 \cdot c$ grup hızındaki elektrik alan dağılımının grafiği

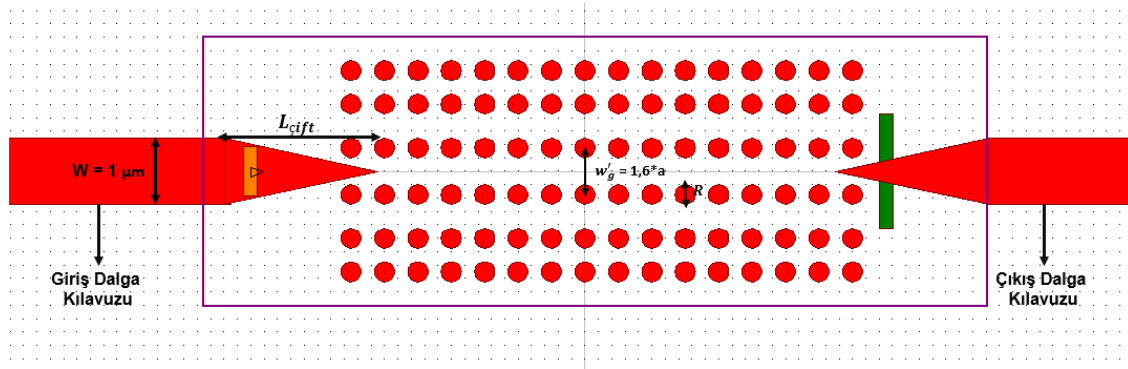


Şekil 4.46. İkinci kusur kipinin ışığın $0,13 \cdot c$ grup hızındaki elektrik alan dağılımının grafiği

Özetle; çok kipli bir fotonik kristal dalga kılavuzunun sensör olarak kullanılması iki ayrı frekans aralığında çalışmayı mümkün kılmıştır. Kiplerin frekansları dışında, dielektrik çubuklarla etkileşimde olan azalan dalga (evanescent wave) alanları farklıdır. Bu azalan dalga alanının artması sensör hassasiyetini arttırmış ve ikinci kipin daha yüksek hassasiyete ulaşmasını sağlamıştır.

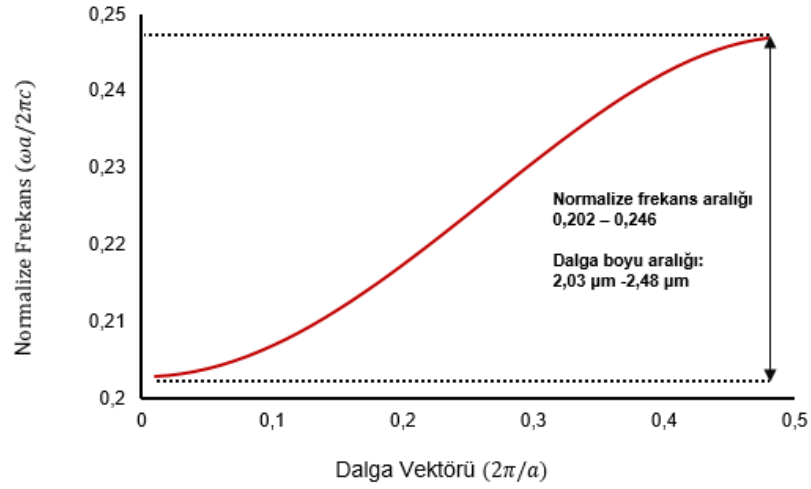
Sensör hassasiyetini arttıran bir diğer etki tezin çalışma temelini oluşturan yavaş ışık etkisidir. Işığın grup hızının azalması, artan madde-alan etkileşimi sağlayarak hassasiyeti önemli ölçüde arttırmıştır. Çok kipli sensör tasarımında ikinci kipin grup hızı birinci kipten düşüktür. İkinci kipin sahip olduğu azalan dalga alan yoğunluğu ve ışığın yapı içerisinde birinci kipe oranla daha fazla yavaşlaması ikinci kipin frekans aralığında daha hassas analizler yapılmasını mümkün kılmaktadır.

Sensör hassasiyetine önemli bir diğer katkıyı dielektrik yarıçap büyüklüğünün artırılması sağlamıştır. Birinci tasarımda sensörün artırılan kusur yarıçapı ile ışık önemli ölçüde yavaşlatılmış, $V_g=0,18*c$, sensör hassasiyeti 212 nm/RIU olarak elde edilmiştir. Çok kipli tasarlanan ikinci fotonik kristal sensör yapısında kılavuzlanan ikinci kip daha düşük grup hızına sahip olmasına rağmen dielektrik kusur yarıçaplarının artırılması birinci tasarımı etkileşim açısından daha güçlü kılmış ve en hassas sensör tasarımı olarak elde edilmiştir.



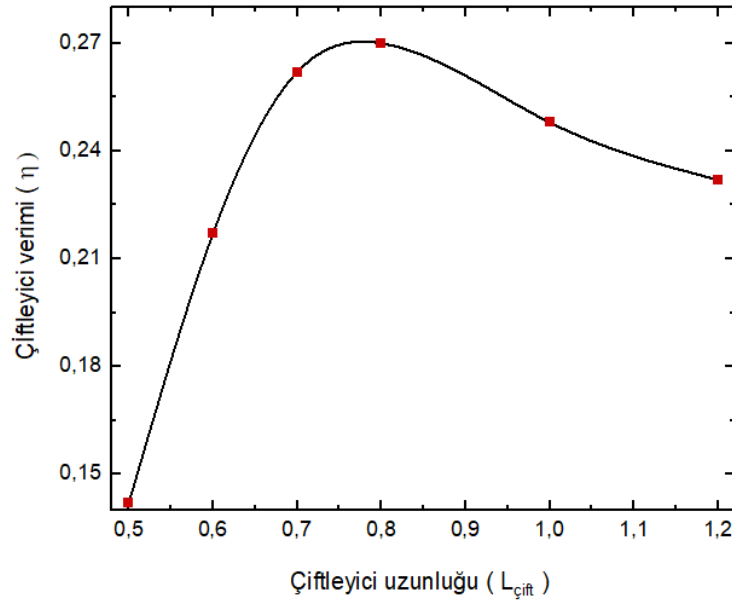
Şekil 4.47. Dalga kılavuzu genişliğinin daraltılması ile elde edilen fotonik kristal dalga kılavuzu sensör tasarımı. Işığın etkin bir şekilde kristal içerisine çiftlenmesi için çiftleyici tasarımı yapılmıştır. ($r = 0,3*a$, $a = 0,5 \mu\text{m}$ olarak seçilmiştir.)

Şekil 4.47’de gösterilen fotonik kristal sensör tasarımı, fotonik kristal dalga kılavuzunun kılavuz genişliğinin $0,4*a$ oranında daraltılması ile elde edilmiştir. Elde edilen tasarım Şekil 4.32’de verilen tasarımdan farklı olarak sadece 2.kusur kipini desteklemektedir. Dalga kılavuzunun genişliğinin daralmasıyla elde edilen bant diyagramı ve dispersiyon eğrisi aşağıda verilmiştir:



Şekil 4.48. Dalga kılavuzu genişliğinin $0,4 \cdot a$ oranında daraltılması ile elde edilen fotonik kristalde kılavuzlanan ikinci kusur kipinin dispersiyon eğrisi. İkinci kusur kipinin $k = 0 - 0,5$ aralığında $0,2 - 0,24$ normalize frekans bandında kılavuzlandığı görülmektedir. ($r = 0,3 \cdot a$, $a = 0,5 \mu\text{m}$ olarak seçilmiştir.)

Şekil 4.48 incelendiğinde fotonik kristal dalga kılavuzunun kılavuz genişliğinin $w = 1,6 \cdot a$ olduğu değerinde sadece ikinci kusur kipinin olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 4.47’de verilen sensör tasarımında ışığın ikinci kusur kipine maksimum verimle eşlenmesi için gereken en uygun çiftleyici uzunluğunun optimizasyon grafiği aşağıda verilmiştir:



Şekil 4.49. İkinci kusur kipinin fotonik kristal içerisine çiftlenmesi için gereken optimum çiftlenme uzunluğunu gösteren grafik. Çiftlenme uzunluğuna bağlı olarak çiftlenme veriminin değişimini ifade eder. İkinci kusur kipinin maksimum çiftlenme verimi %27 olarak elde edilmiştir. (Dalga boyu 2,46 μm)

Şekil 4.49 incelendiğinde dalga kılavuzunda ilerletilen ışığın fotonik kristale eşlenmesi için en uygun çiftlenme uzunluğu $L_{çift} = 0,8 \mu\text{m}$ olarak elde edilmiştir. Işığın bant kenarında yani $k = 0,01$ 'da 133 kat yavaşladığı bu tasarım, ışığın kılavuzdan düşük bir verimle kristale eşlendiği için sensör olarak kullanılmayacaktır. Fotonik kristalin dalga kılavuz genişliğinin daraltılmasıyla ışığın grup hızı azalmış fakat dalga kılavuzunun fazla dar olduğu bu tasarımda ışığın etkin bir şekilde iletimi mümkün olmamaktadır.

5. SONUÇ

Fotonik kristaller ortamın dielektrik sabitinin periyodik olarak değiştirilmesi ile oluşturulmaktadır. Fotonik kristaller yarı iletken malzemelerde atomların örgü modeline benzer şekilde periyodik olarak dizildiği gibi ortamın kırılma indisinin (dielektrik sabitinin) bir, iki veya üç dikey doğrultuda periyodik değişimin yapıldığı yapılardır. Bir boyutlu fotonik kristaller diğer bir deyişle çok katmanlı yapılardır. Bunlar; bir yönde periyodik olarak değişen, diğer iki yönde homojen olan, farklı kırılma indisli malzemelere sahip katmanlardan oluşur. 2 boyutlu fotonik kristaller, kırılma indisinin xy düzleminde her iki yönde de periyodik olarak değiştiği yapılardır. Bu yapılar, yüksek kırılma indisli bir malzeme üzerine üçgen veya kare örgü yapısına sahip periyodik delikler açılarak veya hava üzerine herhangi bir dielektrik sabitine sahip silindirlerin periyodik olarak dizilmesiyle elde edilir. Kırılma indisi bilinen bir ortamda periyodik kırılma indisi artışları veya azalışları olarak ortaya çıkan fotonik kristallerde, iki boyuttaki (örneğin; SOI kristallerinde silikonun kırılma indisi) malzemenin kırılma indisine geri plan indisi (background index) denir. Bu durumda kırılma indisi azalışları, örneğin silikonda deliklere veya indis artışları da dikmelere (pillar) karşılık gelir.

Çok farklı yapılarda oluşturulan bu fotonik kristaller ise tıpkı yarı iletken malzemeler gibi yasak enerji bant aralığına sahip olmaktadır. Fotonik kristallerin sahip olduğu fotonik bant aralığı olarak adlandırılan bu yasak bant belirli dalga boylarının kristal içerisinde ilerlemesini sağlarken yasak enerji aralığına karşı gelen belirli dalga boylarının ise geri yansıtarak kristalin içinde ilerlemesini engellemektedir.

Bir fotonik kristal bant aralığı, temel olarak kristalin içerisinde ışığın var olmasının yasak olduğu frekans aralığını tanımlar. Mükemmel bir kristal yapısında, kusurlar olmadıkça, bu bant aralığında ışığın fotonik kristalden geçişi mümkün olmamaktadır. Bir kusur, bu aralıkta şekilleri ve özellikleri kusurun yapısı ile yönlendirilen fotonik durumlara yol açar. Bu fotonik durumlar, kusur kipleri olarak adlandırılır.

Tez kapsamında kare örgü simetrisine sahip fotonik kristal yapılarda çeşitli kusurlar oluşturularak kusur kiplerinin dispersiyon eğrileri incelenmiş ve bant diyagramları elde edilmiştir. Tasarlanan farklı fotonik kristal yapılarda ışığın grup hızının değişimi elde

edilmiştir. Kare örgülü fotonik kristal tasarımlarında düşük dielektrik sabitli katman üzerine silisyum çubukların periyodik olarak yerleştirildiği yapılar kullanılmıştır. Dielektrik çubukların yarıçap değişiminin grup hızına etkisi incelenmiştir. Kusursuz kare örgülü fotonik kristal yapısından tek sıra dielektrik çubukların çıkarılması ile fotonik kristal dalga kılavuzu tasarımı yapılmıştır.

Tasarımı yapılan fotonik kristal yapısında oluşan kusur kipinin dispersiyon eğrisinden ışığın kristal içerisinde yavaşlama oranı elde edilir. Işığın fotonik kristal içerisinde yavaşlamasını temel alarak tasarlanan sensörlerin yüksek hassasiyetlere ulaşabileceği, literatürdeki çalışmalarda mevcuttur. Tez kapsamında ışığın grup hızının azaltılacağı fotonik kristal tasarımlarının sensör olarak kullanılması ve hassasiyetlerinin elde edilmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda üç adet fotonik kristal dalga kılavuzu tasarımı yapılmıştır. Yapılan ilk tasarım fotonik kristal dalga kılavuzununun paralel üst ve alt dielektrik çubuklarının yarıçaplarının artırılması ile elde edilen sensör dizaynidir. Bu sensör yapısında kusur yarıçapı olarak adlandırılan $r_s = 1,5 \cdot r$ olduğu değerde ışık yüksek oranda, $0,18 \cdot c$, yavaşlamış ve sensör hassasiyeti $S = 212 \text{ nm/RIU}$ olarak elde edilmiştir.

Yapılan ikinci tasarım fotonik kristal dalga kılavuzunun kılavuz genişliğinin daraltılması ile elde edilen sensör dizaynidir. Kılavuz genişliğinin azaltılması çok kipli bir fotonik kristal sensör elde edilmesini sağlamış ve farklı frekans aralıklarında çalışmayı mümkün kılmıştır. Bu çok kipli dalga kılavuzunda oluşan birinci kipin yavaşlama oranı $0,13 \cdot c$ olarak elde edilmiş ve hassasiyeti 166 nm/RIU olarak hesaplanmıştır. Aynı tasarımda kılavuzlanan ikinci kipin yavaşlama oranı $0,08 \cdot c$ olarak elde edilmiş ve sensör hassasiyeti 181 nm/RIU olarak hesaplanmıştır. Işığın yavaşlamasıyla artan madde-alan etkileşimi sensör hassasiyetini arttırmıştır. Ayrıca ikinci kipin azalan dalga alanının dielektrik çubuklarla etkileşiminin fazla olması da sensörün ikinci kip frekans aralığında daha hassas analiz yapmasını sağlamıştır.

Yapılan üçüncü tasarım fotonik kristal dalga kılavuzunun genişliğinin $0,4 \cdot a$ oranında daraltıldığı tasarımdır. Bu tasarımda çok kipli fotonik kristal dalga kılavuzu sadece ikinci kipi destekleyerek tek kipli bir tasarıma dönüştürülmüştür. Sensör tasarımında kılavuz genişliğinin daraltılması ışığın yavaşlama oranını arttırsa da ışığın dar dalga kılavuzuna

iftleyici tasarımı ile dahi düşük oranlarda eşlenmesi sebebiyle sensör olarak kullanılmamıştır.

KAYNAKLAR

- Akahane, Y., Asano, T., Song, B. S., Noda, S. 2003.** High-Q photonic nanocavity in a two-dimensional photonic crystal. *Nature*, 425(6961):, 944–947. <https://doi.org/10.1038/nature02063>
- Armin, A., Soltanolkotabi, M., Feizollah, P. 2011.** On the pH and concentration response of an evanescent field absorption sensor using a coiled-shape plastic optical fiber. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 165(2):, 181–184. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2010.10.006>
- Ayas, L. 2011.** Özgün Fotonik Dalga Kılavuzlarının Işığın Hızını Yavaşlatmak Gayesiyle Tasarımı ve Bu Tasarımların Biyosensör Alanına Uyarlanması, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi.
- Chai Yeh 2015.** Applied Photonics, San Diego, : Academic Press.
- Chen, C., Li, X., Li, H., Xu, K., Wu, J., Lin, J. 2007.** Bandpass filters based on phase-shifted photonic crystal waveguide gratings. *Optics Express*, 15(18):, 11278. <https://doi.org/10.1364/oe.15.011278>
- Chow, E., Grot, A., Mirkarimi, L., Sigalas, M., Girolami, G. 2004.** Ultra compact biochemical sensor built with two-dimensional photonic crystal microcavity. *OSA Trends in Optics and Photonics Series*, 97(10):, 909–910. <https://doi.org/10.1364/ol.29.001093>
- Cline, D. 2017.** Variational Principles in Classical Mechanics.
- Correa-Mena, A. G., Gonzalez, L. A., Quintero-Rodriguez, L. J., Zaldivar-Huerta, I. E. 2017.** Review on integrated optical sensors and its applications. 2017 IEEE Mexican Humanitarian Technology Conference, MHTC 2017, 170–173. <https://doi.org/10.1109/MHTC.2017.7926204>
- Costa, R., Melloni, A., Martinelli, M. 2003.** Bandpass resonant filters in photonic-crystal waveguides. *IEEE Photonics Technology Letters*, 15(3):, 401–403. <https://doi.org/10.1109/LPT.2002.807953>
- Courant, R., Friedrichs, K., Lewy, H. 1986.** Über die partiellen Differenzgleichungen der mathematischen Physik. *Kurt Otto Friedrichs*, 53–95. https://doi.org/10.1007/978-1-4612-5385-3_7
- Dinodiya, S., Suthar, B., Bhargava, A. 2018.** Photonic crystal sensors: Physics and applications. *AIP Conference Proceedings*, 1953:. <https://doi.org/10.1063/1.5032747>
- Dissanayake, S. E., Wijewardena Gamalath, K. A. I. L. 2015.** Point Defects in GaAs Photonic Crystals. *International Letters of Chemistry, Physics and Astronomy*, 43:, 91–102. <https://doi.org/10.18052/www.scipress.com/ilcpa.43.91>
- Fabricius, N., Gauglitz, G., Ingenhoff, J. 1992.** A gas sensor based on an integrated optical Mach-Zehnder interferometer. *Sensors and Actuators: B. Chemical*, 7(1–3):, 672–676. [https://doi.org/10.1016/0925-4005\(92\)80384-A](https://doi.org/10.1016/0925-4005(92)80384-A)
- Fuh, M. ren S., Burgess, L. W., Christian, G. D. 1988.** Single Fiber-Optic Fluorescence Enzyme-Based Sensor. *Analytical Chemistry*, 60(5):, 433–435. <https://doi.org/10.1021/ac00156a012>
- Gharsallah, Z., Najjar, M., Suthar, B., Janyani, V. 2019.** Slow light enhanced bio sensing properties of silicon sensors. *Optical and Quantum Electronics*, 51(11):, 1–7. <https://doi.org/10.1007/s11082-019-2067-6>
- Goyal, A. K., Pal, S. 2015.** Design and simulation of high sensitive photonic crystal waveguide sensor. *Optik*, 126(2):, 240–243. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2014.08.174>

- Gupta, B. D., Singh, C. D. 1994.** Evanescent-absorption coefficient for diffuse source illumination: uniform- and tapered-fiber sensors. *Applied Optics*, 33(13):, 2737. <https://doi.org/10.1364/ao.33.002737>
- Hasek, T., Kurt, H., Citrin, D. S., Koch, M. 2006.** Photonic crystals for fluid sensing in the subterahertz range. *Applied Physics Letters*, 89(17):, 87–90. <https://doi.org/10.1063/1.2369537>
- Hosseinibalam, F., Hassanzadeh, S., Ebnali-Heidari, A., Karnutsch, C. 2012.** Design of an optofluidic biosensor using the slow-light effect in photonic crystal structures. *Applied Optics*, 51(5):, 568–576. <https://doi.org/10.1364/AO.51.000568>
- Joannopoulos, J. D. ;Steve. G. J. N. W. D. M. 2008.** Photonic Crystals: Molding the Flow of Light (Vol. 66).
- Joannopoulos, J. D., Johnson, S. G., Winn, J. N., Meade, R. D. 2008.** Photonic Crystals: Molding the Flow of Light (Vol. 3), Princeton University Press
- Johnson, S. G. 2001.** Photonic Crystals: from Theory to Practice.
- Kang, C., Phare, C. T., Vlasov, Y. A., Assefa, S., Weiss, S. M. 2010.** Photonic crystal slab sensor with enhanced surface area. *Optics Express*, 18(26):, 27930. <https://doi.org/10.1364/oe.18.027930>
- Kao, T. W., Taylor, H. F. 1996.** High-sensitivity intrinsic fiber-optic Fabry–Perot pressure sensor. *Optics Letters*, 21(8):, 615. <https://doi.org/10.1364/ol.21.000615>
- Khijwania, S. K., Gupta, B. D. 2000.** Maximum achievable sensitivity of the fiber optic evanescent field absorption sensor based on the U-shaped probe. *Optics Communications*, 175(1):, 135–137. [https://doi.org/10.1016/S0030-4018\(00\)00465-X](https://doi.org/10.1016/S0030-4018(00)00465-X)
- Kittel, C. 2004.** Introduction to Solid State Physics, 8th edition.
- Kumar, M., Kumar, A., Dwivedi, R. 2016.** Ultra high sensitive integrated optical waveguide refractive index sensor based on multimode interference. *Sensors and Actuators, B: Chemical*, 222:, 556–561. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2015.08.103>
- Kurt, H. 2013.** All-dielectric periodic media engineered for slow light studies. *International Journal of Modern Physics B*, 27(27):, 1–31. <https://doi.org/10.1142/S021797921330020X>
- Lai, W. C., Chakravarty, S., Zou, Y., Guo, Y., Chen, R. T. 2013.** Slow light enhanced sensitivity of resonance modes in photonic crystal biosensors. *Applied Physics Letters*, 102(4):, 1–5. <https://doi.org/10.1063/1.4789857>
- Lee, M. R., Fauchet, P. M. 2007.** Two-dimensional silicon photonic crystal based biosensing platform for protein detection. *Optics Express*, 15(8):, 4530. <https://doi.org/10.1364/oe.15.004530>
- Li, J., White, T. P., O’Faolain, L., Gomez-Iglesias, A., Krauss, T. F. 2008.** Systematic design of flat band slow light in photonic crystal waveguides. *Optics Express*, 16(9):, 6227. <https://doi.org/10.1364/oe.16.006227>
- Morton, A. V. 2002.** Photonic band structure calculations for 2D and 3D photonic crystals. .
- Parra, E., Lowell, J. R. 2007.** Toward Applications of Slow Light Technology. *Optics and Photonics News*, 18(11):, 40. <https://doi.org/10.1364/opn.18.11.000040>
- Paul, H., Kychakoff, G. 1986.** A fiber-optic evanescent field absorption sensor. , 27:, 27–32. <https://doi.org/10.2351/1.5057836>
- Rsoft 2006.** BandSOLVE 3.0. Snopsys Rsoft.
- RSOFT 2007.** FullWAVE 6.0. Snopsys Rsoft.
- Sünner, T., Stichel, T., Kwon, S. H., Schlereth, T. W., Höfling, S., Kamp, M., Forchel, A. 2008.** Photonic crystal cavity based gas sensor. *Applied Physics Letters*,

92(26):. <https://doi.org/10.1063/1.2955523>

Tian, Z., Yam, S. S. H., Barnes, J., Bock, W., Greig, P., Fraser, J. M., Loock, H. P., Oleschuk, R. D. 2008. Refractive index sensing with Mach-Zehnder interferometer based on concatenating two single-mode fiber tapers. *IEEE Photonics Technology Letters*, 20(8):, 626–628. <https://doi.org/10.1109/LPT.2008.919507>

Tsigaridas, G. N. 2017. A study on refractive index sensors based on optical micro-ring resonators. *Photonic Sensors*, 7(3):, 217–225. <https://doi.org/10.1007/s13320-017-0418-0>

Üstün, K., Kurt, H. 2010. Ultra slow light achievement in photonic crystals by merging coupled cavities with waveguides. *Optics Express*, 18(20):, 21155. <https://doi.org/10.1364/oe.18.021155>

White, I. M., Oveys, H., Fan, X. 2006. Liquid-core optical ring-resonator sensors. *Optics Letters*, 31(9):, 1319. <https://doi.org/10.1364/ol.31.001319>

Xu, W., Huang, X. G., Pan, J. S. 2013. Simple fiber-optic refractive index sensor based on fresnel reflection and optical switch. *IEEE Sensors Journal*, 13(5):, 1571–1574. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2012.2236751>

Yamada, K., Notomi, M., Shinya, A., Yokohama, I., Shoji, T., Tsuchizawa, T., Watanabe, T. 2002. SOI-based Photonic Crystal Line-Defect Waveguides. , 4870:, 283–297.

Yariv, A., Yeh, P. 1984. *Optical Waves in Crystals: Propagation and Control of Laser Radiation.*

Yee, K. S. 1966. Numerical Solution of Initial Boundary Value Problems Involving Maxwell's Equations in Isotropic Media. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 14:, 141–147. https://doi.org/10.1007/978-3-319-61185-3_17

Zbay, E., Abeyta, A., Tuttle, G., Tringides, M., Biswas, R., Chan, C. T., Soukoulis, C. M., Ho, K. M. 1994. Measurement of a three-dimensional photonic band gap in a crystal structure made of dielectric rods. *Physical Review B*, 50(3):, 1945–1948. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.50.1945>

Ziegel, E. R., Parker, S. 1991. Concise Encyclopedia of Science and Technology (Vol. 33). <https://doi.org/10.2307/1269034>

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Ezel Yağmur ZEYDAN

Doğum Yeri ve Tarihi : 18.02.1994 / BİTLİS

Yabancı Dili : İNGİLİZCE

Eğitim Durumu

Lise : Bitlis Anadolu Lisesi / 2012

Lisans : Sakarya Üniversitesi Elektrik-Elektronik
Mühendisliği Bölümü / 2012-2016

Çalıştığı Kurumlar ve Yıl : Bursa Uludağ Üniversitesi

İletişim (e-posta) : eyzeydan@uludag.edu.tr

Yayımları

Zeydan, E.Y., Keskinden, S., Aydınli, A. 2020. Fotonik Kristal Temelli Sensör Tasarımı. 11. Ulusal Elektrik-Elektronik ve Biyomedikal Mühendisliği Konferansı, 26-28 Kasım 2020, Bursa, Türkiye.