

**ANKARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**ÇİZGİ KUSURLU FOTONİK KRİSTAL DALGA KILAVUZLARINA
IŞIĞIN BAĞDAŞTIRILMASI**

Osman ÖZDEMİR

FİZİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ANKARA
2014**

Her hakkı saklıdır.

TEZ ONAYI

Osman ÖZDEMİR tarafından hazırlanan “Çizgi Kusurlu Fotonik Kristal Dalga Kılavuzlarına Işığın Bağdaştırılması” adlı tez çalışması 26/11/2014 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Doç. Dr. Barış AKAOĞLU
Ankara Üniversitesi, Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Jüri Üyeleri :

Başkan : Yrd. Doç. Dr. Alpan BEK
Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fizik Anabilim Dalı

Üye : Doç. Dr. Barış AKAOĞLU
Ankara Üniversitesi, Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Üye : Yrd. Doç. Dr. Ş. Barış EMRE
Ankara Üniversitesi, Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. İbrahim DEMİR
Enstitü Müdür

ETİK

Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez içindeki bütün bilgilerin doğru ve tam olduğunu, bilgilerin üretilmesi aşamasında bilimsel etiğe uygun davrandığımı, yararlandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi beyan ederim.

26/11/2014

Osman ÖZDEMİR

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ÇİZGİ KUSURLU FOTONİK KRİSTAL DALGA KLAVUZLARINA IŞIĞIN BAĞDAŞTIRILMASI

Osman ÖZDEMİR

Ankara Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Barış AKAOĞLU

Fotonik kristaller bir ya da daha fazla boyutta periyodik olarak dizilen düzenli yapılardır. Bu yapılar fotonik bant boşluğuna sahip olmaları sayesinde ışığı kontrol edebilirler ve olağandışı optik özelliklerle birlikte birçok yenilikçi uygulama alanına sahiptirler. Bir fotonik tümleşik devrenin bir iletişim ağı sisteminde uygulaması olması için, fotonik kristal aygıtların boyunun mikro boyutların da altına düşürülmesine ihtiyaç vardır. Fakat küçük boyutlu fotonik kristal cihazlarda ortaya çıkan en kritik problem, dar fotonik kristal dalga kılavuzuyla yeterli miktarda ışığı bağdaştırmaktır. Bu sebepten ötürü, bu tez kapsamında daha geniş kesitli ışık kaynağını, dar fotonik kristal dalga kılavuzu ile bağdaştırmak için özel fotonik kristal bağdaştırıcılar tasarlanmıştır. Öncelikle fotonik kristal kare ve üçgen örgü meydana getirilmiş ve bunların çözümlenmesi yapılmıştır. Daha sonra fotonik kristal dalga kılavuzu oluşturulmuş ve bu kılavuzun girişinde basamaklı yapı ile inceltilmiş bağdaştırıcılar incelenmiştir. Sonrasında inceltici yapıya eklenen kusurların iletim performansı etkileri araştırılmıştır. Fotonik kristal yapılarda ışığın yavaşlatılması ışık-madde etkileşimini artırarak fotonik aletlerin performansını artırır. Bundan dolayı, tasarlanan bağdaştırıcıların iletim performansları yavaş ışık destekleyen dalga kılavuzunda hesaplanmıştır. Fotonik kristallerin bant yapıları düzlem dalga açılımı yöntemi ile belirlenmiştir. Atmanın zaman içinde ilerleyişi ve iletim spektrumları zaman bölgesinde sonlu farklar yöntemi hesaplamalarıyla elde edilmiştir.

Kasım 2014, 70 sayfa

Anahtar Kelimeler: Fotonik kristaller, fotonik kristal dalga kılavuzları, inceltici bağdaştırıcı, yavaş ışık, düzlem dalga açılımı yöntemi, zaman bölgesinde sonlu farklar yöntemi, grup hızı, grup indisi

ABSTRACT

Master Thesis

COUPLING OF LIGHT INTO LINE DEFECT PHOTONIC CRYSTAL WAVEGUIDES

Osman ÖZDEMİR

Ankara University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Physics Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Barış AKAOĞLU

Photonic crystals are regular array of structures that are periodic in one or more dimensions. They have the capability to control electromagnetic waves due to the existence of photonic bandgap. By means of this, photonic crystals possess unusual optical properties and various innovative application areas. For the application of a photonic-integrated circuit in a communication network system, the dimension of photonic crystal devices need to be scaled down to the sub-micro-range. However, the most critical problem that arises from the small size of photonic crystal devices is to couple sufficient amount of light to the narrow waveguide. For this reason, within the scope of this thesis, special photonic crystal couplers have been designed to couple light source of larger cross-sectional size to the narrow photonic crystal waveguide. Firstly, square and triangular shape photonic crystal lattices are created and analysed. Then, photonic crystal waveguide is generated and step shaped tapered coupler is examined at the entry of waveguide. After that, transmission performance effects of defects-added taper structure is investigated. The slowness of light in photonic crystal structures improves performance of the photonic devices with the increase of light-matter interaction. Because of this reason, transmission performance of designed couplers are calculated in waveguide supporting slow light. Band structures of photonic crystals are determined by plane-wave expansion method. The propagation of the pulse in time and transmission spectra are obtained by finite-difference time-domain calculations.

November 2014, 70 pages

Key Words: Photonic crystals, photonic crystal waveguides, taper waveguide, slow light, plane-wave expansion method, finite-difference time-domain method, group index, group velocity

TEŞEKKÜR

Yaptığı çalışmalarla hepimize güven ve heyecan veren, yüksek lisans eğitimim ve tez çalışmam boyunca bilgisini, önerisini ve yardımını benden esirgemeyen tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Barış AKAOĞLU'na (Ankara Üniversitesi, Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı), verdiği optik dersleriyle gelişimimde katkısı olduğuna inandığım sevgili hocam Sayın Doç. Dr. Hüseyin SARI'ya (Ankara Üniversitesi, Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı), beni bu günlere taşıyan sağlam temeli kuran ilkokul hocam Sayın Durali ÖZÇELİK'e ve her zaman yanımda olan, maddi ve manevi desteğini esirgemeyen sevgili annem Ayfer ÖZDEMİR, babam Hasan ÖZDEMİR ve ablam Burcu ÖZDEMİR'e teşekkür ederim.

Osman ÖZDEMİR

Ankara, Kasım 2014

İÇİNDEKİLER

TEZ ONAY SAYFASI

ETİK.....	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	iv
SİMGELER DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Önceki Çalışmalar	2
2. KURAMSAL TEMELLER: FOTONİK KRİSTALLER.....	7
2.1 Fotonik Kristal Nedir?	7
2.2 Fotonik Bant Aralığı ve Önemi.....	9
2.3 Fotonik Kristal Örgü	12
2.4 2B Fotonik Kristaller ve Eşdeğer Dilim Fotonik Kristallerin Oluşturulması ..	12
2.5 Çizgi Kusurlu Fotonik Kristal Dalga Kılavuzları.....	15
2.6 Fotonik Kristallerin Tarihi Gelişimi ve Uygulama Alanları.....	17
3. MATERYAL VE YÖNTEM	23
3.1 Teorik Altyapı	24
3.2 Düzlem Dalga Açılımı Yöntemi	26
3.3 Zaman Uzayında Sonlu Farklar Yöntemi	28
3.4 Crystalwave Yazılımı.....	29
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	31
4.1 Fotonik Kristal Örgüler ve Bant Diyagramlarının Hesaplanması.....	31
4.1.1 Kare örgülü fotonik kristal	31
4.1.2 Üçgen örgülü fotonik kristal	32
4.2 Fotonik Kristallerde Dalga Kılavuzunun Oluşturulması ve Çözümlemesi....	34
4.3 Dilim Dalga Kılavuzundan FGD'ye Işığın Bağdaştırılması.....	36
4.3.1 İnceltmiş bağdaştırma teorisi	37
4.3.2 Basamaklı yapı ile inceltici bağdaştırma	40
4.3.3 Kusurlu yapı optimizasyonunun basamaklı inceltici bağdaştırıcıya etkisi....	46
4.4 Işık Hızının Yavaşlatılması	51
4.4.1 Yavaş ışık rejimine sahip dalga kılavuzunun oluşturulması ve analizi	53

4.4.2 Yavaş ışık dalga kılavuzuna ışığın bağdaştırılması	56
4.5 Yapılan Çalışmaların Optik Haberleşme Dalgaboyuna Uygun Hale Getirilmesi	60
4.6 Üretim Hatalarının Bağdaştırma Performansına Etkisi.....	61
5. SONUÇ.....	63
KAYNAKLAR	66
ÖZGEÇMİŞ.....	70

SİMGELER DİZİNİ

ω	Açısal frekans
λ	Dalga boyu
$\vec{k}$	Dalga vektörü
r	Deşik çapı
ϵ	Dielektrik sabiti
$\vec{E}$	Elektrik alan vektörü
v_G	Grup hızı
n_G	Grup indisi
c	Işığın vakumdaki hızı
$\vec{H}$	Manyetik alan vektörü
μ	Manyetik alınganlık
α	Örgü parametresi
ρ	Yük yoğunluğu

Kısaltmalar

FBA	Fotonik bant aralığı
FDTD	Zaman uzayında sonlu farklar
FK	Fotonik kristal
FKD	Fotonik kristal dalga kılavuzu
GVD	Grup hızı dağınımı
PML	Mükemmel uyumlu tabaka
PWE	Düzlem dalga açılımı
TE	Enine elektrik
TM	Enine manyetik

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1 FDTD yöntemi ile J-coupler'in performansının benzetimi (Prather vd. 2002)	3
Şekil 1.2 Hava ortamında dolu çubuklardan oluşan bir FK içine ucu sivriltilmiş silikon malzemeli harici bir bağdaştırıcı konularak bağdaştırma (Mekis ve Joannopoulos 2001).....	3
Şekil 1.3 Çeşitli FK ışık inceltici geometrilerinin iletim spektrumu (Happ vd. 2001)	4
Şekil 1.4 Yumuşak daralımlı kare örgüye sahip ışık inceltici FK yapı (Bienstman vd. 2003)	5
Şekil 1.5 Yumuşak daralımlı üçgen örgüye sahip ışık inceltici FK yapı (Pottier vd. 2003).....	5
Şekil 1.6 Yumuşak daralımlı FK ışık incelticiler (Khoo vd. 2005)	6
Şekil 2.1 1B, 2B ve 3B FK örnekleri (Sukhoivanov ve Guryev 2009).....	8
Şekil 2.2 Fotonik bant aralığı (Joannopolulos 2008)	10
Şekil 2.3 1B fotonik kristalin bant yapısı (Sukhoivanov ve Guryev 2009)	11
Şekil 2.4 2B FK örgü tipi örnekleri (Sukhoivanov ve Guryev 2009)	12
Şekil 2.5 Kare örgülü dielektrik çubuklu iki boyutlu fotonik kristal yapısı (Joannopoulos vd. 2008)	13
Şekil 2.6 Fotonik kristal dilim yapıları (Joannopoulos vd. 2008).....	13
Şekil 2.7 Elektrik Alan dağılımının kesit görüntüleri	14
Şekil 2.8.a. Nokta kusuru (rezonant kavite), b. çizgi kusuru (dalga kılavuzu)	15
Şekil 2.9 Havada asılı fotonik kristal dilim yapının üretildiğindeki şematik görünüşü (Carlsson vd. 2002)	16
Şekil 2.10 x-doğrultusunda bir sıra hava deliklerinin çıkartılmasıyla oluşturulmuş dilim fotonik kristal dalga kılavuzuna ait dağınım grafiği (Joannopoulos vd. 2008).....	16
Şekil 2.11 FKD'nin: a. $k_x=0.32\pi/a$ noktasında, b. $k_x=0.5\pi/a$ noktasında y-tek kipinin H_z alan dağılımı (Joannopoulos vd. 2008).....	17
Şekil 2.12 YMK örgülü 3B FK'in bant yapısı (Sukhoivanov ve Guryev 2009).	18
Şekil 2.13 Elmas örgülü 3B FK'in bant yapısı (Sukhoivanov ve Guryev 2009).....	19
Şekil 2.14 Ters YMK örgüye sahip FK'in bant yapısı (Sukhoivanov ve Guryev 2009).....	19
Şekil 2.15 Ters YMK örgülü 3B fotonik kristal (Sukhoivanov ve Guryev 2009).....	20
Şekil 3.1 Crystalwave programından ekran alıntısı	29
Şekil 3.2 Crystalwave programında benzetim sırasında alınmış ışık demetinin ikiye ayrılması görüntüsü	30
Şekil 4.1.a. Kare örgüye göre dizilmiş silindirik çubuklardan oluşan fotonik kristal, b. Ters uzayda simetri noktaları	31
Şekil 4.2 Kare örgülü yapı için daraltılamaz Brillouin alanı kenarlarında dağınım diyagramları.....	32
Şekil 4.3.a. Üçgen örgüye göre dizilmiş silindirik deliklerden oluşan FK, b. Ters uzayda simetri noktaları	33
Şekil 4.4 Şekil 4.3'deki yapı için daraltılamaz Brillouin alanı kenarlarında dağınım diyagramları.....	33
Şekil 4.5 Fotonik kristal örgü ve dalga kılavuzunun oluşturulması.....	34
Şekil 4.6.a. Tasarlanan üçgen fotonik kristal yapının bant diyagramı, b. Oluşturulan FKD fotonik bant aralığı içindeki izinli kipler	35
Şekil 4.7 Bir kipli dalga kılavuzu için elektrik alan görüntüleri	36
Şekil 4.8 Dielektrik dalga kılavuzundan FKD'ye direk bağlantı	37
Şekil 4.9.a. İnceltilmiş dalga kılavuzunun genel görünümü, b. İnceltilmiş bir dalga kılavuzunda kip dönüşümü için basamak analizini gösteren diyagram (Khoo vd. 2005).....	38
Şekil 4.10 Çeşitli basamak uzunluklarına göre tasarlanmış FK bağdaştırıcılar	41

Şekil 4.11 Bağdaştırıcıların basamak uzunluklarına göre gösterdikleri iletim performansları ...	42
Şekil 4.12 Değişken basamak uzunluklu bağdaştırıcı yapısı	44
Şekil 4.13 Doğrusal olmayan bağdaştırıcı girişi	44
Şekil 4.14 İçbükey ve dışbükey inceltici bağdaştırıcı tasarımlarının iletim grafiği	44
Şekil 4.15 Basamaklar arasına yerleştirilmiş kusurlara göre bağdaştırıcı tasarımları.....	46
Şekil 4.16 2.5a basamak uzunluklu bağdaştırıcının kusur tasarımlarına göre iletim grafiği (kusur yarıçapı: $r/2$).....	47
Şekil 4.17 3.5a basamak uzunluklu bağdaştırıcının kusur tasarımlarına göre iletim grafiği (kusur yarıçapı: $r/2$).....	48
Şekil 4.18 4.5a basamak uzunluklu bağdaştırıcının kusur tasarımlarına göre iletim grafiği (kusur yarıçapı: $r/2$).....	48
Şekil 4.19 Dışbükey inceltici bağdaştırıcının kusur tasarımlarına göre iletim grafiği	50
Şekil 4.20 İçbükey inceltici bağdaştırıcının kusur tasarımlarına göre iletim grafiği	50
Şekil 4.21 Yavaş ışık dalga kılavuzunun oluşturulması.....	53
Şekil 4.22 Süper Hücre ve süper hücrenin alan dağıtım görünümleri,.....	54
Şekil 4.23 Çizgi kusuru çevresindeki ilk iki sıra deliklerin konumunun genişletilmesi sonucu elde edilen grup indisi-frekans grafiği	55
Şekil 4.24 Çizgi kusuru çevresindeki ilk sıra deliklerin konumunun genişletilmesi, ikinci sıra deliklerin konumunun daraltılması sonucu elde edilen grup indisi-frekans grafiği.....	56
Şekil 4.25 Dışbükey inceltici bağdaştırıcıya sahip yavaş ışık dalga kılavuzuna sahip FK kesiti.....	57
Şekil 4.26 Yavaş ışık FKD'nin ışık ile etkileşimine ait alan profili görüntüsü	57
Şekil 4.27 Yavaş ışık dalga kılavuzu bağdaştırıcılarının iletim grafiği	58
Şekil 4.28 Dışbükey inceltici bağdaştırıcının kusur optimizasyonuna ait yavaş ışık iletim grafiği (kusur çapı: $r/2$)	59
Şekil 4.29 Örgü noktası konum toleransı 0.05a olan FKD'ye ait iletim grafiği	62
Şekil 4.30 Örgü noktası konum toleransı 0.02a olan FKD'ye ait iletim grafiği	62

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 4.1 Eşit basamak uzunluklu bağdaştırıcılar ile elde edilen en yüksek iletim değerleri.....	43
Çizelge 4.2 Dışbükey ve içbükey inceltici bağdaştırıcı tasarımlarının iletim çizelgesi.....	45
Çizelge 4.3 Düzenli basamak inceltici bağdaştırıcıların tasarım, kusur çapı ve basamak uzunluklarına göre iletim değerleri	49
Çizelge 4.4 Değişken basamak uzunluklu inceltici bağdaştırıcıların tasarım, kusur çapı ve basamak boyu değişim tipine göre iletim değerleri	51
Çizelge 4.5 GVD'nin düşük olduğu frekans aralığında bağdaştırıcıların yavaş ışık iletimi	58
Çizelge 4.6 Dışbükey inceltici bağdaştırıcının kusur optimizasyonuna ait yavaş ışık iletim çizelgesi.....	60

1. GİRİŞ

Fotonik kristaller (FK) bir ya da daha fazla boyutta periyodik dizilime sahip düzenli yapılardır. Periyodik yapılar elektromanyetik dalgaların belirli bir frekans aralığında ilerlemelerini tüm yönlerde engelleyebilirler. Bu aralık fotonik bant aralığı (FBA) olarak bilinir. Araştırmacılar yaklaşık son 25 yıldır fotonik kristaller üzerine yoğun bir şekilde odaklanmışlardır. Bunun sebebi, klasik yarıiletkenlerle elektron akışının kontrolü ile benzerlik kurularak (Joannopoulos vd. 1997) fotonik kristallerin ışığın kontrolü ve akışının belirli bir kalıba sokulması aşamasında eşsiz özelliklere sahip olmasıdır. Kristal örgüye kusurlar eklendiğinde fotonik kristallerin uygulama alanları genişler ve bu da fotonik kristal dalga kılavuzları (FKD) (Johnson vd. 2000), geniş açılı ışın demeti ayırıcıları (Bayındır vd. 2000), FK kavite filtreleri (Akahane vd. 2003) gibi birçok kompakt tümleşik fotonik cihazların geliştirilmesine olanak tanır.

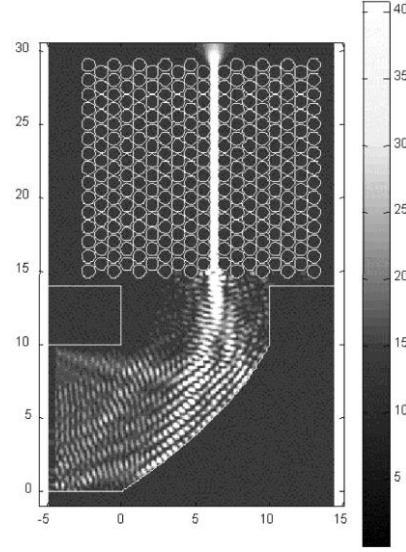
FKD'ler fotonik cihazların oluşumunda anahtar bileşenlerden biridir. Çünkü FKD'ler fotonik tümleşik devrelerde ışık ilerleyişi için bir ortam oluştururlar (Joannopoulos vd. 2008). FKD'ler fotonik kristal örgü içerisinde geometri değişimi ya da basitçe bir dizinin çıkarılmasıyla oluşturulabilir. Çizgi kusurları FBA içinde ışığın hapsedildiği ve kılavuzlandığı bir lokalize kip oluşmasına sebep olurlar. Bu eşsiz özellik FKD'lerin çok dar bir genişlikte olabilmesine ve keskin köşelerde bile ışığı rahatça kılavuzlamasına izin verir (Mekis vd. 1996). Bu da klasik dalga kılavuzlarının yüksek iletim gücü ve düşük radyasyon kaybı sınırlamalarının üstesinden gelir.

Bir fotonik tümleşik devrenin bir iletişim ağı sisteminde uygulaması olması için, fotonik kristal aygıtların boyunun mikro boyutların da altına düşürülmesine ihtiyaç vardır. Bu gereklilik ölçüm, tasarım ve fabrikasyon sürecinde birçok zorluklar içerir. Araştırmacılar ve bilim adamları; tasarım ve analiz, üretim süreci ve deneysel ölçüm tekniklerinde birçok zorlukla başa çıkmak zorunda kalırlar. Bu teknik zorluklar fotonik kristal cihazların ticarileştirilmesinde de ortaya çıkmaktadır. Fakat küçük boyutlu fotonik kristal cihazlarda ortaya çıkan en kritik problem, dar dalga kılavuzuyla yeterli miktarda ışığı bağdaştırmaktır. Fotonik kristal cihazları tasarlarken bu en önemli adımdır, çünkü uygun olmayan bağdaştırma sonucunda dalga kılavuzuna güç zayıf

iletilir, bu da optik cihazların fonksiyonelliğini ve güvenilirliğini etkiler. Bu sebeplerden dolayı, daha büyük boyutlu ışık kaynaklarını, dar fotonik kristal dalga kılavuzu ile bağdaştırmak için fotonik kristal bağdaştırıcılar tasarlanmaktadır. Bu gereklilikten ötürü bu tezde ışığın fotonik kristal örgüye çizgi kusurlu FKD'lere özel olarak tasarlanan bağdaştırıcılar kullanılarak bağdaştırılması amaçlanacaktır. Bu tez kapsamında ışık inceltici bağdaştırıcılar araştırılacak ve yüksek bağdaştırma verimliliği gelişiminin yanında çizgisel ışık inceltici kompaktlığı ve düşük yansıma kaybı karşılaştırılacaktır.

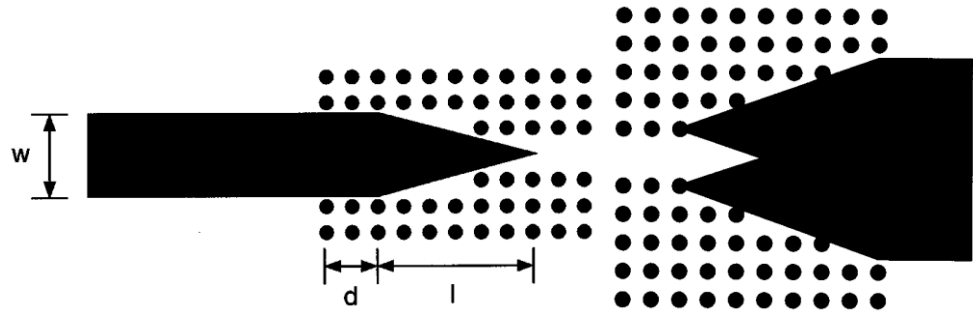
1.1 Önceki Çalışmalar

FKD'ye verimli bir bağdaştırma yapan çeşitli bağdaştırma metotları uygulanmıştır. Bunlar genel olarak dikey ve yatay bağdaştırma metotları olarak iki kategoriye bölünmüştür. Dikey bağdaştırma metotlarından biri ızgaraya benzer yapıda aygıtların fotonik kristal önüne getirilerek bağdaştırma için kullanılmasıdır (Tailaert vd. 2002). Diğer dikey bağdaştırma yöntemi inceltirilmiş fiberden FKD'ye serbest boşluk bağdaştırma yöntemini kullanır (Barclay vd. 2004). Fakat her iki metotta zaman zaman ışık kaynağından FKD'ye etkin ve verimli bağdaştırma konusundaki güvensizliklerinden dolayı tartışılmıştır. Bundan dolayı araştırmacılar yatay bağdaştırma yöntemlerine yüksek güvenilirlik ve yüksek bağdaştırma verimliliğinden dolayı yönelmişlerdir. Yatay bağdaştırma için yoğun çalışmalar iki boyutlu FKD'ler ele alınarak yerine getirilmiştir. J-coupler olarak adlandırılan bir parabolik ayna ışığı FKD'nin girişine odaklamak için tasarlanmıştır (Şekil 1.1) (Prather vd. 2002). Gelen ışık aynada yansır ve parabolik aynanın yakınsama özelliklerinden dolayı dalga kılavuzuna kılavuzlanmak için FKD'nin girişine odaklanır.



Şekil 1.1 FDTD yöntemi ile J-coupler'in performansının benzetimi (Prather vd. 2002)

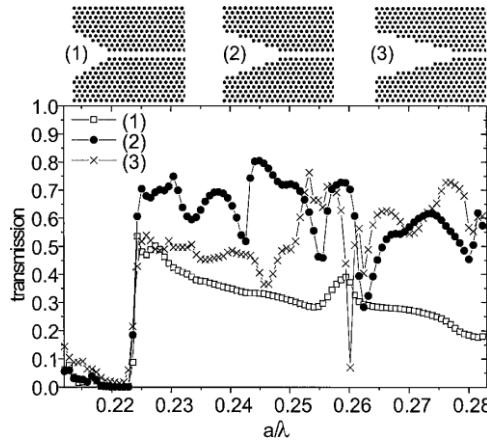
Başka bir yöntemse dalga kılavuzuna ışığı getirebilmek için harici bir inceltilmiş bağdaştırıcı dalga kılavuzu kullanır (Şekil 1.2) (Mekis ve Joannopoulos 2001). Bu bağdaştırma yöntemleri genellikle bağdaştırma verimliliğini indiren radyasyon kayıplarını ortaya koyar. Üstelik ek bağdaştırma aygıtları daha fazla potansiyel kayıp spotlarının varlığı anlamına geleceğinden kayıpları artırır.



Şekil 1.2 Hava ortamında dolu çubuklardan oluşan bir FK içine ucu sivriltilmiş silikon malzemeli harici bir bağdaştırıcı konularak bağdaştırma (Mekis ve Joannopoulos 2001)

Fotonik kristal incelticiler optik kaynak ve FKD arasında direk bağdaştırma için FKD'lerle bütünleştirilmişlerdir. Bu, adyabatik kip dönüşümünü sağlamak için, birim

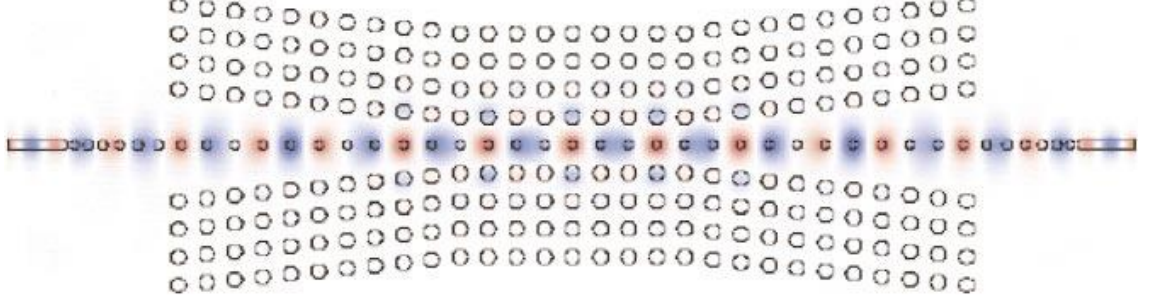
örgünün boyutunu değiştirerek yapılabilir (Palamaru ve Lalanne 2001, 2002). Geometrinin aşamalı bir şekilde değişimiyle inceltici basamaklar boyunca ışığın taşınması adyabatik kip dönüşümü sağlayacaktır. Bu metot tasarım için yüksek serbestlik derecelerine olanak verir. Fakat değişik delik büyüklükleri, hassas fabrikasyon kontrolü ve doğruluğuna ihtiyaç duyulmasından dolayı üretim zorluğuna sahiptir. Ayrıca özkipin adyabatik değişimi için büyük ölçüde deliklerin geometrisine de bağlıdır. İnceltici aynı zamanda ışığın FKD'ye bağdaşması için FK'in kendi yapısal formunda sunulabilir. Bu deşiklerin seçilerek basamaklı olarak incelen bir form şekline getirilmesiyle kristal yapı üzerinde uygulanabilir (Şekil 1.3) (Happ vd. 2001).



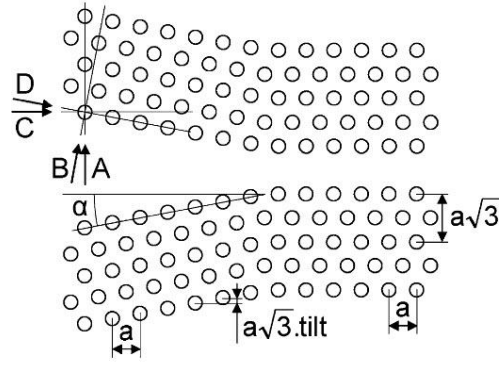
Şekil 1.3 Çeşitli FK ışık inceltici geometrilerinin iletim spektrumu (Happ vd. 2001)

Işık inceltici aygıt şeklinden dolayı yanal kip değişimi sağlar ve ışık kaynağı ile FKD arasında direk kip değişimi için kullanılabilir. Bu, kompakt bağdaştırma yapısı tasarımına izin verir ancak ışık incelticinin basamaklarında geri yansıma ve ciddi yüksek radyasyon kaybı sıkıntısı vardır. Bu problemi çözmek için, bir doğrusal yumuşak duvarlı FK ışık incelticiler bu kayıpları azaltmak için tasarlanmıştır (Bienstman vd. 2003, Pottier vd. 2003, Khoo 2005). Çizgisel FK inceltici kristal örgünün kırılması ve biçiminin değiştirilmesiyle oluşturulmuştur. Bienstman vd. (2003) tarafından tasarlanan geometride fotonik kristaller kare örgünün (Şekil 1.4), Pottier vd. (2003) tarafından tasarlanan geometride ise fotonik kristaller üçgen örgünün (Şekil 1.5) x doğrultusunda kademeli olarak kaydırılmasıyla bağdaştırıcının giriş ve

çıkışında ışık inceltici oluşturulmuştur. Bu sayede kip değişimi esnasında basamaklar arası yansımalarından kaçınılmaya çalışılmıştır.

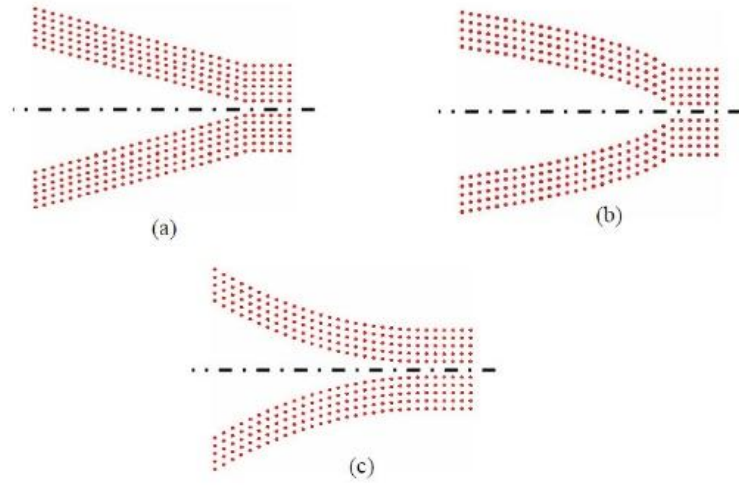


Şekil 1.4 Yumuşak daralımlı kare örgüye sahip ışık inceltici FK yapı (Bienstman vd. 2003)



Şekil 1.5 Yumuşak daralımlı üçgen örgüye sahip ışık inceltici FK yapı (Pottier vd. 2003)

Bu çalışmalardan sonra Khoo vd. (2005) yukarıdaki çalışmaları bir adım öteye taşımak ve iletim verimliliğini artırmak amacıyla kare örgülü fotonik kristalin girişine içbükey ve dışbükey yapıda ışık incelticiler tasarlayarak ölçümler almıştır (Şekil 1.6). Çalışma sonucunda dışbükey yapının en yüksek iletime sahip olduğu görülmüştür. Ancak bu yapıların hassas üretim ihtiyacı ve ışık inceltici boyunun büyük olması üretim aşamasına geçmesine engel olmuştur.



Şekil 1.6 Yumuşak daralımlı FK ışık incelticiler (Khoo vd. 2005)

a. Düz daralımlı FK, b. Dışbükey daralımlı FK, c. İçbükey daralımlı FK

2. KURAMSAL TEMELLER: FOTONİK KRİSTALLER

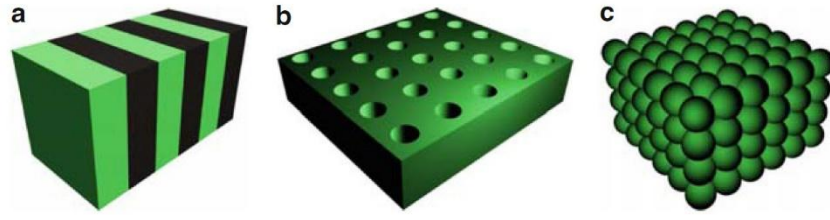
Fotonik kristalleri ve onların çalışma alanlarını incelemek, fotonik kristallere ışığın etkin ve verimli bir şekilde bağdaştırılmasının önemini çok daha anlaşılır kılacaktır. Bu bölümde fotonik kristallerin özellikleri ve uygulama alanları tartışılmıştır.

2.1 Fotonik Kristal Nedir?

Bir kristal, üzerinde ilerleyen bir elektron için periyodik bir potansiyel sunar ve kristalin öğeleri ve örgü geometrisi kristalin iletim özelliklerini oluşturur.

Bir periyodik potansiyelde kuantum mekaniği teorisi fiziğin büyük bir gizemini açıklar. İletim yapılan bir kristalde neden elektronlar serbest parçacıkların gaz dağılımı gibi ilerliyorlar? Cevap, elektronların dalga gibi ilerlemesi ve belirli ölçütlerde buluşan dalgaların bir periyodik potansiyel boyunca saçılmadan gidebilmesidir (Safsızlık ve kusurlardan saçılacak olmalarına rağmen). Bununla birlikte, örgü aynı zamanda belirli dalgaların ilerlemesini yasaklayabilir. Kristalin enerji bandında yasak aralıklar olabilir, yani elektronların belirli yönlerde belirli enerji ile ilerlemesine izin verilmez. Eğer örgü potansiyeli yeteri kadar güçlü ise, yasak aralık tüm olası yayılım yönlerini kapsamak için genişleyebilir ve tam yasak bant aralığını oluşturur. Örneğin, bir yarıiletken değerlik ve iletim bantları arasında bir tam yasak bant aralığına sahiptir.

Fotonik kristaller, kırılma indisi periyodik olarak değişen, yapay ya da doğal olarak oluşturulan optik yapılardır. Bu optik yapı, çok sayıda uygulamaya fırsat veren kendine özgü özelliklere sahiptir. Yapının geometrisine bağlı olarak fotonik kristaller üç ana kategoriye ayrılabilir: bir boyutlu (1B), iki boyutlu (2B) ve üç boyutlu (3B) yapılar (Şekil 2.1).



Şekil 2.1 1B, 2B ve 3B FK örnekleri (Sukhoivanov ve Guryev 2009)

a. 1B FK, b. 2B FK, c. 3B FK

Bir boyutlu fotonik kristallerde, dielektrik sabitinin periyodik değişimi yalnızca bir yönde olur. Diğer iki yönde yapı üniformdur. Bu şekildeki fotonik kristallere örnek olarak genellikle VCSEL lazerlerde dağınım yansıtıcı olarak kullanılan Bragg ızgarası verilebilir. Bunun yanında bazı yapılar çoğunlukla lenslerin, prizmaların ve diğer optik bileşenlerin yüzey yansımalarını azaltan yansıma engelleyici tabakalarda kalitenin artması için kullanılır.

İki boyutlu fotonik kristaller nispi olarak çeşitli yapılandırmalara sahip olabilirler. Çünkü iki yön boyunca dielektrik sabiti periyodikliği vardır. Üçüncü yön ortamı üniformdur. İki boyutlu fotonik kristalin iyi bir örneği periyodik olarak gözenekleştirilmiş silikondur. Bir başka örnek ise havada dielektrik çubukların periyodik olarak düzenlenmiş halidir. İki boyutlu fotonik kristaller doğal olarak da bulunabilirler. Bunun doğadaki yansıması kelebeğin kanatlarındaki desenlerdir. Bu renkli desen, kelebeğin kanadındaki mikro yapılara gelen ışığın kırınımına uğrayarak farklı renkler oluşturmasından meydana gelmiştir.

Üç boyutlu fotonik kristaller dielektrik sabitinin üç yönde periyodik olarak değiştiği yapılardır. Buna bağlı olarak olası fotonik kristal yapılandırmalarının sayısı bir boyutlu ya da iki boyutlu fotonik kristallerden çok daha fazladır. Yeni uygulama alanları keşfedebilmek için üç boyutlu yeni geometrik çizim elde etmek için çok sayıda çalışma ortaya çıkarılmıştır.

Bir yapının yansıması ışının açısına bağlıdır. Yani onu döndürdüğünüzde ışınım farklı dalga boylarında yansımaya başlar. Bundan dolayı, fotonik kristallerin optik özellikleri ortamın dielektrik sabiti ya da kırılma indisinin periyodik değişiminin varlığı ile hesaplanır. Bunun üzerine gözlemlenen etkiler katıhal yani kristal örgü içinde periyodik olarak dizilmiş atom ya da moleküllerden oluşan yapılar ile güçlü benzerlikler gösterir. Fotonik kristal fiziği ve katıhal fiziği arasındaki benzerlik, bu alanda uygulanan bazı hesaplama yöntemleri ve özellikler arasında paralellik kurulmasına olanak sağlar.

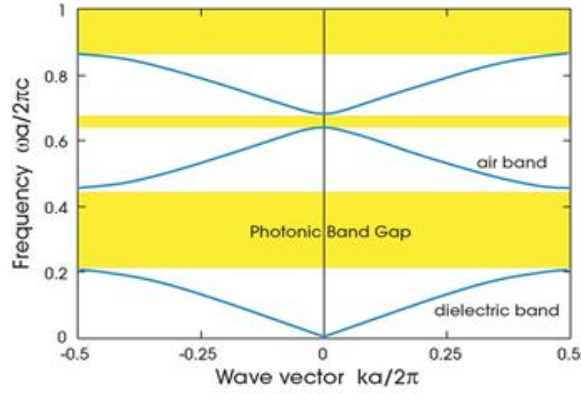
Fotonik kristal formdaki bir örgüde kırılma indisinin periyodik değişimi katıhal fiziğinin atomik örgüsü ile benzerdir. Fotonik kristaldeki fotonların davranışı bir atomik örgüdeki elektron ve deşiklerin davranışı ile benzerdir. Fotonik kristal ve katıhal yapıda örgü periyodikliğinin bulunmasından dolayı her iki durumda da içinde herhangi bir yapının bulunmadığı enerji bölgesi yani bant aralığı vardır. Teorik bakış açısına göre, bir fotonik kristaldeki öz fonksiyonların belirlenmesi, katıhal fiziğindeki parçacık dalga fonksiyonunun hesaplanması ile çok benzerdir. Bu benzerlik fotonik bant yapısını elde etmek için kullanılır.

Güçlü benzerliklerin yanında bazı önemli farklılıklar da vardır. Temel farklılıklardan bir tanesi parçacık enerji dağılımıdır. Fotonlar Bose-Einstein dağılımı gösterirken elektronlar Fermi-Dirac dağılımı gösterir. Bunun yanında elektronlar kristal içi alandan etkilenirken fotonlar etkilenmez. Bundan dolayı optik alan dağılımı ya da fotonik bant yapısının hesaplanması basitleşir.

2.2 Fotonik Bant Aralığı ve Önemi

Fotonik kristallerin pratik anlamda önemini belirleyen en önemli özellik fotonik bant aralığı sunmasıdır (**Şekil 2.2**). Fotonik bant aralığı, belirli frekans ve enerjideki ışık ilerlemesinin fotonik kristal içinde yasaklanacağı aralıktır. Işık, yapıya özgü fotonik bant aralığı içindeki bir frekansta ilerlediğinde tamamen yansır. Eğer periyodik yapı içine bir kusur konulursa oluşacak etki bir yarıiletkenin kristal yapısına konulan kusurun oluşturduğu etki ile aynı olur. Bunun anlamı fotonik bant aralığı içinde kusurun özfrekansına karşılık gelen enerjide yeni öz durumların görünmesidir. Bu sebeple, kusur

frekansındaki ışık yapı içinde ilerleyecek ya da eğer birden fazla kusur varsa ışık bir dalga kılavuzunda olduğu gibi kılavuzlanacaktır. Bundan dolayı, matematiksel ve fiziksel noktalarda katıhal fiziği ile fotonik kristal fiziği arasında çok güçlü benzerlikler vardır.

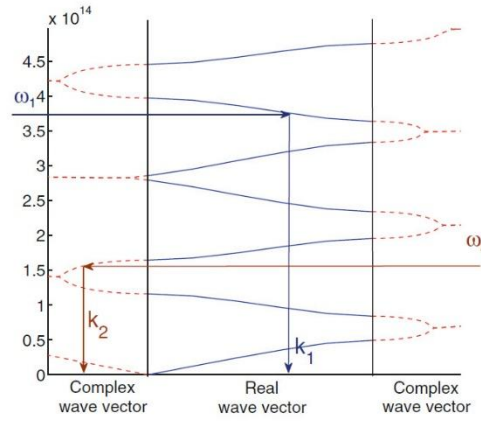


Şekil 2.2 Fotonik bant aralığı (Joannopolulos 2008)

Fotonik kristalin bant yapısı onun özellikleri hakkında en genel bilgiyi veren karakteristik yapıdır. Bu sonsuz bir periyodik yapının öz durumları ya da özfrekanslarının sayısı olarak gösterilir.

Özfrekans bir başka önemli terimdir. Buna aynı zamanda yapının çınlanım frekansı da denilir. Fotonik kristal sonsuz bir periyodik yapı olduğu için, yapıda bir takım Fresnel yansımaları görünür. İleri ve geri yayılan dalgalar arasındaki yapıcı ve yıkıcı girişim, ışımının yansımaya ya da geçmesine sebep olur.

Her bir öz durum ışınım dalga vektörünün özel değerine karşılık gelir. Fotonik kristalin boyutundan bağımsız olarak, bant yapısı iki boyutlu çizim olarak gösterilebilir. Bir boyutlu fotonik kristal için bant yapısı örneği şekil 2.3’de gösterilmiştir.



Şekil 2.3 1B fotonik kristalin bant yapısı (Sukhoivanov ve Guryev 2009)

Bant yapısının fiziksel anlamı ilerleyen ışınının içinde bulunduğu optik ortamın özellikleri ile ışınım özellikleri arasında bağlantı kurmaktır. Şekilde yatay eksen ışınının dalga vektörüne, dikey eksen ortamın çınlanım frekansına karşılık gelir. Fotonik kristale ω_1 frekansı ile bir ışınım geldiği durumu düşünelim. Bu ışınım yapının içine girdiği anda yapı tarafından izin verilen dalga vektörüne sahiptir. Herhangi bir dalga vektörünün değeri bant yapısından kolayca bulunabilir. Şekil 2.3'den görülebileceği üzere dalga vektörü değeri k_1 , ışınım frekansı olan ω_1 e karşılık gelir. Bu dalga vektörüne sahip olunması, ışınının yapı boyunca ilerlemesi anlamına gelir.

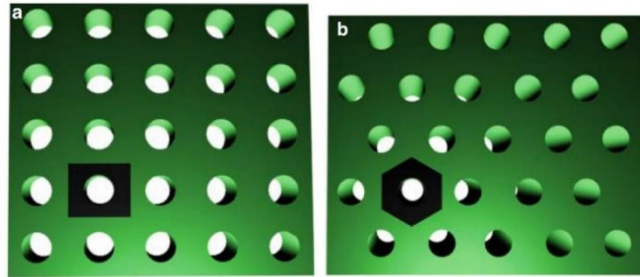
Eğer ışınım ω_2 frekansına sahipse, bu frekansının gerçek dalga vektörünün olmadığı bir frekans aralığına düştüğünü görürüz. Fakat ışınım hala k_2 karmaşık dalga vektörüne sahiptir. Dalga vektörünün sanal kısmı ışınım sönümüne karşılık gelir. Yani bu durum bu özel bölgenin frekansındaki ışınının yapıdan yansıyacağı anlamına gelir. Bununla birlikte, sönüm sonlu değerde olduğu süreçte, ışınım belirli bir mesafe boyunca yapının içine girebilecektir.

Aslında her iki durum da fotonik bant yapısı analizinin temel ilkelerini verir. Şöyle ki, periyodik ortam izinli ve yasak frekans bölgelerine sahiptir. Işınım yapı içerisinde sadece izinli frekanslarda ilerleyebilir. Aksi takdirde yansıyacaktır. Yasak frekans bölgelerinden genellikle fotonik bant aralığı olarak bahsedilir. Eğer ışınım izinli

frekansa sahipse, bant yapısında bulunabilen dalga vektörünün değerini alır. Bu son durum iki boyutlu ve üç boyutlu fotonik kristaller için son derece önemlidir. Çünkü bu yapıların dalga vektörleri ışının ilerleme yönüyle bağlantılıdır. Bu, fotonik kristalde güçlü açısal dağınım gibi birtakım ilginç etkilere sebep olan dalga ilerleme yönünün ayarlanmasına olanak sağlar.

2.3 Fotonik Kristal Örgü

Fotonik kristal literatüründe en çok kullanılan iki boyutlu yapılar hava ortamında kare örgü halinde dizilmiş dielektrik çubuklar ve dielektrik malzemenin üçgen örgü halinde delinmesiyle oluşan hava dolu deliklerdir (Şekil 2.4). Bu yapılar üzerinde genel düzenin dışındaki modifikasyonlar elektromanyetik dalganın yasaklı bant aralığında da yapı içinde bulunabilmesini sağlar. Buradaki elektromanyetik dalga fotonik kristalin düzenli bir biçimde olduğu yönlerde hareket edemez fakat düzensizliğin olduğu yerde hareket edebilir. Bu sayede fotonik kristal dalga kılavuzları elde edilebilir.

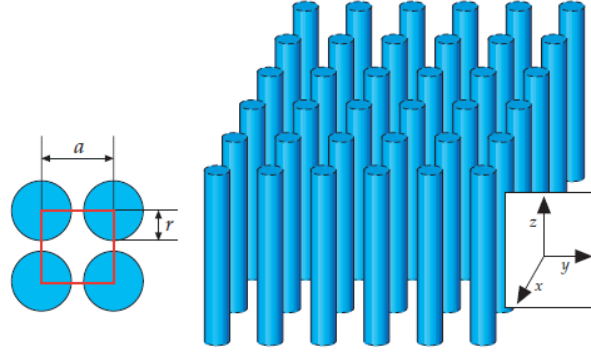


Şekil 2.4 2B FK örgü tipi örnekleri (Sukhoivanov ve Guryev 2009)

a. 2B kare örgü b. 2B üçgen örgü

2.4 2B Fotonik Kristaller ve Eşdeğer Dilim Fotonik Kristallerin Oluşturulması

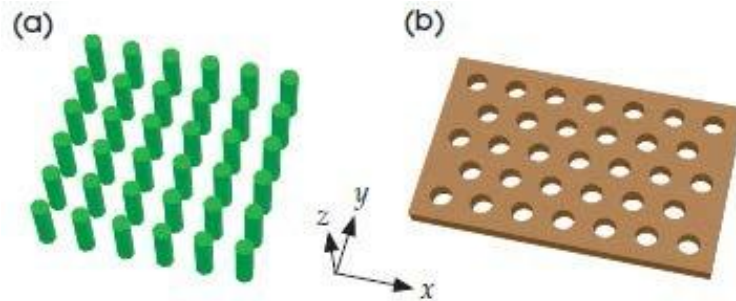
Fotonik kristaller iki boyutlu olduklarında x ve y doğrultusunda periyodik, z doğrultusunda ise yapı homojendir. Periyodikliğin var olduğu xy düzleminde FBA bulunabilir ve $k_{//}$ kesikli öteleme simetrisine sahiptir. Bu durum Brillouin bölgesi içindeki sınır koşullarındadır.



Şekil 2.5 Kare örgülü dielektrik çubuklu iki boyutlu fotonik kristal yapısı (Joannopoulos vd. 2008)

FK simetrik olduğunda, xy düzleminde ilerlemekte olan kipler ($k_z=0$) xy düzlemindeki yansımalarından etkilenmezler. Bu ayna simetrisine sahip kipler kutuplu olma durumlarına göre iki farklı gruba ayrılırlar. Manyetik alan vektörü (H) xy düzlemine dik olduğunda kip enine-elektriktir ve TE kipleri olarak adlandırılırlar. Elektrik alan vektörü (E) xy düzlemine dik olduğunda ise kip enine-manyetiktir ve bu kipler TM kipleri olarak adlandırılırlar.

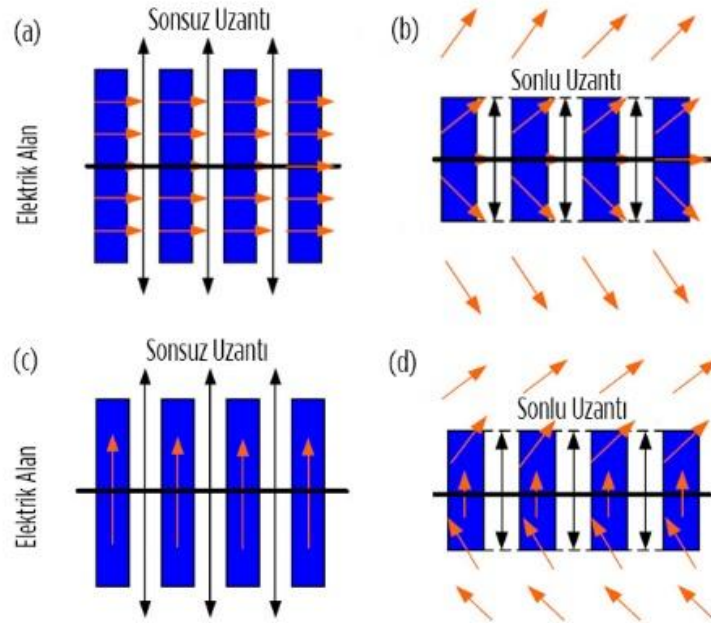
İki boyutlu bir fotonik kristal eğer üçüncü boyutta sonsuz sayılabilecek kalınlıkta değilse, kipler tam olarak TM -kutuplu veya TE -kutuplu değildir. Şekil 2.6'da örnek fotonik kristal dilim yapıları gösterilmiştir. Şekil 2.6.a hava içerisinde kare örgülü dielektrik çubuklu, şekil 2.6.b ise dielektrik dilimde üçgen örgülü hava delikli bir FK dilim yapısıdır.



Şekil 2.6 Fotonik kristal dilim yapıları (Joannopoulos vd. 2008)

a. Havada kare örgülü dielektrik çubuklar, b. Dielektrik dilimde üçgen örgülü hava delikleri

Fotonik kristal dilimden geçen elektrik alan çizgileri *TM* ve *TE* kipleri için temsili olarak şekil 2.7’de gösterilmiştir. $z = 0$ simetri düzlemi boyunca *TM* ve *TE* kipleri tamamen kutuplu iken bu düzlemden ayrıldıkça *TM* ve *TE* kiplerin elektrik alan çizgileri idealden uzaklaşmaktadır. Bu sebeple bir fotonik kristal dilim için *TM* ve *TE* kipleri *TM-benzer* ve *TE-benzer* kipler olarak adlandırılmıştır. $y = 0$ düzlemi için *TM-benzer* kip çift, *TE-benzer* kip ise tek kiptir. Dilim FK’lerde $\omega > ck/n_{min}$ frekansları için ışık konisi bulunmaktadır. Işık konisinde hava/altaş içerisinde ilerleyen kipler yaygın kiplerdir. FK hava içerisinde değil de altaş üzerinde ise bant aralığının ve kılavuz kipin ışık konisinin altında kalması için altaşın kırılma indisinin FK’den daha düşük olması gerekmektedir. Genellikle FK olarak Si, altaş olarak silika kullanılmaktadır. $\lambda=1.5\mu\text{m}$ dalga boyunda Si’nin kırılma indisi 3.4, silikanın ise 1.4’dür. Düzlem üzerindeki $k_{//}=(k_x,k_y)$ dalga vektörü iki doğrultudaki kesikli öteleme simetrisinden dolayı korunmakta, fakat dik yöndeki k_z dalga vektörü korunmamaktadır.

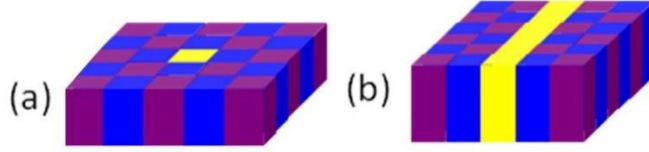


Şekil 2.7 Elektrik Alan dağılımının kesit görünüşleri

a. 2B FK’de TE kip, b. 2B FK dilimde TE-benzer kip, c. 2B FK’de TM kip, d. 2B FK dilimde TM-benzer kip

2.5 Çizgi Kusurlu Fotonik Kristal Dalga Kılavuzları

FK'lerde nokta kusurları kullanılarak ışık hapsedilebilir (Şekil 2.8.a). Çizgisel kusurlar kullanılarak ise ışık bir konumdan diğerine kılavuzlanabilir (Şekil 2.8.b).



Şekil 2.8.a. Nokta kusuru (rezonant kavite), b. çizgi kusuru (dalga kılavuzu)

Bir dilim fotonik kristal dalga kılavuzunda ışık FBA içerisinde kılavuz kipi bulunduğu frekans aralığında kusur içerisine hapsedilmiştir, dolayısıyla kusur boyunca ilerletilebilir. Bant aralığından ötürü bu kip kristal içerisinde sönümlüdür. Işığın ilerlediği kılavuz boyunca kesikli öteleme simetrisi korunduğundan dolayı kılavuz kipler oluşabilmektedir.

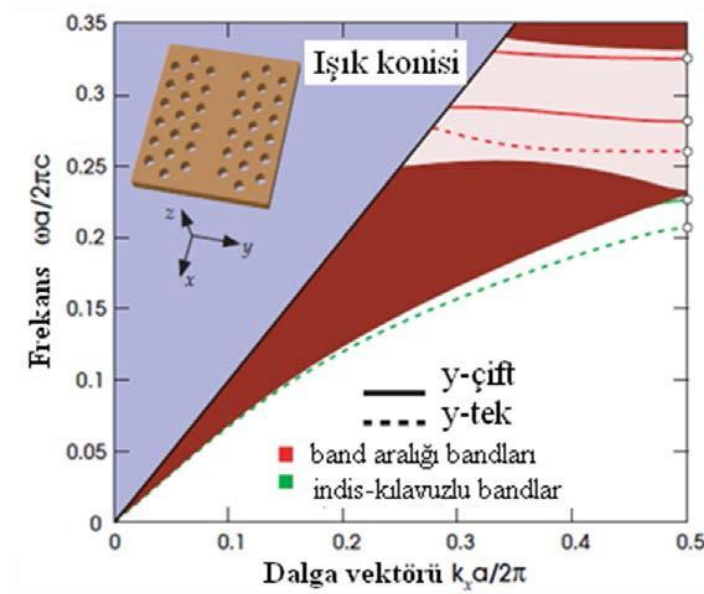
Si dilim içerisinde $r=0.3a$ yarıçaplı üçgen örgülü hava delikli, $t=0.6a$ kalınlıklı FK dilim yapısı (Şekil 2.9) ve bu yapıya ait bant yapısı Şekil 2.10'da gösterilmiştir. Havada asılı iki boyutlu fotonik kristal yapılar çoğunlukla seçici ıslak aşındırma teknikleriyle üretilmektedir (Carlsson vd. 2002). Bant aralığı dışında taralı olan bölgede kipler sürekli frekans aralığına sahiptir ve kip profilleri kristal içerisine yayılmıştır. Bu kipler yaygın kipler olarak adlandırılır ve kristal örgüsündeki kiplerin çizgi kusuru üzerine izdüşümlerinin alınmasıyla elde edilir. Bir dilim FKD'deki kılavuz kipler yatay yönde bant aralığı etkisiyle ve dikey yönde indis kılavuzlanma etkisiyle kılavuzlanmaktadır. Burada yaygın kiplerin altındaki kesikli çizgiyle gösterilen bant tamamıyla indis-kılavuzlu banttır ve tam iç yansıma yolu ile kılavuzlanmıştır.

Işık konisinin altında kalan alanda FBA içerisinde fotonik bant aralığına kılavuzlanmış üç kip bulunmaktadır. Yapı $y=0$ yansıma düzlemi altında değişmez ise kipler bu düzlemden yansımalarına göre tek veya çift kipler olarak sınıflandırılabilirler. Bu üç kipten en düşük frekanslı olanı y-tek, diğer ikisi y-çift kipler olarak adlandırılır. Bu

adlandırma tamamen bu kiplerin H_z alan dağılımlarının $y=0$ düzlemine göre simetrik (tek kip) veya antisimetrik (çift kip) olmasına bağlıdır. Burada H 'nin bir psedovektör olduğu ve bu yüzden y-çift olarak görülen bir H_z deseninin aslında y-tek olduğu gözden kaçırılmamalıdır. Işık konisinin altında ve FBA içinde FK dilimin yüksek dielektrik sabiti kılavuz kipleri oluşturmaktadır. Bu kiplerin öz durumları dilimden uzaklaştıkça üstel olarak sönümlenmektedir (Joannopoulos vd. 2008).



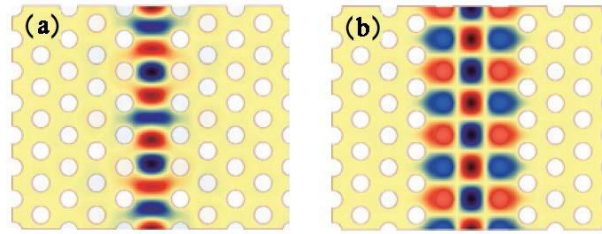
Şekil 2.9 Havada asılı fotonik kristal dilim yapının üretildiği şematik görünüşü (Carlsson vd. 2002)



Şekil 2.10 x-doğrultusunda bir sıra hava deliklerinin çıkartılmasıyla oluşturulmuş dilim fotonik kristal dalga kılavuzuna ait dağıtım grafiği (Joannopoulos vd. 2008)

Tüm kılavuz kipler *TE-benzer* olduğundan ve z doğrultusu bir düğüm çizgisi içermediğinden H_z dağılımları $z = 0$ düzleminde incelenebilir. Dalga kılavuzunun

girişine bir düzlem dalga verilerek kolayca uyarılabileceğinden ötürü y -tek kipler ile ilgilenilmektedir. FBA içerisindeki y -tek kipinin H_z deseni dalga vektörü ışık konisinden Brillouin bölgesi köşesine doğru değıştikçe değışiklik göstermektedir. Şekil 2.11.a $k_x=0.32\pi/a$, şekil 2.11.b $k_x=0.5\pi/a$ için bu alan dağılımı desenlerini göstermektedir. Alan dağılımlarından ötürü bu kipler indis-kılavuzlu ve bant aralığı-kılavuzlu olarak adlandırılabilir. İndis kılavuzlu kipin enerjisi kusur içerisinde yoğunlaşmıştır ve sadece kusur çevresindeki ilk sıra delikler ile etkileşmektedir (Notomi vd. 2001). Bant aralığı kılavuzlu kiplerin enerjisi ise kılavuz çevresindeki birden çok sıra ile etkileşmektedir. Bu adlandırma kiplerin kılavuzlanma mekanizmalarını belirtmemekte, sadece kip alan dağılımlarını tanımlamaktadır. Kılavuz kipin indis ve bant aralığı kılavuzlu kısımları arasındaki etkileşme dağılım eğrisinin şeklini ve eğimini değıştirmektedir (Notomi vd. 2001).



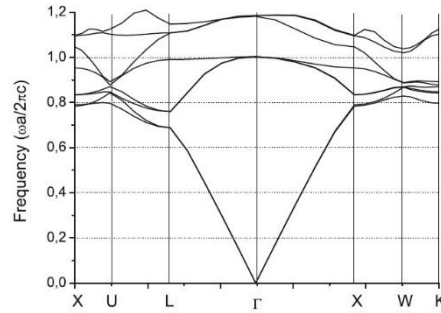
Şekil 2.11 FKD'nin: a. $k_x=0.32\pi/a$ noktasında, b. $k_x=0.5\pi/a$ noktasında y -tek kipinin H_z alan dağılımı (Joannopoulos vd. 2008)

2.6 Fotonik Kristallerin Tarihi Gelişimi ve Uygulama Alanları

Fotonik kristaller son yıllarda büyük ilgi çekmesine rağmen, tarihi, ışığın ilerleyişinin periyodik yapılar kullanılarak kontrol edilmesi varsayımına (Rayleigh 1887) kadar uzanır. Yaklaşık 100 yıl sonra Sovyet bilim adamı Bykov (1972) kendiliğinden yayılım kontrolü için periyodik yapıların kullanılabilme olasılığını açıklayan bir makale yayınlamıştır. Fakat fotonik kristaller hakkında yoğun çalışma süreci Yablonovitch (1987) ve John'un (1987) çalışmalarının Physical Reviews Letter'da yayımlanması ile başlamıştır. Makaleler hem kendiliğinden yayılım idaresinin olasılığı hem de periyodik yapılar kullanılarak ışığın ilerleme kontrolünün olasılığı üzerineydi. Bu makalelerin

yayımlanmasından sonra, birçok sayıda fotonik kristal fiziği ve teknolojisi hakkında yayın her yıl katlanarak artmıştır.

Ho (vd. 1990)'nin, hava ortamına yerleştirilmiş yüksek kırılma indisine sahip dielektrik kürelerden meydana gelen yüzey merkezli kübik (YMK) örgülerle oluşturulmuş fotonik kristallerin bant yapısını elde etmiştir. Düzlem dalga genişlemesi (plane wave expansion, PWE) yöntemi ile hesaplanmış bant yapısı örneği şekil 2.12'de görülebilir.

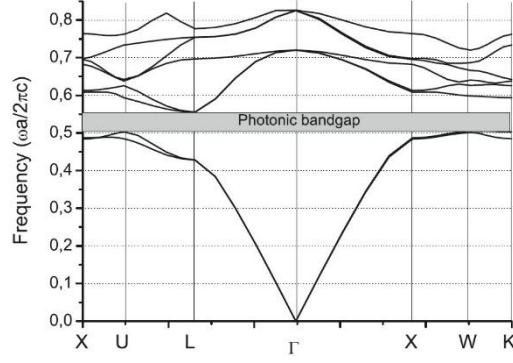


Şekil 2.12 YMK örgülü 3B FK'in bant yapısı (Sukhoivanov ve Guryev 2009).

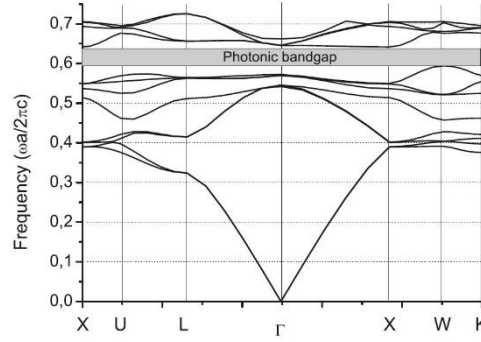
Şekil 2.12'de görüleceği üzere, ilk bant 0-0,8 bağıl frekans aralığı boyunca uzanıyor. İkinci bant ilk bant ile Γ -L (frekans aralığı 0-0,7) ve Γ -X (frekans aralığı 0-0,79) dalga vektörü kısımlarında çakışıyor. Dahası, araştırılan tüm frekans aralıklarında en az bir tane öz durum var, yani görünen tam fotonik bant aralığı yoktur. Örneğin, Γ noktasında öz frekans sıfıra eşittir. Γ -L dalga vektörü aralığında özfrekans yavaşça 0'dan 0,8'e artıyor.

Araştırılan frekans aralıklarının her bir noktadaki öz durumlarının varlığı tam FBA'nın yokluğunu gösterir. Yani, kırılma indisinin her değerinde bu örgü tipindeki bir fotonik kristalin tam fotonik bant aralığına sahip olmadığı görülür. Fakat bant yapısı göz önüne alındığında, bazı ilerleme doğrultularında fotonik kristalin kısmi bant aralıklarına sahip olduğu sonucuna ulaşılabilir (örneğin L noktası 0,7-0,77 aralığında öz frekans yoktur). Bu durum, bu aralıklara karşılık gelen yönlerde ışığın yansıtacağı anlamına gelir. Bu tüm sanal ve doğal opaller için tipik optik etkiye sebep olur.

Aynı çalışmada, ikinci ve üçüncü bantlar arasında tam fotonik bant aralığı bulunan hava ortamına yerleştirilmiş dielektrik kürelerden oluşmuş üçgen örgülü fotonik kristalin bant yapısı hesaplanmıştır (Şekil 2.13).

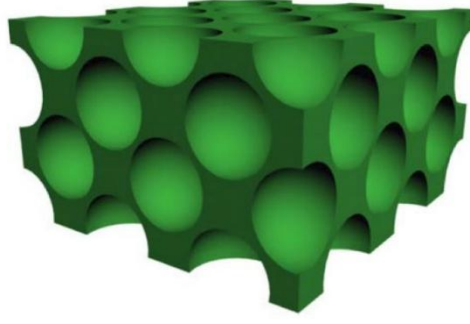


Şekil 2.13 Elmas örgülü 3B FK'in bant yapısı (Sukhoivanov ve Guryev 2009).



Şekil 2.14 Ters YMK örgüye sahip FK'in bant yapısı (Sukhoivanov ve Guryev 2009).

Souzer ve Haus (1992) ters YMK örgüye sahip fotonik kristalin bant yapısını hesaplamışlardır (Şekil 2.14). Ters opal, havada bulunan dielektrik küreler yerine daha yüksek kırılma indisli bozucular tarafından ayrılan küresel kavitelerin sayısından meydana gelen ters YMK örgü anlamına gelir (Şekil 2.15). Böyle bir fotonik kristalin diğerlerine nazaran yüksek kırılma indisinde tam FBA'ya sahip olduğu görülmüştür. İncelenen ters opal 8. ve 9. bantlar arasında tam FBA'ya sahiptir.



Şekil 2.15 Ters YMK örgülü 3B fotonik kristal (Sukhoivanov ve Guryev 2009)

Ters YMK örgü içinde tam FBA'nın görülmesi özel bir ilgi uyandırdı, çünkü günümüzde ters yapay opaller yüksek ölçekli FK üretimi olasılığına olanak sağlayabilirdi. 1998'de ters yapay opaller deneysel olarak elde edildi (Wijnhoven vd. 1998). 2000 yılında ilk 3B FK elde edildi (Blanco vd. 2000). Bu FK yakın kızılötesi bölgede tam FBA'na sahipti. FK üçgen örgü biçiminde dizilmiş silikon kürelerden meydana gelmişti.

Fotonik kristaller ve fotonik kristal tabanlı aygıtlar üzerine 1987'den başlayarak 2014 yılına kadar binlerce çalışma yayımlanmıştır. Fotonik kristaller optoelektronik alanda birçok yapıya uygulanabilir. Bu alanlardan bazıları aşağıda açıklanmıştır.

Rastgele Radyasyon Yönetimi: Fotonik kristallerin bu özelliği, fotonik kristal temelli ışık kaynaklarının tasarımında önemli rol oynamıştır. Örneğin, fotonik kristaller yarı iletken lazerlerin daha düşük eşik akımında ve daha verimli çalışabilmeleri için kullanılabilirler. 1, 2 ve 3 boyutlu fotonik kristaller dağınım reflektörü vazifesinde de olabilirler (Heinrich vd. 2007). Fotonik kristalleri rasgele ışınım yönetimi elemanı olarak kullanmanın bir ikinci yolu çoğunlukla yeni ışınım kaynaklarının tasarımıdır. Bu kaynaklarda, saf fotonik kristaller ve kusur içinde güçlü ışınım lokalizasyonu sağlayan ve yüksek kaliteli çınlayıcı formunda kusura sahip fotonik kristaller lazer özelliklerinin geliştirilmesinde ve rasgele ışınım yönetiminde kullanılabilirler (Englund vd. 2005).

Optik İzolatörler: Fotonik kristallerin optik izolatör olarak kullanımı kural olarak periyodik yapı içindeki kusurda ışınının lokalize edilmesidir. Bu bağlamda ışınının dalga boyu fotonik kristalin FBA içinde olmalıdır. Fotonik kristallerin bu temel özelliğine bağlı olarak geliştirilebilen başlıca aygıtlar mikrokaviteler, dalga kılavuzları ve bükülü dalga kılavuzları, ayırıcılar (splitter), bağdaştırıcılar ve birleştiricilerdir.

Fotonik Kristal Dalga Kılavuzları: Dalga kılavuzları periyodik yapıların çizgi kusurları olarak da bilinirler. Bu çizgi kusurları belli bir dalga boyu aralığında ışığı yönlendirme özelliğine sahiptir. Fotonik kristal dalga kılavuzlarının eşsiz özelliklerinden biri 90° ve daha fazla açılara sahip çok keskin bükülmelere olanak sağlayabilmesidir (Zhang ve Li 2006). Toplam iç yansıma prensibine dayanan düzlem dalga kılavuzlarının aksine, fotonik kristal dalga kılavuzlarında tam FBA varlığından dolayı dalga kılavuzu ışığı lokalize eder. Bundan dolayı fotonik kristal dalga kılavuzları daha kompakt ve daha yüksek verime sahip olurlar.

Ayırıcılar: Ayırıcılar optik gücü istenen oranda ya da onu kutuplanmış demetlere bölmeye izin veren optik aygıtlardır (Morita vd. 2008). Fotonik kristal bazlı ayırıcı tek bir noktada bağlanan optik dalga kılavuzlarının sayısı olarak açıklanabilir. Bu durumda girişte dalga kılavuzundan geçen güç bağlanma noktasında bölünür. Ayırıcıların başka bir şekli de aralarında az mesafe bulunan paralel dalga kılavuzlarının bağdaştırılmasıdır (Xu vd. 2005). Bir dalga kılavuzundan gelen ışınım giriş dalga kılavuzundan çıkışa yavaşça akar. Dalga kılavuzu parametrelerinin değiştirilmesiyle, çıkış dalga kılavuzuna iletilen gücün oranı da değiştirilebilir.

Dağınım Yönetimi: Fotonik kristallerin eşsiz dağınım özelliği onları süper prizmalar (Bakhtazad vd. 2007), süper lensler (Sun vd. 2008) optik birleştirici ve optik ayırıcı olarak kullanmamıza izin verir.

Süper prizma etkisini incelerken fotonik kristal hacim ortamı gibi düşünülür. Prizma ışınının dalga boyuna ve fotonik kristalin geometrisine bağlı bir etkin kırılma indisine sahiptir. Bazı durumlarda ise kırılma indisi negatif olabilir (Abdelmalek vd. 2007). Süper lens etkisi optik ışımayı odaklamak için fotonik kristallerin kullanılmasıdır.

Dahası, fotonik kristalin dağınım özellikleri kompakt ve yüksek verimli dalga boyu ayırıcı demultiplexerların oluşturulmasına izin verir. Dalga boyu ayırıcı demultiplexerlar tek dalga kılavuzu kanalı üzerindeki farklı dalga boylarında iletilen bilgi kanallarını ayırmaya olanak sağlar. Fotonik kristal dalga kılavuzları ve dalga kılavuzu bükümlerinin boyu gelen ışığın dalga boyu mertebesinde olduğu için FK bazlı demultiplexerlar kompakt olacaktır. Ayrıca yaygın kullanılan demultiplexerlara göre FK demultiplexerların kanal yoğunluğu gerektiğinde artırılabilir.

Mikroyapılı Fiberler: Bu optik fiberler merkezde tanımlanan çizgi kusurlu fotonik kristalden meydana gelirler. Işık kusur içinde toplanır. Mikroyapılı fiberlerin iki farklı çeşidi vardır. İlki toplam iç yansıma etkisine dayanır. Bu durumda FK daha düşük kırılma indisine sahip yansıtıcı tabaka olarak kullanılır. Bu fiberler geleneksel basamak indisli fiberlerin tersine, genellikle geniş dalga boyu aralığında tek kiplidir. İkincisi, fotonik kristalin tam FBA'na sahip olmasından dolayı bu mikroyapılı fiber tipinin temeli kusur içinde ışınımın lokalizasyonudur. Bu fiberler genellikle çok kiplidir ve kusur alanında yüksek ışınım gücünün lokalizasyonuna izin verirler. Bundan dolayı bu fiberler yüksek güçlü ışınımın iletilmesi ve bazı çizgisel olmayan etkilerin elde edilmesi için kullanılabilirler. Günümüzde bu mikroyapılı fiberlerin eşsiz özelliklerini kullanan çeşitli aygıtlar üzerinde çalışılmaktadır (Geernaert vd. 2009).

Yavaş Işık: Yavaş ışık fotonik kristallerin yaygın olarak geliştirilen başka bir uygulama alanıdır. Bu uygulama özel dalga boyunda ultra düşük grup hızına sahip fotonik kristal yeteneğini kullanır. Böylelikle bilgi işleme alanında çok daha fonksiyonel çalışan cihazların üretilmesine imkân sağlanabilir. Yavaş ışık etkisine dayalı aygıtlar saydam optik ağlarda fotonik yönlendirici, düşük kipsel hacimli mikrolazer, optiksel gecikme hattı vb. olarak kullanılabilirler (Sukhoivanov ve Guryev 2009).

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Fotonik kristal dalga kılavuzu iletimindeki birleşme verimliliği ve iletim kaybının hesaplanması için önceki yıllarda birçok değişik yöntem kullanıldı. Hepsinin içinde, birleştirilmiş kip teorisi (coupled mode theory) (Skorobogatiy vd. 2003), düzensizlik yöntemi (perturbation method) (Skorobogatiy vd. 2004), çoklu-kutup yöntemi (multipole method) (Asatryan vd. 1999, 2000) ve zaman uzayında ışın yayılım yöntemi (time domain beam propagation method) (Koshiba vd. 2000) yaygın olarak kullanılmıştır. Birleştirilmiş kip teorisi ve düzensizlik teorisi, zayıf geometrik dalga kılavuzu varyasyonunun analizine hızlıca yakınsayabilmiştir. Fakat daha güçlü düzensizlik, daha yüksek düzende doğrulamalar gerektirir bu da kesin çözüme yakınsamayı etkileyebilir. Yüksek-endeksli zıt dalga kılavuzu için, çoklu-kutup yöntemi yüksek sayısal doğrulukta özkipleri analiz etmek için uygulanabilir fakat bu düzensiz formülasyona izin vermez. Işın yayılımı yöntemi yüksek doğruluk verebilir fakat çok iyi bir çözünürlüğe ihtiyaç duyar. Bu da çok hesap yükü isteyebilir. Fakat günümüzde bilgisayar teknolojisinin gelişmesiyle çok çekirdekli işlemcilerle sahip hızlı bilgisayarlar kullanılmaktadır. Dolayısı ile geçmişte hesap yükünün yüksek olmasından dolayı farklı yöntemler uygulayan araştırmacıların aksine bu tez kapsamında ışığın iletim performansını ölçebilmek için ışın yayılımı yöntemi olarak bilinen zaman uzayında sonlu farklar (finite-difference time domain, FDTD) yöntemi kullanılmıştır.

Bu tez çalışmasında fotonik kristallerin bant yapılarının ve iletim özelliklerinin belirlenmesinde PWE ve FDTD yöntemleri kullanılmıştır. PWE genelde simetrik durumlarda bant yapısının bulunmasında kullanılırken, FDTD herhangi bir karmaşık yapı için de kullanılabilir. PWE yöntemi frekans bölgesinde tanımlıdır ve fotonik kristallerin bant yapılarını yüksek verimlilikle ve doğrulukta hesaplanmaktadır. FDTD elektromanyetik problemlerin çözümünde kullanılan en yaygın yöntemlerden biridir ve tek bir çevrimde geniş bir frekans aralığında bilgi verebilmektedir.

3.1 Teorik Altyapı

Frekans ve zaman bölgesinde fotonik kristal dalga kılavuzlarının bant yapısının ve iletim özelliklerinin hesaplanması konusunda gerekli teorik altyapı incelenmiştir.

Maxwell eşitlikleri; kısmi, çizgisel, birinci dereceden diferansiyel denklemler ile eşlenik çizgisellikten dolayı üst üste gelme özelliği olan eşitliklerdir. Elektrik alan $\mathbf{E}$ ve manyetik alan $\mathbf{H}$; yük yoğunluğu ρ , uzay koordinat vektörü $\mathbf{r}$ 'nin ve t zamanının bir fonksiyonudur ve birbirlerine Maxwell eşitlikleri ile bağlıdır. Maxwell denklemleri kaynaksız bir ortamda ($\rho=0$ ve $\mathbf{J}=0$),

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = 0 \quad (3.1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (3.2)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = 0 \quad (3.3)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} = 0 \quad (3.4)$$

olarak verilir. İzotropik bir ortamda elektriksel alınganlık ϵ , manyetik alınganlık μ ve elektrik iletkenliği σ skaler niceliklerdir. Elektriksel geçirgenlik $\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon(r)$ olarak ifade edilir. Burada ϵ_0 vakumun geçirgenliği, $\epsilon(r)$ malzemenin göreceli geçirgenliğidir. Kullanılan malzemelerin manyetik olmadığı göz önüne alındığında $\mu = \mu_0$, yük yoğunluğu olmadığı göz önüne alındığında $\sigma(r) = 0$ 'dır. Makroskopik, izotropik ve dağılımının olmadığı doğrusal rejimde saydam bir ortamda (ϵ gerçel ve pozitif),

$$\mathbf{D}(r) = \epsilon \mathbf{E}(r) \quad (3.5)$$

$$\mathbf{B}(r) = \mu_0 \mathbf{H}(r) \quad (3.6)$$

olarak yazılır. (3.5) ve (3.6) denklemleri yerlerine konulduğunda Maxwell denklemleri:

$$\nabla \cdot [\varepsilon(r)E(r, t)] = 0 \quad (3.7)$$

$$\nabla \cdot H(r, t) = 0 \quad (3.8)$$

$$\nabla \times E(r, t) = -\frac{\partial(\mu_0 H(r, t))}{\partial t} \quad (3.9)$$

$$\nabla \times H(r, t) = -\frac{\partial(\varepsilon_0 \varepsilon_r E(r, t))}{\partial t} \quad (3.10)$$

Denklem (3.10)'daki $E(r, t)$ çekilip (3.9) denkleminde yerine konulursa ikinci dereceden bir diferansiyel denklem elde edilir:

$$\nabla \times \left[\frac{1}{\varepsilon_0 \varepsilon_r} \nabla \times H(r, t) \right] = -\frac{\partial^2}{\partial t^2} \mu_0 H(r, t) \quad (3.11)$$

Maxwell denklemleri doğrusal olduğundan alanlar harmonik kiplere açılarak uzaysal ve zamansal davranış ayrı ayrı çözülebilir:

$$H(r, t) = H(r) \exp(-i\omega t) \quad (3.12)$$

Bu denklemde $H(r)$ bir düzlem dalgası şeklinde, $H(\vec{r}) = \vec{a} \cdot \exp(i\vec{k} \cdot \vec{r})$ olarak ifade edilir. Denklem (3.11)'deki $H(r, t)$ ifadesi yerine (3.12) denklemindeki karşılığı yazılıp zamana göre iki kez türevi alındığında ve $c = 1/\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}$ eşitliği dikkate alındığında, (3.11) denklemi frekans bölgesinde ifade edilmiş olur. Denklem (3.13) temel denklem olarak adlandırılır.

$$\nabla \times \left[\frac{1}{\varepsilon_r} \nabla \times H(r) \right] = \left(\frac{\omega}{c} \right)^2 H(r) \quad (3.13)$$

Kuantum mekaniğindeki Schrödinger denklemi gibi elektromanyetik dalgaların temel denklemi de budur. Bu denklem Maxwell denklemlerinin sağladığı özdeğer denklemidir (Joannopoulos vd. 2008).

Elektromanyetik dalgaların enine olması ($\nabla \cdot H(r) = 0$) manyetik alan genliğinin ilerleme doğrultusuna dik olmasını gerektirir. (3.13) eşitliği Φ dönü operatörünü temsil etmek üzere (3.14) eşitliğinde yeniden yazılmıştır.

$$\Phi H(r) = \left(\frac{\omega}{c}\right)^2 H(r) \quad (3.14)$$

$$\nabla \times E(r) - i\omega\mu_0 H(r) = 0 \quad (3.15)$$

$$\nabla \times H(r) - i\omega\varepsilon_0\varepsilon_r E(r) = 0 \quad (3.16)$$

Temel denklemin çözümü ile birlikte $H(r)$ kipleri ve sahip oldukları frekanslar hakkında tüm bilgiye sahip olunur.

Temel denklem doğrusal bir özdeğer denklemdir. Doğrusal olduğundan $H_1(r)$ ve $H_2(r)$ ayrı ayrı çözüm olmak üzere $\alpha H_1(r) + \beta H_2(r)$ de bir çözümdür. Dolayısıyla aynı kiplere (frekansa) karşı gelen farklı alan desenleri olabilir. Bu doğrusal operatör, kuantum mekaniğindeki gibi Hermityen bir operatördür.

3.2 Düzlem Dalga Açılımı Yöntemi

PWE yönteminde elektromanyetik sistemlerin özdeğerlerinin ayrıştırılması işlemi, alanlar kesikli-frekanslı durumlara genişletilerek ve bütün baz seti bir yerde sonlandırılıp doğrusal problemin çözülmesi ile gerçekleştirilir.

Temel denklem bir özdeğer denklemdir ve ω^2/c^2 bu denklemin özdeğerleridir. PWE denkleminde frekansların elde edilmesi için özdeğer denklemi çözülmektedir. Özdeğerlere karşı gelen özvektörler frekanslara karşı gelen alan profillerini vermektedir. PWE denkleminde periyodikliğin periyodiklik düzleminde sonsuz olduğu kabul edilmektedir. Herhangi bir n_i tamsayı değeri için periyodiklik düzleminde

$$\varepsilon_r(r) = \varepsilon_r(r + \sum_{i=1,N} n_i \alpha_i) \quad (3.17)$$

olarak verilmektedir. Bu denklemde α_i örgü vektörüdür ve N periyodikliğin bir, iki veya üç boyutta olmasına bağlı olarak 1, 2 veya 3 değerlerini almaktadır. Bu tez çalışmasında iki boyutlu FK'ler ile ilgilenildiğinden $N=2$ 'dir.

Yapı periyodik olduğundan ε_r veya $\frac{1}{\varepsilon_r}$ Fourier serisine açılabilir. Örneğin $\frac{1}{\varepsilon_r}$,

$$\frac{1}{\varepsilon_r(r)} = \sum_G \kappa(G) \exp(iGr) \quad (3.18)$$

şeklinde yazılabilir. Burada $\kappa(G)$ Fourier açılım katsayıları ve G ters örgü uzayında örgü vektörleridir.

Ters örgü vektörü ilkel ters örgü vektörleri olan b_i 'lerin doğrusal bir bileşimi şeklinde ifade edilebilir:

$$G = \sum_{i=1,N} l_i b_i \quad (3.19)$$

Burada l_i 'ler rastgele tamsayılardır. İlkel ters örgü vektörleri olan b_j 'ler,

$$\alpha_i b_j = 2\pi \delta_{ij} \quad (3.20)$$

olarak verilmektedir. ε uzaysal r koordinatının periyodik bir fonksiyonu olduğundan Bloch teoremine göre öz fonksiyonlar,

$$H_{kn}(r) = H_{kn}(r) = u_{kn}(r) \exp(ikr) \quad (3.21)$$

olarak seçilebilir. Burada u_{kn} periyodiktir ve FK ile aynı periyodikliğe sahiptir. Bu eşitlikte k birinci Brillouin bölgesi olan $-\pi \leq k\alpha_i \leq \pi$ aralığında dalga vektörü ve n

bandın indisidir. $u_{kn}(r)$ periyodik olduğundan $H(r)$ $1/\varepsilon$ 'a benzer biçimde Fourier serisine açılabilir ve yapılan işlemler sonucunda:

$$\sum_{G^*} \kappa(G - G^*)(k + G) \times [(k + G) \times H_{kn}(G^*)] = -\frac{\omega_{kn}^2}{2} \sum_G H_{kn}(G) \quad (3.22)$$

şeklinde özdeğer denklemi elde edilmiş olur. Bu denklem sayısal olarak çözülerek birinci Brillouin bölgesinde, verilen bir k dalga vektörü için özdeğerleri olan ω_{kn}^2 ve özfonksiyonları olan $H_{kn}(r)$ çözümlenebilir. ω_{kn}^2 değerleri k 'ya karşın çizdirilerek fotonik kristalin bant yapısı elde edilir (Askari vd. 2011).

3.3 Zaman Uzayında Sonlu Farklar Yöntemi

Günümüzde, sayısal yöntemler içinde en çok kullanılan yöntemlerden biri de FDTD'dir. İlk kez 1966 yılında, Yee (1966) tarafından ortaya atıldı. FDTD yöntemi, elektromanyetik alanı içinde Maxwell denklemleri olarak bilinen denklemlerden yalnızca iki rotasyonel denklemin doğrudan zaman bölgesinde çözümüne dayandırılan bir yöntemdir. Karmaşık yapıları çalışabilme esnekliği ve kapasitesi, kolay uygulanabilirlik, belirli bir hacim içerisinde zamanla değişen alanları görselleştirebilme, doğrusal olmayan, frekansa bağlı ve iletken malzemeleri ele alabilme, tek bir çevrimde geniş spektral alanda bilgi verme FDTD yöntemini güçlü bir sayısal yöntem kılmaktadır. Elektrik ve manyetik alan bileşenlerine ait ayrıklaştırılmış denklemler, bilgisayar ortamında çözülerek modellenen yapının zaman cevabı elde edilir. Zaman cevabının hızlı Fourier dönüşümü alınarak da modellenen yapının geniş bir aralıkta frekans cevabını elde etmek mümkündür (Kunz ve Luebbers 1993).

Kendisi ve türevleri her noktada sürekli olan bir $f(x)$ fonksiyonunun türevi merkezi farklar yöntemi kullanılarak çok küçük bir hata miktarı ile belirlenebilir:

$$\left[\frac{\partial f}{\partial x} \right]_{x=x_0} = \frac{f\left(x=x_0+\frac{\Delta x}{2}, t\right) - f\left(x=x_0-\frac{\Delta x}{2}, t\right)}{\Delta x} + O(\Delta x^2) \quad (3.23)$$

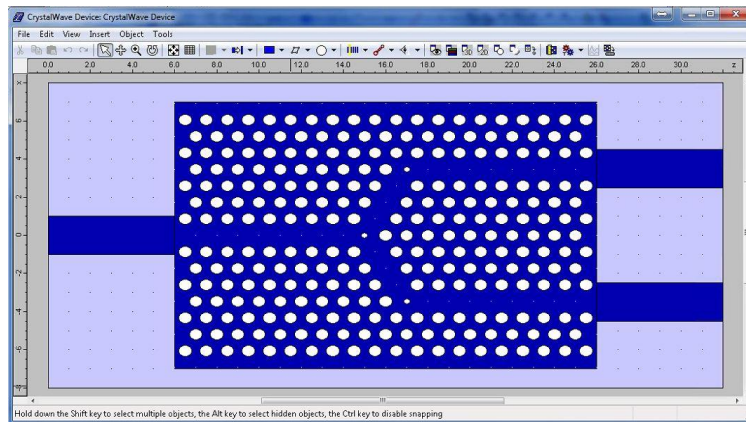
Burada O ile parantez içerisinde gösterilen ifade bu yöntemdeki hata miktarıdır. Hata miktarı iki nokta arası mesafenin karesi ile orantılıdır. Eğer türev alınan iki nokta arası mesafe yeterince küçük ise O ile temsil edilen tüm terimler ihmal edilerek merkezi fark yaklaşımı,

$$\left[\frac{\partial f}{\partial x} \right]_{x=x_0} \approx \frac{f\left(x=x_0+\frac{\Delta x}{2}, t\right) - f\left(x=x_0-\frac{\Delta x}{2}, t\right)}{\Delta x} \quad (3.24)$$

ile verilir. Üç boyutlu uzayda f fonksiyonunun uzay ve zaman değişimleri $f(i,j,k,n)=f(i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z, n)$ ile temsil edilmektedir. FDTD'nin temeli, bir boyutlu FDTD yöntemi incelenerek öğrenilebilir. FDTD yöntemi elektrik ve manyetik alanların belirlenmesinde Yee algoritmasını kullanmaktadır (Yee 1966).

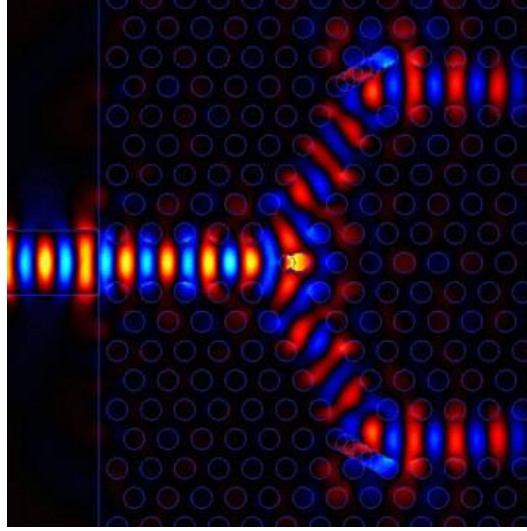
3.4 Crystalwave Yazılımı

Fotonik kristallerin tasarım ve düzenlenmesinde Crystalwave bilgisayar programı kullanılacaktır (CrystalWave, Photon Design). Crystalwave, fotonik kristal yapıların tasarımı için geliştirilmiş olan; bunların optik özellikleri, tasarımı ve düzenlenmesi (Şekil 3.1) için yapılmış bir tasarım ve analiz programıdır. Crystalwave programı elektromanyetik sistemleri modelleyebilir (Şekil 3.2) ve FDTD benzetim yazılım paketini kullanır.



Şekil 3.1 Crystalwave programından ekran alıntısı

Fotonik kristal ile bağdaştırıcı arasındaki bağdaştırma verimi, atmanın ilerlemesi Crystalwave programında nümerik olarak benzetilerek belirlenecektir. CrystalWave fotonik araçlar için tasarım/hesaplama yazılım paketi Oxford/İngiltere merkezli “Photon Design” firması tarafından geliştirilmiştir. CrystalWave baz modülü içerisinde “Band Structure Analyser”, “FDTD Engine”, “FEFD Engine” ve “Kallistos” araçları vardır.



Şekil 3.2 Crystalwave programında benzetim sırasında alınmış ışık demetinin ikiye ayrılması görüntüsü

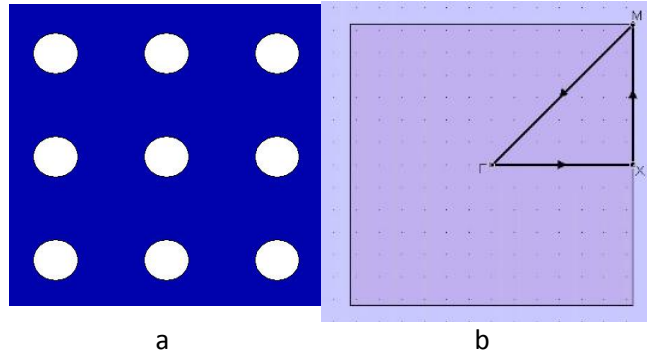
4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1 Fotonik Kristal Örgüler ve Bant Diyagramlarının Hesaplanması

Bu kısımda fotonik kristal örgüler incelenmiş ve bant diyagramları hesaplanmıştır.

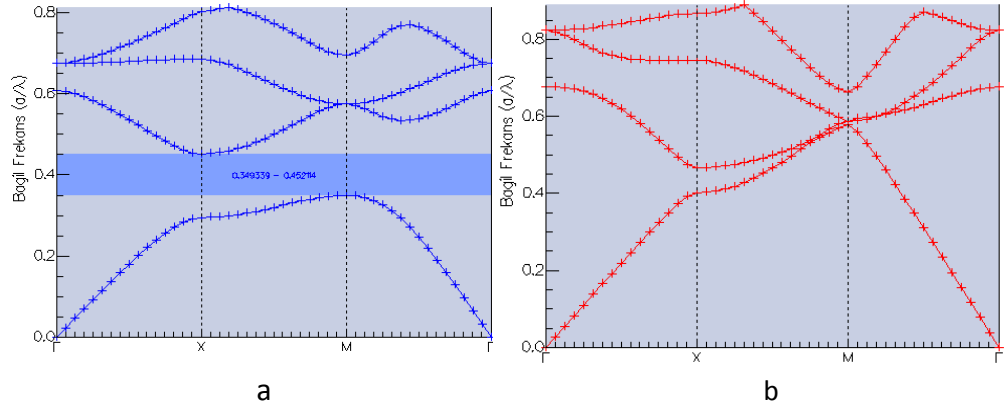
4.1.1 Kare örgülü fotonik kristal

Bu kısımda kare örgülü FK olarak adlandırılan hava ortamında kare örgü halinde dizilmiş dielektrik çubuklardan oluşan yapı ele alınmış, dağınım ve yasaklı bant aralığı özellikleri incelenmiştir.



Şekil 4.1.a. Kare örgüye göre dizilmiş silindirik çubuklardan oluşan fotonik kristal, b. Ters uzayda simetri noktaları

Şekil 4.1.a'da kare örgülü FK yapı verilmiştir. Örgü katsayısı a , dielektrik çubukların yarıçapı $r = 0.3a$ 'dır. Bu örgünün simetri noktaları uzaysal frekans (ters uzay) alanında şekil 4.1.b'de verilmiştir. Bu ve benzeri yapıların yasaklı bant aralığını elde edebilmek için ters uzayda daraltılamaz Brillouin alanlarının kenarlarına denk gelen k dalga vektörlerinde yapının harekete izin verdiği frekansları hesaplamak çoğu zaman yeterlidir. Bu frekanslar şekil 4.1.b'deki simetri noktalarından geçen üçgen boyunca PWE yöntemiyle frekansları çözümlenmiştir.



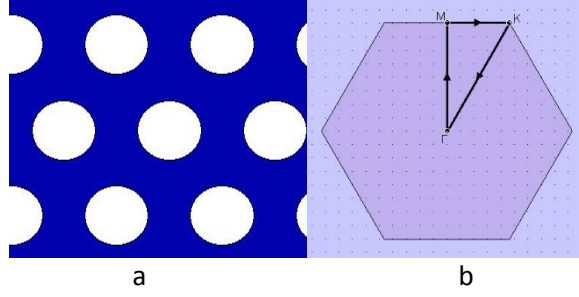
Şekil 4.2 Kare örgülü yapı için daraltılamaz Brillouin alanı kenarlarında dağıtım diyagramları

a. *TM* kip için dağıtım diyagramı (Elektrik alan kristal düzlemine dik), b. *TE* kip için dağıtım diyagramı (Manyetik alan kristal düzlemine dik)

Şekil 4.2’de PWE yöntemiyle daraltılamaz Brillouin alanı kenarlarında yapılan benzetimlerin sonuçları verilmiştir. Görüldüğü üzere *TM* kip için $0.345 - 0.452 \alpha/\lambda$ bağıl frekans aralığında FBA oluşmuştur (Şekil 4.2.a). *TE* kip için bir bant boşluğu oluşmamıştır (Şekil 4.2.b). Bu durum yüksek dielektrik katsayılı yapıların birbirinden ayrık olmasındandır. Elektrik alan bağlantılı olmayı tercih ettiği için yapıya dik olma durumu FBA oluşması için uygun bir durum oluşturmuştur.

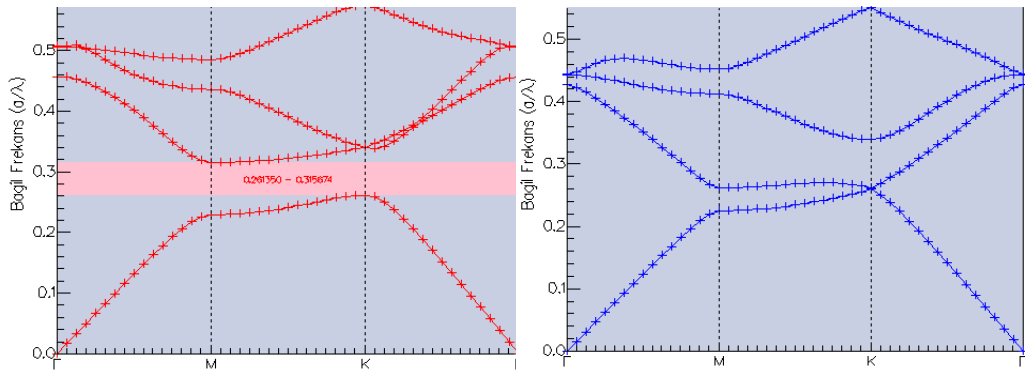
4.1.2 Üçgen örgülü fotonik kristal

Bu kısımda üçgen örgülü FK’nın dağıtım ve yasaklı bant aralığı özellikleri incelenmiştir. FK yapı dielektrik malzemenin üçgen örgü halinde delinmesiyle oluşan hava dolu boşluklarla oluşturulmuştur (Şekil 4.3).



Şekil 4.3.a. Üçgen örgüye göre dizilmiş silindirik deliklerden oluşan FK, b. Ters uzayda simetri noktaları

Üçgen örgülü yapı dielektrik bir arka planda silindirik delikler açılarak elde edilir. Bu örgü çeşidinde çalışılması gereken polarizasyon kare örgüden farklı olarak TE' 'dir (Manyetik alan kristal düzlemine dik). Bu yüksek dielektrikli malzemenin yapısının bağlantılı olmasından kaynaklıdır (kare örgüde çubuklar bağlantısızdır). Arka planın etkin kırılma indisi 2.75'dir. Delikler hava boşluklarıdır. Bu deliklerin yarıçapları $r = 0.30a$ 'dır. Bu örgü tipi ile oluşturulan dalga kılavuzları literatürde en çok kullanılan dalga kılavuzudur. Çünkü fotonik kristal dilim üzerinde oluşturulan hava boşluklarının üretimi hava boşluğu üzerinde dizilen dielektrik çubukların üretiminden daha kolay ve maliyeti düşüktür. Ayrıca üçgen örgülü fotonik kristalin yasak bant aralığı kare örgülü fotonik kristale göre daha geniştir. Bu tez kapsamında bağdaştırma tasarımları üçgen örgülü fotonik kristal dalga kılavuzu üzerinde tasarlanmıştır.



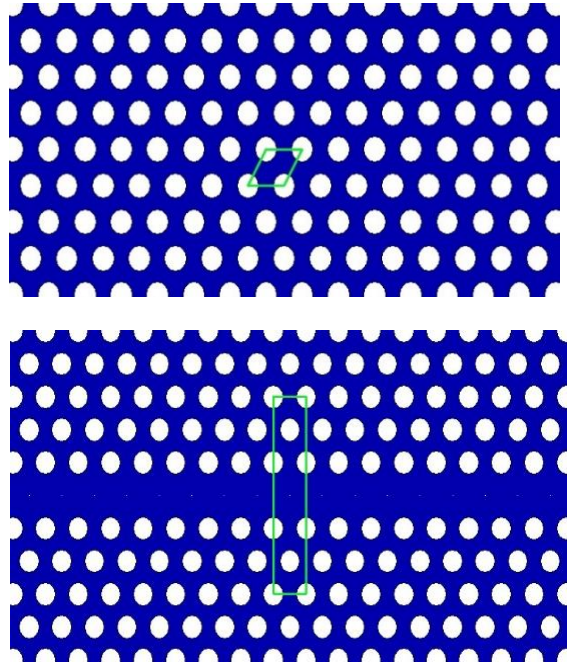
Şekil 4.4 Şekil 4.3'deki yapı için daraltılamaz Brillouin alanı kenarlarında dağılım diyagramları

a. TE kip için dağılım diyagramı (Manyetik alan kristal düzlemine dik), b. TM kip için dağılım diyagramı (Elektrik alan kristal düzlemine dik)

Şekil 4.4’de daraltılamaz Brillouin alanı kenarlarında yapılan PWE yöntemi benzetimlerinin sonuçları verilmiştir. Üçgen örgülü fotonik kristalde *TE* kip için 0.261 – 0.316 α/λ bağıl frekans aralığında FBA oluşmuştur (Şekil 4.4.a). *TM* kip için ise bant boşluğu oluşmamıştır (Şekil 4.4.b). İkinci yapının birinci yapıdan farkı yüksek dielektrik katsayılı yapının bağlantılı olmasıdır. Elektrik alan bağlantılı olmayı tercih ettiği için yapıya paralel olma fırsatı bulmuştur. Bu da *TE* kipteki bantlar arasında bir boşluğun oluşmasının önünü açmıştır.

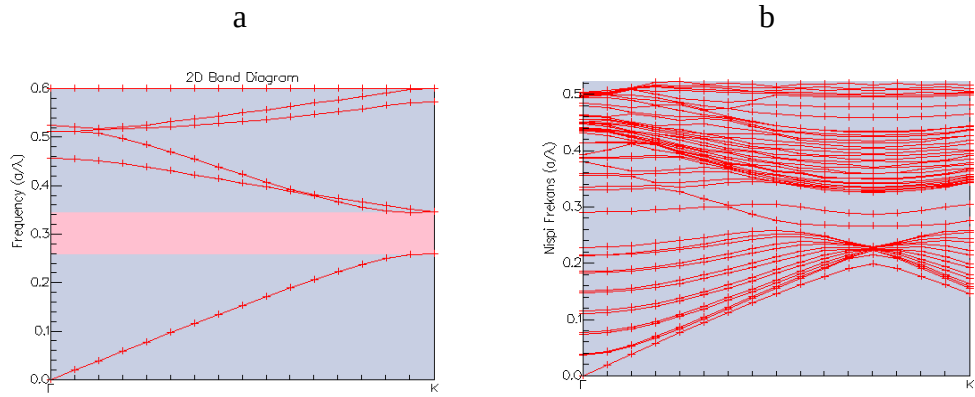
4.2 Fotonik Kristallerde Dalga Kılavuzunun Oluşturulması ve Çözümlemesi

FK’lar, periyodik oluşu sayesinde belirli frekans bölgelerinde tanımlanan yasaklı bant aralıklarına sahiptir. Bu içsel özellik sayesinde ışık hareketi kontrolü kolaylıkla sağlanır. FK’lar, genelde simetriklerdir yani öteleme simetrisi ve dönme simetri korunmuştur. Simetrik FK’larla yapı içerisine çizgisel olarak örgünün bozulmasıyla kompakt dalga kılavuzları tasarlamak mümkündür.



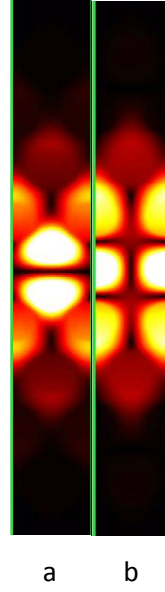
Şekil 4.5 Fotonik kristal örgü ve dalga kılavuzunun oluşturulması

Bu tez de tasarlanan dalga kılavuzu üçgen örgü dizilimine sahiptir. Tasarlanan yapı, *TE-benzer* kip ile uyarılmıştır. Gelen dalga, gaussiyen genlik dağılımına sahiptir. Kullanılan dielektrik boşlukların yarıçapı $0.3a$ ve etkin kırılma indisi 2.75 'dir. Burada a örgü sabitini göstermektedir ve uzunluğu $0.45 \mu\text{m}$ 'dir. ΓK doğrultusu boyunca bir sıra boşluk çıkarılarak tek kipli dalga kılavuzu oluşturulmuştur. Nümerik analizler *TE* polarizasyon (manyetik alan $x\text{-}z$ düzlemine dik) için gerçekleştirilmiştir. Zaman düzlemindeki hesaplamalarda, hesaplama alanının sınırlarındaki yansımaları yok etmek için yapılandırmanın etrafına PML katmanlar konulmuştur (Berenger 1994).



Şekil 4.6.a Tasarlanan üçgen fotonik kristal yapının bant diyagramı, b. Oluşturulan FKD fotonik bant aralığı içindeki izinli kipler

Şekil 4.5'de yeşil çizgilerle gösterilen bölge süper hücre olarak adlandırılan kısımdır. Bu kısım üzerinden yapının bant diyagramı şekil 4.6.a'da gösterildiği gibi hesaplanmıştır. Burada $0.257 - 0.344 a/\lambda$ bağıl frekans aralığında TE kip için FBA oluşmuştur. Dalga kılavuzlu yapının bant diyagramı ise şekil 4.6.b'de gösterilmiştir. Dalga kılavuzunun oluşturulması yasak bant içerisinde iletim bandı oluşturur. Dağılım diyagramında geniş bir frekans aralığını tarayan güdümlü kip ortaya çıkar. İzin verilen bantların yukarı ve aşağı hareketi farklı ilerleme pozisyonlarında düşük grup hızları oluşmasını sağlar. Bu iletim bantları çift ve tek olmak üzere tek kipli bir yapı için 2 tanedir (Şekil 4.6.b). Bu bantlar için elektrik alan görünüşler şekil 4.7'de gösterilmiştir.

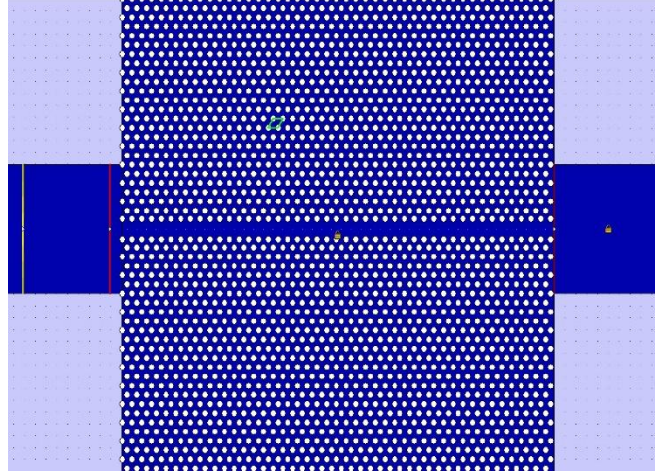


Şekil 4.7 Bir kipli dalga kılavuzu için elektrik alan görünümüleri

a. tek kip, b. çift kip

4.3 Dilim Dalga Kılavuzundan FKD'ye Işığın Bağdaştırılması

FK'lardan oluşan bileşenlerin literatürdeki optik bileşenlerle yarışabilmesi için kayıpların etkisi dikkate alınmalıdır. Tasarımdaki kayıplar, yapı içerisindeki yayılım kayıpları ve dalga kılavuzu ile FK bölgesi ara yüzündeki bağlantı kayıplarıdır. Giriş/çıkış dielektrik dalga kılavuzları ile FK dalga kılavuzu ara yüz bağlantı kayıpları çok kritiktir. Sadece bir katmandan oluşan ara yüzey tanımlamak yerine daha iyi bağlantı stratejileriyle bağlantı kayıpları azaltılabilir. Tasarlanan yapıda ışığın FKD'ye bağlantısı için kullanılan dielektrik dalga kılavuzu şekil 4.8'deki gibidir.



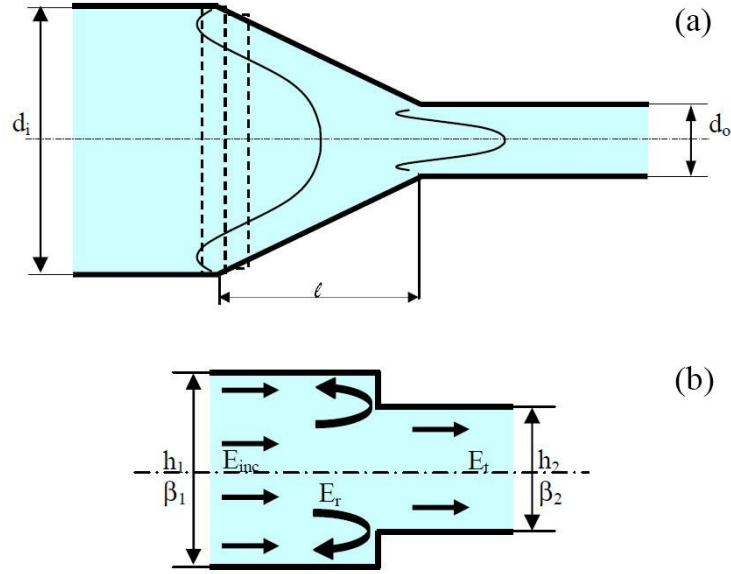
Şekil 4.8 Dielektrik dalga kılavuzundan FKD'ye direk bağlantı

Geri yansımaları azaltmak ve ışık iletimini artırmak için basamaklı yapılar ve bu yapılar için kusur tasarımları oluşturulmuştur. Basamaklı yapılar; düz, dışbükey ve içbükey yapıda olmak üzere 3 şekilde incelenmiştir. Bu tasarımların sonuçlarına göre en kompakt ve iletim verimliliği en yüksek tasarım seçilmeye çalışılmıştır. Yapının iletim spektrumunu analiz etmek için, dalga kılavuzu girişi ve çıkışına ışık algılayıcı konulmuştur. Tasarlanan yapı geniş frekans aralığına sahip kaynak ile uyarıldığında, fotonik kristal dalga kılavuzu içerisinde ilerleyen ışının elektromanyetik dalga görünümüleri FDTD yöntemi ile hesaplanmıştır. Giriş ve çıkışta algılayıcıların algıladığı elektromanyetik akış karşılaştırılarak yapıların iletim verimlilikleri incelenmiştir. Tasarlanan bir yapıyı fabrikasyon sürecinden önce analiz etmek için 3 boyutlu hesaplamalarının yapılması gerekirdi fakat 2 boyutlu fotonik kristal dilimlerin etkin indis yöntemi yaklaşımı ile çözümlenmesi gerçeğe yakın sonuçlar oluşturmakta ve hesaplama süresini azaltmaktadır. (referans ver) Dolayısıyla yaptığımız tasarımlarda 2B FK dilimler göz önüne alınarak hesaplamalar yapılmıştır.

4.3.1 İnceltilmiş bağdaşma teorisi

Bu kısımda inceltilmiş kesitte kip bağdaşma mekanizması tartışılacaktır. İnceltilmiş dalga kılavuzu sonuna doğru gidildiğinde gittikçe incelen, elektromanyetik dalga iletimi için kullanılan uzatılmış bir kılavuz yapısıdır. Şekil 4.9 iki farklı kesite sahip dalga

kılavuzu arasında doğrusal olarak inceltilmiş dalga kılavuzunun şematik gösterimidir. Büyük dalga kılavuzu üzerindeki kip dağılımı kesiti, doğrusal inceltme yapısı tarafından dar dalga kılavuzuna daha küçük bir kip dağılımına sıkıştırılır.



Şekil 4.9.a İnceltilmiş dalga kılavuzunun genel görünümü, b. İnceltilmiş bir dalga kılavuzunda kip dönüşümü için basamak analizini gösteren diyagram (Khoo vd. 2005)

İnceltilmiş dalga kılavuzunun ana fonksiyonu farklı kesit alanlarına sahip dalga kılavuzları arasındaki yüksek bağlantı kayıplarını en aza indirmektir. Geri yansıma, kipler arası bağdaşma kaybı, radyasyon ve saçılma kaybı gibi olası kayıpların kaynağı dalga kılavuzu ve ışık kaynağı arasında kip dağılımının incelenmesinden kaynaklanmaktadır. Bu kayıplar incelticinin kip bağdaşma verimini etkileyen inceltici ilerleme sabitinin değişmesine neden olur. Bu kısımda incelticiler için etkin kip bağdaşma karakteristiği basamak geçiş metodu (Marcuse 1969) kullanılarak kısaca açıklanacaktır.

Basamak geçiş yöntemi incelticiyi yayılım sabiti değişimini görmek ve bu sayede kayıp analizi yapmak amacıyla birçok basamağa ayırır. Işık incelticide ilerledikçe, kip dönüşümü dalga kılavuzunun genişliğindeki değişimle eşleşerek gerçekleşir. Dalga kılavuzunun yarı genişliği etkin grup indisi ile bağlantılıdır;

$$z(x) = \frac{m\lambda}{2\sqrt{n_{dk}^2 - n_g^2}} \quad (4.1)$$

Burada m kip sayısı ve n_{dk} dalga kılavuzunun kırılma indisidir. λ yayılım dalgaboyu ve n_g dalga kılavuzunun etkin grup indisidir. İki kip arasındaki kip etkileşimi şekil 4.9.b’de gösterilmiştir.

Kolay anlaşılması açısından her iki tarafın da sadece bir kip desteklediği durum göz önüne alınmıştır. Sol taraftaki basamak h_1 genişliğinde, sağ taraftaki basamak h_2 genişliğindedir. Dalga kılavuzu genişliğindeki farktan dolayı, gelen ışık E_{gel} yayılım sabitindeki değişim ile çoğu sağ taraftaki basamağa iletilir ve kalanı basamakta yansıtılır. Kip bağdaşma veriminin belirlenmesi ışınım kaybının azaltılması ya da kaynağa geri yansıyan ışığın minimize edilmesiyle ilgilidir. İki basamak arasındaki sınır koşullarına bağlı olarak yaklaşık yansıma katsayısı

$$r = \left(\frac{\beta_1 - \beta_2}{\beta_1 + \beta_2} \right) \exp(-i2\beta_1) \quad (4.2)$$

ile verilir ve iletim katsayısı

$$c = 2 \frac{\sqrt{\beta_1 \beta_2}}{(\beta_1 + \beta_2)} \frac{I_{1,2}}{\sqrt{I_{1,1} I_{2,2}}} \exp[-i(\beta_1 + \beta_2)] \quad (4.3)$$

ile verilir. Burada

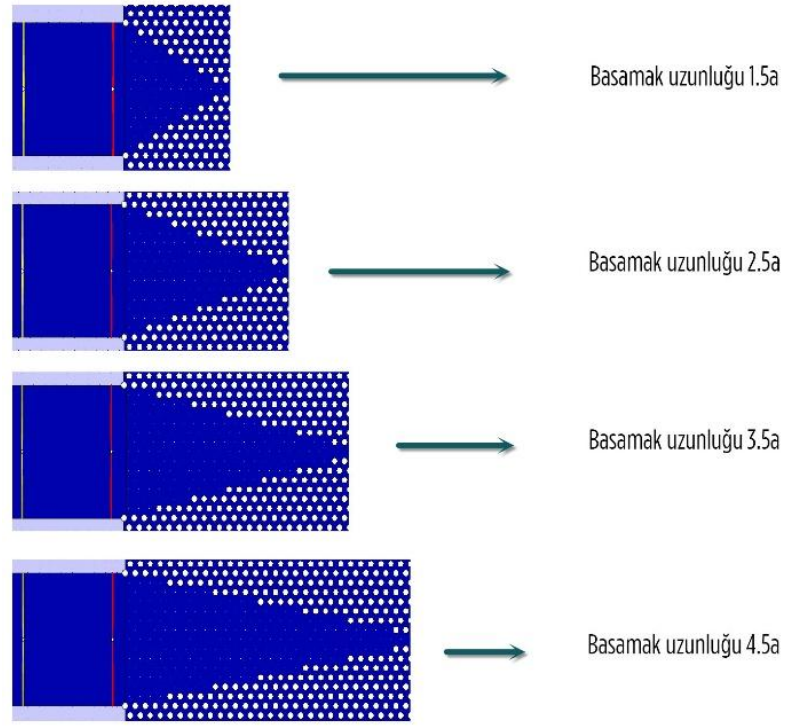
$$I_{\alpha,\gamma} = \int E_\alpha E_\gamma dz, \quad \alpha, \gamma = 1, 2 \text{’dir.} \quad (4.4)$$

β_1 ve β_2 sırasıyla sol ve sağ basamakların yayılım sabitleridir. $I_{\alpha,\gamma}$ ise gelen ve iletilen alan dağılımı arasındaki alan örtüşmesinin integralidir. (2)-(4) eşitlikleri tek kipten tek kipe iletimin teorik yaklaşımıdır. Buradaki asıl amaç inceltme kesiti için bağdaşma verimliliğini etkileyen faktörler üzerinde basit bir analiz elde etmektir. Asıl inceltici

analizi için çoklu kipler vardır ve bundan dolayı ışık inceltici boyunca ilerledikçe kipler arası iç bağdaşma gözlemlenir. Esas kip ve daha yüksek dereceli kipler arasındaki iç bağdaşma hesabı için (2)-(4) eşitlikleri değiştirilmelidir. Küçük incelticiler için iç bağdaşma göz ardı edilebilir ve bu incelticiler için esas kayıp kaynağı yansıma kayıplarıdır (Marcuse 1969). Bu, inceltici daraldıkça yüksek dereceli kiplerin kesilmesinden dolayı ortaya çıkar. Bu problem daha yavaş inceltme yapılabilmesi için incelticinin uzunluğunun artırılması ile çözülebilir. İncelticinin boyu arttıkça, inceltici üzerinde ilerleyen ışık adyabatik davranışa sahip olur ve daha yüksek iletim elde edilir.

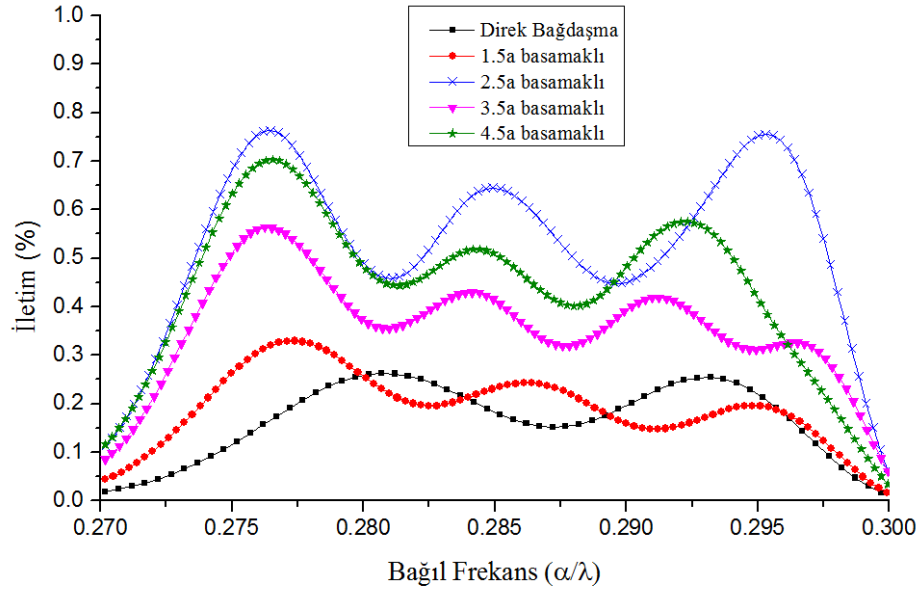
4.3.2 Basamaklı yapı ile inceltici bağdaştırma

Bu bölümde basamaklı bir yapıyla oluşturulmuş FK bağdaştırıcılar incelenmiştir. Basamaklar, geniş çaplı bir geleneksel dalga kılavuzundan fotonik kristal dalga kılavuzuna ışığın girişinin kademeli olarak inceltilmesini sağlar. Bu bağdaştırıcılara inceltici bağdaştırıcı da denilebilir. İlk olarak sabit uzunluklu basamak yapıları incelenmiştir. Bu yapılar şekil 4.10'da gösterilmiştir. Bu tasarımlar sayesinde $7a\sqrt{3}$ μm kalınlığında bir dalga kılavuzundan $a\sqrt{3}$ kalınlığında bir dalga kılavuzuna ışık bağdaştırılacaktır. Örgü tasarımında dielektrik silikon içinde hava delikleri açılmasıyla oluşturulmuş üçgen örgü FK dizilim kullanılmıştır. Yapının efektif kırılma indisi 2.75, hava deliklerinin yarıçapı (r) $0.3a$ μm , örgü parametresi (a) 0.45'dir. Tüm tasarımlarda yapıya 1 watt gücünde 20 fs süreli *TE-benzer* kipli gaussiyen ışık kaynağı gönderilerek analiz yapılmıştır. İletim grafiklerinin alınabilmesi için dalga kılavuzu önüne ve dalga kılavuzu çıkışına iletim algılayıcıları konulmuş ve dalga kılavuzu çıkışındaki pozitif akış miktarının dalga kılavuzu girişindeki pozitif akış miktarına oranı iletim performansını belirlemiştir. Bağdaştırıcı iletim grafiklerinin alınması sırasında yapı içerisindeki salınımlardan kaynaklanan atım sayısının artması ve bu atımların verebileceği yüksek iletim değerlerinden sakınılmıştır. Sadece yapıdan çıkan ilk atımdan gelen iletim ölçülmüştür.



Şekil 4.10 Çeşitli basamak uzunluklarına göre tasarlanmış FK bağdaştırıcılar

Şekil 4.10’da gösterilen basamaklı yapılara ait FK, dielektrik bir dilim içerisinde hava boşluklarının oluşturulmasıyla meydana getirilmiştir. Basamaklar o bölgedeki hava boşluklarının kademeli olarak kaldırılmasıyla oluşturulmuştur. Bağdaştırıcıların başına ve FKD’nin çıkışına konulan 2 adet sensör ile gönderilen ışığın FKD içinde 0.27-0.30 bağıl frekans aralığındaki iletim performansı incelenmiştir (Şekil 4.11). Bu bağıl frekans aralığı FK içinde FKD oluşturulmasıyla oluşan izinli kiplerin bulunduğu frekans aralığının bir bölümüdür.



Şekil 4.11 Bağdaştırıcıların basamak uzunluklarına göre gösterdikleri iletim performansları

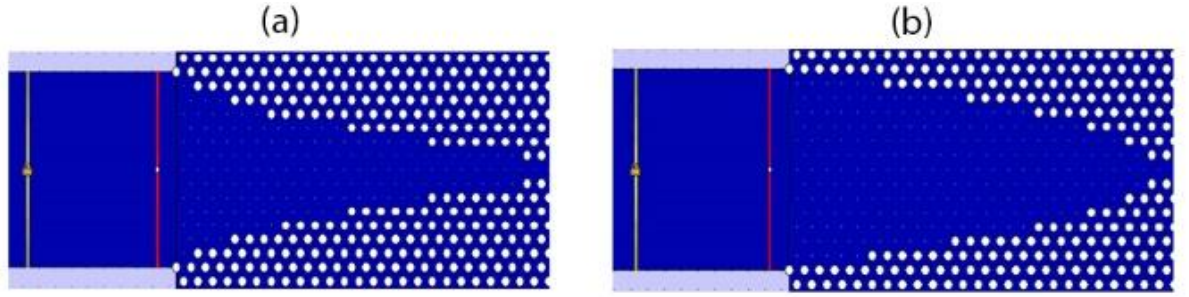
Şekil 4.11'deki grafikte görüldüğü üzere basamaklı yapı kullanılmayıp FKD'ye direk bağdaştırma yapıldığında iletim verimliliği en yüksek %26 seviyesinde kalmıştır. Fakat eşit basamak uzunluklu yapı kullanıldığında bağdaştırıcının en yüksek iletimi yaklaşık %76 seviyesine çıkmıştır. Bağdaştırıcıları boylarına göre incelersek 2.5a basamak uzunluklu bağdaştırıcının uzunluğu 15a, 3.5a basamak uzunluklu 21a ve 4.5a basamak uzunluklu bağdaştırıcının boyu 27a'dır. Şekil 4.11'den çıkarılan önemli bir sonuç ise basamak uzunluğunun artmasıyla iletim verimliliğinin doğru orantılı olmamasıdır. Elde edilen en yüksek verimlilik 2.5a uzunluğundaki basamaklı yapıya ait olan bağdaştırıcıda meydana gelmiştir. 1.5a uzunluğunda verimliliğin düşük 2.5a uzunluğunda en yüksek, 3.5a uzunluğunda ise tekrar düşüş gösterdiği görülmüştür. 4.5a uzunluğunda ise tekrar bir miktar artış görülmüştür. Bu sonuç bağdaştırıcı kompaktlığı açısından istenilen bir durumdur. Bu sayede %70 seviyesinin üzerinde bir iletim verimi için çok daha uzun bağdaştırıcılara gerek kalmadan geniş çaptaki bir ışın demeti daha dar bir FKD'ye bağdaşabilecektir.

Eşit basamak uzunluklu bağdaştırıcılar ile elde edilen en yüksek iletim değerlerinin basamak uzunluklarına göre karşılaştırması çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1 Eşit basamak uzunluklu bağdaştırıcılar ile elde edilen en yüksek iletim değerleri

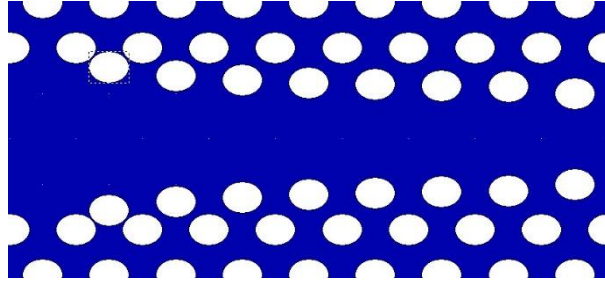
Basamak Boyu	Ortalama İletim(%)	Frekans Aralığı (α/λ)	En Yüksek İletim(%)	Frekans (α/λ)
Direk bağdaşma	16	0.27-0.30	26	0.280
1.5a uzunluklu	19	0.27-0.30	33	0.277
2.5a uzunluklu	54	0.27-0.30	76	0.276
3.5a uzunluklu	36	0.27-0.30	56	0.275
4.5a uzunluklu	47	0.27-0.30	70	0.276

İletim verimliliğinin daha da yukarılara çıkarılması amacı ile basamak uzunluğunun kademe kademe değiştirilmesiyle oluşan dışbükey ve içbükey inceltici bağdaştırıcıların tasarımı yapılmıştır (Şekil 4.12). Bu basamakların en kısası 1.5a en uzununu ise 6.5a uzunluğundadır. Dışbükey ve içbükey inceltici bağdaştırıcıların boyu 24a'dır. Ayrıca bu inceltici basamak bağdaştırıcıların FKD'ye giriş kısımları konikleştirilerek (Şekil 4.13) bu tarz bir giriş yapısının ışık iletimine katkısı da incelenmiştir (Şekil 4.14). Fakat bu durumun iletim performansını negatif yönde etkilediği görülmüştür.

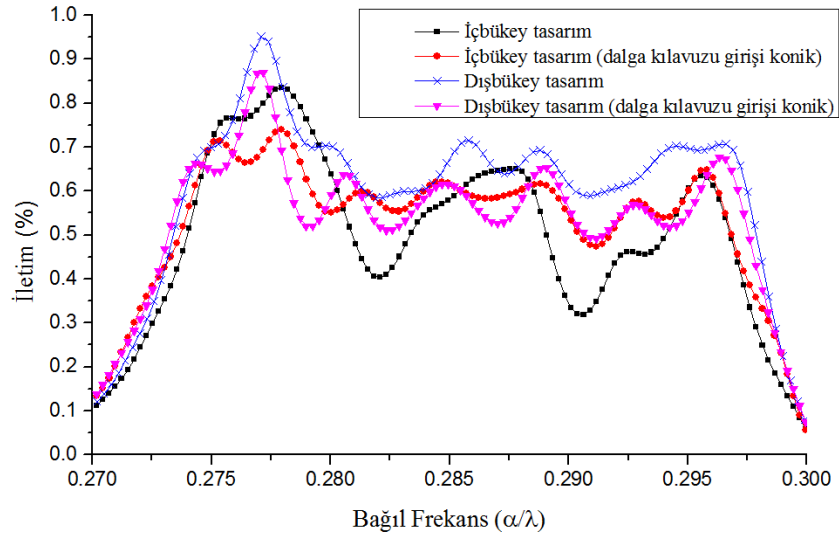


Şekil 4.12 Değişken basamak uzunluklu bağdaştırıcı yapısı

a. İçbükey tasarım, b. dışbükey tasarım



Şekil 4.13 Doğrusal olmayan bağdaştırıcı girişi



Şekil 4.14 İçbükey ve dışbükey inceltici bağdaştırıcı tasarımlarının iletim grafiği

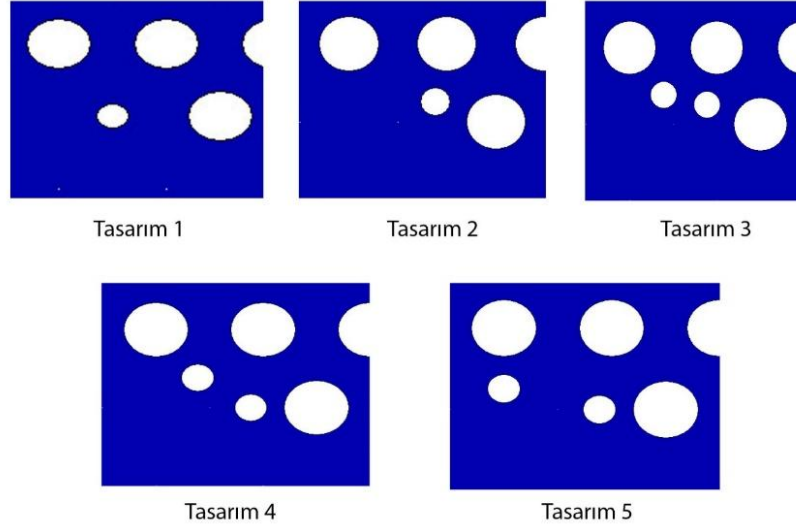
Şekil 4.14’de görüldüğü üzere içbükey ve dışbükey basamaklı inceltici bağdaştırıcıların eşit uzunluğa sahip basamaklı inceltici bağdaştırıcılara göre daha yüksek iletim performansı sergiledikleri görülmektedir. Burada dışbükey incelticinin en yüksek iletim değerine sahip olduğu görülmektedir. Bu tasarımda ışığın FKD’a girişi esnasında uzun basamaklardan daha kısa basamaklara doğru ilerlemesiyle ışığın ani daraltılmaması sağlanmıştır. Bunun sonucu olarak bu durumun iletim performansına pozitif etki sağladığı söylenebilir. $0.277 \alpha/\lambda$ bağıl frekans değerinde bağdaştırıcı iletim verimliliği %95 seviyesine kadar yükselmiştir. Öte yandan içbükey tasarımda bağdaştırıcının ani daralmasında bir miktar yansıma olmasına rağmen iç kısımlara gidildikçe daha uzun bir basamak uzunluğu olmasından kaynaklı olarak ışık daha yumuşak bir şekilde inceltirilmiştir. Bu sayede yine eşit basamaklı tasarımlara göre daha yüksek bir iletim performansı sağlanmıştır. Dışbükey ve içbükey inceltici bağdaştırıcı tasarımlarının ayrıntılı iletim performansları çizelge 4.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.2 Dışbükey ve içbükey inceltici bağdaştırıcı tasarımlarının iletim çizelgesi

Basamak Boyu Değişim Tipi	Ortalama İletim (%)	Frekans Aralığı (α/λ)	En Yüksek İletim (%)	Frekans (α/λ)
İçbükey Tasarım	51	0.27-0.30	84	0.278
İçbükey tasarım (kılavuz girişi konik)	57	0.27-0.30	74	0.278
Dışbükey Tasarım	64	0.27-0.30	95	0.277
Dışbükey tasarım (kılavuz girişi konik)	56	0.27-0.30	87	0.277

4.3.3 Kusurlu yapı optimizasyonunun basamaklı inceltici bağdaştırıcıya etkisi

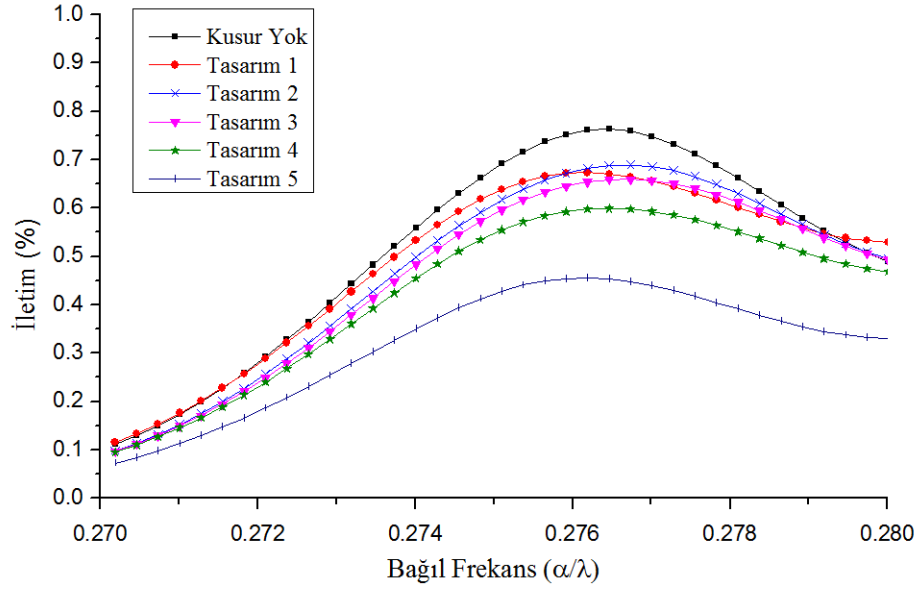
Bu kısımda kısım 4.3.1’de oluşturulan basamaklı yapılar içine kusurlar eklenerek bu kusurların iletim performansı incelenmiştir. Kusurlar fotonik kristal örgü parametresinden bağımsız olarak örgü içine yerleştirilen çubuk ya da deliklerdir. Kusurların çapı örgü içindeki diğer deliklerden farklı olabilir. Buna göre kusurlar 5 farklı tasarımda basamaklar arasına yerleştirilmiştir (**Şekil 4.15**). Ayrıca kusur çapları da değiştirilmiştir. Kusur çapları delik çaplarının yarısı ve $3/2$ ’si olarak seçilerek kusur çaplarının boyundaki değişimin iletim verimliliğine etkisi de incelenmiştir.



Şekil 4.15 Basamaklar arasına yerleştirilmiş kusurlara göre bağdaştırıcı tasarımları

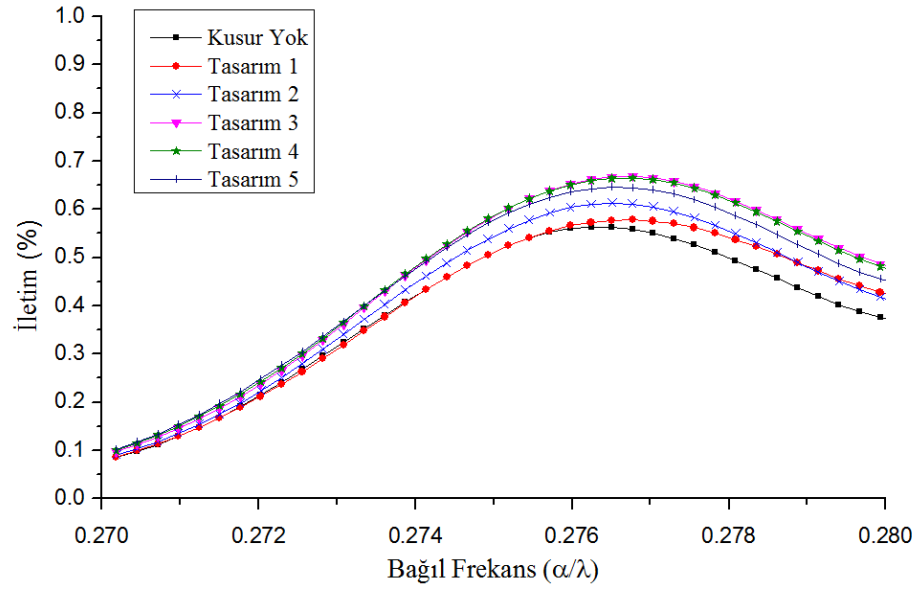
Tasarım 1’de kusur, oluşturulan fotonik kristalin bağdaştırma bölgesindeki basamaklar arasında bulunan örgü noktasına yerleştirilmiştir. Tasarım 2’de ise basamaklar arasında kusur oluşturulmuş ve oluşturulan kusur x ve z yönlerinde kaydırılmıştır. x yönünde kaydırma miktarı $0.1 \mu\text{m}$, z yönünde kaydırma miktarı ise $0.1\sqrt{3} \mu\text{m}$ ’dir. Tasarım 3’de basamaklar arasında 2 kusurlu tasarım oluşturulmuştur. Bu tasarımda Tasarım 2’de kaydırılan kusurun yeri değiştirilmeden ona komşu örgü noktasına ikinci bir kusur konulmuş ve bu kusur x yönünde $0.15 \mu\text{m}$ ve z yönünde $0.4 \mu\text{m}$ kaydırılarak basamaklar arası geçiş iyice yumuşatılmaya çalışılmıştır. Tasarım 4’de de tasarım 3’de olduğu gibi çift kusur kullanılmıştır. Basamak kenarındaki ilk kusurun z yönündeki kaydırılması

aynı kalırken x yönündeki kaydırması 0 pozisyonuna yani örgü noktası hizasına geri çekilmiştir. 2. kusur ise tasarım 3'deki yerinde kalmıştır. Tasarım 5'de basamak kenarındaki kusurun konumu tasarım 4 ile aynı kalırken 2. kusurun x yönündeki konumu aynı, z yönündeki konumu ise örgü noktasından $a/2$ kadar yukarı kaydırılmıştır. Ayrıca tüm tasarımlarda kullanılan kusurların yarıçapları $r/2$ den $2r/3$ 'e çıkarılarak iletim performansına kusur büyüklüğünün etkisi de incelenmiştir.

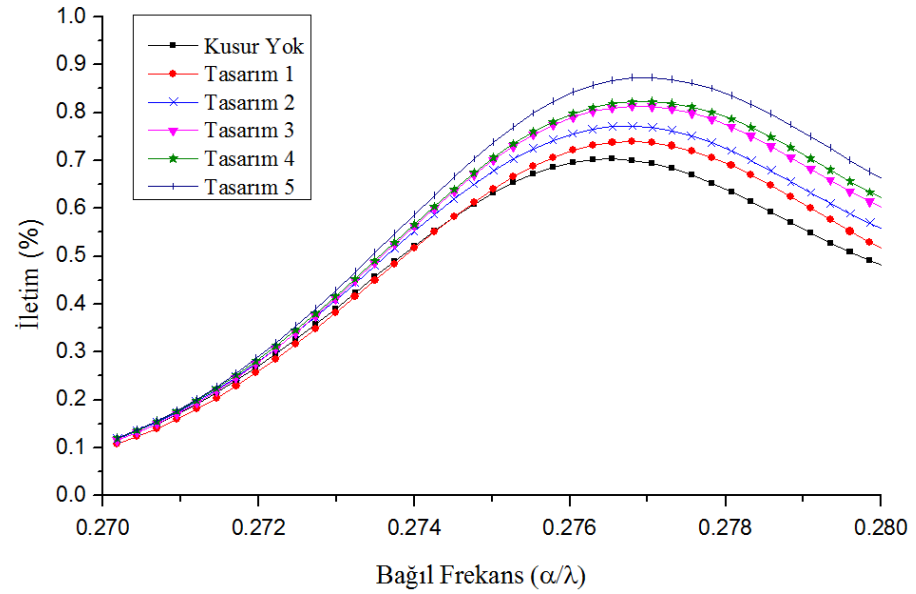


Şekil 4.16 2.5a basamak uzunluklu bağdaştırıcının kusur tasarımlarına göre iletim grafiği (kusur yarıçapı: $r/2$)

Kusurlar tüm tasarımlar için eşit uzunluklu, dışbükey ve içbükey inceltici bağdaştırıcı basamaklarına yerleştirilerek iletim grafikleri alınmıştır. Şekil 4.16-4.18 numaralı grafiklere genel olarak bakıldığında kusurlu yapı tasarımlarının iletim performanslarını etkilediği görülmektedir. Bu etki 2.5a eşit basamak uzunluklu yapıda negatif yönde olurken 3.5a ve 4.5a eşit basamak uzunluklu yapılarda pozitif yönde olmuştur.



Şekil 4.17 3.5a basamak uzunluklu bağdaştırıcının kusur tasarımlarına göre iletim grafiği (kusur yarıçapı: $r/2$)



Şekil 4.18 4.5a basamak uzunluklu bağdaştırıcının kusur tasarımlarına göre iletim grafiği (kusur yarıçapı: $r/2$)

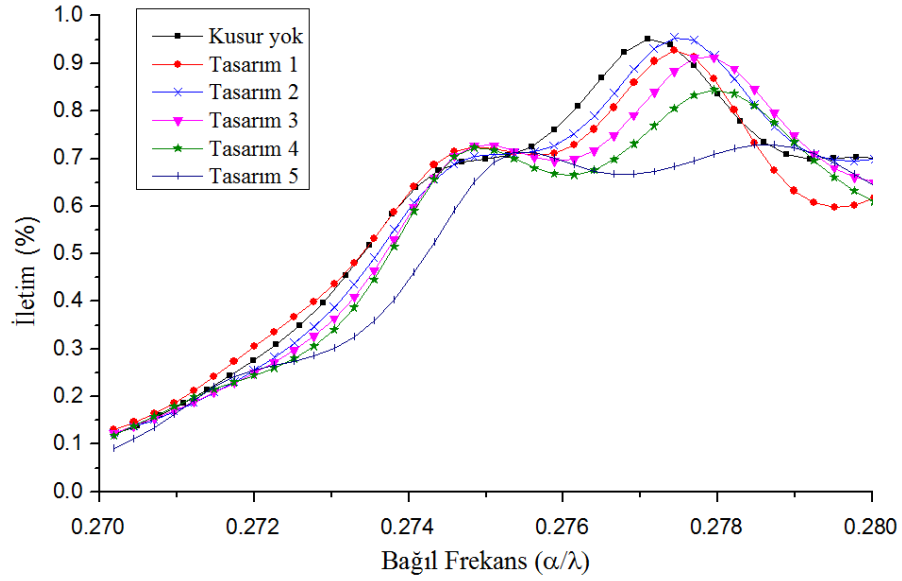
Çizelge 4.3'de eşit uzunluklu bağdaştırıcıların basamak uzunluğu, kusur çapı ve uygulanan kusur tasarımına göre iletim performansları gösterilmiştir. Bu çizelgeye göre

2.5a basamak uzunluklu bağdaştırıcıda kusur tasarımlarının iletim performansına katkısının olmasının yanında negatif etkisinin olduğu görülmektedir. Tasarım 5’de iletim %42 seviyesine kadar düşmüştür. 3.5a uzunluklu yapıda ise tasarım 5 sayesinde iletim %56’dan %78 seviyesine yükselmiştir. 4.5a uzunluklu yapıda ise yine tasarım 5 sayesinde iletim %88 seviyesine gelmiştir. %88 4.5a uzunluklu yapı için iyi bir sıçramadır. Ayrıca $0.27-0.28 a/\lambda$ bağıl frekans aralığında ortalama iletim değeri %71’e yükselmiştir. İletim değerleri kusurların çap uzunluklarına göre incelendiğinde büyük farkların söz konusu olmadığı ve çap uzunluğundan daha çok kusurların pozisyonlarının iletim performansına etkisinin olduğu görülmüştür. Bu sonuçlara göre, eşit uzunluklu bağdaştırıcılara kusurlar eklenmesinin etkisi basamak boyunun değişimi ile orantılıdır. Basamak uzunluğu ve bağdaştırıcı boyu arttıkça yapılan tasarımlar iletim performansına daha fazla pozitif etki etmiştir. Çok daha geniş bir klasik dielektrik dalga kılavuzundan gelen bir ışık göz önüne alındığında basamak sayısı artacağından bağdaştırıcı boyu da artacaktır. Böyle bir durumda yapıya kusur eklenmesi iletim performansını yükseltir.

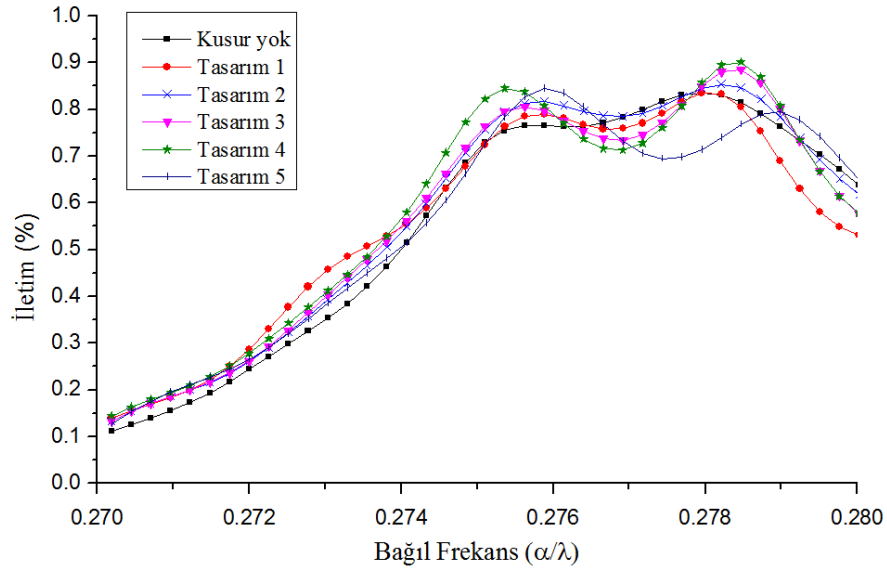
Çizelge 4.3 Düzenli basamak inceltici bağdaştırıcıların tasarım, kusur çapı ve basamak uzunluklarına göre iletim değerleri

	Kusur Çapı	Basamak Uzunluğu					
		2.5a		3.5a		4.5a	
		Ortalama iletim (%)	En yüksek iletim (%)	Ortalama İletim (%)	En yüksek iletim (%)	Ortalama iletim (%)	En yüksek iletim (%)
Kusur Yok		56	76	42	56	54	70
Tasarım 1	r/2	55	67	45	58	56	74
	2r/3	54	70	44	55	55	70
Tasarım 2	r/2	53	69	46	61	60	77
	2r/3	50	63	51	67	63	82
Tasarım 3	r/2	52	66	52	67	64	81
	2r/3	50	63	56	72	65	82
Tasarım 4	r/2	48	60	51	66	65	82
	2r/3	41	52	57	74	67	83
Tasarım 5	r/2	35	46	49	65	69	87
	2r/3	32	42	60	78	71	88

Dışbükey ve içbükey inceltici bağdaştırıcılara kusur eklenmesinin iletim performansına etkisi eşit basamak uzunluklu inceltici bağdaştırıcılardan farklı olmuştur. Şekil 4.19 ve şekil 4.20’de görüldüğü üzere kusurlu tasarımların iletim performansına belirgin bir şekilde pozitif etkisi olmamıştır. Ayrıntılı iletim performansları çizelge 4.4’de verilmiştir.



Şekil 4.19 Dışbükey inceltici bağdaştırıcının kusur tasarımlarına göre iletim grafiği



Şekil 4.20 İçbükey inceltici bağdaştırıcının kusur tasarımlarına göre iletim grafiği

Çizelge 4.4 Değişken basamak uzunluklu inceltici bağdaştırıcıların tasarım, kusur çapı ve basamak boyu değişim tipine göre iletim değerleri

	Kusur Çapı	Basamak Boyu Değişim Tipi			
		İçbükey Tasarım		Dışbükey Tasarım	
		Ortalama İletim (%)	En Yüksek İletim (%)	Ortalama İletim (%)	En Yüksek İletim (%)
Kusur Yok		67	84	70	95
Tasarım 1	r/2	59	84	63	93
	2r/3	60	84	63	92
Tasarım 2	r/2	65	85	70	95
	2r/3	66	85	67	90
Tasarım 3	r/2	66	88	67	91
	2r/3	66	82	65	81
Tasarım 4	r/2	67	90	66	84
	2r/3	66	86	58	70
Tasarım 5	r/2	66	84	65	73
	2r/3	55	78	38	58

4.4 Işık Hızının Yavaşlatılması

Yavaş ışık bir optik atmanın düşük grup hızında ilerlemesidir ve fotonik biliminde önemli bir olgudur. Yavaş ışığın hızlı ışığa göre şiddeti daha yüksektir. Zira hızlı ışığı yavaş ışığa çevirmek, ışığı sıkıştırmak anlamına gelmektedir. Böylece birim alana düşen ışık gücü artmış olur. Birim alana düşen ışık gücünün artması da ışık-madde etkileşimini artırır. Madde-ışık etkileşiminin artması maddenin doğrusal olmayan özelliklerinin ortaya çıkmasında kolaylık sağlar. Işğın hızının yavaşlatılması optik sinyal işleme, optik anahtarlama, optik transistörler, mikro-nano ölçekte lazerler, ikinci ve üçüncü harmonik üretimi, frekans toplama-çıkarma işlemi yapılması ve yüksek performanslı algılayıcıların geliştirilmesinde oldukça önemlidir.

Bir ortamın fazı denklem (4.5) ile ifade edilir:

$$\varphi(\omega) = k(\omega)L \quad (4.5)$$

Dalga vektörü $k(\omega)$ Taylor serisine açılırsa,

$$k(\omega) = k(\omega_0) + k'(\omega_0)(\omega - \omega_0) + \frac{1}{2}k''(\omega_0)(\omega - \omega_0)^2 + \dots \quad (4.6)$$

Denklem (4.6)'da ilk terim dalganın faz hızı, ikinci terim grup hızı, üçüncü terim grup hız dağılımı ile ilişkilidir.

Grup hızı denklem (4.7) ile ifade edilir:

$$v_G = \frac{d\omega}{dk} \quad (4.7)$$

Grup hızı dalga cephesinin uzayda ilerleme hızıdır. Eğer dalganın ilerlediği ortam soğurmasız ise grup hızı enerji veya bilginin dalga boyunca iletirme hızı olarak da tanımlanabilir. Yavaş ışık grup hızı düşük olan ışıktır. ω - k dağılım eğrisinde bir bandın eğimi ne kadar azsa grup hızı o kadar düşüktür.

Grup indisi ışığın c hızından yavaşlama oranı olarak ifade edilir. Yavaş ışık birçok malzemede üretilebilir, fakat yararlı olabilmesi için yeterli bant genişliğine sahip olmalıdır.

$$n_G = \frac{c}{v_G} \quad (4.8)$$

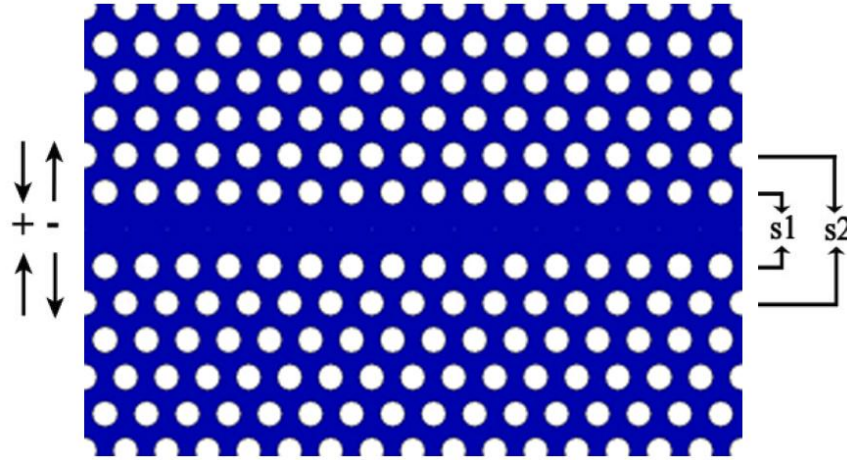
Eğer bir sinyal veya atma birden fazla dalga boyu içeriyorsa, bu sinyalin dalga boyu bileşenlerinin her biri farklı grup hızlarında ilerleyecektir. Dolayısıyla bu bileşenler alıcıya farklı zamanlarda ulaşacaktır. Bu durum atmanın genişlemesine yol açacaktır. Bu etki grup hız dağılımı (GVD) olarak adlandırılır ve denklem (4.9) ile ifade edilir. GVD birimi ps/(nm-mm) ile verilir. Bu terim atmanın 1 mm yol aldığında 1 nm spektral bant genişliği başına ne kadar ps genişleyeceğini göstermektedir (Pollock vd. 1995).

$$D_{\lambda} = -2\pi c/\lambda^2 \times \partial^2 k/\partial \omega^2 \quad (4.9)$$

Eğer grup indisi belirli bir frekans aralığında sabit kalacak şekilde dağınım eğrisi değiştirilebilirse, bu frekans aralığında elektromanyetik dalga aynı grup indisini görerek ve grup indisi neredeyse sabit olduğundan düşük grup hız dağınımı ile ilerletilebilir.

4.4.1 Yavaş ışık rejimine sahip dalga kılavuzunun oluşturulması ve analizi

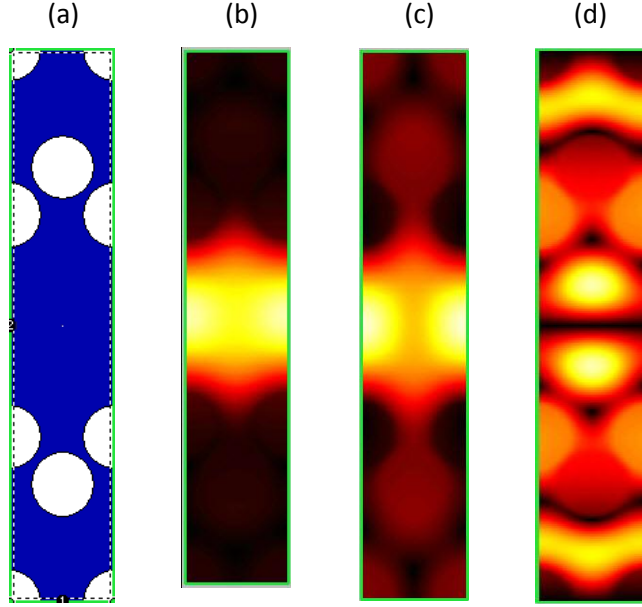
Bir FKD'da ışığın hızı çeşitli yollarla düşürülebilir. Bu tez kapsamında FKD boyunca çizgi kusuru etrafındaki ilk iki sıra deliklerin konumlarının dikey doğrultuda kaydırılmasıyla ışık yavaşlatılması yöntemi kullanılmıştır. Kılavuz kenarındaki sıra S1, onun komşu sırası da S2 olarak gösterilmiştir (Şekil 4.21). S1 ve S2 pozitif değer alması çizgi kusuru merkezine doğru daralma, negatif değer alması merkezden genişleme şeklinde kayma anlamına gelmektedir (Şekil 4.21).



Şekil 4.21 Yavaş ışık dalga kılavuzunun oluşturulması.

Yavaş ışık dalga kılavuzunun analizinde süper hücre seçimi önemlidir. Süper hücre FKD'nin temel dağınım diyagramı ve grup hızının belirlenmesinde önemli rol oynar. Şekil 4.22.a'da S1 ve S2 sıralarının kaydırılmasıyla oluşan FKD'de seçilen süper hücre görülmektedir. Süper hücre analiz edildiğinde dağınım diyagramının doğrusal kısmı için elektrik alan görünümü şekil 4.22.b, dağınım diyagramının doğrusal olmayan kısmı

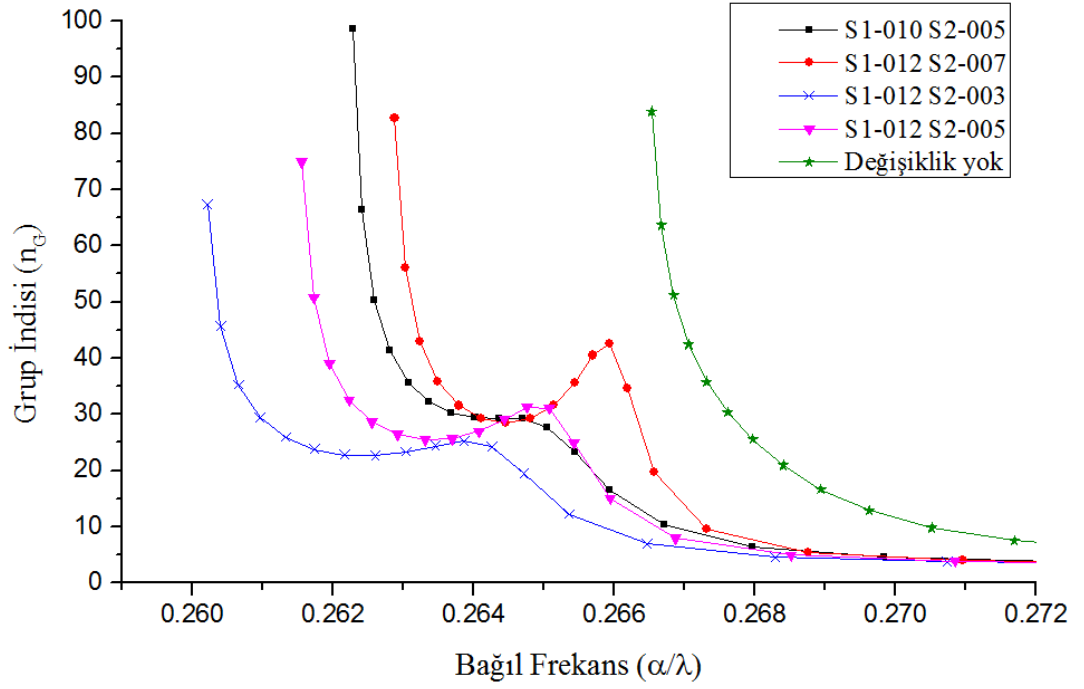
için çift kipli elektrik alan görünümü şekil 4.22.c ve tek kipli elektrik alan görünümü şekil 4.22.d'deki gibidir.



Şekil 4.22 Süper Hücre ve süper hücrenin alan dağılım görüntüleri,

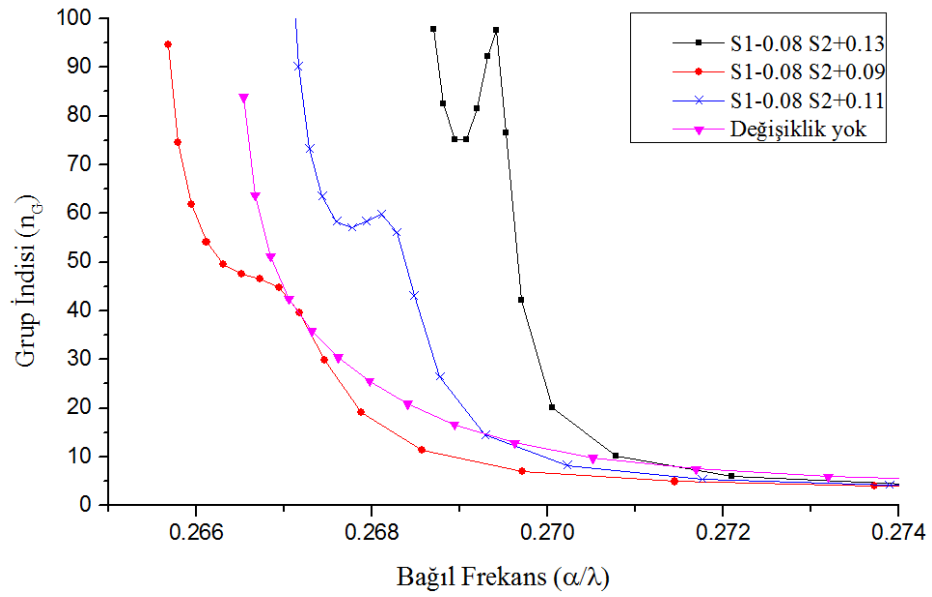
a. Süper hücre, b. Hızlı ışık bölgesinde alan dağılımı, c. Yavaş ışık bölgesinde çift kip alan dağılımı, d. Yavaş ışık bölgesinde tek kip alan dağılımı

Yavaş ışık FKD oluşturmak için kısım 4.2'de oluşturulan FKD üzerinde öncelikle S1 ve S2 sıralarının ikisinin birden merkezden dışarı doğru genişlediği değerler alınarak FKD'nin dağılım diyagramı (bağıl frekans-dalga vektörü) alınmıştır. Bu diyagram sayesinde FKD'nin FBA içindeki çift TE kipin grup indisi-frekans grafikleri çizdirilmiştir (Şekil 4.23). Burada s1 ve s2 kaydırmalarının miktarlarına göre grup indisleri ve grup indisinin birbirine yakın olduğu bant genişliklerinin değişim gösterdiği görülmüştür.



Şekil 4.23 Çizgi kusuru çevresindeki ilk iki sıra deliklerin konumunun genişletilmesi sonucu elde edilen grup indisi-frekans grafiği

Grup indisi seviyesinin daha yukarılara çıkarılabilmesi amacıyla ilk analizden farklı olarak S1 sırası merkezden dışa doğru genişletilmiş S2 sırası da merkeze doğru daraltılmıştır. Buna göre yapılan hesaplar sonucunda şekil 4.24'deki grafikler çizdirilmiştir. Burada S1 sırasının merkezden dışa genişleme miktarı $0.08a$ ve merkeze doğru daralma miktarı $0.11a$ olan FKD tasarımında yüksek grup indisinin yanında belirli bir frekans aralığında grup indislerinin birbirine çok yakın olduğu da görülmektedir. Bu frekans aralığı şekil 4.23'deki frekans aralıklarından az olmasına rağmen ışığın yavaşlama miktarının çok daha fazla olması nedeniyle ışığın tezin önceki bölümlerinde tartışılan özel bağdaştırıcılar ile bağdaştırılacağı yavaş ışık FKD tasarımı olarak bu değerler seçilmiştir.

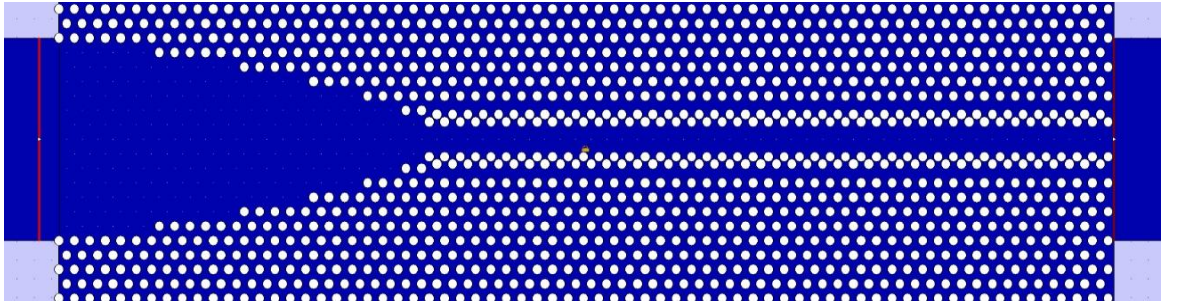


Şekil 4.24 Çizgi kusuru çevresindeki ilk sıra deliklerin konumunun genişletilmesi, ikinci sıra deliklerin konumunun daraltılması sonucu elde edilen grup indisi-frekans grafiği

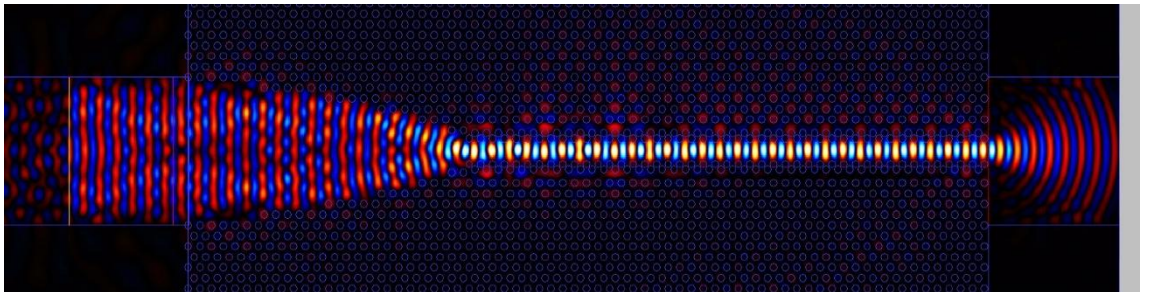
4.4.2 Yavaş ışık dalga kılavuzuna ışığın bağdaştırılması

Bu çalışmada dalga kılavuzuna gelen ışığın yavaş ışık rejiminde optimize edilmiş dalga kılavuzuna bağdaştırılması sağlanmaya çalışılacaktır. Burada önemli olan etmen, yavaş ışık dalga kılavuzunun verimli bir şekilde çalışabilmesi için frekansa göre grup hızının bir miktar sabit kalması gerektiğidir. Bu sağlanamadığı zaman ışık atımının bir kısmı diğer bir kısmını geride bırakmasından dolayı bu durum ışığın dağılmasına sebep olur. Bu durum bir önceki bölümde tartışılmış ve uygun sonuçlar elde edilmiştir. Yavaş ışığın bir problemi de hızlı ışığı yavaş ışığa dönüştürmektir. Yavaş ışık yapılarının empedansı hızlı ışık yapılarından yüksektir. Bu nedenle aradaki geçişlerde ışığın bir kısmı yansıtılır. İki yapı arasındaki hız oranı ne kadar fazlaysa bu yansıma o kadar fazla olur. Bu nedenle özellikle yüksek grup indisli yapıların dışarıyla olan etkileşimi özel yapılarla desteklenmelidir. Bu yapılar tezin önceki bölümlerinde anlatıldığı gibi bağdaştırıcılardır. Bu bağdaştırıcı yapı indis korunumu prensibine göre çalışan düz bir dalga kılavuzunu daha önce tasarlanan yavaş ışık yapısına bağdaştıracaktır.

Bu bölümde kısım 4.4.1’de elde edilen S1 sırasının merkezden dışa genişleme miktarı $0.08a$ ve merkeze doğru daralma miktarı $0.11a$ olan FKD tasarımı ile kısım 4.3’de tartışılan bağdaştırıcı tasarımları bir araya getirilerek düşük grup hızı dağınımına sahip olan frekans bölgesindeki iletim performansları analiz edilmiştir. Örnek gösterim olarak şekil 4.25’de iletim performansı analiz edilen yavaş ışık FKD’li dışbükey inceltici bağdaştırıcı tasarımı ve şekil 4.26’da bu tasarımın ışık ile etkileşimine ait alan profili görüntüsü verilmiştir.



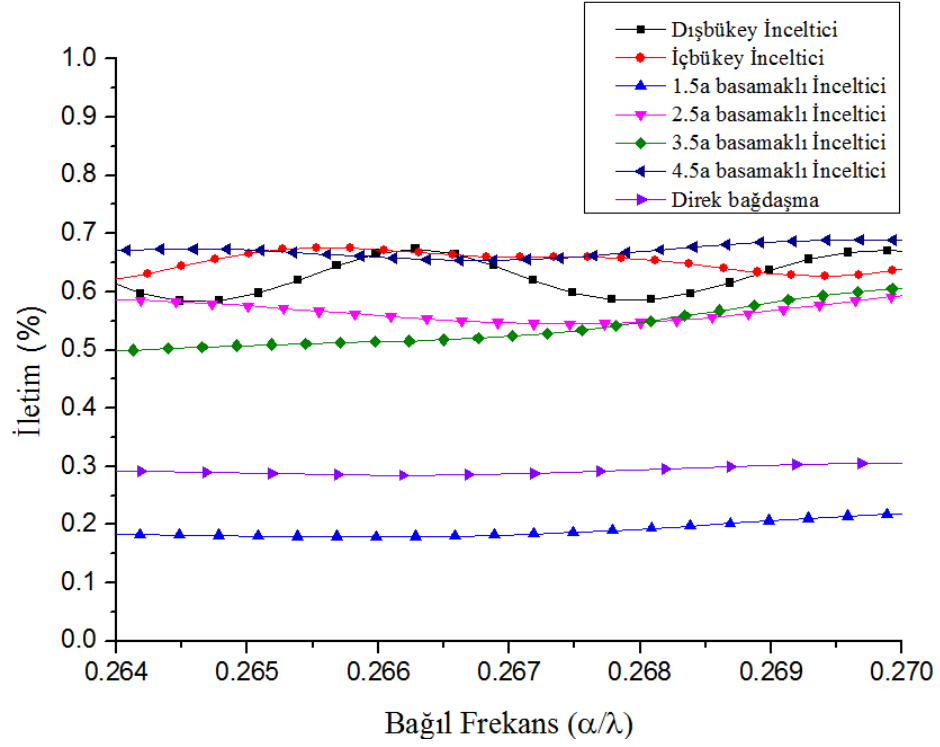
Şekil 4.25 Dışbükey inceltici bağdaştırıcıya sahip yavaş ışık dalga kılavuzuna sahip FK kesiti



Şekil 4.26 Yavaş ışık FKD'nin ışık ile etkileşimine ait alan profili görüntüsü

Şekil 4.27’de yavaş ışık dalga kılavuzuna kısım 4.3’de tasarlanan bağdaştırıcılar eklendiğinde klasik dalga kılavuzundan gelen ışığın FKD’ye bağdaşma iletim analizi sonucu gösterilmiştir. Burada dikkat edilecek önemli nokta oluşturulan yavaş ışık FKD’nin GVD’sinin en düşük olduğu frekans aralığıdır. Bu bağlı frekans aralığı $0.2675 - 0.2685 \alpha/\lambda$ ’dır. Bu aralıkta en yüksek iletim değeri veren tasarım %67 iletim

performansı ile 4.5a eşit basamak uzunluklu tasarımıdır. Diğer tasarımların iletim performansları çizelge 4.5’de verilmiştir.

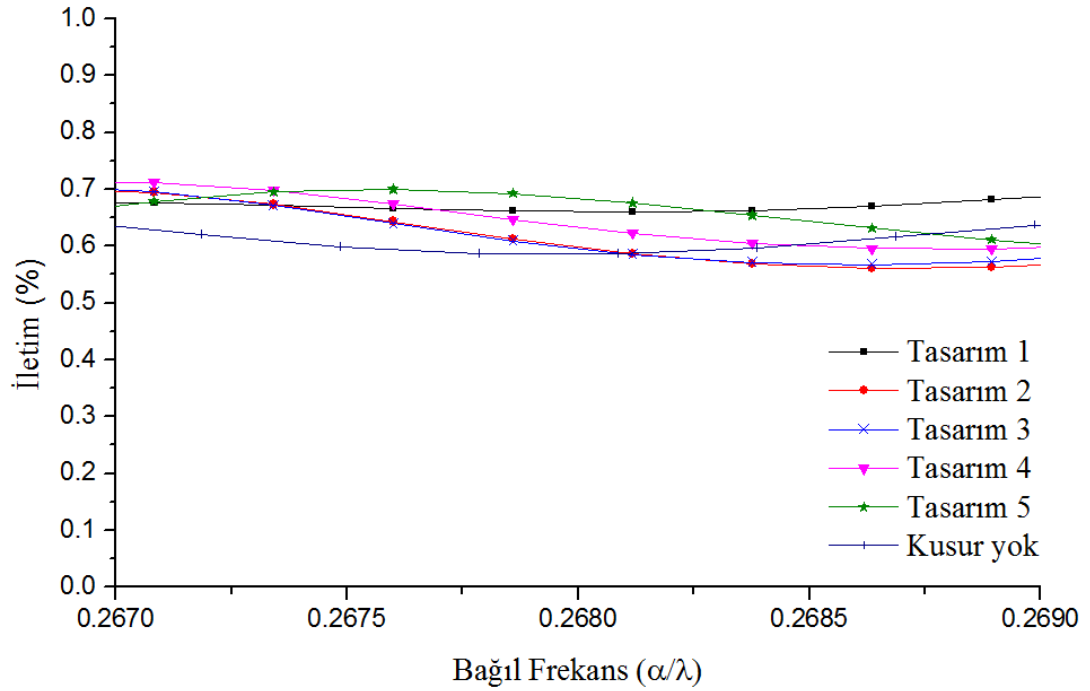


Şekil 4.27 Yavaş ışık dalga kılavuzu bağdaştırıcılarının iletim grafiği

Çizelge 4.5 GVD’nin düşük olduğu frekans aralığında bağdaştırıcıların yavaş ışık iletimi

Bağdaştırıcı Tipi	Yavaş Işık İletimi (%)	Frekans (α/λ)
Direk bağdaşma	26	0.268
1.5a uzunluklu	19	0.268
2.5a uzunluklu	55	0.268
3.5a uzunluklu	55	0.268
4.5a uzunluklu	67	0.268
Dışbükey	59	0.268
İçbükey	66	0.268

Çizelge 4.5’de görüldüğü üzere yavaş ışık FKD’a bağdaşma verimi çalışılan bağdaştırıcı modellerinde en fazla %67’ye çıkmaktadır. Bu seviyeyi artırmak ve kusurlu yapı optimizasyonunun etkisini gözlemlemek amacıyla dışbükey inceltici bağdaştırıcı basamakları arasına kısım 4.3.3’de modellenen kusur tasarımları konularak iletim verimlilikleri hesaplanmıştır (Şekil 4.28). GVD’nin düşük olduğu 0.2675-0.2685 a/λ frekans aralığında alınan ortalama iletim değerleri çizelge 4.6’da ayrıntılı olarak verilmiştir. Buradaki çarpıcı sonuç kusur yokken yavaş ışık iletimi %59 olan dışbükey inceltici bağdaştırıcının tasarım 4 kusur optimizasyonu ile %72’lik bir iletim verimliliğine kavuşmuş olmasıdır.



Şekil 4.28 Dışbükey inceltici bağdaştırıcının kusur optimizasyonuna ait yavaş ışık iletim grafiği (kusur çapı: $r/2$)

Çizelge 4.6 Dışbükey inceltici bağdaştırıcının kusur optimizasyonuna ait yavaş ışık iletim çizelgesi

Tasarım Tipi	Kusur Yarıçapı	Yavaş Işık İletimi (%)	Frekans (α/λ)
Kusur Yok	-	59	0.268
Tasarım 1	$r/2$	66	0.268
	$2r/3$	67	
Tasarım 2	$r/2$	57	0.268
	$2r/3$	60	
Tasarım 3	$r/2$	60	0.268
	$2r/3$	67	
Tasarım 4	$r/2$	63	0.268
	$2r/3$	72	
Tasarım 5	$r/2$	68	0.268
	$2r/3$	68	

4.5 Yapılan Çalışmaların Optik Haberleşme Dalgaboyuna Uygun Hale Getirilmesi

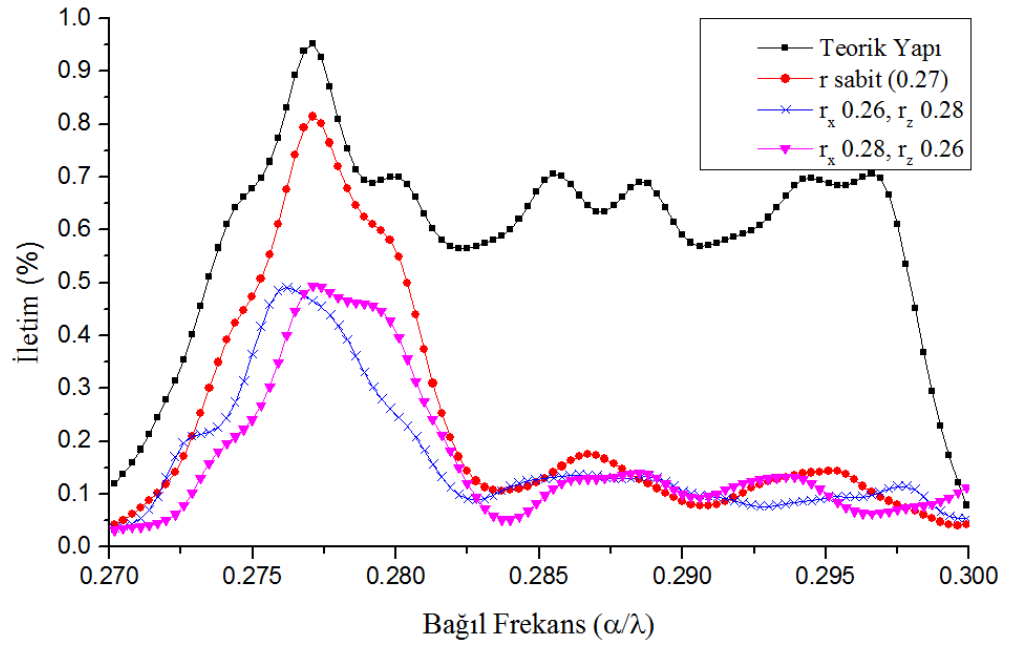
Bu tez çalışmasında klasik dalga kılavuzundan FKD'ye ışığın etkin bir şekilde bağdaştırılması çalışılmıştır. Bağdaştırılan ışığın dalga boyu optik haberleşme ağlarına uygun olması açısından $1.55 \mu\text{m}$ dalga boyu seçilmiştir. Hesaplamalar esnasında ışığın dalga boyu değil örgü parametresine bağlı olan bağıl frekans (α/λ) kullanılmıştır. Bunun sebebi fotonik kristal dalga kılavuzlarının en önemli özelliklerinden biri olan doluluk oranı (r/a) değiştirilmeden yapının boyutu değiştirilerek spektral bölge değişimine olanak sağlamasıdır. Örgü tasarımını oluştururken başlangıç örgü parametresi boyutu olarak $0.45 \mu\text{m}$ seçilmiştir. Yavaş ışık grup indisinin yüksek ve sabit olduğu bağıl frekansın $0.268 \alpha/\lambda$ olması nedeni ile örgü parametresinin bu bağıl frekansa eş gelen boyuta değiştirilmesi gerekir. Bu işlem bilinçli olarak tezin son kısmına bırakılmıştır. Çünkü yapılan tasarımın grup indisinin hangi frekansta sabit ve yüksek çıkacağı bilinemez. $f = \alpha/\lambda$ bağıl frekans eşitliğini kullanarak λ $1.55 \mu\text{m}$ seçildiğinde 0.268 bağıl frekansı için yeni örgü parametresi $0.415 \mu\text{m}$ bulunur. Bu sayede elde edilen tüm en yüksek ve ortalama iletim grafikleri optik haberleşme frekansında yani $1.55 \mu\text{m}$ 'de de aynı olacaktır.

4.6 Üretim Hatalarının Bağdaştırma Performansına Etkisi

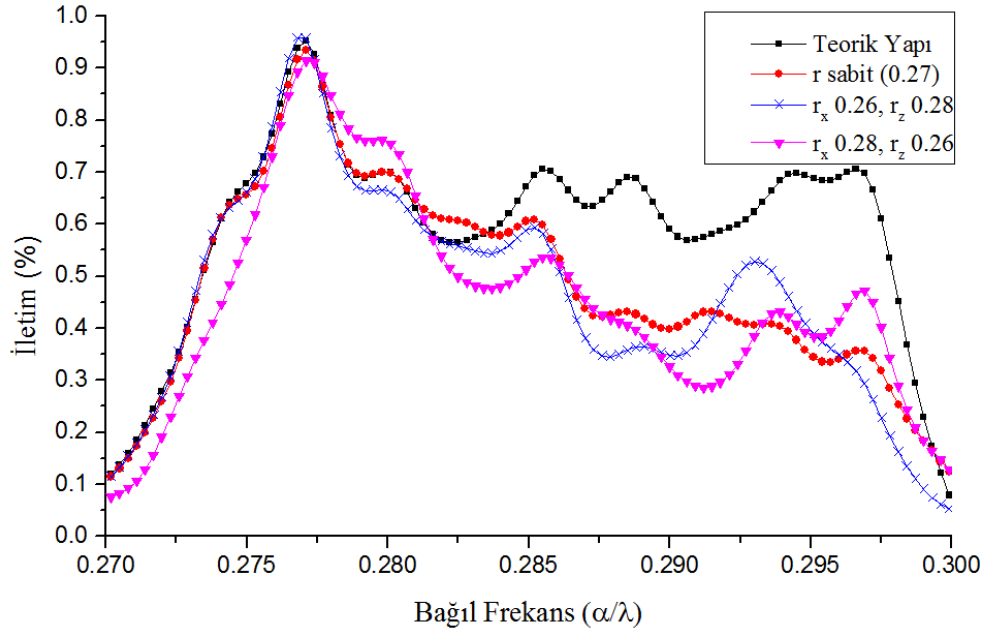
FK yapısı, elektron demeti litografisi ve atomik katman kaplama gibi modern mikro-fabrikasyon teknolojileriyle üretimi gerçekleştirilebilir (Feng vd. 2009). SOI (Silicon on insulator) alttaşların gelişimi elektronik ve optik fonksiyonların tek bir alttaş üzerinde tek parça bütünleşmesi sağlaması sayesinde tümleşik mikrofotonikler için yakından takip edilmektedir. SOI alttaşların avantajlarından biri üst silikon katman üzerindeki geniş ışık hapsine sahip dalga kılavuzlarının mikronaltı boyutlara inmesine izin vermesidir. Bunun sebebi silikon ve onun oksidi arasındaki yüksek kırılma indisi karşıtlığıdır. Üretim sırasında yapıda bazı düzensizlikler oluşur. Oluşabilecek düzensizliklerden biri silikon üzerindeki deliklerin konumlarının önceden belirtilenden farklı olması diğeri de deliklerin yarıçaplarının önceden belirlenen yarıçaplardan farklı olması ya da daireselliklerinin bozuk olması durumudur.

Tez çalışması sırasında FK örgü bilgisayar ortamında tasarlanıp analiz edilmiştir. Bu tasarımların üretim sonrası performanslarını tahmin etmek için FK örgü tasarımı içinde deliklerin çapları ve konumları değiştirilerek üretimden kaynaklanabilecek sapma benzetimi yapılabilir (Hagino vd. 2009).

Bu tez çalışmasında yüksek iletim performansı sergileyen değişken basamak uzunluğuna sahip dışbükey inceltici bağdaştırıcı tasarımının üretim hatası analizi yapılmıştır. İlk olarak dışbükey inceltici bağdaştırıcılı FKD'nin örgü parametresi konum toleransı $0.05a$ verilmiştir. Bu değer üzerinden konumların rasgele olarak değiştiği 3 analiz yapılmış ve bu iletim analizlerinin ortalaması alınarak grafik haline getirilmiştir. Deliklerin yarıçapı sabit olduğunda iletim performansı en yüksek değer olan %95'den %81'e inmiştir. Delik daireselliği bozularak yarıçapın x ve z yönlerinde farklılaştığı grafiklerde ise iletim performansının %50'nin altına indiği görülmektedir (Şekil 4.29). Bu çalışmadan sonra örgü parametresi toleransı $0.02a$ 'ya düşürülerek analizler tekrarlanmıştır (Şekil 4.30). Bu tolerans değerinde fabrikasyon sürecinin iletim performansına etkisi çok daha az olmuştur. Alınan analiz sonuçlarına göre iletim performansının %91'in altına inmediği gözlenmiştir.



Şekil 4.29 Örgü noktası konum toleransı $0.05a$ olan FKD'ye ait iletim grafiği



Şekil 4.30 Örgü noktası konum toleransı $0.02a$ olan FKD'ye ait iletim grafiği

5. SONUÇ

Fotonik kristaller ışığın fotonik bir yapı içerisinde kontrolü noktasında sahip olduğu olağanüstü özellikler sayesinde günümüzde heyecan uyandıran çalışma alanlarından bir tanesidir. Bu tez kapsamında, çizgi kusurlu fotonik kristal dalga kılavuzuna sahip optik aygıtlara ışığın bağdaştırılması amaçlanmıştır. Fotonik kristallerin bant yapıları düzlem dalga açılımı yöntemi hesaplanmış, elektromanyetik dalganın zaman içinde ilerleyişi ve iletim spektrumları zaman bölgesinde sonlu farklar yöntemiyle belirlenmiştir.

Tezin ilk bölümünde tezin amacı, önemi ve konu hakkında yapılmış önceki çalışmalar açıklanarak literatür tartışması yapılmıştır.

2. bölümde fotonik kristaller hakkında temel teorik bilgi verilip çalışmada kullanılacak olan iki boyutlu fotonik kristal dilimler ve dalga kılavuzları anlatılmıştır. Ayrıca fotonik kristallerin tarihi gelişimi ve uygulama alanları anlatılarak konunun önemine vurgu yapılmıştır.

Tezin 3. bölümünde kullanılan hesaplama yöntemlerinin seçiminin yapılması, bunlar hakkında açıklama ve kısa teorik bilgiler verilmesi ile ışığın dielektrik ortamda ilerleyişi anlatılmıştır. Son olarak da benzetim çalışmalarını yaptığımız bilgisayar programı hakkında bilgi verilmiştir.

Tezin 4. bölümünde fotonik kristal örgüler oluşturularak bunların bant diyagramları hesaplanmış ve fotonik bant aralıkları bulunmuştur. Kare örgülü dielektrik çubukların oluşturduğu fotonik kristal yapıda temel TM kip için fotonik bant aralığı, dielektrik malzeme üzerinde hava deliklerinin açılmasıyla oluşturulmuş üçgen örgülü fotonik kristal yapıda ise TE kip için fotonik bant aralığının bulunduğu ispatlanmıştır. Daha sonra oluşturulan üçgen örgü içinde çizgisel olarak bir sıra hava boşluğunun kaldırılmasıyla tek kipli dalga kılavuzu oluşturulmuştur. Bu kılavuzun düzlem dalga açılımı yöntemiyle bant diyagramı hesaplanmış ve kılavuz içindeki izinli kipler bulunmuştur. Bu kiplerin elektrik alan görünüşleri de karşılaştırılmıştır. Sonraki kısımda inceltilmiş bağdaşma teorisi anlatılarak altyapı oluşturulmuş ve literatürdeki

Çalışmalardan farklı olarak özel olarak oluşturulan basamaklı yapı ile ışığın inceltilerek fotonik kristal dalga kılavuzlarına bağdaştırılması için tasarlanan tasarımlar, bağdaştırıcı uzunlukları, basamak uzunlukları ve özel dalga kılavuzu girişlerine göre analiz edilmiştir. Analiz sonuçlarına göre değişken basamak uzunluklu içbükey ve dışbükey incelticilerin eşit basamak uzunluklu inceltici bağdaştırıcılara göre daha yüksek iletim verimliliğine sahip olduğu gözlenmiştir. Tüm sonuçlar karşılaştırıldığında ise dışbükey inceltici bağdaştırıcının ışığı en yüksek verimlilikle fotonik kristal dalga kılavuzuna taşıdığı ortaya çıkmıştır. Daha sonra bu yapılara kusur eklenerek bu tasarımın iletim verimliliği performansına etkisi araştırılmıştır. Bu alışma sonucunda kusurlu yapı optimizasyonunun eşit basamak uzunluklu inceltici yapılara büyük bir etki sağladığı görülürken değişken basamak uzunluklu içbükey ve dışbükey inceltici bağdaştırıcılar üzerinde belirgin bir etkisi olmamıştır. Bu sonuç ile üçgen örgülü dışbükey inceltici bağdaştırıcının en verimli bağdaştırma yöntemi olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Böylelikle literatürdeki karmaşık ve büyük bağdaştırıcı boyutlarına göre çok daha küçük ve oluşturulması daha kolay bir bağdaştırma geometrisi literatüre kazandırılmıştır. Bu çalışmadan sonra grup hızının yavaşlatılmasının ışık-madde etkileşimini artırması ve bunun sonucunda da çok daha fonksiyonel optik aygıtların geliştirilecek olması amacıyla ışık hızının yavaşlatıldığı dalga kılavuzları tasarlanmıştır. Burada grup indisinin en yüksek olduğu ve grup hızı dağınımının en az olduğu fotonik kristal dalga kılavuzu tasarımı seçilmiştir. Seçilen dalga kılavuzuna önceki kısımlarda yapılan bağdaştırıcı tasarımlarıyla ışık bağdaştırılmış ve iletim verimliliği analizleri yapılmış ve %26 olan direk bağdaşma verimini %72'ye çıkaran kusurlu yapı optimizasyonu yapılmış dışbükey inceltici bağdaştırıcı nerilmıştir. Sonraki kısımda yapılan çalışmaların optik haberleşme dalga boyuna optimize edilmesi anlatılarak tasarlanan bağdaştırıcıların optik haberleşme alanında uygulanabilirliği gsterilmıştir. Son kısımda ise üretim hatalarının bağdaştırma performansına etkisi incelenmiştir. Üretim hatası analizi sonucunda $0.02a$ örgü noktası konum toleransında bağdaştırma veriminin dışbükey inceltici bağdaştırıcıda %90'ın üzerinde kaldığı gözlemlenmiştir.

Hazırlanan tez fotonik kristal tabanlı optik aygıtların ihtiyaı olan ışığın bu aygıtlara daha iyi bir verimle bağdaştırılması konusunda önemli iletim artışları sağlamıştır. Küçük boyutlu fotonik kristal cihazlarda ortaya çıkan en kritik problem, dar fotonik

kristal dalga kılavuzuyla yeterli miktarda ışığı bağdaştırmaktır. Bu sebepten ötürü, bu tez kapsamında daha geniş kesitli ışık kaynağını, dar fotonik kristal dalga kılavuzu ile bağdaştırmak için özel fotonik kristal bağdaştırıcılar tasarlanarak bu problemin çözümü için benzetim önerileri sunulmuştur. İleriki çalışmalarda hesaplanan benzetim sonuçlarının üretim sonuçları ile doğrulanması amaçlanmalıdır.

KAYNAKLAR

- Abdelmalek, F., Belhadj, W. and Haxha, S. 2007. Realization of a high coupling efficiency by employing a concave lens based on two-dimensional photonic crystals with a negative refractive Index. *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 29(10), 1368-1374.
- Akahane, Y., Mochizuki, M., Asano, T., Tanaka, Y. and Noda, S. 2003. Design of a channel drop filter by using a donor-type cavity with high-quality factor in a two-dimensional photonic crystal slab. *Applied Physics Letter*, 82, 1341-1343.
- Anonymous. 2010. CrystalWave, PhotonDesign, <http://www.photond.com/>, Erişim Tarihi: 06.04.2012
- Asatryan, A. A., Robinson, P. A., Botten, L. C., McPhedran, R.C., Nicorovici, N.A. and Martin de Sterke, C. 1999. Effects of disorder on wave propagation in two-dimensional photonic crystals. *Physical Review E*, 60, 6118
- Asatryan, A. A., Robinson, P. A., Botten, L. C., McPhedran, R.C., Nicorovici, N.A. and Martin de Sterke, C. 2000. Effects of geometric and refractive index disorder on wave propagation in two-dimensional photonic crystals. *Physical Review E*, 62, 5711.
- Askari, M. 2011. High efficiency devices based on slow light in photonic crystals. Doktora tezi, Georgia Institute of Technology, School of Electrical and Computer Engineering, 145 s., Atlanta, A.B.D.
- Bakhtazad, A. and Kirk, A. G. 2007. First-band S-vector photonic-crystal superprism demultiplexer design and optimization. *Journal of Lightwave Tehcnology*, 25(5), 1322-1333.
- Barclay, P. E., Srinivasan, K., Borselli, M., and Painter, O. 2004. Efficient input and output fiber coupling to a photonic crystal waveguide. *Optics Letters*, 29, 697-699.
- Bayındır, M., Temelkuran, B. and Özbay, E. 2000. Photonic-crystal-based beam splitter. *Applied Physics Letters*, 77, 3902-3904.
- Berenger, J. P. 1994. A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves. *Journal of Computational Physics*, 114, 185.
- Bienstman, P., Assefa, S., Johnson, S. G., Joannopoulos, J. D., Petrich, G. S., and Kolodziejski, L. A. 2003. Taper structures for coupling into photonic crystal slab waveguide. *Journal of the Optical Society of America B*, 20, 1817-1821.
- Blanco, A., Chomski, E. and Grabttchak, S. 2000. Large-scale synthesis of a silicon photonic crystal with a complete three-dimensional bandgap near 1.5 micrometres. *Nature*, 405, 437-440.

- Bykov, V. P. 1972. Spontaneous emission in a periodic structure. *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 35, 269.
- Englund, D., Fattal, D. and Waks, E. 2005. Controlling the spontaneous emission rate of single quantum dots in a two-dimensional photonic crystal. *Physical Review Letters*, 95, 13904-13907.
- Feng, J., Chen, Y., Blair, J., Kurt, H., Hao, R., Citrin, D. S., Summers, C. J. and Zhou, Z. 2009. Fabrication of annular photonic crystals by atomic layer deposition and sacrificial etching. *Journal of Vacuum Science and Technology B*, 22, 568-572.
- Geernaert, T., Luyckx, G. and Voet, E. 2009. Transversal load sensing with fiber Bragg gratings in microstructured optical fibers. *IEEE Photonics Technology Letters*, 21(1), 6-8.
- Hagino, H., Takahashi, Y., Tanaka, Y., Asano, T. and Noda, S. 2009. Effects of fluctuation in air hole radii and positions on optical characteristics in photonic crystal heterostructure nanocavities. *Physical Review B* 79, 085112.
- Happ, T. D., Kamp, M., and Forchel, A. 2001. Photonic crystal tapers for ultracompact mode conversion. *Optics Letters*, 26, 1102-1104.
- Heinrich, J., Langhans, R., Seufert, J., et al. 2007. Quantum cascade microlasers with two-dimensional photonic crystal reflectors. *IEEE Photonics Technology Letters*, 19(23), 1937-1939.
- Ho, K. M., Chan, C. T., and Soukoulis, C. M. 1990. Existence of a photonic gap in periodic dielectric structures. *Physical Review Letters*, 65, 3152-3155
- Joannopoulos, J. D., Villeneuve, P. R. and Fan, S. 1997. Photonic crystals: putting a new twist on light. *Nature*, 386, 143.
- Joannopoulos, J.D., Maede, R.D and Winn, J.N. 2008. *Photonic Crystals: Molding the Flow of Light*. Princeton University Press, 286, Princeton, NJ.
- John, S. 1987. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices. *Physical Review Letters*, 58, 2486–2489.
- Johnson, S. G., Villeneuve, P. R., Fan, S. H. and Joannopoulos, J. D. 2000. Linear waveguide in photonic crystal Slab. *Physical Review B*, 62, 8212-8222.
- Khoo, E. H., Liu, A. Q. and Wu, J. H. 2005. Nonuniform photonic crystal taper for high-efficiency mode coupling. *Optics Express*, 13(20), 7748-7759.

- Koshiba, M., Y. Tsuji, Y. and M. Hikari, M. 2000. Time-domain beam propagation method and its application to photonic crystal circuits. *Journal of Lightwave Technology*, 18, 102-110.
- Kunz, K.S. and Luebbers, R.J. 1993. *The Finite- Difference Time-Domain Method for Electromagnetics*. CRC Press, 448, Boca Raton.
- Marcuse, D. 1969. Radiation losses of tapered dielectric slab waveguides. *Bell System Technical Journal*, 49, 273-290.
- Mekis, A. and Joannopoulos, J. D. 2001. Tapered couplers for efficient interfacing between dielectric and photonic crystal waveguides. *Journal of Lightwave Technology*, 19, 861-865.
- Mekis, A., Chen, J. C., Kurland, I., Fan, S., Villeneuve, P. R. and Joannopoulos, J. D. 1996. High transmission through sharp bends in photonic crystal waveguide. *Physical Review Letters*, 77, 3787-3790.
- Morita, Y., Tsuji, Y. and Hirayama, K. 2008. Proposal for a compact resonant-couplingtype polarization splitter based on photonic crystal waveguide with absolute photonic bandgap. *IEEE Photonics Technology Letters*, 20(2), 93-95.
- Palamaru, M. and Lalanne, Ph. 2001. Photonic crystal waveguides: out-of-plane losses and adiabatic mode conversion. *Applied Physics Letters*, 78, 1466-1468.
- Pottier, P., Ntakis, I. and De La Rue, R. M. 2003. Photonic crystal continuous taper for low-loss direct coupling into photonic crystal channel waveguides and further device functionality. *Optics Communications*, 223, 339–347.
- Prather, D. W., Murakowski, J., Shi, S., Venkataraman, S., C. Chen, C. and Pustai, D. 2002. High-efficiency coupling structure for a single-line-defect photonic crystal waveguide. *Optics Letters*, 27, 1601-1603.
- Rayleigh, L. 1887. On the maintenance of vibrations by forces of double frequency, and on the propagation of waves through a medium endowed with a periodic structure. *Philosophical Magazine*, 24, 145-159.
- Skorobogatiy, M., Johnson, S. G., Jacobs, S. A. and Fink, Y. 2003. Dielectric profile variations in high-indexcontrast waveguides, coupled mode theory, and perturbation expansions. *Physical Review E*, 67, 046613.
- Skorobogatiy, M. 2004. Modeling the impact of imperfections in high-index-contrast photonic crystal waveguides. *Physical Review E*, 70, 046609.
- Sozuer, H. S., Haus, J. W. and Inguva, R. 1992. Photonic bands: Convergence problems with the plane-wave method. *Physical Review B*, 45, 13962-13972

- Sukhoivanov, I. and Guryev, I. 2009. Photonic Crystals: Physics and Practical Modeling. Springer Press, 238, New York.
- Sun, X. H., Tao, X. M. and Kwan, K. Ch. 2008. Effects of material composition on the superlens frequency of photonic crystals. *Journal of the Optical Society of America B*, 25(4), 571–575.
- Tailaert, D., Bogaerts, W., Bienstman, P., Krauss, T., Daele, P. V., Moerman, I., Verstuyft, S., Mesel, K. D. and Baets, R. 2002. An out-of plane grating coupler for efficient butt coupling between compact planar waveguides and single mode fibres. *IEEE J. Quantum Electron*, 38, 949-954.
- Wijnhoven, J. E. G. J. and Willem, L. V. 1998. Preparation of photonic crystals made of air spheres in Titania. *Science*, 281, 802-804.
- Xu, Z., Wang, J., and He, Q. 2005. Optical filter based on contra-directional waveguide coupling in a 2D photonic crystal with square lattice of dielectric rods. *Optics Express* 13(15), 5608-5613.
- Yablonovitch, E. 1987. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics. *Physical Review Letters*, 58, 2059-2062.
- Yee, K. S. 1966. Numerical solution of initial boundary value problems involving maxwell's equations in isotropic media. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2, 302-307.
- Zhang, Y. and Li, B. 2006. Photonic crystal-based bending waveguides for optical interconnections. *Optics Express*, 14(12), 5723-5732.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Osman ÖZDEMİR

Doğum Yeri : Ankara

Doğum Tarihi : 08.07.1987

Medeni Hali : Bekar

Yabancı Dili : İngilizce

Eğitim Durumu

Lise : Ümitköy Anadolu Lisesi, Ankara (2005)

Lisans : Ankara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Fizik Mühendisliği Bölümü (2010)

Yüksek Lisans : Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,
Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı (Şubat 2011 - Aralık 2014)

Çalıştığı Kurumlar

TÜBİTAK-SAGE : Araştırmacı (Mekatronik Birimi) 2013 – halen devam etmekteyim.

Ulusal Kongre

Ozdemir, O., Bagci, F. and Akaoglu, B. 2012. Improved Transmission Characteristics in a Photonic Crystal Waveguide Geometry with Two 60° Waveguide Bends. 13. Ulusal Optik, Elektro-Optik ve Fotonik Toplantısı, Koç Üniversitesi, İstanbul.