

FOTONİK KRİSTALLERDE IŞIĞIN YAVAŞLATILMASI

KADİR ÜSTÜN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ELEKTRİK VE ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ

TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

AĞUSTOS 2011

ANKARA

Fen Bilimleri Enstitü onayı

Prof. Dr. Ünver KAYNAK

Müdür

Bu tezin Yüksek Lisans derecesinin tüm gereksinimlerini sağladığını onaylarım.

Doç. Dr. Kahraman Güçlü KÖPRÜLÜ

Anabilim Dalı Başkanı

Kadir ÜSTÜN tarafından hazırlanan FOTONİK KRİSTALLERDE IŞIĞIN YAVAŞLATILMASI adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Hamza KURT

Tez Danışmanı

Tez Jüri Üyeleri

Başkan : Yrd. Doç. Dr. Ali Cafer GÜRBÜZ _____

Üye : Doç. Dr. Hamza KURT _____

Üye : Doç. Dr. Kemal BIÇAKCI _____

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada orijinal olmayan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Kadir ÜSTÜN

Üniversitesi : TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi
Enstitüsü : Fen Bilimleri
Anabilim Dalı : Elektrik ve Elektronik Mühendisliği
Tez Danışmanı : Doç. Dr. Hamza KURT
Tez Türü ve Tarihi : Yüksek Lisans – Ağustos 2011

Kadir ÜSTÜN

FOTONİK KRİSTALLERDE IŞIĞIN YAVAŞLATILMASI

ÖZET

Işığın yavaşlatılması yirmi yıldan fazla bir zamandır yoğun bir araştırma konusudur. Işığın yavaşlatılmasının optik tamponlar, geciktirme kabloları ve doğrusal olmayan dalga boyu çevirici elemanların çalışmasında etkin rol oynayabileceği gerçeğini gören araştırmacılar ışığın yavaşlatılması için verimli yollar aramaktadırlar. Işığı yavaşlatma denemeleri iki kategoride değerlendirilebilir. Birinci kategoriye giren denemelerin temelinde sıradışı malzemelerin ve katı hal yapıların özellikleri kullanılarak ışığı yavaşlatmak yatmaktadır. İkinci kategoriye giren denemeler ise doğrusal malzemelerin yapısal dispersiyonunun kullanılması yönündedir. Bu yapısal dispersiyon fotonik kristallerin kullanılmasıyla elde edilmektedir. Fotonik kristaller yasaklı bant aralığı özelliği gösteren özgün yapılardır. Fotonik kristallerin içerisine hatalar (yapısal bozulmalar) konularak ışığın bu alanlarda lokalizasyonu sağlanabilir, böylece dalga kılavuzları ve kaviteler elde edilebilir. Bu yapıların üzerinde özel tasarımlar yaparak yavaş ışık dalga kılavuzları, yüksek kalite faktörlü kaviteler ve benzeri yapılar elde edilebilir. Tezin kapsamı şöyle açıklanabilir: Tezin ilk amacı yapısal değişikliklerle ışığı fotonik kristal dalga kılavuzlarında yavaşlatmaktır. Tezin ikinci amacı ise yavaş ışığı geniş bir bant aralığında yavaşlatmaktır. Tezin son amacı ise hızlı ışıktan yavaş ışığa, yavaş ışıktan hızlı ışığa geçişin kayıpsız gerçekleşmesini sağlayacak arayüzlerin tasarlanmasıdır. Yavaş ışığı hedefleyen yeni fotonik kristal dalga kılavuzlarının tasarımı sayesinde elektrik-ışık sinyal dönüşümlerinden kaçınılması mümkün olmakta ve böylelikle bilgi işleme sistemlerinin verimliliğinin artması beklenmektedir.

Anahtar Kelimeler: Fotonik Kristaller, Yavaş Işık, Dalga Kılavuzları, Kaviteler, Dalga kılavuzu eşleyiciler, Sayısal elektromanyetik yöntemler.

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

Kadir ÜSTÜN

SLOWING DOWN THE LIGHT IN THE PHOTONIC CRYSTALS

ABSTRACT

Slow light has been an intense research area for more than two decades. Researchers has sought for efficient ways of slowing down the light because slow light pave the way to optical devices such as optical buffers, delay lines, and nonlinear elements that can be used to convert the wavelength of the light. The attempts for slowing down the light are carried out in two different categories. The first category utilizes extraordinary material properties such as atomic resonances and solid state structures. The second category employs structural dispersion of linear materials, such as photonic crystals. Photonic crystals are distinctive elements of photonic devices that show photonic band gap property. By imposing defects into photonic crystals, devices can be achieved that confine the light in these defects, such as waveguides and cavities. By special designs of these types of photonic structures, slow light waveguides and high quality factor cavities can be attained. The first aim of the thesis is slowing down the light speed in photonic crystal waveguides with structural modifications. The second aim of the thesis is to obtain slow light with a large bandwidth. The last concern of the thesis is to solve the transition problem of fast light to slow light and back from slow light to fast light. By novel designs of photonic crystal structures that provide slow light propagation, the efficiency of information processing systems can be increased by avoiding the electro-optic conversions.

Keywords: Photonic crystals, Slow light, Waveguides, Cavities, Waveguide couplers, Computational electromagnetic methods.

TEŞEKKÜR

Beni bu yeni konuyla tanıştıran hocam Doç. Dr. Hamza Kurt'a, ve manevi desteklerinden ötürü Aileme, Doç. Dr. Bülent Tavlı'ya, Prof. Dr. Ünver Kaynak'a, Doç. Dr. Kemal Bıçakcı'ya, Mehmet Barış Tabakçioğlu'na ve Mehmet Burak Akgün'e ve diğer tüm emeği geçenlere teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca TÜBİTAK'a 108T717 numaralı Fotonların Hızının Fotonik Kristal Dalga Kılavuzları Kullanılarak Yavaşlatılması başlıklı proje kapsamında verdiği destek için teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iii
ABSTRACT	iv
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER	vi
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	viii
KISALTMALAR	xi
SEMBOL LİSTESİ	xii
1. GİRİŞ	1
1.1. Fotonik Kristaller	1
1.2. Fotonik Kristallerde Işığın Yavaşlaması	2
2. FOTONİK KRİSTAL ve MAXWELL DENKLEMLERİ	4
2. 1. Fotonik Kristal Yapılarda Elektromanyetik Dalga Hareketi	4
3. FOTONİK KRİSTAL DALGA KILAVUZLARI VE YAVAŞ IŞIK	8
3. 1. Fotonik Kristal Dalga Kılavuzu ve Dispersiyon Özellikleri	8
3.1.1. Kare Örgülü Fotonik Kristal	8
3.1.2. Üçgen Örgülü Fotonik Kristal	9
3. 2. Fotonik Kristal Dalga Kılavuzlarında Grup Hızını Bant Kenarlarında Azaltma	10
3.2.1 Giriş	11
3.2.2. Fotonik Kristal yapı, Dispersiyon diyagramı ve Elektrik Alan	

dağılımı	11
3.2.3. Yapı üzerinde yapılan değişiklikler ve Sonuçların değerlendirilmesi	14
3.2.4. Sonuç	19
3. 3. Grup Hızını Yüksek Bant Genişliğinde Azaltma	20
3. 4. Fotonik Kristal Dalga Kılavuzları ve Kovuklarla (Kaviteler) Yavaş Işık	29
3.4.1. Işığın yavaşlatan fotonik yapının özellikleri ve frekans düzleminde incelenmesi	30
3.4.2. Çok yavaş ışığın yol almasının zaman düzleminde incelenmesi	34
3.4.3. Tight-binding metoduyla yarı analitik hesaplar	36
3.4.4. Üçgen-örgü fotonik kristal tabanlı benzer bir yapının analizi	38
3.4.5. Tartışma	41
4. YAVAŞ IŞIĞIN PRATİKTEKİ PROBLEMLERİ VE İLGİLİ TASARIMLAR	43
4.1. Hızlı Işıktan Yavaş Işığa ve Yavaş Işıktan Hızlı Işığa Geçiş	43
4.1.1. Kare örgü fotonik kristal yapı için eşleyici yapının tasarımı	43
4.1.2. Üçgen örgülü yavaş ışık yapısı	47
4.2.3. Üçgen yapı için eşleyici tasarımı	51
4.2.4. Yavaş ışık dalga kılavuzunun alan artırma özelliği	53
5. BİTİRİŞ	57
KAYNAKLAR	58
ÖZGEÇMİŞ	61

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Soldan sağa, bir, iki ve üç boyutlu fotonik kristaller	1
Şekil 2.1. Kare örgüsü ve daraltılamaz Brillouin alanı	6
Şekil 3.1. (a) Kare örgüye göre dizilmiş silindirik çubuklardan oluşan fotonik kristal. (b) Ters uzayda simetri noktaları.	8
Şekil 3.2. Şekil 3.1'deki yapı için daraltılamaz Brillouin alanı kenarlarında dispersiyon diyagramları. (a) TM mod için (Elektrik alan kristal düzlemine dik). (b) TE mod için (Manyetik alan kristal düzlemine dik).	9
Şekil 3.3. Üçgen örgüye göre dizilmiş silindirik deliklerden oluşan fotonik kristal. (b) Ters uzayda simetri noktaları.	10
Şekil 3.4. Şekil 3.3'deki yapı için daraltılamaz Brillouin alanı kenarlarında dispersiyon diyagramları. (a) TM mod için (Elektrik alan kristal düzlemine dik). (b) TE mod için (Manyetik alan kristal düzlemine dik).	10
Şekil 3.5. Üzerinde işlem yapılmamış fotonik kristal dalga kılavuzu (solda) ve bu yapı için kullanılan hesap hücresi (sağda)	12
Şekil 3.6. Dispersiyon diyagramında yapının içinde dalga kılavuzu açılmasıyla oluşan bant.	12
Şekil 3.7. Şekil 3.5'deki fotonik kristal dalga kılavuzunun dispersiyon diyagramında yavaş ışık bölgesinin grup indis – frekans grafiği.	13
Şekil 3.8. $k_x=0$, $k_x=0.05$, $k_x=0.10$ durumları için elektrik alan dağılımları.	14
Şekil 3.9. Hesap hücresinde yapılan değişiklikler.	14
Şekil 3.10. Çeşitli r değerleri (a cinsinden) için grup indis – frekans grafikleri.	15
Şekil 3.11. İlk satırdaki silindirlerin dikdörtgen çubuklarla değiştirilmiş hali.	15
Şekil 3.12. Dikdörtgen çubukların y yönündeki uzunluğuna göre grup indis – frekans değişimi (x yönündeki uzunluk $0.4a$)	16
Şekil 3.13. Soldan sağa sırasıyla $y=0.4a$, $0.6a$, $0.7a$, $0.8a$, $1.0a$ için elektrik alan dağılımları.	17
Şekil 3.14. Çeşitli x boyutları için grup indis – frekans çizimleri ($y=0.4a$)	17
Şekil 3.15. Soldan sağa sırasıyla $x=0.2a$, $0.4a$, $0.6a$ için elektrik alan dağılımları	18
Şekil 3.16. $k=0.01$ 'deki grup indisin çeşitli x ve y uzunlukları için aldığı değerleri gösteren ağ grafiği.	19
Şekil 3.17. (a) Üzerinde işlem yapılmamış üçgen örgülü fotonik kristal dalga kılavuzu. (b) Bu fotonik kristal dalga kılavuzunun dalgayı koruduğu bantların dispersiyon diyagramı üzerindeki yeri. (c) Simetrik modun grup indis spektrası.	21
Şekil 3.18. (a) Şekil 3.17(a)'da sarıyla gösterilen deliklerin çaplarının değişmesiyle oluşan çeşitli dispersiyon diyagramları. (b) Bu yarıçap değerlerinin $0.3625a$ 'dan $0.40a$ 'ya kadar değişmesiyle elde edilen grup indis – frekans grafikleri (soldan sağa). (c) Yarıçap değerlerinin $0.4125a$ 'dan $0.45a$ 'ya kadar değişmesiyle elde edilen grup indis – frekans grafikleri (soldan sağa).	22

Şekil 3.19. (a) İlgili yarıçap değerinin değişmesiyle elde edilen bant genişliği değerleri. (b) 'U' eğrisinin sabit kabul edilen grup indisin yarıçapa göre değişimi. (c) Kriter değer olan grup indis bant genişliği çarpımı.	24
Şekil 3.20. Grup hızı dispersiyonunun (a) $r=0.3875a$ ve (b) $r=0.45a$ durumlarında frekans bağımlılığı.	25
Şekil 3.21. (a) Dalga kılavuzu boyunca konulan ölçüm noktalarındaki gecikme. Ekli küçük resimde SFZD simülasyonu yapılan yapının bir parçası gösterilmektedir. (b) Düzensizlikten kaynaklanan kayıpların düzensiz yarıçaplı silindirlerin x yönünde kapladığı uzunluğa göre grafiği (mavi çemberler). Düz çizgi bu noktaların uydurulduğu doğrusal fonksiyondur (logaritmik ölçekte).	27
Şekil 3.22. Dalga kılavuzu boyunca ışığın hareketi. Yavaş ve hızlı ışığın farklı zamanlarda anlık görüntüleri sırasıyla (a) ve (b)'de gösterilmiştir. (c) Yavaş ışığın yapının sonundaki dağılımı.	29
Şekil 3.23. Kare örgü fotonik kristal dalga kılavuzu ve kavitelerin birleşimiyle oluşan yavaş ışık yapısı.	31
Şekil 3.24. (a) S_x 'in $3a$, $5a$, $7a$, ve $9a$ değerleri için, PWE metoduyla hesaplanan dispersiyon diyagramları. (b) $S_x = 9a$ için yavaş modun elektrik alan dağılımı. (c) $S_x = 3a$ için PWE ile elde edilen (kırmızı) ve yarı analitik tight binding metoduyla elde edilen (mavi) dispersiyon diyagramları. (d) PWE çözümü için (kırmızı) ve yarı analitik metod için (mavi) grup indis spektrumu.	33
Şekil 3.25. (a) S_x ' değerine göre grup indis (mavi çemberler) ve bant genişliği (yeşil kareler) değişimi. (b) Gösterge değerinin S_x 'e göre değişimi (mavi çemberler). Bir yaklaşım fonksiyonu da eklenmiştir (kırmızı).	34
Şekil 3.26. $S_x = 5a$ için ışık atımının zaman düzleminde yol alışı gösteren SFZD simülasyonu.	35
Şekil 3.27. $S_x = 7a$ için ışık atımının zaman düzleminde yol alışı.	36
Şekil 3.28. Düzlem Dalga metodu ve tight binding yaklaşımlarına göre 'U' şekilli grup indis frekans grafiklerinin minimum grup indis değerleri.	37
Şekil 3.29. Üçgen örgü fotonik kristal temelli ikinci yavaş ışık fotonik yapısı.	38
Şekil 3.30. (a) Aynı rezonans modun farklı S_x değerleri için dispersiyon diyagramları. (b) Rezonans modun manyetik alan dağılımı.	39
Şekil 3.31. (a) Şekil 3.30(a)'daki bantların grup indis spektrumu. 'U'-şekilli eğrinin farklı S_x değerleri için grup indis ve bant genişliği karşılaştırması (b).	39
Şekil 3.32. Gösterge değerinin S_x 'e göre değişimi (kare), ve yaklaşım fonksiyonu $g(S_x) = B/S_x$ (çizgi).	40
Şekil 3.33. (a) $S_x = 7a$ için yol alan atımın farklı ölçüm noktalarında aldığı değerler. Her bir ölçüm noktası için atım merkezlerinin zaman gecikmesi alınmış doğrusal bir fonksiyona oturtulmuştur (b).	41
Şekil 3.34. $S_x = 5a$ için R parametresine göre grup indisdeki sapma (sol y-ekseni) ve frekans kayması (sağ y-ekseni).	42

Şekil 4.1. Yavaş ışık yapısı	44
Şekil 4.2. Giriş çıkışlarıyla birlikte yavaş ışık fotonik kristal dalga kılavuzu	44
Şekil 4.3. Eşleyici tasarımının genel görünümü. (b) Düzlemsel dalga kılavuzunun dispersiyon diyagramı (c) Yavaş ışığın dispersiyon diyagramı.	45
Şekil 4.4. 1.1a ile 3.3a arasında değişen farklı L_a değerleri için iletim spektrumu.	46
Şekil 4.5. t değerine göre iletim optimizasyonu.	47
Şekil 4.6. Üçgen örgü fotonik kristal dalga kılavuzu yapısının gösterimi ve yasaklı bant aralığındaki dalga kılavuzu bantları	48
Şekil 4.7. Seçilmiş modların manyetik alan dağılımları.	49
Şekil 4.8. Seçilmiş modların grup indis spektrumları	49
Şekil 4.9. (a) Alt bant için manyetik alanın farklı ölçüm noktalarında zamanda değişimi. (b) (a)'da gösterilen atımların yavaş ışık yapısında zamanda gecikmelerinin ölçüm noktalarının mesafesine göre değişimi.	50
Şekil 4.10. (a) Üst bant için manyetik alanın farklı ölçüm noktalarında zamanda değişimi. (b) (a)'da gösterilen atımların yavaş ışık yapısında zamanda gecikmelerinin ölçüm noktalarının mesafesine göre değişimi.	50
Şekil 4.11. Sivriltilmiş giriş eşleyici.	51
Şekil 4.12. Sivriltilme uzunluğu olan L_x değerlerine göre iletim spektrumu.	52
Şekil 4.13. (a) En iyilenmiş durumun parametreleri. (b) En iyi durumla doğrusal sivriltilmenin en iyi sonuç verdiği durum olan $L_x = 10a$ durumu karşılaştırılmıştır.	52
Şekil 4.14. Devamlı kaynak (tek frekans) uyarımında elektrik alan dağılımı.	54
Şekil 4.15. Elektrik alanın karesinin x eksenini boyunca alınan kesiti üzerindeki değerleri	54
Şekil 4.16. Devamlı kaynak (tek frekans) uyarımında manyetik alan dağılımı.	55
Şekil 4.17. Manyetik alanın karesinin x eksenini boyunca alınan kesiti üzerindeki değerleri	55

KISALTMALAR

Kısaltmalar Açıklama

GHD	Grup hızı dispersiyonu (GHD)
SFZD	Sınırlı Fark Zaman Düzlemi (SFZD)

SEMBOL LİSTESİ

Bu çalışmada kullanılmış olan simgeler açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
c	Işığın vakumdaki hızı
n_g	Grup indisi
v_g	Grup hızı

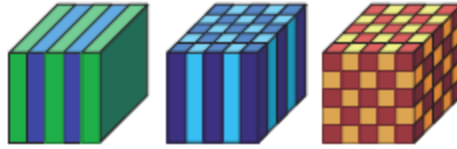
BÖLÜM 1

1. GİRİŞ

Geçmişten günümüze fotonik kristal yapılar kullanılarak çok farklı işlevlere sahip yapılar elde edilmiştir. Bu nedenle ilk önce fotonik kristal konusunun tarihçesinden ve kullanım alanlarından kısaca bahsedeceğiz. Daha sonra tez kapsamında yapılan çalışmaları kısaca özetleyeceğiz

1. 1 Fotonik Kristaller

Fotonik kristaller bir, iki veya üç boyutlu periyodik yalıtkan (dielektrik) yapılardır. Bir boyutlu yapılarda elektromanyetik dalganın hareket özellikleri ilk defa Lord Rayleigh tarafından 1888 yılında yayımlanan bir makalede bahsedilmiştir [1]. Daha sonra elektronun kristal yapılardaki kuantum mekanik özellikleri Bloch tarafından 1928 yılında çalışılmıştır [2]. Fotonik kristal ve yasaklı bant aralığı kavramları Yablonovitch tarafından 1987 de yayımlanmış bir makalede ele alınmıştır [3]. Frekansı yasaklı bant aralığında olan ışık periyodik yapı içerisinde hareket edemez ve yapı bir ayna görevi görür. Periyodik özelliğin kasıtlı şekilde bozulması sayesinde ışık belirli bölgelere hapsedilebilir. Işığın belli bir ortamda hapsedilmesi ve hareketinin yönlendirilebilmesi ise fotonik kristal kavitelelerin, dalga kılavuzlarının ve fiber optik kabloların önünü açmıştır [4].



Şekil 1.1. Soldan sağa, bir, iki ve üç boyutlu fotonik kristaller

Fotonik kristal örnekleri Şekil 1.1'de gösterilmektedir [4]. Fotonik kristal yapılar üzerinde 1987'den bu yana hala bir aktif bir araştırma konusudur. Fotonik kristallerin frekans cevapları ve bu frekans cevaplarının gerekli tasarımlarla ayarlanmasıyla insanoğluna hizmet edebilecek önemli buluşlar yapılmıştır. Bu önemli buluşların bazıları, optik transistör [5], gaz sensörü [6], dalga boyu bölme çoklama (WDM) yapan fotonik kristaller [7], optik geciktirme kabloları ve optik hafızalardır [8]. Bu çalışmalar gün geçtikçe daha gerçekçi olmaktadır ve laboratuarlardan günlük hayata geçmeye başlamaktadırlar.

1. 2 Fotonik Kristallerde Işığın Yavaşlatılması

Bu tezin amacı fotonik kristal yapılar kullanılarak ışığı yavaşlatmaktır. Işığın yavaşlatmanın bilime kazandıracağı bazı yeni uygulamalar olacaktır ve hali hazırda bunun örneklerini literatürde görmek mümkündür [8-12]. Işık eğer yavaşlatılabilirse, optik sinyal belli bir zaman için geciktirilebilir. Işığın varlığına veya yokluğuna göre veriyi anahtarladığımızı düşünecek olursak, bu gecikme verinin en azından belli bir süre için hafızaya kaydedebildiğimiz anlamına gelmektedir. Eğer bu yapılar gerçek hayata uygulanabilirse optik bir rasgele erişimli bellek yapılması mümkün olabilir. Buna ek olarak, yavaş ışığın bir başka özelliği de hızlı ışığa göre şiddetinin yüksek olmasıdır. 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. Bu özellikler sayesinde optik transistörler, mikro-nano ölçekte lazerler, ikinci ve üçüncü harmonik üretimi, frekans toplama-çıkarma işlemi yapılabilir [9]. Yavaş ışığın bu özellikleri gerçek hayata geçirilebilirse sadece ışık kullanan fotonik entegre devreler üretilebilir. Bu da işlemci teknolojisinde çok büyük bir yenilik olacaktır.

Tüm bu özelliklerin yanında, ışık madde etkileşiminin artmasının sensör teknolojisinde de etkisi olacaktır. Işık madde etkileşimi arttıkça, ışık hareketi maddedeki küçük değişikliklerden daha fazla etkilenmeye başlar. Bu özellik sayesinde çok hassas sensörler elde edilebilir.

Tez kapsamında yapılan çalışmalar dört bölümden oluşmaktadır:

1. İlk çalışma kare örgülü fotonik kristalde ışığı yapısal değişikliklerle yavaşlatmak olmuştur. Bu çalışmada ışık bant kenarına yakın bölgelerde yavaşlatılmıştır. Böylece ışığın yapısal değişikliklere olan duyarlılığı ortaya çıkarılmaya çalışılmıştır
2. İkinci çalışmada literatürde en çok kullanılan yapı olan üçgen örgülü fotonik kristalde ışık yavaşlatılmaya çalışılmıştır ki benzer çalışmalar literatürde vardır [13-20]. Bu çalışmanın odak noktası ışığı yavaşlatmaktan ziyade bant genişliğini artırmak olmuştur [21]. Çünkü yavaş ışığın kullanım alanının artması için ışığın yeterince geniş bir bant genişliği de olmalıdır. Bant

genişliğinin yanı sıra frekansa göre grup hızının bir ölçüde sabit kalması gerekir. Ters durumda ışık atımının bir kısmı diğer bir kısmını geride bırakır. Bu da ışığın dağılmasına sebep olur.

3. Üçüncü çalışmada ışık dalga kılavuzu ve kavitelelerin etkileşimiyle yavaşlatıldı. Böylece ışığın hızı çok yavaşlatılabilirken belli bir bant aralığında grup hızı sabit kalabildi. Etkileşimli kavitelelerin ışığı belli bir süre saklayabilme özelliği dalga kılavuzundaki ışığın yavaşlamasına sebep oldu.
4. Son çalışmada hızlı ışıktan yavaş ışığa, yavaş ışıktan hızlı ışığa geçiş tasarlanmış oldu. Literatürde farklı tip dalga kılavuzları arasındaki geçişler ve yavaş ışık hızlı ışık geçişleri daha önce de yer bulmuştur. [22-31]. Bu çalışmalarda adiyabatik geçişler, sivriltilmiş uçlar, dereceli fotonik kristaller, azalimli modlar kullanılmıştır. Bu çalışmaların ışığında tezin kapsamında benzer geçişler tasarlanmıştır. Üçüncü basamaktakilere benzer kare örgülü fotonik kristal dalga kılavuzu üzerinde etkileşimli kavite yapısının aktarılmasıyla yapılmış bir çalışmamız anlatıldı. Daha sonra bu yapıya düzlemsel bir dalga kılavuzuyla ışık aktarılıp yine aynı tarzdaki başka bir kılavuz üzerinden ışık geri alınmaya çalışıldı. Sonra üçüncü basamaktaki üçgen örgülü yapı üzerinde yavaş ışık farklı bir bakış açısıyla ele alındı. Burada istediğimiz yavaş ışığı elde ettikten sonra düzlemsel dalga kılavuzuyla kare örgüdeki gibi ışığı yapıya aktarıp çıkarmaya çalıştık. Böylece yavaş ışık - hızlı ışık geçişleri için literatüre kazandırılacak bazı önerilerde bulunmuş olduk.

BÖLÜM 2

2. FOTONİK KRİSTAL ve MAXWELL DENKLEMLERİ

Fotonik kristal yapıları etkin bir biçimde kullanılabilmesi için öncelikle fotonik kristallerin teorik temelleri anlaşılmalıdır. Bu nedenle tezin bu bölümünde fotonik kristal konusunu teorik yönleri ele alınmıştır.

2.1 Fotonik Kristal Yapılarda Elektromanyetik Dalga Hareketi

Tezin bu kısmında fotonik kristallerde elektromanyetik dalganın dinamiğine değineceğiz [4]. Elektromanyetik alanlar ve bu alanların hareketi, Maxwell denklemleriyle açıklanır. Maxwell denklemleri aşağıdadır:

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

Burada E ve D sırasıyla elektrik alan ve elektrik akı yoğunluğuna, H ve B ise sırasıyla manyetik alan ve manyetik akı yoğunluğuna karşılık gelmektedir. ρ ve J ise ortamdaki serbest yüke ve serbest akım yoğunluğuna karşılık gelmektedir.

Akı yoğunlukları ve alanlar ise birbirine şu denklemlerle bağlantılıdır:

$$\begin{aligned}B &= \mu_r \mu_0 H \\ D &= \epsilon_r \epsilon_0 E\end{aligned}\tag{2.2}$$

Göreceli manyetik ve elektromanyetik sabitler μ_r ve ϵ_r ile, vakumun manyetik ve elektromanyetik sabitleri ise μ_0 ve ϵ_0 ile gösterilmiştir.

Bu tezin kapsamında serbest kaynaklar araştırılmadığı için ρ ve J sıfır kabul edilmiştir. Aynı zamanda $\mu_r = 1$ kabul edilmiştir, çünkü manyetik malzemeler tez kapsamının dışındadır. Elektromanyetik akı yoğunluğu sadece birinci terimle ifade

edilmiştir. Daha yüksek terimler malzemenin doğrusal olmayan özellikleriyle ilgilidir ve tez kapsamı dışındadır.

Bu denklemlerin frekans düzlemindeki karşılıkları ise şöyledir:

$$E = E(r)e^{j\omega t}$$

$$H = H(r)e^{j\omega t}$$

$$\nabla \cdot H(r) = 0$$

$$\nabla \cdot \epsilon(r)E(r) = 0$$

$$\nabla \times E(r) + j\omega\mu_0 H(r) = 0$$

$$\nabla \times H(r) - j\omega\epsilon_r(r)\epsilon_0 E(r) = 0 \quad (2.3)$$

Dielektrik sabitinin zaman düzleminde değişmediği varsayılmıştır. Son iki denklem birleştirilirse fotonik kristaller için Helmholtz denklemine benzer bir denklem elde edilir:

$$\nabla \times \frac{1}{\epsilon(r)} \nabla \times H(r) = \frac{\omega^2}{c^2} H(r) \quad (2.4)$$

Bu denklem aynı zamanda bir özdeğer denklemdir. Bu denklemin çözümü fotonik kristal içerisinde yol alabilecek dalganın frekanslarını verir. Bu denklemin bazı özellikleri şunlardır:

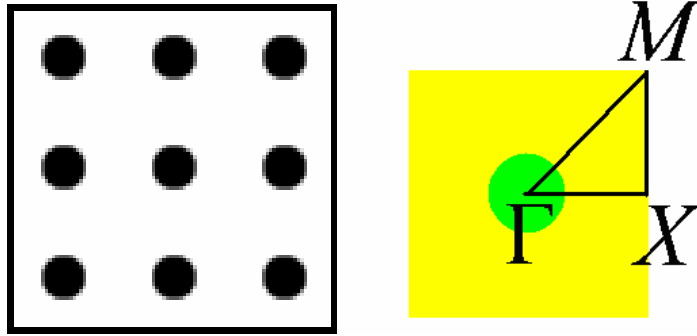
- 1) Ölçeklenebilirlik: Fotonik kristalin kapladığı ortam belli bir katsayı ile çarpılarak genişletilir veya daraltılırsa, ilgili özdeğere karşılık gelen frekans azalır veya artar. Frekanstaki değişim ortamın ölçeğiyle ters orantılıdır.
- 2) Sabit katsayı: Eğer ortamın dielektrik sabiti belli bir katsayıyla çarpılırsa özdeğer bu katsayıya bölünür. Bu sebeple ilgili frekans bu katsayının kareköküyle ters orantılıdır.
- 3) Ortamın kırılma indisindeki küçük değişimler ilgili frekansta küçük oynamalara yol açar. Ortamdaki malzemenin kırılma indisindeki yeterince küçük artış/azalış ilgili frekansta küçük azalışa/artışa neden olur.

Şimdi ortamda yol alan dalganın alan dağılımlarının, belli bir periyodik zarf fonksiyonunun içinde olduğunu kabulleniyoruz:

$$E(r) = E_k(r)e^{jk \cdot r}$$

$$H(r) = H_k(r)e^{jk \cdot r} \quad (2.5)$$

Bu kabullenmenin kaynağı Bloch teoremidir [2]. r vektörü uzayda herhangi bir noktayı gösterir ve k vektörü dalganın hareketinin yönünü ve uzaysal frekansını gösterir. Dalganın uzaysal frekansının fotonik kristalin periyoduyla bağlantılıdır. Fotonik kristalin kendisini $R = ba_x + ca_y + da_z$ vektörüyle tekrarladığını varsayalım. a_x , a_y ve a_z burada x , y ve z yönündeki periyotları gösterir. b , c ve d ise rasgele tamsayılardır. $\epsilon_r(r+R) = \epsilon_r(r)$ olur. Uzay düzlemi periyodik olduğu için uzaysal frekans düzlemi de periyodiktir. Yani, ilgili frekans çözümü uzaysal frekans düzleminde belli bir periyotla kendini tekrarlar. Bu periyot (kare örgü için) $\frac{2\pi}{a_{x,y,z}}$ olur. Frekansın kendini tekrarlamadığı sifıra en yakın aralığa ilk Brillouin Bölgesi denir. Bu bölge kare örgü için $\left(\frac{-\pi}{a_{x,y,z}}, \frac{\pi}{a_{x,y,z}}\right)$ aralığıdır. Buna ek olarak, yapıdaki simetriden dolayı bu bölge daha da küçültülebilir. Küçültülmüş bölgeye “Küçültülemez Brillouin Bölgesi” denir. Bu bölge iki boyutlu kare örgü için aşağıda gösterilmiştir:



Şekil 2.1. İlgili Kare örgüsü (solda) ve daraltılamaz Brillouin alanı (sağda).

Böylece artık fotonik kristalin dispersiyon diyagramı (Zaman frekansına karşı uzaysal frekans) hesaplanabilir. Bu hesabı denklem 4’ü şöyle modifiye ederek yapabiliriz:

$$\nabla \times \frac{1}{\epsilon(r)} \nabla \times H_k(r) e^{-k \cdot r} = \frac{\omega^2}{c^2} H_k(r) e^{-k \cdot r}$$

$$(ik + \nabla) \times \frac{1}{\epsilon(r)} (ik + \nabla) \times H_k(r) = \frac{\omega(k)^2}{c^2} H_k(r) \quad (2.6)$$

Bu özdeğer denkleminin özdeğerleriyle, her bir k vektörü için ilgili zaman frekansını, özvektörleriyle dalganın yapıdaki alan dağılımını bulabiliriz. Bu denklemin sonucunda ortaya çıkan frekanslar k eksenini boyunca devamlıdır. Bu devamlı $\omega_m(k)$ fonksiyonları, her bir m sayısı için bir bant oluştururlar. Böylece bant diyagramı oluşmuş olur. Eğer bu bant diyagramları herhangi bir bölgede birbirlerinden ayrılırlarsa, frekansı bu aradaki boşluğa denk gelen dalgalar fotonik kristal yapı içerisinde yol alamaz. Bu boşluğa yasaklı bant aralığı denir. Kare ve üçgen örgünün bant diyagramları ve yasaklı bant aralıkları Üçüncü bölümde irdelenecektir. Kristal içerisinde yol alan elektromanyetik dalganın belli bir hızı vardır. Bu hıza grup hızı denir. Tezin konusu bu hızı düşürmektir. Bu hız, $\omega_m(k)$ bulunduktan sonra şöyle hesaplanır:

$$v_g(k) = \nabla \omega_m(k) = \frac{\partial \omega_m(k)}{\partial k_x} \hat{x} + \frac{\partial \omega_m(k)}{\partial k_y} \hat{y} + \frac{\partial \omega_m(k)}{\partial k_z} \hat{z} \quad (2.7)$$

Grup hızı dispersiyonu (GHD), grup hızının frekansa göre değişimini ifade etmektedir. Formülü şöyledir:

$$\beta_2 = \frac{\partial^2 k}{\partial \omega^2} = - \left(\frac{\partial \omega}{\partial k} \right)^{-3} \frac{\partial^2 \omega}{\partial k^2} \quad (2.8)$$

Optik atımın hareket ederken dağılmaması için GHD küçük değerler almalıdır. İlgili tasarımlar tezin ilerleyen bölümlerinde anlatılmaktadır.

BÖLÜM 3

3. FOTONİK KRİSTAL DALGA KILAVUZLARI VE YAVAŞ IŞIK

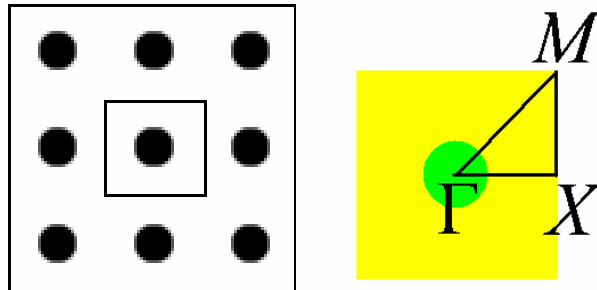
Bu bölümde tez kapsamında kullanılan fotonik kristal dalga kılavuzları ve yavaş ışık yapılarından bahsedilmektedir. Tezin ana hedefi olan yavaş ışık dalga kılavuzu tasarlama işlemi genel olarak bu bölümde anlatılmıştır.

3.1 Fotonik Kristaller ve Dispersiyon Özellikleri

Fotonik literatüründe en çok kullanılan iki boyutlu yapılar hava ortamında kare örgü halinde dizilmiş dielektrik çubuklar ve dielektriğin üçgen örgü halinde delinmesiyle oluşan hava dolu boşluklardır. 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. Tezin en önemli amacı fotonik kristal dalga kılavuzları içerisinde ışığı yavaşlatmaktır. Işığın yavaşlatılmasından kastedilen, dalganın grup hızının azaltılmasıdır. Fakat ışığı yavaşlatmadan önce standart fotonik kristal yapıların özelliklerini irdelemeliyiz.

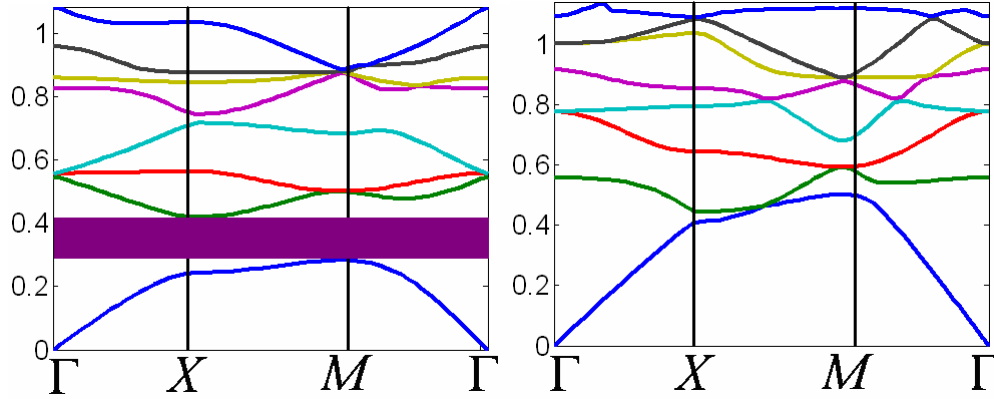
3.1.1 Kare Örgülü Fotonik Kristal

Bu kısımda kare örgü fotonik kristale örnek olarak dielektrik çubukların kare örgüsüyle dizildiği fotonik kristal yapı ele alınmış, dispersiyon ve yasaklı bant aralığı özellikleri incelenmiştir.



Şekil 3.1. (a) Kare örgüye göre dizilmiş silindirik çubuklardan oluşan fotonik kristal. Örgü katsayısı a , silindirik çubukların çapı $0.2a$ 'dır. Dispersiyon hesabı yapılan hücre $(a) \times (a)$ 'lık bir hücre olup, bu hücre şekilde kare çevrelenmiş kısımdır. (b) Ters uzayda simetri noktaları Γ , X ve M noktalarının koordinatları sırasıyla, $(0,0)$, $(0,0.5)$ ve $(0.5,0.5)$ 'dir

Şekil 3.1(a)'da ilgili fotonik yapı verilmiştir. Şekil 3.1(a)'daki yapının geometrisi uzaysal frekans (ters uzay) alanında Şekil 3.1(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. Biz de burada bu Şekil 3.1(b)'deki simetri noktalarından geçen üçgen boyunca düz dalga metoduyla frekansları çözeceğiz [32].

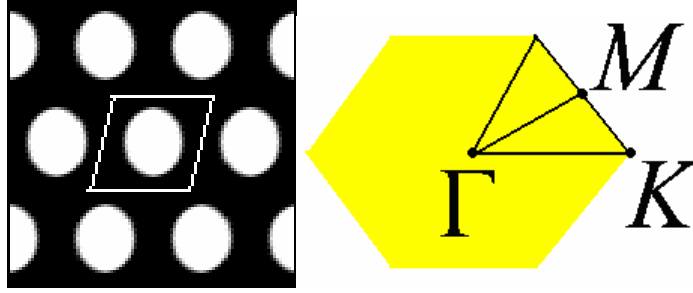


Şekil 3.2. Şekil 3.1'deki yapı için daraltılamaz Brillouin alanı kenarlarında dispersiyon diyagramları. (a) TM mod için (Elektrik alan kristal düzlemine dik). (b) TE mod için (Manyetik alan kristal düzlemine dik).

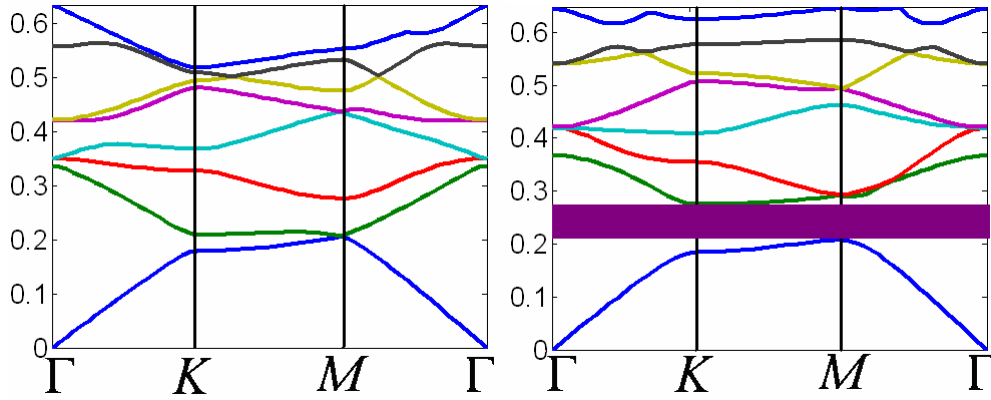
Şekil 3.2'de düz dalga yöntemiyle daraltılamaz Brillouin alanı kenarlarında yapılan simülasyonların sonuçları verilmiştir. Görüldüğü üzere TM mod için bant boşluğu oluşmuştur. TE mod için bir bant boşluğu oluşmamıştır. Bu durum yüksek dielektrik katsayılı yapıların birbirinden ayrık olmasındandır. Elektrik alan bağlantılı olmayı tercih ettiği için yapıya dik olma durumu boşluk oluşması için uygun bir durum oluşturmuştur.

3.1.2 Üçgen Örgülü Fotonik Kristal

Bu bölümde üçgen örgülü fotonik kristalin dispersiyon ve yasaklı bant aralığı özellikleri incelenmiştir. Bu kısımda kullanacağımız yapı dielektrik arka plan üzerine açılmış hava delikleridir (Şekil 3.3).



Şekil 3.3. Üçgen örgüye göre dizilmiş silindirik deliklerden oluşan fotonik kristal. Örgü katsayısı a , deliklerin yarıçapı $0.3a$ 'dır. Hesap hücresi şekilde gösterilen paralelkenara denk gelmektedir. (b) Ters uzayda simetri noktaları.



Şekil 3.4. Şekil 3.3'deki yapı için daraltılabilir Brillouin alanı kenarlarında dispersiyon diyagramları. (a) TM mod için (Elektrik alan kristal düzlemine dik). (b) TE mod için (Manyetik alan kristal düzlemine dik).

Şekil 3.4'de daraltılabilir Brillouin alanı kenarlarında yapılan düz dalga yöntemi simülasyonlarının sonuçları verilmiştir. Üçgen örgülü fotonik kristalde TM mod için bant boşluğu oluşmamıştır, TE mod için bir bant boşluğu oluşmuştur. 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 modaki bantlar arasında bir boşluğun oluşmasının önünü açmıştır.

3.2 Fotonik Kristal Dalga Kılavuzlarında Grup Hızını Bant Kenarlarında Azaltma

Tez kapsamında yapılan ilk çalışma bant kenarlarında grup hızını düşürmek olmuştur. Teorik olarak bant kenarlarında ışık durdurulabilir, fakat bu sadece tam bant kenarındaki bir nokta için geçerlidir. Bu çalışmada bant kenarının yakınındaki bir noktanın grup hızı düşürülmeye çalışılmıştır. Bu noktadaki grup hızının düşmesi sağındaki ve solundaki noktalarda da grup hızının düşmesini sağlayacaktır.

3.2.1 Giriş

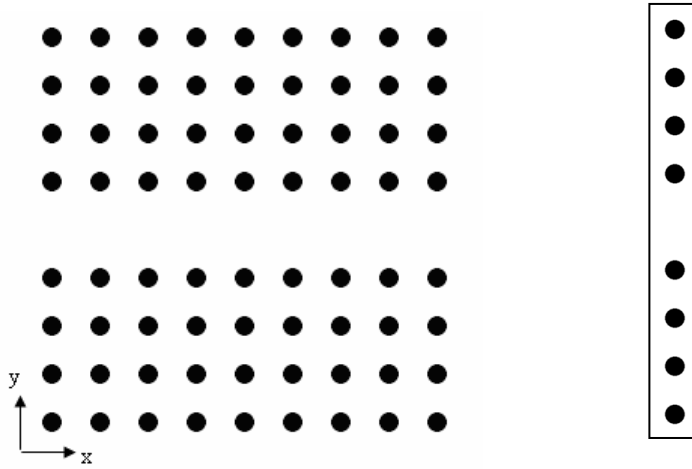
Elektromanyetik dalganın fotonik kristal dalga kılavuzu içerisinde saklanması periyodik yapının dispersiyon özelliğiyle yakından ilgilidir. Fotonik bant boşluğu özelliği sebebiyle elektrik ve manyetik alanlar üstel bir biçimde hareket doğrultusuna dik yönde azalmaktadır. Kristal yapısının bazı bölgelerinde periyodik yapıyı bozarak yapılan değişikliklerle ortaya çıkabilecek özellikler önemli bir araştırma konusudur. Optik iletişim, optik anahtarlama ve optik tamponlar gibi uygulama alanlarında yavaş ışığın kullanımına yeni bir boyut kazandırmak için bu çalışmada ışık hızının yavaşlama faktörü olan grup indisini yapısal değişikliklerle artırmak hedeflenmiştir.

Grup hızının nümerik analizi düz dalga açılımı metoduyla yapılmıştır [32]. Bu metot sayesinde, çeşitli fotonik kristal dalga kılavuzlarının dispersiyon diyagramı ve grup hızı değerleri elde edilmiştir. Bu çalışmanın ilk basamağı dalga kılavuzunun hemen sağındaki ve solundaki çubukların yarıçaplarını değiştirmek olmuştur. Sonra bu yalıtkan çubuklar dikdörtgen çubuklarla değiştirilmiştir. Bu dikdörtgenlerin x ve y yönündeki kenar uzunlukları değiştirilerek grup hızının bu iki parametreye olan bağımlılıkları incelenmiş, en düşük grup hızını veren parametreler araştırılmıştır. Bu çalışma böylelikle grup hızını düşürmenin bir yolunu göstermektedir. Fakat yavaş ışığın diğer problemleri olan grup hızı dispersiyonu, eşleme (coupling) kaybı ve saçılım (scattering) kayıpları bu basamakta göz önüne alınmamıştır. Tezin kapsamındaki diğer çalışmalarda bu meselelere de değinilecektir. Ayrıca modun bazı durumlarda bant boşluğundan çıkması o modun artık dalga kılavuzunda korunamayacağı anlamına gelmektedir. Grup hızının yapıya bağımlılığını elde etmek asıl gaye olduğu için bu durumlar çalışmanın kapsamından çıkarılmamıştır.

3.2.2. Fotonik Kristal Yapı, Dispersiyon Diyagramı ve Elektrik Alan Dağılımı

Çalışılan fotonik kristal yapısı iki boyutlu bir kare örgüsüdür. Bu kare örgüsünün her bir noktasına silindirik çubuklar konulmuştur. Fotonik kristalin bir satırındaki silindirler yapıdan çıkarılarak dalga kılavuzu elde edilmiştir. Elde edilen yapı Şekil 3.5'de gösterilmiştir. Düzlem dalga açılım yöntemi hesaplama hücrenin x ve y yönlerinde kendini tekrar ettiğini kabul eder. Bu sebeple, özellikle x yönündeki dalga kılavuzu için yapının y yönündeki büyüklüğü sonsuz olmalıdır fakat bu durumun

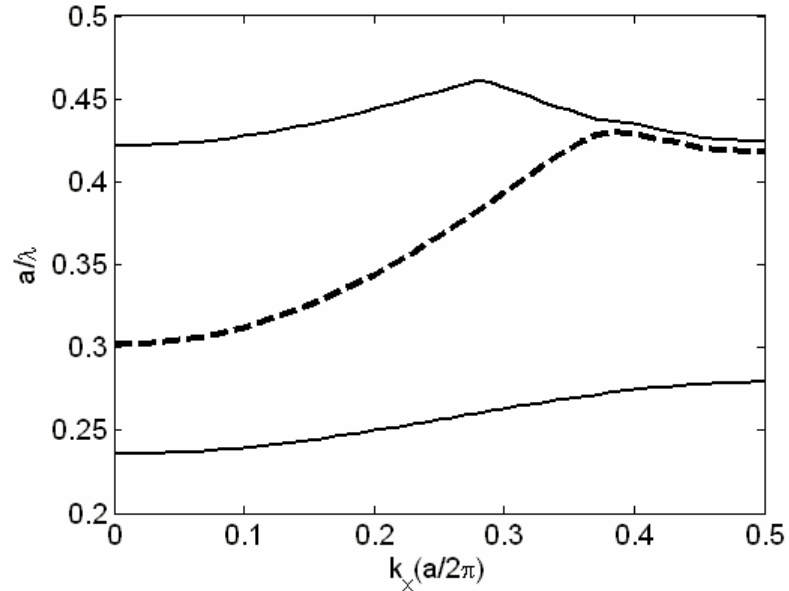
nümerik çözümü imkânsızdır. Bu nedenle hesaplama hücrenin boyutunu sınırlamak zorundayız. Çalışmada gösterilen hesaplama hücresi büyüklüğü $(9a) \times (a)$ 'dır.



Şekil 3.5. Şekilde üzerinde işlem yapılmamış fotonic kristal dalga kılavuzu (solda) ve bu yapı için kullanılan hesap hücresi (sağda) Çubukların yarıçapları $0.20a$, dielektrik katsayısı 12 'dir.

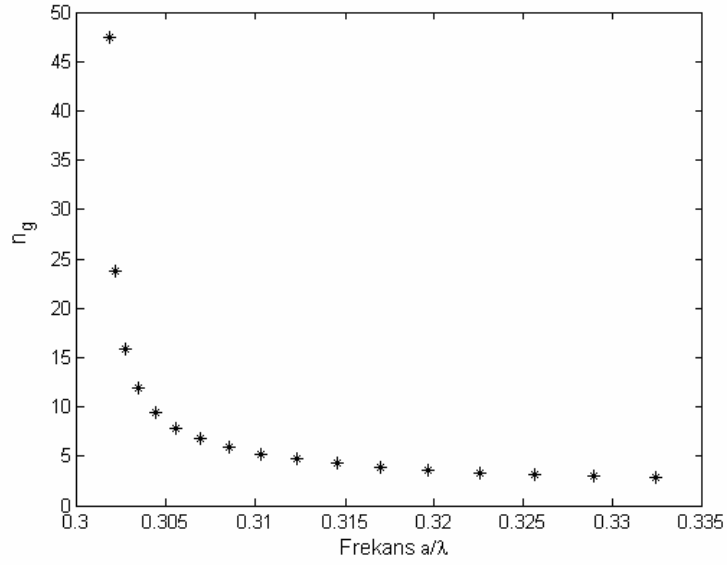
Bu hesaplama hücresiyle elde edilen TM bant çözümleri Şekil 3.6'daki dispersiyon diyagramında gösterilmiştir. Dalga kılavuzu bandı kesikli çizgiyle çizdirilmiştir.

Şekilden görüleceği üzere, frekans $\frac{\omega a}{2\pi c} = 0.3017$ ve $\frac{k_x a}{2\pi} = 0$ 'a giderken bandın eğimi de sıfıra gitmektedir.



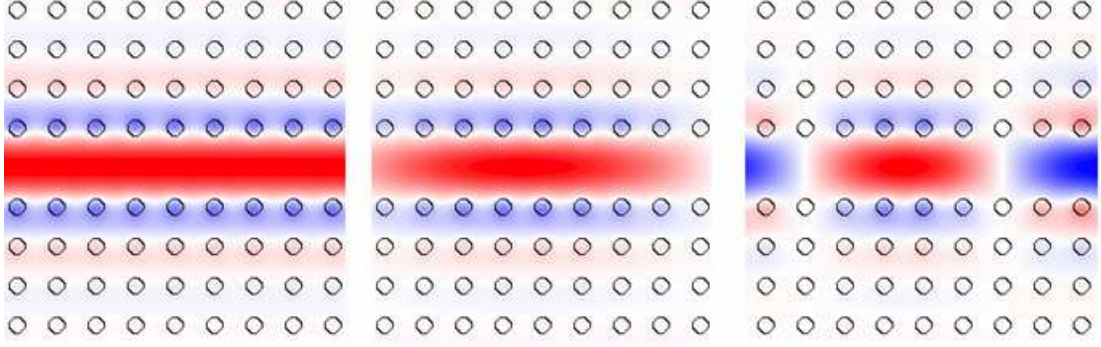
Şekil 3.6. Dispersiyon diyagramında yapıнын içinde dalga kılavuzu açılmasıyla oluşan bant. (Küçültülemez Brillouin alanı k_x yönünde $k = (0, 0, 0)$ to $k = (0.5, 0, 0)$ arasında olacağı için sadece bu alan çizdirildi). k vektörünün düşük değerlerinde dalga kılavuzunun yavaş ışık etkisi gözlemlenmektedir.

Grup indisin bu noktada sonsuza gitmesi durumu Şekil 3.7'deki grup indis vs. frekans grafiğinde de gösterilmiştir. Grup indisin tanımı $n_g = c/v_g$ 'dir. Grup hızı sıfıra gittikçe grup indis sonsuza gitmektedir. $k=0$ 'daki grup index değeri çizdirilmemiştir çünkü bu değerde grup hızı hep sonsuza gitmektedir ve bu durum pratikte imkansızdır. Bu nedenle çizdirilecek olan hiç bir grup indis grafiğinde bu nokta gösterilmeyecektir.



Şekil 3.7. Şekil 3.5'deki fotonik kristal dalga kılavuzunun dispersiyon diyagramında yavaş ışık bölgesinin grup indis – frekans grafiği. $k_x = 0$ durumunda grup indis sonsuza gittiği için bütün grafikler $k_x = 0.01$ noktasından başlamaktadır.

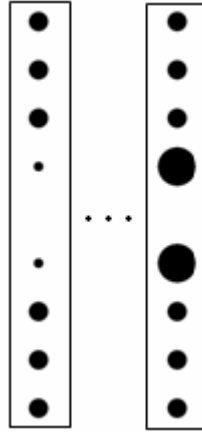
Bu noktadan hareketle $k=0$ komşuluğunda grup indisin maksimum değerini bulmak için ışık ve fotonik yapı arasındaki etkileşimi simülasyonlarda gözlemledik. Bu etkileşim Şekil 3.8'teki elektrik alan dağılımlarında gösterilmektedir. Elektrik alanın dalga kılavuzundaki dielektrik malzemeyle etkileşen kısmı en çok birinci sonra ikinci silindir çubuk satırlarıyla etkileşmektedir. Buna göre, bu satırlardaki dielektrik malzeme üzerinde yapılacak değişiklikler ilerleyen dalganın korunmasında ve yavaşlatılmasında etkili olacaktır.



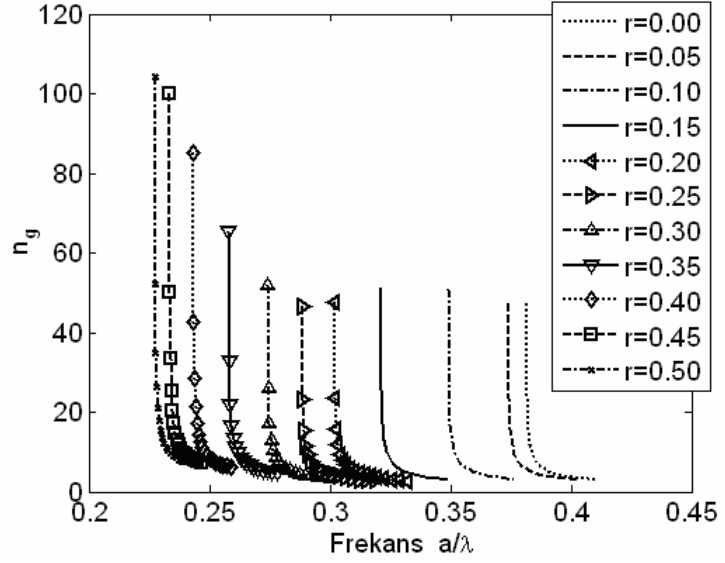
Şekil 3.8. $k_x=0$, $k_x=0.05$, $k_x=0.10$ durumları için elektrik alan dağılımları.

3.2.3. Yapı üzerinde yapılan değişiklikler ve Sonuçların değerlendirilmesi

Bu çalışmada elektromanyetik dalganın üstünde en çok etkisi olan birinci satırlar ele alınacaktır. Yapılan en uç değişiklikler Şekil 3.9’da gösterilmiştir. Değiştirilen çubukların her bir yarıçapı için dispersiyon diyagramı hesaplanmıştır ve buradan grup indis vs. frekans grafikleri elde edilmiştir. Bu grafikler Şekil 3.10’da toplanmıştır.

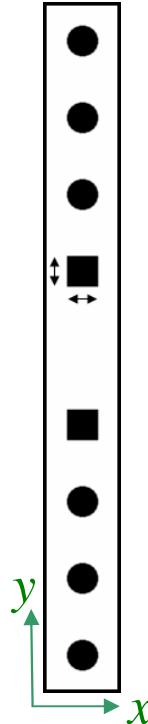


Şekil 3.9. Hesap hücresinde yapılan değişiklikler. İlk satırdaki çubukların yarıçapları taranmıştır.



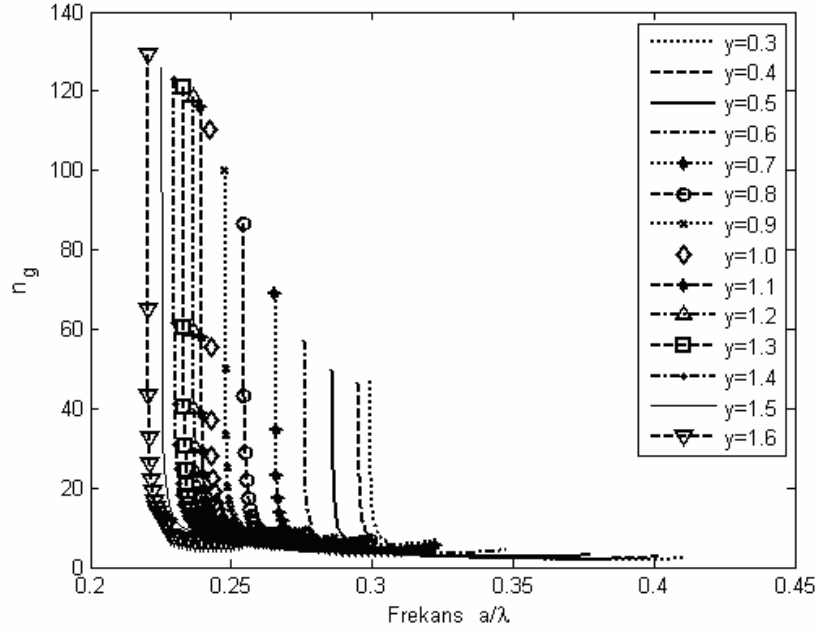
Şekil 3.10. Çeşitli r değerleri (a cinsinden) için grup indis – frekans grafikleri.

Grafikler yarıçapa göre monoton bir değişim göstermemektedir. Genel olarak yarıçapın artışıyla grup indis artmaktadır. Çubukların dairesel simetrisinden ötürü bu kompleks değişimin x ve y yönündeki bağımlılığı çıkarılamamaktadır. Bu nedenle bu değişimin çözümünü bulmak ve grup indisi daha da artırmak amacıyla silindir çubukları dikdörtgen çubuklarla değiştirdik. Şekil 3.11 yeni çözüm hücresinin ilgili parametreleri göstermektedir.



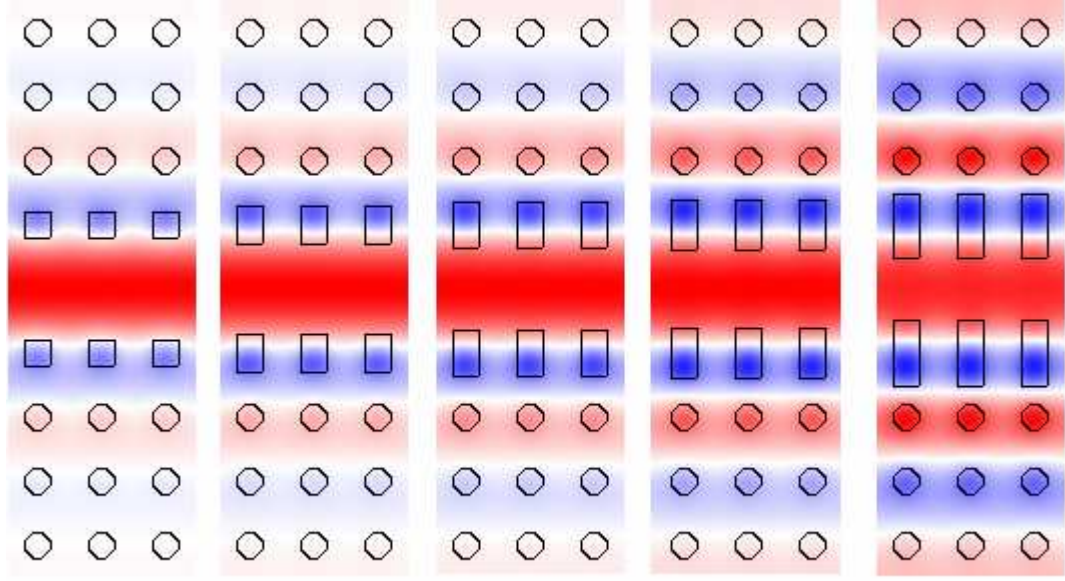
Şekil 3.11. İlk satırdaki silindirlerin dikdörtgen çubuklarla değiştirilmiş hali.

Grup indisin y -yönündeki dielektrik artışına bağımlılığını elde etmek için dikdörtgen çubuğun x -yönündeki uzunluğu sabit bırakıldı ve y -yönündeki uzunluğa göre grup indis vs. frekans değerleri elde edildi. Şekil 3.12’de y -yönündeki uzunluğun artmasıyla grup indisin monotonik artışı görülmektedir (özellikle $0.4a$ ’dan büyük değerler için). Artış $1.0a$ ’ya kadar çok hızlıdır, sonra doğrusallaşmıştır. Bu dielektrik malzemenin artması ve hesap hücrelerinin sınırlı olmasından kaynaklanabilir.



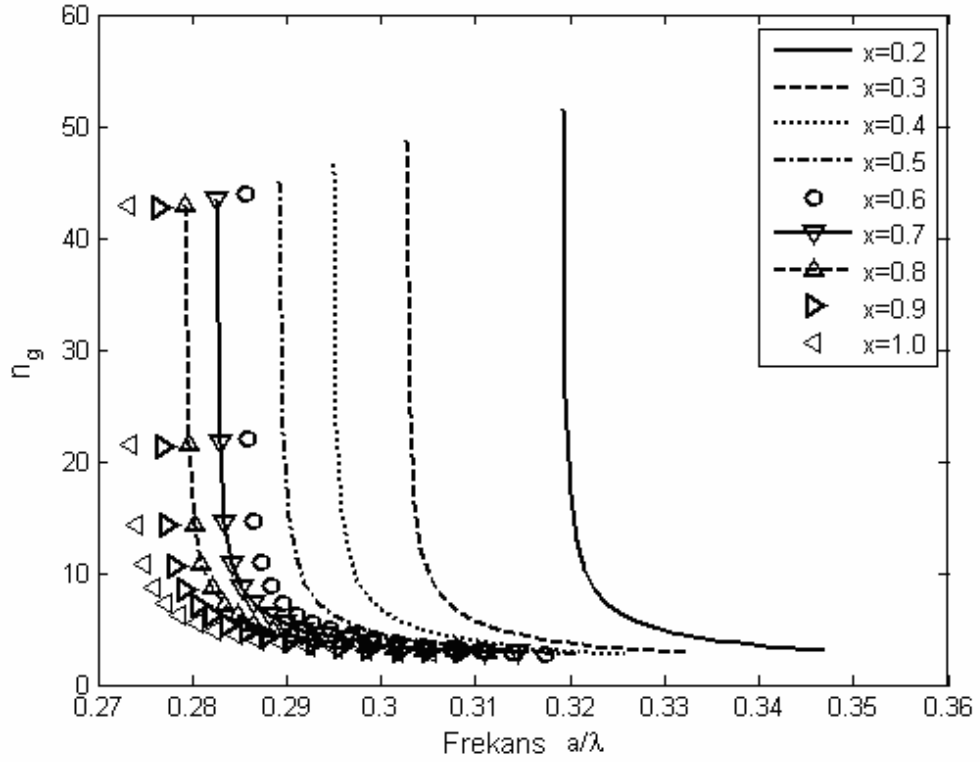
Şekil 3.12. Dikdörtgen çubukların y yönündeki uzunluğuna göre grup indis – frekans değişimi (x yönündeki uzunluk $0.4a$)

Farklı y -uzunluğu değerleri için elektrik alan dağılımları Şekil 3.13’de verilmiştir. Dikdörtgen çubuklar elektrik alanın kristal yapının içine taşıyarak madde-ışık etkileşimini artırmaktadır. Bu da bir sürtünme etkisi yaparak ışığı yavaşlatmaktadır.



Şekil 3.13. Soldan sağa sırasıyla $y=0.4a, 0.6a, 0.7a, 0.8a, 1.0a$ için elektrik alan dağılımları.

Yapıdaki x -yönlü değişimlerin etkisini ortaya çıkarmak için dikdörtgen çubukların y -yönündeki uzunluğu sabitleyip x -yönündeki uzunluğu değiştirdik. Her bir durum için grup indis - frekans grafiklerini Şekil 3.14'de çizdirdik.

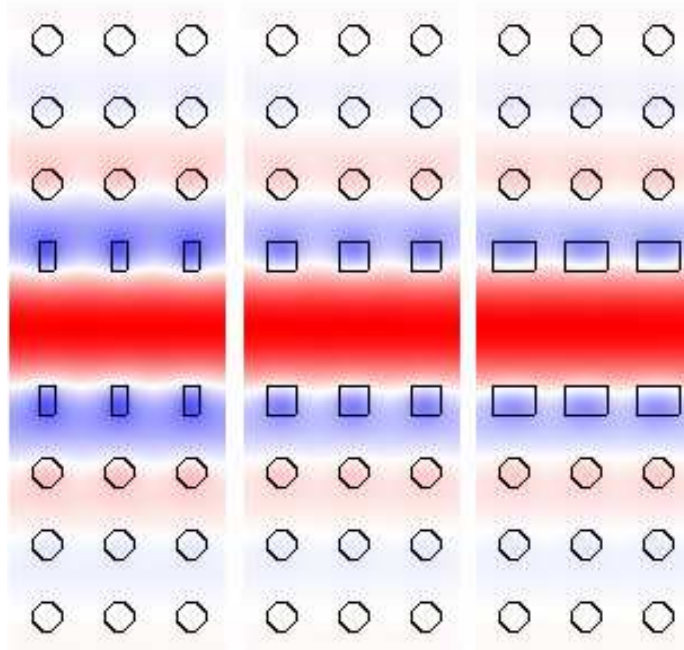


Şekil 3.14. Çeşitli x boyutları için grup indis - frekans çizimleri ($y=0.4a$)

Grup indis, y-yönündeki değişimin tersine, genellikle dikdörtgenlerin x-uzunluğunun artmasıyla azaldı. $x=0.2a$, $0.4a$ ve $0.6a$ için elektrik alan dağılımları Şekil 3.15’de verilmiştir. Alan dağılımlarında görüldüğü üzere grup indisteki düşüş ışığın dalga kılavuzunun yanlarına aktarılamamasıyla doğrudan ilgilidir. Bu önermenin ışığında, grup indisteki düşüş aynı zamanda dalga kılavuzunun koruma etkisinin artması anlamına gelmektedir. Dikdörtgenin x-uzunluğunun artması aynı zamanda x-z düzlemindeki indis değişim yüzeyinin alanını da artırır. Dik geliş için iletim katsayısı

$$\tau = \frac{2\eta_2}{\eta_2 + \eta_1} = \frac{2\sqrt{\epsilon_1}}{\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2}}. \text{ Bu yüzeydeki } \tau \text{ katsayısı } 0.44 \text{ değerini almaktadır ve bu}$$

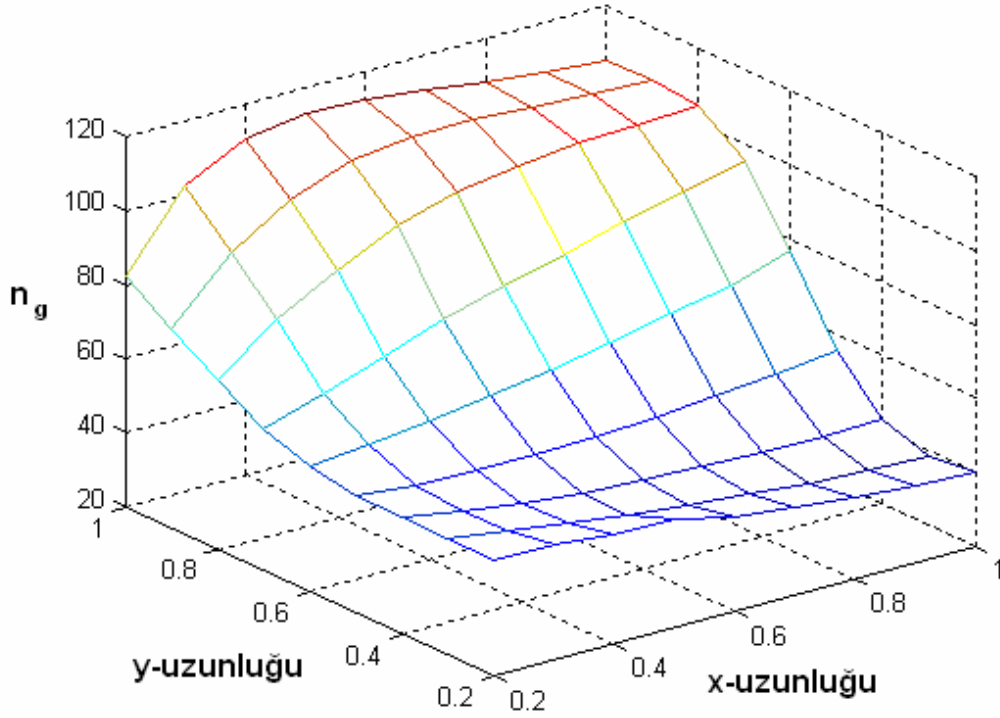
değer 1’den küçüktür. Dikdörtgenlerin x-yönündeki uzunluklarının artması, bu etkinin yüzeyini de artırır ve elektrik alan y-yönünde daha az ilerler. Işık dalga kılavuzunun kenarlarıyla daha az etkileşime girdiği için grup indis düşer.



Şekil 3.15. Soldan sağa sırasıyla $x=0.2a$, $0.4a$, $0.6a$ için elektrik alan dağılımları.

Genel trendin bu şekilde olduğunu kesinleştirmek için, dikdörtgenlerin farklı x ve y uzunluklarına göre $k_x=0.01$ değerindeki grup indis değerlerini Şekil 3.16’da çizdirdik. En yüksek grup indis değeri $x=0.5a$ ve $y=1.0a$ durumunda elde edilmiştir. Bu noktada grup indis 100’ün üstündedir. Şekil 3.15’de grup indis x uzunluğuna göre azalan bir fonksiyon olmasına rağmen y uzunluğunun daha yüksek olduğu durumlarda grup indis artış göstermektedir. Fakat, maksimum grup indisin $x=0.5a$ ’da

bulunması her y değeri için optimum bir x uzunluğu değerinin varlığını göstermektedir. Anlaşılan odur ki eğer x uzunluğu belli bir değer altında kalırsa elektrik alanın dalga kılavuzunun kristalleriyle olan etkileşimi azalmaktadır. x -uzunluğu bu değer üstüne çıktığında da yansıtma özelliği baskın çıkmaktadır.



Şekil 3.16. $k=0.01$ 'deki grup indisin çeşitli x ve y uzunlukları için aldığı değerleri gösteren ağ grafiği.

Bu grafiğin maksimum değeri $x=0.5a$ ve $y=1a$ değerlerindedir

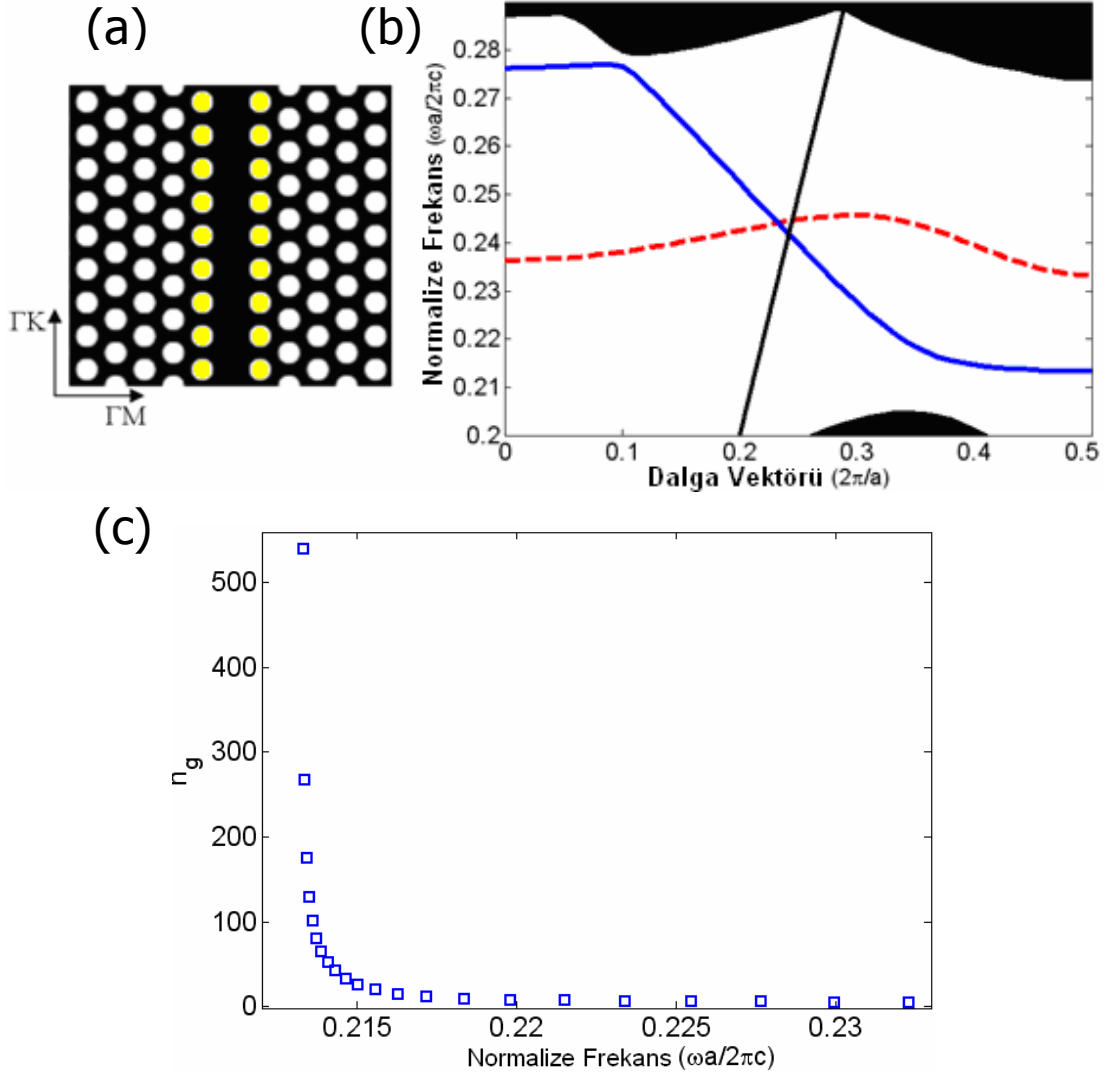
3.2.4. Sonuç

Bu çalışmanın hedefi grup indisi artırmak için bazı yöntemler bulmaktır. Dalga kılavuzu kare örgülenmiş silindirik çubuklardan oluşan fotonik kristal üzerinde bir satırın ortadan kaldırılmasıyla oluşmuştur. Fotonik kristal dalga kılavuzu içerisindeki elektrik alan dağılımının ışığın yavaşlatılmasında kritik bir rolü olduğunu gördük. Elektrik alanın ilk iki kristal satırında son bulunduğunu gördük ve tasarımıımızı ilk satırlara odakladık. Bu satırlardaki çubukların yarıçapını değiştirdik. Yarıçapın grup indis üzerindeki etkisi kompleks olduğu için bu satırlardaki çubukları dikdörtgen çubuklarla değiştirdik. Bu durumda çubukların x ve y yönlerindeki uzunluklarına göre grup indisin değişimini elde etmeye çalıştık. İlk önce x yönündeki uzunluğu

sabit alıp y yönündeki uzunluğun etkisine baktık. Simülasyonlar y yönündeki uzunlukla grup indisin doğru orantılı olduğunu gösterdi. y yönündeki uzunluğu sabit alıp x yönündeki uzunluğu değiştirdiğimizde, önce grup indisin genel olarak ters orantılı olduğunu gördük. Bütün x ve y uzunluğu değerlerini denediğimizde bu öngörünün her durumda geçerli olmadığını gördük. Bu durumu fiziksel izahı şöyle olabilir. Grup indisin y uzunluğuna göre doğru orantılı olması dikdörtgenlerin elektrik alanın kristal elemanlarıyla olan etkileşimini artırması sayesinde. Grup indisin x uzunluğuna göre farklı değerler alması ise x -kenarının hem yansıtıcı yüzey vazifesi görmesi hem de elektrik alanın içe aktaran dikdörtgenlerin içe aktarma parametresi gibi iki fonksiyonu olmasıdır.

3.3 Grup Hızını Yüksek Bant Genişliğinde Azaltma

Geniş bant aralığına ışığın yavaşlatılması, ışığın yapı içerisinde dağılarak gürültü seviyesine inmesini önlenmesi gerekliliğindedir. Bu nedenle tez kapsamında yapılan ikinci çalışma ise ışığın grup hızının birinci çalışmaya göre daha geniş bir bant aralığında ve dispersiyon diyagramının ortasına yakın noktalarda ışığı yavaşlatmaktır [21]. Bu çalışmada üçgen örgülü fotonik kristal kullanılmıştır. Kristal arka planı dielektrik olan silindir hava deliklerinden oluşmaktadır. Arka planın kırılma indisi 3.46'dır. Deliklerin yarıçapı $0.30a$ 'dır (a örgü katsayısıdır). Yapı Şekil 3.17(a)'da gösterilmiştir. Dalga kılavuzu GK yönünde deliklerin bir satının tamamen doldurulmasıyla elde edilmiştir. Elde edilen fotonik kristal dalga kılavuzunun düz dalga metoduyla elde edilen dispersiyon diyagramı Şekil 3.17(b)'dedir. Manyetik alan dağılımı x eksenine göre (hareket yönü) çift olan mod kesiksiz çizgiyle, tek olan mod ise kesikli çizgiyle gösterilmiştir. Frekansa göre grup indis değerleri Şekil 3.17(c)'de gösterilmiştir. Bu çalışmada fotonik kristalin polarizasyon hassasiyeti gereği manyetik alanın optik düzleme dik olduğu durum ele alınmıştır.

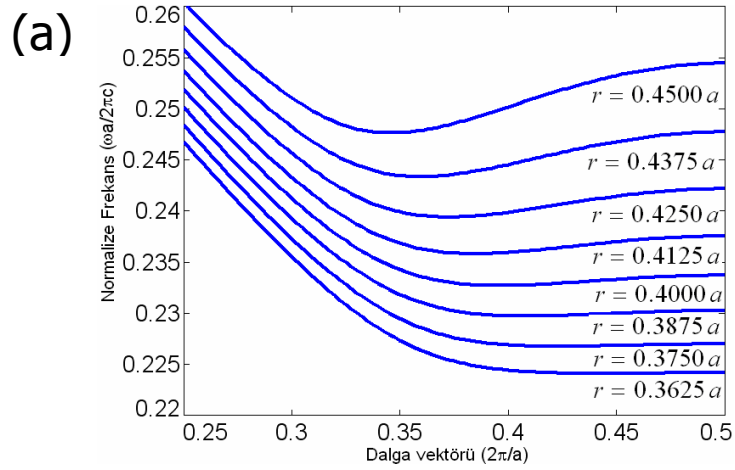


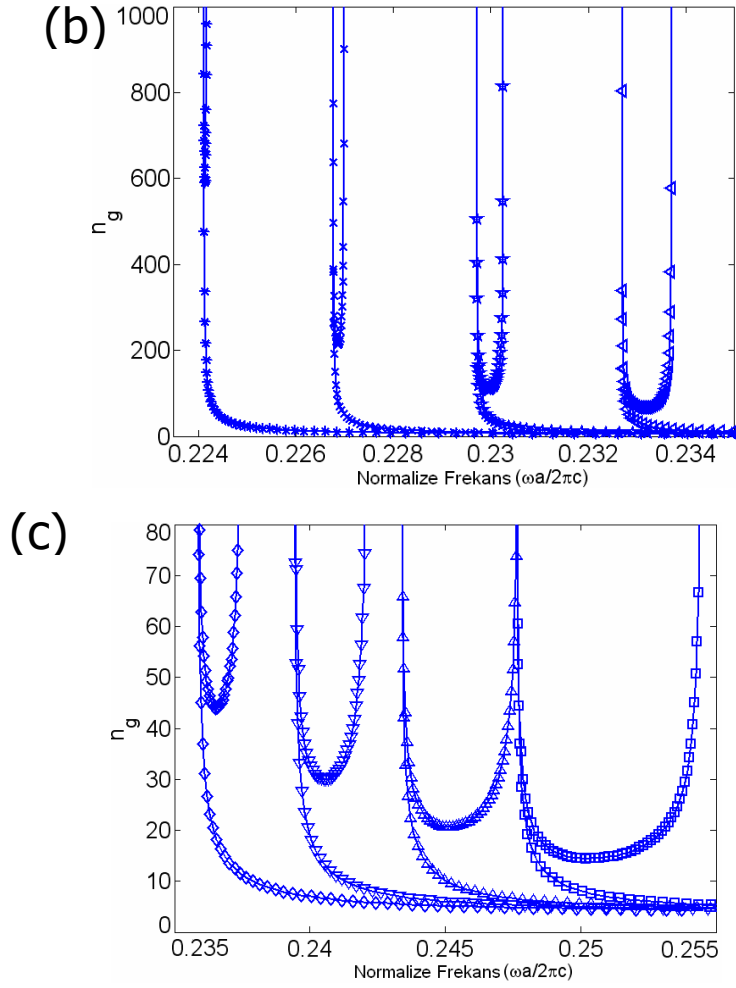
Şekil 3.17. (a) Üzerinde işlem yapılmamış üçgen örgülü fotonik kristal dalga kılavuzu. Hava deliklerinin yarıçapı $0.30a$ arka plan dielektrik malzemenin dielektrik katsayısı 12'dir. Sarı delikler yarıçapı değiştirilecek olan deliklerdir. (b) Bu fotonik kristal dalga kılavuzunun dalgayı koruduğu bantların dispersiyon diyagramı üzerindeki yeri. Düz ve kesikli bantlar, x eksenine göre sırasıyla simetrik ve anti simetrik manyetik alan dağılımı olan bantları göstermektedir. (c) Simetrik modun grup indis spektrası

Düzlem dışı kayıplar göz önünde tutularak ters uzayda (k -vektör uzayı) ışık çizgisinin altındaki kısım dikkate alınmıştır. Bu bölge yaklaşık olarak $(0.25(2\pi/a), 0.5(2\pi/a))$ olarak belirlenmiştir. $k = 0.5(2\pi/a)$ noktası tam bant kenarı olduğu için grup indis sonsuza çıkar, fakat bant genişliği çok az olacağından ve grup hızı dispersiyonu bu noktada çok fazla olduğundan bu nokta ihmal edilir. Şekil 3.17(c)'de üzerinde değişiklik yapılmamış yapının grup hızı frekans değişimi

verilmişti. Şekilden görüleceği üzere bant kenarına doğru grup indis uzaksamaktadır. Bu durumun temel problemi dar bant aralığı ve grup indisin devamlı değişmesi yani grup hızı dispersiyonudur. Bu durumdan kurtulmanın yolu çeşitli yapısal düzenlemelerle grup indis-frekans grafiğinde düz bantlar elde edebilmektir ve bu çalışmanın ana konusu budur. Yeterince düz eğimli grafikler sabite yakın grup indis değişimi ve düşük grup hızı dispersiyonu sağlayacaktır. Bu da zaman içeriği sinüs modüle Gauss dağılımı olan bir optik atımın dalga kılavuzu içerisinde bozulmadan ilerleyebilmesi hedefine ulaştıracaktır.

Bu çalışmada bir önceki çalışmadan alınan bakış açısı kullanılmıştır. Manyetik alan dalga kılavuzunun merkez çizgisinin yakınlarında en yüksek değerini almıştır ve fotonik kristalin birinci ve ikinci satırlarında büyük ölçüde sönümlenmektedir. Bu nedenle biz de tasarımımızda birinci satıra odaklandık. Bu satırlardaki deliklerin yarıçapını artırarak dispersiyon diyagramındaki ve grup indisindeki değişimi inceledik. Bu deliklerin yarıçapı (0.30a, 0.36a) arasında bir değer aldığı durumda düz bantlar oluşmamakta, grup hızı dispersiyonu yüksek değerler almaktadır. Fakat yarıçap 0.36a'yı geçtiğinde düz bantlar ortaya çıkmaktadır. İlgili düz dalga metoduyla hesaplanan dispersiyon diyagramları Şekil 3.18(a)'da gösterilmiştir.

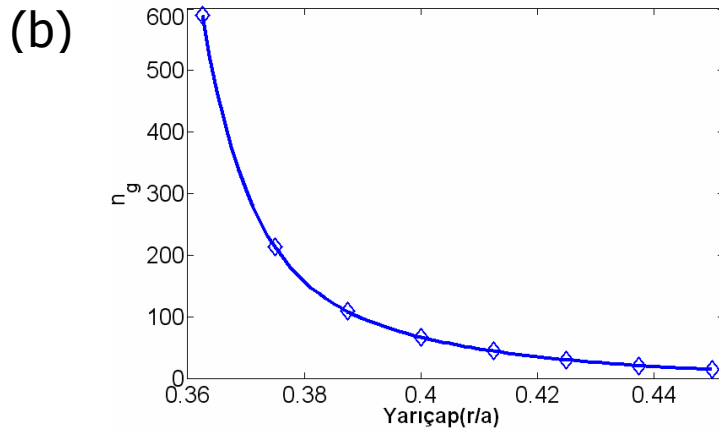
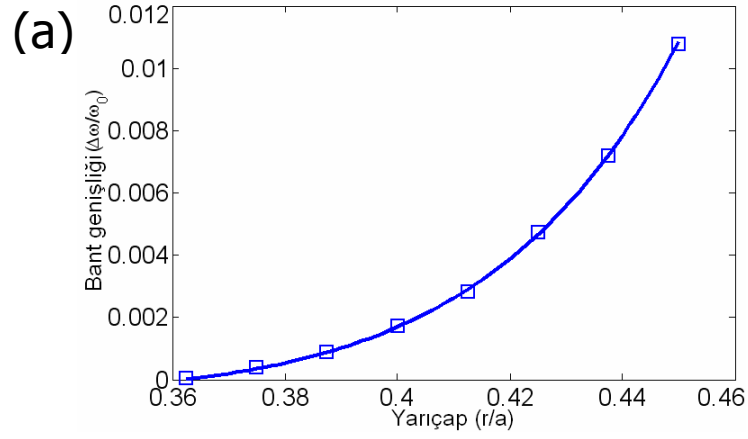


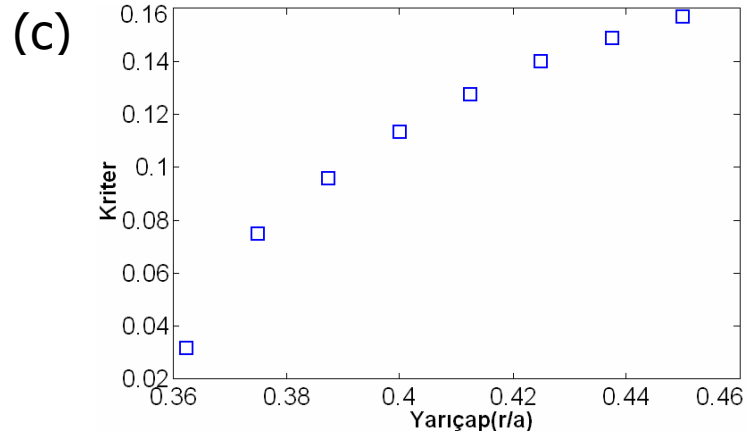


Şekil 3.18. (a) Şekil 3.17(a)'da sarıyla gösterilen deliklerin çaplarının değişmesiyle oluşan çeşitli dispersiyon diyagramları. (b) Bu yarıçap değerlerinin $0.3625a$ 'dan $0.40a$ 'ya kadar değişmesiyle elde edilen grup indis – frekans grafikleri (soldan sağa). (c) Yarıçap değerlerinin $0.4125a$ 'dan $0.45a$ 'ya kadar değişmesiyle elde edilen grup indis – frekans grafikleri (soldan sağa).

Bu dispersiyon diyagramlarında $k = 0.35(2\pi/a)$ komşuluğunda bir dönüş noktası ortaya çıkmıştır. Yarıçap arttıkça ortalama kırılma indisi azaldığı için bant eğrisi devamlı yukarı kaymaktadır. Dönüş noktasında dalga kılavuzunun eğimi eksiden artıya dönmektedir. Dönüş noktasından sonra aradığımız düz bantlar ortaya çıkmaktadır. İlgili grup indis grafikleri Şekil 3.18(b) ve Şekil 3.18(c)'de gösterilmiştir. Bu şekillerde sabit grup indis bölgelerinin farklı bant genişlikleri ve farklı merkez grup indisleri aldığını görebiliriz. Şekilde görünen 'U' şeklindeki eğriler düz bant aralığı elde etmede, yani az değişen grup indisi, geniş bant aralığı ve düşük grup hızı dispersiyonu elde etmenin uygun bir yoludur. 'U' eğrilerinin minimum grup indisleri ve bant genişlikleri Şekil 3.18'den hesaplanmıştır. Bant

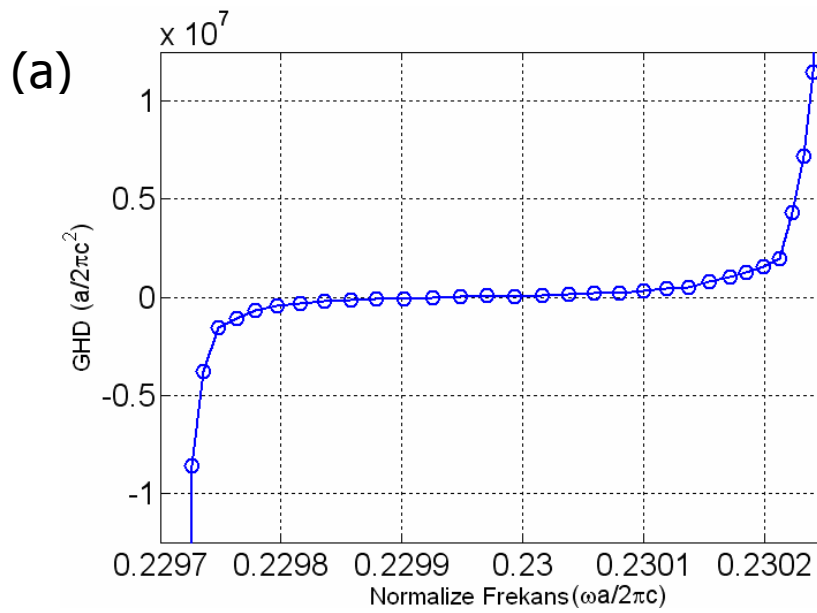
genişliği $\Delta\omega/\omega_0$ olarak tanımlanmıştır. Burada $\Delta\omega$ maksimum ve minimum frekanslar arasındaki farktır. ω_0 ise U-eğrisinin merkez frekansıdır. Maksimum ve minimum frekanslar minimum grup indisin %10 fazlasındaki frekans değerleri olarak elde edilmiştir. Bant genişliğinin ve minimum grup indisin yarıçapa göre değişimi sırasıyla Şekil 3.19(a) ve Şekil 3.19(b)'de verilmiştir. Görüldüğü üzere bant genişliği üstel bir fonksiyon gibi artarken grup indis üstel bir fonksiyon gibi azalmaktadır. Bu iki değer ters orantılı olduğu için bu yapıları karşılaştırabileceğimiz bir kriter belirledik. Bu kriter grup indis-bant genişliği çarpımıdır (FOM). Yarıçapa göre FOM değerleri Şekil 3.19(c)'de verilmiştir. FOM değerleri en büyük değeri 0.16'dır ve delik yarıçapının 0.3625'ten 0.45'e çıktığında FOM yaklaşık 5 kat artmıştır.

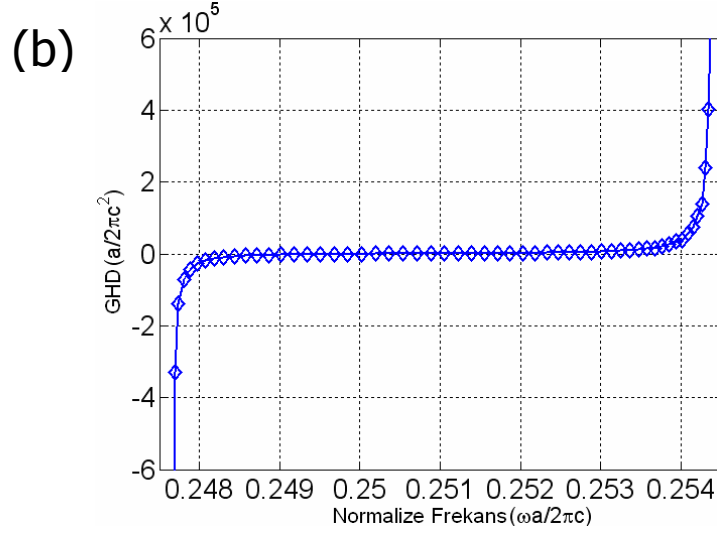




Şekil 3.19. (a) İlgili yarıçap değerinin değişmesiyle elde edilen bant genişliği değerleri. Bant genişliği ‘U’ eğrisinin minimum değerinin en fazla %10 değişmesiyle elde edilmiştir. (b) ‘U’ eğrisinin sabit kabul edilen grup indisin yarıçapa göre değişimi. (c) Kriter değer olan grup indis bant genişliği çarpımı.

Şekil 3.20(a) ve (b)’deki yarıçapın sırasıyla $0.3875a$ ve $0.45a$ olduğu durumlar için elde edilmiştir. Grup hızı dispersiyonu (GHD) grafiği $\partial^2 k / \partial \omega^2$ hesaplanarak elde edilmiştir. GHD 10^5 ps/km^2 değerine kadar düşürülebilmıştır. Grafiklerdeki simetrik GHD değişimleri dispersiyon telafi edici yapılarda kullanım alanı bulabilir. Buraya kadar yapılan çalışma frekans alanındaki simülasyonlara dayanıyordu. Bundan sonra zaman düzleminde optik atımların hareketini gözlemleyeceğiz.

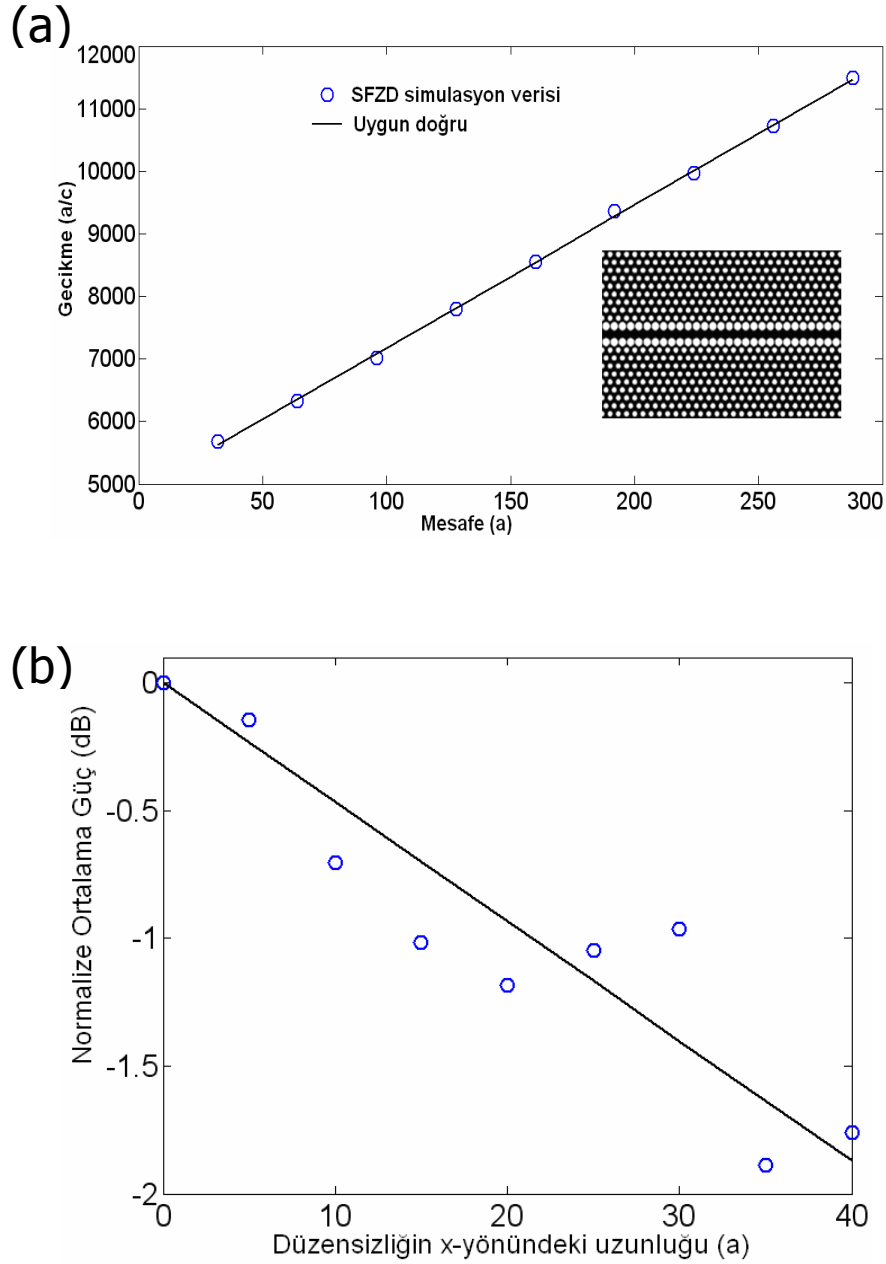




Şekil 3.20. Grup hızı dispersiyonunun (a) $r=0.3875a$ ve (b) $r=0.45a$ durumlarında frekans bağımlılığı.

Zaman düzlemindeki çalışmalarımız sınırlı fark zaman düzlemi (SFZD) simülasyonlarına dayanmaktadır [33]. Bu metot yavaş ışığın fotonik kristal dalga kılavuzu içerisindeki hareketini görmemizi sağlamaktadır. Simüle edilen yapının uzunluğu $300a$ alınmıştır. Simülasyon düzlemi tam uyumlu katmanlarla sarılarak yapının sınırlarından gelecek olan yansımalar engellenmiştir Dalga kılavuzu boyunca $32a$ aralıkla ölçüm noktaları konulmuştur. Söz konusu simülasyonda kenar deliklerin yarıçapları $0.4375a$ alınmıştır. Gauss modüle sinüs çizgi kaynak kullanılarak yapı uyarılmıştır. Kaynağın merkez frekansı $\omega a / 2\pi c = 0.2452$ olarak belirlenmiş, kaynağın normalize bant genişliği 0.001 olarak alınmıştır. Böylece U şeklindeki eğrinin dip kısmı uyarılmaya çalışılmıştır. Bu frekansta, dispersiyon diyagramından da görülebileceği üzere dalga denkleminin iki farklı çözümü vardır. Bu iki çözümden yavaş ışık olan çözümü uyararak için gelen ışığın uzaysal dağılımı ilgili modun dağılımıyla uyumlu olmalıdır. Bu moda anlamlı miktarda güç aktarabilmek için çizgi kaynağı eğimli bir biçimde yerleştirdik. Böylece hızlı modun yanı sıra yavaş modda uyarılmış oldu. Hızlı mod ve yavaş mod arasındaki ayırım ışık belli bir mesafe kat edince ortaya çıkmaktadır. SFZD analizinden grup indis çıkarımı ise yavaş ışığın merkez tavanının ilgili ölçüm noktasına geliş zamanı ve geldiği mesafe kullanılarak yapılır. Bu yapıda optik iletişim dalga boyunda (1550 nm) bir yavaş ışık göndermek istersek a sabitini 380 nm almak gerekir. Bu durumda giriş optik atımının bant genişliği 6.3 nm ve sabit grup indis alanının bant genişliği 12.6 olmuş olur. Optik

atım 10000 a/c süresince izlenmiştir. Farklı ölçüm noktalarında atımın gecikme değeri ölçülerek Şekil 3.21(a)'daki gecikme-yol alınan mesafe grafiği elde edilmiştir.

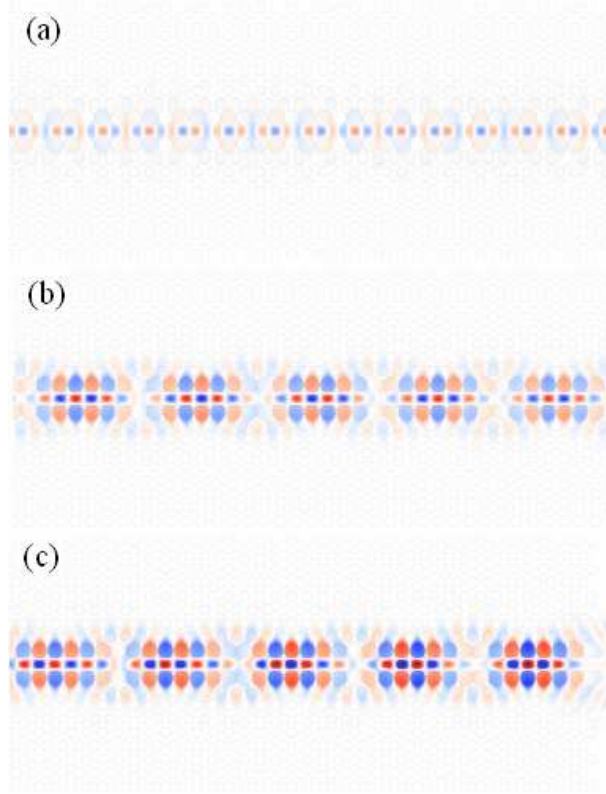


Şekil 3.21. (a) Ekli küçük resimde SFZD simülasyonu yapılan yapının bir parçası gösterilmektedir. Kenar satır deliklerinin yarıçapı $0.4375a$ 'dır. Fotonik kristal dalga kılavuzunun uzunluğu $300a$ ve iki ölçüm noktası arasındaki mesafe $32a$ 'dır. Grafikteki noktalar dalga kılavuzu boyunca konulan ölçüm noktalarındaki gecikmeyi ifade eder. (b) Düzensizlikten kaynaklanan kayıpların düzensiz yarıçaplı silindirlerin x yönünde kapladığı uzunluğa göre grafiği (mavi çemberler). Düz çizgi bu noktaların uydurulduğu doğrusal fonksiyondur (logaritmik ölçekte).

Bu eğrinin eğimi grup indisi $n_g = 22.85$ vermektedir. Bu değer frekans düzlemindeki sonuca yakındır $n_g = 20.59$. Giren atımın $300a$ yol alması için geçen süre ilgili hesaplamalar yapıldığında 8.69ps olarak bulunur. Bu gecikme süresi daha uzun dalga kılavuzu kullanarak veya tasarımdaki ilgili deliklerin yarıçapları değiştirilerek yapılabilir. Farklı yarıçaplı delikler kullanarak gecikme artırılırsa bant genişliği azaltılmak zorunda kalınır.

Yavaş ışık için detaylı bir kayıp analizi bu çalışmanın kapsamı haricindedir. Fakat bu yapı için fabrikasyon hatalarından kaynaklanan geri yansıma kayıplarını göz önüne aldık. Bu nedenle yapıdaki $0.4375a$ yarıçaplı deliklerin bazılarını yarıçapları $0.4375a \pm 0.01a$ aralığında rasgele değerler alacak şekilde yeniden belirledik. Rasgele yarıçaplı kısım $40a$ ya kadar uzatılarak uzunluk başına ortalama kayıp hesaplandı. Gücün rasgele x yönündeki yarıçaplı çubukların sayısına göre değişimi grafiği Şekil 3.21(b)'dedir. Bu değer ise $0.05\text{dB}/a$ 'dır. Bu değer kesin bir sonuç sayılamaz çünkü SFZD analizindeki çözünürlük $0.01a$ değişimi ancak piksel altı ortalaması yaparak yapıya yansıtılabilir. Yapıdaki üretim hatalarından kaynaklanan kayıplar elektrik ve manyetik alan dağılımının deliklerin kenarlarından uzaklaştırılmasıyla mümkün olabilir [34].

Şekil 3.22'de optik atımın yol alışı gözlemlenebilir. İlk önce hızlı ışık gelir (Şekil 3.22(a)). Bu mod dalga kılavuzunda iyice korunmuştur, yani dalga kılavuzunun kenarlarında merkeze göre fazla bir alan bulunmamaktadır. Belli bir süre sonra yavaş ışık ulaşır (Şekil 3.22(b)). Bu mod kenarlara daha fazla yayılmıştır. Bu da belli bir sürtünme oluşturarak ışığı yavaşlatmaktadır. Yavaş ışığın GHD'sinin düşük olduğunu göstermek için Şekil 3.22(b)'deki atımın $300a$ yol almasını sağladık. Şekil 3.22(c) yapının sonundaki manyetik alan dağılımıdır. Bu manyetik alan dağılımında GHD'den kaynaklanan her hangi bir genişleme gözlemlenmemiştir.



Şekil 3.22. Dalga kılavuzu boyunca ışığın hareketi. Yavaş ve hızlı ışığın farklı zamanlarda anlık görüntüleri sırasıyla (a) ve (b)'de gösterilmiştir. (c) Yavaş ışığın yapının sonundaki dağılımı.

Bu çalışmada grup indis değerlerinin ve bant genişliklerini komplike olmayan bir yöntemle düz bantlar elde etmeye çalıştık. Frekans düzlemindeki hesaplamalarımız kenar deliklerinin yarıçaplarının artırılmasıyla özgün özelliklerin ortaya çıkmasını sağladı. Grup indis ve bant genişliği arasındaki üstel tersine ilişki araştırıldı. Daha sonra belirlenen bir kriterle (FOM) yapılar karşılaştırıldı. Pikosaniye seviyesinde optik gecikme zaman düzleminde gösterildi.

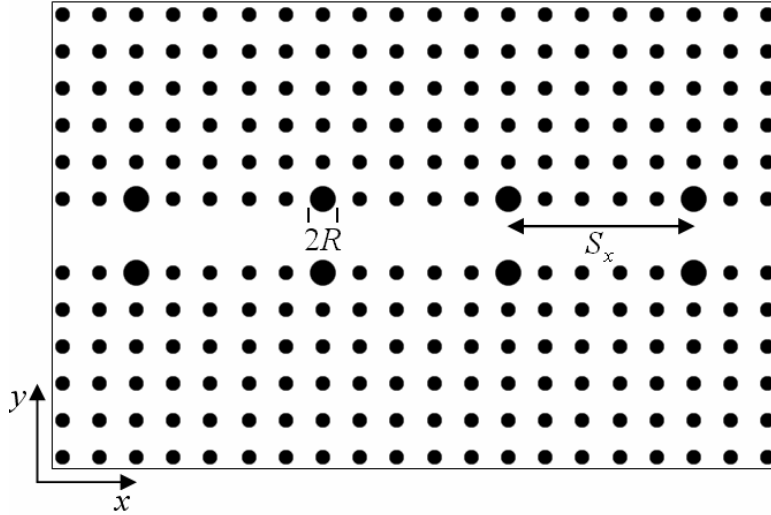
3.4 Fotonik Kristal Dalga Kılavuzları ve Kovuklarla (Kaviteler) Yavaş Işık

Kovukların ışığı belli bir süre hapsetme özellikleri arka arkaya konulan kavitelerle ışığın yol alışının yavaşlatılabileceği fikrini doğurmuştur. Bu konuda hali hazırda yapılan birçok çalışma vardır [35,36]. Bu çalışmaların ışığında tezin bu kısmında bu kovukların dalga kılavuzunun etrafına yerleştirilmesiyle ışığın yavaşlatılması fikri ele alınmıştır.

3.4.1. Işığın yavaşlatan fotonik yapının özellikleri ve frekans düzleminde incelenmesi

Bu çalışmada temel yapı kare örgülü fotonik kristal temelinde kurulmuş silindirik dielektrik çubuklardır. Çubukların arka planı havadır. Çubukların yarıçapı $0.2a$ kadardır. Buradaki a değeri örgü katsayısıdır. ΓX simetri yönünde bir satırlık dielektrik çubuk sırası ortadan kaldırılmasıyla fotonik kristal dalga kılavuzu elde edilmiştir. Dalga kılavuzu modu kristalin bant boşluğu içerisinde $\omega a/2\pi c = [0.300-0.416]$ aralığında değerler almaktadır. Bu mod dışında dalga kılavuzunda hareket eden başka mod bulunmamaktadır. Bu modun bant kenarlarında grup hızı dispersiyonu (GHD) çok yüksektir. İlk çalışmamızda görüleceği üzere dalga kılavuzuna en yakın kristal elemanlarının modun spektral özelliklerinde ciddi bir etkisi vardır. Fakat bu elemanların sadece yarıçapını artırmak düşük GHD'li bir mod elde etmek için yeterli olmaz. Bu nedenle her komşu çubuğun yarıçapını değiştirmek yerine bazı çubukların yarıçaplarını periyodik değiştirerek bir kavite etkileşimi elde edilmiştir. Diğer bir deyişle bu yavaş ışık dalga kılavuzu çubukların dalga kılavuzuyla etkileşmesinden ortaya çıkmıştır. Sonuç olarak dalga kılavuzumuz etkileşimli kavite dizisine dönüştü. Bu etkileşimli kavite konfigürasyonu da bize düz bantlı düşük GHD'li bir modu elde etmemizi sağladı. Bu büyütülmüş çubukların yapıya eklenmesi yasaklı bant aralığına birkaç modun girmesine sebep oldu. Bu çalışmada ışığı yavaşlatmada en fazla işe yarayacağını düşündüğümüz modu nazara alacağız.

Burada analiz edilen yapının bazı geometrik özelliklerinden bahsedeceğiz. Yapımız, yarıçapı $0.20a$ (a örgü katsayısı) olan silindirik çubukların hava ortamına yerleştirilmesiyle oluşmuştur. Bu çubukların dielektrik sabiti 12'dir. Dalga kılavuzu bir satırlık çubuğun yapıdan çıkarılmasıyla elde edildi. Etkileşimli kavite özelliği ise yapıdaki bazı çubukların yarıçaplarının (R) büyütülmesiyle oluşturuldu. Bu çalışma boyunca $R=0.35a$ 'dır. Bu R yarıçaplı silindirler S_x periyoduyla dalga kılavuzunun komşuluklarına yerleştirildi. Bu çalışmadaki en önemli tasarım parametresi S_x periyodudur. $S_x = 5a$ için oluşan yapı Şekil 3.23'de gösterilmiştir. Makaledeki yapılar düz dalga yöntemiyle analiz edilerek ilgili dispersiyon diyagramları ve alan dağılımları elde edilmiştir.



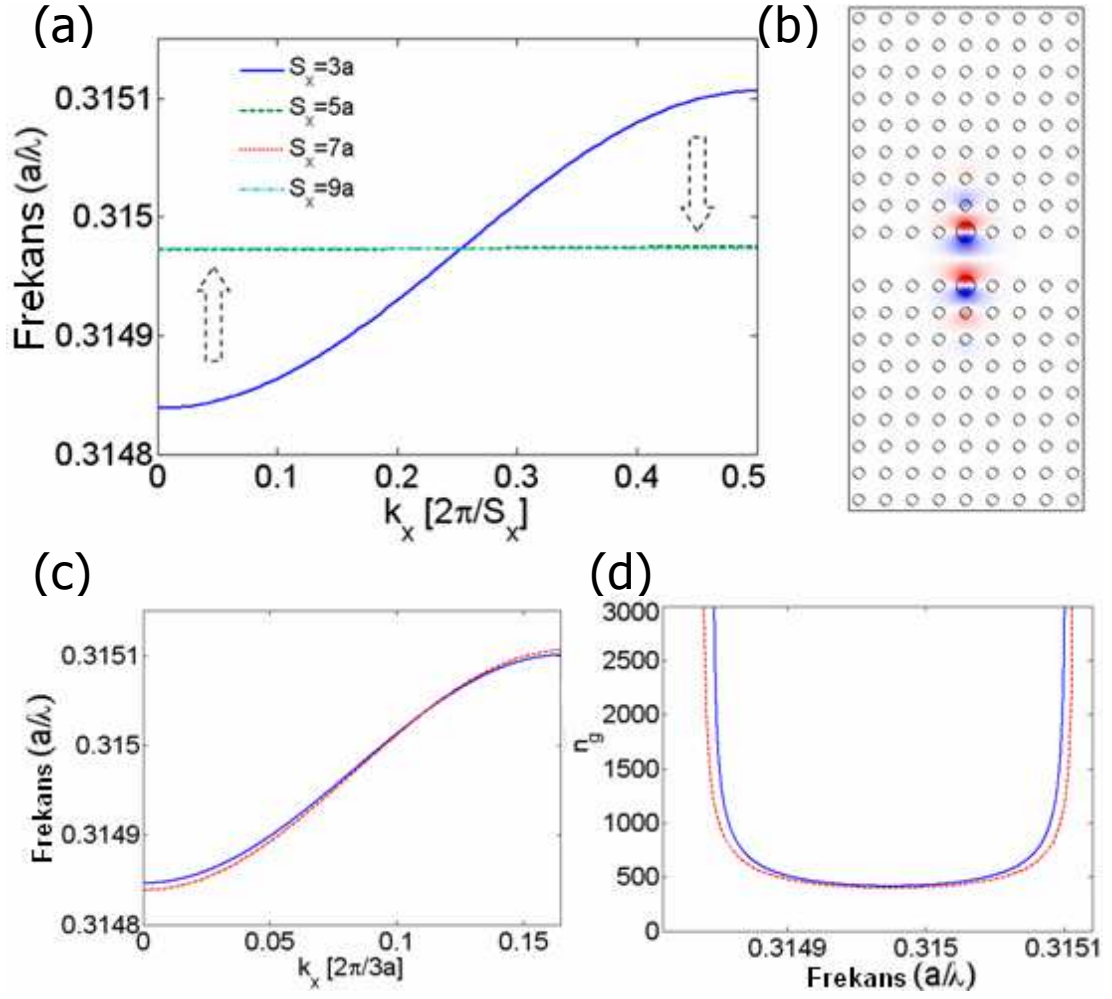
Şekil 3.23. Kare örgü fotonik kristal dalga kılavuzu ve kavite birleşimiyle oluşan yavaş ışık yapısı. Küçük silindirik çubukların yarıçapı $r = 0.20a$, değiştirilen çubukların yarıçapı $R = 0.35a$ 'dır. S_x iki kavite arasındaki uzaklığı gösterir.

Etkileşimli kavite için farklı S_x değerleri için verdiği dispersiyon diyagramları Şekil 3.24(a)'da gösterilmiştir. Dikkat edilecek olursa bant diyagramlarının bir kosinüs fonksiyonu şeklini aldığı görülür. S_x değerinin artırılmasıyla dispersiyon diyagramının bant genişliğinin azaldığı gözlemlenebilir. Özellikle $S_x = 5a$ değerinden yüksek değerlerin dispersiyon diyagramları $S_x = 5a$ 'nın dispersiyon grafiği tarafından örtülmüştür. Bu daralma grup hızı değerini veren $v_g = \partial\omega/\partial k$ değerinin S_x arttıkça azaldığını göstermektedir. Yani S_x arttıkça ışık yavaşlamaktadır. Elektrik alan dağılımı $S_x = 9a$ durumunda Şekil 3.24(b)'deki gibidir. Bu modun önemli özellikleri biri elektrik alanın yapı içerisinde sıkıca korunması ve büyütülmüş çubukların merkezlerinde odaklanmasıdır. Bir diğer özelliği de modun elektrik alan dağılımının x-eksenine göre anti simetrik olmasıdır. Işığın yavaşlamasında elektrik alanın büyütülmüş çubuklarda yoğunlaşması ve mod dağılımının anti simetrik olması çok önemlidir.

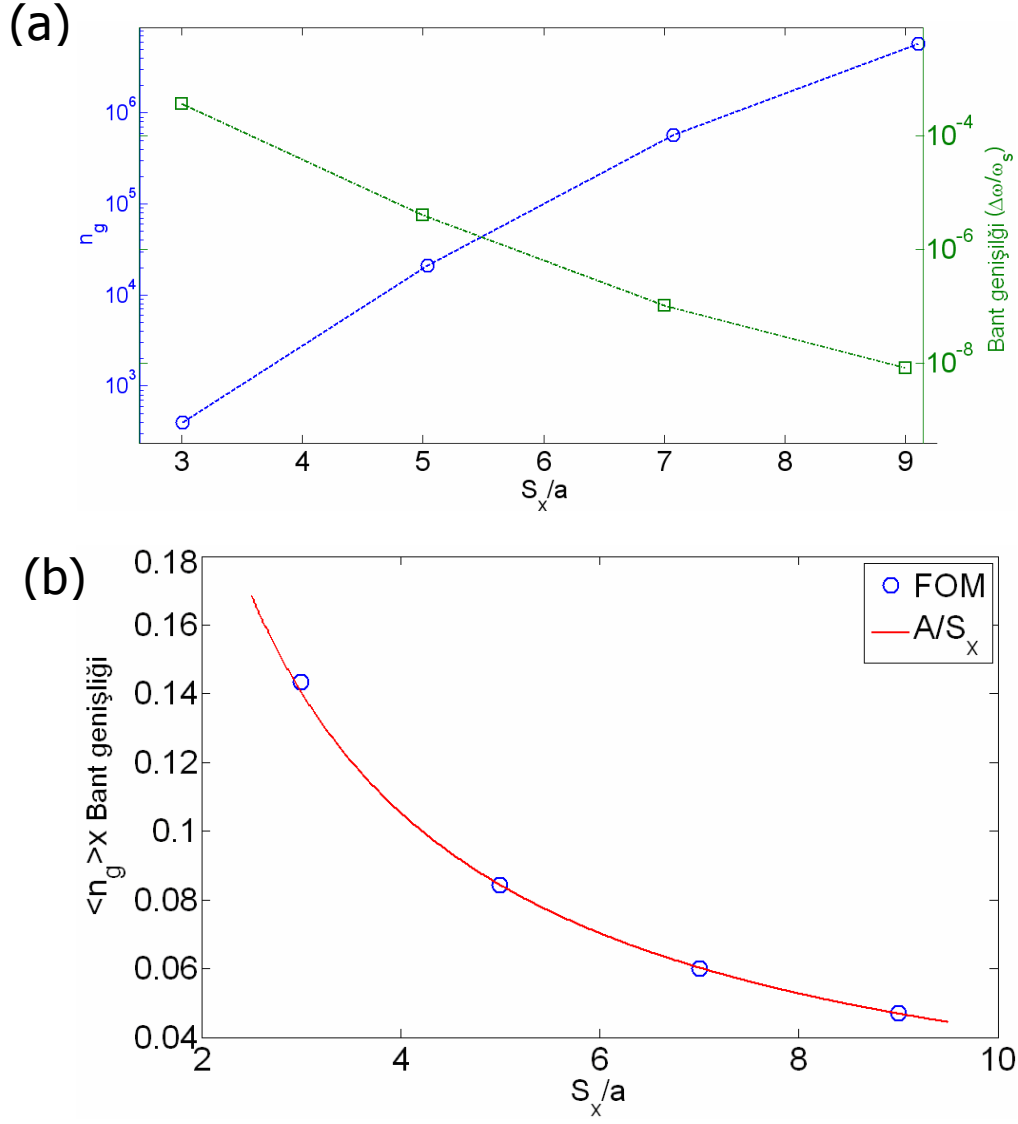
Bu kısımda grup indisin $(n_g(\omega) = (\partial\omega/\partial k)^{-1}c = c/v_g)$ frekansa göre değişimi ve ilgili modun grup hızının sabit kabul edilebileceği bant aralığından bahsedilecektir. $S_x = 3a$ durumunda geniş kabul edilebilecek bir bant genişliği olduğunu Şekil 3.24(c)'deki dispersiyon diyagramından görebiliriz. İlgili grup indis-frekans değişimi

Şekil 3.24(d)'de gösterilmiştir. U harfiyle gösterilen eğri (kırmızı) grup indisin U harfinin tabanında sabite yakın olduğunu ve buradaki bant genişliğinde GHD'nin düşük olacağını göstermektedir. Bundan sonra S_x arttıkça komşu kaviterin etkileşimi azaldığı için grup indis değeri yükselmekte ve bant genişliği azalmaktadır. Bant genişliğinin artmasını daha büyük yapının frekans seçiciliğinin artmasıyla da açıklayabiliriz. Bu açıklama Şekil 3.25(a)'daki grup indisi ve bant genişliği değerlerindeki değişimle ispatlanmıştır. Bu şekilde bant genişliği grup indis değerinin en fazla %10 arttığı aralığın merkez frekansına bölümü olarak kabul edilmiştir ($BW = \Delta\omega/\omega_c$). Matematiksel ifadelerle tutarlı bir biçimde bant genişliği fonksiyonu ve grup indis fonksiyonu birbirine zıt bir biçimde değişmektedir. Bu iki parametrenin birlikte değerlendirilmesiyle bir karşılaştırma yapılabilir. Bu nedenle kriter olarak grup indis – bant genişliği çarpımı $FOM = \langle n_g \rangle \times BW$ ele alınmıştır.

Bu kriterin S_x bağımlılığı Şekil 3.25(b)'de gösterilmiştir. FOM ile S_x arasındaki ters orantı şöyle açıklanabilir: Belli bir frekans aralığını ($\Delta\omega$) ve belli bir dalga vektör aralığını (Δk) kaplayan düz bir bandın varlığını farz edelim. Bu durumda bandın grup indisi $n_g = \Delta k/\Delta\omega$ olarak formülize edilebilir. Bant genişliğinin daha önceden $BW = \Delta\omega/\omega_c$ olarak tanımlamıştık. Bu durumda kriterimiz ($FOM = \langle n_g \rangle \times BW$) $\Delta k/\omega_c$ 'ye eşittir. Yapının periyodikliğine bağlı olarak küçültülemez Brillouin alanı ($0, \pi/S_x$) içinde olmalıdır. Yani, dalga vektör aralığı $\Delta k = \pi/S_x$ olmalıdır. $FOM = \Delta k/\omega_c$ olduğu için, gösterge değeri S_x parametresiyle ters orantılı olmalıdır ve bu ilişki $f(S_x) = A/S_x$ gibi bir fonksiyona karşılık gelebilir (Şekil 3.25(b)'de gösterildiği gibi). Şurayı vurgulayalım ki, S_x 'in 3a'dan 9a'ya kadar değişiminde, grup indisi ve bant genişliği çok fazla değişmektedir. Zira $S_x = 9a$ için grup indis yaklaşık 10^7 'dir. Işığın grup hızının 100m/s'ye kadar düştüğü anlamına gelir.



Şekil 3.24. (a) S_x 'in $3a$, $5a$, $7a$, ve $9a$ değerleri için, PWE metoduyla hesaplanan dispersiyon diyagramları. Dispersiyon eğrisinin azalması ışığın grup hızının düştüğünü gösterir. (b) $S_x = 9a$ için yavaş modun elektrik alan dağılımı. Elektrik alan dielektrik çubukların üzerinde daha yoğundur ve anti-simetriktir. (c) $S_x = 3a$ için PWE ile elde edilen (kırmızı) ve yarı analitik tight binding metoduyla elde edilen (mavi) dispersiyon diyagramları. (d) PWE çözümü için (kırmızı) ve yarı analitik metot için (mavi) grup indis spektrumu.

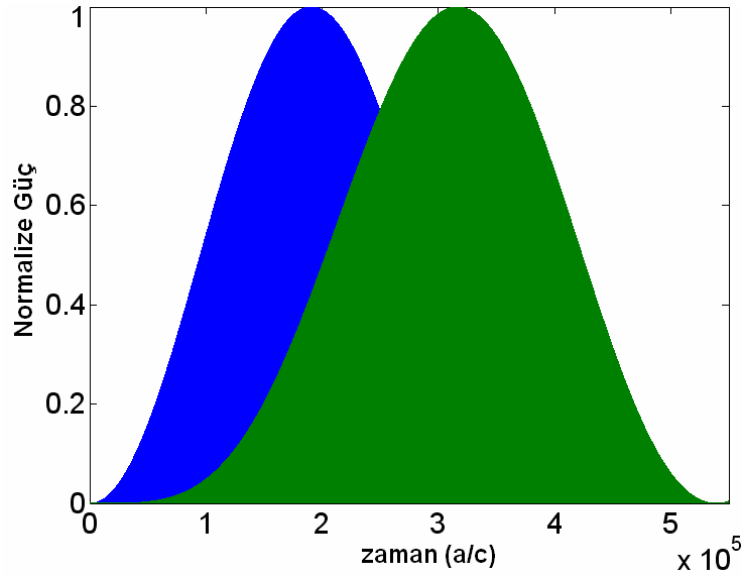


Şekil 3.25. (a) S_x 'değerine göre grup indis (mavi çemberler) ve bant genişliği (yeşil kareler) değişimi. (b) Gösterge değerinin S_x 'e göre değişimi (mavi çemberler). Bir yaklaşım fonksiyonu da eklenmiştir (kırmızı).

3.4.2. Çok yavaş ışığın yol almasının zaman düzleminde incelenmesi

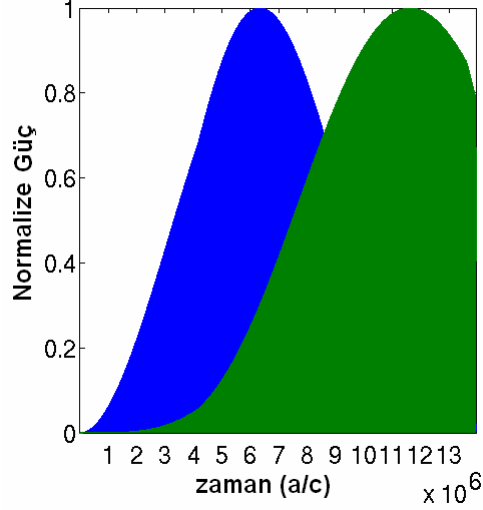
Işığın yapı içerisinde yüksek grup indis ve düşük GHD özellikleri göstermesini zaman düzleminde göstermek için SFZD simülasyonları yapılmıştır [33]. $S_x = 5a$ durumunda farklı iki noktadan ölçülen optik atım sinyalinin zaman ekseninde alan değişimi Şekil 3.26'de gösterilmiştir. Optik sinyal Gauss dağılımlıdır ve frekansı yaklaşık 0.3150 ve bant genişliği yaklaşık 3.3×10^{-6} 'dır. Bu optik atımın aldığı yol ΔL ve geçen zaman Δt değerleri kullanılarak $n_g = c(\Delta t/\Delta L)$ formülüyle hesaplanmıştır. Grup indisi $S_x = 5a$ için 25111'dir. Bu değer geçen zaman Δt ve

alınan yol ΔL değerlerinden $n_g = c(\Delta t/\Delta L)$ formülüyle bulunmuştur. Benzer bir simülasyon $S_x = 7a$ için de SFZD simülasyonu tekrarlanmış, farklı iki noktadan ölçülen optik atım sinyalinin zaman ekseninde alan değişimi Şekil 3.27’de gösterilmiştir.



Şekil 3.26. $S_x = 5a$ için ışık atımının zaman düzleminde yol alışı gösteren SFZD simülasyonu. Grup indis değeri $n_g = \Delta t/\Delta L$ formülüyle hesaplandı ve yaklaşık olarak 25000 bulundu.

Simülasyon süresi çok uzun olduğu için simülasyon ikinci atım bitmeden sonlandırılmıştır. Buna rağmen, grup indis hesabı atımların merkezlerindeki zaman gecikmesinden yapılabilir. Bu durumda için grup indis yaklaşık 5.29×10^5 olarak bulunmuştur. Ölçülen ışık atımı şeklini çok bozulmamıştır, bu GHD’nin düşük bir değer de olduğunu gösterir. Zaman düzlemindeki belli miktar genişlemenin sebebi optik atımın bant genişliğinin frekans analizinde bulunan bant genişliğinden fazla olmasıdır. Fotonik kristal frekans analizindeki bandın dışında kalan bantları filtre etmektedir. Frekans ekseninde daralan atım matematiksel olarak zaman ekseninde genişlemelidir ve de öyle olmuştur. Bu durum için daha kesin sonuçlar verebilecek simülasyonlar yapılabilir fakat bu simülasyonların süresi çok uzun olur.



Şekil 3.27. $S_x = 7a$ için ışık atımının zaman düzleminde yol alışı. Grup indis değeri yaklaşık olarak 529000 bulundu.

3.4.3. Tight-binding metoduyla yarı analitik hesaplar

İlk defa Yariv ve arkadaşları tight binding metoduyla dalga kılavuzunun dispersiyon ilişkisini hesaplanmaya çalışmışlardır [37]. Tight binding analizinin amacı etkileşimli kaviterler içinde yol alan ışığın spektral karakterini ilgili bir etkileşimsiz kavitenin frekans ve alan dağılımı yardımıyla açıklamaktır. Tight binding yaklaşımına göre bantın matematiksel formülasyonu aşağıdaki gibidir.

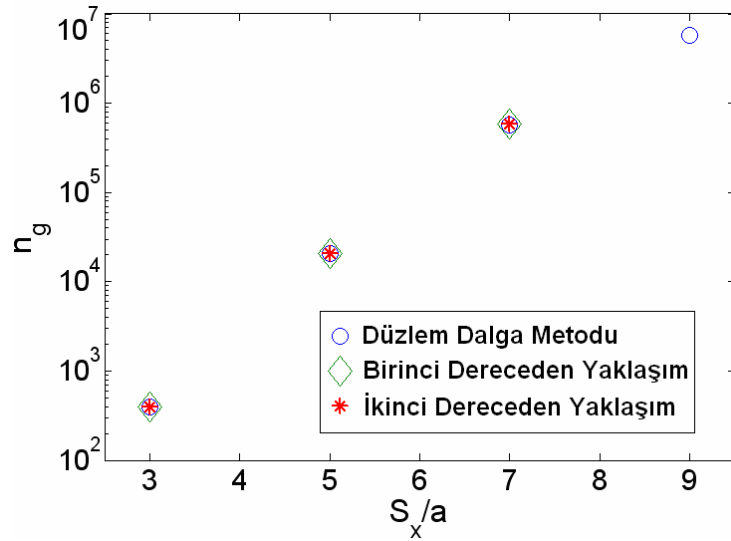
$$\omega_k^2 = \Omega^2 \frac{1 + \sum \beta_n e^{-jknS_x}}{1 + \Delta\alpha + \sum \alpha_n e^{-jknS_x}} \quad (3.1)$$

Ω etrafıyla etkileşimi olmayan kavitenin rezonans frekansıdır. Etkileşimsiz kavitenin elektrik alan dağılımı ve rezonans frekansı (Ω) düz dalga metoduyla, hesap hücrelerinin yeterince büyütülmesiyle bulunmuştur. Bu elektrik alan dağılımı $\Delta\alpha, \alpha_1, \alpha_2, \beta_1$ ve β_2 'nin hesaplanmasında kullanılmıştır. Bu katsayılar iki kavitenin etkileşimiyle yakından ilgilidir. İlgili referansta bu katsayıların hesap yöntemi verilmiştir [37]. Uzak kaviterlerin etkileşimleri az olduğundan sıfır kabul edilmiştir. Denklem 1'e göre bant diyagramı $\omega(k)$ bulunmuş, nümerik türev alınarak $n_g(\omega)$ bulunmuştur ve sırasıyla Şekil 3.24(c) ve 3.24(d)'de gösterilmiştir. Dikkat edileceği üzere düz dalga metodu (düz çizgi) ve tight binding metodunun verdiği değerler (nokta çizgiler) birbirini doğrulamaktadır. Denklem 1'deki ikinci terimler yeterince

küçük kabul edilirse daha da basitleştirilse bant diyagramının fonksiyonu şu şekilde olur:

$$\omega_k = \Omega \left[1 - \frac{\Delta\alpha}{2} + \kappa_1 \cos(kS_x) \right], \quad (3.2)$$

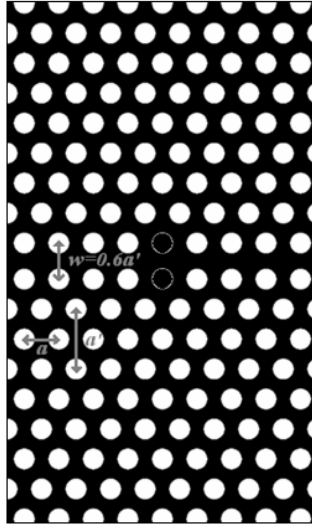
$\kappa_1 = \beta_1 - \alpha_1$ 'dir. Grup hızın k vektörüne göre türev olarak hesaplırsak $v_g(k) = -\Omega S_x \kappa_1 \sin(kS_x)$ olur. Bu grup hızı formülünü c 'ye bölüp çarpmaya göre tersini aldığımızda beklediğimiz 'U' şeklindeki grup indis eğrisini bulmuş oluruz. Bu 'U' fonksiyonunun taban değeri de GHD'nin düşük olduğu bölgedeki grup indis değerini verir. Bu değeri Denklem 2'den $n_{g,\min} = 1/\Omega S_x \kappa_1$ olarak buluruz. Bu değer S_x ile ters orantılı zannedilebilir fakat S_x κ_1 değerini de etkilemektedir. κ_1 değeri kaviterler arasındaki etkileşimlere bağlı olduğu için S_x 'in artmasıyla azalacaktır. Hesaplamalarımıza göre $n_{g,\min}$ değeri S_x 'in artmasıyla üstel bir fonksiyon gibi artmaktadır. Bu anlatılan hesaplamaların sonuçları Şekil 3.28.'da gösterilmiştir. Şekilde üç yaklaşım da görülmektedir. (düz dalga, tight binding metodu ($n=1$, ve $n=1,2$)) Yarı analitik metodun sonuçları nümerik sonuçla uyumludur, bu da tight-binding'in geçerli olduğunu ispat eder. $S_x = 9a$ olduğu durum için tight binding metodu kullanılmamıştır, çünkü etkileşimsiz kabul ettiğimiz kavitenin hesaplama hücresi büyüklüğü $S_x = 9a$ için yeterince kesin değildir.



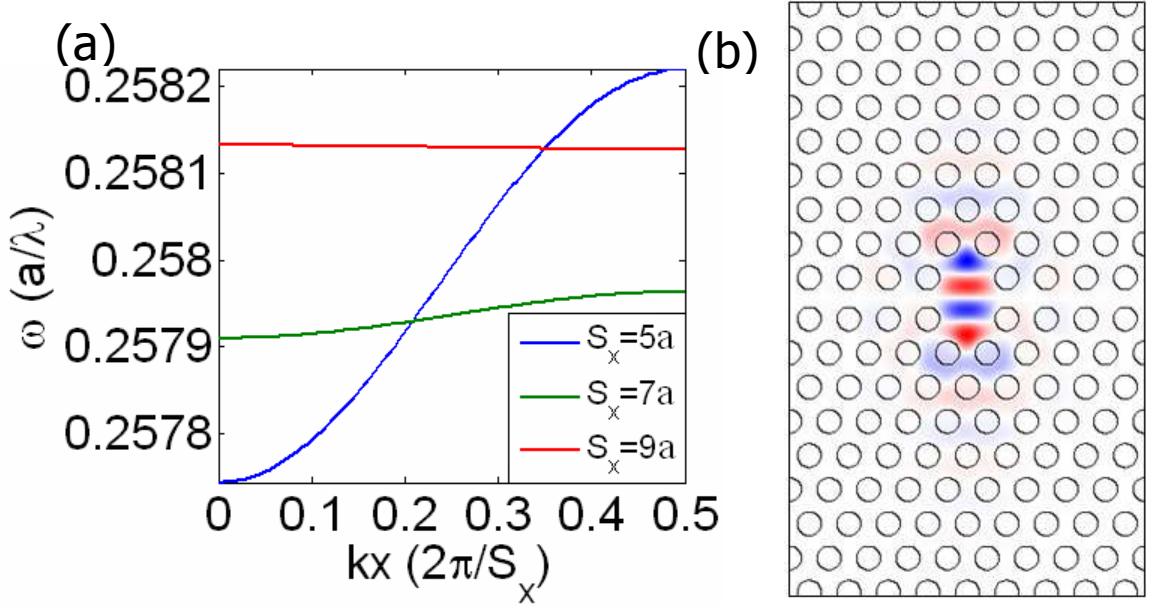
Şekil 3.28. Düzlem Dalga metodu ve tight binding yaklaşımlarına göre 'U' şekilli grup indis frekans grafiklerinin minimum grup indis değerleri.

3.4.4. Üçgen-örgü fotonik kristal tabanlı benzer bir yapının analizi

Bu bölümde kare örgülü fotonik kristal yapının analizden aldığımız tecrübe ile üçgen örgülü bir yavaş ışık dalga kılavuzu tasarlayacağız. 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 dielektrik sabiti 12'dir. Delikler hava boşluklarıdır. Bu deliklerin yarıçapları $r = 0.30a$ 'dır. Dalga kılavuzu ise ΓK doğrultusunda bir sıra deliğin arka plandaki dielektrik malzemeyle doldurulmasıyla oluşur. Bu dalga kılavuzu literatürde en çok kullanılan dalga kılavuzu olmakla beraber, bu haliyle istediğimiz grup indislerine çıkmamız için yeterli değildir. Bu nedenle bütün delikler dalga kılavuzunun merkezine kaydırılır. Dalga kılavuzunun iki tarafındaki delikler arasındaki merkezden merkeze uzaklık $W = 0.6\sqrt{3}a$ olur. Bu formasyonla dalga kılavuzunun merkez çizgisindeki elektrik alanın kenarlarla olan etkileşimi artırılmış olur. Bundan sonra etkileşimli kovuk etkisini yapıya yerleştirmek için dalga kılavuzunun komşuluğundaki bazı delikler belli bir periyotlarla doldurulur (S_x). $S_x = 9a$ için elde edilen yapı Şekil 3.29'de gösterilmiştir.

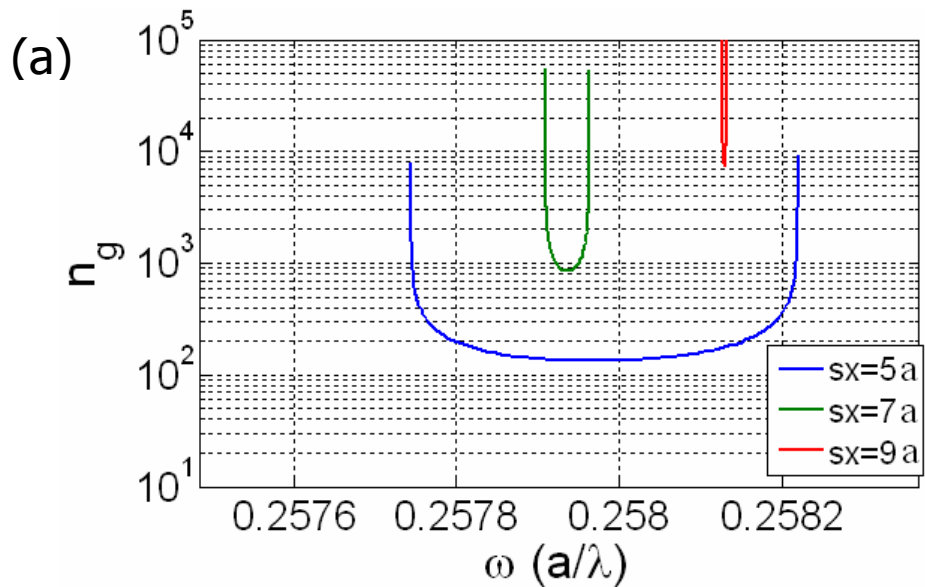


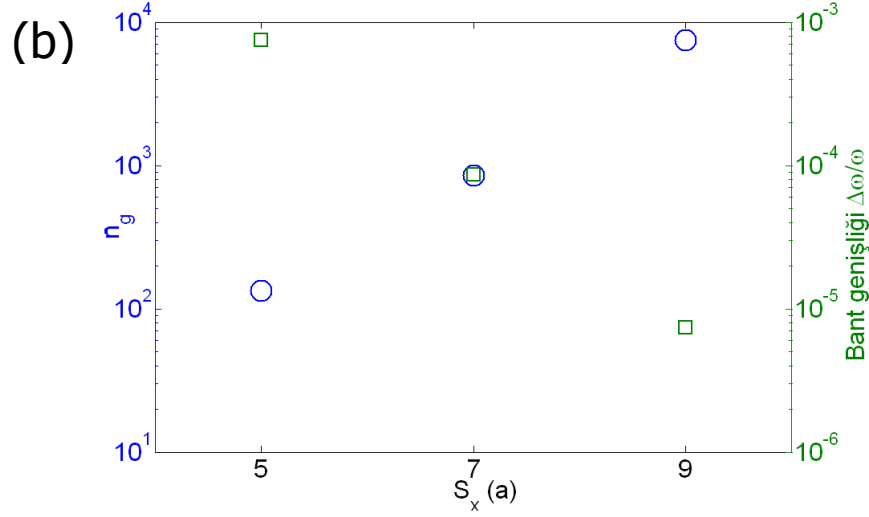
Şekil 3.29. Üçgen örgü fotonik kristal temelli ikinci yavaş ışık fotonik yapısı. Yapı dielektrik arka plan üzerine koyulan deliklerden meydana gelmiştir. Arka planın dielektrik sabiti 12, deliklerin dielektrik sabiti 1'dir. Dalga kılavuzu daraltılmış ve $W0.6$ dalga kılavuzu elde edilmiştir.



Şekil 3.30. (a) Aynı rezonans modun farklı S_x değerleri için dispersiyon diyagramları. (b) Rezonans modun manyetik alan dağılımı.

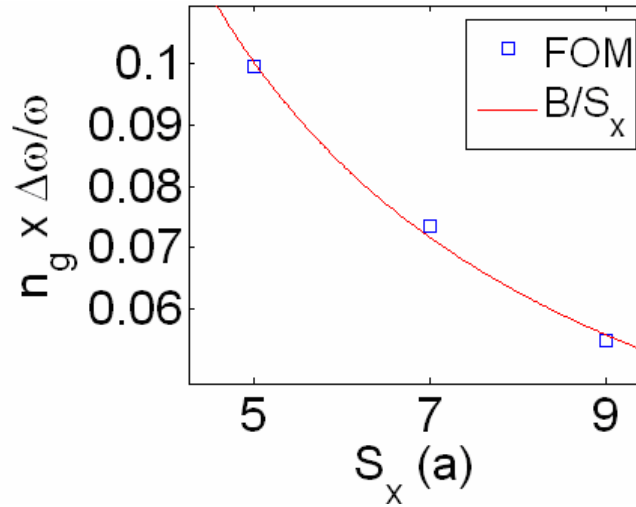
Işığın yavaşlatılmasındaki asıl parametre yine deliklerin doldurulma periyodudur (S_x). Bu yapıda da yasaklı bant aralığında birçok bant ortaya çıkmıştır. Bizim ilgilendiğimiz modun farklı S_x değerleri için dispersiyon diyagramını ve $S_x = 9a$ için manyetik alan dağılımını Şekil 3.30(a) ve 3.30(b)'de gösterilmiştir. Şekil 3.30(a)'daki eğrilerin eğimlerinden grup hızının S_x ile ters orantılı değişimini görebiliriz. S_x 'e göre grup indis-frekans grafikleri Şekil 3.31(a)'da verilmiştir. Grup indisin S_x 'e göre üstel değişimi grafikte gözlemlenmektedir.





Şekil 3.31. (a) Şekil 3.30(a)'daki bantların grup indis spektrumu. Spektrumun 'U'-şeklini alması düşük grup hızı dispersiyonunun göstergesidir. 'U'-şekilli eğrinin farklı S_x değerleri için grup indis ve bant genişliği karşılaştırması (b).

Bu durum U-şeklindeki fonksiyonun dip değerlerinin ve bant genişliği değerlerinin S_x 'e göre değişimini gösteren Şekil 3.31(b)'de de gözlemlenebilir. Daha önce de gözlemlediğimiz gibi grup indis arttıkça bant genişliği azalmaktadır. Bu nedenle aynı kare örgüdeki kriter değerlerini (FOM) bu yapı için de hesaplıyoruz. FOM değerinin S_x 'e göre aldığı değerler Şekil 3.32'de gösterilmiştir. FOM 'un hesaplandığı noktalar kare örgüde de olduğu gibi $g(S_x) = B/S_x$ fonksiyonuna uydurulabilir. Bu durumun sebebi kare örgü ele alındığında açıklanmıştı.

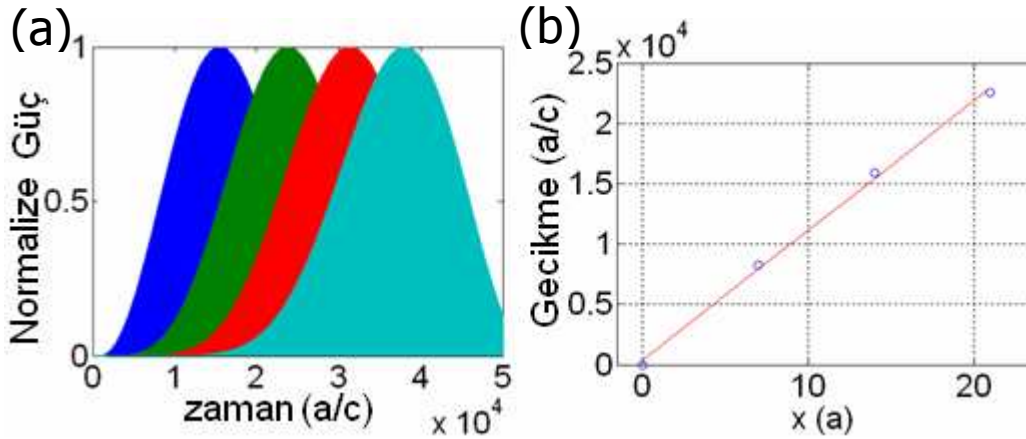


Şekil 3.32. Gösterge değerinin S_x 'e göre değişimi (kare), ve yaklaşım fonksiyonu $g(S_x) = B/S_x$ (çizgi).

Frekans düzleminde elde edilen sonuçların zaman ekseninde de doğrulanması için $S_x = 7a$ durumu SFZD metoduyla simüle edildi. Yapıda yol alan optik sinyalin farklı ölçüm noktalarından alınan alan değerleri zaman eksenine göre Şekil 3.33(a)'da verilmiştir. Optik sinyalin şeklinde ciddi bir bozulma olmaması düşük GHD'nin bir kanıtıdır. Gözlemlenen düşük seviyede dispersiyon yine gönderilen atımın bant genişliğinin frekans analizinin öngördüğünden fazla olmasıdır. Zamandaki gecikme - alınan yol grafiği doğrusal bir fonksiyona uydurulduğunda (Şekil 3.33(b)) grup indisi $n_g \cong 1074$ olarak bulunur ve bu değer frekans analiziyle tutarlıdır.

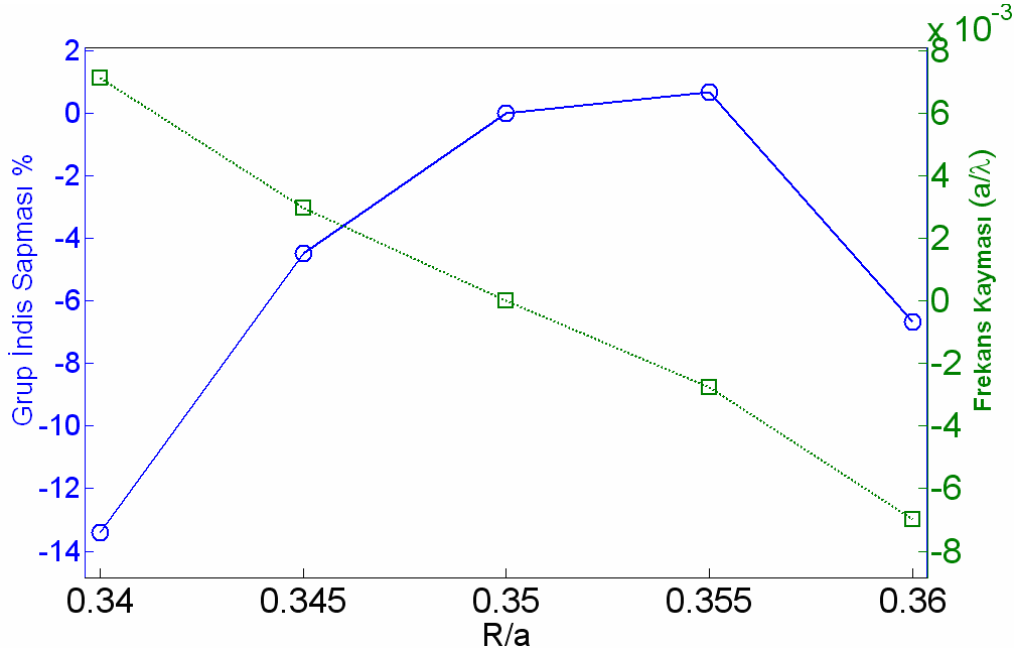
3.4.5. Tartışma

Gerçek hayatta yavaş ışığın elde edilmesini zorlaştıran engellerden biri fabrikasyonu yapılan yapının teorikteki yapıyla birebir aynı olmamasıdır. Üretim sırasında yapıda bazı düzensizlikler oluşur. Oluşabilecek düzensizliklerden biri de yapıdaki elemanların (deliklerin veya çubukların) yarıçaplarının önceden belirlenen yarıçaplardan farklı olması durumudur.,



Şekil 3.33. (a) $S_x = 7a$ için yol alan atımın farklı ölçüm noktalarında aldığı değerler. Ölçüm noktaları $7a$ aralıklarla konulmuştur. Her bir ölçüm noktası için atım merkezlerinin zaman gecikmesi alınmış doğrusal bir fonksiyona oturtulmuştur (b). Bu fonksiyona göre grup indisi 1074'dür.

Küçük değişikliklerin kare örgülü yavaş ışık dalga kılavuzunun dispersiyon diyagramına etkisini araştırmak için $S_x = 5a$ durumunda R değerindeki küçük kaymaların grup indisteki ve merkez frekansındaki etkisine baktık. İlgili grafik Şekil 3.34'de verilmiştir. Grup indis değeri R değerine çok bağlı değildir fakat frekansta ciddi bir kayma göstermiştir. Frekans kayması ışığın dalga kılavuzuna kabul edilmemesine yol açacağı için yapı çok hassas bir şekilde üretilmelidir.



Şekil 3.34. $S_x = 5a$ için R parametresine göre grup indisteki sapma (sol y-ekseni) ve frekans kayması (sağ y-ekseni).

BÖLÜM 4

4. YAVAŞ IŞIĞIN PRATİKTEKİ PROBLEMLERİ VE İLGİLİ TASARIMLAR

Yavaş ışığın gerçek hayata geçirilmesini önleyen bazı problemler vardır. Bu problemlerin en önemlileri şunlardır:

- 1) Üretilen yapıların idealdeki yapılardan farklı olması. Fabrikasyondan gelen düzensizlikler.
- 2) Işığın kristal düzlemine dik olan üçüncü boyuta sızarak yapıdan çıkması
- 3) Hızlı ışıktan yavaş ışığa geçerken empedans uyumsuzluğundan gelen geri yansımalar

Önceki bölümlerde birinci ve ikinci problemden az da olsa bahsedildi. Bu problemlerin detaylı bir biçimde işlenmesi tezin kapsamı dışında bırakılmıştır. Bu bölümde üçüncü problem olan empedans tutuşmazlığı ve çözüm yolları tartışılacaktır.

4.1. Hızlı Işıktan Yavaş Işığa ve Yavaş Işıktan Hızlı Işığa Geçiş

Yavaş ışığın bir problemi de hızlı ışığı yavaş ışığa, yavaş ışığı hızlı 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 yapılara giriş-çıkış eşleyici diyeceğiz. Bu çalışmada giriş-çıkış güç eşleştirici tasarlayacağız. Bu eşleyici yapı indis korunumu prensibine göre çalışan düz bir dalga kılavuzunu daha önce tasarladığımız yavaş ışık yapısına eşleştirecektir.

4.1.1. Kare örgü fotonik kristal yapı için eşleyici yapının tasarımı

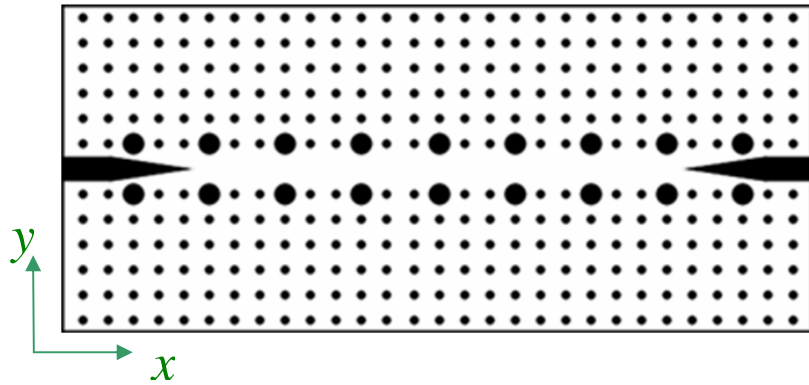
Eşleştirilecek yavaş ışık fotonik kristal yapısı bir kare örgü üzerinde bir dalga kılavuzu açılması ve bazı silindirlerin yarıçaplarının artırılmasıyla oluşturulmuştur. Normal kristalin çubuk yarıçapı $0.2a$ 'dır (a örgü katsayısı). Bir çubuk satırının

çıkartılmasıyla dalga kılavuzu elde edilmiştir. Bazı çubukların yarıçapları artırılarak eşleşen kavite etkisi elde edilmiştir. Bu çubukların çapları $R=0.45a$ 'dır. Yapı Şekil 4.1'de gösterilmiştir.



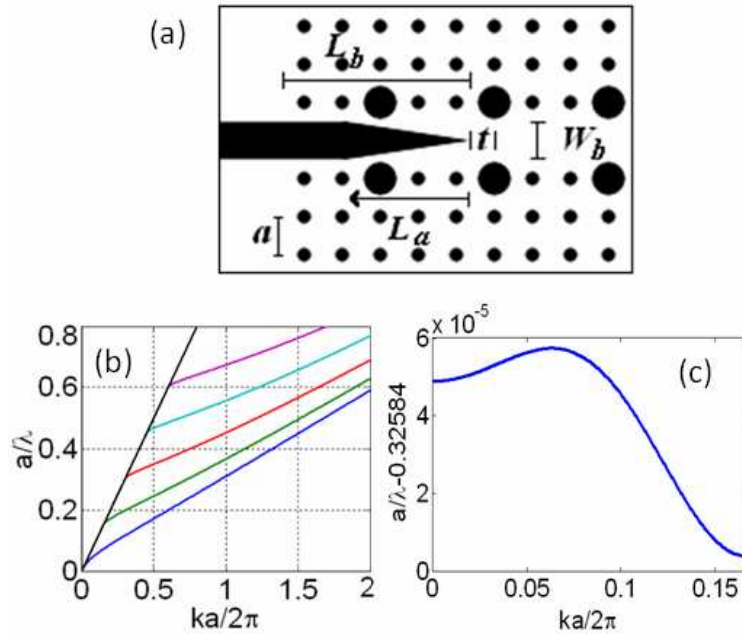
Şekil 4.1. Bir önceki çalışmaya benzer bir yavaş ışık yapısı [38]. Küçük çubukların yarıçapı $0.20a$ 'dır. Bu yapının değiştirilmiş çubukları bir önceki çalışmadaki değiştirilmiş göre daha büyüktür ($R=0.45a$). Bu çalışmanın bir önceki çalışmadan ikinci bir farkı da x-eksenine göre simetrik bir yavaş ışık modunun incelenmesidir (bir önceki çalışmada anti simetrik bir mod incelenmişti).

Bu yapıda ilgilendiğimiz bandın düz bant aralığındaki grup indisi 1200'dür [38]. Bu çalışmanın amacı bu yapıyı indis korunumu prensibine göre çalışan düzlemsel bir dalga kılavuzuyla eşlemektir. Bu iki yapıyı eşlemek için düz dalga kılavuzunun uç kısmını üçgenleştiriceğiz. Bu eşleyici yapı Şekil 4.2'de görülmektedir.



Şekil 4.2. Giriş çıkışlarıyla birlikte yavaş ışık fotonik kristal dalga kılavuzu

Eşleyici kısım Şekil 4.3(a)'da daha detaylı bir biçimde gösterilmiştir. Düzlemsel fotonik dalga kılavuzunun kalınlığı $W_b = a$ 'dır. Dalga kılavuzunun içeri giriş uzunluğu L_b ile gösterilmiştir. x -yönünde ok şeklinin uç kısmıyla büyük yarıçaplı çubuğun merkezi arasındaki mesafe t 'dir. Bu çalışmada $L_b + t$, $5.5a$ değerinde sabittir, L_a ve t tasarım parametrelerimizdir. Çalıştığımız yapıda giriş kısmında yaptığımız bütün değişiklikler, çıkış kısmına da yansıtılmıştır. Düzlemsel dalga kılavuzunun bant diyagramı Şekil 4.3(b)'de verilmiştir. Şekil 4.3(c)'de de yavaş ışık yapısının bant diyagramı verilmiştir. Bu bant diyagramının düz bölgesi sabit grup indis özelliği göstermektedir. Bu bölgede grup indis yaklaşık 1200 olarak bulunmuştur. Bu bandın frekans aralığında düzlemsel dalga kılavuzunun grup hızı 3.58'dir. Bu iki yapı arasında ışığı verimli bir şekilde iletebilecek bir eşleyici elde edilmeye çalışılacaktır.

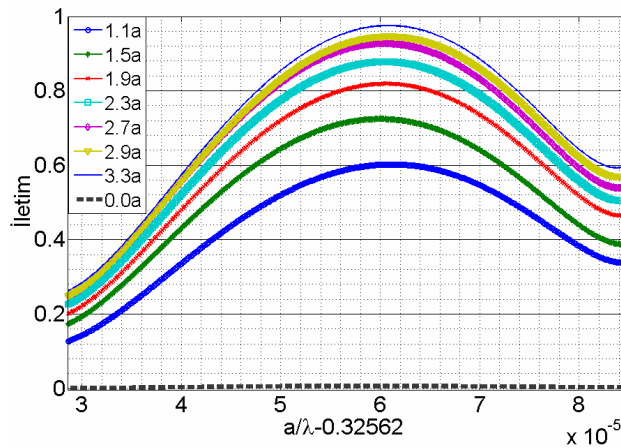


Şekil 4.3. (a) Eşleyici tasarımının genel görünümü. Eşleyicinin uzunluğu ve ok konfigürasyonunun uzunluğu sırasıyla L_b ve L_a ile gösterilmektedir. Ok kısmının ucuyla büyütülmüş silindirin x yönündeki uzaklığı t ile gösterilmiştir. Dielektrik dalga kılavuzunun kalınlığı W_b 'dir. (b) Düzlemsel dalga kılavuzunun dispersiyon diyagramı (c) Yavaş ışığın dispersiyon diyagramı.

Tasarlanan farklı parametrelere sahip eşleyicilerin iletim katsayılarını SFZD simülasyonu ile elde ettik. Hesap alanının çözünürlüğü 20'dir ($\Delta x = \Delta y = a/20$). Hesap alanının sınırları geri yansımaları engellemek için tam uyumlu katmanlarla

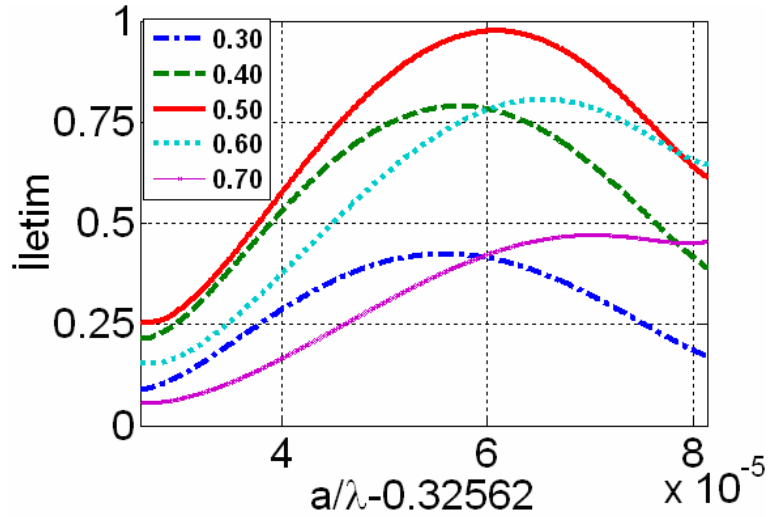
kaplanmıştır. Yapıda polarizasyon yavaş ışık dalga kılavuzunun desteklediği mod olan TM'dir, yani elektrik alan kristal düzlemine diktir. Yapı içerisindeki salınımlardan kaynaklanan atım sayısının artması ve bu atımların verebileceği yüksek iletim değerlerinden sakınılmıştır. Sadece yapıdan çıkan ilk atımdan iletim ölçülmüştür.

İlk olarak ok konfigurasyonun x-yönündeki uzunluğu olan L_a değeri değiştirilerek sivrilerle geçiş mekanizmasının iletimi en iyilenmiştir. $t = 0.5a$ değeri sabit alınmış, L_a değeri $1.1a$ 'dan $4.7a$ 'ya kadar taramıştır. Çeşitli L_a değerleri için iletim spektrumu Şekil 4.4'de verilmiştir. Şekil 4.4'deki maksimum iletim katsayıları L_a değerinin artan bir fonksiyonudur. L_a değeri $2.7a$ 'yı bulduğunda maksimum iletim katsayısı %90'ı geçmektedir. Bu değer $L_a = 3.3a$ durumunda en yüksek değeri olan %97'e ulaşır. $L_a > 3.3a$ durumları grafikte verilmemiştir. Özetle, bu maksimum değer salınımlı bir karakter göstermektedir. $L_a > 3.3a$ durumlarının maksimum değerleri %89'un üstünde kalmaktadır. Şekil 4.4'deki L_a 'nın farklı değerleri için iletim katsayıları ok konfigurasyonu ile olamayan durumla $L_a = 0a$ durumuyla karşılaştırıldığında ok konfigurasyonun önemi ortaya çıkmaktadır. Ok şeklinin dikdörtgene dönüştüğü $L_a = 0a$ değerinde iletim neredeyse sıfırdır (kesikli siyah çizgi). Bu noktada bir önemli hususa dikkat çekmek isteriz. Bu çalışmanın bütününde beyan ettiğimiz iletim değerleri iki taraflı iletim değeridir. Yani hem giriş hem çıkış birlikte eniyelenmiş, giriş-çıkış sisteminin bütünün performansı elde edilmiştir.



Şekil 4.4. $1.1a$ ile $3.3a$ arasında değişen farklı L_a değerleri için iletim spektrumu. t değeri $0.5a$ 'ya sabitlenmiştir. İletim en fazla $L_a = 3.3a$ durumunda elde edilmiştir.

İkinci basamakta, ok konfigürasyonunun tepe noktasının bulunduğu yeri gösteren t parametresinin yapıdaki etkisini inceledik. Birinci basamağın en iyi durumu olan $L_a = 3.3a$ durumunu ele alıp t parametresini $0.3a$ 'dan $0.7a$ 'ya kadar taradık. Bu analizin sonuçları Şekil 4.5'de gösterilmiştir. Bu grafiğe göre t parametresinin iletimi en iyilediği değer birinci analizde sabit aldığımız $0.5a$ değeridir. Bu t parametresi önemlidir, zira bu değer yanlış seçilirse maksimum iletim %45'e iner. Doğru seçildiğinde ise bu değer yaklaşık %97'dir.

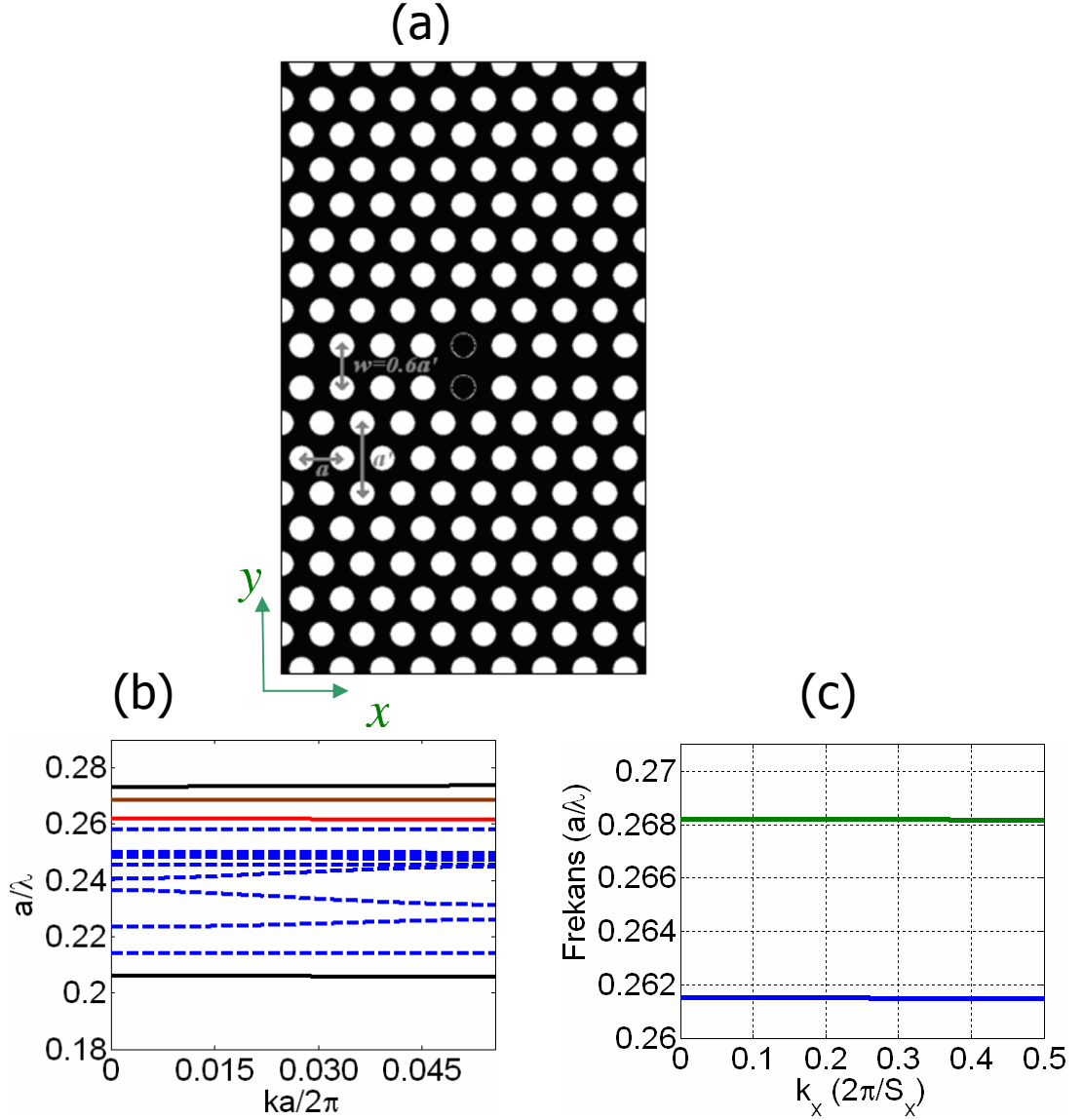


Şekil 4.5. t değerine göre iletim optimizasyonu. t değeri $0.3a$ 'dan $0.7a$ 'ya kadar taranmıştır. En iyi iletimi veren değer $t = 0.5a$ 'dır.

4.1.2. Üçgen örgülü yavaş ışık yapısı

Bu kısımda benzer bir eşleme konfigürasyonunu üçgen örgülü fotonik kristal yapısına uygulayacağız. Bu yapıyı bir önceki çalışmamızdan aldık ve farklı bir açıdan inceledik. Yapının özelliklerini tekrar etmek gerekirse; yapımız dielektrik arka plan üzerinde üçgen örgü düzenine uygun olarak yerleştirilen $0.3a$ yarıçaplı deliklerden oluşmaktadır. Bu deliklerin bazıları doldurularak dalga kılavuzu elde edilmiştir. Daha sonra yapıdaki bütün delikler merkeze doğru y -yönünde yaklaştırılarak merkezden merkeze $0.6a\sqrt{3}$ mesafe bırakılacak şekilde dalga kılavuzu daraltılmıştır. Periyodu x -yönünde $9a$ olacak şekilde komşu bazı delikler de doldurularak etkileşimli kavite yapısı elde edilmiştir. Sonunda Şekil 4.6(a)'dakine benzer bir yapı elde edilir. Bu yapı her $9a$ 'da bir kendini tekrarlamaktadır. Bu yapı frekans alanında TE polarizasyon (manyetik alan kristal eksenine diktir) düz dalga açılımıyla analiz edilmiştir. Şekil 4.6(a)'da verilen hesaplama hücrenin dispersiyon

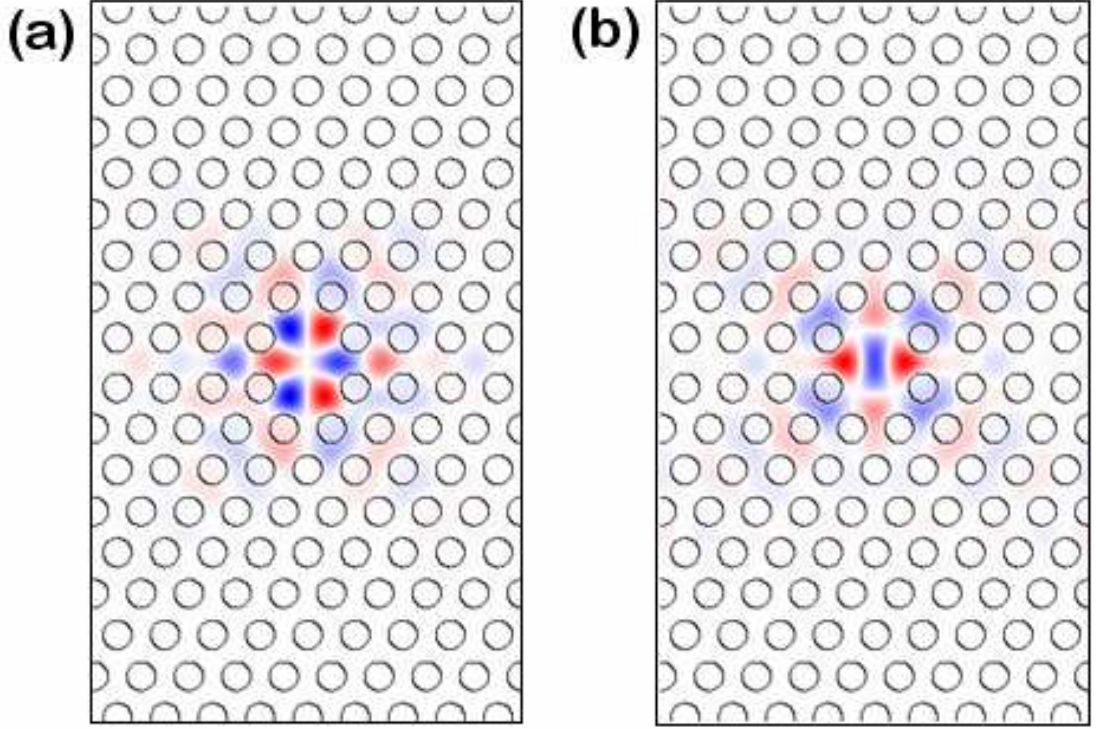
diyagramı Şekil 4.6(b)'dedir. Görüldüğü üzere dispersiyon diyagramının yasaklı bant aralığında birçok bant ortaya çıkmıştır. Fakat bu modları belli kriterlere tabi tutduğumuzda (elektrik alan dağılımı ve grup indis değeri gibi), elimizde iki dispersiyon bandı kalmaktadır. Bu modlar Şekil 4.6(c)'de gösterilmiştir.



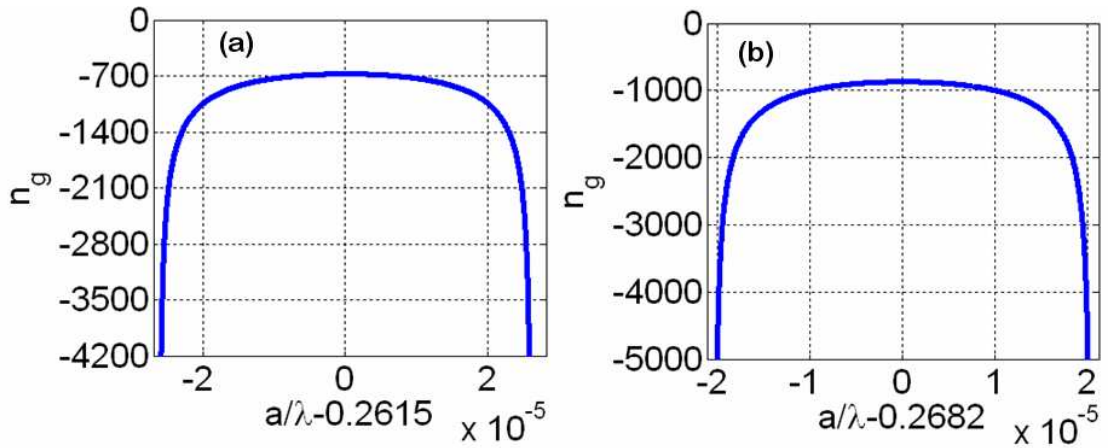
Şekil 4.6. Üçgen örgü fotonik kristal dalga kılavuzu yapısının gösterimi ve yasaklı bant aralığındaki dalga kılavuzu bantları sırasıyla (a) ve (b)'de gösterilmiştir. (c) Bu çalışmada kullanılan bantlara daha yakından bakış.

Üst ve alt bantların yapıdaki manyetik alan dağılımları Şekil 4.7(a) ve Şekil 4.7(b)'de verilmiştir. Bu çalışmanın bir önceki üçgen örgü çalışmasından farkı modların alan dağılımlarının x eksenine göre simetrik olmasıdır (bir önceki çalışmadaki modun alan dağılımı anti simetrikti). Yapının sağladığı düşük GHD'li yavaş ışık özelliğini

açıkça görmek için bantlar üzerinde nümerik türev aldık. Grup indisi $n_g = c \frac{\partial k}{\partial \omega}$ formülüyle hesaplanmıştır. Üst ve alt bantlar için grup indis spektrarı Şekil 4.8(a) ve 4.8(b)'de verilmiştir. Burada da 'U' şeklindeki eğriler ortaya çıkmaktadır. U şeklinin tabanına karşılık gelen frekanslar uyarıldığında düşük GHD'li yavaş ışık elde edilebilecektir. 'U' seklinin tabanındaki grup indislere bakılacak olursa alt bantın grup indisi yaklaşık olarak 700, üst bantın grup indisi ise yaklaşık 900 olmaktadır.

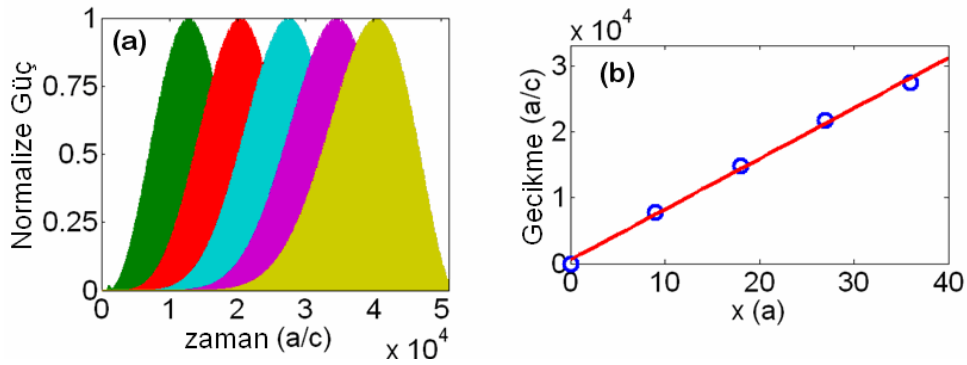


Şekil 4.7. Seçilmiş modların manyetik alan dağılımları. Alt ve üst bantın alan dağılımları sırasıyla (a) ve (b)'de verilmiştir.

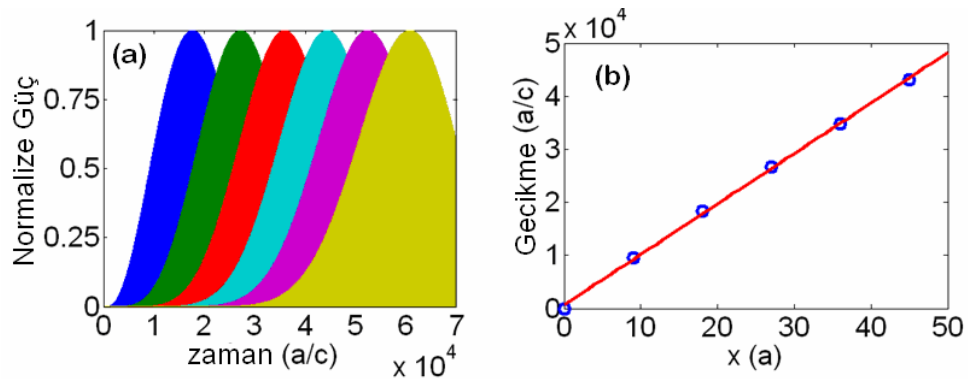


Şekil 4.8. Alt ve üst bantların grup indis spektrumları sırasıyla (a) ve (b)'de verilmiştir.

Bu yapıların frekans düzlemindeki analizinden sonra, zaman düzlemindeki analizi de yaptık. Yavaş ışık dalga kılavuzunu SFZD simülasyonu ile analiz ettik [33]. Fotonik yapıyı Gauss modüle edilmiş sinüs optik atımıyla uyardık. Dalga kılavuzu boyunca $9a$ periyoduyla koyduğumuz ölçüm noktalarıyla ışığın hareketinin farklı noktalarda zamana göre değişimini elde ediyoruz. Bu değişim alt ve üst bantlar için Şekil 4.9(a) ve Şekil 4.10(a)'da gösterilmiştir. Bu optik atımların grup haline gecikmesini maksimum noktayı gecikmesi olarak alırsak zamandaki gecikmenin ölçüm noktasına göre aldığı değerler alt ve üst bantlar için Şekil 4.9(b) ve Şekil 4.10(b)'de gösterilmiştir. Atımların şeklinin çok bozulmaması düşük GHD'nin bir göstergesidir. Zamandaki gecikmeleri doğrusal bir eğriye uydurursak, alt ve üst bantlar için gecikme 767 ve 950 bulunur ki bu değerler frekans analiziyle tutarlıdır.



Şekil 4.9. (a) Alt bant için manyetik alanın farklı ölçüm noktalarında zamana değişimi. Yapının kenarlarından gelenler ve kaviteler arasındaki salınımlardan gelen ekstra atımlar gösterilmemiştir. (b) (a)'da gösterilen atımların yavaş ışık yapısında zamana gecikmelerinin ölçüm noktalarının mesafesine göre değişimi. Noktaların uydurulduğu doğrunun eğimi grup indisi olan 767'yi vermektedir.

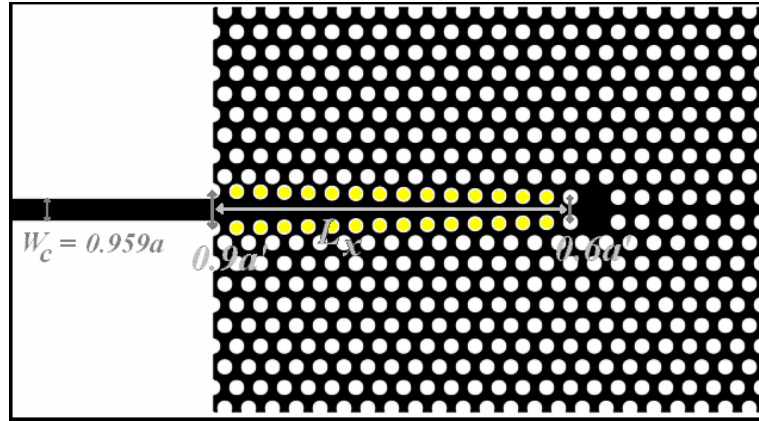


Şekil 4.10. (a) Üst bant için manyetik alanın farklı ölçüm noktalarında zamana değişimi. Yapının kenarlarından gelenler ve kaviteler arasındaki salınımlardan gelen ekstra atımlar gösterilmemiştir. (b) (a)'da gösterilen atımların yavaş ışık yapısında zamana gecikmelerinin ölçüm noktalarının mesafesine göre değişimi. Noktaların uydurulduğu doğrunun eğimi grup indisi olan 950'yi vermektedir.

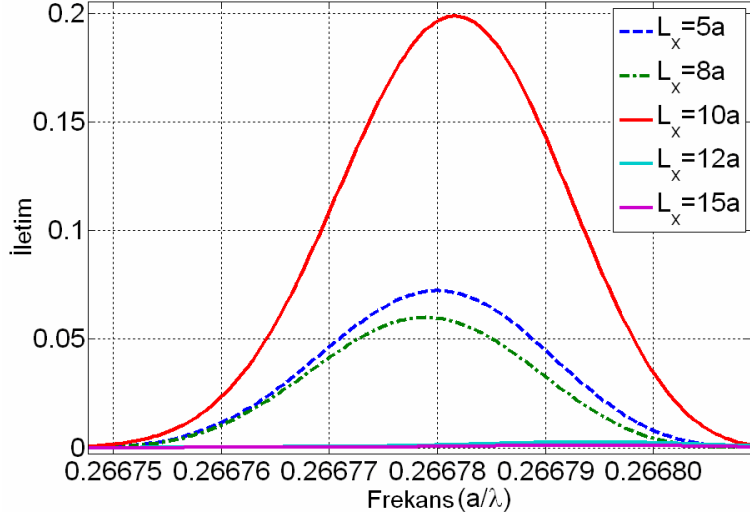
4.1.3. Üçgen örgülü yapı için eşleyici tasarımı

Bu yapının da grup indisi yüksek olduğu için yapıyı düzlemsel dalga kılavuzuyla eşleyecek bir geçiş bölgesi tasarlanmalıdır. Bir önceki analizdeki yöntemimizi biraz daha başkalaştırarak, üçgen örgülü dalga kılavuzu için böyle bir geçiş bölgesinin tasarımına uygulayacağız. Şekil 4.11’de üst bantı düzlemsel dalga kılavuzuna eşleyecek tasarımın ilk basamağı gösterilmiştir. Eşleme bölgesinin uzunluğu şekilde görüldüğü üzere L_x ’dir. Giriş-çıkış dalga kılavuzunun kalınlığı $w_c = 0.9a - 2r' \cong 0.959a$ ’dır. Bu dalga kılavuzunun grup indisi ilgili frekans aralığında yaklaşık 4.1’dir. Yani böyle bir yapıyla, grup indisi 4.1 olan ortamdaki 900 olan ortama geçiş yapacağız. Buradaki geçiş inceltme işlemi bazı deliklerin y yönünde merkezden merkeze uzaklık doğrusal değişecek şekilde yukarı aşağı kaydırılmasıyla elde edilmiştir (sarı).

Şekil 4.12 L_x ’e göre iletim değişimini göstermektedir. İletimi en iyileyen değer $L_x = 10a$ ’dır. Bu durumda maksimum iletim değeri yaklaşık %20’dir. $L_x > 10a$ durumunda iletimin azalması ışığın daralan alanda azalma eğilimine girmesindedir. Bunun sebebi dar dalga kılavuzunun modun frekansını desteklememesidir. Bu azalma bölgesi uzadıkça yansıma da artmaktadır.

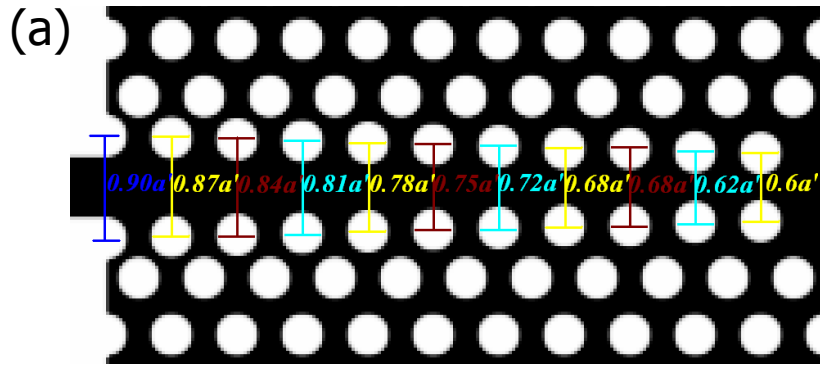


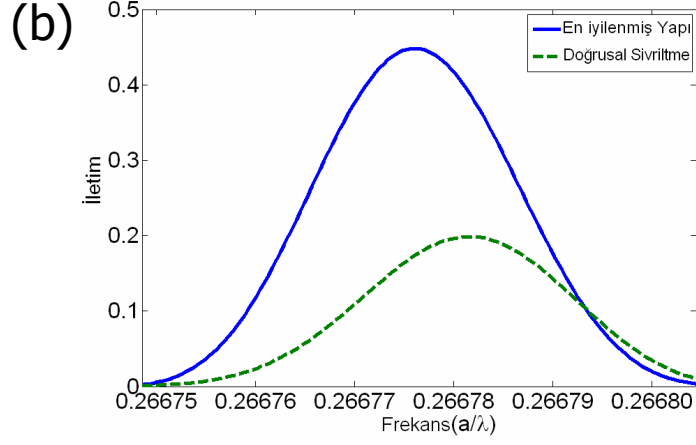
Şekil 4.11. Sivriltilmiş giriş eşleyici. Benzer bir eşleyici yavaş ışık fotonik dalga kılavuzunun sonuna da eklenmiştir. Sivriltilme uzunluğu L_x ile gösterilmiştir.



Şekil 4.12. Sivrilme uzunluğu olan L_x değerlerine göre iletim spektrumu.

Doğrusal eğimle ancak %20 verimlilik elde edebildiğimiz için, en iyilemelerle tasarıma devam ettik. Bu en iyileme dalga kılavuzunun iki tarafındaki deliklerin mesafesini ayarlamak şeklinde olmuştur. Bu işlem kavite boşluğuna yakın olan deliklerde yapılmıştır, çünkü diğer delikler için denenen optimizasyonların sonuca anlamlı etkisi gözlemlenmemiştir. Bu optimizasyonların sonucunda yaklaşık %45 maksimum iletim değeri bulunmuştur. İlgili yapı ve iletim grafiği Şekil 4.13(a) ve 4.13(b)'de verilmiştir. Bu verimlilik orta seviyededir, fakat iki farklı fotonik dalga kılavuzu arasındaki grup indis farkının yüksekliği göz önüne alındığında bu değer yüksek kabul edilebilir.



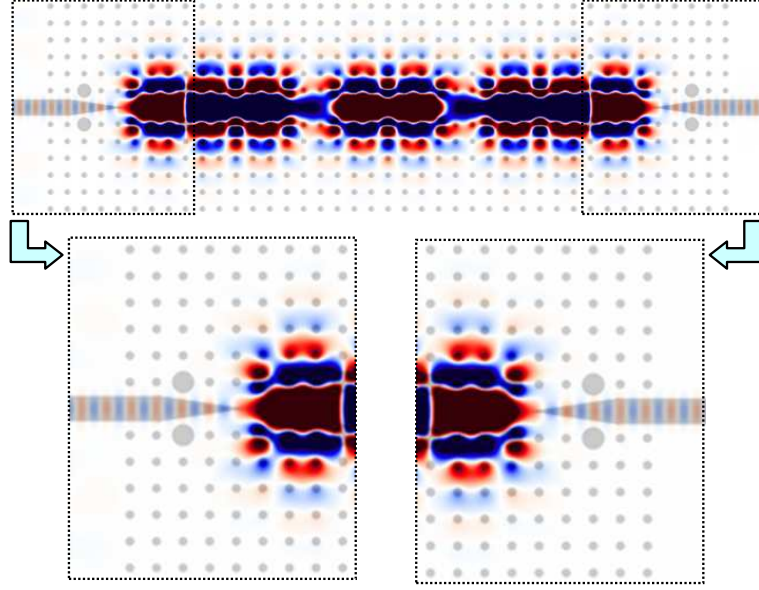


Şekil 4.13. (a) Şekilde en iyilenmiş durumun parametreleri gösterilmiştir. (b) En iyi durumla doğrusal sivrilmenin en iyi sonuç verdiği durum olan $L_x = 10a$ durumu karşılaştırılmıştır.

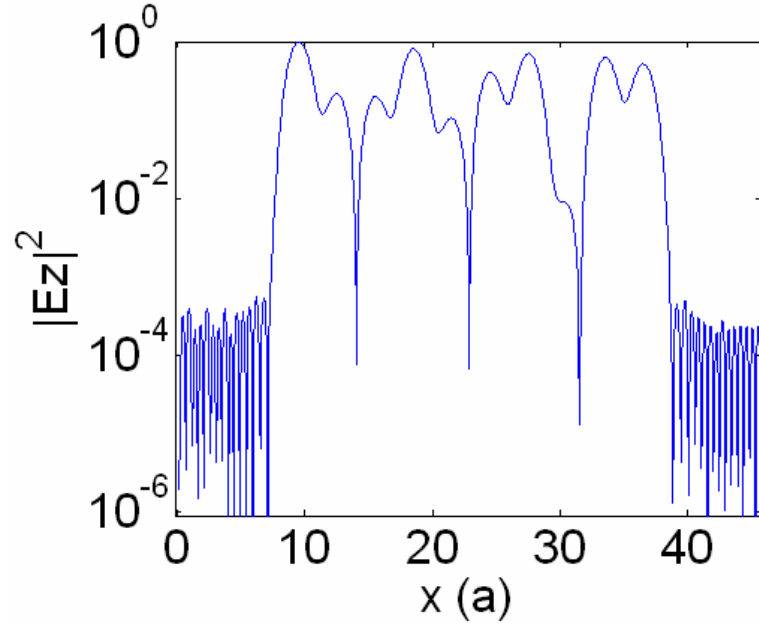
Kare örgü yapısıyla üçgen örgü yapısı arasındaki verim farkı şöyle açıklanabilir: Kare örgüde dielektrik çubuklar birbirinden kopuk yerleştirilmiştir. Üçgen örgüde ise dielektrik arka plan bağlantılıdır. Bu nedenle elektrik alan kare örgüdeki ok konfigürasyonunda daha yoğundur. Bu sebeple kenarlardan gelebilecek yansımalar üçgen örgülü yapıya göre daha azdır. Üçgen örgülü yapıda geçiş bölgesinin kristal ile etkileşimi fazla olmaktadır. Aynı zamanda dalga kılavuzunun üçgen örgülü yapıda çok dar olması ışığın içeri girişini engellemektedir

4.1.4. Yavaş ışık dalga kılavuzunun alan artırma özelliği

Yavaş ışıkla hızlı ışığın verimli eşlenmesiyle yavaş ışığın bazı özellikleri gözlemlenebilmektedir. Alan artışı özelliği bu özelliklere bir örnek olarak verilebilir. Bu özellik sayesinde doğrusal olmayan optik süreçler daha verimli hale getirilebilir [39]. Bu özelliği göstermek için optimize parametreler ve en iyi iletimi sağlayan frekans değeri kullanılarak devamlı dalga kaynağıyla ilgili sistemleri uyaracağız. Kare örgü tabanlı yavaş ışık dalga kılavuzunu bu koşullarda uyardığımızda ortaya çıkan elektrik alan dağılımı Şekil 4.14'de gösterilmektedir. Renk ölçeği giriş ve çıkıştaki sinyallerin görülebilmesi için azaltılmıştır. Yapının içindeki renklerin doyuma ulaşması alan artışı etkisini göstermektedir.



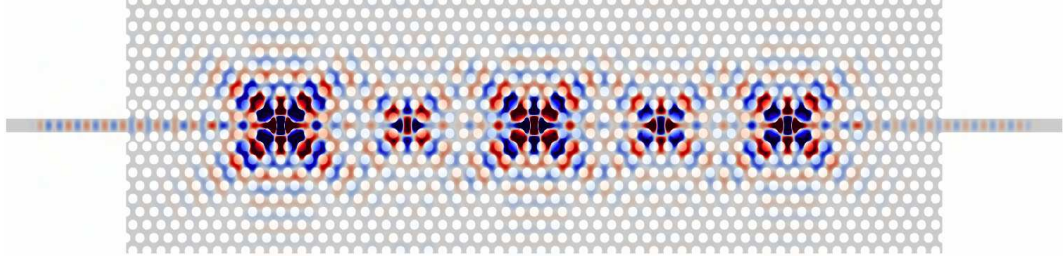
Şekil 4.14. Devamlı kaynak (tek frekans) uyarımında elektrik alan dağılımı. Uyarı frekansı iletimin en yüksek olduğu değere ayarlanmıştır. Renk ölçeği giriş ve çıkıştaki dalga hareketini göstermek için ölçeklenmiştir, Bu nedenle yavaş ışık dalga kılavuzundaki renkler doyuma ulaşmıştır. Kırmızı ve mavi renkler elektrik alanın pozitif ve negatif olduğu durumları göstermektedir.



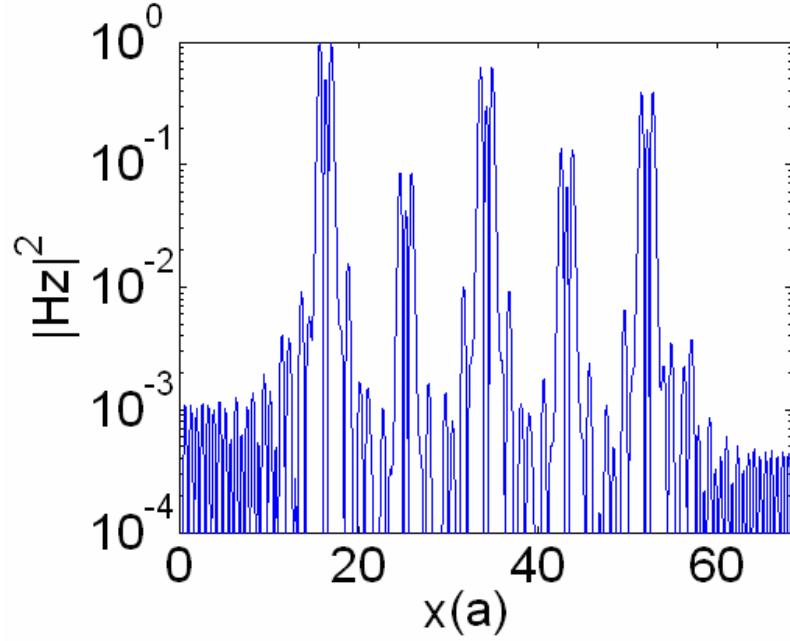
Şekil 4.15. Elektrik alanın karesinin x eksenini boyunca alınan kesiti üzerindeki değerleri (dalga kılavuzunun merkez çizgisi).

Bu durumun sayısal olarak ifade edilmesi için x eksenini boyunca bir kesit alınarak bu kesitteki elektrik alanın karesi Şekil 4.15'te çizdirildi. Görüldüğü üzere yavaş ışık ile hızlı ışığın alanlarının kareleri oranı 2×10^3 'den fazladır. Giren ve çıkan ışığın arasındaki oranın bire yakın olması tasarlanan eşleme yapısının verimli olduğunu da göstermektedir. Benzer simülasyon üçgen örgülü fotonik kristal için de

uygulandığında manyetik alanın dağılımı Şekil 4.16'deki gibi olur. Kesit alma işlemi yapıldığında, Şekil 4.17'den de görülebileceği üzere alan kareleri arasındaki oran 10^3 'den fazladır. Bu kez çıkan ve giren atımlar arasındaki oran daha düşüktür bunun sebebi bu yapıda iletimin daha az olmasıdır.



Şekil 4.16. Devamlı kaynak (tek frekans) uyarımında manyetik alan dağılımı. Uyarı frekansı iletimin en yüksek olduğu değere ayarlanmıştır. Renk ölçeği giriş ve çıkıştaki dalga hareketini göstermek için ölçeklenmiştir, bu nedenle yavaş ışık dalga kılavuzundaki renkler doyuma ulaşmıştır. Kırmızı ve mavi renkler manyetik alanın pozitif ve negatif olduğu durumları göstermektedir.



Şekil 4.17 Manyetik alanın karesinin x eksenine boyunca alınan kesiti üzerindeki değerleri (dalga kılavuzunun merkez çizgisi).

Kare örgülü yapıyı haberleşme dalga boyu olan $\lambda = 1550nm$ 'ye ayarlamak için yapıyı ölçeklersek, örgü katsayısı a 505 nm ve geçiş bölgesinin uzunluğu $2.5 \mu m$ olur. Bu uzunluğa bakarak eşleyicinin küçük yer kaplama özelliğini anlamış oluruz. Aynı eşleyicinin çıkışta da etkili olması yapının başka bir kazanımıdır. Aynı özellik üçgen örgülü dalga kılavuzu için de geçerlidir. Haberleşme dalga boyu olan $\lambda = 1550nm$ 'ye bu yapıyı uyarlırsak örgü katsayısı $a=416$ nm ve geçiş bölgesinin

uzunluğu $L_x = 10a = 4.16 \mu m$ olur. Bu yapı da yeterince küçük bir yapı olarak kabul edilebilir.

BÖLÜM 5

5. BİTİRİŞ

Bu tez kapsamındaki çalışmalar ışığı fotonik kristal dalga kılavuzları içerisinde yavaşlatmayı hedeflemiştir. Anlatılan bu çalışmaların ardındaki en temel mantık ışık, madde etkileşimini artırmaktır. Fakat ışığı yavaşlatmak tek başına yeterli bir hedef değildir. Işığın yeterince geniş bir bant aralığında, yapı içerisinde dağılmaksızın (ki bu dağılma mekanizmasının en önemli etmeni olan grup hızı dispersiyonudur) hareket edebilmesini sağlamak da çok önemlidir. Bu noktada çalışılan yapılara ikinci bir periyodikliğin eklenmesi ve neticesinde kavite etkisinin ortaya çıkması çok önemli bir işlev görmüştür. Kavite dalga kılavuzu etkileşimi bize ‘U’-şeklinde grup indis spektrasını sağlamıştır. Bu ‘U’-şeklindeki eğrilerin tabanında çalışılabildiği zaman düşük GHD’li geniş bantlı yavaş ışık elde edilebileceğini göstermiş olduk. En sonunda da hızlı ışıktan yavaş ışığa, yavaş ışıktan hızlı ışığa geçişteki geri yansımalar ve bu yansımaların en aza indirilmesi konusu tartışılmıştır. Böylece ışığın ideal ortamlarda yavaşlatılması probleminin bir ölçüde çözüme ulaştığı sonucuna varıyoruz. Bundan sonraki yavaş ışık çalışmalarının çözmesi gereken problem yavaş ışığın üç boyutlu yapılarda elde edilmesi, ki literatürde bu konuda bir çok çalışma hali hazırda vardır, ve bu yapıların yapısal düzensizliklerden en az etkilenmesini sağlamaktır. Bu şekilde yavaş ışığın ana kullanım alanları olan optik tamponlar, optik transistörler ve doğrusal olmayan optik olaylarda daha sıkça kullanılabilecektir.

KAYNAKLAR

- [1] J. W. S. Rayleigh, "On the remarkable phenomenon of crystalline reflexion described by Prof. Stokes", *Phil. Mag* **26**: 256–265 (1888).
- [2] F. Bloch, "Über die Quantenmechanik der Electronen in Kristallgittern," *Z. Physik* **52** 555-600 (1928).
- [3] E. Yablonovitch, "Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics." *Phys. Rev. Lett.* **58** 2059–2062 (1987).
- [4] J. D. Joannopoulos, S. G. Johnson, R. D. Meade ve J. N. Winn, *Photonic Crystals: Molding the Flow of Light* (Princeton University Press, Princeton, 2008).
- [5] M. F. Yanik, S. Fan, M. Soljačić, ve J. D. Joannopoulos, "All-optical transistor action with bistable switching in a photonic crystal cross-waveguide geometry," *Opt. Lett.* **28**, 2506-2508 (2003).
- [6] J. Jágerská, H. Zhang, Z. Diao, N. Le Thomas, ve R. Houdré, "Refractive index sensing with an air-slot photonic crystal nanocavity," *Opt. Lett.* **35**, 2523-2525 (2010).
- [7] S. Fan, P. Villeneuve, J. Joannopoulos, ve H. Haus, "Channel drop filters in photonic crystals," *Opt. Express* **3**, 4-11 (1998).
- [8] R. S. Tucker, P-C. Ku, ve C. J. Chang-Hasnain, "Slow-light optical buffers-capabilities and fundamental limitations," *J. Lightwave Technol.* **23**, 4046-4066 (2005).
- [9] J. B. Khurgin, "Slow light in various media: a tutorial," *Adv. Opt. Photon.* **2**, 287-318 (2010).
- [10] T. Baba, "Slow light in photonic crystals," *Nat. Photonics* **2**, 465-473 (2008).
- [11] T.F. Krauss, "Why do we need slow light?" *Nat. Photonics* **2**, 448-449 (2008).
- [12] T. F. Krauss, "Slow light in photonic crystal waveguides," *J. Phys. D. Appl. Phys.* **40**, 2666-2670 (2007).
- [13] D. Mori ve T. Baba, "Dispersion-controlled optical group delay device by chirped photonic crystal waveguides," *Appl. Phys. Lett.* **85**, 1101-1103 (2004).
- [14] S. Kubo, D. Mori, ve T. Baba, "Low-group-velocity and low-dispersion slow light in photonic crystal waveguides," *Opt. Lett.* **32**, 2981-2983 (2007).
- [15] Y. Petrov ve M. Eich, "Zero dispersion at small group velocities in photonic crystal waveguides," *Appl. Phys. Lett.* **85**, 4866-4868 (2004).
- [16] L. H. Frandsen, A. V. Lavrinenko, J. Fage-Pedersen, ve P. I. Borel, "Photonic crystal waveguides with semi-slow light and tailored dispersion properties," *Opt. Express* **14**, 9444-9450 (2006).
- [17] J. Li, T. P. White, L. O'Faolain, A. Gomez-Iglesias, ve T. F. Krauss, "Systematic design of flat band slow light in photonic crystal waveguides," *Opt. Express* **16**, 6227-6232 (2008).

- [18] M. D. Settle, R. J. P. Engelen, M. Salib, A. Michaeli, L. Kuipers, ve T. F. Krauss, "Flatband slow light in photonic crystals featuring spatial pulse compression and terahertz bandwidth," *Opt. Express* **15**, 219-226 (2007).
- [19] T. Baba, T. Kawaaski, H. Sasaki, J. Adachi, ve D. Mori, "Large delay-bandwidth product and tuning of slow light pulse in photonic crystal coupled waveguide," *Opt. Express* **16**, 9245-9253 (2008).
- [20] F. Wang, J. Ma, ve C. Jiang, "Dispersionless slow wave in Novel 2-D photonic crystal line defect waveguides," *J. Lightwave Technol.* **26**, 1381-1386 (2008).
- [21] H. Kurt, K. Üstün ve L. Ayas, "Study of different spectral regions and delay bandwidth relation in slow light photonic crystal waveguides," *Opt. Express*, **18**, 26965-26977 (2010).
- [22] A. Mekis ve J. D. Joannopoulos, "Tapered Couplers for Efficient Interfacing Between Dielectric and Photonic Crystal Waveguides," *J. Lightwave Technol.*, **19**, 861-865 (2001).
- [23] Y. Xu, R. K. Lee, ve A. Yariv, "Adiabatic coupling between conventional dielectric waveguides and waveguides with discrete translational symmetry," *Opt. Lett.*, **25**, 755-757 (2000).
- [24] S. G. Johnson, P. Bienstman, M. A. Skorobogatiy, M. Ibanescu, E. Lidorikis, ve J. D. Joannopoulos, "Adiabatic theorem and continuous coupled-mode theory for efficient taper transitions in photonic crystals," *Physical Review E*, **66**, 066608 (2002).
- [25] Talneau, Ph. Lalanne, M. Agio, ve C. M. Soukoulis, "Low-reflection photonic-crystal taper for efficient coupling between guide sections of arbitrary widths," *Opt. Lett.* **27**, 1522-1524 (2002).
- [26] P. Pottier, M. Gnan ve R. M. De La Rue, "Efficient coupling into slow-light photonic crystal channel guides using photonic crystal tapers," *Opt. Express*, **15**, 6569-6575 (2007).
- [27] J. P. Hugonin, P. Lalanne, T. P. White, ve T. F. Krauss, "Coupling into slow-mode photonic crystal waveguides," *Opt. Lett.*, **32**, 2638-2640 (2007).
- [28] H. Kurt ve D. S. Citrin, "A novel optical coupler design with graded-index photonic crystals," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **19**, 1532-1534 (2007).
- [29] O. Cakmak, E. Colak, H. Caglayan, H. Kurt, ve E. Ozbay, "High efficiency of graded index photonic crystal as an input coupler," *J. Appl. Phys.*, **105**, 103708 (1-5), (2009).
- [30] Martijn de Sterke, K. B. Dossou, T. P. White, L. C. Botten, ve R. C. McPhedran, "Efficient coupling into slow light photonic crystal waveguide without transition region: role of evanescent modes," *Opt. Express*, **17**, 17338-17343 (2009).
- [31] T. P. White, L. C. Botten, C. Martijn de Sterke, K. B. Dossou, ve R. C. McPhedran, "Efficient slow-light coupling in a photonic crystal waveguide without transition region," *Opt. Lett.* , **33**, 2644-2646 (2008).

- [32] S. Johnson ve J. Joannopoulos, “Block-iterative frequency-domain methods for Maxwell's equations in a planewave basis,” *Opt. Express* **8**, 173-190 (2001).
- [33] Ardavan F. Oskooi, David Roundy, Mihai Ibanescu, Peter Bermel, J. D. Joannopoulos, ve Steven G. Johnson, “MEEP: A flexible free-software package for electromagnetic simulations by the FDTD method,” *Computer Physics Communications* **181**, 687–702 (2010).
- [34] A. Petrov, M. Krause, ve M. Eich, “Backscattering and disorder limits in slow light photonic crystal waveguides,” *Opt. Express* **17**, 8676-8684 (2009).
- [35] D. O'Brien, M. D. Settle, T. Karle, A. Michaeli, M. Salib, ve T. F. Krauss, “Coupled photonic crystal heterostructure nanocavities,” *Opt. Express* **15**, 1228-1233 (2007).
- [36] T. Tanabe, M. Notomi, E. Kuramochi, ve H. Taniyama, “Large pulse delay and small group velocity achieved using ultrahigh-Q photonic crystal nanocavities,” *Opt. Express* **15**, 7826-7839 (2007).
- [37] Yariv, Y. Xu, R. K. Lee, ve A. Scherer, “Coupled-resonator optical waveguide: a proposal and analysis,” *Opt. Lett.* **24**, 711-713 (1999).
- [38] K. Üstün ve H. Kurt, “Ultra slow light achievement in photonic crystals by merging coupled cavities with waveguides,” *Opt. Express*, **18**, 21155-21161 (2010).
- [39] M. Soljacic ve J. D. Joannopoulos, “Enhancement of nonlinear effects using photonic crystals,” *Nat. Mater.* **3**, pp. 211–219 (2004).

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : ÜSTÜN, Kadir
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 16.11.1986 Ankara
Medeni hali : Bekar
Telefon : 0 (312) 292 40 00
Faks : 0 (312) 292 40 91
e-mail : k.ustun@etu.edu.tr

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Lisans	Orta Doğu Teknik Üniversitesi/ Elektrik ve Elektronik Mühendisliği	2008

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2009-2011	TOBB ETÜ	Araştırma Görevlisi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

- Kadir Üstün, Hamza Kurt, “Ultra slow light achievement in photonic crystals by merging coupled cavities with waveguides,” *Optics Express* vol. 18, 21155-21161 (2010).
- Hamza Kurt, Kadir Üstün, Lokman Ayas, “Study of different spectral regions and delay bandwidth relation in slow light photonic crystal waveguides,” *Optics Express* vol. 18, 26965-26977 (2010).
- Hamza Kurt, İbrahim H. Giden, Kadir Üstün, “Highly efficient and broadband light transmission in 90° nanophotonic wire waveguide bends,” *J. Opt. Soc. Am. B* vol. 28, 495-501 (2011).