

T.C.  
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
FİZİK ANABİLİM DALI

FOTONİK KRİSTAL OYUK YAPILARIN  
İNCELENMESİ

DOKTORA TEZİ

HASAN OĞUZ

DENİZLİ, OCAK 2025

T.C.  
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
FİZİK ANABİLİM DALI



FOTONİK KRİSTAL OYUK YAPILARIN  
İNCELENMESİ

DOKTORA TEZİ

HASAN OĞUZ

DENİZLİ, OCAK 2025

Bu tez çalışması Pamukkale Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından 2021FEBE041 nolu proje ile ve YÖK 100/2000 Öncelikli Alanlar Doktora Burs Programı ile desteklenmiştir. Bu tez çalışması Pamukkale Üniversitesi Malzeme Fiziği Simülasyonu Laboratuvarı imkanları kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini; bu çalışmanın doğrudan birincil ürünü olmayan bulguların, verilerin ve materyallerin bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini ve alıntı yapılan çalışmalara atfedildiğine beyan ederim.

**Hasan OĞUZ**



# ÖZET

## FOTONİK KRİSTAL OYUK YAPILARIN İNCELENMESİ

### DOKTORA TEZİ

HASAN OĞUZ

PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FİZİK ANABİLİM DALI

(TEZ DANIŞMANI : PROF. DR. MUZAFFER ADAK)

(EŞ DANIŞMAN : DR. ÖĞR. ÜYESİ ÖZGÜR ÖNDER

KARAKILINÇ)

DENİZLİ, "OCAK 2025"

Fotonik kristaller, fotonların hareketlerini yönlendiren ve sınırlayan periyodik optik yapılardır. Bu yönlendirme ve sınırlama için kullanılacak en etkili araçlardan birisi de kavite yapılarıdır. Fotonik kavite yapıları, frekans, ışığın hızı ve gecikmeler gibi birçok önemli parametrenin hassas kontrol edilmesini sağlar. Bu yapılar, ışık-madde etkileşimlerinin yoğunlaştırılmasında ve fotonik cihazların verimliliğinin artırılmasında kritik rol oynarlar. Fotonik kristal kavite yapıları, ışığın tamponlanması, filtrelenmesi gibi pek çok uygulamanın yanı sıra optik sensörler, optik mantık kapıları, dar ve geniş bant filtreler gibi birçok fotonik cihazın temelini oluştururlar.

Bu çalışmada, fotonik kavite yapıların eşlenik kavite dalga kılavuzu olarak kullanımı üzerine simülasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Yapılarda simetrisinin azaltılmasının frekans, grup hızı ve grup hız dağılımı (GVD) gibi parametreler üzerindeki etkileri düzlem dalga açılımı (PWE) ve sonlu farklar zaman bölgesi (FDTD) yöntemleri kullanılarak incelenmiştir. Özellikle, simetri kırılmasının gökkuşağı tuzaklaması (Rainbow Trapping, RT) fenomenine nasıl katkıda bulunduğu araştırılmıştır. Gökkuşağı tuzaklaması, ışığın belirli dalga boylarının farklı pozisyonlarda hapsedilerek yavaşlatıldığı bir fenomendir ve bu sayede optik sinyallerin gecikme hatları ve veri depolaması gibi uygulamalarda kullanılabilir. Çalışmamız, düşük simetri ve RT tekniklerinin bir arada kullanılarak fotonik kristal kavite yapılarının performansının nasıl artırabileceği üzerinedir. Bu çalışmamız sonucunda düşük simetri etkisiyle optik parametrelerin iyileştirilmesi sağlandı ve başarılı bir şekilde RT gerçekleştirildi.

**Anahtar Kelimeler :** Fotonik, fotonik kristal, dalga kılavuzu, kavite, düşük simetri, yavaş ışık, gökkuşağı tuzaklama.

# ABSTRACT

## EXAMINATION OF PHOTONIC CRYSTAL CAVITY STRUCTURES

PhD THESIS

HASAN OĞUZ

PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE  
PHYSICS

(SUPERVISOR : PROF. DR. MUZAFFER ADAK )

(CO-SUPERVISOR : ASST. PROF. DR. ÖZGÜR ÖNDER  
KARAKILINÇ )

DENİZLİ, JANUARY 2025

Photonic crystals are periodic optical structures that guide and confine the movement of photons. One of the most effective tools for this guidance and confinement is the use of cavity structures. Photonic cavity structures enable the precise control of many important parameters, such as frequency, light speed, and delays. Moreover, these structures play a critical role in enhancing light-matter interactions and improving the efficiency of photonic devices. Photonic crystal cavity structures form the foundation of numerous photonic devices, including optical sensors, optical logic gates, and both narrow and broad-band filters, in addition to applications like buffering and filtering of light.

In this study, simulations were conducted to investigate the use of photonic cavity structures as coupled cavity waveguides. The effects of symmetry reduction on parameters such as frequency, group velocity, and group velocity dispersion (GVD) were analyzed using the plane wave expansion (PWE) and finite-difference time-domain (FDTD) methods. Specifically, we explored how symmetry breaking contributes to the phenomenon of rainbow trapping (RT). Rainbow trapping is a phenomenon where light of specific wavelengths is slowed and trapped at different positions, enabling applications such as optical delay lines and data storage. This study focuses on how the performance of photonic crystal cavity structures can be enhanced by combining low-symmetry effects with RT techniques. As a result of our work, both the improvement of optical parameters through low-symmetry effects and the successful realization of these improvements were achieved RT.

**Keywords :** Photonics, photonic crystal, waveguide, cavity, low symmetry, slow light, rainbow trapping.

# İÇİNDEKİLER

ÖZET . . . . .	i
ABSTRACT . . . . .	ii
İÇİNDEKİLER . . . . .	v
ŞEKİL LİSTESİ . . . . .	ix
TABLO LİSTESİ . . . . .	ix
KISALTMA VE SEMBOL LİSTESİ . . . . .	x
ÖNSÖZ . . . . .	xiii
<b>1 GİRİŞ . . . . .</b>	<b>1</b>
1.1 Işığın Kısa Tarihi ve Temel Kavramlar . . . . .	1
1.2 Araştırma Konusu ve Amacı . . . . .	8
<b>2 FOTONİK KRİSTALLERİN TEORİSİ VE HESAPLAMA</b>	
<b>ARAÇLARI . . . . .</b>	<b>11</b>
2.1 Maxwell Denklemleri . . . . .	12
2.1.1 Elektrostatik Gauss Yasası . . . . .	12
2.1.2 Manyetostatik Gauss Yasası . . . . .	12
2.1.3 Faraday Yasası . . . . .	12
2.1.4 Ampère-Maxwell Yasası . . . . .	13
2.1.5 Ayar Dönüşümü, Dalga Denkleminin Çıkartılması ve Kırılma İndisi . . . . .	13
2.1.6 Bant Yapısı ve Yasak Bantların Belirlenmesi . . . . .	15
2.2 Bloch Teoremi . . . . .	16
2.2.1 Bir Boyutlu Basit Bir PhC Örneği . . . . .	16
2.3 Düzlem Dalga Açılımı Metodu . . . . .	18
2.4 Sonlu-Farklar Zaman-Bölgesi Yöntemi . . . . .	19

2.4.1	Mükemmel Eşlenmiş Katman . . . . .	21
2.5	Bağlanım Mod Teorisi . . . . .	22
2.6	Dispersiyon ve Yavaş Işık . . . . .	25
2.6.1	Grup Hız Dağılımı . . . . .	26
2.6.2	Üçüncü Derece Dispersiyon . . . . .	28
2.7	Kalite Faktörü . . . . .	29
2.7.1	Modal Alan ve Modal Hacim . . . . .	30
2.7.2	Kalite Faktörünün Nümerik Analizi . . . . .	31
2.8	İletim ve Yansıma S-parametrelerinin Tanımlanması . . . . .	33
<b>3</b>	<b>FOTONİK KRİSTALLERİN YAPISI VE TEMEL ÖZELLİKLERİ</b>	<b>35</b>
3.1	Fotonik Kristaller ve Temel Özellikleri . . . . .	35
3.1.1	Fotonik Kristallerde Birim Hücre, Brillouin Bölgesi ve Ters Uzay . . . . .	35
3.1.2	Dispersiyon Diyagramları . . . . .	36
3.1.3	Fotonik Bant Yapısı . . . . .	36
3.1.4	Fotonik Kristallerde Simetri . . . . .	37
3.1.5	Yüksek Simetriye Sahip Fotonik Kristaller . . . . .	38
3.1.6	Düşük Simetriye Sahip Fotonik Kristaller . . . . .	38
3.1.7	Eşlenik Dalga Kavimleri . . . . .	39
3.2	Fotonik Kristal Tasarımı ve Optimizasyonu . . . . .	40
3.2.1	Fotonik Kristal Geometrisinin Tasarımı . . . . .	41
3.2.2	Malzeme Özelliklerinin Belirlenmesi . . . . .	42
3.2.3	Simülasyon ve Optimizasyon Süreçleri . . . . .	43
3.3	Fotonik Kristallerde Yavaş Işık Uygulamaları . . . . .	44
3.3.1	Fotonik Kristal Kavimlerinde Yavaş Işık Uygulamaları . . . . .	44
3.3.2	Eşlenik Kavimlerde Yavaş Işık Uygulamaları . . . . .	45
3.4	Gökkuşuğu Tuzaklaması Fenomeni . . . . .	47
3.5	Kare Örgülü 2B Fotonik Kristal Örneği . . . . .	48
<b>4</b>	<b>BULGULAR VE TARTIŞMA</b>	<b>54</b>
4.1	Gökkuşuğu Tuzaklama Etkisinin İncelenmesi . . . . .	54
4.2	Düşük Simetri Etkilerinin İncelenmesi . . . . .	55
4.2.1	Bant Yapılarına Düşük Simetrinin Etkileri . . . . .	55
4.2.2	Yavaş Işık Etkilerinin İncelenmesi . . . . .	61
4.3	İletim, Yansıma ve Faz Kayması Profillerinin İncelenmesi . . . . .	65
4.4	Gökkuşuğu Tuzaklamasının İncelenmesi . . . . .	73
4.4.1	Bölgesel Lokalizasyonların İncelenmesi . . . . .	76

4.4.2	Gökuşağı Tuzaklaması ve Simetri Kırılması . . . . .	77
4.4.3	Ayırıcı Kanal Tasarımı . . . . .	79
<b>5</b>	<b>SONUÇ VE ÖNERİLER . . . . .</b>	<b>82</b>
	<b>KAYNAKLAR . . . . .</b>	<b>92</b>
	<b>ÖZGEÇMİŞ . . . . .</b>	<b>94</b>

# ŞEKİL LİSTESİ

1.1	1B, 2B ve 3B PhC yapıları (Lee ve Asher 2000) . . . . .	3
2.1	3B Yee Hücresi (Erol ve Balık 2008) . . . . .	20
2.2	$S_2$ kavite için tek bir rezonatörün iki dalga kılavuzu ile duran dalga modeli bağlanım diyagramı. . . . .	25
2.3	$\omega - k$ dispersiyon ilişkisi ve $v_g$ ile $v_\phi$ bağıntılarını gösteren diyagram (Sakoda 2014) . . . . .	27
3.1	Kare örgülü, örgü sabiti $a$ olan PhC için (a) birim hücre ve $b_1$ ve $b_2$ öteleme simetrisi, (b) birim hücre içinde $\rho_i$ ayna ve $C_r$ dönel simetrisi. . . . .	38
3.2	$r = 0.2a$ yarıçaplı ve $\epsilon = 9,8$ değerli çubuklardan oluşturulan kare örgülü 2 boyutlu PhC'in TM birinci PBG'sini gösteren bant diyagramı. Şekil içindeki detayda Brillouin bölgesinin iç yapısı gösterilmiştir. . . . .	49
3.3	$r = 0.2a$ yarıçaplı ve $\epsilon = 9,8$ değerli çubuklardan oluşturulan kare örgülü 2 boyutlu PhC içinde oluşturulan kusurlu dalga kılavuzunun birinci PBG'nin TM kılavuz modunu gösteren süper-hücre bant diyagramı. Şekil içindeki detayda PhC'in süper-hücre gösterilmektedir. . . . .	50
3.4	$r = 0.2a$ yarıçaplı ve $\epsilon = 9,8$ değerli çubuklardan oluşturulan kare örgülü 2B PhC içinde oluşturulan eşlenik dalga kılavuzuna ait TM modları gösteren süper-hücre bant diyagramı ve $3a$ genişliğindeki $r_c = 0,35a$ yarıçaplı kavitelere oluşan süper-hücrenin şematik gösterimi. . . . .	51
3.5	$r = 0.2a$ yarıçaplı ve $\epsilon = 9,8$ değerli çubuklardan oluşturulan 2 boyutlu kare örgülü $r_c = 0.35a$ yarıçaplı çubukların $3a$ periyotlu CCW yapısının şematik gösterimi . . . . .	52
3.6	$r = 0,2a$ , $r_c = 0,35$ ve periyodiklik $3a$ olarak tasarlanmış, yardımcı uyumsuz, kare örgülü $a$ yapı sabitli temel kavite yapısının $S_{21}$ ve $S_{11}$ TM modu için iletim/yansımaya katsayıları. . . . .	52

4.1	Düşük simetrlili kavite yapısının uydu eklenmiş süper hücresi. Kavite parametreleri; $r_c$ ve $r_a$ sırasıyla kavite ve uydunun yarıçaplarını, $\varphi$ ve $\Delta$ sırasıyla yardımcı çubuğun dönme açısını ve kavite ile uydu arasındaki mesafeyi göstermektedir. . . . .	56
4.2	Uydu yarıçapı $r_a = 0,14a$ olan düşük simetrlili kavite yapısının bant yapısı, <b>(a)</b> $\varphi = 15^\circ$ , <b>(b)</b> $\varphi = 30^\circ$ , <b>(c)</b> $\varphi = 45^\circ$ , <b>(d)</b> $\varphi = 60^\circ$ , <b>(e)</b> $\varphi = 75^\circ$ ve <b>(f)</b> $\varphi = 90^\circ$ açılarında. . . . .	57
4.3	Uydu açısı <b>(a)</b> $\varphi = 15^\circ$ , <b>(b)</b> $\varphi = 30^\circ$ , <b>(c)</b> $\varphi = 45^\circ$ , <b>(d)</b> $\varphi = 60^\circ$ , <b>(e)</b> $\varphi = 75^\circ$ ve <b>(f)</b> $\varphi = 90^\circ$ için, $r_a = 0,10a - 0,17a$ arasında değişen yarıçapa sahip 3. bantın normalize edilmiş frekansının değişimi. . . . .	58
4.4	Uydu açısı değişimlerine göre <b>(a)</b> 1. bant, <b>(b)</b> 2. bant, <b>(c)</b> 3. bant, <b>(d)</b> 4. bant ve <b>(e)</b> 5. bant yapılarının değişimi. . . . .	59
4.5	Uydu açısının küçük açı değişimlerine göre <b>(a)</b> 2. bant ve <b>(b)</b> 3. bant yapılarındaki değişimler. . . . .	60
4.6	Uydu açısındaki değişimlere göre <b>(a)</b> 2. Bant için grup hızı $v_g$ , <b>(b)</b> 2. Bant için grup indisi $n_g$ , <b>(c)</b> 3. Bant için grup hızı $v_g$ ve <b>(d)</b> 3. Bant için grup indisi $n_g$ eğrilerinin değişimleri. . . . .	62
4.7	Uydu açısındaki değişimlere göre <b>(a)</b> 2. Bant için GVD, <b>(b)</b> 2. Bant için TOD, <b>(c)</b> 3. Bant için GVD ve <b>(d)</b> 3. Bant için TOD eğrilerinin değişimleri. . . . .	63
4.8	$r = 0,2a$ , $r_c = 0,35$ , $r_a = 0,10a$ ve $3a$ periyotlu olarak tasarlanmış, $\varphi = 0^\circ$ uydu açılı yapının simülasyon sonucu elde edilen iletim/yansımaya katsayıları . . . . .	66
4.9	$r = 0,2a$ , $r_c = 0,35$ , $r_a = 0,10a$ ve $3a$ periyotlu olarak tasarlanmış, $\varphi = 0^\circ$ uydu açılı yapının CMT'ye göre iletim/yansımaya katsayıları . . . . .	67
4.10	$r = 0,2a$ , $r_c = 0,35$ , $r_a = 0,10a$ ve $3a$ periyotlu olarak tasarlanmış, $\varphi = 30^\circ$ uydu açılı yapının simülasyon sonucu elde edilen iletim/yansımaya katsayıları. . . . .	67
4.11	$r = 0,2a$ , $r_c = 0,35$ , $r_a = 0,10a$ ve $3a$ periyotlu olarak tasarlanmış, $\varphi = 60^\circ$ uydu açılı yapının simülasyon sonucu elde edilen iletim/yansımaya katsayıları. . . . .	68
4.12	$r = 0,2a$ , $r_c = 0,35$ , $r_a = 0,10a$ ve $3a$ periyotlu olarak tasarlanmış, $\varphi = 90^\circ$ uydu açılı yapının simülasyon sonucu elde edilen iletim/yansımaya katsayıları. . . . .	68

4.13	$r = 0, 2a, r_c = 0, 35, r_a = 0, 10a$ ve $3a$ periyotlu olarak tasarlanmış, $\varphi = 30^\circ$ uydu açılı yapının CMT'ye göre elde edilen iletim/yansımaya katsayıları. . . . .	69
4.14	$r = 0, 2a, r_c = 0, 35, r_a = 0, 10a$ ve $3a$ periyotlu olarak tasarlanmış, $\varphi = 60^\circ$ uydu açılı yapının CMT'ye göre elde edilen iletim/yansımaya katsayıları. . . . .	70
4.15	$r = 0, 2a, r_c = 0, 35, r_a = 0, 10a$ ve $3a$ periyotlu olarak tasarlanmış, $\varphi = 90^\circ$ uydu açılı yapının CMT'ye göre elde edilen iletim/yansımaya katsayıları. . . . .	70
4.16	$r = 0, 2a, r_c = 0, 35, r_a = 0, 10a$ ve $3a$ periyotlu olarak tasarlanmış, $\varphi = 0^\circ$ uydu açılı yapının CMT'ye göre faz kayması .	71
4.17	$r = 0, 2a, r_c = 0, 35, r_a = 0, 10a$ ve $3a$ periyotlu olarak tasarlanmış, $\varphi = 30^\circ$ uydu açılı yapının CMT'ye göre faz kayması	71
4.18	$r = 0, 2a, r_c = 0, 35, r_a = 0, 10a$ ve $3a$ periyotlu olarak tasarlanmış, $\varphi = 60^\circ$ uydu açılı yapının CMT'ye göre faz kayması	72
4.19	$r = 0, 2a, r_c = 0, 35, r_a = 0, 10a$ ve $3a$ periyotlu olarak tasarlanmış, $\varphi = 90^\circ$ uydu açılı yapının CMT'ye göre faz kayması	72
4.20	$r = 0, 2a, r_c = 0, 35, r_a = 0, 10a$ ve $3a$ periyotlu olarak tasarlanmış yapının 2. bandında uydu açısı çiftlerine göre bant yapıları. . . . .	74
4.21	$r = 0, 2a, r_c = 0, 35, r_a = 0, 10a$ ve $3a$ periyotlu olarak tasarlanmış yapının 3. bandında uydu açısı çiftlerine göre bant yapıları. . . . .	75
4.22	3. geçiş bandı için $60^\circ$ ve $75^\circ$ dereceli RT yapısına ait (a) bant diagramları ve (b) $n_g$ . . . . .	76
4.23	$\varphi = 60^\circ$ ve $\varphi = 75^\circ$ dereceli uydulardan oluşan tuzaklama yapısına ait (a) tuzaklama ve (b) geçiş bantlarına ait $E_z$ profilleri ve (c) mevzubahis bantlara ait TOD, GVD değerleri. . . . .	77
4.24	$\varphi = 60^\circ$ ile $\varphi = 75^\circ$ için $2^\circ$ kademeli artışlarla oluşturulan gökkuşağı tuzaklama yapısının yapı şematığı ve yapı içerisinde simüle edilen elektrik alan profilleri: (a) $\varphi = 60^\circ$ açıdaki başlangıç uyduları ve kademeli olarak $\varphi = 75^\circ$ 'e artan PhC eşlenik kavite dalga kılavuzunun üstten görünümü, (b) $\omega = 0, 3372a/\lambda$ için $E_z$ alan yoğunlukları, (c) $\omega = 0, 3376a/\lambda$ için $E_z$ alan yoğunlukları, (d) $\omega = 0, 3382a/\lambda$ için $E_z$ alan yoğunlukları, (e) $\omega = 0, 3386a/\lambda$ için $E_z$ alan yoğunlukları, (f) $\omega = 0, 3392a/\lambda$ için $E_z$ alan yoğunlukları, (g) $\omega = 0, 3396a/\lambda$ için $E_z$ alan yoğunlukları ve (h) frekansa karşılık gelen mekansal RT pozisyonları. . . . .	78



4.25 (a) $0,33720a/\lambda$ , (b) $0,33820a/\lambda$ , (c) $0,33940a/\lambda$ normalize frekanslar için demultipleksleme amacıyla lokalizasyon ile ayırıcı kanala eşleşen frekanslara ait $ E_z $ profilleri . . . . .	80
--	----

## TABLO LİSTESİ

4.1 $r_c = 0,35a$ , $r_a = 0,10a$ , ve $\Lambda = 0,50a$ yapı parametrelerine sahip yardımcı uydulu yapının harmonik analiz ile hesaplanmış dalga kılavuzu eşlenim frekansları ( $\omega_{wg}$ ), kavite rezonans frekansları ( $\omega_{cav}$ ), ortak rezonans frekansları ( $\omega$ ), dalga kılavuzu kalite faktörleri ( $Q_w$ ), kavite kalite faktörleri ( $Q_i$ ) ve toplam kalite faktörlerinin ( $Q$ ) uydu açısına göre değişimi. . . . .	64
4.2 3. bant modunda, uydular olmadan (Model A) ve $60^\circ$ ile $75^\circ$ açılarına yerleştirilmiş uydularla (Model B) PhCC'nin bant merkez frekansı $\omega_0$ , bant genişliği $\Delta\omega$ , ortalama grup indisi $\langle n_g \rangle$ , ışığın vakumdaki hızı $c$ ile çarpılmış ortalama grup hızı $\langle v_g \rangle$ ve $GBP$ . Tüm değerler, uydular eklenmeden önceki (A) ve sonradan eklenerek oluşturulan (B) yapının performanslarını değerlendirmek için kullanılmaktadır. . . . .	77

# KISALTMA VE SEMBOL LİSTESİ

- PhC Fotonik kristal (Photonic Crystal)
- PBG Fotonik bant aralığı (Photonic Band Gap)
- SL Yavaş ışık (Slow Light)
- SNR Sinyal gürültü oranı (Signal-to-noise ratio)
- PhCC Fotonik kristal kavite (Photonic Crystal Cavity)
- CCW Eşlenik kavite dalga kılavuzu (Coupled Cavity Waveguide)
- PIC Fotonik entegre devreler (Photonic Integrated Circuits)
- FL Hızlı ışık (Fast Light)
- RT Gökkuşuğu tuzaklaması (Rainbow Trapping)
- CROW Eşlenik rezonatör optik dalga kılavuzları (Coupled Resonator Optical Waveguides)
- CC Eşlenik kavite (Coupled Cavity)
- PWE Düzlem Dalga Açılımı (Plane-Wave Expansion)
- TE Enine Elektrik (Transverse Electric)
- TM Enine Manyetik (Transverse Magnetic)
- FDTD Sonlu-farklar zaman-bölgesi (Finite-Difference Time-Domain)
- PML Mükemmel eşlenik katman (Perfectly Matching Layer)
- CMT Bağlı mod teorisi (Coupled Mode Theory)
- GVD Grup hız dağılımı (Group Velocity Disersion)
- BWH Bant genişliği (Bandwidth)

GBP	Grup bant genişliği (Group Bandwidth Product)
TOD	Üçüncü derece dispersiyon (Third Order Dispersion)
PBS	Fotonik bant yapısı (Photonic Band Structure)
FEM	Sonlu elemanlar metodu (Finite Elements Method)
ONS	N-derece spektral metot (Order-N Spectral Method)
KKR	Korring, Kohn ve Rosker metodu
Harminv	Harmonik analiz (Harmonic Inversion)
<b>E</b>	Elektrik alan vektörü
<b>B</b>	Manyetik alan vektörü
<b>D</b>	Elektrik deplasman vektörü
<b>H</b>	Ortamsal manyetik alan vektörü
$\epsilon_0$	Serbest uzayın elektrik geçirgenliği
$\rho$	Elektrik yük yoğunluğu
$\epsilon$	Ortamın elektriksel geçirgenliği
<b>J</b>	Hacimsel akım yoğunluk vektörü
$\mu_0$	Serbest uzayın manyetik geçirgenliği
$\mu$	Ortamın manyetik geçirgenliği
$\omega$	Açısal frekans
$n$	Maddenin kırılma indisi
$n_{\text{eff}}$	Efektif kırılma indisi
$\beta$	Yayıma sabiti
$c$	Işığın boşluktaki hızı
$v$	Işığın ortam içindeki hızı
$v_g$	Grup hızı
$n_g$	Grup indisi

$v_\phi$	Faz hızı
$\mathbf{r}$	Konum vektörü
$\mathbf{k}$	Dalga vektörü
$\omega_0$	Merkez frekans
$\gamma$	Sönümlenme oranı
$Q$	Kalite faktörü
$V_{\text{mod}}$	Modal hacim
$A(t)$	Zamana bağlı harmonik genlik
$A_j$	Genlik
$\phi_j$	Faz
$\gamma_j$	Sönümlenme katsayısı
$S_{ij}$	S-parametresi
$a_j$	Gelen dalga genliği
$b_j$	İletilen/Yansıyan dalga genliği
$\rho_i$	Ayna simetrisi
$C_r$	Dönel simetri
$\kappa$	Kaviteler arası bağlanma kuvveti
$L$	Kaviteler arası mesafe
$\lambda$	dalga boyu
$D$	Dispersiyon
$a$	Örgü sabiti
$r$	Yapı çubuk yarıçapı
$r_c$	Kavite çubuk yarıçapı
$r_a$	Yardımcı çubuk yarıçapı
$\phi$	Yardımcı çubuk açısı
$\Delta$	Yardımcı çubuk, kavite çubuğu arası mesafe

# ÖNSÖZ

Tez çalışmam boyunca bana sabırla yol gösteren, gerektiğinde müdahale ederek öğrenme sürecime büyük katkılar sağlayan, tecrübelerinden her zaman faydalandığım danışman hocam Sayın Prof. Dr. Muzaffer ADAK'a en içten teşekkürlerimi sunarım. Onun rehberliği ve vizyonu, akademik gelişimimde kritik bir rol oynamış ve çalışmamın her aşamasında bana ilham kaynağı olmuştur. Sadece bir akademisyen olmayı değil, insanîyet ve ahlaki değerlerle düşünmeyi, empati kurarak hareket etmeyi öğreten bir yol gösterici olarak hayatımda çok önemli bir yere sahiptir. Bir baba figürü gibi her zaman önümde durarak bana güven veren ve rehberlik eden hocamın desteği, bu sürecin en değerli parçası olmuştur. İkinci danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Özgür Önder Karakılınç'a da değerli katkıları, destekleri ve cesaretlendirmeleri için teşekkür ederim. Onun fotonik üzerine engin bilgisi ve vizyonu olmasaydı, bu çalışma mümkün olamazdı. Kendisi, her aşamada yol gösterici rehberliğiyle hem akademik çalışmalarım da hem de kişisel gelişimimde büyük katkılar sağlamıştır. Değerli sohbetleri, bilimsel yaklaşımları ve hayatıma kattığı perspektiflerle, bu çalışmamın şekillenmesinde çok önemli bir rol oynamıştır. Kendisine en derin teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, bilgi ve tecrübeleriyle çalışmalarımı zenginleştiren, her zaman teşvik edici ve destekleyici olan Sayın Prof. Dr. Halil Berberoğlu'na da sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Beyfendiliği, engin bilgisi ve eşsiz sohbetleri ile her zaman beni çalışmak için cesaretlendiren, bilimsel bakış açımı genişletmemde büyük katkısı olan kıymetli hocama, bu yolculukta yanımda olduğu için minnettarım.

Bu çalışmamın her aşamasında bana rehberlik eden ve değerli katkılarıyla tez sürecimi zenginleştiren Sayın Prof. Dr. Sevgi Özdemir Kart'a özel bir teşekkür borçluyum. Kendisi, sabrı, bilgisi ve yol göstericiliğiyle bana her zaman doğru yönü göstermiştir. Onun sabırlı yaklaşımı ve özverili tutumu olmasaydı, bu çalışmayı tamamlamak çok daha zor olurdu. Ayrıca, doğruluğun her zaman yanında olan, metodik ve titiz çalışmayı öğreten, öğrencilerini bilgisi ve şefkatiyle asla yalnız bırakmayan çok kıymetli hocama, bu süreçte bana verdiği destek ve rehberlik için sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam boyunca her aşamada bana destek olan, bilgi birikimlerini

paylaşarak akademik gelişimime büyük katkıda bulunan Sayın Prof. Dr. Pınar Tunay Taşlı, Prof. Dr. Mirbek Turduev ve Dr. Eylem Çelik'e de en derin teşekkürlerimi sunarım. Onların engin bilgi ve deneyimleri, yalnızca çalışmalarımı zenginleştirmekle kalmayıp, her adımda doğru yolda ilerlememi sağlayan bir rehber oldu. Akademik hayatımın her anında yanımda olup, karşılaştığım zorluklar karşısında her daim cesaretlendiren bu kıymetli hocalarımın katkıları benim için son derece değerli ve anlamlıdır. Destekleri, bu süreci daha verimli ve anlamlı kıldı.

Doktora dönemimin bu zorlu ve yoğun sürecini, kimi zaman gülerek, kimi zaman zor anlar yaşayarak, hatta zaman zaman kızgınlıklarla beraber atlattığımız kıymetli yol arkadaşım Zekeriya Mehmet Yüksel'e, her türlü desteği ve yoldaşlığı için en içten teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim. Onunla paylaştığım bu yolculuk, akademik hayatımın en unutulmaz anılarından biri olarak hep zihnimde yer alacak. Birlikte çalışırken edindiğimiz deneyimler, karşılıklı yardımlaşma ve anlayış, bu süreci hem daha anlamlı hem de katlanılabilir kıldı.

Ayrıca, bu tez sürecinde bana moral ve motivasyon kaynağı olan, zorlu zamanlarda desteğini esirgemeyen ve bu yolculuğu çok daha kolay hale getiren sevgili arkadaşlarım Ertan Kök, Çağlar Pala, İsmail Kalay ve Fuat Bilican'a da yürekten teşekkür ederim. Onlarla geçirdiğim zamanlar, akademik zorlukların yanı sıra, insani anlamda da bana güç ve motivasyon verdi. Kimi zaman uzun tartışmalar, kimi zaman neşeli sohbetlerle geçen bu süreçte, onların varlığı bu zorlu yolculuğu daha keyifli ve anlamlı hale getirdi.

Aileme, özellikle Anneme bu zorlu süreçte bana gösterdikleri sınırsız destek, sabır ve anlayış için sonsuz şükranlarımı sunuyorum. Onların sevgisi, sabrı ve her an yanımda olmaları olmasaydı, bu başarıyı elde etmek çok daha zor olurdu. Hayatım boyunca bana verdikleri güç, her türlü zorluğun üstesinden gelmemde en büyük dayanağım oldu. Özellikle akademik hayatımda yaşadığım zorluklarda, ailemin koşulsuz desteği sayesinde kendimi hep güçlü hissettim. Ayrıca buradan rahmetli Babamı özlem ve sevgiyle anıyorum.

Ayrıca, günlük yaşamın getirdiği stresin bir kısmını hafifletmekte büyük rol oynayan kedilerimiz Kontes, Elizabeth ve Karaçocuk'a da sevgi dolu teşekkürlerimi iletmek istiyorum. Onların varlığı, bu yoğun süreçte hayatıma neşe ve huzur kattı. Onlarla geçirdiğim her an, tez sürecinin stresinden bir nebze olsun uzaklaşmama yardımcı oldu. Onların enerjisi ve sevecenliği, her günümü daha güzel ve katlanılabilir kıldı.

Sevgili eşim Hatice Zor Oğuz'a ise, bu süreçte bana her zaman psikolojik, akademik ve manevi olarak sağladığı eşsiz destek için en derin teşekkürlerimi

sunarım. Onun sabrı, anlayışı ve sevgisi olmasaydı, bu sürecin zorluklarıyla başa çıkmak çok daha güç olurdu. Hayatımın her anında bana güç veren, moral ve motivasyon kaynağım olan Hatice, bu tezin gerçekleşmesinde büyük bir paya sahiptir. O, sadece akademik hayatımda değil, aynı zamanda hayat yolculuğumda da en büyük destekçim olmuştur.

Bu çalışma, başta sevgili eşim Hatice olmak üzere katkılarıyla bu yolculuğu anlamlı kılan tüm bu değerli insanlara adanmıştır.

# BÖLÜM 1

## GİRİŞ

### 1.1 Işığın Kısa Tarihi ve Temel Kavramlar

Işık ve ışığın davranışı, Antik Çağlardan beri insanlığın ilgi ve merakını uyandıran bir konu olmuştur. Işığın doğası ve özellikleri üzerine Öklid'den İbn-Heysem'e kadar birçok bilim insanı, bu merak uyandırıcı konu üzerine çalışmalarda bulunmuştur (Darrigol 2012). Antik Yunan'da Öklid, ışığın doğrusal yayılımını ve yansıma kurallarını incelemiş, bu alandaki ilk teorik temelleri atmıştır. Orta Çağ'da İbn-Heysem, ışığın kırılma ve yansıma olaylarını deneysel olarak araştırmış ve optik bilimini sistematik bir şekilde ele alan ilk bilim insanlarından biri olmuştur.

İnsanlığın ışığın davranışlarını anlama çabası, 17. yüzyılda büyük bir ivme kazanmıştır. Bu dönemde Isaac Newton ve Christiaan Huygens gibi bilim insanları, ışığın doğası üzerine farklı modeller ortaya atmışlardır. Newton, ışığın parçacık modelini savunmuş ve ışığın küçük parçacıklardan oluştuğunu öne sürmüştür (Crombie 1959). Buna karşılık, Huygens, ışığın dalga modelini önererek ışığın bir dalga hareketi şeklinde yayıldığını iddia etmiştir. Bu iki model, modern optiğin temelini oluşturmuş ve bilimsel tartışmaların merkezinde yer almıştır.

19. yüzyılda James Clerk Maxwell'in çalışmaları, ışığın doğasına dair önemli bir dönüm noktası olmuştur. Maxwell, elektromanyetik teori ile ışığın özünde elektromanyetik dalgalar olduğunu açıklamış ve bu teori ile elektrik ve manyetizmanın birleşik bir açıklamasını sunmuştur (Maxwell 1865). Maxwell'in denklemleri, ışığın hızı, polarizasyonu ve dalga boyu gibi özelliklerini matematiksel olarak tanımlamış ve optik alanında devrim yaratmıştır.

Bu teorik çalışmaların ışığında, Lord Rayleigh, düşük kayıplı iletim



sağlayabilen optik fiberlerin teorik temellerini atmış ve ışığın dalga kılavuzları yardımıyla yönlendirilmesi ve kontrol edilmesinin mümkün olduğunu göstermiştir (Strutt ve Spottiswoode 1871). Rayleigh'in çalışmaları, optik iletişimin gelişimine önemli katkılarda bulunmuş ve fiber optik teknolojisinin temelini oluşturmuştur.

20. yüzyılın ortalarından itibaren, ışığın dalga kılavuzları ve fotonik kristaller (Photonic Crystal, PhC) üzerine yapılan araştırmalar, bu teknolojilerin gelişimini hızlandırmıştır. PhC'ler, ışığın belirli frekans aralıklarında yayılımını kontrol edebilme yetenekleri sayesinde, birçok ileri teknoloji uygulamasında kullanılmaktadır. Günümüzde, bu çalışmalar kuantum bilgi işleme, entegre fotonik devreler, nanofotonik uygulamalar ve haberleşme gibi alanlarda büyük ilgi görmektedir. Fotonik teknolojiler, yüksek hızlı internet altyapılarından hassas sensörlere kadar geniş bir yelpazede uygulama alanı bulmaktadır.

Bu kapsamlı araştırmalar, ışığın hem dalga hem de parçacık özelliklerini daha iyi anlamamızı sağlamış ve modern optik teknolojilerinin temelini oluşturmuştur. Gelecekte, ışığın bu eşsiz özelliklerinden yararlanarak yeni ve yenilikçi uygulamaların geliştirilmesi beklenmektedir. Özellikle, PhC'ler gibi yapıların, ışığın kontrolü ve yönlendirilmesinde sundukları benzersiz imkanlar, bu yenilikçi uygulamaların geliştirilmesinde önemli bir rol oynayacaktır.

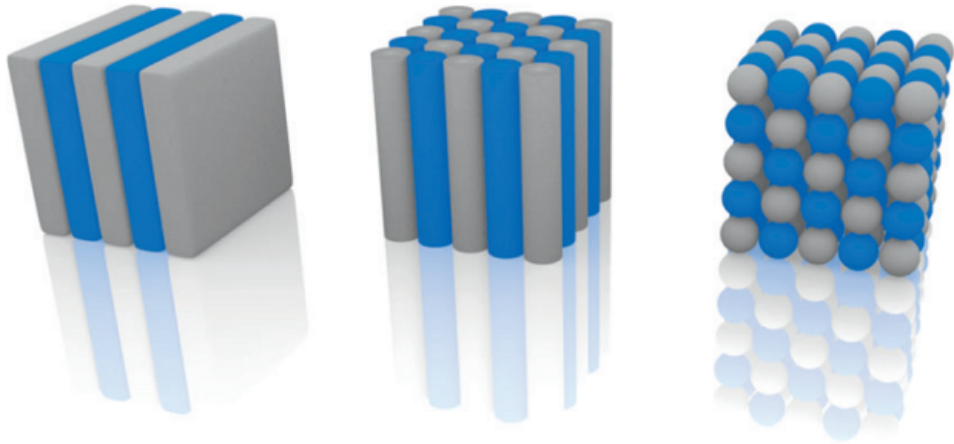
PhC'ler, fotonların hareketini etkin bir şekilde sınırlayan ve yönlendiren periyodik dielektrik bileşenlerden oluşan yapılardır. Bu yapılar, katı hal fiziğinde bulunan kristal yapıların elektronlar üzerindeki benzer etkisini fotonlar üzerinde gösterirler. Bu benzerlik, elektronların kristal potansiyel içinde hareketinin sınırlanmasıyla, fotonların PhC yapıları içinde hareketinin sınırlanması arasındadır. Bu sınırlamalar, Brillouin bölgesi yaklaşımı ile matematiksel olarak ifade edilebilir ve analiz edilebilir.

PhC'lerin eşsiz özellikleri, doğada bile kelebek kanatları ve opaller gibi yapılarda gözlemlenebilir. Bu doğal yapılar, pigmentlerin renkliliğinden bağımsız olarak, PhC yapılarından kaynaklanan özgün yansımalar ve soğurmalar sonucunda renkler oluştururlar. Bu fenomen, ışığın doğada ve teknolojideki etkilerinin ne kadar geniş kapsamlı olduğunu göstermektedir ve bu da PhC'lerin önemini vurgular. Bu yapıların optik özellikleri ve etkileri, optik teknolojilerin ilerlemesi için önemli bir potansiyel sunmaktadır ve bu da geniş bir uygulama yelpazesine sahip olmalarını sağlar. Bu uygulamalar arasında optik iletişim sistemleri, sensörler, filtreler ve daha fazlası bulunmaktadır.

PhC yapılarına dair ilk bilimsel çabalar, 1887 yılında Lord Rayleigh tarafından gerçekleştirildi. Rayleigh, bir boyutlu (1B) periyodik dielektrik yığınlar üzerinde detaylı çalışmalar yürüttü ve bu yapıların bir boyutlu fotonik band aralığı

oluşturduğunu ortaya koydu. Bu önemli buluş, ışığın kontrol edilebilir bir şekilde yönlendirilmesi ve manipülasyonu için ilk adımlardan biriydi (Strutt 1887). 1987 yılında, bir asır sonra, E. Yablonovitch bu alanda önemli bir ilerleme kaydetti. Yablonovitch, 2B ve 3B periyodik dielektrik yapılar üzerindeki çalışmalarıyla, bu yapıların PhC olarak adlandırılmasına öncülük etti. Bu dönüm noktası buluş, fotonların çok boyutlu yapılar içindeki hareketinin kontrol edilebileceğini gösterdi ve bu da optik teknolojilerde yeni bir evre başlattı (Yablonovitch 1987).

PhC'ler, günümüzde birçok disiplin tarafından yoğun bir şekilde incelenen aktif bir araştırma alanıdır. Fizik ve matematik temellerinin yanı sıra, bilişim, tıp, astronomi gibi çeşitli disiplinlerin de dahil olduğu bu geniş ve çeşitli araştırma alanı, bilim ve teknolojinin çok farklı yönlerinden katkıları bir araya getirerek ilerlemektedir. PhC'ler, modern teknolojide yankıları olan geniş bir uygulama yelpazesi sunmakta ve bu da onları bu çeşitli disiplinlerin ilgi odağı haline getirmektedir.



Şekil 1.1: 1B, 2B ve 3B PhC yapıları (Lee ve Asher 2000)

PhC'lerin özünde, ışığın bu yapılar içerisindeki ilerlemesi üzerine etkileri yatar. Her periyotta, ilerleyen ışığın bir kısmı yansır ve bu yansıyan ışık, sonraki yansımalar ile yapıcı veya yıkıcı girişim oluşturabilir. Bu girişimler, ışığın PhC içerisinde nasıl yayıldığını belirler. Eğer PhC'nin geometrisi ve kırılma indislerinin kontrastı doğru bir şekilde tasarlanmışsa, ışığın belirli dalga boylarındaki ilerlemesi tamamen yasaklanabilir. Bu yasaklı bölgelere fotonik bant aralığı (Photonic Band Gap, PBG) adı verilir (Joannopoulos ve diğ. 2008).

Bu bant aralıkları, yüzeydeki metallerin yansıtma yeteneğinden daha üstün bir özelliğe sahiptir. Metaller, belirli bir frekans aralığında ışığı yansıtırken, bir miktar emilim eğilimindedirler. Ancak PBG'ye sahip bir PhC, bu frekans aralığında hemen hemen tam bir yansıtma sağlar. Bu, neredeyse hiç enerji

kaybetmeyen aşırı derecede etkili bir ayna oluşturur ve PhC'lerin çoğu uygulamadaki temel çalışma prensibidir. Bu etki, ışığın dalga boyu ölçeğinde manipülasyonunu ve hapsedilmesini mümkün kılar, bu da optik bilgi işlem, optik haberleşme ve sensör uygulamaları gibi birçok önemli teknolojik uygulamanın temelini oluşturur.

PhC simetrisinin bir veya birden fazla yönde eklenen kusurlarla bozulması, nanometre ölçeğinde oyuk yapılar oluşturulmasına imkan tanır (Notomi ve diğ. 2001; Baba 2008; Üstün ve Kurt 2010). Simetri, PhC'lerde ışığın yayılım özelliklerini doğrudan etkileyen kritik bir faktördür. Yüksek simetriye sahip yapılar, genellikle geniş PBG bölgeleri sunarak ışığın belirli frekanslarda tüm yönlerde yayılmasını engeller. Ancak, düşük simetriye sahip yapılar, yönsellik ve mod lokalizasyonu gibi özelliklerle daha hassas kontrol sunar. Bu durumda, nanofotonik rezonatörler olarak hareket eden bu nano-oyuklar, yüksek simetriden düşük simetriden yapılarca ise belirli yönlerde yayılımın sınırlandırılmasıyla ışığın istenilen şekilde yönlendirilmesi sağlanabilir. Sonuç olarak, ışığın dalga kılavuzu boyunca kılavuzlanmış modlar halinde iletilmesi, "yavaş ışık" (Slow Light, SL) fenomenini ortaya çıkarır. Bu fenomen, faz hızı ile grup hızı arasındaki fark sayesinde düşük sinyal gürültü oranı (Signal-to-noise ratio, SNR) ile yüksek bant genişliğinde ışık iletimi sağlar (Baba 2008). Bu nedenle, hem yüksek hem de düşük simetriden PhC yapıları, optik sinyallerin işlenmesi ve iletilmesi için kritik öneme sahiptir.

Düşük simetriden PhC yapıları, ışığın yayılımını daha ince bir şekilde kontrol etmek ve belirli optik işlevleri optimize etmek için önemli avantajlar sunar. Bu yapılar, yüksek simetriye sahip olanlardan farklı olarak, belirli yönlerde asimmetrik bir yayılım sağlama kapasitesine sahiptir. Böylece, belirli frekanslarda ve yönlerde ışık yayılımını sınırlandırarak veya artırarak, istenilen PBG özelliklerine ulaşılabilir. Düşük simetri, özellikle dar bant genişlikleri ve yüksek yönsellik gerektiren optik cihazlar için faydalıdır. Örneğin, yönlü ışık yayılımının gerekli olduğu uygulamalarda düşük simetriden yapılar, ışığın sadece belirli bir yönde etkili bir şekilde yayılmasını sağlayarak cihaz performansını artırır. Bu durum, nanofotonik rezonatörlerin ve dalga kılavuzlarının tasarımında da büyük önem taşır (Giden, Turduev ve Kurt 2013; Yasa ve diğ. 2017; Yasa ve diğ. 2018).

Düşük simetriye sahip PhC yapılarında yer alan kaviteler, ışığın belirli modlarda daha güçlü bir şekilde lokalize edilmesine olanak tanır. Bu tür yapılarca, kaviteler arasındaki asimmetrik etkileşimler, rezonans frekanslarını ve mod profillerini hassas bir şekilde ayarlayarak, ışığın hapsedilmesini ve

yönlendirilmesini optimize eder. Ayrıca, düşük simetri nedeniyle oluşan asimetric mod dağılımı, ışığın daha düşük grup hızlarına sahip olmasını sağlayarak SL etkisinin güçlendirilmesine katkıda bulunur. Düşük simetrinin, ışığın belirli modlarda ve yönlerde yoğunlaşmasını sağlayarak, fotonik devrelerdeki ışık-madde etkileşimlerini artırdığı ve bu sayede daha verimli optik anahtarlar, sensörler ve lazerler gibi cihazların geliştirilmesine imkan tanıdığı gözlemlenmiştir. Bu tür kavitelelerin, optik sinyallerin işlenmesinde kritik roller üstlenerek, yüksek performanslı fotonik cihazların tasarımında büyük bir potansiyele sahip olduğu değerlendirilmektedir (Gumus, Giden ve Kurt 2018; Gumus ve diğ. 2019; Oguz ve diğ. 2024; Yuksel ve diğ. 2024). Bu kavite yapıları aynı zamanda eşlenerek, dalga kılavuzu içeren fotonik kristal kavite (Photonic Crystal Cavity, PhCC) yapıları haline getirilip ışığın yönlendirilmesi ve manipülasyonu için kullanılabilir (Bushell, Florescu ve Sweeney 2017).

Bu yapıların ışığı yerleştirebilme ve ışık-madde etkileşimlerini önemli ölçüde artırabilme yeteneği, çeşitli lineer ve non-lineer fenomenlerin meydana gelmesine olanak sağlar (Moreolo, Morra ve Cincotti 2008; Bushell, Florescu ve Sweeney 2017). Bu PhCC yapıları, düşük enerjili lazerler, optik anahtarlar, optik veri depolama, elektro-optik modülatörler, optik filtreler ve sensörler gibi bir dizi fotonik cihazın tasarlanmasına ve üretilmesine olanak sağlar (Fan ve diğ. 1998; Little ve diğ. 1999; Baba 2008; Moreolo, Morra ve Cincotti 2008; Bushell, Florescu ve Sweeney 2017). Daha sonraki bölümlerde ayrıntılı biçimde ele alacağımız üzere, PhCC'lerin tasarım ve malzeme özelliklerinin incelenmesi, PBG'lerinin ve dalga kılavuzunda kılavuzlanmış modlarının dispersiyon diyagramları kullanılarak elde edilmesi, grup hız dağılımlarının hesaplanması, modal hacimlerin belirlenmesi ve kalite faktörlerinin hesaplanması gibi işlemler, birçok bilimsel ve teknolojik disipline önemli katkılar sağlayabilir. Bu nedenle bu tür çalışmalar, hem bilimsel hem de teknolojik anlamda büyük öneme sahiptir.

PhCC yapısının SL kavramının uygulanabilir alanlarından biri olduğunu belirtmiştik. SL, ışığın bir optik ortamda son derece düşük grup hızı ile yayılmasını ifade eder ve bu durumda ışığın ilerlediği ortamla etkileşimleri büyük önem taşır (Baba 2008).

1998 yılında Hau ve ekibi, bir ışık huzmesinin hızını Bose-Einstein yoğunlaşması etkisiyle 17 m/s'ye düşürdü ve 2001'de ışığı tamamen durdurarak daha sonra tekrar hareket ettirdi. Bu çalışmalar, SL araştırmalarının genişlemesini tetikledi ve 2004 yılında, ışığın hızının fotonik fiber kullanılarak oda sıcaklığında 9.7 km/s'ye indirildiği çalışmalara ilham verdi.

Işığın bu şekilde manipüle edilmesi, optik haberleşme, fotonik tabanlı hafıza cihazları, kuantum bilgisayarlar, yüksek hassasiyetli interferometrik ölçüm cihazları ve fotonik entegre devreler (Photonic Integrated Circuits, PIC) gibi alanlarda temel bir yapı taşıdır (Xu ve diğ. 2005; Velha ve diğ. 2006; Ríos ve diğ. 2015).

Bu yapıların ışığı yerleştirebilme ve ışık-madde etkileşimlerini önemli ölçüde artırabilme yeteneği, çeşitli lineer ve non-lineer fenomenlerin meydana gelmesine olanak sağlar (Moreolo, Morra ve Cincotti 2008; Bushell, Florescu ve Sweeney 2017). Bu PhCC yapıları, düşük enerjili lazerler, optik anahtarlar, optik veri depolama, elektro-optik modülatörler, optik filtreler ve sensörler gibi bir dizi fotonik cihazın tasarlanmasına ve üretilmesine olanak sağlar (Fan ve diğ. 1998; Little ve diğ. 1999; Baba 2008; Moreolo, Morra ve Cincotti 2008; Bushell, Florescu ve Sweeney 2017). PhCC'lerin tasarım ve malzeme özelliklerinin incelenmesi, PBG'lerinin ve dalga kılavuzunda kılavuzlanmış modlarının dispersiyon diyagramları kullanılarak elde edilmesi, grup hız dağılımlarının hesaplanması, modal hacimlerin belirlenmesi ve kalite faktörlerinin hesaplanması gibi işlemler, birçok bilimsel ve teknolojik disipline önemli katkılar sağlayabilir. Bu nedenle bu tür çalışmalar, hem bilimsel hem de teknolojik anlamda büyük öneme sahiptir.

PhCC yapıları ise, SL fenomenini uygulamada, çok düşük sıcaklık veya yüksek enerji gibi ekstrem koşullara gerek kalmadan, sadece yapısal ve malzeme özelliklerine bağlı olarak gerçekleştirebilme potansiyeline sahip olması nedeniyle önemli bir araştırma ve geliştirme konusudur. Bu alan, geniş bir uygulama yelpazesine sahip olup, gelecekteki teknolojik gelişmeler için önemli bir temel oluşturabilir.

"Hızlı ışık" (Fast Light, FL) konsepti, sistemin negatif grup hızına ( $v_g$ ) sahip olduğu durumlar için geçerli bir fenomendir. Bu, ışığın, normalden daha hızlı yayılmasına izin veren özel malzemelerle, yani metamateryallerle etkileşimini ifade eder. Metamateryaller, doğal malzemelerin sahip olmadığı özelliklere sahip olan yapay malzemelerdir ve bu özellikler, onları optik ve elektromanyetik uygulamalar için son derece ilgi çekici kılar (Boyd 2009).

FL, anormal dispersiyon özellikleri, metamateryaller ve diğer benzer fenomenler aktif araştırma konularıdır ve bu fenomenlerin derinlemesine anlaşılması, gelecekteki teknolojik ilerlemelere ve yeniliklere yardımcı olabilir. Bu alanlar, özellikle yeni nesil optik ve elektromanyetik cihazların tasarımı ve üretimi için büyük potansiyele sahip olup, bu tür uygulamaların performansını önemli ölçüde iyileştirebilir. Bununla birlikte, hızlı ışığın ve metamateryallerin

potansiyel uygulamalarını tam olarak gerçekleştirebilmek için bu fenomenler hakkında daha fazla araştırma ve anlayış gerekmektedir.

Bu yapıların ışığı yerleştirebilme ve ışık-madde etkileşimlerini önemli ölçüde artırabilme yeteneği, çeşitli lineer ve non-lineer fenomenlerin meydana gelmesine olanak sağlar (Moreolo, Morra ve Cincotti 2008; Bushell, Florescu ve Sweeney 2017). Bu PhCC yapıları, düşük enerjili lazerler, optik anahtarlar, optik veri depolama, elektro-optik modülatörler, optik filtreler ve sensörler gibi bir dizi fotonik cihazın tasarlanmasına ve üretilmesine olanak sağlar (Fan ve diğ. 1998; Little ve diğ. 1999; Baba 2008; Moreolo, Morra ve Cincotti 2008; Bushell, Florescu ve Sweeney 2017). PhCC'lerin tasarım ve malzeme özelliklerinin incelenmesi, PBG'lerinin ve dalga kılavuzunda kılavuzlanmış modlarının dispersiyon diyagramları kullanılarak elde edilmesi, grup hız dağılımlarının hesaplanması, modal hacimlerin belirlenmesi ve kalite faktörlerinin hesaplanması gibi işlemler, birçok bilimsel ve teknolojik disipline önemli katkılar sağlayabilir. Bu nedenle bu tür çalışmalar, hem bilimsel hem de teknolojik anlamda büyük öneme sahiptir.

PhCC yapıları ise, SL fenomenini uygulamada, çok düşük sıcaklık veya yüksek enerji gibi ekstrem koşullara gerek kalmadan, sadece yapısal ve malzeme özelliklerine bağlı olarak gerçekleştirebilme potansiyeline sahip olması nedeniyle önemli bir araştırma ve geliştirme konusudur. Bu alan, geniş bir uygulama yelpazesine sahip olup, gelecekteki teknolojik gelişmeler için önemli bir temel oluşturabilir.

FL, anormal dispersiyon özellikleri, metamateriyaller ve diğer benzer fenomenler aktif araştırma konularıdır ve bu fenomenlerin derinlemesine anlaşılması, gelecekteki teknolojik ilerlemelere ve yeniliklere yardımcı olabilir. Bu alanlar, özellikle yeni nesil optik ve elektromanyetik cihazların tasarımı ve üretimi için büyük potansiyele sahip olup, bu tür uygulamaların performansını önemli ölçüde iyileştirebilir. Bununla birlikte, hızlı ışığın ve metamateriyallerin potansiyel uygulamalarını tam olarak gerçekleştirebilmek için bu fenomenler hakkında daha fazla araştırma ve anlayış gerekmektedir (Thévenaz 2008).

Gökkuşaklı Tuzaklaması (Rainbow Trapping, RT) fenomeni, fotonik alanında son derece ilgi çekici ve geniş uygulama alanına sahip bir konsepttir (Yang, Zhu ve Li 2015). RT, ışığın uzaysal olarak frekansa bağlı olarak yapının belirli bölgelerinde hapsedilmesini ifade eder ve Yavaş Işık (Slow Light, SL) teknolojisinin önemli uygulamalarından birini oluşturur (Gao, Zhou ve Zhang 2012). Bu uzaysal olarak ışığın kontrol mekanizması, fotonik ayırıcılar ve birleştiriciler gibi birçok aygıtın tasarlanmasını ve uygulanmasını mümkün

kılar. RT fenomeni, belirli bir dalga boyunun yapının içinde uzaysal olarak hapsedilmesini sağlar (Oguz ve diğ. 2024). Bu, aynı bant üzerinde yer alan farklı dalga boylarının kademeli indis PhC, metalik kademelendirme veya topolojik olarak modifiye edilmiş PhC gibi yapılarla lokalize edilebildiği bir mekanizmadır (He ve diğ. 2021; Ghaderian ve Habibzadeh-Sharif 2021; Neşeli ve diğ. 2020; Arreola-Lucas ve diğ. 2019; Liu ve diğ. 2018; Liu ve diğ. 2017; Gan, Ding ve Bartoli 2009). Bu yapılar, ışığın belirli frekans aralıklarında hapsedilerek yavaşlatılmasını ve hatta durdurulmasını sağlar. Bu özellikleriyle, RT fenomeni, optik iletişim, sensör teknolojileri, ve PIC'ler gibi birçok alanda önemli uygulamalara sahip olabilir. RT, özellikle bilgi işleme, optik bellek, sensör teknolojileri, ve optik sinyal işleme gibi alanlarda büyük potansiyel taşır. RT üzerine yapılan araştırmalar, fotonik alanında önemli bir ilgi odağıdır ve bu alandaki çalışmalar, gelecekte optik iletişim sistemlerinden sensör teknolojilerine kadar birçok alanda önemli yeniliklere yol açabilir.

## 1.2 Araştırma Konusu ve Amacı

PhCC yapıları, SL fenomenini uygulamada, ekstrem koşullar gerektirmeksizin, sadece yapısal ve malzeme özelliklerine bağlı olarak gerçekleştirme potansiyeline sahip olmaları nedeniyle büyük bir öneme sahiptir. Bu potansiyel, özellikle ışığın hızını kontrol ederek yavaşlatma yeteneği sunan ve bir eşlenik kavite dalga kılavuzu (Coupled Cavity Waveguide, CCW) alt türü olan bağlı rezonatör optik dalga kılavuzu (Coupled Resonator Optical Waveguide, CROW) yapılarıyla birleştiğinde daha da güçlenir. CROW, birbirine yakın yerleştirilmiş rezonatörlerin eşlenip etkisiyle ışığın yönlendirilmesini sağlar ve bu yönlendirme, ışığın yavaşlatılması veya belirli bir frekans aralığında sıkışması gibi etkileri ortaya çıkarabilir (Yariv ve diğ. 1999). Bu özellikler, SL uygulamalarında enerji verimliliğini artırarak, yüksek hızlı veri iletimi, optik gecikme hatları ve hassas zamanlama gerektiren sistemlerde devrim niteliğinde yenilikler getirebilir.

PhCC ve özellikle CROW yapıları, geniş bir uygulama yelpazesine sahip olup, PIC'ler, optik haberleşme sistemleri ve sensör teknolojileri gibi alanlarda gelecekteki teknolojik gelişmeler için önemli bir temel oluşturabilir. Özellikle, bu yapılar, yüksek enerji veya düşük sıcaklık gereksinimlerini ortadan kaldırarak, daha pratik ve yaygın olarak kullanılabilir optik cihazların geliştirilmesine olanak tanır. Bu nedenle, PhCC ve CROW yapılarının SL fenomeni üzerindeki etkileri, optik bilimler ve mühendislik alanında kritik bir araştırma ve geliştirme konusu olarak öne çıkmaktadır.



Bu çalışmanın temel amacı, PhCC ve bu yapılardan türetilen eşlenik CROW yapılarında, SL fenomeninin derinlemesine incelenerek, bu yapıların optik cihazlardaki kullanımının optimize edilmesidir. Araştırma kapsamında, PhCC'lerin yapısal özelliklerinin, özellikle de simetri özelliklerinin, SL fenomeni üzerindeki etkileri incelenmiş ve bu yapıların performanslarının nasıl iyileştirilebileceği analiz edilmiştir. Bu bağlamda, çalışma, optik haberleşme ve diğer fotonik uygulamalar için daha verimli ve yüksek performanslı cihazların geliştirilmesine katkı sağlamayı hedeflemektedir.

Bu çalışma, RT fenomeninin, yalnızca kavite yapısında düşük simetri etkisinin uygulanması yoluyla gerçekleştirildiği ilk örnek olarak özgün bir nitelik taşımaktadır. Çalışmada gerçekleştirilen simülasyonlarda, düzlem dalga açılımı (Plane-Wave Expansion, PWE) ve sonlu farklar zaman bölgesi (Finite-Difference Time-Domain, FDTD) yöntemleri kullanılarak fotonik bant diyagramları elde edilmiş, bu diyagramlar üzerinden PBG ve geçiş modları belirlenmiştir. Ayrıca, bu modların iletim, yansımaya,  $v_g$ , grup indisi ( $n_g$ ), grup hız dağılımı (Group Velocity Dispersion, GVD) ve üçüncü derece dağılım (Third Order Dispersion, TOD) gibi optik parametreleri detaylı bir şekilde hesaplanmıştır.

Analitik yöntemler açısından, özellikle faz davranışlarının analizi için bağlanım mod teorisi (Coupled Mode Theory, CMT) kullanılmıştır. Bağlanım mod teorisinde kullanılan kalite faktörleri, harmonik analiz yöntemleriyle belirlenmiştir. Çalışmada elde edilen verilerin işlenmesi ve görselleştirilmesi için MATLAB ve Python tabanlı özel kodlar geliştirilerek kullanılmıştır. Bu yöntemler, elde edilen sonuçların doğruluğunu artırmak ve çalışmanın genelleştirilebilirliğini sağlamak adına titizlikle uygulanmıştır.

Bu çalışmanın ilerleyen bölümlerinde, konunun daha derinlemesine ele alınmasını sağlayacak şekilde yapılandırılmış bir içerik sunulacaktır. İlk olarak, 2. bölümde, çalışmada kullanılan yöntemler detaylı bir şekilde açıklanacaktır. Bu bölümde, yöntemlerin dayandığı teorik temeller ele alınarak, hem PWE hem de FDTD gibi analiz tekniklerinin matematiksel çerçevesi ve uygulama alanları irdelenecektir. Ayrıca, bu yöntemlerin birbirleriyle nasıl tamamlayıcı olduğu ve optik yapılar üzerindeki etkileri değerlendirilecektir.

Ardından, 3. bölümde, çalışmada kullanılan fotonik kristal yapıların malzeme özellikleri, geometrik parametreleri ve tasarım detayları sunulacaktır. Bu bölümde, yapısal parametrelerin (örneğin, periyodiklik, kırılma indisi kontrastı ve simetri öğeleri) optik özellikler üzerindeki etkileri tartışılacak ve çalışmada kullanılan simülasyon modelleriyle uyumluluğu sağlanacaktır. Ayrıca, fotonik kristallerin optik iletişimden sensör teknolojilerine kadar uzanan geniş uygulama



alanlarıyla ilgili literatür destekli bilgiler sunulacaktır.

Sonrasında, 4. bölümde, yapılan analizler sonucunda elde edilen bulgular kapsamlı bir şekilde sunulacaktır. Bu bölümde, simetri kırılmasının ve yardımcı çubukların fotonik kristaller üzerindeki etkisi, hem teorik hem de simülasyon sonuçlarıyla desteklenerek açıklanacaktır.  $v_g$ ,  $n_g$ , GVD ve TOD gibi optik parametrelerin performansa katkıları ayrıntılı şekilde incelenecek ve bu parametrelerin ışık-madde etkileşimlerindeki rolü tartışılacaktır.

Son olarak, 5. bölümde, çalışma boyunca elde edilen sonuçlar özetlenecek ve bu bulguların daha geniş bir bağlamda nasıl değerlendirilebileceği üzerinde durulacaktır. Bu bölümde, fotonik kristal kavite yapılarının sunduğu yenilikçi uygulama olanakları, özellikle SL ve RT teknikleri bağlamında ele alınacaktır. Ayrıca, bu çalışmanın gelecekteki araştırmalara ışık tutacak yönleri ve öneriler de kapsamlı bir şekilde sunulacak, çalışmanın bilimsel ve teknolojik katkıları ortaya konulacaktır.

# BÖLÜM 2

## FOTONİK KRİSTALLERİN TEORİSİ VE HESAPLAMA ARAÇLARI

PhC yapıları, karmaşıklığı artırarak ele alınabilir. Bu, temel bir fotonik yapı olan bir boyutlu PhC'lerden başlayarak, daha karmaşık 2 boyutlu (2D) ve 3 boyutlu (3D) yapıların tasarımına kadar geniş bir yelpazeyi içerir.

Bir boyutlu PhC'ler genellikle düzenli olarak tekrarlanan bir şekilde dizilmiş dielektrik veya iletken malzemelerden oluşur. Bu yapılar, elektromanyetik dalgaların belirli dalga boylarını iletmesine veya yansıtmasına izin vererek belirli optik özelliklerin elde edilmesini sağlar. Genellikle fotonik fiberlerde kullanılan periodik bir dizilime sahip olan bir boyutlu PhC'ler, belirli frekans aralıklarında PBG oluşturabilir ve bu da ışığın belirli frekanslarda geçirgenlik veya yansıma özelliklerini etkiler.

2 boyutlu ve 3 boyutlu PhC'ler, daha karmaşık yapılar oluşturur. 2 boyutlu yapılar, genellikle yüzeylerinde periodik bir desene sahip düzlemsel bir yapıya sahiptir. Bunlar, yüzeyler boyunca yayılan dalga kılavuzları veya optik rezonanslar oluşturmak için kullanılabilir. 3 boyutlu PhC'ler ise, hacimde periodik bir desene sahip olup, daha karmaşık optik özellikler sağlarlar. Örneğin, 3 boyutlu PhC'ler, belirli frekans aralıklarında ışığı hapsederek PBG oluşturabilir ve bu da çeşitli uygulamalarda kullanılabilir (Sakoda 2014; Joannopoulos ve diğ. 2008).

Bu şekilde, PhC yapıları, basit bir boyutlu yapıların optik özelliklerinden daha karmaşık 3 boyutlu yapıların özelliklerine kadar geniş bir yelpazede tasarlanabilir ve uygulanabilir. Bu yapılar, optik iletişim, sensör teknolojileri, optik entegre devreler ve diğer birçok fotonik uygulama için temel oluşturur (Yablonovitch 1993; Joannopoulos ve diğ. 2008; Xia ve diğ. 2007; Zhang ve diğ. 2008; Notomi, Kuramochi ve Tanabe 2008; Xiao ve diğ. 2007; Kubo, Mori ve Baba 2007; Baba 2008; Shu ve Mao 2015).

## 2.1 Maxwell Denklemleri

Işığın ilerleyişini anlamamanın temel yolu, elektrik ve manyetik alanların zaman ve mekân içindeki davranışlarını tanımlayan Maxwell denklemlerini kullanmaktır. Bu denklemler, elektrik yükleri ve akımlarının elektrik ve manyetik alanlar üzerindeki etkilerini açıklar ve elektromanyetik dalgaların yayılımını anlamak için kritik bir rol oynar (Maxwell 1865; Jackson 1999; Griffiths 2017).

### 2.1.1 Elektrostatik Gauss Yasası

Gauss yasası, bir yüzeyden geçen elektrik akısı ile elektrik yük yoğunluğu arasındaki ilişkiyi tanımlar. Bu ilişki, elektrik yüklerinin çevrelerinde bir elektrik alanı oluşturduğunu ifade eder:

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (2.1.1)$$

denklemleri şeklindedir. Burada,  $\nabla \cdot \mathbf{E}$  elektrik alanının diverjansını,  $\rho$  elektrik yük yoğunluğunu ve  $\epsilon_0$  serbest uzayın elektrik geçirgenliğini temsil eder.

### 2.1.2 Manyetostatik Gauss Yasası

Gauss'un manyetik yasası, kapalı bir yüzeyden geçen manyetik akının sıfır olduğunu belirtir, bu da doğada manyetik monopoller bulunmadığını gösterir:

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (2.1.2)$$

denklemleri şeklindedir. Bu denklem, manyetik alanın diverjansının sıfır olduğunu ve manyetik alanın ( $\mathbf{B}$ ) kaynağının bulunmadığını vurgular.

### 2.1.3 Faraday Yasası

Faraday yasası, zamanla değişen manyetik alanların elektrik alanı oluşturduğunu ve bunun elektromanyetik indüksiyonun temelini oluşturduğunu açıklar:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2.1.3)$$

denklemleri şeklindedir. Bu denklemde, elektrik alanının rotasyonu ( $\nabla \times \mathbf{E}$ ) ve manyetik alanın zamana göre değişimi ( $\partial \mathbf{B} / \partial t$ ) arasındaki ilişki ifade edilmektedir.

### 2.1.4 Ampère-Maxwell Yasası

Ampère-Maxwell yasası, elektrik akımları ve zamanla değişen elektrik alanlarının manyetik alanlar oluşturduğunu belirtir:

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (2.1.4)$$

şeklindedir. Bu denklem, manyetik alanın rotasyonu ( $\nabla \times \mathbf{B}$ ), serbest uzayın manyetik geçirgenliği ( $\mu_0$ ), elektrik akımı yoğunluğu ( $\mathbf{J}$ ) ve elektrik alanının zamana göre değişimi ( $\partial \mathbf{E}/\partial t$ ) ile ilişkilidir.

Maxwell denklemleri, bu ilişkiler aracılığıyla elektromanyetik alanların dinamiklerini kapsamlı bir şekilde tanımlar ve modern elektromanyetizma teorisinin temelini oluşturur.

### 2.1.5 Ayar Dönüşümü, Dalga Denkleminin Çıkartılması ve Kırılma İndisi

Ayar dönüşümü, elektromanyetik teoride yaygın olarak kullanılan bir yöntem olup, periyodik ortamlarda ışığın yayılımını analiz etmek için kullanılmaktadır. Bu dönüşüm, dalga denklemlerinin çözümlerini basitleştirmek ve periyodik yapılarıdaki simetri özelliklerini anlamak için kullanılır.

Ayar dönüşümü, elektromanyetik alanlar ve potansiyellerin belirli dönüşüm kurallarına göre yeniden tanımlanmasıdır. Maxwell denklemlerinde, elektrik alan  $\mathbf{E}$  ve manyetik alan  $\mathbf{H}$  şu şekilde ifade edilir:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2.1.5)$$

denklemleri ve

$$\nabla \times \mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \mathbf{J} \quad (2.1.6)$$

denklemleri şeklindedir. Burada,  $\mathbf{B}$  manyetik indüksiyon,  $\mathbf{D}$  elektrik deplasman vektörü ve  $\mathbf{J}$  akım yoğunluğunu ifade eder. Ayar dönüşümü ile bu denklemler, periyodik bir ortamda çözülmek üzere yeniden yazılabilir.

Maxwell denklemleri madde içinde şu şekilde ifade edilir:

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_f \quad \text{Gauss yasası} \quad (2.1.7)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad \text{Manyetik yük yoktur} \quad (2.1.8)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad \text{Faraday yasası} \quad (2.1.9)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}_f + \frac{1}{c^2} \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad \text{Ampère-Maxwell yasası} \quad (2.1.10)$$

denklemleri şeklindedir. Burada,  $\rho_f$  ortamdaki serbest yüklerin hacimsel yoğunluğunu,  $\mathbf{J}_f$  ise ortamdaki serbest akımların hacimsel yoğunluğunu ifade eder. Ortamın  $\mathbf{E}$  ile etkileşimini  $\epsilon$ ,  $\mathbf{B}$  ile etkileşimini ise  $\mu$  ile temsil ederiz. Lineer izotropik maddeler için bu etkileşimler,  $\mathbf{D} = \epsilon\mathbf{E}$  ve  $\mathbf{B} = \mu\mathbf{H}$  yapı denklemleri ile verilir. Işığın madde içerisindeki hızı  $v$  olmak üzere,  $\mu\epsilon = 1/v^2$  ve  $\mu_0\epsilon_0 = 1/c^2$  iken,

$$\sqrt{\frac{\mu\epsilon}{\mu_0\epsilon_0}} = \frac{c}{v} = n \quad (2.1.11)$$

eşitliği elde edilir. Burada  $n$ , ortamın kırıcılık indisini ifade eder.  $\epsilon/\epsilon_0 = \epsilon_r$  ortamın bağıl elektrik geçirgenliğini,  $\mu/\mu_0 = \mu_r$  ise ortamın bağıl manyetik geçirgenliğini gösterir (Sakoda 2014; Joannopoulos ve diğ. 2008). Ortamın Kırıcılık indisine aynı zamanda Kırılma indisi de denir, bir ortamda ışığın yayılma hızının boşluktaki ışık hızına oranı olarak tanımlanır.

Efektif kırılma indisi ( $n_{\text{eff}}$ ), özellikle dalga kılavuzlarında, fotonik kristallerde ve benzeri optik yapılarda, ışığın dalga kılavuzu boyunca nasıl yayıldığını tanımlayan kritik bir parametredir.  $n_{\text{eff}}$ , genellikle bir dalga modunun yayılma sabiti ( $\beta$ ) ile şu şekilde ifade edilir:

$$n_{\text{eff}} = \frac{\beta}{k_0},$$

burada  $\lambda_0$  ışığın boşluktaki dalga boyunu,  $k_0 = 2\pi/\lambda_0$  serbest uzay dalga sayısını ve  $\beta$  yayılma sabitini temsil eder. Bu ifade, bir dalga modunun, dalga kılavuzundaki enerji yoğunluğunun ortamın kırıcılık indisi profiline nasıl etki ettiğini gösterir. Buradaki *beta* dalga modunun faz hızı ve kırılma indisi ile ilişkilidir ve dalganın fazının birim uzunluk başına ne kadar ilerlediğini ifade eder. Yüksek *beta* değeri daha yüksek bir  $n_{\text{eff}}$  ile ilişkilidir ve enerjinin daha çok kılavuzun yüksek kırıcılık indisli bölgesinde yoğunlaştığını gösterir. Aynı şekilde düşük *beta* değeri ise enerjinin daha çok kılavuzun düşük kırıcılık indisli bölgelerinde yayıldığını işaret eder.

Efektif kırılma indisi, bir dalga modunun, genellikle kılavuzun yüksek kırıcılık indisli bölgesinde yoğunlaşan alan profili ile yakından ilişkilidir. Bu parametre, kılavuz modlarının dispersiyon özelliklerini ve optik dalgaların faz ve grup hızını tanımlamak için kullanılır. Efektif kırılma indisi, özellikle fotonik kristallerde ışığın belirli frekanslarda tuzaklanması, yavaşlatılması veya yönlendirilmesi gibi olguların analizinde kritik öneme sahiptir. Dalga kılavuzlarının tasarımında  $n_{\text{eff}}$ 'in doğru hesaplanması, ışığın dalga kılavuzundaki yayılımını optimize etmek ve kayıpları en aza indirmek için temel bir gerekliliktir. Ayrıca, fotonik kristal tabanlı cihazlarda,  $n_{\text{eff}}$  dispersiyon mühendisliği ile hassas bir şekilde

ayarlanarak optik filtreler, sensörler ve diğer entegre optik devreler gibi ileri düzey uygulamalara olanak tanır.

1B PhC'lerde, dielektrik sabiti  $\epsilon(x)$  periyodik bir fonksiyon olarak kabul edilir. Maxwell denklemleri, zaman harmonik çözümler ( $e^{-i\omega t}$ ) varsayılarak şu şekilde yeniden yazılabilir:

$$\nabla \times \mathbf{E} = i\omega \mathbf{B} \quad (2.1.12)$$

ve

$$\nabla \times \mathbf{H} = -i\omega \mathbf{D} \quad (2.1.13)$$

elde edilir. Bu denklemler, bir boyutlu bir PhC'de (sadece  $x$  yönünde periyodik olan) sadeleştirilebilir.  $E_y$  bileşeni için dalga denklemi şu şekilde elde edilir:

$$\frac{d^2 E_y}{dx^2} + \frac{\omega^2}{c^2} \epsilon(x) E_y = 0 \quad (2.1.14)$$

şeklinde olur. Bu denklem, PhC'in periyodik yapısı içinde ışığın nasıl yayıldığını belirler,  $x$  ekseninde hareket eden ışığın elektrik alan yönelimi çözüm kolaylığı açısından  $y$  ekseninde alınmıştır,  $E_y$  burada elektrik alanın ilgili eksenki bileşenini temsil eder. Bloch teoremi uygulanarak, çözüm Bloch fonksiyonları şeklinde ifade edilebilir:

$$E_y(x) = e^{ikx} u_k(x) \quad (2.1.15)$$

şeklindedir. Burada  $u_k(x)$  periyodik bir fonksiyondur ve  $u_k(x) = u_k(x + a)$  şartını sağlar,  $a$  burada kristalin örgü sabitidir. Bu dalga denklemi, PhC'lerin bant yapısını ve ışık yayılımını analiz etmek için temel bir araçtır (Sakoda 2014; Joannopoulos ve diğ. 2008; Griffiths 2017).

## 2.1.6 Bant Yapısı ve Yasak Bantların Belirlenmesi

Dalga denkleminin Bloch teoremi kullanılarak çözülmesi, PhC'in bant yapısının ve PBG'nin belirlenmesini sağlar. Bu bant yapısı, farklı frekanslarda fotonların nasıl yayıldığını ve hangi frekansların yasaklı olduğunu gösterir. Periyodik yapıların bant yapısı, malzeme tasarımında ve uygulamalarında kritik bir rol oynar (Sakoda 2014; Joannopoulos ve diğ. 2008). 2.1.14 denklemini  $k$  uzayında genelleştirdiğimizde aynı forma sahip olan

$$\frac{d^2 E_k(x)}{dx^2} + \frac{\omega^2}{c^2} \epsilon(x) E_k(x) = 0 \quad (2.1.16)$$

denklemini şeklindeki bu bant yapısı analizi, 1B PhC'lerin optik özelliklerini anlamak ve geliştirmek için temel bir araçtır. PBG'nin elde edilmesinde  $k$  uzayı boyunca ileride de tekrar inceleyeceğimiz PWE yöntemi ile 2.1.16 denkleminin

ters uzayda tam çözümü olarak veya şimdi ele alacağımız Bloch teoremin tam çözümü elde edilir. Gene aynı şekilde kusurlardan kaynaklanan geçiş modlarında eldesi mümkündür.

## 2.2 Bloch Teoremi

Bloch teoremi, periyodik potansiyel altında hareket eden parçacıkların dalga fonksiyonlarını tanımlamak için kullanılan temel bir kavramdır. Bu teorem, kristal yapılarındaki elektronların enerji bantlarının belirlenmesinde kritik bir rol oynar ve benzer şekilde PhC'lerde de uygulanabilir. Bloch teoremi, bir periyodik potansiyel içinde çözülen dalga fonksiyonlarının, periyodik potansiyelin simetrisini yansıttığını belirtir. Bu nedenle, PhC'lerde elektromanyetik dalgaların yayılımı da Bloch fonksiyonları ile açıklanabilir (Sakoda 2014).

Bloch teoremine göre, periyodik bir potansiyel içinde hareket eden bir parçacığın dalga fonksiyonu  $\psi_k(x)$ , düzlem dalgası ve periyodik bir fonksiyonun çarpımı şeklinde ifade edilebilir. Bu ifade şu şekildedir:

$$\psi_k(x) = u_k(x)e^{ikx} \quad (2.2.1)$$

burada  $\psi_k(x)$  Bloch dalga fonksiyonunu,  $u_k(x)$  periyodik bir fonksiyonu (periyot yapının örgü sabiti olan  $a$  ile verilmek üzere) ve  $e^{ikx}$  ise düzlem dalgasını temsil eder.  $u_k(x)$  fonksiyonu, periyodik potansiyelin periyodunu yansıtır ve şu özelliğe sahiptir:

$$u_k(x + a) = u_k(x) \quad (2.2.2)$$

şekindedir. Bu form, PhC'lerdeki elektromanyetik dalgaların da benzer şekilde ifade edilebileceği anlamına gelir. Bir boyutlu PhC'lerde, dielektrik sabiti  $\epsilon(x)$ 'in periyodik olduğu kabul edilir ve bu periyodiklik, elektromanyetik dalgaların yayılımında Bloch fonksiyonları ile açıklanabilir.

Bloch teoreminin PhC'lere uygulanması, Maxwell denklemlerinin çözümlerinde büyük kolaylık sağlar. Özellikle, bir boyutlu PhC'lerde bant yapısının ve PBG'lerinin belirlenmesi, bu teorem ile daha anlaşılır hale gelir. Periyodik potansiyel altında hareket eden elektromanyetik dalgaların Bloch fonksiyonları ile tanımlanması, bu sistemlerin optik özelliklerinin hesaplanmasını ve anlaşılmasını sağlar (Sakoda 2014).

### 2.2.1 Bir Boyutlu Basit Bir PhC Örneği

Bir boyutlu PhC'ler, tekrarlayan yüksek ve düşük kırılma indisi katmanlarından oluşur ve bu yapılar, periyodik bir dielektrik sabitine sahiptir. En basit haliyle,

bu kristallerdeki periyodiklik şu şekilde ifade edilebilir:

$$\epsilon(x) = \epsilon(x + a) \quad (2.2.3)$$

burada  $a$ , kristalin örgü sabitidir ve yapının periyodunu temsil eder. Bu periyodik yapının içinde elektromanyetik dalgaların yayılımı Bloch teoremi ile açıklanabilir. Maxwell denklemleri kullanılarak, bu yapının bant yapısını elde edebiliriz.

Maxwell denklemleri, PhC'lerdeki elektromanyetik dalgaların yayılımını tanımlar. Elektrik alanı  $E$  ve manyetik alanı  $H$  ile ilgili denklemler, uygun sınır koşulları altında çözüldüğünde, bu alanların periyodik yapılarda nasıl davrandığını belirler. Bir boyutlu bir PhC için 2.1.16 ve 2.2.2 denklemlerinden yola çıkarak bir boyutlu PhC için bant yapısını belirlemek amacıyla, periyodik potansiyelin Fourier serisi açılımını kullanabiliriz.  $\epsilon(x)$  fonksiyonunu Fourier serisi ile ifade edelim:

$$\epsilon(x) = \sum_G \epsilon_G e^{iGx} \quad (2.2.4)$$

burada  $G$ , ters örgü vektörleridir (reciprocal lattice vector) ve  $\epsilon_G$  Fourier katsayılarıdır. Bu ifade, Maxwell denklemlerindeki periyodik potansiyel terimini Fourier serisi açılımına dayalı olarak çözümlerken kullanılır.

Bu yaklaşımla, bir boyutlu PhC bant yapısını ve PBG'lerini belirleyebiliriz. Bant yapısı, PhC'in belirli frekanslarda (veya dalga boylarında) elektromanyetik dalgaları iletip iletmeyeceğini gösteren kritik bir özelliktir. Bir fotonik bant diyagramı, frekans ile dalga vektörü arasındaki ilişkiyi grafiksel olarak gösterir ve bu ilişki, yapının optik performansını belirleyen temel bir parametredir. Bant diyagramındaki frekans aralıkları, elektromanyetik dalgaların kristal boyunca yayılabildiği izinli bantlar ve yayılımın tamamen engellendiği PBG'ler olarak ikiye ayrılır.

PBG'lar, fotonik kristalin belirli bir frekans aralığında elektromanyetik dalgaların yayılmasını tamamen engellediği bölgeleri ifade eder. Bu özellik, ışığın kontrol edilmesi, yönlendirilmesi ve yönetilmesi için büyük önem taşır. Örneğin, bu PBG'ler, dalga kılavuzları, yüksek kalite faktörlü (Q-faktör) rezonatörler, filtreler ve optik yalıtıcılar gibi birçok fotonik cihazın tasarımında kullanılabilir. Özellikle geniş PBG'lerine sahip bir PhC, ışığın daha etkili bir şekilde yönlendirilmesini ve yönetilmesini sağlar.

Sonuç olarak, bir boyutlu PhC'lerin bant yapısını ve iletim özelliklerini belirlemek için Bloch teoremi ve Maxwell denklemleri kullanılarak periyodik yapı çözülebilir. Bu yöntemler, PhC'lerin optik özelliklerini anlamamıza ve tasarlamamıza olanak tanır (Sakoda 2014).



## 2.3 Düzlem Dalga Açılımı Metodu

PWE metodu Maxwell denklemlerinin bir özdeğer problemi olarak ele alınarak çözülmesi yöntemidir. Bu yöntem, elektromanyetik alanın bir PhC içindeki dağılımını hesaplamak için etkili bir yöntemdir. Düzlem dalgalar  $\nabla^2 f = -k^2 f$  homojen Helmholtz denkleminin bir çözümü olarak ele alınır (Sakoda 2014; Shi, Chen ve Prather 2004; Vasseur 2019).

Bu yöntemi kullandığımızda, çözüm için elektrik alan, manyetik alan ve dielektrik geçirgenliği için PhC'in örgü vektörleri üzerinde Fourier serisi açılımı yaparak

$$\frac{1}{\epsilon(\mathbf{r})} = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} K_m^{\epsilon_r} e^{-i\mathbf{G}_m \cdot \mathbf{r}m} \quad (2.3.1)$$

ortamın bağıl elektrik geçirgenliği ve

$$E(\omega, \mathbf{r}) = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} K_m^{\epsilon_r} e^{-i\mathbf{G}_m \cdot \mathbf{r}m} e^{-i\mathbf{k}_m \cdot \mathbf{r}m} \quad (2.3.2)$$

elektrik bileşenleri olmak üzere

$$\frac{1}{\epsilon(\mathbf{r})} \nabla \times \nabla \times \mathbf{E}(\omega, \mathbf{r}) = \left(\frac{\omega}{c}\right)^2 \mathbf{E}(\omega, \mathbf{r}) \quad (2.3.3)$$

denklemini elde ederiz. Burada  $\mathbf{G}_m$  ters örgü vektörleri olup, örgü simetrisine bağlıdır ve kristalin periyodik yapısını Fourier uzayında temsil eder,  $K_m^{\epsilon_r}$  Fourier katsayıları, bağıl elektrik geçirgenliği  $\epsilon(\mathbf{r})$  fonksiyonunun Fourier serisi açılında yer alan katsayılarıdır, bu katsayılar, ortamın dielektrik özelliklerini ifade eder,  $K_m^E$  Fourier katsayıları ise, elektrik alanın (veya manyetik alanın) Fourier serisinde kullanılan katsayılarıdır ve alanın uzaysal dağılımını temsil eder,  $\mathbf{k}_m$  Bloch dalga vektörleri, örgünün periyodikliği nedeniyle dalgaların izin verilen dalga vektörlerini tanımlar ve Bloch teoremi ile ilişkilidir. Bu denklem uygun sınır koşulları ile örgü vektörleri boyunca çözülmeli ve özdeğerler elde edilmelidir (Shi, Chen ve Prather 2004; Vasseur 2019).

PWE yöntemi, özellikle birim hücre ve süper hücre analizlerinde mod çözümlerini Brillouin bölge sınırlarında hızlı ve etkili bir şekilde sunar. Küçük ve düzenli yapılar için oldukça uygun olan bu yöntem, fotonik kristal (PhC) yapıların analizinde sıkça tercih edilir. Ancak, geniş yapılar üzerinde çalışıldığında etkinliği azalabilir ve bazı kısıtlamalara yol açabilir. Bununla birlikte, PhC yapıların periyodikliği göz önüne alındığında, PWE yöntemi periyodik yapıların analizinde değerli bir araç olmaya devam etmektedir (Aravantinos-Zafiris ve diğ. 2014). PhC analizinde, PWE yöntemiyle hesaplanan modlar genellikle Enine Elektrik

(Transverse Electric, TE) ve Enine Manyetik (Transverse Magnetic, TM) modlar olarak sınıflandırılır. TE modunda elektrik alan ( $E$ ), dalganın yayılım yönüne dik olup  $E_z = 0$  koşulunu sağlar. Bu durum, manyetik alanın ( $H$ ) yayılım yönünde bileşenler içermesine olanak tanır. TM modunda ise manyetik alan ( $H$ ), yayılım yönüne dik olup  $H_z = 0$  koşulunu sağlar ve elektrik alan ( $E$ ) yayılım doğrultusunda bileşenler barındırır. TE ve TM modlarının bu temel özellikleri, PhC'lerin optik özelliklerinin incelenmesinde ve band yapılarının tasarımında kritik bir rol oynar (Joannopoulos ve diğ. 2008; Aravantinos-Zafiris ve diğ. 2014).

Bu çalışmada, PWE yöntemine entegre olan MPB (MIT Photonic Bands) (MPB 2024) yazılımı kullanılmıştır. MPB, periyodik PhC yapıların bant yapılarının hesaplanmasında oldukça etkili ve yaygın olarak kullanılan bir yazılımdır. Bu yazılım, çalışmamızda kullanılan PhC yapıların frekans bantlarının ve modlarının belirlenmesi ve optimize edilmesinde kritik bir rol oynamıştır. İlerleyen bölümlerde, fotonik bant yapılarının nasıl oluştuğunu ve bu yapıların PhC uygulamalarındaki önemini detaylı olarak ele alacağız (Johnson ve Joannopoulos 2001).

## 2.4 Sonlu-Farklar Zaman-Bölgesi Yöntemi

Kane Yee tarafından ortaya atılan FDTD, güçlü bir sayısal teknik olup, pek çok elektromanyetik problemin çözümünde başarıyla uygulanmaktadır. FDTD yöntemi, sonlu farklar yöntemi (FDM) ve sonlu elemanlar yöntemi (FEM) gibi diğer sayısal yöntemlerle karşılaştırıldığında, düzenli geometrilerde daha verimli ve doğrudan sonuçlar sağlar (Yee 1966). FDTD yöntemi, iletken, dielektrik ve doğrusal olmayan kayıplı malzemelerde elektromanyetik dalga yayılımının analizi, dalga kılavuzu modelleme, düzlemsel mikrodalga devre ve mikroşerit filtre analizi, aktif ve pasif anten modellemesi gibi uygulama alanları için kullanılabilir (Alimenti ve diğ. 2000).

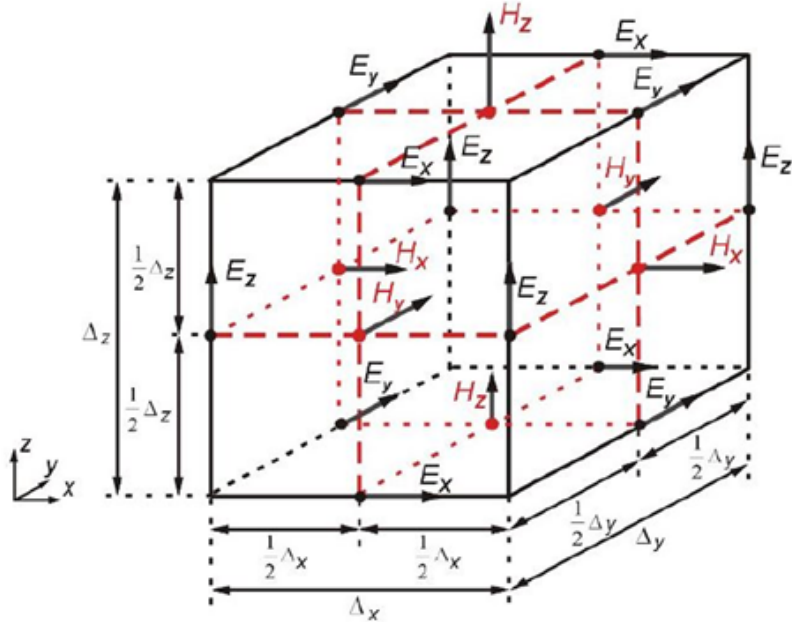
Maxwell denklemlerinin FDTD yöntemi kullanılarak sonlu farklarla çözülmesi, elektrik ve manyetik alanların zamana ve konuma bağımlı bir şekilde sayısal olarak hesaplanmasını gerektirir. Bu nedenle, zaman adımı ve uzay adımı belirlemek için bazı parametrelerin dikkatli bir şekilde seçilmesi gerekmektedir (Taflove, Hagness ve Picket-May 2005).

FDTD yöntemi, sayısal analizde geniş kullanım alanına sahiptir. Hatta sayısal işlemlerin pek çoğu için temel teşkil eder. Zamana bağlı Maxwell denklemlerinin diferansiyel formunu, sonlu farklar metodu kullanılarak konum

hücrelerinde nümerik çözüm yöntemidir. Her  $t$  anında kartezyen ızgaradaki bütün noktalar için elektrik ve manyetik alan değerlerini çıktı olarak verir. Tek simülasyonda geniş frekans aralığında (300-500 THz gibi) analiz yapabilme özelliği bulunmaktadır (Alimenti ve diğ. 2000). Tüm karmaşıklığına rağmen, Maxwell denklemlerinin anlaşılmasını sağlamak ve verilerin bilgisayara aktarılıp gerekli hesaplamaları yürütmek için denklemlerin uygun formlara dönüştürülmesi elzemdir. İzole edilmiş yüklerin ve akımların olmadığı bir uzay bölgesi ele alınırsa Maxwell denklemleri:

$$\frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} = -\frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{E} \quad \text{ve} \quad \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = \frac{1}{\epsilon} \nabla \times \mathbf{H} \quad (2.4.1)$$

şeklinde olur (Yee 1966). Bu denklemlerin çözümünün işlemlerin anlaşılması için, Şekil 2.1'te görüldüğü gibi alanları uzayda sürekli olarak ele almaktansa ayırık olarak ele almak daha yararlıdır.



Şekil 2.1: 3B Yee Hücresi (Erol ve Balık 2008)

Gerçek bir problemde malzeme, her biri bir  $\mu$  ve  $\epsilon$  değeri ile tanımlanan küçük hücrelere bölünür. Bu hücrede  $\mathbf{E}$  ve  $\mathbf{H}$  vektör bileşenleri merkezden ayırık mesafelerde konumlanırlar.  $H_x$  bileşeninin  $(i, j + 1/2, k + 1/2)$  noktalarındaki değerleri  $E_y$  bileşenlerinin  $(i, j, k + 1/2)$  ve  $(i, j + 1, k + 1/2)$  noktaları ve  $E_z$  bileşenlerinin  $(i, j + 1/2, k)$  ve  $(i, j + 1/2, k + 1)$  noktaları kullanılarak hesaplanır. Yöntem, zaman adımı  $\Delta t$  olarak tanımlanan süre boyunca tekrar eder. Her adımda, elektrik alanları mevcut manyetik alanlardan hesaplanır ve sonra bu yeni elektrik alanları mevcut manyetik alanlardan hesaplanır. Bu işlem, belirli bir durma koşuluna kadar devam eder (Yee 1966; Taflove, Hagness ve Picket-May

2005).

Maxwell denklemlerindeki  $E$  ve  $H$  alanlarına ait kısmi diferansiyel denklemlerdeki gerekli vektörel çarpımlar yapılsa, Manyetik alan şöyle hesap edilir.

$$\frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} = -\frac{1}{\mu} \begin{vmatrix} \hat{i} & \hat{j} & \hat{k} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ E_x & E_y & E_z \end{vmatrix} = \frac{1}{\mu} \begin{pmatrix} \frac{\partial E_y}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial y} \\ \frac{\partial E_z}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial z} \\ \frac{\partial E_x}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial x} \end{pmatrix} \quad (2.4.2)$$

Burada manyetik alanın üç bileşeni vardır. Elektrik alan ise aşağıdaki gibi olur.

$$\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = \frac{1}{\epsilon} \begin{vmatrix} \hat{i} & \hat{j} & \hat{k} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ H_x & H_y & H_z \end{vmatrix} = \frac{1}{\epsilon} \begin{pmatrix} \frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} \\ \frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} \\ \frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} \end{pmatrix} \quad (2.4.3)$$

Burada elektrik alanın üç bileşeni vardır. Bu iki vektörel denklemin bileşenleri altı tane skaler denklem verir.

$$\frac{\partial H_x}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left( \frac{\partial E_y}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial y} \right), \quad \frac{\partial H_y}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left( \frac{\partial E_z}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial z} \right), \quad \frac{\partial H_z}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left( \frac{\partial E_x}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial x} \right) \quad (2.4.4)$$

$$\frac{\partial E_x}{\partial t} = \frac{1}{\epsilon} \left( \frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} \right), \quad \frac{\partial E_y}{\partial t} = \frac{1}{\epsilon} \left( \frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} \right), \quad \frac{\partial E_z}{\partial t} = \frac{1}{\epsilon} \left( \frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} \right) \quad (2.4.5)$$

Böylece elektrik ve manyetik alana ait üçer bileşen elde edilmiş olur. Uzayın herhangi bir noktasındaki elektrik ve manyetik alan bileşenleri birbirlerine tamamen bağlıdır ve bu bağlılık ortamın manyetik geçirgenliği ve elektrik geçirgenliğiyle de ilgilidir. Elde edilen bu 6 adet denklem zamana bağlıdır. Bu denklemlerin bilgisayar ortamında çözülebilmesi için ayrıklaştırılması gerekir. FDTD yönteminde üç boyutlu problemlerde uzaydaki ayrıklaştırma, Yee tarafından önerilen Şekil 2.1'deki birim hücre kullanılarak gerçekleştirilir (Yee 1966). Burada Taylor serisi kullanılarak, merkezi sonlu farklar açılımı yapılır.

### 2.4.1 Mükemmel Eşlenmiş Katman

Mükemmel eşlenmiş katman (Perfectly Matched Layer, PML), hesaplama alanının sınırlarında yansımaları önlemek için kullanılan bir teknik olarak, özellikle FDTD yönteminde yaygın bir şekilde kullanılır. PML, sınır koşulu olarak tasarlanmış yapay bir bölgedir ve elektromanyetik dalgaların sınırdan geri yansımaları minimize eder. Bu, hesaplama alanının dışındaki sınırlarda, dalgaların kaybolmasına olanak tanıyarak yansısız bir sınır koşulu oluşturur (Berenger 1994; Taflove, Hagness ve Picket-May 2005).

PML, dalgaların sınır bölgelerinde sönümlenmesini sağlamak için özel malzeme özellikleri tanımlanır. Bu malzeme, sanal ve gerçek bileşenlerden oluşan bir kompleks kırılma indisi ile karakterize edilir ve bu sayede elektromanyetik dalgaların sönümlenmesi sağlanır. PML, belirli bir kalınlık boyunca, dalgaların eksponansiyel olarak azalmasını sağlar, bu da sınır yansımalarının önlenmesinde kritik rol oynar (Berenger 1994; Taflove, Hagness ve Picket-May 2005).

PML'in matematiksel temeli, Maxwell denklemlerine eklenen bir koordinat uzayı dönüşümü ile sağlanır. Bu dönüşüm, hesaplama alanının sınır bölgelerinde, elektromanyetik dalgaların sönümlenmesini sağlar. PML'in etkinliği, kullanılan malzeme parametrelerine ve PML'in kalınlığına bağlıdır. PML'in kalınlığı ve malzeme parametreleri uygun şekilde seçildiğinde, dalgalar neredeyse tamamen soğurular ve geri yansıma minimum düzeye indirgenir (Taflove, Hagness ve Picket-May 2005).

FDTD yönteminde, PML'in uygulanışı, elektrik ve manyetik alan bileşenlerinin zaman alanında çözümlenmesi sırasında yapılır. PML bölgesindeki elektrik ve manyetik alan denklemlerinin ifadesi:

$$\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = \frac{1}{\epsilon} (\nabla \times \mathbf{H} - \sigma \mathbf{E}) \quad (2.4.6)$$

ve

$$\frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} = \frac{1}{\mu} (\nabla \times \mathbf{E} - \sigma^* \mathbf{H}) \quad (2.4.7)$$

şeklinde. Burada  $\sigma$  ve  $\sigma^*$ , PML bölgesinde elektrik ve manyetik alanların sönümlenmesini sağlayan sönüm katsayılarıdır. Bu katsayılar, sınır yansımalarını minimize edecek şekilde ayarlanır ve dalgaların PML içinde soğurulmasını sağlar. PML, hesaplama alanının sınırlarını ideal bir şekilde tanımlar ve elektromanyetik dalgaların yansımalarını en aza indirir, böylece FDTD simülasyonlarının doğruluğunu artırır (Taflove, Hagness ve Picket-May 2005).

Bu bölümde PWE ve FDTD yöntemlerinin temel ilkeleri ve uygulama alanları ele alındı. Hesaplama PhC analizlerinde her iki yöntemin de kullanımı, farklı avantajlar ve zorluklar içermektedir. Bu çalışmada, bu yöntemlerin kullanılmasıyla elde edilen sonuçlar ve bu sonuçların PhC tasarımında nasıl değerlendirileceği ilerleyen bölümlerde tartışılacaktır.

## 2.5 Bağlanım Mod Teorisi

Bağlanım mod teorisi (Coupled Mode Theory, CMT), tüm bir sistemin zayıf biçimde eşleşmiş elemanlar olarak tanımlanarak kurgulanabilmesini ve analiz edilebilmesini sağlayan bir teoridir (Miller 1954; Huang 1994; Barybin ve

Dmitriev 2002; Li ve diğ. 2010). Mod, bağımsız elektromanyetik enerji paketlerini ifade etmektedir ve bu ayrımı yaratan özdeğer, polarizasyon ve faz farkları ortaya koyabilir. Eğer sistemde CCW varsa mod ayrışmasının analizine ve faz karakteristiklerinin, iletim ve yansıma özelliklerinin ortaya çıkartılması için kullanılabilir. Bağlanım bir sistem içerisinde duran dalga veya ilerleyen dalga bağlanımı şeklinde gerçekleşebilir. Eğer bağlanım duran dalga şeklinde gerçekleşiyorsa, bu yapılar  $S$  tipi olarak adlandırılır; ilerleyen dalga şeklinde gerçekleşiyorsa, bu yapılar ise  $T$  tipi olarak tanımlanır (Huang 1994; Li ve diğ. 2010).  $S_n$  gösteriminde,  $S$  harfi kavitedeki bağlanımın duran dalga (standing wave) karakterinde olduğunu,  $n$  ise sistemdeki toplam giriş ve çıkış sayısını belirtir. Buna karşılık,  $T_n$  gösteriminde,  $T$  harfi kavitedeki bağlanımın ilerleyen dalga (traveling wave) karakterinde olduğunu ifade eder. Bu iki tip, kavitenin optik özelliklerinin ve dalga iletiminin farklı fiziksel mekanizmalarla açıklanmasına olanak tanır. Genelleştirilmiş CMT’i ele aldığımızda; bir kavitenin içerisindeki hapsedilen enerji yani kavite modları  $U_i = |A_i|^2$ , ( $i = 1, 2$ ) şeklinde ifade edilebilir. Benzer biçimde dalga kılavuzu içerisinde gelen ve giden dalga kılavuzunun ilerleme modlarının gücü  $|S_{i\pm}|^2$  şeklinde tanımlanabilir. Burada  $S_{i+}$  genliği kaviteye doğru artan modların  $S_{i-}$  ise genliği kaviteye doğru azalan modların gücünü tanımlamaktadır. Kavite içerisindeki modun sönümlenme zamanını  $\tau$  olarak tanımladığımızda dalga kılavuzunun devrede olmadığı sadece kaviteyi ele aldığımız durumda

$$\frac{dA}{dt} = -j\omega_0 A - \frac{A}{\tau} \quad (2.5.1)$$

şeklinde bir genlik bağıntısı elde ederiz. Bu bağıntının çözümü ise

$$A(t) = A(0)e^{i\omega_0 t - t/\tau} \quad (2.5.2)$$

şeklinde olacaktır. Sonrasında Şekil 2.2’de  $S_i$  bağlanımın geçişini  $S_r$  bağlanım yansımamı,  $S_t$  iletimi  $\tau_\omega$  ise grup gecikmesini ifade etmek üzere tek bir rezonatörün iki dalga kılavuzu ile duran dalga modeli bağlanımının diyagramındaki gibi  $S_{i+}$ ’dan enerji alan ve  $S_{i-}$ ’den gerek yansıma gerekse iletim ile enerji kaybeden bir kaviteyi ele aldığımızda, kavitenin sönümleme durumu  $\tau \gg 2\pi/\omega_0$  veya  $Q = \omega_0\tau/2 \gg \pi$  bağlanım şartını sağlamadığı (normal şartlarda bağlanım olabilmesi için  $Q > 30$  olması gerekmektedir) durum için lineer zamana bağlı bağıntılar,

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_1} + \frac{1}{\tau_2} \quad (2.5.3)$$

sönümlenme zamanı olmak üzere

$$\frac{dA}{dt} = -j\omega_0 A - \frac{A}{\tau_1} - \frac{A}{\tau_2} + \alpha_1 S_{1+} + \alpha_2 S_{2-} \quad (2.5.4)$$

$$S_{i-} = \beta_i S_{i+} + \gamma_i A \quad (2.5.5)$$

şeklindedir. Burada  $\alpha_i$  ve  $\gamma_i$  sabitleri kavite ile dalga kılavuzunun bağlanım kuvvetini, ve  $\beta_i$  sabiti yansıma katsayısını vermektedir. Bu noktada,  $\omega_0$  ve  $\tau_i$  bilinmezleri dışındaki tüm bilinmeyenlerden kurtulmamız mümkündür. Enerjinin korunumundan faydalanarak  $\gamma_1$  ve  $\gamma_2$  sabitlerini belirleyebiliriz.  $\tau_2 \rightarrow \infty$  durumunda, yani kavite ikinci dalga kılavuzundan bağlantısız olduğu durumda  $S_{1+} = S_{2+} = 0$  olacaktır çünkü sisteme giren enerji olmayacaktır. Bu şart altında kavite modu eksponansiyel olarak  $A(t) = A(0)\exp(-\omega_0 t - t/\tau_1)$  şeklinde sönümlenecektir.  $|A|^2$  azalırken enerjinin gidebileceği tek yer çıkış gücü  $|S_{1-}|^2$  olacaktır. Bu durumda

$$-\frac{d|A|^2}{dt} = \frac{2}{\tau_1}|A|^2 = |S_{1-}|^2 = |\gamma_1|^2|A|^2 \quad (2.5.6)$$

olacaktır.  $|\gamma_1|^2 = 2/\tau_1$  bağıntısını ele aldığımızda  $S_{1-}$ 'nin fazının keyfilikinden  $\gamma_1 = \sqrt{2/\tau_1}$  seçilebilir. aynı şekilde  $\tau_1 \rightarrow \infty$  için  $\gamma_2 = \sqrt{2/\tau_2}$  seçilebilir.  $\tau_1$  ve  $\tau_2$  sonlu büyüklükte olduğunda ise zayıf bağlanım için birbirine olan etkileri zaten çok küçük bir değere sahip olan  $\gamma_i$  için ikincil derece çok çok küçük etkide olacağı için göz ardı edilebilir. Benzer biçimde zaman-tersinirliği simetrisi kullanarak  $\alpha_i$  ve  $\beta_i$  sabitlerini elde edebiliriz,  $\tau_i \rightarrow \infty$  olduğu durumda tam yansıma görüleceğini göz önüne alırsak  $\beta_i = -1$  olacağı aşıkardır.  $\tau_2 \rightarrow \infty$  durumunda  $A(t)$  Denklem 2.5.4'e yerleştirildiğinde  $\alpha_1 \sqrt{2/\tau_1} A = 2A/\tau_1$  olduğu görülecektir. Bu durumda  $\alpha_i = \sqrt{2/\tau_i} = \gamma_i$  olacaktır. Sistem için elde ettiğimiz genelleştirilmiş CMT bağıntıları

$$\frac{dA}{dt} = -i\omega_0 A - \sum_{i=1}^2 A/\tau_i + \sum_{i=1}^2 \sqrt{\frac{2}{\tau_i}} s_{i+} \quad (2.5.7)$$

$$s_{i-} = -s_{i+} + \sqrt{\frac{2}{\tau_i}} A \quad (2.5.8)$$

olacaktır (Joannopoulos ve diğ. 2008).  $Q = \omega_0 \tau / 2$  yola çıkarak  $Q_i$  kavitenin kalite faktörü,  $Q_w$  dalga kılavuzunun kalite faktörü olmak üzere

$$\frac{1}{Q} = \frac{1}{Q_i} + \frac{1}{Q_w} \quad (2.5.9)$$

bağıntısı elde edilebilir. Son tanımda transfer fonksiyonu

$$T = |t|^2 = \frac{|s_{2-}|^2}{|S_{1+}|^2} \quad (2.5.10)$$

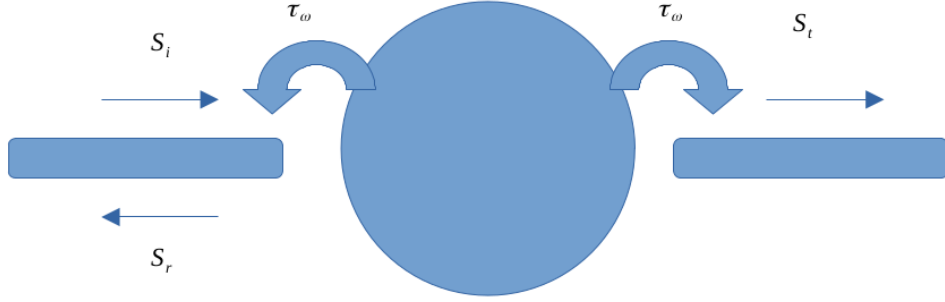
şeklinde tanımlanır (Li ve diğ. 2010). Bu durumda  $S_2$  tipi bir tekli duran dalga kavite için bağlanım denklemleri,  $t$  transfer fonksiyonu,  $T$  iletimi,  $\theta$  faz kayması ve  $\tau$  grup gecikmesi olmak üzere;

$$\theta = \arg(t) \quad \text{ve} \quad \tau = \frac{d\theta(\omega)}{d\omega} \quad (2.5.11)$$

olmak üzere, ilgili bağıntılar rezonans modları için

$$t = \frac{\frac{1}{Q_w}}{j2\delta + \frac{1}{Q_i} + \frac{1}{Q_w}} \quad , \quad T(\omega_0) = \left( \frac{1}{1 + \frac{Q_w}{Q_i}} \right)^2 \quad \text{ve} \quad \theta(\omega_0) = \left( \frac{1}{1 + \frac{Q_w}{Q_i}} \right)^2 \quad (2.5.12)$$

şeklinde olacaktır. Faz kayması  $\theta$  ise  $[-\pi/2, +\pi/2]$  aralığında değer almaktadır (Li ve diğ. 2010).



Şekil 2.2:  $S_2$  kavite için tek bir rezonatörün iki dalga kılavuzu ile duran dalga modeli bağlanım diyagramı.

## 2.6 Dispersiyon ve Yavaş Işık

Bir dalga ilerlerken, genellikle iki farklı hızla karşılaşırız: grup hızı ( $v_g$ ) ve faz hızı ( $v_\phi$ ) (Giden, Turduev ve Kurt 2013).  $v_g$ , bir dalganın genliklerinden oluşan zarfın yayılma hızını tanımlar (Sakoda 2014; Joannopoulos ve diğ. 2008). Dalga paketinin taşıdığı enerji genliğinde, taşıdığı bilgi ise genellikle bu dalganın genliklerinden oluşan zarfın şekline kodlanmış bir biçimde taşınır. Bu nedenle,  $v_g$  aynı zamanda bir dalganın enerji ve bilgi taşıma hızını belirler.  $v_\phi$  ise,  $\omega$  açısıl



frekans ve  $k$  dalga vektörü olmak üzere,

$$v_\phi = \frac{\omega_0}{k_0} \quad (2.6.1)$$

şeklinde tanımlanır. Eğer  $\omega(k)$  dispersiyon bağıntısı olarak kabul edilirse,  $v_g$ ,

$$v_g = \frac{\partial \omega}{\partial k} \quad (2.6.2)$$

olarak ifade edilir (Sakoda 2014; Joannopoulos ve diğ. 2008).  $v_g$  ve  $n_{\text{eff}}$  arasındaki ilişki şu şekilde verilir:

$$v_g = \frac{c}{n_{\text{eff}}} + \omega \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial \omega} \quad (2.6.3)$$

ve aynı zamanda bu denklem,  $n_{\text{eff}}$ 'in dispersiyon ile nasıl değiştiğini ve bu değişimin grup hızını nasıl etkilediğini gösterir. Bu parametreler arasındaki ilişkilerin temel kaynağı olan dispersiyon eğrileri, optik dalgaların bir ortamda nasıl yayıldığını belirler ve bu nedenle  $v_\phi$ ,  $v_g$  ve GVD gibi kritik parametrelerin doğrudan anlaşılmasını sağlar. Dispersiyon eğrileri,  $\omega$  ile  $k$  arasındaki bağıntıyı gösterir ve bu bağıntı, optik sinyallerin bir fotonik yapı içerisindeki davranışını öngörmek için kullanılır. Şekil 2.3'de bu dispersiyon eğrilerinin yanı sıra  $v_\phi$  ve  $v_g$ 'nin nasıl tanımlandığı ve birbirleriyle nasıl ilişkilendirildiği açıkça görülmektedir.

Şekil 2.3'de yer alan diyagram, optik sistemlerde yayılım hızlarının nasıl değiştiğini görselleştirmekle kalmaz, aynı zamanda bu parametrelerin nasıl birlikte çalıştığını ve nihayetinde optik sistemin genel performansını nasıl etkilediğini anlamamıza olanak tanır.

### 2.6.1 Grup Hız Dağılımı

Ortamın dispersiyonunu tanımlamak için iki önemli parametre kullanılabilir: GVD ve  $n_g$ . GVD şu şekilde tanımlanır:

$$\text{GVD} = \frac{\partial^2 k}{\partial \omega^2} \quad (2.6.4)$$

Grup indisi ise, efektif kırılma indisinin  $n_{\text{eff}}$ 'in bir fonksiyonu olarak ifade edilir ve şu şekilde tanımlanır:

$$n_g = \frac{c}{v_g} = c \frac{\partial k}{\partial \omega} = n_{\text{eff}}(\omega) + \omega \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial \omega} \quad (2.6.5)$$

Bu iki parametrenin analizi, dispersiyon ilişkilerinin çıkarılması ve SL aygıtlarının tasarımı için önemlidir (Kubo, Mori ve Baba 2007; Kawasaki, Mori ve Baba

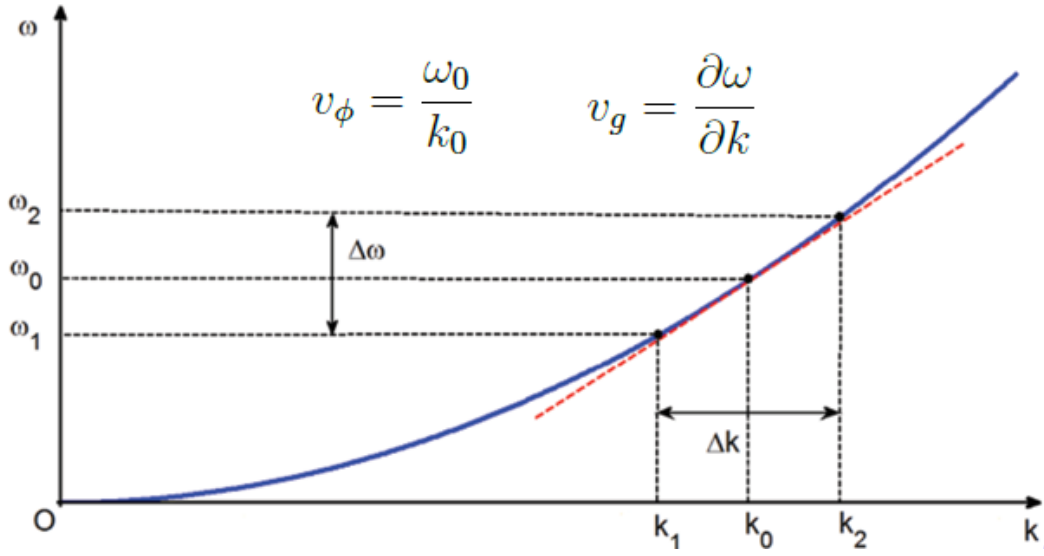
2007). Ayrıca, sistemde iletilen enerji ve bilginin sinyal analizi için bant genişliği (Bandwidth, BWH)

$$BWH = \frac{\Delta\omega}{\omega_0} \quad (2.6.6)$$

değeri önemli bir göstergedir. Bu değer kullanılarak aynı zamanda grup bant genişliği (Group Bandwidth Product, GBP) şu şekilde hesaplanabilir:

$$GBP = \langle n_g \rangle \cdot \Delta\omega \quad (2.6.7)$$

Burada,  $\langle n_g \rangle$  ortalama grup indisini,  $\Delta\omega$  ise bant genişliğini temsil eder (Giden, Turduev ve Kurt 2013; Hao ve diğ. 2010). Negatif grup hızı, elektromanyetik



Şekil 2.3:  $\omega - k$  dispersiyon ilişkisi ve  $v_g$  ile  $v_\phi$  bağıntılarını gösteren diyagram (Sakoda 2014)

dalganın grup hızı vektörünün faz hızı vektörüne ters yönde olması anlamına gelir. Bu durum,  $v_g$  ile aynı yönde dalganın enerji taşıma yönünün  $v_\phi$  ile aynı yönlü olan faz cephesinin hareket yönüne ters olduğunu ifade eder. Ancak negatif grup hızı, fiziksel olarak ışığın "ters yönde hareket ettiği" anlamına gelmez. Bunun yerine, bu durum genellikle dispersif bir ortamda meydana gelir ve dalganın çıkışta girişten önce ortaya çıkıyormuş gibi bir etki yaratmasıyla ilişkilidir. Bu tür davranış, neden-sonuç ilişkisini ihlal etmez; çünkü bilgi veya enerji iletimi her zaman sınırlıdır ve bu hız genellikle ortamın anormal dispersiyon özelliklerinden kaynaklanır. Bu etkiler, özellikle PhC tabanlı SL cihazlarında ve negatif kırılma indisi metamalzemelerinde ilginç uygulamalara kapı aralayabilir. Negatif frekans eğimlerine sahip bu bölgelerde ışığın davranışı, klasik optik kurallarından saparak yeni olasılıkların ve kontrol mekanizmalarının ortaya çıkmasını sağlar. Bu etkilerin incelenmesi için ek parametrelerin incelenmesi

önemlidir. Sinyal işleme uygulamaları için optimal dispersiyon özelliklerine sahip ve yüksek geçirgenlikli yapılar hayati önem taşır. Bu tür yapılar, tamamen optik anahtar elemanlarının tasarım ve üretimini mümkün kılar, bu da fiber ağ teknolojisinin büyümesini büyük ölçüde etkiler (Giden, Turdjev ve Kurt 2013). Tamamen optik sistemler, elektro-optik sistemlere kıyasla daha hızlı ve verimli performans sunma potansiyeline sahiptir, bu da optik anahtarlamaı önemli bir teknoloji haline getirir (Ríos ve diğ. 2015). Ayrıca, sistemin GVD'si, dalganın yapı içerisinde hareketinin önemli bir göstergesidir (Poon ve diğ. 2004; Baba 2008; Baba ve diğ. 2009; Yüksel ve diğ. 2024). Pozitif GVD, dalga paketinin ilerleme doğrultusunda yüksek frekanslı bileşenlerinin daha "hızlı" hareket ederek "öne" geçeceğini, yani normal dispersiyon dağılımı göstereceğini belirtir. Negatif GVD ise anormal dispersiyonun görülebileceğinin bir göstergesidir; bu durumda dalga paketi düşük frekanslı bileşenlerinin daha "hızlı" hareketi gözlemlenir, bu da paketin sıkışmasına yol açar. GVD'nin sıfıra yakın değerli "düz" olduğu bölgenin bulunması, dalga paketinin o frekans aralıklarında şeklinin bozulmadan ilerleyebileceğinin bir göstergesidir (Povinelli, Johnson ve Joannopoulos 2005; Giden, Turdjev ve Kurt 2013).

## 2.6.2 Üçüncü Derece Dispersiyon

Bu durumun incelenmesi için gerekli ve önemli bir diğ er parametre ise TOD değeridir:

$$\text{TOD} = \frac{\partial^3 k}{\partial \omega^3} \quad (2.6.8)$$

şeklinde tanımlanır. Bu değer, her ne kadar GVD dalga genişlemesinin ana sebebi olsa da özellikle yüksek BWH'lerinde veya kısa süreli darbe formundaki dalga paketlerinde dağılımın anlaşılabilmesi için TOD değerinin hesaplanması ve analizi önem kazanmaktadır. Üçüncü merteb e dispersiyon, darbe şeklinin bozulmasına yol açar ve bu, özellikle ultra kısa darbe uygulamalarında, yüksek çözünürlüklü spektroskopi ve yüksek hızlı optik iletişimde önemli bir sorundur (Poon ve diğ. 2004; Engelen ve diğ. 2006; Baba ve diğ. 2009).

TOD'ın işareti, ilerleyen dalganın davranışını öngörebilmek için önemli bir araçtır. Pozitif TOD, darbenin frekans bileşenlerinin yayılım hızlarının artan frekansla arttığı anlamına gelir. Bu durum, özellikle ultra kısa darbelerde, darbe şeklinin simetrik olmayan bir şekilde bozulmasına ve darbenin bir yönüne doğru uzamasına neden olur. Bu bozulma, optik iletişimde darbe genişlemesine ve zamanlama hatalarına yol açabilir. Negatif TOD ise, frekans bileşenlerinin yayılım hızlarının artan frekansla azaldığı durumu ifade eder. Bu da darbenin

ters yönde simetrik olmayan bir şekilde bozulmasına neden olur. TOD'nin sıfır olması, üçüncü merteye dispersiyonun darbe üzerinde herhangi bir etkisinin olmadığı anlamına gelir. Bu ideal bir durumdur ve ultra kısa darbelerin şeklinin korunmasını sağlar. Optik iletişim ve yüksek hassasiyetli spektroskopi uygulamalarında, darbenin şeklinin mümkün olduğunca orijinal halini koruması önemlidir. TOD'nin sıfır olması, bu tip uygulamalar için ideal koşulları sunar (Engelen ve diğ. 2006; Baba ve diğ. 2009).

Bu kapsamda, optik fiberlerde ve fotonik cihazlarda dalga paketinin yayılması ve şeklinin korunması, iletim hızı ve iletilen bilginin doğruluğu açısından kritik öneme sahiptir. GVD ve TOD gibi parametrelerin dikkatlice analizi, bu sistemlerin tasarımı ve performansının optimize edilmesinde kilit bir rol oynar. Optik iletişim, yüksek hızlı veri iletimi ve hassas algılama gibi birçok uygulama, bu fenomenlerin derinlemesine anlaşılmasını ve etkin bir şekilde yönetilmesini gerektirir. Bu nedenle, optik dalga kılavuzları ve fotonik yapılarla ilgili araştırmalar, gelecekteki optik teknolojilerin geliştirilmesinde önemli bir rol oynayacaktır.

## 2.7 Kalite Faktörü

Q-faktörü, PhC'lerdeki rezonans modlarının kayıplarını ve enerji depolama yeteneklerini değerlendiren önemli bir parametredir. Q-faktörü, rezonansın merkezi frekansının ( $\omega_0$ ) rezonans bant genişliğine ( $\Delta\omega$ ) oranı olarak tanımlanır:

$$Q = \frac{\omega_0}{\Delta\omega} \quad (2.7.1)$$

Q-faktörü, modun ne kadar dar bantlı olduğunu ve enerjinin ne kadar uzun süre depolanabileceğini ifade eder. Yüksek Q-faktörleri, enerjinin uzun süre rezonans modunda kalmasını sağlar ve bu da yavaş ışık (SL) uygulamaları ve doğrusal olmayan optik olaylar için avantajlıdır. PhCC'ler için bir diğer önemli parametre ise, oyuk yapısının ışığı madde ile güçlü bir şekilde etkileşime sokarak izole etmesi ve nanosaniye-pikosanisye mertebesindeki gecikmeleri oluşturmasıdır. Bu özellik, optik sinyallerin kontrollü olarak yavaşlatılması ve zamanlama uygulamalarında kullanılması açısından oldukça önemlidir. Optik sistemlerde, rezonans frekansını ifade eden  $f_0$ , oyukta saklanan enerjiyi ifade eden  $E$ , ve zamanla kaybolan enerjiyi ifade eden  $P = -\frac{dE}{dt}$  ile kalite faktörü şu şekilde hesaplanır:

$$Q = \frac{2\pi f_0 E}{P} \quad (2.7.2)$$

ve bu formül, rezonans modlarının etkinliğini ve enerji kayıplarını belirlerken, aynı zamanda sistemin performansını iyileştirme potansiyelini de gösterir. Yüksek

kalite faktörüne sahip bir sistem, ışığın uzun süre boyunca etkileşimde kalmasını sağlayarak, optik cihazların verimliliğini artırabilir ve düşük kayıplarla daha etkili işlevler gerçekleştirilebilir (Baba 2008; Bushell, Florescu ve Sweeney 2017).

### 2.7.1 Modal Alan ve Modal Hacim

Optik fiberlerde, fiberin destekleyebildiği dalga kılavuzu boyunca kılavuzlanmış modların sayısını belirleyen değere "modal hacim" (Mode Volume,  $V_{\text{mod}}$ ) denir. Modal hacim, normalize frekansı ifade eden  $\omega$  ile  $V_{\text{mod}} = 4\omega^2/\pi^2$  şeklinde verilir. Bu değer, dalga kılavuzu içeren PhCC dahil olmak üzere tüm PhC yapılarında geçerlidir (Bushell, Florescu ve Sweeney 2017). Bu ifadeyi rezonans modunun uzaysal alanının toplam hacmini ifade edecek şekilde tanımladığımızda ise

$$V_{\text{mod}} = \frac{\int \epsilon(\mathbf{r})|\mathbf{E}(\mathbf{r})|^2 d\mathbf{r}}{\max\{\epsilon(\mathbf{r})|\mathbf{E}(\mathbf{r})|^2\}} \quad (2.7.3)$$

ifadesi elde edilir. Burada  $\epsilon(\mathbf{r})$ , ortamın dielektrik sabiti ve  $\mathbf{E}(\mathbf{r})$  ise elektrik alanıdır. Modal hacim, rezonans modunun ne kadar geniş bir hacme yayıldığına veya ne kadar sıkı bir şekilde yerleşmiş olduğunu gösterir. Küçük modal hacim, modun küçük bir hacimde sıkıca yerleşmiş olduğunu gösterir ve bu, ışık-madde etkileşimlerinin artmasına yol açabilir. Küçük modal hacimli ve yüksek Q-faktörlü modlar, güçlü ışık-madde etkileşimlerinin ve doğrusal olmayan optik süreçlerin gerçekleşmesi için uygun koşullar sağlar.

Modal alan, bir PhC'de veya rezonatörde rezonans modunun iki boyutlu uzaysal dağılımını ifade eder. Modal alanın büyüklüğü, modun ne kadar yayılmış veya yerleşmiş olduğunu belirler.  $V_{\text{mod}}$  içerisinde kesit olarak veya tüm hesaplamaları iki boyuta indirgenmiş olarak yapılması ile elde edilir. Bu durumda hapsedilen modun veya ilerleyen dalganın iki boyutlu analizi sayesinde daha az işlem gücüyle gerekli hesaplamaların yapılmasını sağlar. Modal alanın uzaysal dağılımı, ışığın belirli bir fotonik yapıda nasıl yayıldığını ve yoğunlaştığını gösterir. Modal alanın yüksek bir alan yoğunluğuna sahip olduğu bölgeler, ışık-madde etkileşimlerini ve doğrusal olmayan optik olayları artırabilir. Modal alan, tipik olarak  $|\mathbf{E}(\mathbf{r})|^2$  formunda elektrik alan yoğunluğunun uzaysal profili olarak ifade edilir ve PhC'lerdeki modların yerleşmiş olduğu bölgelerin haritasını çıkarmak için kullanılır. yerleşmiş modlar, modal hacmi küçültebilir ve bu da yüksek Q-faktörlerinin elde edilmesini sağlayabilir. Yüksek Q-faktörü ve düşük modal hacim kombinasyonu, PhC'lerde yoğun enerji depolama ve yüksek hassasiyetli optik cihazların tasarımı için idealdir. Bu parametreler, PhC'lerde SL fenomeni ve diğer optik özelliklerin optimize edilmesi açısından büyük önem taşır.

## 2.7.2 Kalite Faktörünün Nümerik Analizi

Q-faktörü, bir rezonans modunun enerji kaybını ve rezonansın keskinliğini belirleyen kritik bir parametredir. Yüksek Q-faktörlü modlar, enerji kaybının düşük olduğunu ve rezonansın dar bir frekans aralığında uzun süre sürdüğünü gösterir. Bu özellik, PhC'ler gibi optik sistemlerde ışığın hapsedilmesi ve yavaşlatılması için son derece önemlidir. Q-faktörü, rezonans modlarının performansını değerlendirirken, özellikle doğrusal olmayan optik etkileşimlerin optimize edilmesi ve SL uygulamalarının geliştirilmesi açısından temel bir kriterdir.

Harmonik analiz (Harmonic Inversion, Harminv) yazılım aracı, zaman alanında (time-domain) bir sinyalden rezonans frekansları, Q faktörleri ve mod genlikleri gibi bilgileri çıkarmak için kullanılır. Harminv, özellikle elektromanyetik simülasyonlarda ve PhC'ler gibi sistemlerde yaygın olarak kullanılır. FDTD gibi yöntemlerle elde edilen zaman alanı verilerini analiz etmek için ideal bir araçtır (Mandelshtam ve Taylor 1997).

Harminv, belirli bir zaman aralığında sinyaldeki frekans bileşenlerini analiz eder. Bu analiz sırasında sinyaldeki her bir frekans bileşenini modelleyen bir dizi harmonik fonksiyon kullanılır. Harminv, bu fonksiyonları kullanarak sinyaldeki frekansları, genlikleri, fazları ve Q faktörlerini çıkarır. Harminv, genellikle bir FDTD simülasyonundan elde edilen zaman alanı verilerini kullanır. Bu veriler, sistemdeki bir noktadaki elektrik veya manyetik alan bileşenlerinin zamanla nasıl değiştiğini gösterir. Harminv, zaman uzayı simülasyonlarından elde edilen elektromanyetik verileri analiz ederek, rezonans modlarının frekanslarını, sönümlenme oranlarını ve Q-faktörünü belirlemek için kullanılan etkili bir analiz aracıdır. Temel çalışma prensibi, bir elektromanyetik alanın zamanla evrilen sinyalini inceleyerek, bu sinyaldeki modların frekanslarını ve sönümlenme özelliklerini Fourier dönüşümüne dayalı bir yöntemle çıkarmaktır. Fourier dönüşümü, sinyali bileşenlerine ayırarak, modların frekansları, fazları ve genlikleri hakkında detaylı bilgi sağlar. Harminv'nin bu özelliği, PhC ve diğer düzenli ya da düzensiz yapılandırılmış ortamlar gibi kompleks sistemlerdeki modların ayrıntılı bir şekilde analiz edilmesine olanak tanır. Özellikle yüksek çözünürlüklü mod analizlerinin gerektiği durumlarda, Harminv, sinyalin içinde gizli olan ince rezonansları bile ortaya çıkarabilir. Harminv, zaman alanı verisini, belirli bir zaman aralığında üstel olarak sönümlenen veya büyüyen harmonik fonksiyonlar şeklinde modellemeye çalışır. Bu fonksiyonlar aşağıdaki forma

sahiptir:

$$A(t) = \sum_j A_j e^{i(\omega_j t + \phi_j)} e^{-\gamma_j t} \quad (2.7.4)$$

ve burada  $A_j$  genlik,  $\omega_j$  frekans,  $\phi_j$  faz ve  $\gamma_j$  sönümlenme katsayısını temsil eder. Sönümlenme katsayısı, modun ne kadar hızlı söndüğünü gösterir ve bu bilgi, Q faktörünün hesaplanmasında kullanılır.

Harminv'nin öne çıkan bir diğer avantajı, simülasyon verilerinden doğrudan Q-faktörünü hesaplama yeteneğidir. Q-faktörü, bir rezonans modunun ne kadar dar veya geniş spektrumunda yer aldığını, dolayısıyla enerjinin ne kadar uzun süre hapsedilebileceğini gösteren kritik bir parametredir. Harminv, rezonans modunun merkez frekansını ( $\omega_0$ ) ve bu modun sönümlenme oranını ( $\gamma$ ) belirleyerek Q-faktörünü aşağıdaki formülle hesaplar:

$$Q = \frac{\omega_0}{2\gamma} \quad (2.7.5)$$

ve burada,  $\omega_0$  rezonans frekansını,  $\gamma$  ise sönümlenme oranını temsil eder. Q-faktörü, rezonansın keskinliği ve enerji kaybı hakkında doğrudan bilgi verir; bu nedenle, yüksek Q-faktörlü modlar, düşük enerji kaybına ve uzun ömürlü rezonanslara işaret eder. Harminv, zaman uzayı simülasyonları sırasında elde edilen verilerden bu parametreleri hızlı ve doğru bir şekilde çıkararak, rezonans modlarının derinlemesine analiz edilmesine olanak tanır (Mandelshtam ve Taylor 1997).

Harminv'nin sağladığı bu güçlü analiz yetenekleri, PhC'lerdeki yüksek Q-faktörlü modların tespit edilmesi ve bu modların optimizasyonu açısından büyük önem taşır. PhC'lerdeki modların yüksek Q-faktörlerine sahip olması, ışığın uzun süre hapsedilmesi, dolayısıyla SL uygulamaları ve doğrusal olmayan optik etkileşimlerin optimize edilmesi için gereklidir. Bu bağlamda, Harminv, fotonik cihazların tasarımında kritik bir araç olarak kullanılır ve bu cihazların performans değerlendirmelerinde önemli bir rol oynar. Harminv ile elde edilen analiz sonuçları, PhC dalga kılavuzları, rezonatörler ve sensörler gibi optik cihazların tasarım sürecinde yol gösterici olur ve bu cihazların işlevselliğini artırmak için gereken mod optimizasyonlarını gerçekleştirir. Sonuç olarak, Harminv, rezonans modlarının hassas bir şekilde belirlenmesi ve bu modların Q-faktörlerinin optimize edilmesi açısından vazgeçilmez bir araçtır.

## 2.8 İletim ve Yansıma S-parametrelerinin Tanımlanması

Bu bölümde, fotonik yapılar içerisindeki elektromanyetik dalga davranışını tanımlamak ve analiz etmek için kullanılan S-parametrelerinin (Saçılma Parametreleri) temel tanımlarına odaklanılacaktır. S-parametreleri, mikrodalga devrelerinden optik sistemlere kadar geniş bir yelpazede kullanılır ve genellikle bir sistemin iletim ve yansıma özelliklerini karakterize etmek için kullanılır. Fotonığa entegre edildiğinde, S-parametreleri ışığın enerjisi ile ilişkilendirilir ve bu enerji temelli yaklaşımla, optik yapıların davranışları daha hassas bir şekilde analiz edilir. İletim ve yansıma süreçlerini anlamak için en yaygın kullanılan iki parametre  $S_{11}$  ve  $S_{21}$  parametreleridir. Burada  $S_{11}$  parametresi, gelen ışığın ne kadarının geri yansıdığını ve  $S_{21}$  parametresi, iletilen ışığın ne kadarının çıkış kapısına ulaştığını tanımlar.

Fotonik sistemlerde S-parametrelerinin tanımı ve kullanımı, aşağıdaki gibi formüle edilir. Gelen ve yansıyan elektromanyetik dalga genlikleri arasındaki ilişkiyi gösteren  $S_{ij}$  parametresi,

$$S_{ij} = \frac{b_i}{a_j} \quad (2.8.1)$$

olarak ifade edilir. Burada  $a_j$  gelen dalganın genliğini,  $b_i$  ise yansıyan veya iletilen dalganın genliğini temsil eder. Bu formül, bir fotonik yapının giriş kapısından gelen ışığın enerjisinin, farklı kapılarda nasıl dağıldığını ve geri yansıdığını tanımlamaktadır. Bu parametrelerin doğru bir şekilde hesaplanması, yapıların optik performanslarını değerlendirmek için kritik öneme sahiptir (Li ve diğ. 2010).

FDTD ve CMT yöntemleri, fotonik yapılar içerisindeki elektromanyetik dalgaların genliklerini ve dolayısıyla S-parametrelerini doğru bir şekilde çıkarmak için kullanılır. FDTD yöntemi, zaman alanında tam dalga analizi yaparak, elektromanyetik dalgaların yapı içerisinde nasıl ilerlediğini, ne kadarının yansıyıp ne kadarının iletildiğini ayrıntılı bir şekilde belirler. Bu yöntem, yapının fiziksel ve geometrik özelliklerine dayalı olarak dalga genliklerinin doğrudan hesaplanmasını sağlar. Öte yandan, CMT yöntemi ise, modlar arası bağlanma süreçlerini ve rezonans davranışlarını analitik olarak değerlendirir, bu da özellikle hassas yapısal değişikliklerin etkilerini anlamak için kritiktir. Bu iki yöntemle elde edilen dalga genlikleri,  $S_{11}$  ve  $S_{21}$  gibi parametrelerin hassas bir şekilde hesaplanmasını mümkün kılar. S-parametrelerinin doğru bir şekilde belirlenmesi, fotonik yapıların iletim performans analizleri için elzemdir; çünkü



bu parametreler, yapının ışıkla nasıl etkileşime girdiğini ve ne kadar verimli bir şekilde enerji iletildiğini ortaya koyar (Mandelshtam ve Taylor 1997; Taflove, Hagness ve Picket-May 2005; Li ve diğ. 2010).

## BÖLÜM 3

# FOTONİK KRİSTALLERİN YAPISI VE TEMEL ÖZELLİKLERİ

### 3.1 Fotonik Kristaller ve Temel Özellikleri

Bu alt başlık altında PhC yapı taşları, tasarım prensipleri ve işleyiş mekanizmaları ele alınacaktır. PhC'ler, periyodik dielektrik yapılara sahip olup, ışığın belirli frekanslarda ve yönlerde yayılımını kontrol etmek amacıyla tasarlanmış yapılar olarak tanımlanabilir. Bu kristaller, elektromanyetik dalgaların yayılımını PBG aracılığıyla manipüle ederler ve bu aralık, PhC yapılarının temel fonksiyonlarını belirler. PhC'lerin tasarımında, kullanılan malzemelerin optik özellikleri, kristalin geometrik düzeni ve yapısal periyodu gibi faktörler büyük öneme sahiptir.

#### 3.1.1 Fotonik Kristallerde Birim Hücre, Brillouin Bölgesi ve Ters Uzay

PhC'ler periyodik yapılarından dolayı bant yapısı analizinde kristal geometrisinin özel noktaları ve bölgeleri yardımıyla daha önce 2. bölümde ayrıntılı biçimde anlatıldığı üzere analiz edilebilirler. Bu analizde birim hücre, Brillouin bölgesi ve ters uzay kavramları temel rol oynar. Birim hücre, kristalin uzayda tekrarlanan en küçük yapısını tanımlarken, ters uzay, bu periyodik yapının Fourier dönüşümündeki temsilini sunar. Brillouin bölgesi ise ters uzayda, kristalin simetri özelliklerini yansıtan ve bant yapısı hesaplamalarında kullanılan özel bir bölgedir.

Kare örgü için birim hücre, iki doğrusal bağımsız vektör ile tanımlanır ve bu vektörler, tüm kristal boyunca tekrarlanan yapı taşlarını oluşturur. Bu düzen, optik dalgaların belirli yönlerde farklı özellikler göstermesine neden olur ve bu

da fotonik kristalin anisotropik (yönelime bağlı) davranışlarını açıklamak için önemlidir. Ters uzayda, bu birim hücre vektörlerine karşılık gelen ters örgü vektörleri tanımlanır ve bu vektörler, periyodik yapının Fourier dönüşümü ile elde edilen uzayda yer alır.

Brillouin bölgesi, ters uzaydaki birim hücreye karşılık gelir ve tüm kristal yapının simetrisini yansıtır. Kare örgü için Brillouin bölgesi, genellikle bir kare veya düzgün altıgen şeklinde temsil edilir ve kristalin optik bant yapısı analizlerinde sıkça kullanılır. Brillouin bölgesinin sınırları, ters örgü vektörlerinin kesişim noktalarından oluşur ve bu bölgede yer alan özel noktalar, bant yapısı hesaplamalarında kritik rol oynar. Örneğin, kare örgü için  $\Gamma$ ,  $X$  ve  $M$  gibi simetri noktaları, optik dalgaların yayılımını anlamak için kullanılan temel noktalardır. Bu özel noktalar, PhC bant yapılarının nasıl oluştuğunu belirlemek için önemlidir. Ters uzayda hesaplanan bu noktalar arasındaki bant yapısı, optik özelliklerin tasarımında ve kontrolünde rehberlik eder. Örneğin, bir fotonik kristal içinde belirli bir frekans aralığında ışığın hapsedilmesi veya iletilmesi, ters uzaydaki bu analizlerle optimize edilebilir (Sakoda 2014; Joannopoulos ve diğ. 2008).

### 3.1.2 Dispersiyon Diyagramları

Dispersiyon diyagramları, PhC'lerdeki ışık yayılımını analiz etmek için kritik bir araçtır. Bu diyagramlar, dalga vektörü ( $\mathbf{k}$ ) ve frekans ( $\omega$ ) arasındaki ilişkiyi grafiksel olarak gösterir. Dispersiyon diyagramları, bir PhC'nin bant yapısını anlamamıza ve PBG'nin oluştuğu frekans aralıklarını belirlememize olanak tanır. Bu diyagramlar, ışığın hangi frekanslarda ve hangi yönlerde yayılabileceğini veya yayılmasının engellendiğini görmemizi sağlar.

Dispersiyon diyagramlarının oluşturulması, genellikle PWE veya FDTD gibi sayısal yöntemlerle gerçekleştirilir (Shi, Chen ve Prather 2004; Taflove, Hagness ve Picket-May 2005). Bu yöntemler, elektromanyetik dalgaların PhC içinde nasıl yayıldığını modelleyerek, dalga kılavuzu modlarının ve PBG'nin analiz edilmesini mümkün kılar.

### 3.1.3 Fotonik Bant Yapısı

PhC çalışmalarında en temel ve kritik adımlardan biri, fotonik bant yapısının (Photonic Band Structure, PBS) hesaplanmasıdır. Bu hesaplamalar, PBG belirlenmesi, normal modların analizi ve dalga kılavuzlarındaki kılavuz modların karakterizasyonu açısından büyük önem taşır. Fotonik bant yapısı, bir PhC

frekans ve dalga vektörü arasındaki ilişkiyi tanımlar ve bu sayede ışığın kristal içerisindeki yayılımı üzerinde kontrol sağlanabilir.

Bu bant yapısının elde edilmesi için kullanılan başlıca yöntemler Bölüm 2’de detaylandırılmıştır. Bu yöntemler arasında PWE, FDTD, sonlu elemanlar metodu (Finite Elements Method, FEM), N-derece spektral metot (Order-N Spectral Method, ONS), ve Korring, Kohn ve Rosker metodu (KKR) yer almaktadır (.Gan ve Li 2015; Sakoda 2014; Joannopoulos ve diğ. 2008).

Bu yöntemler, dalga vektörü boyunca frekansları veya frekanslar boyunca dalga vektörünü çözümlyerek bant diyagramlarının çıkarılmasını sağlar. Dispersiyon ilişkilerinin belirlenmesi, PhC’lerin ışık yayılımını nasıl kontrol ettiğini anlamak açısından hayati öneme sahiptir. Bu çalışmada, hesaplama süresi ve doğruluk açısından sağladıkları avantajlar nedeniyle PWE ve FDTD yöntemleri tercih edilmiştir. PWE, düzlem dalgaların periyodik bir ortamda yayılımını modellemek için kullanılırken, FDTD, zaman alanında elektromanyetik dalgaların dinamik davranışlarını simüle eder. Her iki yöntem de PhC’lerin bant yapılarının ayrıntılı bir şekilde analiz edilmesine olanak tanır.

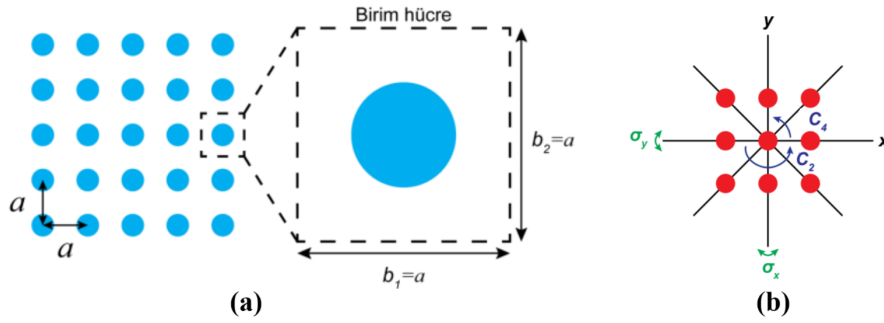
### 3.1.4 Fotonik Kristallerde Simetri

PhC’lerde simetri, yapının fiziksel ve optik özelliklerini belirleyen önemli bir faktördür. Simetri, kristalin hangi yönlerde ve nasıl ışığı manipüle edeceğini etkiler. PhC tasarımında, kullanılan simetri türü, PBG’lerinin genişliği, modların doğası ve ışığın yönlendirilmesi gibi özellikler üzerinde belirleyici bir rol oynar.

Simetri kavramı, kristal yapısının periyodikliğine dayalıdır ve bu periyodiklik, kristalin geometrik düzeninin uzaydaki farklı noktalarda kendini tekrar etmesi anlamına gelir. PhC’lerde simetri, genellikle yüksek simetri ve düşük simetri olarak iki kategoriye ayrılır. Bu iki simetri türü, PhC’nin performansını ve uygulama alanlarını doğrudan etkileyen farklı optik özelliklere sahiptir.

PhC yapılar tıpkı kristallerin atomların belirli örgü düzeni içerisinde dizili olmasına benzer biçimde tekrarlı örgü yapıları sergilemektedir. Bu örgünün indirgenebilir ve tekrar eden elemanları bulunduran yapıya birim hücre adı verilir. Bu durumda yapının sahip olduğu temel simetriler öteleme, dönme ve ayna simetrileridir(Kurt 2018). İki boyutlu kare örgülü PhC için birim hücre ve öteleme simetrileri  $b_1$  ve  $b_2$  olmak üzere Şekil 3.1(a)’da görülebileceği gibidir. Ayna simetrisi  $\rho_i$  ve döne simetri  $C_r$  ise Şekil 3.1(b)’de görülebileceği gibidir, burada  $i$  indisi iki boyut için  $x, y$  iken  $r$  indisi cismin döndürüldüğünde eski görünümünü alması için gereken döndürme açısının  $2\pi$  radyan’a oranı şeklindedir. Örneğin kare şeklindeki bir obje en az  $90^\circ$  döndürüldüğü zaman tekrar eski görünümüne sahip

olur. Bu bağlamda  $r = 4 = (360^\circ/90^\circ)$  olarak hesaplanır ve objenin  $C_4$  dönele simetrisine sahip olduğu belirlenir. Cisimler sahip oldukları geometrik şekillere bağlı olarak  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  ve  $C_4$  gibi farklı simetri grupları altında yer alırlar. PhC'ler de örgü türleri ve birim hücre geometrilerine bağlı olarak farklı dönele simetrisini sağlamaktadır. Örnek olarak aşağıdaki şekilde verilen iki-boyutlu ve kare örgülü PhC yapısı, merkezi etrafında  $90^\circ$  veya  $180^\circ$  döndürüldüğünde mevcut görünümünü korumaktadır. Bu nedenle verilen PhC yapısının  $C_4$  ve  $C_2$  dönele simetrisine sahip olduğu söylenebilir.



Şekil 3.1: Kare örgülü, örgü sabiti  $a$  olan PhC için (a) birim hücre ve  $b_1$  ve  $b_2$  öteleme simetrisi, (b) birim hücre içinde  $\rho_i$  ayna ve  $C_r$  dönele simetrisi.

### 3.1.5 Yüksek Simetriye Sahip Fotonik Kristaller

Yüksek simetriye sahip PhC'ler, genellikle kübik veya altıgen geometrilere bulunur ve bu yapılar, geniş PBG'leri oluşturmada etkilidir. Yüksek simetri, kristalin tüm yönlerde benzer optik özellikler göstermesini sağlar ve bu da ışığın belirli frekanslarda yayılmasını etkin bir şekilde engeller. Bu tür simetrisi, özellikle üç boyutlu PhC yapılarında yaygındır ve tam bant boşluğu (complete photonic band gap) elde etmek için tercih edilir.

Örneğin, Altıgen bir kafes yapısına sahip olan PhC'ler, simetrik özellikleri sayesinde geniş bir bant boşluğu oluşturabilirler ve bu PBG'leri, birçok optik uygulama için ideal bir ortam sağlar (Joannopoulos ve diğ. 2008). Yüksek simetriye sahip bu yapılar, optik iletişimden lazerlere kadar geniş bir uygulama yelpazesinde kullanılır.

### 3.1.6 Düşük Simetriye Sahip Fotonik Kristaller

Düşük simetriye sahip PhC'ler ise, kristal yapısının belirli yönlerde farklı optik özellikler göstermesine olanak tanır. Bu durum, ışığın yönlendirilmesinde ve

belirli modların seçilmesinde avantaj sağlar. Düşük simetri, genellikle PhC dalga kılavuzları ve SL uygulamaları için tercih edilir.

Düşük simetriye sahip PhC'ler, genellikle prizmatik veya ortorombik yapılarla karakterize edilir. Bu yapılar, yönsel PBG'leri ve anizotropik yayılım gibi özellikler sunar. Örneğin, prizmatik bir PhC yapısı, belirli bir yön boyunca ışığın yayılmasını kısıtlayabilirken, diğer yönlerde daha serbest yayılmaya izin verebilir (Sakoda 2014). Bu özellikler, optik devreler ve sensörler gibi hassas optik uygulamalarda kullanılır.

Düşük simetriye sahip PhC'ler, ayrıca ışık-madde etkileşimlerini artırarak doğrusal olmayan optik olayların güçlendirilmesine olanak tanır. Bu tür yapıların tasarımı ve analizi, özel olarak optimize edilmiş optik cihazların geliştirilmesinde kritik bir rol oynar (Vucic ve diğ. 2001; Gumus ve diğ. 2019).

### 3.1.7 Eşlenik Dalga Kavimleri

Eşlenik dalga kavimleri arasında bağlanma kuvveti (coupling strength) ve modlar, genellikle kavimleri arasındaki mesafeye ve yapının geometrisine bağlıdır (Vucic ve diğ. 2001; Gumus ve diğ. 2019). Kavimleri arasındaki bağlanma kuvveti  $\kappa$  şu şekilde tanımlanabilir:

$$\kappa = \frac{c \sin(kL)}{n L} \quad (3.1.1)$$

Burada,  $c$  ışık hızını,  $n$  ortamın kırılma indisini,  $k$  dalga sayısını ( $k = 2\pi/\lambda$ ) ve  $L$  kavimleri arasındaki mesafeyi ifade etmektedir.

CROW yapıları ışık yayılımını kontrol etmek için oldukça etkili bir yöntem sunar (Yariv ve diğ. 1999). Bu yapılar, PhC sistemlerinde SL uygulamaları için özellikle önemlidir. Eşlenik kavimleri (Coupled Cavities, CC), ışığın grup hızını ( $v_g$ ) bağlanma kuvveti ( $\kappa$ ) ve kavimleri arasındaki mesafe ( $L$ ) ile düzenleyerek, yayılımın hassas bir şekilde kontrol edilmesini sağlar.  $v_g$ ,  $\omega$  açısal frekans ve  $k$  dalga vektörüne bağlı olarak aşağıdaki formülle ifade edilir:

$$v_g = \frac{d\omega}{dk} = 2\kappa L \cos(kL) \quad (3.1.2)$$

Bu bağıntı, CROW yapılarında ışığın  $v_g$ 'ni belirlerken, kavimleri arasındaki mesafe ve bağlanma kuvvetinin doğrudan etkisini ortaya koyar. Aynı zamanda yapının önemli bir SL parametresi olan grup indisi ( $n_g$ )'de bu durumda

$$n_g = \frac{1}{v_g} = \left(\frac{d\omega}{dk}\right)^{-1} = (2\kappa L \cos(kL))^{-1} \quad (3.1.3)$$

şeklinde olmaktadır.

CC dalga kılavuzlarında faz hızı ( $v_\phi$ ), ışığın kaviteler arasında yayılımını tanımlar ve şu şekilde ifade edilir:

$$v_\phi = \frac{\omega}{k} = \frac{c}{n} \sqrt{1 - \left(\frac{\kappa}{\Delta\omega}\right)^2} \quad (3.1.4)$$

Bu denklem, özellikle bağlanmanın zayıf olduğu durumda geçerlidir ve  $\Delta\omega$ , frekans ayırımı gösterir.  $v_\phi$ , ışığın kavitelerde nasıl bir hızla ilerlediğini anlamak için kritik bir parametredir.

CC'lerdeki dispersiyon ilişkisi ise dalga vektörü  $k$  ile frekans  $\omega$  arasındaki bağıntıyı verir ve şu şekilde tanımlanır:

$$\omega(k) = \omega_0 + 2\kappa \cos(kL) \quad (3.1.5)$$

Bu formülde  $\omega_0$  serbest kavite frekansını,  $\kappa$  kaviteler arasındaki bağlanma kuvvetini ve  $L$  ise kaviteler arasındaki mesafeyi ifade eder. Dispersiyon ilişkisi, ışığın yayılımındaki faz ve  $v_g$ 'lerinin nasıl değiştiğini ve bunun sonuçlarını anlamak için kullanılır.

CC'lerden oluşan bu yapılar, SL uygulamalarında kritik öneme sahiptir ve bu yapıların derinlemesine analizi, daha verimli ve fonksiyonel fotonik cihazların tasarımını mümkün kılar. CC'lerin özellikleri, ışığın yayılımını kontrol etmek için sağladıkları esneklik nedeniyle PhC sistemlerinin gelişiminde önemli bir rol oynar (Gao ve diğ. 2020).

## 3.2 Fotonik Kristal Tasarımı ve Optimizasyonu

PhC'ler, ışığın kontrolü ve yönlendirilmesi için yüksek verimlilik sunan yapılar olarak, modern fotonik araştırmalarında ve uygulamalarında merkezi bir rol oynamaktadır. PhC'ler, ışığın belirli frekans aralıklarında yayılımını yasaklayan PBG'ler sayesinde, optik cihazların performansını ve işlevselliğini önemli ölçüde artırabilir. Bu bölümde, PhC'lerin geometrik tasarımı, malzeme seçimi ve optimizasyon süreçleri ele alınacaktır. Öncelikle, PhC geometrisinin nasıl belirlendiği ve optimize edildiği, ardından kullanılan malzemelerin özellikleri ve seçim kriterleri, son olarak da simülasyon ve optimizasyon yöntemleri detaylandırılacaktır. Bu süreçlerin her biri, PhC'lerin hedeflenen optik özellikleri sağlamak için nasıl tasarlandığını ve optimize edildiğini açıklayarak, fotonik cihazların geliştirilmesine yönelik önemli bilgiler sunacaktır (Sakoda 2014; Joannopoulos ve diğ. 2008; Liu 2005).

### 3.2.1 Fotonik Kristal Geometrisinin Tasarımı

PPhC'lerin etkinliği, büyük ölçüde geometrik yapılarının hassas bir şekilde tasarlanmasına bağlıdır. PhC geometrisinin tasarımı, PBG'nin oluşumunu ve ışığın yapı içerisindeki yayılımını doğrudan etkileyen kritik bir faktördür. Bu alt bölümde, PhC yapılarının temel geometrik parametreleri, bu parametrelerin optik özellikler üzerindeki etkileri ve optimum geometrik yapıların belirlenmesi için kullanılan tasarım metodolojileri ele alınacaktır.

PhC yapılarının geometrisi, periyodik yapıdaki dielektrik sabit kontrastı, doluluk oranı, birim hücre şekli ve düzeni gibi birçok parametreyi içerir. Bu parametreler, ışığın belirli dalga boylarında yayılımını engelleyen PBG'nin genişliği ve merkezi frekansını belirler. Örneğin, yüksek dielektrik sabit kontrastı ve optimize edilmiş doluluk oranı, daha geniş bir PBG'ye olanak sağlar. Bunun yanı sıra, birim hücrenin şekli ve düzeni, ışığın yayılım yönlülüğü ve mod özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Altıgen, kare ve üçgen gibi farklı örgü geometrileri, PBG genişliği ve yönlülük açısından farklı avantajlar sunar (Joannopoulos ve diğ. 2008; Sakoda 2014).

PhC geometrisinin doğru bir şekilde tasarlanması, sadece PBG'nin oluşumunu optimize etmekle kalmaz, aynı zamanda ışığın yönlendirilmesi, hapsedilmesi ve yavaşlatılması gibi istenen optik işlevlerin gerçekleştirilmesine de olanak tanır. Örneğin, düşük simetrik geometriler, belirli yönlerdeki ışık yayılımını sınırlandırarak yönlü PBG'leri oluşturabilir. Bununla birlikte, kavite veya dalga kılavuzu gibi kusurların yapılandırılması, ışığın belirli frekanslarda yerleştirilmesini ve yönlendirilmesini sağlar (Liu 2005).

Optimum geometrik yapıların belirlenmesi için genellikle ileri simülasyon teknikleri ve optimizasyon algoritmaları kullanılır. Bu süreçlerde, sonlu farklar zaman alanı (FDTD) yöntemi, düzlem dalga genişletme (PWE) yöntemi ve genetik algoritmalar gibi araçlar, PhC'nin optik özelliklerinin analizinde ve optimizasyonunda yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle, simülasyonlar aracılığıyla, PBG'nin genişliği, modal dağılımlar, grup hızı ve ışık hapsedilme etkinliği gibi önemli parametreler incelenir. Bu analizler, tasarım sürecinde hem daha verimli hem de uygulamaya uygun geometrilerin seçilmesine olanak tanır (Joannopoulos ve diğ. 2008).

PhC geometrisinin doğru bir şekilde tasarlanması, yüksek performanslı optik cihazların geliştirilmesi için temel bir adımdır. Örneğin, fotonik entegre devreler (PIC), optik filtreler, sensörler ve lazerler gibi uygulamalarda kullanılan PhC yapılarının etkinliği, bu tasarım süreçlerinin başarısına bağlıdır. Gelecekteki uygulamalarda, daha karmaşık geometrik yapıların ve hibrit malzemelerin



kullanılması, optik cihazların performansını artırabilir ve yeni işlevsellikler sunabilir. Bu nedenle, PhC geometrisinin optimize edilmesine yönelik çalışmalar, fotonik teknolojilerin ilerlemesinde kritik bir rol oynamaktadır (Sakoda 2014; Liu 2005; Joannopoulos ve diğ. 2008).

PhC tasarımında ayrıca üretim yöntemlerinin sınırlamaları da dikkate alınmalıdır. Nanofabrikasyon tekniklerinin hassasiyeti ve üretim toleransları, tasarım parametrelerinin uygulanabilirliğini etkileyebilir. Bu nedenle, tasarım süreçlerinde, hem teorik analiz hem de pratik üretim yöntemleri bir arada değerlendirilmelidir. Bu yaklaşım, yüksek hassasiyetli ve düşük maliyetli üretim süreçlerinin geliştirilmesine katkıda bulunabilir ve geniş çaplı uygulamalara olanak sağlayabilir (Joannopoulos ve diğ. 2008).

Sonuç olarak, PhC geometrisinin dikkatli bir şekilde tasarlanması, ışığın kontrol edilmesi ve yönlendirilmesinde kritik bir rol oynar. Bu tasarım süreçleri, optik cihazların performansını optimize etmekle kalmaz, aynı zamanda gelecekteki fotonik uygulamalara yeni kapılar açar. Bu kapsamda, PhC geometrisinin analizine ve optimizasyonuna yönelik çalışmalar, bilim ve teknoloji alanlarında önemli ilerlemeler sağlayacaktır.

### 3.2.2 Malzeme Özelliklerinin Belirlenmesi

PhC'lerin performansı, sadece geometrik tasarıma değil, aynı zamanda kullanılan malzemelerin optik özelliklerine de büyük ölçüde bağlıdır. Bu çalışmada, PhC yapılarının tasarımı için silika ve alumina malzemeleri kullanılmıştır. Silika, düşük kayıp, geniş bir optik bant aralığı ve düşük kırılma indisi (yaklaşık 1.45) ile öne çıkarken, sınırlı anizotropi hariç silikona benzer özellikler gösteren alumina ise yüksek kırılma indisi (yaklaşık 3.45) ve olgun üretim teknolojileri ile dikkat çekmektedir. Kırılma indisi, ışığın malzeme içindeki hızını belirleyen kritik bir parametredir ve bu nedenle PhC'lerin efektif kırılma indisi ve indeks kontrastı üzerinde doğrudan etkiye sahiptir (Sakoda 2014; Joannopoulos ve diğ. 2008).

Kırılma indisi, malzemenin izotropik veya anizotropik özelliklerine göre değişebilir. İzotropik malzemelerde kırılma indisi, malzemenin her yönde aynı olup, ışığın yönüne bağlı olarak değişmez. Ancak anizotropik malzemelerde kırılma indisi, ışığın yönüne ve polarizasyonuna bağlı olarak değişir. Silika ve alumina genellikle izotropik bir malzeme olarak davranırken, silikon anizotropik özellikler gösterebilir, bu da tasarım ve simülasyon süreçlerinde dikkate alınması gereken önemli bir faktördür (Sakoda 2014; Joannopoulos ve diğ. 2008).

PhC yapılarında kullanılan malzemelerin kırılma indisleri arasındaki fark, yani indeks kontrastı, ışığın belirli frekanslarda yayılımını kontrol eden

PBG'lerin oluşumu için kritiktir. Yüksek indeks kontrastı, daha geniş PBG'ler oluşturulmasına olanak tanır, bu da daha etkili ışık kontrolü ve yönlendirmesi sağlar. Bu bağlamda, silika ve silikonun kombinasyonu, yüksek indeks kontrastı yaratarak PhC yapıların efektif kırılma indisini optimize eder ve bu yapıların performansını artırır (Sakoda 2014; Joannopoulos ve diğ. 2008).

Özellikle fotonik kristal fiberler (PCF) bağlamında, silika ve silikon malzemeleri büyük avantajlar sunar. PCF'ler, ışığı kontrollü bir şekilde yönlendirmek ve yaymak için yüksek indeks kontrastına sahip malzemelerden yapılmış periyodik yapılar kullanır. Silika bazlı PCF'ler, düşük kayıpları ve geniş bant genişlikleri nedeniyle yaygın olarak kullanılırken, silikon bazlı PCF'ler, yüksek kırılma indisi ve geniş PBG'leri sayesinde gelişmiş ışık yönetimi sağlar (Sakoda 2014; Joannopoulos ve diğ. 2008).

### 3.2.3 Simülasyon ve Optimizasyon Süreçleri

PhC yapılarının performansını değerlendirmek ve optimize etmek için çeşitli simülasyon ve analiz araçları kullanılır. Bu süreçte, PWE (Plane Wave Expansion) yöntemi, sonlu farklara dayalı FDTD gibi yöntemler önemli rol oynar (Vasseur 2019; Taflove, Hagness ve Picket-May 2005). PWE yöntemi, PhC'lerin bant yapısını analiz etmek için kullanılırken, FDTD daha karmaşık yapıların ve cihazların modellenmesine olanak tanır (Vasseur 2019; Taflove, Hagness ve Picket-May 2005). Bu yöntemleri kullanmak için etkin ve gelişmiş çeşitli yazılımlar bulunmaktadır. Bu yazılımlardan FDTD ve harmonik inveriyon yöntemlerini içeren MEEP, zaman alanında elektromanyetik dalga yayılımını simüle eden açık kaynaklı bir yazılım olup, geniş bir kullanıcı topluluğu tarafından desteklenir ve esnek bir platform sunar (MEEP 2024). Lumerical ise, başta FDTD olmak üzere modüler olarak çeşitli sonlu farklar yöntemlerini içeriğinde barındıran, yüksek doğruluk ve kullanıcı dostu arayüzü ile bilinen ticari bir simülasyon yazılımıdır ve fotonik cihazların optimizasyonunda geniş çapta kullanılır (Inc. 2024). Bu araçlar, fotonik kristal yapıların tasarımı ve optimizasyonunda kritik öneme sahiptir (Alimenti ve diğ. 2000; Shi, Chen ve Prather 2004; Xiao ve diğ. 2007; Men ve diğ. 2014; Zhao ve diğ. 2015). Elde edilen dataların kullanılmasında ise MATLAB ve python kullanılmıştır, MATLAB özellikle görselleştirme, python ise büyük dataların işlenmesinde sundukları avantajlar nedeniyle tercih edilmiştir (MATLAB 2024; PYTHON 2024).

Bu çalışmamızda tüm bant hesaplamaları için MPB programını kullandık, tüm hesaplamalarımızı normalize frekanslar için yaptık ve elde ettiğimiz bant verilerini işleyerek  $\omega - k$  ilişkilerine bağlantısını Bölüm 2'de anlattığımız,  $n_g, v_g$ ,

GVD ve TOD değerlerini hesapladık. Buradan elde ettiğimiz verilere dayanarak tasarladığımız FDTD simülasyonları için Lumerical programını kullandık, bu simülasyonlarda yapının bileşenleri sınırları kesmediği için standart anizotropik 4 katmanlı PML ile simülasyon sınırlarımızı belirledik ve simülasyonlarda dalga kılavuzu etrafında ince ızgara (mesh) kullanarak bölgesel çözünürlüğü artırdık. Aynı zamanda gene özellikli PML ile iletim yansıma simülasyonlarımızı hem MEEP hem Lumerical programlarında çapraz eşleştirme amaçlı olarak çoklu olarak hesapladık. CMT hesaplarımız için gerek olan Q-faktör hesaplamaları için ise MEEP ve harminv paketini kullandık, çok nokta gauss atma ile uyardığımız rezonatörün 5 tekrar sonucunda elde edilen ortalama q-faktörlerini alarak hesaplamalarımızı gerçekleştirdik ve sonuç bölümünde görüleceği üzere elde ettiğimiz iletim yansımaları FDTD sonuçlarıyla karşılaştırdık.

### 3.3 Fotonik Kristallerde Yavaş Işık Uygulamaları

PhC'lerde SL uygulamaları, optik sinyallerin hızını yavaşlatarak ışık-madde etkileşim süresini artırmaya yönelik çeşitli teknikleri içerir. Bu uygulamalar, optik gecikme hatları, hassas sensörler, optik bellek ve sinyal işleme gibi pratik fotonik cihazlarda önemli avantajlar sunar.

#### 3.3.1 Fotonik Kristal Kaviterinde Yavaş Işık Uygulamaları

PhCC'leri, ışığın belirli bir frekans aralığında yakalanmasını ve bu bölgede yoğunlaşmasını sağlayan yapılar olarak tanımlanır. Kaviterde oluşturulan durgun modlar, ışığın belirli bir hacim içinde hapsedilmesine ve bu sayede enerji yoğunluğunun artırılmasına olanak tanır. SL uygulamaları açısından, bu hapsedilme ve enerji yoğunlaşması, ışığın yayılma hızının önemli ölçüde yavaşlatılmasını sağlar (Povinelli, Johnson ve Joannopoulos 2005; Giden, Turduev ve Kurt 2013).

PhC kaviterleri, genellikle optik sinyallerin yavaşlatılması ve saklanması amacıyla kullanılır. Işığın  $v_g$ 'nin düşürülmesi, kavite içindeki rezonans koşulları altında gerçeleşir ve bu durum, kavite Q-faktörü ile doğrudan ilişkilidir. Yüksek Q-faktörlü kaviterlerde, ışık daha uzun süre kaviter içinde kalır ve bu da daha düşük  $v_g$  anlamına gelir (Schulz ve diğ. 2010; He ve diğ. 2018; Moghaddam ve Fleury 2019). Bu özellik, optik gecikme hatları ve yüksek doğruluklu sensörler gibi uygulamalarda kritik bir rol oynar (Li ve diğ. 2008; Moghaddam, Attari ve Mirsalehi 2013; Hao ve diğ. 2010; Kubo, Mori ve Baba 2007; Bagci ve Akaoglu 2015; Danaie, Geravand ve Mohammadi 2018).

Kavitelerdeki SL etkisi, ayrıca doğrusal olmayan optik olayların (örneğin, frekans yükseltme veya ışık yoğunluğunun artırılması) etkinliğini artırmak için de kullanılabilir. Bu tür uygulamalar, optik sinyal işleme cihazlarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Notomi ve diğ. 2001).

### 3.3.2 Eşlenik Kavitelere Yavaş Işık Uygulamaları

CC, birden fazla PhCC'nin birbirine yakın yerleştirilmesiyle oluşturulan yapılardır ve SL uygulamalarında daha karmaşık ve gelişmiş işlevler sunar. Bu yapılarda, ışık farklı kaviteler arasında ileri-geri yansıtılarak yayılır ve bu süreç, ışığın yayılma hızını daha da yavaşlatabilir. CC'lerdeki bu mekanizma,  $v_g$ 'nin önemli ölçüde azaltır.

$$v_g = \frac{d\omega}{dk} \quad (3.3.1)$$

Burada  $\omega$  açısal frekans ve  $k$  dalga vektörüdür. CC'lerde, optik modların birbirine yakınlaştırılması ile optik bağlanma kuvveti (optical coupling strength,  $\kappa$ ) artar ve bu da  $v_g$ 'ni daha da yavaşlatır. Bağlanma kuvveti, iki kaviteli sistemde genellikle aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$\kappa = \frac{1}{2} \sqrt{(\omega_1 - \omega_2)^2 + 4g^2} \quad (3.3.2)$$

Burada  $\omega_1$  ve  $\omega_2$  kaviterlerin rezonans frekansları,  $g$  ise kaviteler arasındaki bağlanma kuvvetini temsil eder. CC'lerde, ışığın  $v_g$ 'nin daha da düşürülmesi ve ışık yayılımının daha hassas bir şekilde kontrol edilmesi mümkündür. Bu özellikler, optik bellekler ve yüksek çözünürlüklü optik ölçüm cihazları gibi alanlarda kullanılabilir.

Ayrıca, CC'lerdeki bağlanma kuvveti, dispersiyon yönetimi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. CC'ler, dispersiyon ilişkilerini modifiye ederek, ışığın belirli frekans aralıklarında yavaşlamasını optimize edebilir. Dispersiyon ilişkisi şu şekilde verilir:

$$D = \frac{d^2\beta}{d\omega^2} \quad (3.3.3)$$

Burada  $D$  dispersiyon katsayısı ve  $\beta$  ise faz kaymasıdır. CC'lerde bu ilişki, belirli bir frekans aralığında  $v_g$ 'nin optimize edilmesini sağlar ve bu da geniş bantlı SL uygulamaları ve optik zaman uzatma sistemlerinde büyük avantajlar sunar (Kubo, Mori ve Baba 2007; Baba 2008; Shu ve Mao 2015; Notomi ve diğ. 2001; Üstün ve Kurt 2010).

CC'lerin bu tür dispersiyon mühendisliği özellikleri, optik iletişim sistemlerinde sinyal işleme, veri depolama ve sinyal işleme gibi ileri düzey uygulamalarda kullanılabilir. Bu da fotonik cihazların performansını

artırmada kritik bir rol oynar. Özellikle, optik zaman uzatması (temporal stretching) ve sıkıştırma gibi uygulamalarda CC'lerin dispersiyon mühendisliği ile optimize edilmiş  $v_g$ , optik sinyallerin zaman profillerinin hassas bir şekilde kontrol edilmesini sağlar.

Negatif  $v_g$  ve  $n_g$  gibi fenomenler, ışığın davranışı üzerinde oldukça karmaşık ve önemli etkiler yaratmaktadır. Negatif  $v_g$ , elektromanyetik dalganın yayılım yönünün tersine hareket ettiğini gösterirken, negatif  $n_g$ , dalga paketinin  $v_\phi$  ile  $v_g$  arasındaki ters orantıyı işaret eder. Başka bir deyişle, negatif  $v_g$ , enerjinin kaynağa doğru yayılması gibi karşıt bir yönde ilerleme anlamına gelirken, negatif  $n_g$ , dalga paketinin faz cephesinin ileri doğru hareket ettiği ancak dalganın kendisinin geriye doğru yayıldığı bir durumu ifade eder (Bushell, Florescu ve Sweeney 2017).

Bu fenomenler, belirli frekans aralıklarında ışığın hızının yavaşlatılmasına, durdurulmasına ve hatta tersine çevrilmesine yol açabilir. Bu durum, fotonik yapıların dispersiyon özellikleriyle doğrudan ilişkilidir. Negatif  $v_g$  ve  $n_g$ , PhC'ler, metamalzemeler ve diğer yapay yapılar gibi yüksek dispersif ortamlarda gözlemlenir. Dispersiyonun bu denli güçlü olduğu ortamlarda, küçük frekans değişimlerine karşı büyük  $v_g$  değişiklikleri meydana gelir. Bu da keskin frekans seçiciliğine, yani belirli frekanslarda ışığın yayılımını kontrol edebilme kabiliyetine olanak tanır. Bu özellik, özellikle hassas fotonik cihazlarda ve optik filtreleme sistemlerinde avantaj sağlar.

Negatif  $v_g$ 'nin ve indisin SL uygulamalarındaki rolü de oldukça kritiktir. SL etkisi, dalga kılavuzlarında veya fotonik yapılarda ışığın hızının ciddi oranda yavaşlaması anlamına gelir. SL fenomeni, ışığın yapıda daha uzun süre kalmasına ve böylece ışık-madde etkileşimlerinin güçlenmesine olanak tanır. Bu etkileşimlerin artırılması, ışık sinyallerinin geciktirilmesi, depolanması ve işlenmesi için avantaj sağlar. Özellikle negatif  $v_g$  ve  $n_g$  sahip yapılar, bu etkileşimlerin daha etkin hale gelmesine neden olur ve optik gecikme hatları, veri işleme ara bellekleri, yüksek hassasiyetli sensörler gibi uygulamalarda kritik rol oynar (Hao ve diğ. 2010).

Optik gecikme hatları, ışığın belirli bir süre boyunca geciktirilmesi gereken sistemlerde kullanılır ve negatif  $v_g$  ile  $n_g$  sayesinde bu gecikme süreleri artırılabilir. Bu özellik, optik bilgi işlem ve telekomünikasyon sistemlerinde verinin işleme hızını optimize etme potansiyeline sahiptir. SL, optik sinyallerin depolanması ve yönlendirilmesi için de ideal bir araçtır. Ayrıca, bu fenomen, optik sinyal işleme süreçlerinde verimliliği artırarak, frekans seçici filtreler, sensörler ve benzeri cihazların performansını iyileştirmede önemli bir faktör olarak karşımıza çıkar

(Hayran ve diğ. 2016; He ve diğ. 2021).

Bu bağlamda, negatif  $v_g$ 'ları ve  $n_g$ 'leri kullanılarak tasarlanan fotonik yapılar, sadece SL fenomeni için değil, aynı zamanda PIC'ler, yüksek doğruluklu zamanlama sistemleri ve kuantum bilgi işlemi gibi ileri teknolojilerde de devrim niteliğinde iyileştirmeler sağlayabilir. Negatif dispersiyon ve buna bağlı olarak ortaya çıkan optik özellikler, bu teknolojilerin hassasiyetini ve işlevselliğini önemli ölçüde artırabilir. Örneğin, kuantum sinyal işleme sistemlerinde, optik sinyallerin hassas bir şekilde kontrol edilmesi ve geciktirilmesi kritik öneme sahiptir ve negatif  $v_g$  ile  $n_g$ 'leri bu kontrolü optimize edebilir (Hao ve diğ. 2010).

Özellikle, yüksek kaliteli SL etkileri, optik gecikme hatları ve optik ara bellekleri için ideal çözümler sunarak, sinyal işleme, veri depolama ve filtreleme sistemleri için büyük bir potansiyel ortaya koymaktadır. Ayrıca, bu yapıların sunduğu keskin frekans seçiciliği, farklı frekanslardaki sinyallerin aynı anda işlenmesi gereken uygulamalarda benzersiz bir avantaj sağlar (He ve diğ. 2021).

Sonuç olarak, negatif  $v_g$  ve  $n_g$ 'nin fotonik yapılar üzerindeki etkileri, ışık-madde etkileşimlerini güçlendirerek daha sofistike ve yüksek performanslı optik cihazların geliştirilmesine katkıda bulunur. Bu tür yapıların, özellikle SL fenomenini kullanarak, fotonik entegre devrelerden kuantum bilgi işlem sistemlerine kadar geniş bir yelpazede uygulanma potansiyeli bulunmaktadır.

### 3.4 Gökkuşuğu Tuzaklaması Fenomeni

RT fenomeni, elektromanyetik dalgaların farklı dalga boylarına sahip bileşenlerinin, uzayda belirli konumlarda geçici olarak tuzaklanmasıyla ortaya çıkan bir olgudur (Yang, Zhu ve Li 2015). Bu etki, temel olarak uzaysal dispersiyonun bir sonucudur (Gao, Zhou ve Zhang 2012). RT, PhC yapılarında dereceli indeks, konik PC yapıları, metalik ızgaralar, frekans ayarlı ve topolojik olarak modifiye edilmiş PC'ler ile metamalzemeler gibi çeşitli yöntemlerle gerçekleştirilebilir (Tsakmakidis, Boardman ve Hess 2007; Gan, Ding ve Bartoli 2009; Liu ve diğ. 2017; Liu ve diğ. 2018; Arreola-Lucas ve diğ. 2019; Neşeli ve diğ. 2020; Ghaderian ve Habibzadeh-Sharif 2021; Oguz ve diğ. 2024). Bu fenomen, bir kuplör, nokta kusuru veya konik mekanizmalar yardımıyla fotonik cihaz yapılarında uygulanabilir (Hayran ve diğ. 2016; Neşeli ve diğ. 2020). RT fenomeni, optik anahtarlama, çoklama ve ayırma işlemleri gibi pek çok optik iletişim ve bilgi cihazında kullanılabilir (He ve diğ. 2021). Bu yapıların fotonik cihazlardaki uyarlanabilirliği, optik sistemlerin verimliliği ve performansında önemli iyileştirmeler sunarak, geniş bir uygulama alanı oluşturur.

### 3.5 Kare Örgülü 2B Fotonik Kristal Örneği

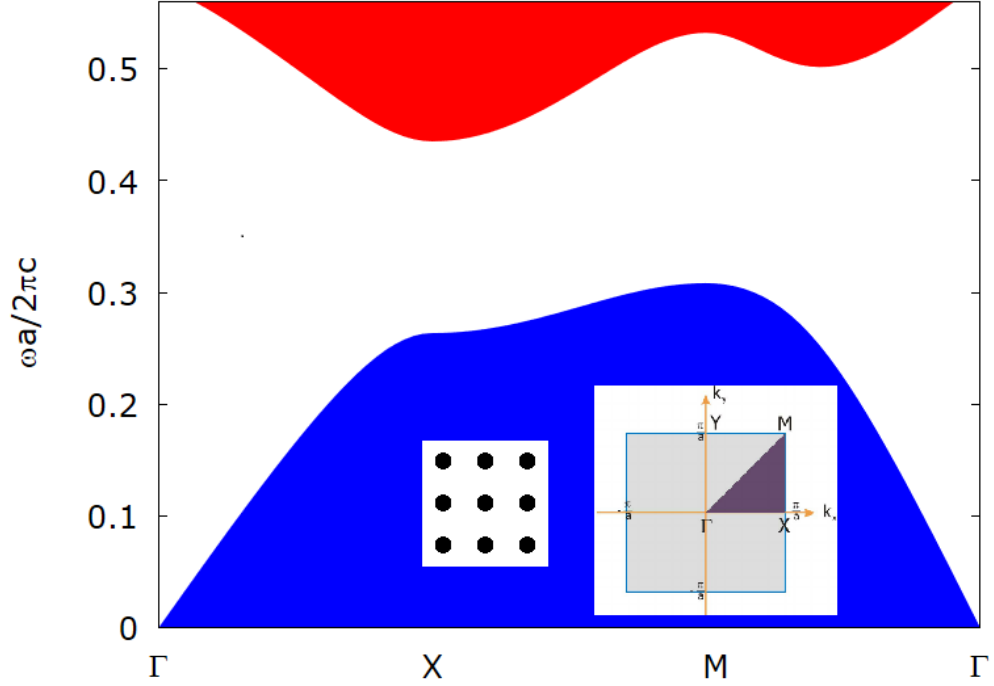
Bu bölümde, kare örgülü 2 boyutlu (2B) PhC yapısının temel özelliklerini ve bu yapının SL uygulamaları açısından potansiyelini ele alacağız. İnceleyeceğimiz yapı, dielektrik sabiti  $\epsilon = 9,8$  olan bir malzeme kullanılarak modellenmiştir. Bu spesifik dielektrik sabiti seçimi, PhC içerisindeki elektromanyetik dalgaların belirli dalga boylarında güçlü yansıtma ve yönlendirme kapasitelerini artırmak amacıyla yapılmıştır. Yapı, örgü sabiti  $a$  olan düzenli bir kare ızgara şeklinde yerleştirilmiş dielektrik çubuklardan oluşur. Kare örgünün simetrisi, PhC'in optik özelliklerini doğrudan etkileyerek, farklı yayılım yönlerinde belirgin optik farklılıkların ortaya çıkmasına yol açar.

Kare örgülü 2B PhC yapısının TM bant diyagramı, bu yapının PBG'sini ve mod dağılımını görselleştiren kritik bir analiz aracıdır. Şekil 3.2'te gösterilen bant diyagramı, yapının birinci bant aralığını ve Brillouin bölgesi iç yapısını detaylandırmaktadır. Bu bant diyagramı, TM modundaki ışığın belirli frekans aralıklarında (PBG) yayılmasının engellendiğini ve belirli dalga boylarının kristal içinde hapsedildiğini göstermektedir. Dielektrik çubuk yarıçapı  $r = 0,2a$  olan yüksek dielektrik sabitli ( $\epsilon = 9,8$ ) çubuklardan örgü sabiti  $a$  olacak şekilde oluşturulan bu PhC yapısı, özellikle SL uygulamaları için potansiyel bir yapı sunmaktadır. Bant diyagramından elde edilen veriler, ışığın belirli frekanslarda nasıl hapsedildiğini ve yönlendirildiğini detaylandırarak, bu yapının optik performansını ve uygulama potansiyelini anlamamıza olanak tanır.

Yapılan kapsamlı analizler, kare örgülü 2B PhC yapısının  $\epsilon = 9,8$  dielektrik sabiti kullanılarak oluşturulan yapısının, 0.29 ile 0.44 normalize frekans aralığında geniş bir PBG'ye sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Bu geniş bant aralığı, PhC'in belirli frekanslarda ışığı etkin bir şekilde hapsedmesini ve yönlendirmesini sağlar. PBG içerisinde ışığın yönlendirilmesini sağlamak amacıyla, yapı üzerinde bir kusur oluşturulmuştur. W1 dalga kılavuzu olarak adlandırılan bu yapı, kristal içerisindeki bir sıranın tamamen kaldırılmasıyla oluşturulmuş ve kusur yapısının olduğu bölgede ışığın belirli bir frekansta yönlendirilmesini sağlamıştır. Oluşturulan bu dalga kılavuzu, özellikle SL uygulamaları ve yüksek Q-faktörlü rezonans modlarının optimize edilmesi açısından oldukça etkili bir çözüm sunar. Bu tür bir kusur yapısının varlığı, PhC yapısının optik performansını artırmakta ve cihazların fonksiyonelliğini geliştirmektedir.

Kare örgülü 2B PhC yapısında oluşturulan kusurlu dalga kılavuzunun bant diyagramı, Şekil 3.3'te görüldüğü gibi,  $\Gamma$  ve  $X$  yönleri arasında  $\omega$  normalize frekansı 0.32 ile 0.43 arasında yer alan bir kusur modunun ortaya çıktığını





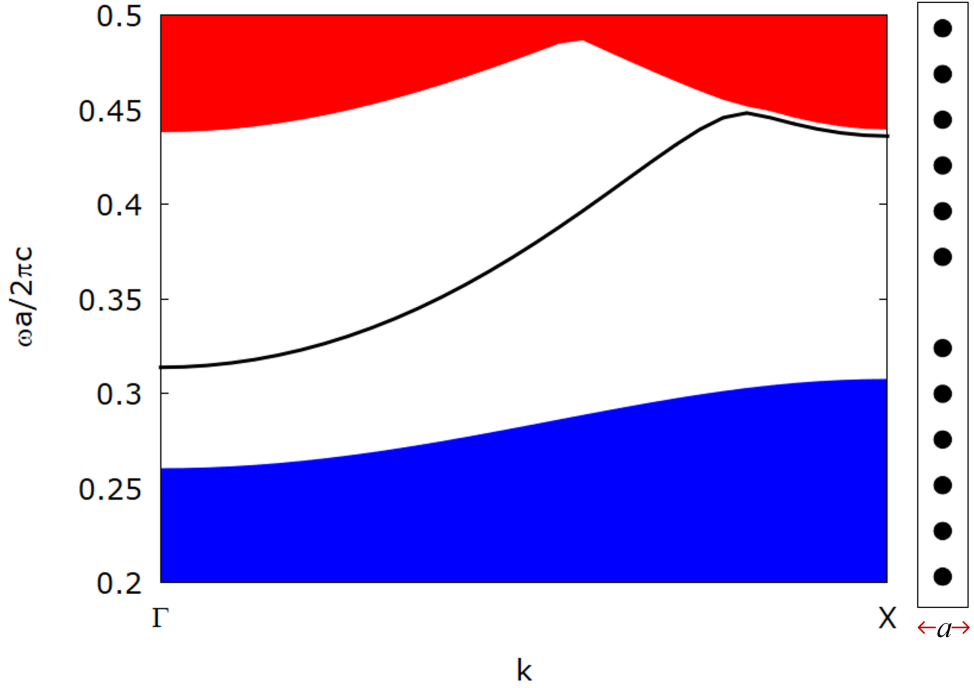
Şekil 3.2:  $r = 0.2a$  yarıçaplı ve  $\epsilon = 9,8$  değerli çubuklardan oluşturulan kare örgülü 2 boyutlu PhC'in TM birinci PBG'sini gösteren bant diyagramı. Şekil içindeki detayda Brillouin bölgesinin iç yapısı gösterilmiştir.

göstermektedir. Bu kusur modu, PBG içinde yer almakta olup, bu frekans aralığında ışığın yönlendirilmiş bir şekilde kılavuzlanmasını sağlamaktadır. W1 dalga kılavuzu olarak bilinen bu kusurlu yapı, PhC yapısı içinde belirli bir frekansta ışık enerjisinin yoğun bir şekilde hapsedilmesine ve belirli bir yön boyunca verimli bir şekilde iletilmesine olanak tanımaktadır.

Bu tür bir yapısal modifikasyon, özellikle SL uygulamaları için kritik öneme sahiptir. Kusur modlarının varlığı, ışığın  $v_g$ 'nin önemli ölçüde azalmasını sağlamakta ve bu sayede optik sinyal işleme ve iletişim sistemlerinde daha yüksek doğruluk ve hassasiyet elde edilmektedir.  $v_g$ 'nin azaltılması, fotonik cihazların performansını artırarak, daha düşük enerji tüketimi ve daha hassas kontrol imkanı sunar. Böylece, bu tür PhC yapılarına dayalı gelişmiş optik cihazlar, hem bilgi işlem hem de iletişim alanlarında yenilikçi çözümler sunmak için kullanılabilir. Bu yapıların tasarımı ve optimizasyonu, ileri düzey fotonik uygulamaların gerçekleştirilmesinde önemli bir rol oynar.

CCW yapısı, birbiriyle etkileşime giren iki veya daha fazla kaviteden oluşur ve bu kavite rezonatörleri arasındaki karşılıklı etkileşim, yeni fotonik bant yapıları ve modların ortaya çıkmasına yol açar. Bu tür bir yapı, PhC içinde ışığın belirli frekanslarda daha etkin bir şekilde hapsedilmesini ve yönlendirilmesini sağlayarak, optik performansı önemli ölçüde artırır. Özellikle, CCW yapısı, ışığın





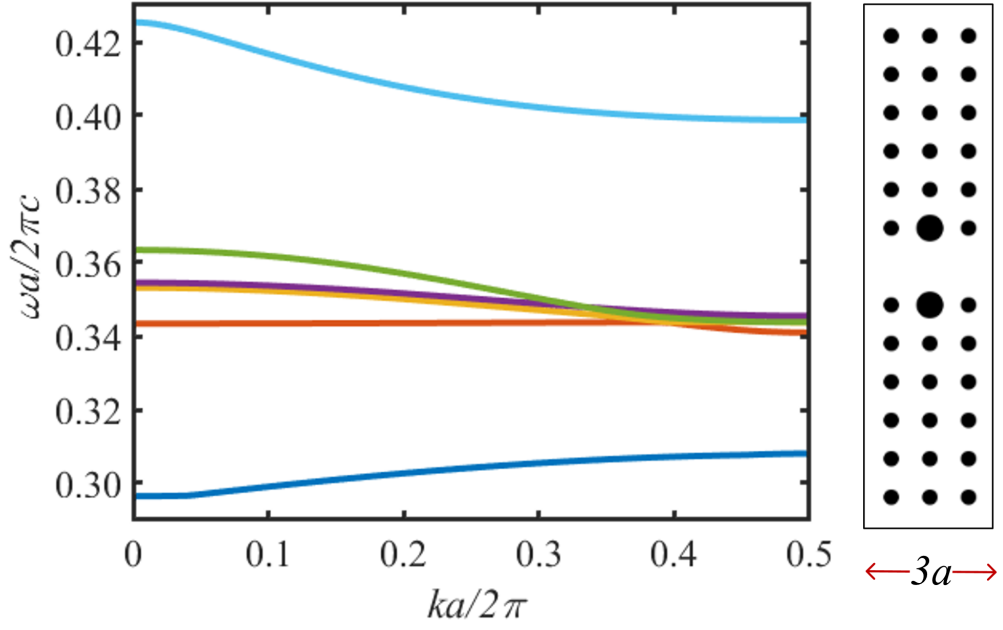
Şekil 3.3:  $r = 0.2a$  yarıçaplı ve  $\epsilon = 9,8$  değerli çubuklardan oluşturulan kare örgülü 2 boyutlu PhC içinde oluşturulan kusurlu dalga kılavuzunun birinci PBG'nin TM kılavuz modunu gösteren süper-hücre bant diyagramı. Şekil içindeki detayda PhC'in süper-hücesi gösterilmektedir.

yavaşlatılması ve  $v_g$ 'nin daha da düşürülmesi açısından önemli avantajlar sunar.

Kare örgülü 2B PhC içinde oluşturulan CCW yapısına ait süper-hücre bant diyagramı, yapının PBG'sini ve modlarını detaylı bir şekilde göstermektedir. Şekil 3.4,  $3a$  genişliğindeki ve  $r_c = 0,35a$  yarıçaplı kavitelerden oluşan süper-hücre yapısının şematik gösterimi ile birlikte bant diyagramını sunmaktadır. Bu diyagram, CCW yapısı içinde yeni fotonik bantların oluştuğunu ve bu bantların optik sinyalin yönlendirilmesi ve hapsedilmesi üzerinde kritik bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir.

Bu CCW yapısı, yüksek bir Q-faktörü sunarak, ışığın daha uzun süre boyunca rezonatör içinde hapsedilmesini sağlar. Bu özellik, optik gecikme hatları, filtreler ve sensörler gibi ileri düzey fotonik cihazların performansını iyileştirmek için kritik bir avantaj sunar. CCW yapısının sağladığı SL etkisi, optik sinyalin  $v_g$ 'ni düşürerek rezonatör içinde daha uzun süre kalmasını sağlar ve bu da daha yüksek hassasiyet ve verimlilik anlamına gelir. Şekil 3.5,  $r = 0,2a$ ,  $r_c = 0,35$  ve periyodiklik  $3a$  olarak tasarlanmış, kare örgülü  $a$  yapı sabitli temel kavite yapının şematik gösterimini sunmaktadır.

PhC yapıları, elektromanyetik dalgaların yayılımını kontrol etme potansiyelleri

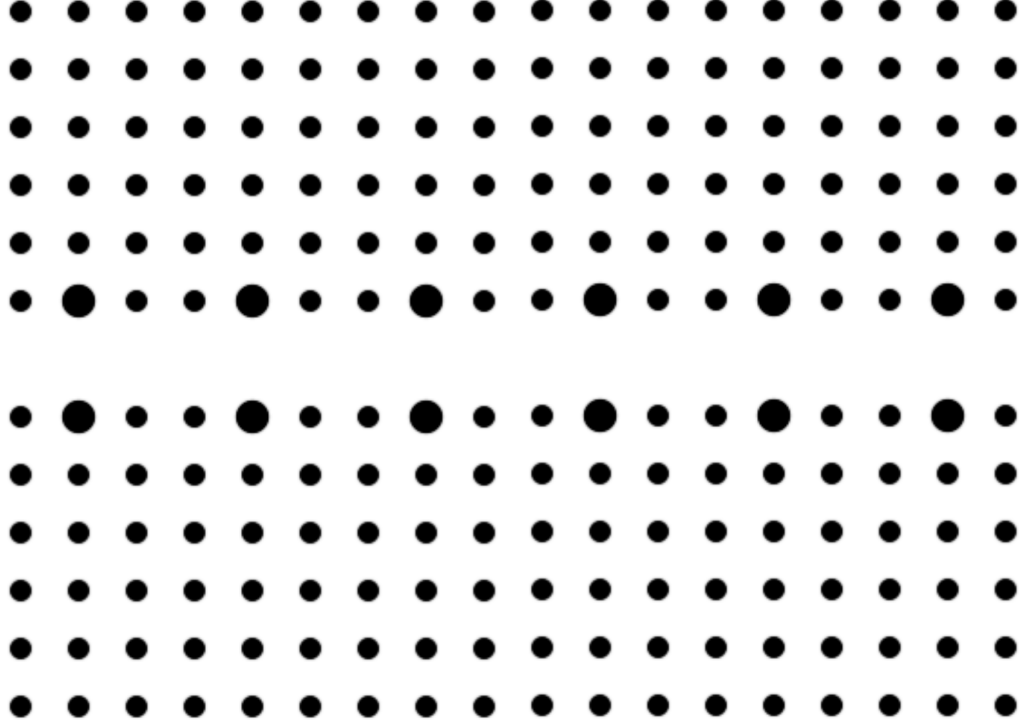


Şekil 3.4:  $r = 0.2a$  yarıçaplı ve  $\epsilon = 9,8$  değerli çubuklardan oluşturulan kare örgülü 2B PhC içinde oluşturulan eşlenik dalga kılavuzuna ait TM modları gösteren süper-hücre bant diyagramı ve  $3a$  genişliğindeki  $r_c = 0,35a$  yarıçaplı kavitelere oluşan süper-hücresinin şematik gösterimi.

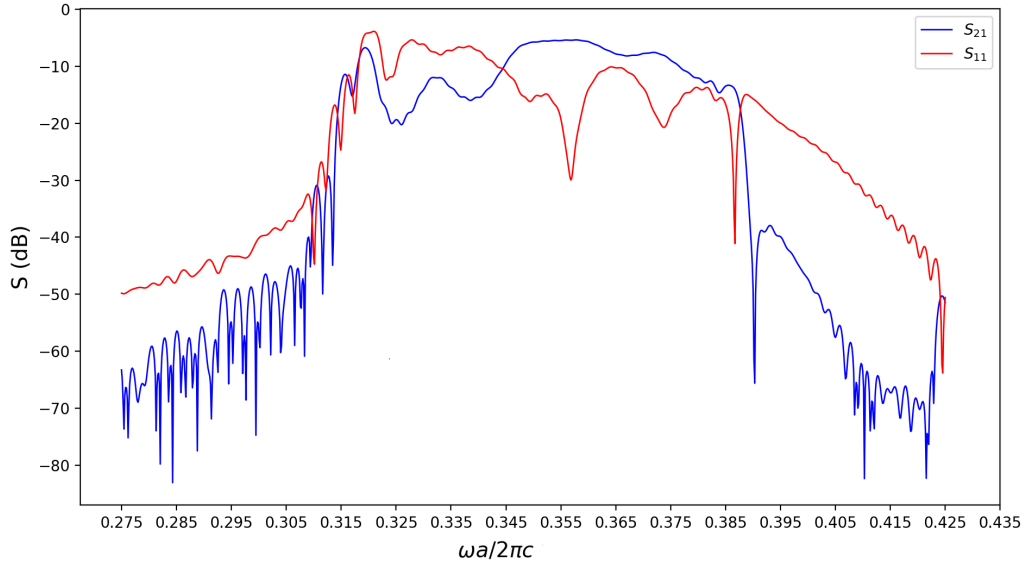
nedeniyle optik cihazların tasarımında büyük bir ilgi odağı olmuştur. Bu tür yapılar, hem PBG'lerin genişletilmesi hem de SL etkisinin elde edilmesi açısından önemli avantajlar sunar. PhC'lerin optik özellikleri, kullanılan malzeme, örgü simetrisi, kusur yapıları ve mod etkileşimleri gibi çeşitli faktörler tarafından belirlenir. Bu nedenle, PhC yapılarının optimizasyonu ve tasarımı, yüksek performanslı optik cihazların geliştirilmesi açısından kritik öneme sahiptir.

Yukarıda Şekil 3.6'de verilen iletim/yansıtma katsayıları ile Şekil 3.4'deki bant diyagramı verileri arasındaki uyum, çalışmanın başarısını göstermektedir. PBG içerisinde oluşan kavite modlarının iletim/yansıtma katsayıları ile uyumu açıkça görülmektedir. Bu veriler, PhC içinde oluşturulan kavite modlarının doğru bir şekilde analiz edildiğini ve FDTD simülasyon sonuçları ile elde edilen PWE bant diyagramı verilerinin tutarlı olduğunu ortaya koymaktadır. Elde edilen sonuçlar, PhCC yapılarının optik cihazların tasarımında yüksek performans sunabilecek şekilde optimize edilebileceğini ve bu yapılar sayesinde SL etkisinin de başarıyla elde edilebileceğini göstermektedir.

Bu çalışmada elde edilen bulgular, PhCC yapılarının yüksek performanslı optik cihazların tasarımında önemli bir potansiyele sahip olduğunu açıkça göstermektedir. İletim/yansıtma katsayıları ile bant diyagramı verileri arasındaki



Şekil 3.5:  $r = 0.2a$  yarıçaplı ve  $\epsilon = 9,8$  değerli çubuklardan oluşturulan 2 boyutlu kare örgülü  $r_c = 0.35a$  yarıçaplı çubukların  $3a$  periyotlu CCW yapısının şematik gösterimi



Şekil 3.6:  $r = 0,2a$ ,  $r_c = 0,35$  ve periyodiklik  $3a$  olarak tasarlanmış, yardımcı uydusuz, kare örgülü  $a$  yapı sabitli temel kavite yapının  $S_{21}$  ve  $S_{11}$  TM modu için iletim/yansımaya katsayıları.

uyum, yapıların optimizasyon sürecinin başarıyla gerçekleştirildiğini ve SL etkisinin etkili bir şekilde elde edildiğini kanıtlamaktadır. Sonraki bölümde,

yapıya yardımcı rod ekleyerek düşük simetrlili CC yapısı oluşturarak orijinal çalışmamıza devam edeceğiz. Bu eklemeye birlikte kavite modlarının daha da optimize edilmesi ve yapının optik özelliklerinin iyileştirilmesi hedeflenmektedir. Yardımcı rodların eklenmesi, mod etkileşimlerini güçlendirecek ve PhC yapılarının performansını artırarak, daha gelişmiş optik cihaz tasarımlarına olanak tanıyacaktır.

# BÖLÜM 4

## BULGULAR VE TARTIŞMA

### 4.1 Gökkuşuğu Tuzaklama Etkisinin İncelenmesi

Bu bölümde, çalışmamızda elde edilen bulgular ayrıntılı bir şekilde sunulacak ve tartışılacaktır. Hem teorik analizler hem de simülasyonlar aracılığıyla elde edilen veriler incelenecek ve bu bulguların literatürdeki diğer çalışmalarla nasıl örtüştüğü veya ayrıştığı değerlendirilecektir. Araştırmamız, kare örgülü 2 boyutlu PhC yapısı üzerine odaklanmakta olup, bu yapıların SL performansını optimize etmek için kullanılan CC yapılarının incelenmesini içermektedir. PhC'lerin ışığın belirli dalga boylarını yönlendirme ve kontrol etme yeteneği, bu çalışmanın temelini oluşturmaktadır.

Kare örgülü 2D PhC yapılar, ışığın yayılmasını kontrol etmede etkili bir araç olarak bilinir ve CC yapıları bu kontrolü daha da optimize etmek için kullanılan özel rezonatörlerdir. CC yapıları, PhC'lerdeki SL fenomenini geliştirmek ve dalga boyu seçici özellikleri iyileştirmek için tasarlanmış özel rezonatörlerdir. Bu rezonatörler, ışığı belirli bir dalga boyunda tuzaklayarak yavaşlatabilir ve bu sayede enerji yoğunluğunu artırarak, cihazların etkinliğini yükseltebilir.

Şekil 4.1'te görüldüğü gibi, düşük simetrik kavite yapısına uydu olarak adlandırdığımız yardımcı çubuklar eklenmiş süper hücre tasarımı, bu çalışmada ele alınan temel yapılardan biridir. Bu yapı, kavite rezonatörlerinin optik özelliklerini daha da zenginleştirerek, SL uygulamaları açısından önemli avantajlar sunar. Şekilde belirtilen kavite parametreleri,  $r_c$  ve  $r_a$  yarıçapları sırasıyla kavite ve yardımcı çubuğu temsil ederken,  $\varphi$  ve  $\Delta$  parametreleri ise yardımcı çubuğun dönme açısı ve kavite ile uydu arasındaki mesafeyi göstermektedir. Bu parametrelerin dikkatli bir şekilde optimize edilmesi, fotonik bant yapılarının ve modların nasıl etkilendiğini anlamak açısından kritik öneme sahiptir.

Bu çalışmada, kare örgülü 2D PhC yapılarındaki CC yapısını inceleyerek, adım adım RT fenomenini nasıl elde ettiğimizi açıklayacağız. RT, ışığın farklı dalga boylarının PhC içinde farklı hızlarda yayılması ve bu dalga boylarının belirli bölgelerde yoğunlaşması anlamına gelir. Bu fenomen, SL uygulamaları, sensörler ve yüksek verimli fotonik cihazlar için büyük potansiyele sahiptir.

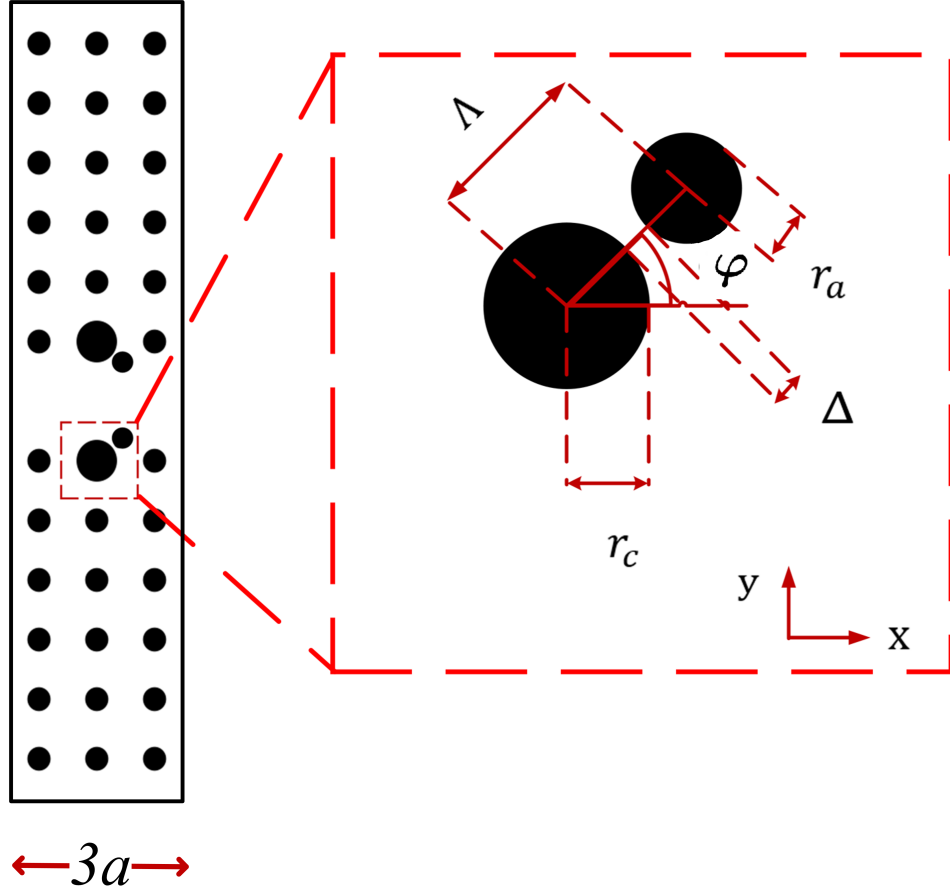
Adım adım gerçekleştirdiğimiz bu çalışma, önce PhC yapısının tasarımı ve optimizasyonu ile başlamıştır. İlerleyen aşamalarda, CC yapısının geometrik parametrelerinin ve malzeme özelliklerinin, ışığın farklı dalga boylarında nasıl tuzaklandığını anlamak için detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Son olarak, elde edilen sonuçlar ve RT'nin etkileri, FDTD ve PWE simülasyon bulguları ve tekil kavritlerin davranışının analizi ise CMT sonuçları ile desteklenerek sunulacaktır. Bu süreç, PhC'lerde ışık yönetimi konusunda yeni perspektifler sunabilir ve ileri düzey optik cihaz tasarımlarına katkıda bulunabilir. Hesaplamamızda  $\omega a/2\pi c$  ifadesi  $a/\lambda$  cinsinden normalize frekansları,  $k$  ve  $ka/2\pi$ 'ler dalga vektörlerini ifade etmektedir. Bu çalışmamızda yapımızın hava ortamında çubuklarla oluşturulmuş olması nedeniyle TM modundaki elektromanyetik dalgalar için gerçekleştirilmiştir.

## 4.2 Düşük Simetri Etkilerinin İncelenmesi

Bu bölümde, düşük simetri etkilerinin ve uyduların PhCC yapılarının optik parametreleri üzerindeki etkileri incelenecektir. PhC yapılarında, uyduların konumu, boyutu ve dönme açısı gibi parametrelerin değiştirilmesi, kavitenin optik özelliklerinde önemli değişikliklere yol açabilir. Bu değişiklikler, özellikle bant yapısı, grup hızı ve kalite faktörü gibi kritik optik parametreler üzerinde derin etkiler yaratır. Dolayısıyla, bu faktörlerin dikkatli bir şekilde analizi, fotonik cihazların performansını optimize etmek için büyük önem taşımaktadır.

### 4.2.1 Bant Yapılarına Düşük Simetrinin Etkileri

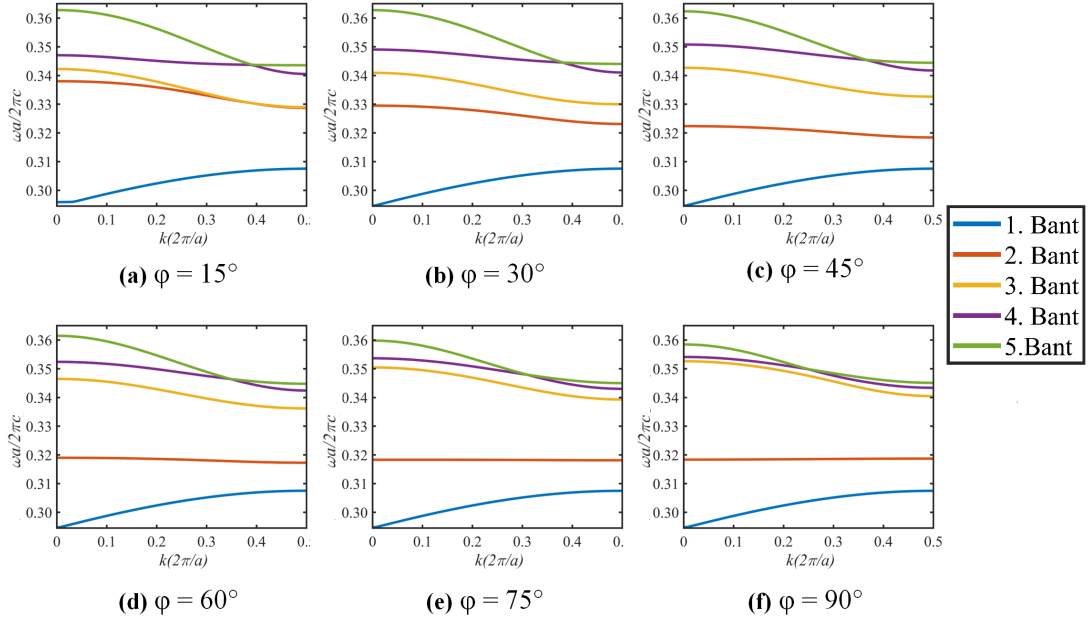
PWE kullanarak yaptığımız bant diagramı hesaplamalarından yola çıkarak düşük simetri etkilerini incelediğimizde uyduların dönme açısı  $\varphi$ 'nin bant yapısı üzerindeki kritik etkisi, Şekil 4.2a-4.2f'de gösterilen bant diyagramlarında açıkça görülmektedir.  $\varphi$  açısının  $15^\circ$ 'den  $90^\circ$ 'ye doğru artmasıyla birlikte, 2. bant daha düşük frekanslara kayarken, 3. ve 4. bantlar 5. banda yaklaşmaktadır. Özellikle  $\varphi = 90^\circ$  durumunda, bu üç bant normalize edilmiş  $a/\lambda = 0,35$  ve  $a/\lambda = 0,36$  frekansları civarında birbirine oldukça yakın bir şekilde konumlanmıştır. Bu durum, uyduların  $\varphi$  açısının  $15^\circ$ 'den  $90^\circ$ 'ye kadar dönmesiyle, dalga kılavuzu



Şekil 4.1: Düşük simetrlili kavite yapısının uydu eklenmiş süper hücresi. Kavite parametreleri;  $r_c$  ve  $r_a$  sırasıyla kavite ve uydunun yarıçaplarını,  $\varphi$  ve  $\Delta$  sırasıyla yardımcı çubuğun dönme açısını ve kavite ile uydu arasındaki mesafeyi göstermektedir.

içindeki CCnin (CCW) yayılım yönünde etkili indeksini ( $n_{eff}$ ) artırdığını göstermektedir.

Etkili indeks  $n_{eff}$ , dalga kılavuzu içindeki kılavuzlu modları karakterize eden bir parametre olup, dalga kılavuzu içerisindeki ışığın hapsedilme ve yayılma özelliklerini dikkate alarak hesaplanan eşdeğer bir kırılma indisi olarak tanımlanır (Liu 2005). Bu değişim, özellikle 2. bantta  $\varphi = 60^\circ$ 'ye kadar belirgin olup,  $60^\circ$ 'den  $90^\circ$ 'ye kadar sabit kalmaktadır. Ancak 3. bant, 2. banttan belirgin bir şekilde ayrılmakta ve benzersiz bir dispersiyon özelliği sergilemektedir. Bu bant,  $\varphi$  açısının  $15^\circ$ 'den  $60^\circ$ 'ye artmasıyla frekansta bir düşüş göstermekte, ardından  $60^\circ$ 'den  $90^\circ$ 'ye kadar artış göstermektedir. Şekil 4.2a-4.2d'de görüldüğü gibi, uyduların dönme açısı, ilgili frekans bantlarını önemli ölçüde değiştirmekte ve PhC CCW'nin frekans tepkisinin ince ayarlanmasının gerekli olduğu optik uygulamalar için önemli bir yol açmaktadır.

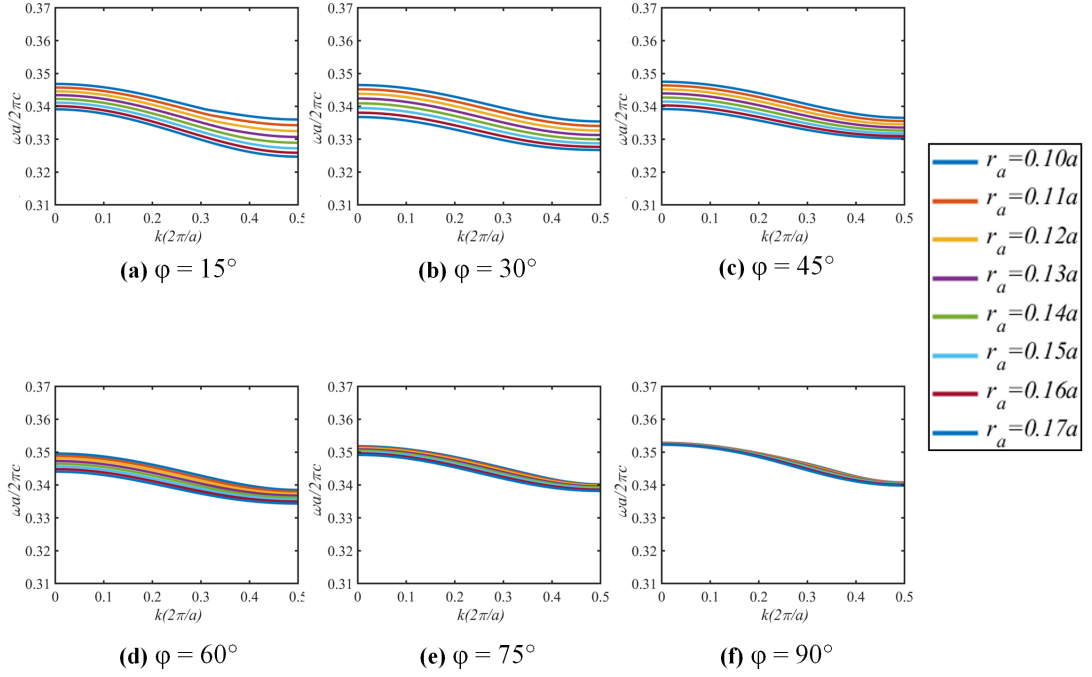


Şekil 4.2: Uydu yarıçapı  $r_a = 0,14a$  olan düşük simetrlili kavite yapısının bant yapısı, (a)  $\varphi = 15^\circ$ , (b)  $\varphi = 30^\circ$ , (c)  $\varphi = 45^\circ$ , (d)  $\varphi = 60^\circ$ , (e)  $\varphi = 75^\circ$  ve (f)  $\varphi = 90^\circ$  açılarında.

2. bant, düz bir profil gösterirken, simetri azaltımına tepkisi sınırlıdır ve  $60^\circ$  ile  $90^\circ$  arasındaki açı değişikliklerinden etkilenmez. Ayrıca, 4. ve 5. bantlar birbirine sıkı sıkıya bağlıdır ve net bir ayırım göstermez. Bu durum, 3. bandı en uygun aday haline getirir. Şekil 4.2a-4.2d'de görüldüğü gibi, yardımcı çubuğun yarıçapı sabit tutulurken dönme açısı değiştirilmiştir. Uydu yarıçapının ilgili frekans bandı üzerindeki etkisini değerlendirmek de önemlidir. Şekil 4.3'te, uydu

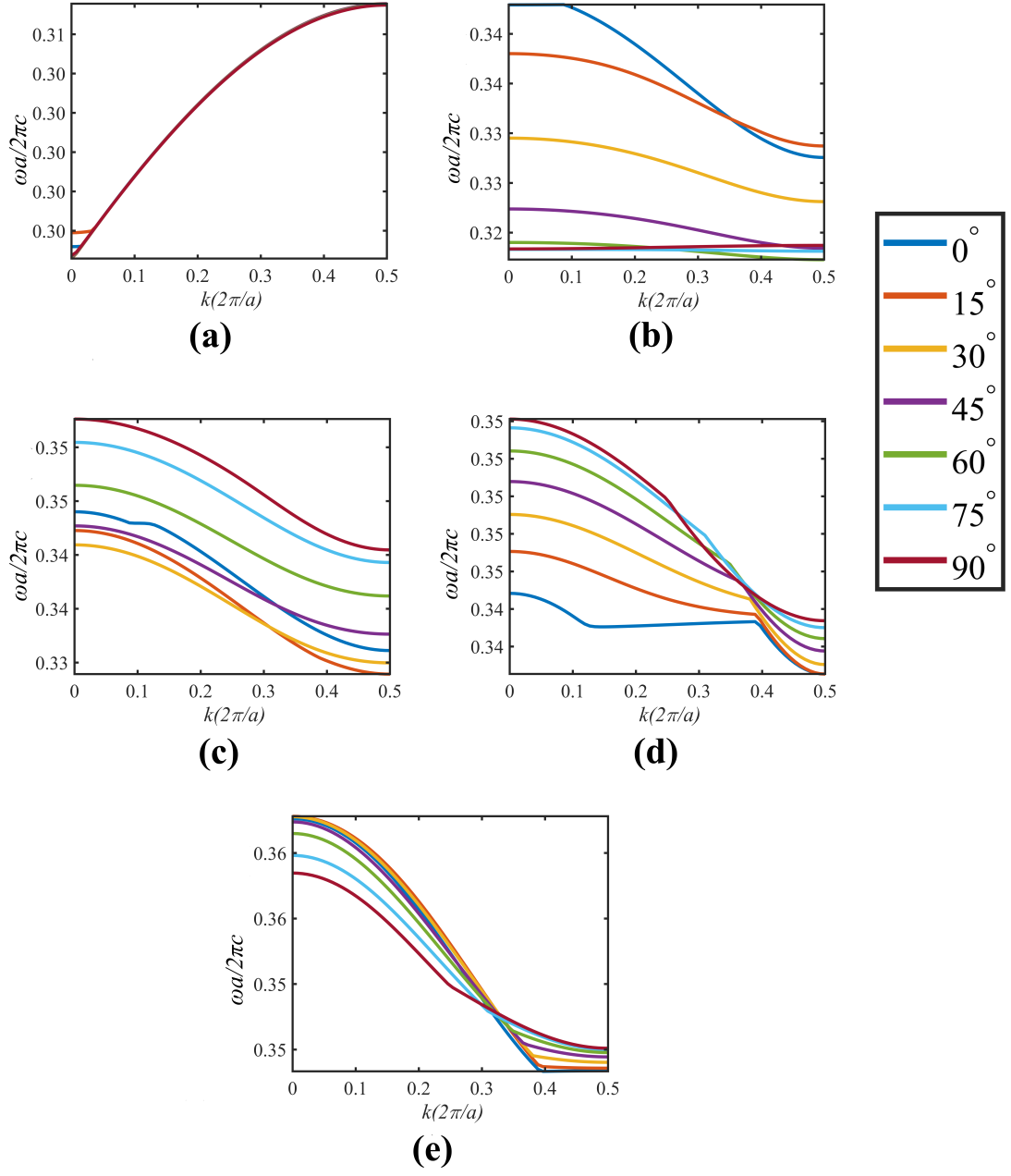


yarıçapının frekans bandının evrimi üzerindeki etkisi gösterilmiştir. Yardımcı çubuğun yarıçapı  $r_a$   $0,10a$ 'dan  $0,17a$ 'ya ayarlandığında ve dönme açısı  $15^\circ$ 'den  $90^\circ$ 'ye ayarlandığında, 3. frekans bandının nasıl korunduğu gözlemlenebilir (Şekil 4.3a-4.3f). Ayrım mesafesi  $\Delta = 0,10a$  olarak sabitlenmiştir. 3. bant,  $r_a$  ile frekans arasında pozitif bir korelasyon sergiler. Ancak,  $\varphi$  arttıkça bu etki azalır ve  $\varphi = 75^\circ$ 'den sonra  $r_a$ 'nın frekans üzerindeki etkisi önemsiz hale gelir.



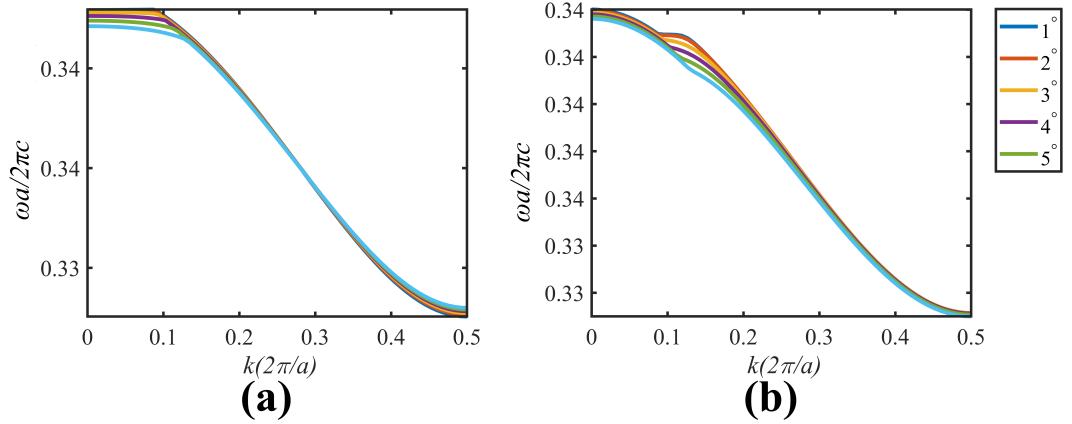
Şekil 4.3: Uydu açısı (a)  $\varphi = 15^\circ$ , (b)  $\varphi = 30^\circ$ , (c)  $\varphi = 45^\circ$ , (d)  $\varphi = 60^\circ$ , (e)  $\varphi = 75^\circ$  ve (f)  $\varphi = 90^\circ$  için,  $r_a = 0,10a - 0,17a$  arasında değişen yarıçapa sahip 3. bantın normalize edilmiş frekansının değişimi.

$r_a$ 'daki değişiklikler, yapının tepki özelliklerini iyileştirmek için bir temel sağlar. Ayrıca, yapının simetrisi azaltıldığında, açı ayarlamalarının SL tepkisini ayarlamak için etkili bir mekanizma olarak hizmet edebileceği ve sistemin SL özelliklerini manipüle etmede ek bir kontrol boyutu sunduğu görülmüştür. Bu yaklaşım, istenilen frekans tepkileriyle  $n_g$  ve GBP gibi SL parametrelerinin hassas bir şekilde kontrol edilmesine olanak tanır. Şekil 4.2 ve 4.3'te görüldüğü gibi, dikkatle seçilmiş opto-geometrik parametrelere sahip uyduların PhC CCW'ye eklenmesiyle SL etkisini sergileyen frekans bantları ve hedeflenen bant modlarının etkili dinamikleri elde edilebilir. Şekil 4.3'te sunulan sonuçlara dayanarak, önerilen PhC CCW'nin geometrik ve üretim sınırlamaları göz önünde bulundurulduğunda en etkili uydu yarıçapı  $r_a = 0,14a$  olarak belirlenmiştir.  $r_a = 0,14a$  yarıçaplı uydulu yapı özelinde, kavite yarıçapı  $r_c = 0,35a$  ve kavite



Şekil 4.4: Uydu açısı değişimlerine göre (a) 1. bant, (b) 2. bant, (c) 3. bant, (d) 4. bant ve (e) 5. bant yapılarının değişimi.

ile uydu arasındaki mesafe  $\Delta = 0,10a$  olarak seçilmiştir. Bu parametrelerle, 1. banttan başlayarak 5. banda kadar olan frekans bantlarının açığa bağlı değişimleri Şekil 4.4(a)-4.4(e)'de gösterilmiştir. Şekillerden açıkça görülebileceği gibi, 1. bant açının değişiminden etkilenmeyen bir yapıya sahip olup, açısız bağımsızlık sergilemektedir. Bunun aksine, 2. bantta  $\varphi = 45^\circ$ 'ye kadar belirgin bir azalış trendi görülmekte, bu da uydu açısının frekans üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. 3. bantta ise, açının artışı ile birlikte  $30^\circ$ 'ye kadar azalan bir frekans değişimi gözlenirken,  $30^\circ$ 'den sonra frekansın tekrar artış eğilimi göstermesi dikkat çekicidir. Bu bant, diğer bantlara göre daha karmaşık bir davranış sergileyerek hem azalış hem de artış dönemlerini içermektedir. 4. bantta genel olarak bir artış eğilimi izlenirken, 5. bantta açının artması ile birlikte bant genişliğinde belirgin bir daralma gözlemlenmiştir. Bu daralma, uydu açısının optik özellikleri üzerinde kontrol sağlamak için kullanılabileceğini göstermektedir. Bu analiz, uydu açısının, PhC CCW'nin frekans tepkisinin ince ayarı için kritik bir parametre olduğunu ortaya koymaktadır.  $r_a = 0,14a$



Şekil 4.5: Uydu açısının küçük açı değişimlerine göre (a) 2. bant ve (b) 3. bant yapılarındaki değişimler.

yarıçaplı uydulara sahip yapı özelinde,  $r_c = 0,35a$  kavite yarıçapı ve  $\Delta = 0,10a$  kavite ile uydu arasındaki mesafe parametrelerine göre yapılan analizde, 2. ve 3. bantların açığa göre davranışları incelenmiştir. Şekil 4.5(a) ve 4.5(b)'de gösterildiği gibi, küçük açı değişimleri büyük açılara kıyasla daha sınırlı frekans kaymalarına neden olmaktadır. Özellikle 2. bantta, küçük açılar ( $1^\circ$ 'den  $5^\circ$ 'ye kadar) aralığında frekans bandında çok keskin olmayan değişimler gözlenirken, 3. bantta benzer şekilde küçük açılarla ilgili belirgin bir kayma gözlenmemektedir. Ancak bu durum, küçük açısız varyasyonların frekans bant genişliği üzerindeki ince etkilerini ortadan kaldırmamaktadır; zira bu varyasyonlar, optik yapının hassas ayarlamalarında önemli rol oynayabilir.

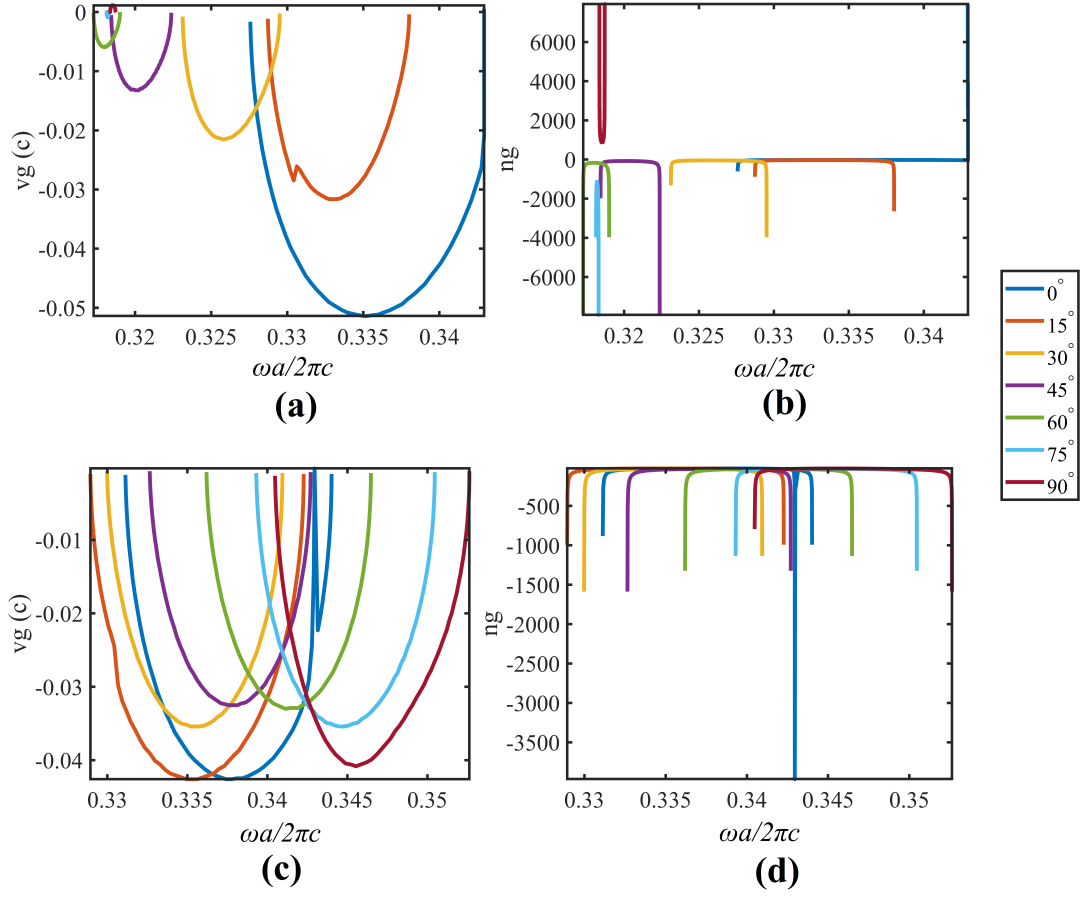
## 4.2.2 Yavaş Işık Etkilerinin İncelenmesi

Bant yapılarına bağlı olarak  $v_g$  ve  $n_g$  parametrelerinin davranışlarını değerlendirdiğimizde, Şekil 4.6 üzerinde sunulan veriler ışığında, uydu açısındaki değişimlerin bu parametreler üzerinde önemli etkiler yarattığını gözlemlemekteyiz. Şekil 4.6(a) ve (c)'de verilen  $v_g$  eğrileri, 2. ve 3. bantlar için farklı açılar altında meydana gelen varyasyonları göstermektedir.  $v_g$  eğrilerinin açısal değişimlere karşı duyarlılığı, bant yapılarının dispersiyon özellikleri ile doğrudan ilişkilidir. Özellikle düşük grup hızları ( $v_g \approx 0$ ) için belirli açılarda meydana gelen keskin değişimler, SL etkilerinin kontrol edilebilirliğini ve bu yapıların PhC tabanlı SL uygulamalarında kullanım potansiyelini ortaya koymaktadır.

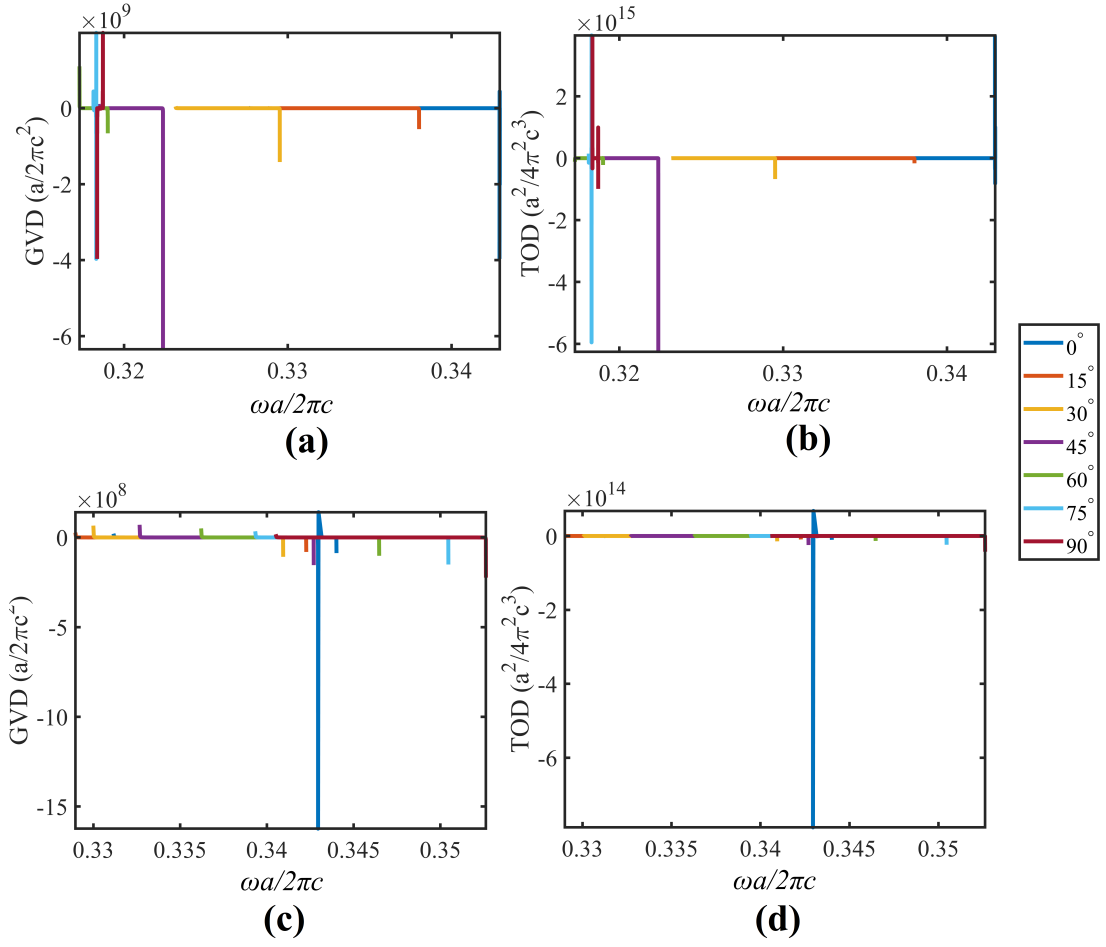
Benzer şekilde, Şekil 4.6(b) ve (d)'de sunulan  $n_g$  eğrileri de, 2. ve 3. bantlar için uydu açısındaki değişimlerin etkilerini göstermektedir.  $n_g$ 'nin yüksek değerlere ulaştığı bölgeler, ışığın yavaşlatıldığı rejimleri işaret ederken, bu parametre üzerindeki açısal değişimlerin bant yapılarının anizotropik özelliklerini nasıl etkilediğini ortaya koymaktadır. Bu sonuçlar, PhC yapılarının SL etkisi yaratan bölgelerinin hassas bir şekilde ayarlanabilmesi için açısal kontrolün kritik bir parametre olduğunu göstermektedir.

Yapılan analizlerde, Şekil 4.6(a) ve 4.6(c)'de gösterilen grup hızı  $v_g$  ve Şekil 4.6(b) ve 4.6(d)'de sunulan grup indisi  $n_g$  eğrilerinde belirgin bir şekilde gözlemlenen negatif değerler, PhC yapılarında ilginç bir fiziksel fenomeni ortaya koymaktadır. Negatif  $v_g$  ve  $n_g$  değerleri, bant yapılarındaki frekansların ters fazda yayılım sergilediğini ve bu yapıların dispersiyon özelliklerinin alışılmışın dışında olduğunu göstermektedir. Şekil 4.7'de görüldüğü gibi, TOD eğrilerinin neredeyse sifıra yakın olması, frekans bandı boyunca TOD'un ihmal edilebilir düzeyde kaldığını ve  $v_\phi$  dispersiyonunun belirgin bir etkiye sahip olmadığını göstermektedir. Bu durum, ışık yayılımının kararlı ve geniş bantlı bir bölgede gerçekleşmesini sağlar. 2. ve 3. bantlar için GVD ve TOD eğrileri incelendiğinde, GVD'nin belirli açılarda büyük değişimler sergileyerek dispersiyon özellikleri üzerinde güçlü bir etki oluşturduğu görülmektedir. GVD'nin pozitif veya negatif değerlere geçişleri, yayılımın yavaşlama veya hızlanma eğiliminde olduğunu ifade eder. TOD'un sifıra yakın olması ise bu etkinin minimal düzeyde olduğunu, ışığın kararlı bir şekilde yayılmasını ve geniş bant aralığında dispersiyon yönetiminin daha etkin olmasını sağlamaktadır.

Bu noktada yapının önemli SL parametrelerinden olan kalite faktörlerinin incelenmesi önem arz etmektedir. Bunun için yapıya ait hem kavite kalite faktörleri hem de dalga kılavuzu ile olan eşlenme faktörleri harmonik analiz



Şekil 4.6: Uydu açısındaki değişimlere göre (a) 2. Bant için grup hızı  $v_g$ , (b) 2. Bant için grup indisi  $n_g$ , (c) 3. Bant için grup hızı  $v_g$  ve (d) 3. Bant için grup indisi  $n_g$  eğrilerinin değişimleri.



Şekil 4.7: Uydu açısındaki değişimlere göre (a) 2. Bant için GVD, (b) 2. Bant için TOD, (c) 3. Bant için GVD ve (d) 3. Bant için TOD eğrilerinin değişimleri.

ile hesaplanmıştır. Kalite faktörleri dalga kılavuzu ve kavite yapısı için ayrı ayrı hesaplanarak daha sonrasında denklem 2.5.9 kullanılarak yapı geneli için hesaplanmıştır. Bu noktada Tablo 4.1’de verilen hesaplamalar yapının SL uygulamaları için uygunluğunu gösterdiği gibi, bir sonraki bölümde yapacağımız yarı analitik CMT hesaplamalarının temelini oluşturacaktır.

$r_c$	$r_a$	$\Lambda$	$\varphi$	$\omega_{wg}$	$\omega_{cav}$	$\omega$	$Q_w$	$Q_i$	$Q$
0,35	0,10	0,50	0	0,342747469	0,342542632	0,342645050	1225,243301	2708,327770	843,5999748
0,35	0,10	0,50	30	0,341098739	0,341456540	0,341277640	575,0756259	2101,933094	451,5377483
0,35	0,10	0,50	60	0,345905966	0,346151794	0,346028880	1491,313928	2412,335734	921,5862566
0,35	0,10	0,50	90	0,348061010	0,349584074	0,348822542	1818,810583	8119,528078	1485,950932

Tablo 4.1:  $r_c = 0,35a$ ,  $r_a = 0,10a$ , ve  $\Lambda = 0,50a$  yapı parametrelerine sahip yardımcı uydulu yapının harmonik analiz ile hesaplanmış dalga kılavuzu eşlenim frekansları ( $\omega_{wg}$ ), kavite rezonans frekansları ( $\omega_{cav}$ ), ortak rezonans frekansları ( $\omega$ ), dalga kılavuzu kalite faktörleri ( $Q_w$ ), kavite kalite faktörleri ( $Q_i$ ) ve toplam kalite faktörlerinin ( $Q$ ) uydu açısına göre değişimi.

Tablo 4.1 incelendiğinde, uydu açısındaki değişimin kalite faktörleri üzerindeki etkisi açıkça gözlemlenmektedir. Uydu açısı arttıkça, genel olarak kalite faktörlerinde de bir artış görülmektedir. Özellikle  $45^\circ$  ve  $90^\circ$  açılarında bu artış belirgin hale gelmektedir. Kalite faktörlerindeki bu artış, SL uygulamaları için büyük önem taşımaktadır, çünkü yüksek kalite faktörleri, ışığın yapıda daha uzun süre hapsedilmesine olanak tanır. Bu durum, hem yapının dalga kılavuzu ile olan eşlenmesinde hem de kavite içinde ışığın etkin bir şekilde hapsedilmesinde kritik bir rol oynamaktadır. Özellikle  $90^\circ$  uydu açısında elde edilen yüksek  $Q_w$  ve  $Q_i$  değerleri, yapının ışık hapsinde ne kadar etkili olduğunu göstermektedir. Bu sonuçlar, yarı analitik CMT hesaplamaları için sağlam bir temel oluşturmaktadır. Bu hesaplamalar, yapının SL performansını daha ayrıntılı bir şekilde analiz etmek için kritik öneme sahiptir. Frekans değerlerine bakıldığında,  $\omega_{wg}$  ve  $\omega_{cav}$  değerlerinin birbirine oldukça yakın olduğu görülmektedir. Bu da yapının belirli bir frekans aralığında SL performansı sergileyebileceğine işaret etmektedir. Özellikle  $\omega$  değerlerinin uydu açılarında dar bir aralıkta kalması, ışığın yapıda daha iyi hapsedildiğini ve bu yapıların SL uygulamaları için uygun olduğunu göstermektedir.

## 4.3 İletim, Yansımaya ve Faz Kayması Profillerinin İncelenmesi

Bu bölümde, PhC CROW yapılarına ait iletim/yansımaya katsayılarının analizine odaklanılacaktır. Öncelikle, daha önce elde edilen S-parametrelerinin (Saçılma Parametreleri) sonuçları detaylı bir şekilde incelenecek ve bu parametrelerin yapının optik performansı üzerindeki etkileri değerlendirilecektir. Bu bağlamda, küçük açısız varyasyonların belirli frekans bantları üzerindeki etkileri ele alınacaktır. 2. ve 3. bantlar üzerinde meydana gelen frekans kaymaları ve bant genişliği ayarlamaları analiz edilecek, küçük açısız değişimlerin iletim/yansımaya katsayıları üzerindeki etkileri ile büyük açısız değişimlerle karşılaştırıldığında ortaya çıkan farklılıklar ve olası optimizasyon stratejileri tartışılacaktır.

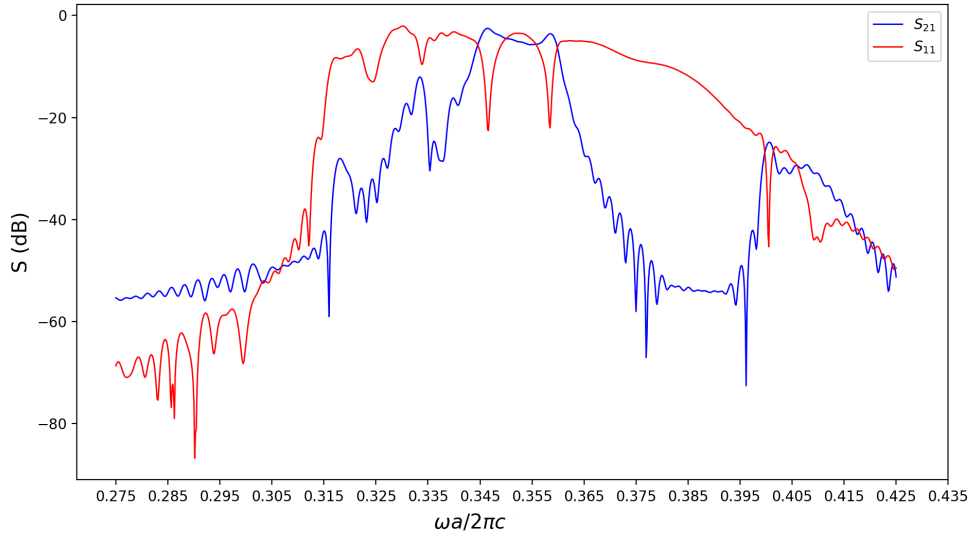
Hesaplamalar, FDTD ve CMT yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. FDTD yöntemi, yapıların elektromanyetik dalgalarla etkileşimini tam dalga analizi ile detaylandırırken, CMT ise bu etkileşimlerin modlar arası bağlanma süreçlerini ve rezonans davranışlarını analitik olarak değerlendirme imkanı sunmuştur. Bu iki yaklaşımın bir araya getirilmesiyle, yapıların optik özelliklerinin daha kapsamlı bir şekilde anlaşılması ve bu özelliklerin optimize edilmesi sağlanmıştır. Ayrıca bu iletimler karşılaştırmalı olarak sunulmuş ve bu analizler, hem iletim hem de yansımaya profillerinin detaylı bir şekilde incelenmesini sağlamış ve yapıların optik performanslarına dair önemli ipuçları sunmaktadır.

Yapının performansının artırılması amacıyla, S-parametrelerinin optimizasyon stratejilerine ve bu optimizasyonların yapının işlevselliği üzerindeki potansiyel etkilerine de değinilmiştir. S-parametreleri üzerinden yapılan analizler, PhC CCW yapılarına dair ince ayarlamalar sayesinde, hedeflenen optik özelliklere ulaşma sürecinde önemli bir rehber sağlamıştır. Sonuç olarak, bu bölümde sunulan çalışmalar, yapıların ışıkla etkileşiminde daha verimli ve kontrollü bir performans elde edilmesine yönelik önemli katkılar sunmaktadır.

RT için gerekli olan  $S_{11}$  ve  $S_{21}$  parametreleri, yansımaya yüksek, iletimin ise düşük olduğu belirli bir frekans aralığının bulunmasıdır. Bu davranış, ışığın tuzaklandığını ve sistemin belirli frekanslarda ışığı iletmek yerine geri yansıttığını, yani RT etkisinin başarılı bir şekilde gerçekleştiğini ima eder. Burada iletim/yansımaya katsayıları FDTD yöntemi ile MEEP kullanılarak hesaplanmıştır. Hesaplama için kavite giriş ve çıkışından ölçüm alınarak kavitesiz ve kaviteli yapıların oranlanması ile  $S_{ij}$  parametreleri hesaplanmıştır. Simülasyonlar 18a genişliğindeki Şekil 3.5 yapısına uydu eklenerek ve  $\varphi$  uydu açısı değiştirilerek

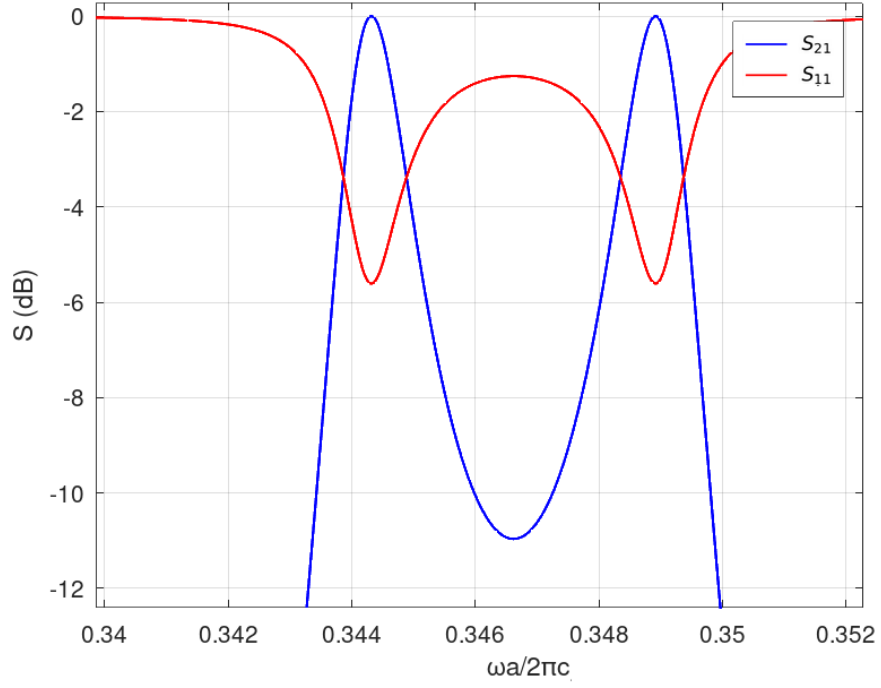


gerçekleştirilmiştir. CMT hesaplamaları ise tekil kavite için yapılmıştır. Şekil 4.8 ve Şekil 4.9,  $\varphi = 0^\circ$  uydu açılı yapının sırasıyla FDTD ve CMT yöntemleriyle elde edilen iletim/yansımaya katsayılarını göstermektedir. FDTD yöntemiyle elde edilen profilde (Şekil 4.8), geniş frekans aralıklarında belirgin iletim minimumları ve yansımaya maksimumları gözlemlenirken, CMT ile elde edilen profilde (Şekil 4.9), özellikle rezonans frekanslarına karşılık gelen noktalarda benzer davranışlar sergilenmektedir. Ancak, CMT yöntemiyle hesaplanan profillerde, FDTD simülasyonuna kıyasla daha keskin geçişler ve daha az sayıda yan loblar görülmektedir. Bu farklılık, CMT'nin analitik yaklaşımı nedeniyle modlar arası bağlanma süreçlerinin daha idealize edilmesinden kaynaklanmaktadır. İki yöntem arasındaki bu karşılaştırma, yapının optik performansını değerlendirirken her iki yöntemin de avantaj ve dezavantajlarını ortaya koymaktadır. Burada 2. ve 3. bant sınırları arasında kalan frekans bölgesinde görünen mini bant aralığını temsil eden boynuzlar bantların dejenerasyonlarını temsil etmektedir, bu durum gök kuşağı tuzaklaması oluşturabilmek için yararlanabileceğimiz bir mekanizmaya işaret etmektedir. Bu durumda,  $\varphi = 0^\circ$  yapısına kıyasla iletim

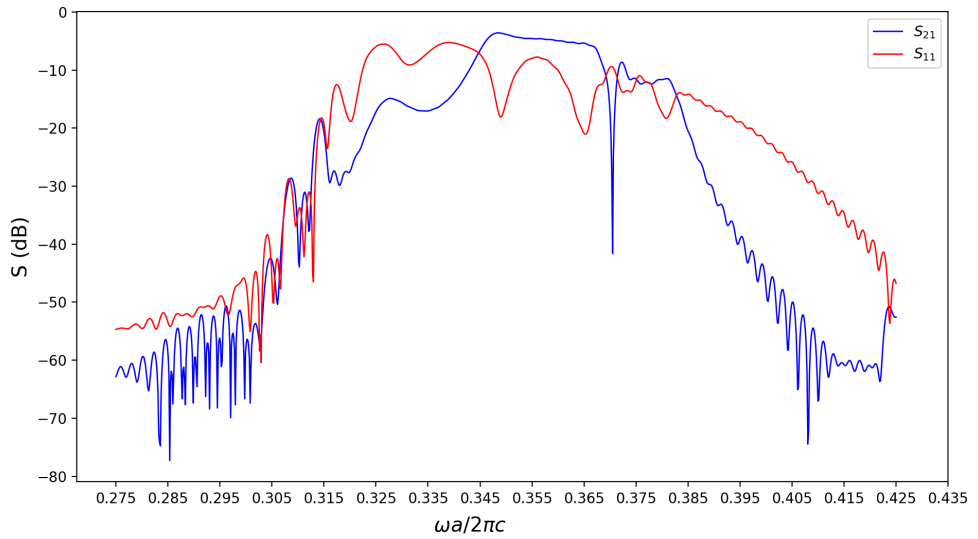


Şekil 4.8:  $r = 0, 2a, r_c = 0, 35, r_a = 0, 10a$  ve  $3a$  periyotlu olarak tasarlanmış,  $\varphi = 0^\circ$  uydu açılı yapının simülasyon sonucu elde edilen iletim/yansımaya katsayıları

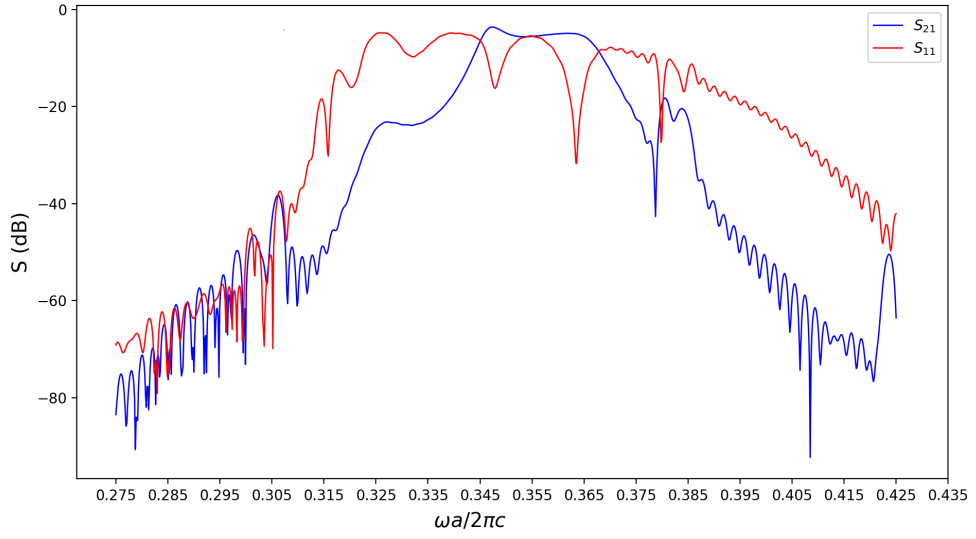
minimumları ve yansımaya maksimumlarının frekans konumları belirgin bir şekilde değişmiştir. Özellikle orta frekans aralığında dar bir bantta yüksek yansımaya gözlemlenmiştir.  $\varphi = 30^\circ$  ile  $\varphi = 90^\circ$  arasındaki açı değerlerine sahip yapılar için simülasyon sonuçlarına göre elde edilen iletim/yansımaya katsayıları, Şekil 4.10 - 4.12 arasında gösterilmektedir. Bu yapıların iletim/yansımaya katsayıları, açığa bağlı olarak farklı rezonans frekanslarına ve bu frekanslarda oluşan yansımaya



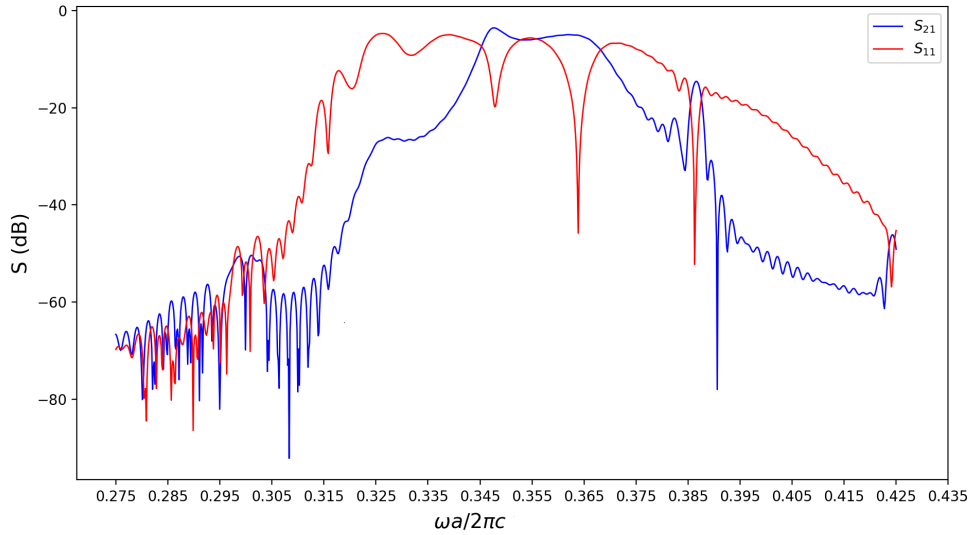
Şekil 4.9:  $r = 0, 2a$ ,  $r_c = 0, 35$ ,  $r_a = 0, 10a$  ve  $3a$  periyotlu olarak tasarlanmış,  $\varphi = 0^\circ$  uydu açılı yapının CMT'ye göre iletim/yansımaya katsayıları



Şekil 4.10:  $r = 0, 2a$ ,  $r_c = 0, 35$ ,  $r_a = 0, 10a$  ve  $3a$  periyotlu olarak tasarlanmış,  $\varphi = 30^\circ$  uydu açılı yapının simülasyon sonucu elde edilen iletim/yansımaya katsayıları.

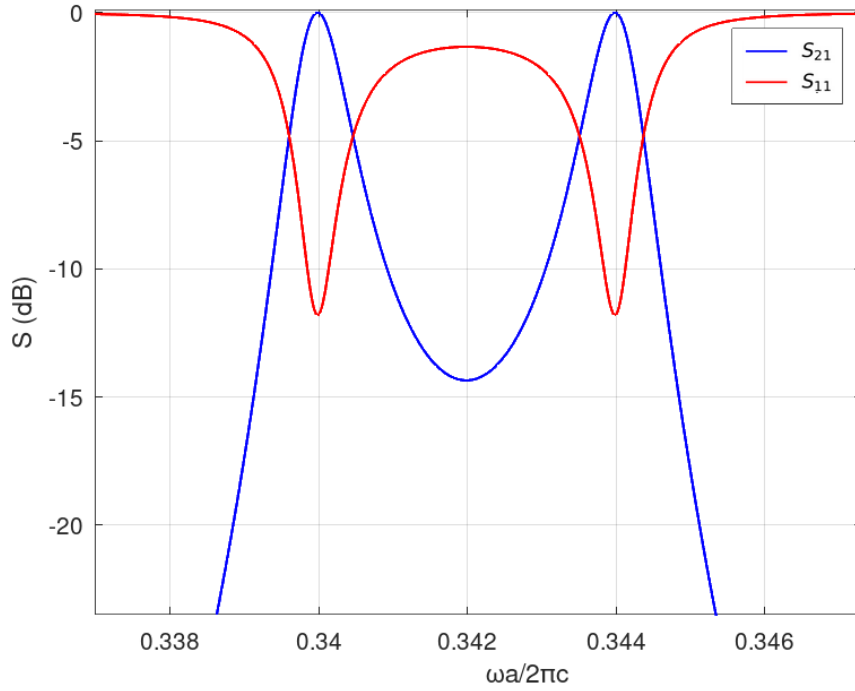


Şekil 4.11:  $r = 0, 2a$ ,  $r_c = 0, 35$ ,  $r_a = 0, 10a$  ve  $3a$  periyotlu olarak tasarlanmış,  $\varphi = 60^\circ$  uydu açılı yapının simülasyon sonucu elde edilen iletim/yansıtma katsayıları.



Şekil 4.12:  $r = 0, 2a$ ,  $r_c = 0, 35$ ,  $r_a = 0, 10a$  ve  $3a$  periyotlu olarak tasarlanmış,  $\varphi = 90^\circ$  uydu açılı yapının simülasyon sonucu elde edilen iletim/yansıtma katsayıları.

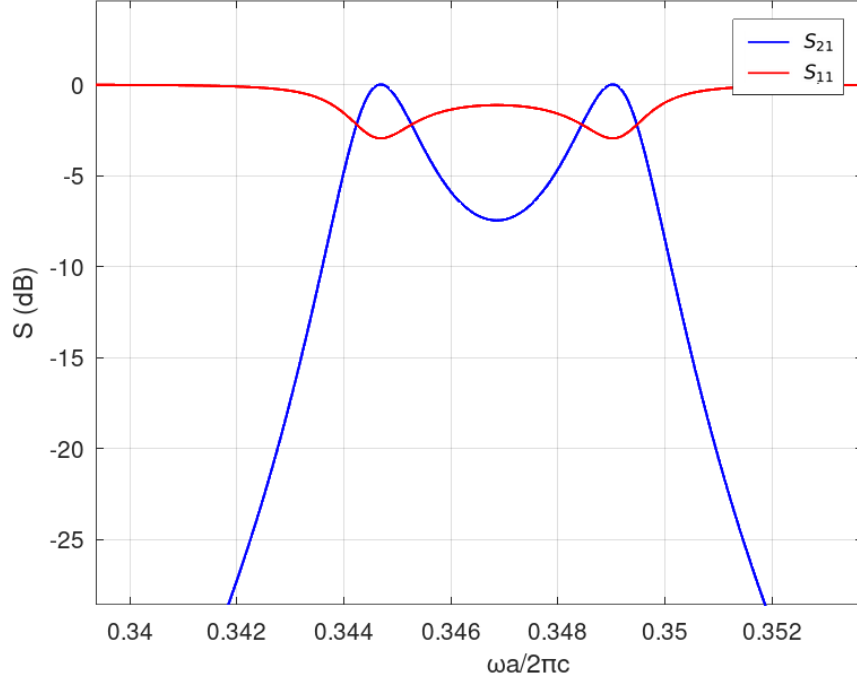
ve iletim değerlerine işaret etmektedir.  $\varphi = 30^\circ$  durumuna kıyasla, bu açıda iletim profili geniş frekans aralıklarında daha fazla değişkenlik göstermektedir. Yüksek frekanslarda iletimde azalma gözlemlenmiştir.  $\varphi = 60^\circ$  açı değeri için, önceki açılara göre daha geniş bir BWH gözlemlenmiştir. Özellikle orta frekans aralığında yüksek bir yansımaya görülmektedir.  $\varphi = 90^\circ$  uydu açısı için ise, iletim bandında yansımının arttığı bir kısım gözlenmektedir, bu durum RT için gerekli yerleşmenin bir göstergesidir. Ayrıca  $\varphi = 90^\circ$  açısında  $\varphi = 0^\circ$  açısına kıyasla daha homojen bir yansımaya profili elde edildiği gözlemlenmektedir.



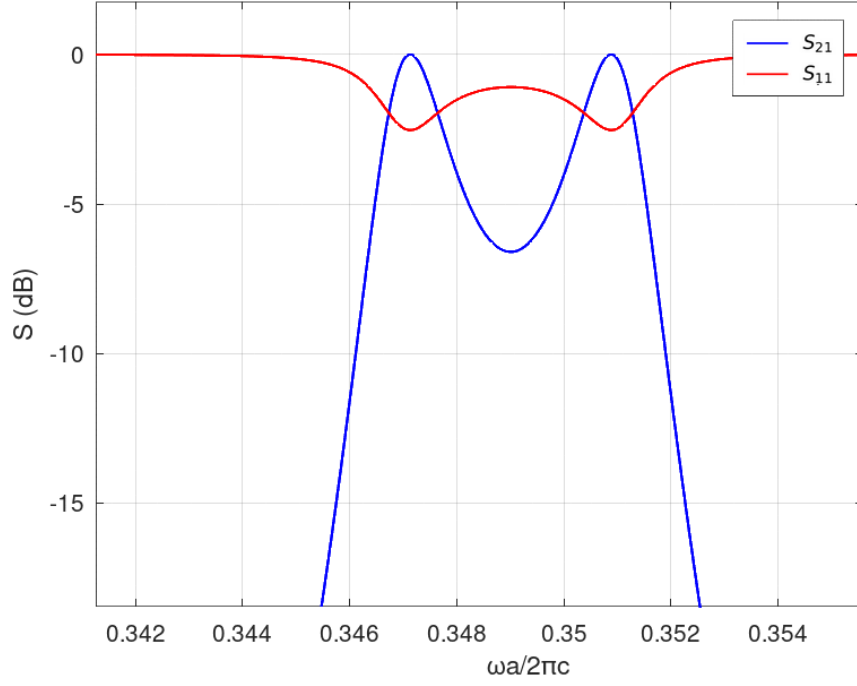
Şekil 4.13:  $r = 0, 2a$ ,  $r_c = 0, 35$ ,  $r_a = 0, 10a$  ve  $3a$  periyotlu olarak tasarlanmış,  $\varphi = 30^\circ$  uydu açılı yapının CMT'ye göre elde edilen iletim/yansımaya katsayıları.

Bu yapıların CMT ile elde edilen yarı analitik hesaplamaları ise Şekil 4.13 - 4.15 arasında gösterilmiştir. CMT sonuçları, simülasyon sonuçlarına benzer şekilde frekans bantları boyunca benzer geçişler göstermekte, ancak bazı frekans aralıklarında daha keskin geçişler ve daha az yan lobların gözlemlendiği dikkati çekmektedir. FDTD ile karşılaştırıldığında,  $\varphi = 30^\circ$  uydu açılı açı değeri için CMT sonucu, rezonans frekanslarında daha keskin bir yansımaya ve iletim geçişi göstermektedir. Benzer şekilde,  $\varphi = 60^\circ$  ve  $\varphi = 90^\circ$  açı değerleri için, CMT ile elde edilen profillerde rezonans frekansları arasındaki geçişlerin oldukça keskin olduğu ve yan lobların azaldığı gözlemlenmiştir.

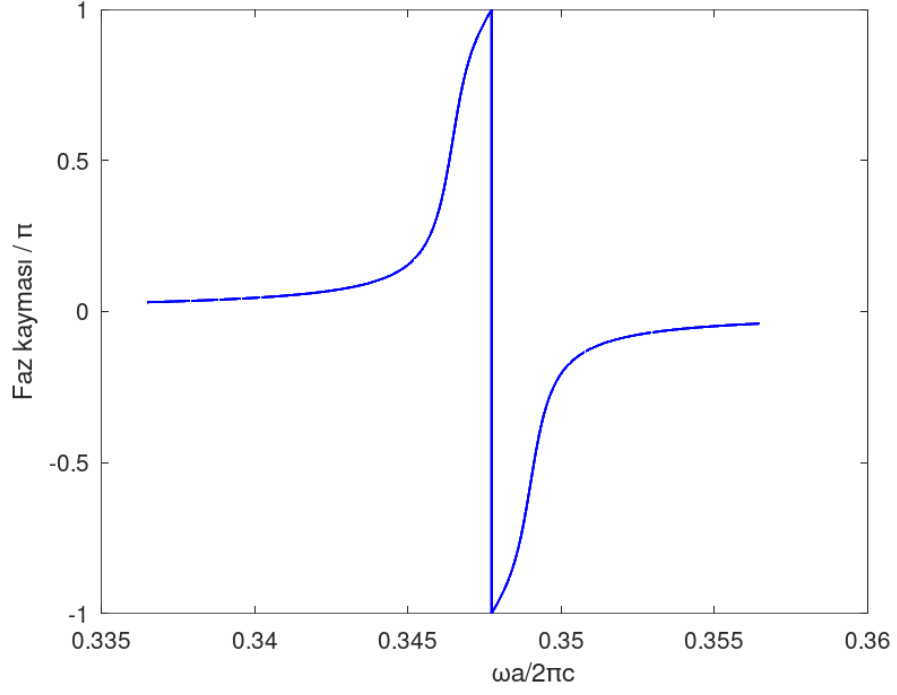
Bu bölgede ele alınan faz kayması ise CMT'ye göre Şekil 4.16-4.19 gibi olmaktadır. Şekil 4.16'de  $\varphi = 0^\circ$ , Şekil 4.17'de  $\varphi = 30^\circ$ , Şekil 4.18'de  $\varphi = 60^\circ$



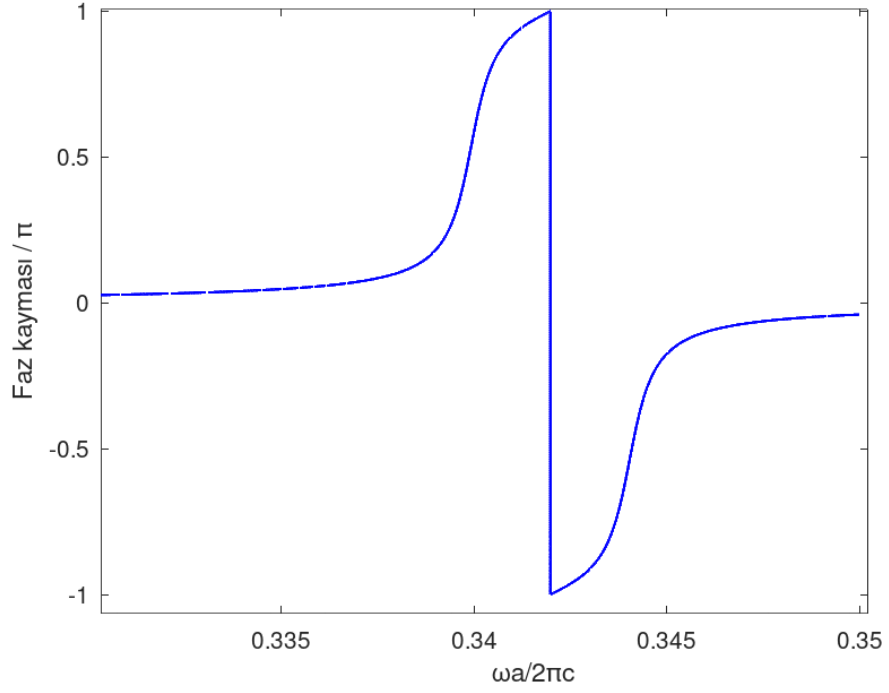
Şekil 4.14:  $r = 0, 2a$ ,  $r_c = 0, 35$ ,  $r_a = 0, 10a$  ve  $3a$  periyotlu olarak tasarlanmış,  $\varphi = 60^\circ$  uydu açılı yapının CMT'ye göre elde edilen iletim/yansımaya katsayıları.



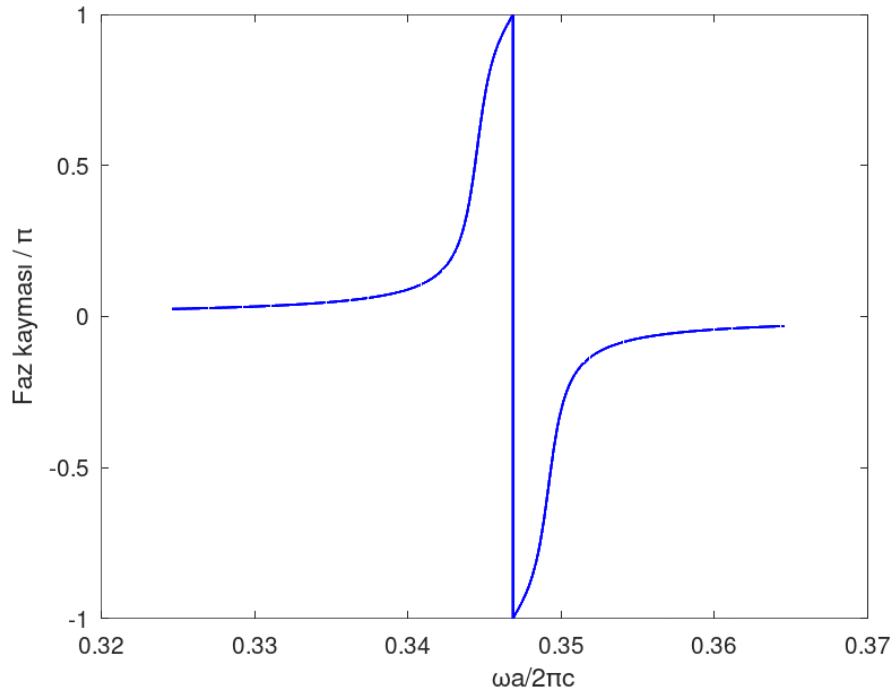
Şekil 4.15:  $r = 0, 2a$ ,  $r_c = 0, 35$ ,  $r_a = 0, 10a$  ve  $3a$  periyotlu olarak tasarlanmış,  $\varphi = 90^\circ$  uydu açılı yapının CMT'ye göre elde edilen iletim/yansımaya katsayıları.



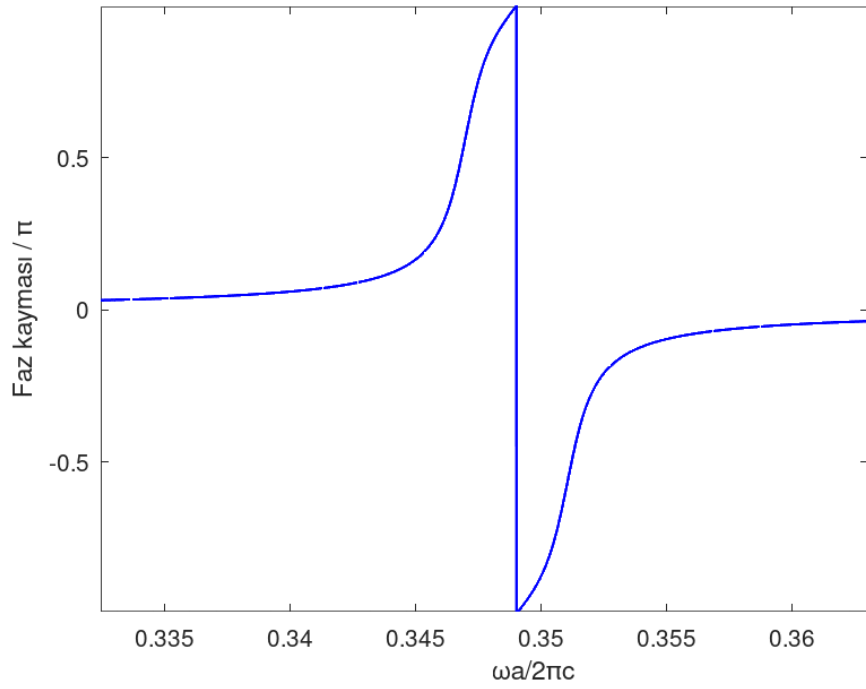
Şekil 4.16:  $r = 0, 2a$ ,  $r_c = 0, 35$ ,  $r_a = 0, 10a$  ve  $3a$  periyotlu olarak tasarlanmış,  $\varphi = 0^\circ$  uydu açılı yapının CMT'ye göre faz kayması



Şekil 4.17:  $r = 0, 2a$ ,  $r_c = 0, 35$ ,  $r_a = 0, 10a$  ve  $3a$  periyotlu olarak tasarlanmış,  $\varphi = 30^\circ$  uydu açılı yapının CMT'ye göre faz kayması



Şekil 4.18:  $r = 0, 2a$ ,  $r_c = 0, 35$ ,  $r_a = 0, 10a$  ve  $3a$  periyotlu olarak tasarlanmış,  $\varphi = 60^\circ$  uydu açılı yapının CMT'ye göre faz kayması



Şekil 4.19:  $r = 0, 2a$ ,  $r_c = 0, 35$ ,  $r_a = 0, 10a$  ve  $3a$  periyotlu olarak tasarlanmış,  $\varphi = 90^\circ$  uydu açılı yapının CMT'ye göre faz kayması

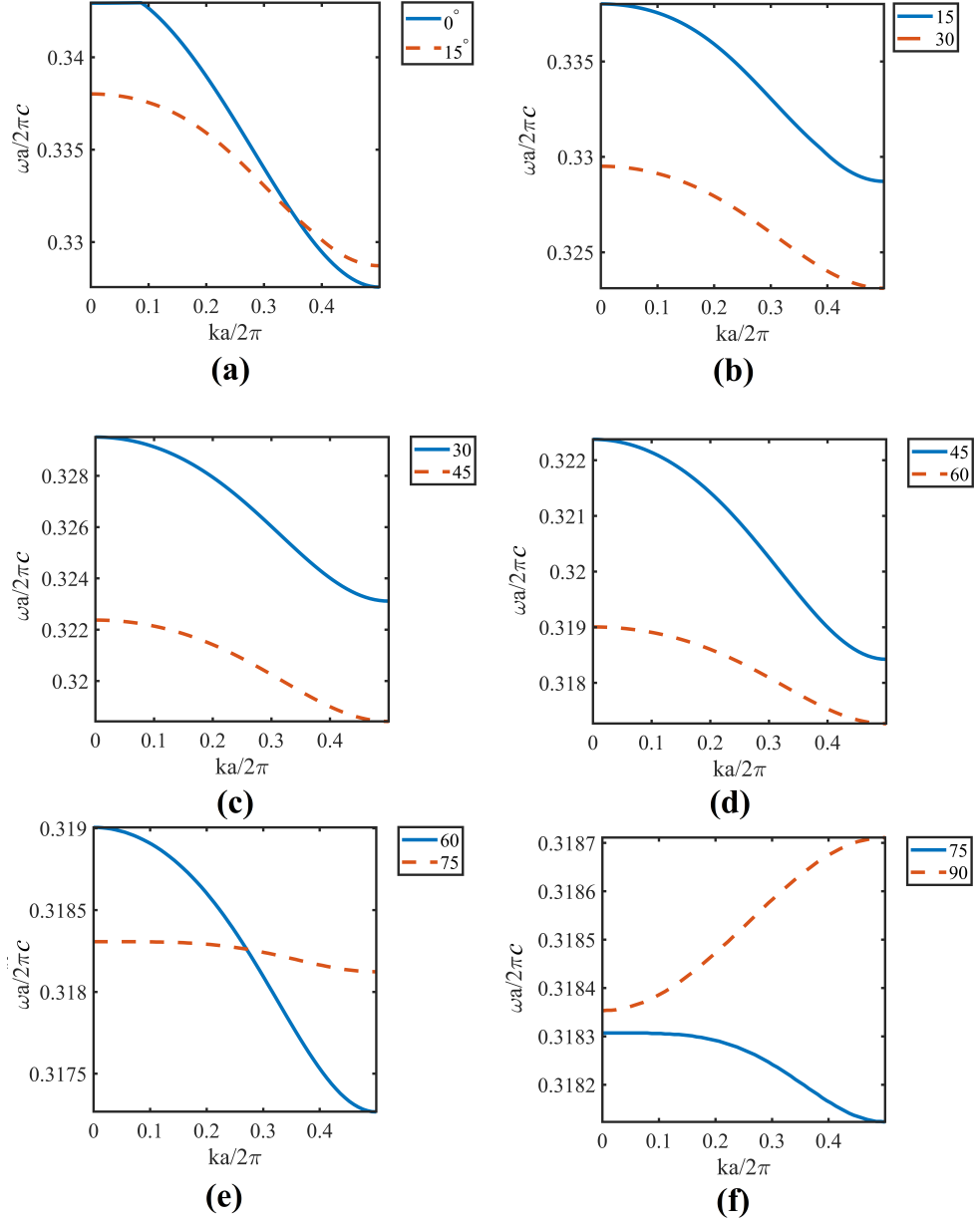
ve Şekil 4.19'de  $\varphi = 90^\circ$  açılara karşılık gelen faz kaymaları gösterilmektedir. Bu şekiller, farklı açılarda uydulu yapının CMT'ye göre nasıl bir faz kayması sergilediğini net bir şekilde ortaya koymaktadır. Sonuçlar, faz kaymalarının, ilgili yapının geometrik parametreleri ve açısal pozisyonları ile yakından ilişkili olduğunu göstermektedir.

## 4.4 Gökkuşağı Tuzaklamasının İncelenmesi

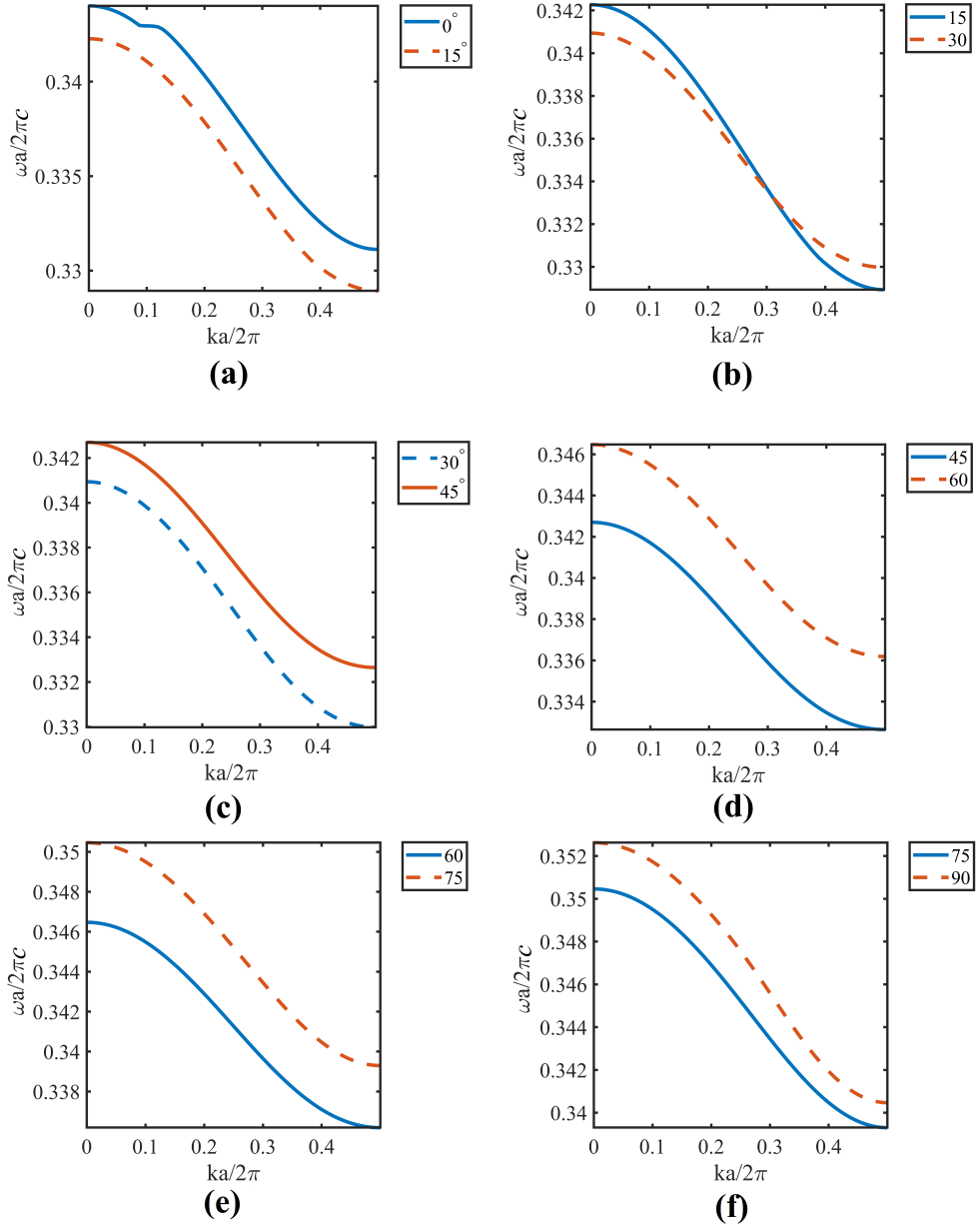
RT fenomeninin oluşabilmesi için, yapının belirli frekansları belirli bölgelerde uzaysal olarak hapsedilmesi gereklidir. Bu çalışmada, düşük simetri etkisini yalnızca kavite içinde kullanarak bu fenomeni ortaya çıkarmayı ve bir frekans ayırıcı yapı konsepti geliştirmeyi amaçladık. RT fenomenini gözlemleyebilmemiz için, belirli ortak frekanslara ve bu frekanslarda sınırlı bir artış veya azalışa ihtiyacımız vardır. Daha önce, küçük açı değişimlerinin özellikle 2. ve 3. bantlarda küçük değişimlere yol açtığını Şekil 4.5 ile göstermiştik. Bu durumun RT fenomeni üzerindeki etkilerini incelemek için,  $\varphi$  açısının  $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $75^\circ$  ve  $90^\circ$  değerleri için ikişer ikişer kombinasyonlarını ve ardından kademeli açı artış ve azalışlarını göz önünde bulundurarak, RT amacıyla kullanılacak çiftlere ait mini bant yapılarını analiz ettik. Öncelikle, düşük simetrlili uyduların açılara bağlı olarak ortaya çıkan mini bant aralıklarını, daha önce incelediğimiz bant diyagramlarında ele aldık. 2. bant için yaptığımız bu inceleme sonucunda, bu mini bant yapılarının, yani ortak geçişe sahip ancak bağımsız frekanslar içeren çiftlerin, yalnızca  $0^\circ$  ve  $15^\circ$  ile  $60^\circ$  ve  $75^\circ$  çiftleri için gözlemlendiğini bulduk. Ancak,  $45^\circ$  ve  $60^\circ$  çiftleri arasında yalnızca çok sınırlı bir şekilde ortaya çıkmaktadır.

Şekil 4.21,  $r = 0,2a$ ,  $r_c = 0,35$ ,  $r_a = 0,10a$  ve periyodiklik  $3a$  olarak tasarlanmış yapının 3. bandında, uydu açısı çiftlerine göre elde edilen bant yapılarını göstermektedir. Yapılan analizde,  $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $75^\circ$  ve  $90^\circ$  gibi açılar arasında oluşturulan tüm çiftlerin belirli frekans aralıklarında uygun geçişler sağladığı açıkça gözlemlenmiştir. Bu, düşük simetri yapılarının etkilerini anlamamıza ve RT fenomeni için uygun frekans aralıklarını belirlememize olanak tanır. Her ne kadar 2. bantta belirgin frekans geçişleri sadece belirli çiftlerle sınırlı kalsa da, 3. bantta gözlemlenen geniş frekans geçişleri yelpazesi, yapının tasarımında daha esnek bir yaklaşım benimsememizi sağlamaktadır ve RT gibi fenomenlerin daha çeşitli koşullar altında elde edilebileceğini göstermektedir.





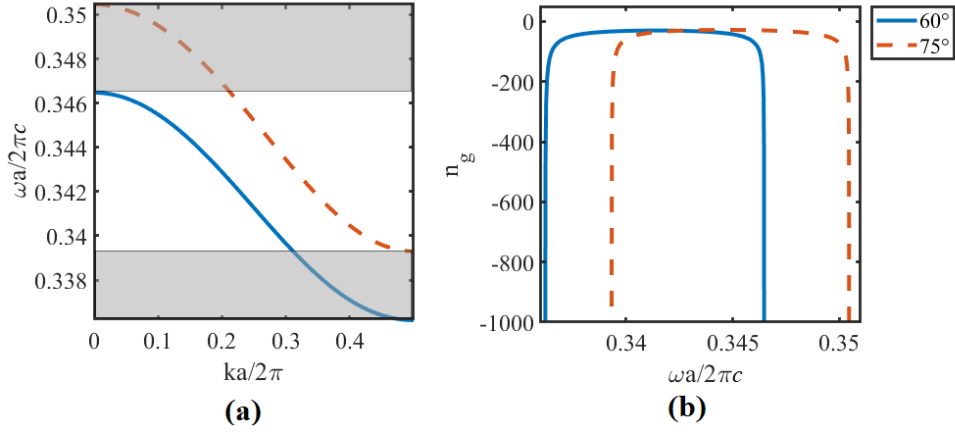
Şekil 4.20:  $r = 0, 2a$ ,  $r_c = 0, 35$ ,  $r_a = 0, 10a$  ve  $3a$  periyotlu olarak tasarlanmış yapının 2. bandında uydu açısı çiftlerine göre bant yapıları.



Şekil 4.21:  $r = 0, 2a$ ,  $r_c = 0, 35$ ,  $r_a = 0, 10a$  ve  $3a$  periyotlu olarak tasarlanmış yapının 3. bandında uydu açısı çiftlerine göre bant yapıları.

#### 4.4.1 Bölgesel Lokalizasyonların İncelenmesi

Bölgesel lokalizasyonları incelemek için daha fazla aday frekans sunan 3. banda odaklanarak çalışmalarımızı sürdürdük. Daha önceki çalışmalarımızda optimize yapı parametrelerini,  $a$  örgü sabiti olmak üzere  $r = 0,2a$ ,  $r_c = 0,35a$  ve  $r_a = 0,14a$  değerleriyle belirlemiştik. Şekil 4.22(a)'da, 3. geçiş bandı için  $60^\circ$  ve  $75^\circ$  dereceli RT yapısına ait bant diagramları ve 4.22(b)'de grup indisi  $n_g$  gösterilmiştir. Tablo 4.2, bu bant diyagramları üzerinden elde edilen PhCC'nin



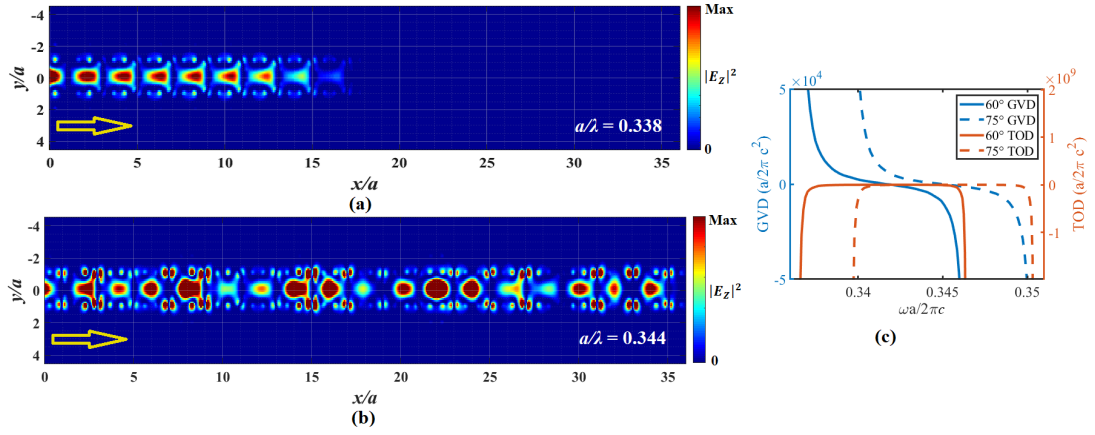
Şekil 4.22: 3. geçiş bandı için  $60^\circ$  ve  $75^\circ$  dereceli RT yapısına ait (a) bant diagramları ve (b)  $n_g$ .

bant merkez frekansı  $\omega_0$ , bant genişliği  $\Delta\omega$ , ortalama grup indisi  $\langle n_g \rangle$ , ışığın vakumdaki hızı  $c$  ile çarpılmış ortalama grup hızı  $\langle v_g \rangle$  ve grup bant ürünü  $GBP$  değerlerini karşılaştırmalı olarak sunmaktadır. Bu analizde, uydular olmadan (Model A) ve  $60^\circ$  ile  $75^\circ$  açılımlarına yerleştirilmiş uydularla (Model B) elde edilen değerler karşılaştırılmıştır. Özellikle  $60^\circ$  derecelik yapı içerisinde tuzaklanan  $\omega_0 = 0,341294a/\lambda$  frekanslı atma için  $E_z$  dağılımları, yapının  $60^\circ$ 'den  $75^\circ$ 'ye geçiş yaptığı  $17,5a$  civarı bölgede uzaysal olarak lokalize olmakta ve RT şartını sağlamaktadır. Şekil 4.23(a)'de görüldüğü gibi, bu frekans için yapının  $36a$  uzunluğundaki kısmında kesintisiz bir şekilde lokalizasyon gerçekleşmektedir. Aynı zamanda, yapının  $60^\circ$  ve  $75^\circ$  açılımlarına sahip uydular için ortak geçiş frekansı olan  $\omega_0 = 0,345040969a/\lambda$  için tüm yapı boyunca ilerleme sağlanmakta olup, bu frekanslara ait GVD ve TOD değerlerinin görece olarak düşük olduğu ve sinyal bütünlüğünün korunduğu Şekil 4.23(c)'de gösterilmiştir. Tablo 4.2'dan açıkça görüleceği üzere PhC CCW'ye uyduların eklenmesi, özellikle 3. bant için hem  $n_g$  hem de  $\Delta\omega$  değerlerini önemli ölçüde iyileştirmiştir. Önerilen  $\varphi = 60^\circ$  ve  $\varphi = 75^\circ$  yapılarında,  $\Delta\omega$  sırasıyla %50,07 ve %32,67 oranında artarken,  $\langle n_g \rangle$  değerleri %282,16 ve %1813,72 oranında artış göstermiştir. Bu iyileştirmeler, 3. bandın

GBP'sini %675 oranında artırarak bulgularımızın potansiyelini vurgulamaktadır.

Model	$r_a$	$\varphi$	$\omega_0 (a/\lambda)$	$\Delta\omega (a/\lambda)$	$\langle n_g \rangle$	$\langle v_g \rangle (c)$	$GBP$
A	—	—	0,353157000	0,010815	162,2441584	0,018918020	0,506709799
B	0,14	$60^\circ$	0,341294000	0,016230	620,0413845	0,020572013	3,420130191
B	0,14	$75^\circ$	0,345040969	0,014351	3104,8971230	0,022326015	3,425385380

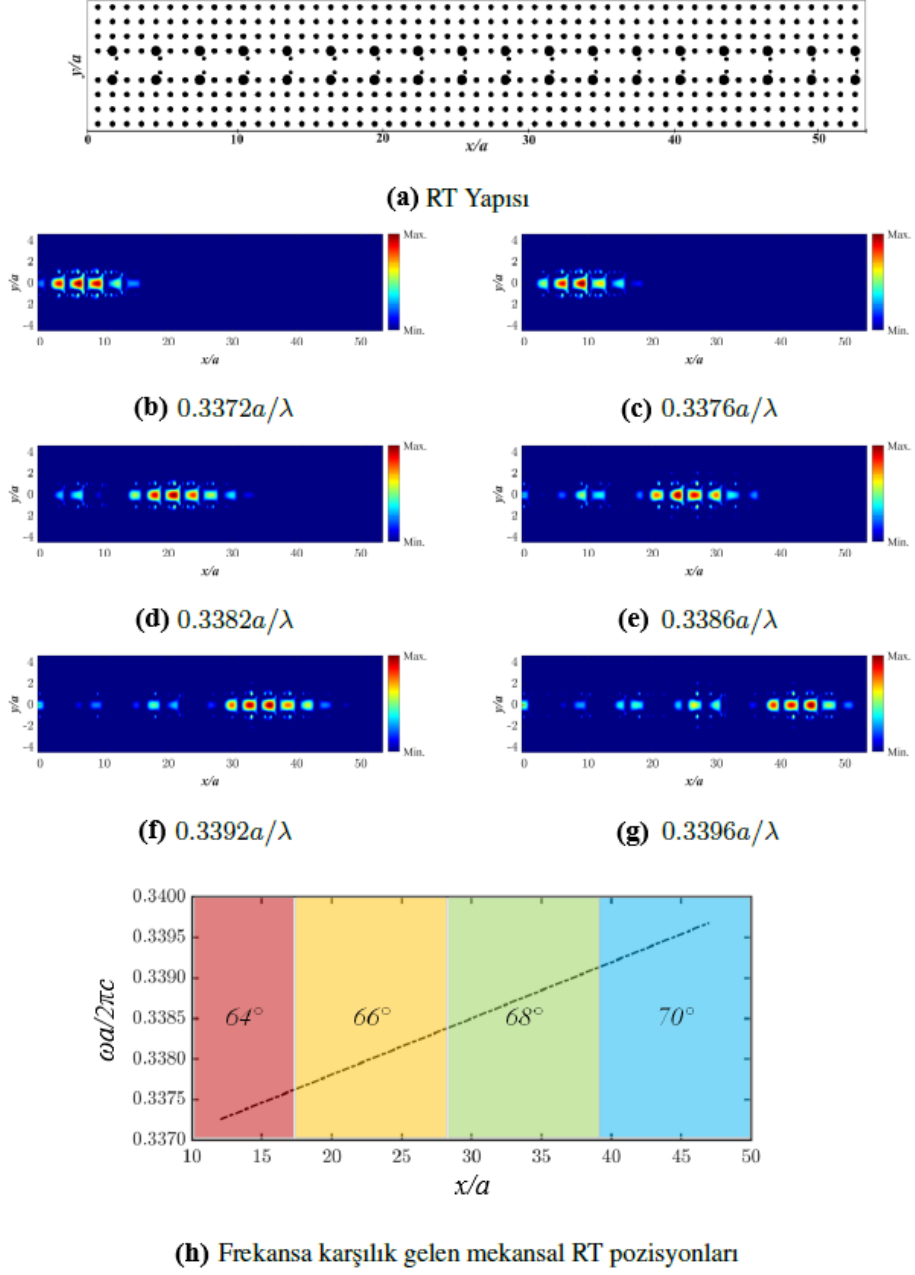
Tablo 4.2: 3. bant modunda, uydular olmadan (Model A) ve  $60^\circ$  ile  $75^\circ$  açılarna yerleştirilmiş uydularla (Model B) PhCC'nin bant merkez frekansı  $\omega_0$ , bant genişliği  $\Delta\omega$ , ortalama grup indisi  $\langle n_g \rangle$ , ışığın vakumdaki hızı  $c$  ile çarpılmış ortalama grup hızı  $\langle v_g \rangle$  ve  $GBP$ . Tüm değerler, uydular eklenmeden önceki (A) ve sonradan eklenerek oluşturulan (B) yapının performanslarını değerlendirmek için kullanılmaktadır.



Şekil 4.23:  $\varphi = 60^\circ$  ve  $\varphi = 75^\circ$  dereceli uydulardan oluşan tuzaklama yapısına ait (a) tuzaklama ve (b) geçiş bantlarına ait  $E_z$  profilleri ve (c) mevzubahis bantlara ait TOD, GVD değerleri.

#### 4.4.2 Gökkuşağı Tuzaklaması ve Simetri Kırılması

Bu bulgulardan yola çıkarak, RT fenomenini bölgesel tuzaklamanın ötesine taşıyarak daha geniş bir frekans aralığında gerçekleştirmek amacıyla, kademeli olarak açının artırıldığı simetri kırıcı bir yapı tasarladık. Şekil 4.24(a)'da görüldüğü gibi,  $\varphi$  açısını  $2^\circ$  artışlarla kademeli olarak artırdık. Bu yapısal değişiklikle simetriyi kademeli olarak kırarak, ışığı  $(0,3372 - 0,3396)a/\lambda$  normalleştirilmiş frekans aralığında uzaysal olarak başarıyla tuzakladık. Şekil 4.24(b)-(g)'de gösterilen  $E_z$  alan profilleri, lokalizasyonun frekansla yakından ilişkili olduğunu açıkça ortaya koymaktadır. Önceki çalışmalarda elde edilen mini bant aralıklarını kullanarak bu yapıyı tasarlayarak başarılı bir şekilde



Şekil 4.24:  $\varphi = 60^\circ$  ile  $\varphi = 75^\circ$  için  $2^\circ$  kademeli artışlarla oluşturulan gökkuşağı tuzaklama yapısının yapı şematiği ve yapı içerisinde simüle edilen elektrik alan profilleri: (a)  $\varphi = 60^\circ$  açındaki başlangıç uyduları ve kademeli olarak  $\varphi = 75^\circ$ 'e artan PhC eşlenik kavite dalga kılavuzunun üstten görünümü, (b)  $\omega = 0,3372a/\lambda$  için  $E_z$  alan yoğunlukları, (c)  $\omega = 0,3376a/\lambda$  için  $E_z$  alan yoğunlukları, (d)  $\omega = 0,3382a/\lambda$  için  $E_z$  alan yoğunlukları, (e)  $\omega = 0,3386a/\lambda$  için  $E_z$  alan yoğunlukları, (f)  $\omega = 0,3392a/\lambda$  için  $E_z$  alan yoğunlukları, (g)  $\omega = 0,3396a/\lambda$  için  $E_z$  alan yoğunlukları ve (h) frekansa karşılık gelen mekansal RT pozisyonları.

RT gerçekleştirdik. Bu mini bant aralığındaki küçük değişimlerle simetri kırılmasını yalnızca kavite içinde gerçekleştirerek fenomeni ortaya çıkarmayı başardık. Bu yapı, RT uygulamaları için son derece uygundur ve RT tabanlı herhangi bir cihazda kullanılabilir. Bu çalışmada asıl amacımızın, dalga kılavuzu kusur bölgesinde simetri kırma yoluyla RT kavramını göstermek olduğunu, demultipleksleme uygulamasını tam anlamıyla geliştirmek ve test etmek olmadığını vurgulamak önemlidir. Ayrıca, gözlemlenen etkilerin pratik uygulanabilirliği açısından PhC yapısının kusurlara karşı dayanıklılığı göz ardı edilemez. Simülasyonlarımızda, yapının kusurlara duyarlılığını test etmek amacıyla bazı değişiklikler yaptık. Dielektrik çubukların yarıçaplarında ve aralarındaki mesafede  $a \pm \%5$  oranında bir değişiklik, çalışma frekanslarında kaymalara neden olabilmektedir. Bu kaymalar dispersiyon özelliklerini etkileyebilse de, ışık tuzaklama etkisinin temel kavramı bozulmadan kalmaktadır. Bu bulgu, belirli uygulamalar için hassasiyetin önemli olduğunu, ancak genel olarak RT fenomeninin küçük değişimlere karşı dayanıklı olabileceğini göstermektedir.

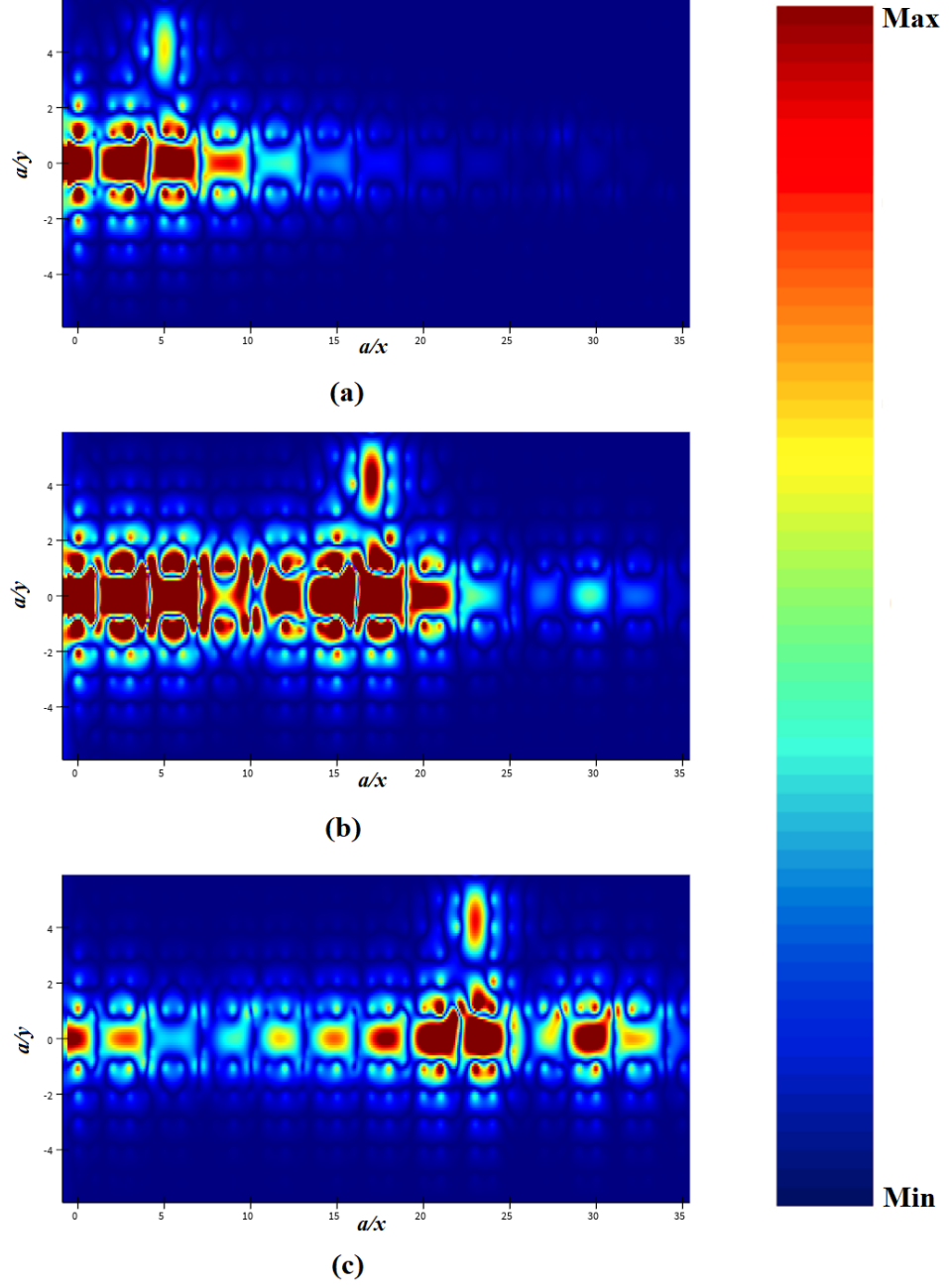
#### 4.4.3 Ayırıcı Kanal Tasarımı

Seçilen çalışma frekanslarında kanalların ayrıştırılabilirliğini göstermek amacıyla çeşitli simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. RT frekanslarının, lokalizasyonların karşılık gelen konumlarında eklenen kanallarla eşlenip ışığın başarılı bir şekilde iletildiğini gösteren genel bir kavramsal demonstrasyon sunulmuştur. Şekil 4.25(a)-(c)'de görüldüğü üzere, ayırıcı kanal ile başarılı bir eşleştirme sağlanmıştır.

Bununla birlikte, bu kanalların performansının iyileştirilmesi, özellikle yansıma, izolasyon (isolation) kayıpları, araya girme kayıpları (insertion loss) ve çapraz eşleşmelerin (Cross-Talk) ortadan kaldırılması için yoğun ve kapsamlı optimizasyon süreçleri gerektirmektedir. Bu noktada, kanalların verimliliğini artırmak ve mekanizmaların işlevselliğini tam anlamıyla sağlamak için daha ileri optimizasyon çalışmalarının yapılması, özellikle SNR'nin düşürülmesi gerektiğini belirtmek isteriz.

Bu çalışma, demultipleksleme uygulamasının tamamen geliştirilmesini hedeflemekte olup, temel kavramı ortaya koymayı amaçlamaktadır. Elde edilen sonuçlar, gelecekteki çalışmalar için bir temel oluşturarak, demultipleksleme yapılandırılmalarının daha ayrıntılı bir şekilde incelenmesi ve optimize edilmesi için bir başlangıç noktası sunmaktadır.

Gelecekte bu ayırıcı sistemin gerçekleştirilmesi ve ayrıca frekansların



Şekil 4.25: (a)  $0,33720a/\lambda$ , (b)  $0,33820a/\lambda$ , (c)  $0,33940a/\lambda$  normalize frekanslar için demultipleksleme amacıyla lokalizasyon ile ayırıcı kanala eşleşen frekanslara ait  $|E_z|$  profilleri

mekanik, manyeto-optik veya nonlinear etkilerle gerçek zamanlı olarak kontrolü için çalışmalarımızı sürdürmeyi planlamaktayız. Bu kavite yapılarından elde ettiğimiz tecrübenin yeni çalışmalara temel oluşturması bizim en öncelikli amacımızdır.



# BÖLÜM 5

## SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, döner simetrisinin azaltılmasıyla SL parametrelerinin iyileştirilmesi amacıyla yardımcı çubukların kullanımını araştırdık. Ayrıca, kavite yapısına seçici olarak düşük simetri modifikasyonları uygulayarak, yeni bir yöntemle RT fenomenini başardık. Bu teknik, fotonik cihazların üretiminde belirgin avantajlar sunmaktadır. Çalışmamızda elde edilen kararlı  $\omega_0$  ve  $\Delta\omega$  değerleri, tamamen optik kontrollü gecikme hatlarının, optik ayırıcıların ve birleştiricilerin tasarlanmasını mümkün kılarak zamanlama fonksiyonları için yeni çözümler sunmaktadır.

Çalışmada, CMT kullanılarak yapılan faz analizleri, CCW yapılarında bölgesel lokalizasyonlar ve frekans ayarlamalarının etkin bir şekilde gerçekleştirilebileceğini göstermiştir. Bu analizler, FDTD yöntemiyle yapılan iletim ve yansıma analizleriyle de uyumlu sonuçlar vermiştir, bu da modellemenin doğruluğunu ve yapıların tasarımında güvenilirliğini pekiştirmektedir. Yapılan  $Q$ -faktörü hesaplamaları, SL performansının yüksekliğine doğrudan işaret etmektedir ve bu yapıların optik uygulamalarda ne denli verimli olabileceğini göstermektedir.

Ayrıca,  $r_c$ ,  $r_a$  ve  $\varphi$  parametreleri ile ince ayar yapabilmek imkanı, CCW yapılarının esnekliğini ve performansını daha da artırmaktadır. Bu ince ayarlar, belirli frekanslarda lokalizasyonu optimize ederek, cihazların spesifik uygulamalarda daha etkin kullanılmasını sağlamaktadır. Özellikle, bu parametrelerin hassas kontrolü, yapıların yavaş ışık uygulamalarında istenen performans kriterlerine göre özelleştirilmesine olanak tanımaktadır; böylece optik iletişim, sensör teknolojileri ve zamanlama sistemleri gibi alanlarda daha ileri düzey cihazlar geliştirilebilecektir.

Yardımcı çubukların eklenmesi, özellikle 3. bant için hem  $n_g$  hem de  $\Delta\omega$  değerlerini önemli ölçüde iyileştirmiştir. Önerilen  $\varphi = 60^\circ$  ve  $\varphi = 75^\circ$  yapılarında,  $\Delta\omega$  sırasıyla %50,07 ve %32,67 oranında artarken,  $\langle n_g \rangle$  değerleri %282,16 ve %1813,72 oranında artış göstermiştir. Bu iyileştirmeler, 3. bandın GBP değerini

%675 oranında artırarak bulgularımızın potansiyelini vurgulamaktadır.

Elde edilen sonuçlar, SL uygulamaları için büyük bir potansiyel sunmaktadır. Özellikle, önerilen yapıların sahip olduğu görece olarak düşük GVD ve TOD değerleri, sinyalin bozulmadan yavaşlatılmasını ve bu etkilerin verimli bir şekilde kullanılmasını mümkün kılmaktadır. Bu, yavaş ışık etkilerini kullanarak optik sinyallerin güvenilir bir şekilde iletilmesini ve işlenmesini sağlayarak, optik iletişim ve zamanlama sistemlerinde daha yüksek doğruluk ve verimlilik elde edilmesine katkıda bulunur.

Özellikle, demultipleks mekanizmaları için seçici yönlendirme sağlayacak olan ekle-çıkart (add-drop) yapabilme kabiliyeti, bu yapılar üzerinde yapılan modifikasyonların potansiyelini açıkça ortaya koymaktadır. CCW yapılarının frekans seçiciliği ve bölgesel lokalizasyon kabiliyetleri, optik sinyallerin belirli dalga boylarında etkin bir şekilde ayrıştırılmasını ve yönlendirilmesini mümkün kılarak, demultipleksleme uygulamalarında büyük bir avantaj sunar. Bu ekle-çıkart mekanizmaları, belirli dalga boylarını seçici olarak ayırma veya ekleme yeteneği sayesinde, optik iletişim sistemlerinde kanal kapasitesini artırma ve veri yönlendirme süreçlerini optimize etme açısından kritik öneme sahiptir. Bu özellik, özellikle yoğun veri trafiğinin bulunduğu ağlarda yüksek verimlilik sağlayarak, optik sinyallerin minimum kayıpla ve yüksek doğrulukla işlenmesine olanak tanır.

Kırılan simetrisinin  $\varphi = 60^\circ$ 'den  $\varphi = 75^\circ$ 'ye kademeli olarak artmasıyla elde edilen dalga yayılım özellikleri, ilgi çekici olasılıklar sunmaktadır. Bu simetri kırılmaları, CCW yapılarında farklı modların birbirleriyle etkileşimini kontrol ederek, dalga yayılımını ve lokalizasyonunu hassas bir şekilde ayarlama olanağı sağlar. Mekânsal RT pozisyonları ile frekans arasındaki net lineer ilişki, herhangi bir RT tabanlı uygulama için avantajlı olabilir. Bu özellik, RT'nin doğrudan kullanılabilmesiyle uygulamalarda, özellikle optik filtreler, gecikme hatları ve sinyal işleme cihazları gibi alanlarda büyük bir potansiyel taşır. Tüm yapı, dalga bütünlüğünü koruyarak SL etkilerini ve RT'yi gerçekleştiren demultipleksör ve multipleksör cihazları için fırsatlar sunan nispeten düz ve düşük GVD ve TOD değerleri sergilemektedir. Bu durum, optik sinyallerin bozulmadan iletilmesini ve işlenmesini sağlayarak, yüksek doğruluk ve verimlilik gerektiren zaman alanı ve mekansal sinyal işleme uygulamaları için yeni alanlar açmaktadır.

Ek olarak, yardımcı çubuklar, mekanik veya termal etkileşimler gibi harici araçlar ile manipüle edilerek ışığın aktif olarak kontrol edilmesine olanak tanıyabilir. Bu durum, bu alanda araştırma fırsatları sunabilir ve nanoteknoloji uygulamalarında ilerlemelere yol açabilecek potansiyeller

barındırabilir. Özellikle, bu manipülasyon teknikleri, optik sinyallerin dinamik olarak ayarlanabilir optik devrelerde kullanılmasını sağlayarak, yeniden yapılandırılabilir(reconfigurable) fotonik cihazların geliştirilmesine kapı açabilir. Normalize frekans sonuçları, terahertz bölgesi veya mikrodalga alanı gibi çeşitli frekans bantlarına uyarlanabilir. Bu esneklik, CCW yapılarının çok çeşitli frekans bölgelerinde kullanılabilmesini mümkün kılabilir ve bu da optik haberleşme, algılama ve veri işleme alanlarında geniş bir uygulama yelpazesi sunabilir.

Genel olarak, RT ile artırılmış SL parametrelerine ulaşmak için yardımcı çubukların kullanımı, geniş bir uygulama yelpazesine sahip gelişmiş optik cihazların geliştirilmesi için önemli bir potansiyel göstermektedir. Bu tür cihazlar, modern iletişim teknolojilerinde ve optik bilgi işlem sistemlerinde önemli bir rol oynayabilir, bu da gelecekteki teknolojik gelişmelere önemli katkılarda bulunabilir. Bu çalışmamızın, gelecekteki araştırmalara ışık tutabileceğine ve işlevsel optik cihazların tasarımı için sağlam bir temel oluşturabileceğine inanıyoruz.

## KAYNAKLAR

- Alimenti, F. ve diğ. (2000). “A revised formulation of modal absorbing and matched modal source boundary conditions for the efficient FDTD analysis of waveguide structures”. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* 48.1, pp. 50–59. DOI: [10 . 1109 / 22 . 817471](https://doi.org/10.1109/22.817471) (ref. verildiği sayfalar [19](#), [20](#), [43](#)).
- Aravantinos-Zafiris, N. ve diğ. (2014). “Phononic crystals and elastodynamics: Some relevant points”. *AIP Advances* 4.12, p. 124203. DOI: [10 . 1063 / 1 . 4904406](https://doi.org/10.1063/1.4904406) (ref. verildiği sayfalar [18](#), [19](#)).
- Arreola-Lucas, A. ve diğ. (2019). “Experimental Evidence of Rainbow Trapping and Bloch Oscillations of Torsional Waves in Chirped Metallic Beams”. *Scientific Reports* 9 (1), p. 1860. DOI: [10 . 1038 / s41598 - 018 - 37842 - 7](https://doi.org/10.1038/s41598-018-37842-7) (ref. verildiği sayfalar [8](#), [47](#)).
- Baba, T. (2008). “Slow light in photonic crystals”. *Nature Photonics* 2.8, pp. 465–473. DOI: [10 . 1038 / nphoton . 2008 . 146](https://doi.org/10.1038/nphoton.2008.146) (ref. verildiği sayfalar [4–7](#), [11](#), [28](#), [30](#), [45](#)).
- Baba, T. ve diğ. (2009). “Dispersion-controlled slow light in photonic crystal waveguides”. *Proceedings of the Japan Academy. Series B, Physical and biological sciences* 85.10, pp. 443–453. DOI: [10 . 2183 / pjab . 85 . 443](https://doi.org/10.2183/pjab.85.443) (ref. verildiği sayfalar [28](#), [29](#)).
- Bagci, F. ve B. Akaoglu (2015). “Enhancement of buffer capability in slow light photonic crystal waveguides with extended lattice constants”. *Optical and Quantum Electronics* 47.3, pp. 791–806. DOI: [10 . 1007 / s11082 - 014 - 9953 - 8](https://doi.org/10.1007/s11082-014-9953-8) (ref. verildiği sayfa [44](#)).
- Barybin, A. A. ve V. A. Dmitriev (2002). *Modern Electrodynamics and Coupled-mode Theory: Application to Guided-wave Optics*. Rinton Press. ISBN: 9781589490079 (ref. verildiği sayfa [22](#)).
- Berenger, J.P. (1994). “A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves”. *Journal of Computational Physics* 114.2, pp. 185–200. DOI: [10 . 1006 / jcph . 1994 . 1159](https://doi.org/10.1006/jcph.1994.1159) (ref. verildiği sayfalar [21](#), [22](#)).

- Boyd, R. W. (2009). “Slow and fast light: fundamentals and applications”. *Journal of Modern Optics* 56.18-19, pp. 1908–1915. DOI: [10 . 1080 / 09500340903159495](https://doi.org/10.1080/09500340903159495) (ref. verildiği sayfa 6).
- Bushell, Z. L., M. Florescu ve S. J. Sweeney (2017). “High-Q photonic crystal cavities in all-semiconductor photonic crystal heterostructures”. *Phys. Rev. B* 95 (23), p. 235303. DOI: [10 . 1103 / PhysRevB . 95 . 235303](https://doi.org/10.1103/PhysRevB.95.235303) (ref. verildiği sayfalar 5–7, 30, 46).
- Crombie, A. C. (1959). *Augustine to Galileo: The History of Science A.D. 400-1650*. Falcon Educational Books (ref. verildiği sayfa 1).
- Danaie, M., A. Geravand ve S. Mohammadi (2018). “Photonic crystal double-coupled cavity waveguides and their application in design of slow-light delay lines”. *Photonics and Nanostructures - Fundamentals and Applications* 28, pp. 61–69. DOI: [10 . 1016 / j . photonics . 2017 . 11 . 009](https://doi.org/10.1016/j.photonics.2017.11.009) (ref. verildiği sayfa 44).
- Darrigol, O. (2012). *A History of Optics from Greek Antiquity to the Nineteenth Century*. Oxford University Press (ref. verildiği sayfa 1).
- Engelen, R. J. P. ve diğ. (2006). “The effect of higher-order dispersion on slow light propagation in photonic crystal waveguides”. *Optics Express* 14.4, pp. 1658–1672. DOI: [10.1364/OE.14.001658](https://doi.org/10.1364/OE.14.001658) (ref. verildiği sayfalar 28, 29).
- Erol, Y. ve H. H. Balık (2008). “A New Approach to Analysis of Rectangular Waveguides”. *BU-Journal of Science and Technology*, pp. 177–193 (ref. verildiği sayfa 20).
- Fan, S. ve diğ. (1998). “Channel drop filters in photonic crystals”. *Opt. Express* 3.1, pp. 4–11. DOI: [10.1364/OE.3.000004](https://doi.org/10.1364/OE.3.000004) (ref. verildiği sayfalar 5–7).
- Gan, L ve Z. Li (2015). “Photonic crystal cavities and integrated optical devices”. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy* 58.11, p. 114203. DOI: [10 . 1007 / s11433 - 015 - 5724 - 1](https://doi.org/10.1007/s11433-015-5724-1) (ref. verildiği sayfa 37).
- Gan, Q., Y. J. Ding ve F. J. Bartoli (2009). ““Rainbow” Trapping and Releasing at Telecommunication Wavelengths”. *Phys. Rev. Lett.* 102 (5), p. 056801. DOI: [10.1103/PhysRevLett.102.056801](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.102.056801) (ref. verildiği sayfalar 8, 47).
- Gao, Y. ve diğ. (2020). “Investigation of coupling effect between a unidirectional air waveguide and two cavities with one-way rotating state”. *Optica Applicata* Vol. 50, nr 1, pp. 49–59. DOI: [10.37190/oa200104](https://doi.org/10.37190/oa200104) (ref. verildiği sayfa 40).
- Gao, Y. F., M. Zhou ve W. Zhang (2012). “Novel dispersion properties of one-dimensional photonic crystals containing a defect made of twin prisms”. *Journal of Russian Laser Research* 33.3, pp. 211–216. DOI: [10.1007/s10946-012-9274-y](https://doi.org/10.1007/s10946-012-9274-y) (ref. verildiği sayfalar 7, 47).

- Ghaderian, P. ve A. Habibzadeh-Sharif (2021). “Rainbow trapping and releasing in graded grating graphene plasmonic waveguides”. *Opt. Express* 29.3, pp. 3996–4009. DOI: [10.1364/OE.414982](https://doi.org/10.1364/OE.414982) (ref. verildiği sayfalar 8, 47).
- Giden, I. H., M. Turdjev ve H. Kurt (2013). “Broadband super-collimation with low-symmetric photonic crystal”. *Photonics and Nanostructures - Fundamentals and Applications* 11.2, pp. 132–138. DOI: [10.1016/j.photonics.2012.12.001](https://doi.org/10.1016/j.photonics.2012.12.001) (ref. verildiği sayfalar 4, 25, 27, 28, 44).
- Griffiths, D.J. (2017). *Introduction to Electrodynamics*. Cambridge University Press. ISBN: 9781108357142 (ref. verildiği sayfalar 12, 15).
- Gumus, M., I. H. Giden ve H. Kurt (2018). “Broadband self-collimation in C2 symmetric photonic crystals”. *Opt. Lett.* 43.11, pp. 2555–2558. DOI: [10.1364/OL.43.002555](https://doi.org/10.1364/OL.43.002555) (ref. verildiği sayfa 5).
- Gumus, M. A ve diğ. (2019). “A reduced symmetric 2D photonic crystal cavity with wavelength tunability”. *Journal of Physics D: Applied Physics* 52.32, p. 325103. DOI: [10.1088/1361-6463/ab1f4b](https://doi.org/10.1088/1361-6463/ab1f4b) (ref. verildiği sayfalar 5, 39).
- Hao, R. ve diğ. (2010). “Novel slow light waveguide with controllable delay-bandwidth product and ultra-low dispersion”. *Opt. Express* 18.6, pp. 5942–5950. DOI: [10.1364/OE.18.005942](https://doi.org/10.1364/OE.18.005942) (ref. verildiği sayfalar 27, 44, 46, 47).
- Hayran, Z. ve diğ. (2016). “Numerical and experimental demonstration of a wavelength demultiplexer design by point-defect cavity coupled to a tapered photonic crystal waveguide”. *Opt. Lett.* 41.1, pp. 119–122. DOI: [10.1364/OL.41.000119](https://doi.org/10.1364/OL.41.000119) (ref. verildiği sayfa 47).
- He, C. ve diğ. (2021). “Dynamic modulation of slow light rainbow trapping and releasing in a tapered waveguide based on low-symmetric photonic crystals”. *Results in Physics* 28, p. 104592. DOI: [10.1016/j.rinp.2021.104592](https://doi.org/10.1016/j.rinp.2021.104592) (ref. verildiği sayfalar 8, 47).
- He, L. ve diğ. (2018). “A unidirectional air waveguide basing on coupling of two self-guiding edge modes”. *Optics & Laser Technology* 108, pp. 265–272. DOI: [10.1016/j.optlastec.2018.06.044](https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2018.06.044) (ref. verildiği sayfa 44).
- Huang, W. P. (1994). “Coupled-mode theory for optical waveguides: an overview”. *J. Opt. Soc. Am. A* 11.3, pp. 963–983. DOI: [10.1364/JOSAA.11.000963](https://doi.org/10.1364/JOSAA.11.000963) (ref. verildiği sayfalar 22, 23).
- Inc., Lumerical (2024). *Lumerical FDTD*. URL: <https://www.ansys.com/products/optics/fdtd> (ref. verildiği sayfa 43).
- Jackson, J. D. (1999). *Classical electrodynamics*. 3rd ed. New York, NY: Wiley. ISBN: 9780471309321 (ref. verildiği sayfa 12).

- Joannopoulos, J. D. ve diğ. (2008). *Photonic Crystals: Molding the Flow of Light (Second Edition)*. 2nd ed. Princeton University Press. ISBN: 0691124566 (ref. verildiği sayfalar [3](#), [11](#), [14](#), [15](#), [19](#), [24–26](#), [36–38](#), [40–43](#)).
- Johnson, S. G. ve J. D. Joannopoulos (2001). “Block-iterative frequency-domain methods for Maxwell’s equations in a planewave basis”. *Opt. Express* 8.3, pp. 173–190. DOI: [10.1364/OE.8.000173](#) (ref. verildiği sayfa [19](#)).
- Kawasaki, T., D. Mori ve T. Baba (2007). “Large Group Index under Zero GVD Condition in Photonic Crystal Coupled Waveguides”. *2007 4th IEEE International Conference on Group IV Photonics*, pp. 1–3. DOI: [10.1109/GROUP4.2007.4347697](#) (ref. verildiği sayfa [26](#)).
- Kubo, S., D. Mori ve T. Baba (2007). “Low-group-velocity and low-dispersion slow light in photonic crystal waveguides”. *Opt. Lett.* 32.20, pp. 2981–2983. DOI: [10.1364/OL.32.002981](#) (ref. verildiği sayfalar [11](#), [26](#), [44](#), [45](#)).
- Kurt, H. (2018). *Düşük Simetriye Sahip Periyodik ve Kuvazi-Periyodik Fotonik Yapıların nümerik ve Deneysel Analizi* (ref. verildiği sayfa [37](#)).
- Lee, K. ve S. A. Asher (2000). “Photonic crystal chemical sensors: pH and ionic strength”. English. *Journal of the American Chemical Society* 122.39, pp. 9534–9537. DOI: [10.1021/ja002017n](#) (ref. verildiği sayfa [3](#)).
- Li, J. ve diğ. (2008). “Systematic design of flat band slow light in photonic crystal waveguides”. *Opt. Express* 16.9, pp. 6227–6232. DOI: [10.1364/OE.16.006227](#) (ref. verildiği sayfa [44](#)).
- Li, Q. ve diğ. (2010). “Coupled mode theory analysis of mode-splitting in coupled cavity system”. *Opt. Express* 18.8, pp. 8367–8382. DOI: [10.1364/OE.18.008367](#) (ref. verildiği sayfalar [23](#), [25](#), [33](#), [34](#)).
- Little, B. E. ve diğ. (1999). “Vertically coupled glass microring resonator channel dropping filters”. *IEEE Photonics Technology Letters* 11.2, pp. 215–217. DOI: [10.1109/68.740708](#) (ref. verildiği sayfalar [5–7](#)).
- Liu, J. M. (2005). *Photonic Devices*. Cambridge University Press. ISBN: 9780511614255. DOI: [10.1017/CB09780511614255](#) (ref. verildiği sayfalar [40–42](#), [57](#)).
- Liu, Y. ve diğ. (2017). “Engineering rainbow trapping and releasing in ultrathin THz plasmonic graded metallic grating strip with thermo-optic material”. *Opt. Express* 25.2, pp. 1278–1287. DOI: [10.1364/OE.25.001278](#) (ref. verildiği sayfalar [8](#), [47](#)).
- Liu, Y. ve diğ. (2018). “Rainbow Trapping in Highly Doped Silicon Graded Grating Strip at the Terahertz Range”. *IEEE Photonics Journal* 10.3, pp. 1–9. DOI: [10.1109/JPHOT.2018.2816566](#) (ref. verildiği sayfalar [8](#), [47](#)).

- Mandelstam, V. A. ve H. S. Taylor (1997). “Harmonic inversion of time signals and its applications”. *The Journal of Chemical Physics* 107.17, pp. 6756–6769. DOI: [10.1063/1.475324](https://doi.org/10.1063/1.475324) (ref. verildiği sayfalar [31](#), [32](#), [34](#)).
- MATLAB (2024). *MATLAB Documentation*. URL: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html> (ref. verildiği sayfa [43](#)).
- Maxwell, J. C. (1865). “A dynamical theory of the electromagnetic field”. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* 155, pp. 459–512 (ref. verildiği sayfalar [1](#), [12](#)).
- MEEP (2024). *MEEP Documentation*. URL: <https://meep.readthedocs.io/en/latest/> (ref. verildiği sayfa [43](#)).
- Men, H. ve diğ. (2014). “Robust topology optimization of three-dimensional photonic-crystal band-gap structures”. *OPTICS EXPRESS* 22.19, pp. 22632–22648. DOI: [10.1364/OE.22.022632](https://doi.org/10.1364/OE.22.022632) (ref. verildiği sayfa [43](#)).
- Miller, S. E. (1954). “Coupled Wave Theory and Waveguide Applications”. *Bell System Technical Journal* 33.3, pp. 661–719. DOI: [10.1002/j.1538-7305.1954.tb02359.x](https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1954.tb02359.x) (ref. verildiği sayfa [22](#)).
- Moghaddam, M. K., A. R. Attari ve M. M. Mirsalehi (2013). “High coupling efficiency to a low dispersion slow light-supporting photonic crystal waveguide”. *Journal of the European Optical Society - Rapid publications* 8.0 (ref. verildiği sayfa [44](#)).
- Moghaddam, M. K. ve R. Fleury (2019). “Slow light engineering in resonant photonic crystal line-defect waveguides”. *Opt. Express* 27.18, pp. 26229–26238. DOI: [10.1364/OE.27.026229](https://doi.org/10.1364/OE.27.026229) (ref. verildiği sayfa [44](#)).
- Moreolo, M. S., V. Morra ve G. Cincotti (2008). “Design of photonic crystal delay lines based on enhanced coupled-cavity waveguides”. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics* 10.6, p. 064002. DOI: [10.1088/1464-4258/10/6/064002](https://doi.org/10.1088/1464-4258/10/6/064002) (ref. verildiği sayfalar [5–7](#)).
- MPB (2024). *MPB Documentation*. URL: <https://mpb.readthedocs.io/en/latest/> (ref. verildiği sayfa [19](#)).
- Neşeli, B. ve diğ. (2020). “Rainbow trapping in a tapered photonic crystal waveguide and its application in wavelength demultiplexing effect”. *J. Opt. Soc. Am. B* 37.5, pp. 1249–1256. DOI: [10.1364/JOSAB.388374](https://doi.org/10.1364/JOSAB.388374) (ref. verildiği sayfalar [8](#), [47](#)).
- Notomi, M., E. Kuramochi ve T. Tanabe (2008). “Large-scale arrays of ultrahigh-Q coupled nanocavities”. *Nature Photonics* 2.12, pp. 741–747. DOI: [10.1038/nphoton.2008.226](https://doi.org/10.1038/nphoton.2008.226) (ref. verildiği sayfa [11](#)).



- Notomi, M. ve diğ. (2001). “Extremely Large Group-Velocity Dispersion of Line-Defect Waveguides in Photonic Crystal Slabs”. *Phys. Rev. Lett.* 87 (25), p. 253902. DOI: [10.1103/PhysRevLett.87.253902](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.87.253902) (ref. verildiği sayfalar 4, 45).
- Oguz, H. ve diğ. (2024). “The effect of symmetry breaking in coupled cavity photonic crystal waveguide on dispersion characteristics”. *Optical and Quantum Electronics* 56.10, p. 1647. DOI: [10.1007/s11082-024-07583-1](https://doi.org/10.1007/s11082-024-07583-1) (ref. verildiği sayfalar 5, 8, 47).
- Poon, J. K. S. ve diğ. (2004). “Designing coupled-resonator optical waveguide delay lines”. *J. Opt. Soc. Am. B* 21.9, pp. 1665–1673. DOI: [10.1364/JOSAB.21.001665](https://doi.org/10.1364/JOSAB.21.001665) (ref. verildiği sayfa 28).
- Povinelli, M. L., S. G. Johnson ve J. D. Joannopoulos (2005). “Slow-light, band-edge waveguides for tunable time delays”. *Opt. Express* 13.18, pp. 7145–7159. DOI: [10.1364/OPEX.13.007145](https://doi.org/10.1364/OPEX.13.007145) (ref. verildiği sayfalar 28, 44).
- PYTHON (2024). *PYTHON 3.12.7 Documentation*. URL: <https://docs.python.org/> (ref. verildiği sayfa 43).
- Ríos, C. ve diğ. (2015). “Integrated all-photonic non-volatile multi-level memory”. *Nature Photonics* 9.11, pp. 725–732. DOI: [10.1038/nphoton.2015.182](https://doi.org/10.1038/nphoton.2015.182) (ref. verildiği sayfalar 6, 28).
- Sakoda, K. (2014). *Optical properties of photonic crystals*. Springer Berlin (ref. verildiği sayfalar 11, 14–18, 25–27, 36, 37, 39–43).
- Schulz, S A ve diğ. (2010). “Dispersion engineered slow light in photonic crystals: a comparison”. *Journal of Optics* 12.10, p. 104004. DOI: [10.1088/2040-8978/12/10/104004](https://doi.org/10.1088/2040-8978/12/10/104004) (ref. verildiği sayfa 44).
- Shi, S., C. Chen ve D. W. Prather (2004). “Plane-wave expansion method for calculating band structure of photonic crystal slabs with perfectly matched layers”. *J. Opt. Soc. Am. A* 21.9, pp. 1769–1775. DOI: [10.1364/JOSAA.21.001769](https://doi.org/10.1364/JOSAA.21.001769) (ref. verildiği sayfalar 18, 36, 43).
- Shu, J. ve Y. Mao (2015). “Study of the properties of slow light in planar photonic crystal coupled-cavity waveguides”. *AOPC 2015: Advances in Laser Technology and Applications*. Vol. 9671. SPIE, 96710O. DOI: [10.1117/12.2199249](https://doi.org/10.1117/12.2199249) (ref. verildiği sayfalar 11, 45).
- Strutt, J. W. (1887). “XVII. On the maintenance of vibrations by forces of double frequency, and on the propagation of waves through a medium endowed with a periodic structure”. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science* 24.147, pp. 145–159. DOI: [10.1080/14786448708628074](https://doi.org/10.1080/14786448708628074) (ref. verildiği sayfa 3).

- Strutt, J. W. ve W. Spottiswoode (1871). “V. On the theory of resonance”. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* 161, pp. 77–118. DOI: [10.1098/rstl.1871.0006](https://doi.org/10.1098/rstl.1871.0006) (ref. verildiği sayfa [2](#)).
- Taflove, A., S. C Hagness ve M. Picket-May (2005). “Computational electromagnetics: the finite-difference time-domain method”. *The Electrical Engineering Handbook* 3, pp. 629–670 (ref. verildiği sayfalar [19–22](#), [34](#), [36](#), [43](#)).
- Thévenaz, L. (2008). “Slow and fast light in optical fibres”. *Nature Photonics* 2.8, pp. 474–481. DOI: [10.1038/nphoton.2008.147](https://doi.org/10.1038/nphoton.2008.147) (ref. verildiği sayfa [7](#)).
- Tsakmakidis, K. L., A. D. Boardman ve O. Hess (2007). “‘Trapped rainbow’ storage of light in metamaterials”. *Nature* 450.7168, pp. 397–401. DOI: [10.1038/nature06285](https://doi.org/10.1038/nature06285) (ref. verildiği sayfa [47](#)).
- Üstün, K. ve H. Kurt (2010). “Ultra slow light achievement in photonic crystals by merging coupled cavities with waveguides”. *Opt. Express* 18.20, pp. 21155–21161. DOI: [10.1364/OE.18.021155](https://doi.org/10.1364/OE.18.021155) (ref. verildiği sayfalar [4](#), [45](#)).
- Vasseur, J. (2019). “The Plane Wave Expansion Method”. *Fundamentals and Applications of Acoustic Metamaterials*. John Wiley I& Sons, Ltd. Chap. 5, pp. 107–141. ISBN: 9781119649182. DOI: [10.1002/9781119649182.ch5](https://doi.org/10.1002/9781119649182.ch5) (ref. verildiği sayfalar [18](#), [43](#)).
- Velha, P ve diğ. (2006). “Ultra-high-reflectivity photonic-bandgap mirrors in a ridge SOI waveguide”. *New Journal of Physics* 8.9, p. 204. DOI: [10.1088/1367-2630/8/9/204](https://doi.org/10.1088/1367-2630/8/9/204) (ref. verildiği sayfa [6](#)).
- Vucic, J. ve diğ. (2001). “Design of photonic crystal microcavities for cavity QED”. *Phys. Rev. E* 65 (1), p. 016608. DOI: [10.1103/PhysRevE.65.016608](https://doi.org/10.1103/PhysRevE.65.016608) (ref. verildiği sayfa [39](#)).
- Xia, F. ve diğ. (2007). “Ultra-compact high order ring resonator filters using submicron silicon photonic wires for on-chip optical interconnects”. *Opt. Express* 15.19, pp. 11934–11941. DOI: [10.1364/OE.15.011934](https://doi.org/10.1364/OE.15.011934) (ref. verildiği sayfa [11](#)).
- Xiao, S. ve diğ. (2007). “A highly compact third-order silicon microring add-drop filter with a very large free spectral range, a flat passband and a low delay dispersion”. *Opt. Express* 15.22, pp. 14765–14771. DOI: [10.1364/OE.15.014765](https://doi.org/10.1364/OE.15.014765) (ref. verildiği sayfalar [11](#), [43](#)).
- Xu, Q. ve diğ. (2005). “Micrometre-scale silicon electro-optic modulator”. *Nature* 435.7040, pp. 325–327. DOI: [10.1038/nature03569](https://doi.org/10.1038/nature03569) (ref. verildiği sayfa [6](#)).

- Yablonovitch, E. (1987). “Inhibited Spontaneous Emission in Solid-State Physics and Electronics”. *Phys. Rev. Lett.* 58 (20), pp. 2059–2062. DOI: [10.1103/PhysRevLett.58.2059](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.58.2059) (ref. verildiği sayfa 3).
- (1993). “Photonic band-gap structures”. *J. Opt. Soc. Am. B* 10.2, pp. 283–295. DOI: [10.1364/JOSAB.10.000283](https://doi.org/10.1364/JOSAB.10.000283) (ref. verildiği sayfa 11).
- Yang, R., W. Zhu ve J. Li (2015). “Realization of “trapped rainbow” in 1D slab waveguide with surface dispersion engineering”. *Opt. Express* 23.5, pp. 6326–6335. DOI: [10.1364/OE.23.006326](https://doi.org/10.1364/OE.23.006326) (ref. verildiği sayfalar 7, 47).
- Yariv, A. ve diğ. (1999). “Coupled-resonator optical waveguide: a proposal and analysis”. *Opt. Lett.* 24.11, pp. 711–713. DOI: [10.1364/OL.24.000711](https://doi.org/10.1364/OL.24.000711) (ref. verildiği sayfalar 8, 39).
- Yasa, U. G. ve diğ. (2017). “High Extinction Ratio Polarization Beam Splitter Design by Low-Symmetric Photonic Crystals”. *J. Lightwave Technol.* 35.9, pp. 1677–1683 (ref. verildiği sayfa 4).
- Yasa, U. G. ve diğ. (2018). “Full utilization of semi-Dirac cones in photonics”. *Phys. Rev. B* 97 (19), p. 195131. DOI: [10.1103/PhysRevB.97.195131](https://doi.org/10.1103/PhysRevB.97.195131) (ref. verildiği sayfa 4).
- Yee, K. (1966). “Numerical solution of initial boundary value problems involving maxwell’s equations in isotropic media”. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 14.3, pp. 302–307. DOI: [10.1109/TAP.1966.1138693](https://doi.org/10.1109/TAP.1966.1138693) (ref. verildiği sayfalar 19–21).
- Yuksel, Z. M. ve diğ. (2024). “Enhanced self-collimation effect by low rotational symmetry in hexagonal lattice photonic crystals”. *Physica Scripta* 99.6, p. 065017. DOI: [10.1088/1402-4896/ad4426](https://doi.org/10.1088/1402-4896/ad4426) (ref. verildiği sayfalar 5, 28).
- Zhang, L. ve diğ. (2008). “Embedded ring resonators for microphotonic applications”. *Opt. Lett.* 33.17, pp. 1978–1980. DOI: [10.1364/OL.33.001978](https://doi.org/10.1364/OL.33.001978) (ref. verildiği sayfa 11).
- Zhao, Y. ve diğ. (2015). “Review on the Optimization Methods of Slow Light in Photonic Crystal Waveguide”. *IEEE Transactions on Nanotechnology* 14.3, pp. 407–426. DOI: [10.1109/TNANO.2015.2394410](https://doi.org/10.1109/TNANO.2015.2394410) (ref. verildiği sayfa 43).