T.C.
ERCİYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FOTONİK KRİSTALLERDE DALGA YAYILIMININ BİLGİSAYAR DESTEKLİ İNCELENMESİ

Tezi Hazırlayan
Yavuz ALMALI

Tezi Yöneten
Yrd. Doç. Dr. Ömer Galip SARAÇOĞLU

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi

Bu çalışma Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından FBT-06-27 kodlu proje ile desteklenmiştir

Şubat 2010
KAYSERİ

Yrd. Doç. Dr. Ömer Galip SARAÇOĞLU danışmanlığında **Yavuz ALMALI** tarafından hazırlanan **"Fotonik Kristallerde Dalga Yayılımının Bilgisayar Destekli İncelenmesi"** adlı bu çalışma, jürimiz tarafından Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında **Yüksek Lisans** tezi olarak kabul edilmiştir.

18/02/2010

JÜRİ:

Başkan: Doç. Dr. Celal YILDIZ

Üye : Doç. Dr. İbrahim DEVELİ

Üye : Yrd. Doç. Dr. Ömer Galip SARAÇOĞLU

ONAY:

Bu tezin kabulü, Enstitü Yönetim Kurulunun 19/02/2010 tarih ve 2010/09-03 sayılı kararı ile onaylanmıştır.

19/02/2010

Prof. Dr. Nusret AYYILDIZ
Enstitü Müdürü

TEŞEKKÜR

"Fotonik Kristallerde Dalga Yayılımının Bilgisayar Destekli İncelenmesi" konulu tez çalışmasının seçiminde, yürütülmesinde, sonuçlandırılmasında ve sonuçlarının değerlendirilmesinde maddi ve manevi destek ve yardımlarını esirgemeyen değerli hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Ömer Galip SARAÇOĞLU'na teşekkür ederim.

Hayatım boyunca her zaman yanımda olup beni bu günlere getiren elleri öpülesi babam ve annem Ali – Müşerref ALMALI'ya teşekkür ederim.

Ayrıca tez çalışmalarım sırasında bana destek olup yardımlarını esirgemeyen eşim Fatıma ALMALI'ya ve neşe kaynağım, küçük prensesim Gülnihal'e teşekkür ederim.

FOTONİK KRİSTALLERDE DALGA YAYILIMININ BİLGİSAYAR DESTEKLİ İNCELENMESİ

Yavuz ALMALI
Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi, Şubat 2010
Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Ömer Galip SARAÇOĞLU

ÖZET

Geride bıraktığımız son onbeş yıl içerisinde optik araştırmalarında fotonik kristal ile ilgili konular literatürde geniş bir şekilde yer almıştır. Konunun sahip olduğu yoğun ilgi fotonik kristallerin önümüzdeki yıllarda da çalışma konusu olacağını göstermektedir. Aynı zamanda fotonik kristal uygulamalarının geleneksel eşdeğerlerine göre birçok avantaja sahip olması sonucu fotonik kristal uygulama alanlarının yaygınlaşacağı öngörülebilir.

Fotonik kristaller farklı dielektrik sabitine sahip ortamların, bir yapı oluşturacak şekilde periyodik dizilimidir. Gelişen teknolojiler ile fotonik kristaller birçok uygulama alanı bulmaktadır. Bu uygulamalardan bazıları optik filtreler, lazerler, dalga kılavuzları, tümleşik optik devreler, yüksek Q faktörüne sahip oyuklar, ekleme çıkarma filtreleri ve sensörlerdir.

Fotonik kristaller literatürde farklı analitik yöntemlerle incelenmiştir: Düzlem Dalga Açılımı (Plane Wave Expansion), Zamanda Sonlu Farklar Yöntemi (Finite-difference Time-domain) ve Sonlu Elemanlar Yöntemi (Finite Element Method,FEM). Fotonik kristallerin karmaşık sınır koşulları, düzgün olmayan (dairesel) geometrileri, zamana bağımlılık ve doğrusal olmayan davranışları yönünden diğer yöntemlere göre daha başarılı olan Sonlu Elemanlar Yöntemi, bu çalışmada tercih edilmiştir. Benzetimler FEMLAB 3 Multiphysics Modelling adlı program ile yapılmıştır.

Fotonik kristalin ışığı kontrol etmedeki yeteneği özellikle dalga kılavuzu ve kuplör uygulamalarında daha fazla değer kazanmaktadır. Fotonik kristal dalga kılavuzları, ışığın kılavuzlanmasında geleneksel dalga kılavuzları ile elde edilemeyecek keskin

dönüşlere imkan sağlamaktadır. Fotonik kristallerin bu özelliğinden yararlanarak fotonik kristal kuplörler tasarlanabilir. Bu tez çalışmasında fotonik kristal dalga kılavuzu ve fotonik kristal kuplörde dalga yayılımı, değişik kuplör tasarımları için incelenmiş ve dalga yayılımını etkileyen faktörler ortaya konmuştur. Fotonik kristalin örgü yapısının, doluluk oranının ve genel geometrisinin kuplaj katsayısına etkisi incelenmiştir. Buna göre, fotonik kristal kuplörlerde kuplaj katsayısının belirlenmesine yönelik sonuçlar verilmiştir.

Anahtar Kelimeler: fotonik kristal, FEM, dalga kılavuzu, kuplör

A STUDY OF COMPUTER AIDED WAVE PROPAGATION IN PHOTONIC CRYSTALS

Yavuz ALMALI
Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences
M.Sc. Thesis, February 2010
Thesis Supervisor: Assist. Prof. Ömer Galip SARAÇOĞLU

ABSTRACT

The subjects about photonic crystals in optical researches have been confronted frequently in the last fifteen years that we have left behind. The intensive interest on this subject shows that the photonic crystals will be one of the studying subjects in the future years too. As the photonic crystal applications have many advantages against its conventional equevalents, it can be foreseen that the photonic crystal applications areas will become widespread.

The photonic crystals are the periodic permutation of media having different dielectric constant that constitute a structure. The photonic crystals have found many applications with the developing technology. Some of these applications are optical filters, lasers, waveguides, integrated optic circuits and cavities having high Q factor, add-drop filters and sensors.

The ability of the photonic crystal on controlling of light gains much more importance especially in wave guides and coupler applications. The photonic crystals have been examined with different analytical methods in the literature: The Plane Wave Expansion, Finite-Difference Time-Domain, and Finite Element Method. The Finite Element Method, FEM has been preferred as main method for this study because of the complex boundary conditions, non-uniform (circular) geometries, time dependence and non linear behaviors of photonic crystals. The simulations have been made with "FEMLAB 3 Multi-physics modelling" program. The effects ofpattern structure, atom filling fraction and geometry of photonic crystals on coupling coefficient have been examined. As a result, determination of coupling coefficient in the photonic crystal couplers has been concluded.

Keywords: Photonic crystal, FEM, Coupler,Waveguides

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY……...……i

TEŞEKKÜR……...…...……ii

ÖZET……..…….iii

ABSTRACT…….…….v

ŞEKİLLER LİSTESİ……..viii

1. BÖLÜM

GİRİŞ…….……1

1.1. Fotonik Kristallerin Tarihçesi……..……..1

1.2. Fotonik Kristal ve Katı Kristal Arasındaki Fark ve Benzerlikler……..…2

1.3. Fotonik Kristallerin Uygulama Alanları……3

2. BÖLÜM

FOTONİK KRİSTALLERDE DALGA YAYILIMI…….……...6

2.1. Fotonik Kristal Yapı…….……..……6

2.2. Periyodik Ortam…….…….……..……7

2.3. Fotonik Kristal için Dalga Eşitlikleri……...10

2.4. Eşitliklerin Ölçeklenebilme Özelliği……...……12

2.5. Fotonik Bant Yapısı……..…….……..13

2.6. Fotonik Bant Aralıklarının Eldesi…….…….……..15

3. BÖLÜM

FOTONİK KRİSTALLERİN MODELLENMESİ VE BENZETİMİ……...…..17

3.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM)……17

3.2. FEM ile Fotonik Dalga Kılavuzlarının İncelenmesi …….…..18

3.2.1. Fotonik Kristal Dalga Kılavuzunun Modellenmesi..……...19

3.2.2. Fotonik Kristal Dalga Kılavuzunun Dalga Yayılımını Etkileyen Etmenler……23

3.3. FEM ile Fotonik Kuplörlerin İncelenmesi ……..26

3.3.1. Simetrik Fotonik Kristal Kuplörün Modellenmesi……..26

3.3.2. Doluluk Oranının Simetrik Kuplöre Etkisi……..30

3.3.3. Asimetrik Fotonik Kristal Kuplör Modellenmesi ……...31

3.3.3.1. Model-1……..……31

3.3.3.2. Model-2……..……33

3.3.4. Simetrik N Çıkışa Sahip Fotonik Kristal Kuplör Modellenmesi…….35

3.3.5 Asimetrik N Çıkışa Sahip Fotonik Kristal Kuplör Modellenmesi……...37

4. BÖLÜM

TARTIŞMA VE SONUÇ…….....39

KAYNAKLAR…….…...42

ÖZGEÇMİŞ…….……45

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Birim hücrenin yapısı……7

Şekil 2.2. Tek boyutlu, iki boyutlu ve üç boyutlu periyodiklik …..…….…....8

Şekil 2.3. Kare örgü dizilimine sahip kristal yapı ve 1.Brillouin bölgesi……..9

Şekil 2.4. Üçgen örgü dizilimine sahip kristal yapı ve 1.Brillouin bölgesi……..10

Şekil 2.5. Düzenli dielektrik çubuklardan oluşan fotonik kristaller…...…….……16

Şekil 3.1. Sonlu Elemanlar Yönteminin alanı üçgen ağlara bölmesi.…...……..18

Şekil 3.2. Birim hücresi d çaplı dairelerden oluşmuş kare örgü.…….……19

Şekil 3.3. Fotonik kristal örgü yapı içerisinden çıkartılan bölgeler……...…….19

Şekil 3.4. λ=913nm olan dalganın kıvrımsız FK içerisinde yayılımı...…….21

Şekil 3.5. λ=913nm olan dalganın kıvrımlı FK içerisinde yayılımı...…….22

Şekil 3.6. λ=875nm olan dalganın FK içerisinde yayılımı……...22

Şekil 3.7. λ=975nm olan dalganın FK içerisinde yayılımı……...23

Şekil 3.8. λ=975nm olan dalganın doluluk oranı 0,27 olan FK içerisinde yayılımı…….……...24

Şekil 3.9. Üçgen örgü yapısındaki FK içerisinde dalga boyu λ=975nm olan dalganın dalga yayılımı……...……25

Şekil 3.10. Birim hücresi d çaplı dairelerden oluşmuş üçgen örgü ……..……27

Şekil 3.11. İki eş kola sahip kuplör yapı……27

Şekil 3.12. Kuplör içerisinde elektrik alan şiddeti…….……29

Şekil 3.13. Kuplör kollarında dalganın elektrik alan şiddeti……...…….……29

Şekil 3.14. Kuplör üzerinde güç akışı……..……...30

Şekil 3.15. Doluluk oranı 0,3 olan kuplör içerisinde elektrik alan şiddeti….……31

Şekil 3.16. Fotonik kristal ile oluşturmuş asimetrik kuplörde elektrik alan şiddeti...32

Şekil 3.17. Kuplör kollarında dalganın elektrik alan şiddeti……..32

Şekil 3.18. Asimetrik kuplör üzerinde güç akışı…...…….……31

Şekil 3.19. Fotonik kristal ile oluşturmuş asimetrik kuplörde elektrik alan şiddeti...34

Şekil 3.20. Kuplör kollarında ilerleyen dalganın elektrik alan şiddeti……...34

Şekil 3.21. Asimetrik kuplör üzerinde güç akışı……35

Şekil 3.22. Simetrik kuplörde dalga yayılımı (N=3)……..36

Şekil 3.23. Simetrik kuplörün çıkış kollarındaki elektrik alan şiddetleri……...36

Şekil 3.24. Asimetrik Kuplörde dalga yayılımı (N=3)……...37

Şekil 3.25 Asimetrik kuplörün çıkış kollarındaki elektrik alan şiddetleri…….37

1. BÖLÜM

GİRİŞ

1.1. Fotonik Kristallerin Tarihçesi

Geçtiğimiz onbeş yıl içerisinde fotonik bant aralıklı maddeler olarak bilinen fotonik kristaller yoğun bir ilgi çekmiş ve çalışma konusu olmuştur. Lord Rayleigh ilk defa 1888'de çok katmanlı film yapısı ile tek boyutlu periyodik yapılarda elektromanyetik dalga yayılımını incelemiş ve bu tür bir yapının bant boşluğuna sahip olduğunu göstermiştir [1]. Hem yüksek yansıtıcı, hem de yansıtıcı olmayan kaplamalar gibi çok tabakalı ortamlar kullanılarak yapılan çalışmalar uzun yıllar devam etmiştir. Fotonik kristallerin en basit örneği, tek boyutlu olanlarıdır. Tek boyutlu fotonik kristallerde dielektrik sabiti tek bir doğrultuda periyodiklik göstermektedir. Tek boyutlu periyodik sistemlerin yoğun bir şekilde incelenmesi birçok uygulamanın da önünü açmıştır. Benzer olarak, iki ve üç doğrultuda periyodik özelliğe sahip yapılar ise iki boyutlu ve üç boyutlu fotonik kristal olarak tanımlanmaktadır [2, 3].

İlk olarak bir fotonik bant aralığı etkisi nedeniyle, düşük kırılma indisli bir bölgede (hava) ışığın kılavuzlanması genel kavramı, 1977'de Yeh tarafından önerilen Bragg yansımalı dalga kılavuzu olarak adlandırılmıştır [4]. Kırılma indisi bir boyutta periyodik değişen dielektrik yapılarda, dielektrik sabitinin geometrik parametrelerinin uygun seçimi ile dik gelen ışık demetinin belirli dalga boylarına karşı yüksek yansıtıcılık sağlanabileceği bu çalışmalar ile ortaya konmuştur. Ancak bu bilginin üç boyutlu yapılara güncellenmesi için 1987 yılına kadar beklemek gerekmiştir.

Rayleigh'dan yaklaşık 100 yıl sonra, 1987 yılında, Yablonovitch [5] ve John [6] birbirlerinden bağımsız olarak aynı dönemde ilk kez iki boyutlu ve üç boyutlu fotonik kristallerde ışığın yayılımı üzerine çalışma yapmışlar ve bu çalışmalar ile fotonik kristal

araştırmalarının öncüsü olmuşlardır. Yablonovitch, dielektrik sabiti periyodik değişen ortamda katı kristalde elektronun karşılaştığı duruma benzer olarak fotonlar için bant aralıkları bulunabileceği ve bant aralığında kalan açısal frekansa sahip elektromanyetik dalgalar için kendiliğinden ışımanın azaltılabileceği, böylece çok düşük eşik değerine sahip lazer gibi uygulamalar öngörülebileceği düşüncesinden hareket etmiştir. Ayrıca Yablonovitch üç boyutlu fotonik kristalin fotonik bant boşluğu içerisinde kalan tüm modların tüm yönlerde bastırıldığını ve doğal olarak enerjinin hapsedildiğini benzetimle göstermiştir. Fotonik kristal terimini ilk kullanan da Yablonovitch olmuştur. Bu arada John ise kusursuz periyodik dielektrik sabiti değişimine düzensizliklerin veya kusurların eklenmesiyle bant aralığı içerisinde yerelleşmiş kusur durumları oluşacağını öngörmüştür. John, bu yeni olgu ile fotonik kristal kullanılarak ışığın sınırlandırılabileceğini ifade etmiştir. Bu çalışmalar dünyanın çeşitli araştırma gruplarında büyük ilgi uyandırmıştır.

Fotonik kristal çalışmaların ilk yıllarında, verilen bir yapının fotonik bant aralığı sergileyip sergilemeyeceği, daha çok atomik/moleküler kristallerle ilgili bilgilere dayanarak tahmin edilmeye çalışılıyordu. Örneğin, Yablonovitch, çalışmalarına 1.Brillouin bölgesi küreye en yakın yapı olan yüzey merkezli kübik yapılara odaklanarak başlamıştır. Daha sonra 13 ile 15 GHz arasında değişen mikrodalga bölgesinde tam bir fotonik bant aralığına sahip üç boyutlu fotonik bir kristalin ilk deneysel çalışmalarını yapmıştır.

1987'den sonraki ilk 4-5 yıl boyunca, teorik çalışmalar daha çok iki boyutlu ve üç boyutlu fotonik kristallerde tam fotonik bant boşluğu için gerekli olan en uygun yapı ve kırılma indisi hesaplarına yoğunlaşmıştır. 1990'ların ikinci yarısında birçok olgu için tam fotonik bant boşluğuna ihtiyaç olmadığı fark edilmiştir. Milimetre ve milimetre-altı bölgede çeşitli örgü sabitine sahip çeşitli fotonik bant yapıları incelenmiştir. Üç boyutlu tam fotonik bant yapılarının imalat güçlüklerine karşın 1999 yılında Noda ve arkadaşları optik bölgede bunu başarmıştır [7].

1.2. Fotonik Kristal ve Katı-hal Kristali Arasındaki Fark ve Benzerlikler

Atom veya moleküllerin periyodik bir düzeni olan katı-hal kristali, sahip olduğu periyodik potansiyel özellikler sebebiyle elektron dağılımını belirleyici nitelik

taşımaktadır. Bir yarıiletken kristalin periyodik potansiyeli, elektronların hareketini etkiler ve bazı yönlerde elektron hareketini ve enerji yayılmasını yasaklar. Eğer potansiyel yeterince güçlü ise olası tüm yönler için yayılım yasaklanabilir ve tam bir bant boşluğu elde edilebilir [8].

Fotonik kristaldeki fotonlar ile katı-hal kristali içerisindeki elektronlar arasında birçok benzerlikler vardır. Her iki yapının da incelenmesi için yapıya ilişkin bir özdeğer probleminin çözümlenmesi gerekmektedir. Katı-hal kristalinde ve fotonik kristalde yapının periyodik geometriye sahip olmasından kaynaklanan bant yapısı kavramları mevcuttur. Elektronun, kristal içerisindeki hareketi periyodik dizilmiş atomların/moleküllerin oluşturduğu potansiyel dağılımını içeren Schrödinger denkleminin çözümü ile incelenebilir. Benzer şekilde dielektrik sabiti periyodik değişen bir ortam (fotonik kristal) üzerine düşen elektromanyetik dalganın ortam içerisindeki hareketi Maxwell denklemlerinin periyodik dielektrik fonksiyonu için çözümü ile incelenir. Katı-hal kristalleri ile fotonik kristaller arasındaki bu benzerlik, katı hal fiziğinde yaygın kullanılan kavramların ve tanımların fotonik kristaller için de uygulanabileceğini akla getirmektedir.

Buna karşın elektron ve foton arasında iki önemli farklılık vardır. Birincisi elektronlar arasındaki etkileşimlere rağmen lineer optikte fotonlar arasında bir etkileşim söz konusu değildir. İkincisi ise fotonlar ve bant yapıları için herhangi bir uzunluk ölçeğine ihtiyaç duyulmamasına rağmen elektronlar doğal bir ölçek ile ölçeklendirilmişlerdir [9].

Katı-hal kristallerindeki elektronlara benzer olarak periyodik dielektrik yapılarda elektromanyetik dalgaların yayılımı belirli yönlerde ve belirli frekans aralığında yasaklanabilir [2]. Bu yüzden fotonik kristaller ışık dalgalarının yayılımının kontrol edilmesinde gelişmeye açık bir teknolojidir.

1.3. Fotonik Kristallerin Uygulama Alanları

Fotonik kristaller ile ilgili teorik araştırmalar bu alanda yapılan uygulamalara ilgi duyulmasını hızlandırmıştır. Teorik çalışmaların yanı sıra bu konuya gösterilen ilginin birkaç sebebi daha vardır. Öncelikle elektromanyetik teori, nanoüretim, yarıiletken

teknolojisi, madde bilimi, biyoteknoloji gibi bilim dallarında fotonik kristaller ile ilgili araştırmaların sayısı hızla artmıştır. Ayrıca fotonik kristaller sahip oldukları eşsiz özellikleri sayesinde bazı uygulama alanlarındaki beklentileri karşılayabilmektedir. Diğer taraftan fotonik kristaller tümleşik optik devrelerin üretimini hızlandırmıştır. Son yıllarda, fotonik kristallerdeki teknik gelişmeler, malzemelerin optik özelliklerini kontrol etme olanağı sağlamıştır [3]. Fotonik kristallerin karmaşık bölgesel dağılım özellikleri, ışığın kontrolü için bir mekanizma sağlar [10]. Fotonik kristallerin ışığı kontrol etmedeki bu özelliği, etkin optik filtreler [11], eşiksiz yarıiletken lazerler [12,13], sonsuz tek modlu filtreler [14] gibi pek çok uygulamaya ışık tutmuştur. Fotonik kristal malzemeler ile dalga kılavuzu [15, 16], çok küçük tümleşik optik devreler [17], yüksek Q değerli oyuklar [18], ekleme çıkarma filtreleri [19] ve sensörler [20] tasarlanmış ve uygulanmıştır. Bu uygulamaların çoğu periyodik yapının sonucu olan fotonik bant yapısının elektromanyetik alanlar üzerindeki etkisine dayanmaktadır. Diğer taraftan, negatif kırılma indisi [21] ve kendiliğinden kolimasyon gibi davranışlar da ilgi odağı olmuştur [22].

Bir fotonik kristalin yüksek düzeyde ışık dağılımını kontrol etme yeteneği bilimsel ve pratik açıdan önemli bir konu teşkil etmektedir. Fotonik kristal dalga kılavuzu sistemlerinde anormal dispersiyon özellikleri ve geleneksel homojen dalga kılavuzları ile elde edilemez derecede yavaş grup hızları ortaya çıkması, bir başka ilgi odağı olmuştur. Bu karakteristikler fotonik bilgi teknolojilerinde heyecan verici bir etki yaratmıştır. Örneğin fotonik bant boşluğu içerisindeki dalga boylarındaki ışık keskin dönüşe sahip bir fotonik kristal dalga kılavuzunda ilerleyebilmektedir.

Dielektrik ortamda oluşturulan düzenli hava boşlukları ile yüksek kalitede fotonik kristal elde edilebilir. Benzer olarak hava ortamı içerisinde düzenli olarak yerleştirilmiş dielektrik çubuklar da fotonik kristal için bir örnek teşkil etmektedir. Yapıya uygun kusurların oluşturulması ile dalga boyu aralığında çok yüksek kalite faktörlerine sahip optik mikro oyukların tasarımı mümkün olmaktadır [19].

Fotonik kristaller başlangıçta yapay maddeler olarak düşünülmesine rağmen, doğada var oldukları artık bilinmektedir. Opaller (panzehirtaşları), doğal fotonik kristallerin en iyi bilinen örneğidir. Bir panzehirtaşı, çapları mikrometre-altı bölgede olan silis kürelerin üç boyutlu örgüsüdür. Panzertaşlarının güzel renkleri onların doğal fotonik kristal

olmalarının doğrudan bir sonucudur. Aynı zamanda fotonik kristallerin biyolojide de yer aldığı keşfedilmiştir. Bazı kelebekler ve güvelerin güzel yanardöner kanatları, gerçekte renk pigmentleri içermemelerine rağmen, kanatlarının yüzeylerinde fotonik kristal bulunması nedeniyledir [2].

Fotonik kristaller ile ilgili yapılan çalışmalar arasında fotonik kristal kuplörler ve kuplör uygulamalarına sıklıkla rastlanır. Çalışmaların bir kısmında kuplörde dalga yayılımı ve kuplör uygulamaları PWE (Plane Wave Expansion, Düzlem Dalga açılımı) yöntemi ile incelenmiştir [23, 24]. Bazı araştırmalar da ise kuplör FDTD (Finite-difference Time-domain, Zamanda Sonlu Farklar) yöntemi ile ele alınmıştır [22, 25, 26].

Elektromanyetik dalgalar üzerine yapılan çalışmalar çok uzun yıllardır teorik ve deneysel çalışma olarak sürdürülmektedir. Ancak son zamanlarda daha sıklıkla başvurulan modelleme ve benzetim yöntemleri düşük maliyet, kolay yorumlanabilirlik ve daha tutarlı sonuçlar elde edilebilmesi dolayısıyla deneysel düzenekler yerine tercih edilmektedir. Elektromanyetik dalgalar konusunda yapılan araştırmalarda, teorik bilgi sorgulanamaz şekilde kabul ediliyorsa çalışma öncelikle modellenir ve benzetim ortamında incelenir. En son olarak da eğer gerekli görülüyor ise modelin eksik kısımları olabileceği varsayımı ile sonuçlar deneysel olarak elde edilmeye çalışılır. Fotonik kristaller üzerine yapılan çalışmalarda benzer şekilde teorik [27], deneysel [28] ve benzetim [29] olarak yürütülmektedir.

Özellikle bilgisayar teknolojilerinin ilerlediği son zamanlarda bu alandaki çalışmalarda da analitik yöntem ve benzetim teknikleri ile yapılan çalışmaların sayısında artış gözlenmektedir. Bu çalışmada fotonik kristallerde dalganın yayılımını analitik yöntemlerden biri olan **“Sonlu Elemanlar Yöntemi” (Finite Element Method, FEM)** ile bilgisayar destekli olarak incelenmesi amaçlanmıştır. Çalışmada modelleme için FEMLAB 3 Multiphysics Modelling [30] yazılımından faydalanılmıştır. Çalışmada fotonik kristaller dalga kılavuzu ve kuplör uygulamaları için farklı modeller tasarlanmıştır. Farklı modellerin analizleri birlikte incelenmiş ve dalga yayılımını etkileyen fiziksel karakteristikler ortaya konulmuştur. Fotonik kristalin örgü yapısının, doluluk oranının ve genel geometrisinin kuplaj katsayısı üzerine etkileri incelenmiştir.

2. BÖLÜM

FOTONİK KRİSTALLERDE DALGA YAYILIMI

2.1. Fotonik Kristal Yapı

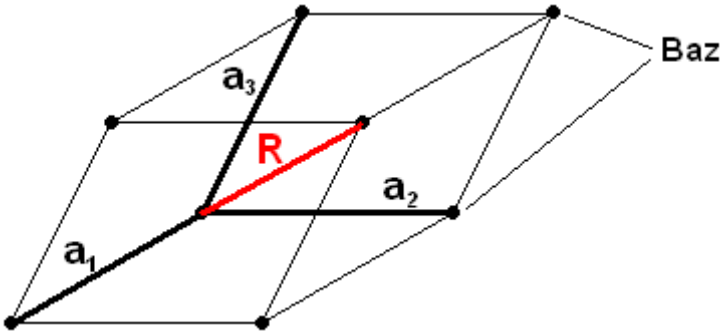
Fotonik kristal yapmanın basit bir yolu, çok tabakalı bir yapı için kırılma indisleri farklı maddeleri birbiri ardına gelecek şekilde yığmaktır. Böyle yapılar aynı zamanda Bragg yansıtıcıları olarak bilinir ve bir boyutlu fotonik kristaller olarak düşünülebilir. İki veya üç boyutlu bir yapı için yapıların, sütunların (çubukların) düzenli bir örgüsü olarak veya dielektrik madde içinde boşluklar delinerek yapıldığı düşünülebilir.

Bir dielektrik ortamda periyodik olarak düzenlenen hava delikleri ile fotonik kristal yapı oluşturulabilir [31]. Kristal yapı kısaca her doğrultuda aynı simetrik ve periyodik özelliklere sahip yapıları ifade etmektedir. "Baz" veya "atom" terimi, kristalin yapıtaşı olan kendini tekrarlayan birimlerini tanımlar. Örneğin katı hal kristalinin bazında atom ve atom grupları(molekül) bulunabilir. Bazı oluşturan birimlerin matematiksel soyutlamaya gidilerek uzayda bir nokta ile tanımlanmasıyla "kristal örgüsü" oluşturulur. Kristal yapı belirli bir düzen içersinde bir araya gelen atomların bu düzenlerini üç boyutta periyodik olarak devam ettirmeleri sonucu oluşur [32]. Atomların ortaya çıkardığı düzen bir nokta ile gösterilecek olursa, üç boyutta oluşan kristal, noktalardan oluşturulmuş bir kafes gibi düşünülebilir. Bu kafese örgü adı verilir.

Kristal örgüsü ile bazın bileşimi kristalin fiziksel yapısını oluşturur. Bir kristali tanımlayan temel kavram "Bravais örgüsü"dür ve üzerindeki hangi noktadan bakılırsa bakılsın aynı düzende yönelimde görünen sonsuz sayıda noktadan oluşan küme olarak tanımlanır [27]. Bravais örgüsü bir başka deyişle $\vec{a_1}$, $\vec{a_2}$ ve $\vec{a_3}$ "ilkel birim vektörleri" ve $\mathbf{n_1}$,$\mathbf{n_2}$ ve $\mathbf{n_3}$ tamsayılar olmak üzere,

$$\vec{R} = n_1\vec{a_1} + n_2\vec{a_2} + n_3\vec{a_3} \qquad (2.1)$$

olarak tanımlanan ve "öteleme vektörü" adı verilen tüm noktaların oluşturduğu kümedir. Bir birim hücrede baz, ilkel birim vektör ve öteleme vektörü Şekil 2.1'de gösterilmektedir.



Şekil 2.1. Birim hücrenin yapısı.

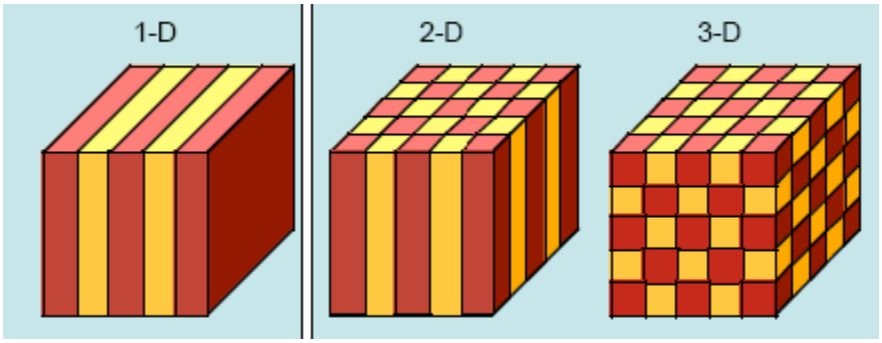
Fotonik kristallerde kırılma etkileri çok karmaşık olabilir ve çoğu durumda yayılan dalganın yönü Snell yasaları ile açıklanamaz [33]. Fotonik kristal fiberlerde dalganın kılavuzlanması için toplam iç yansıma ve fotonik bant boşluğu etkisi olmak üzere iki mekanizma işlev görmektedir [34]. Fiber öz bölgesinde ışığın hapsedilmesi toplam iç yansımalar ile gerçekleşmektedir. Fotonik kristalin sahip olduğu periyodik ağ yapısından kaynaklanan yansımalar ise fotonik band boşluğu etkisinden ileri gelmektedir. Fotonik kristal fiberlerde petek yapısı üzerinde fazladan delik ekleyerek veya bir kusur oluşturulması suretiyle uygun dalga boyu aralığında mükemmel bir bant boşluğu yapısı elde edilir [34].

2.2. Periyodik Ortam

Periyodik bir ortamın optik özellikleri; ortamın öteleme simetrisini yansıtan ve konumun periyodik fonksiyonları olan, ortamın dielektrik ve manyetik geçirgenlik tensörleri,

$$\varepsilon(\vec{r}) = \varepsilon(\vec{r} + \vec{a}); \qquad \mu(\vec{r}) = \mu(\vec{r} + \vec{a}) \qquad (2.2)$$

ile tanımlanır; burada, "$\vec{r}$" üç boyutta konum vektörü ve "$\vec{a}$" keyfi bir örgü vektörüdür. Bu eşitlikler kısaca şunu söyler: Ortam $\vec{r}+\vec{a}$ noktasındaki gözlemciye ve $\vec{r}$ noktasındaki gözlemciye tam olarak aynı görünür. Tek boyutlu, iki boyutlu ve üç boyutlu periyodik yapılar Şekil 2.2'de gösterilmiştir.



Şekil 2.2.Tek boyutlu, iki boyutlu ve üç boyutlu periyodiklik [38].

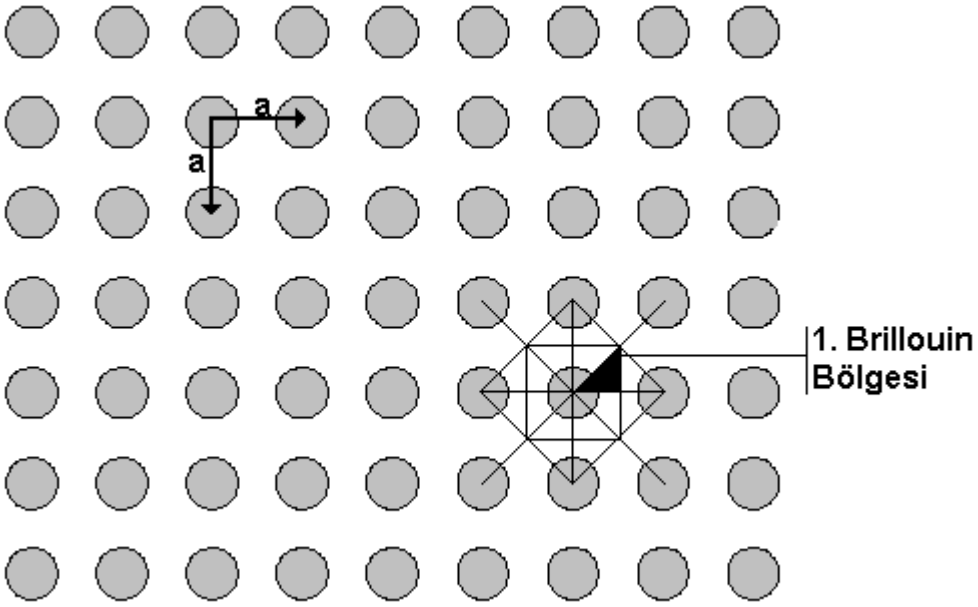
Kristaller gibi üç boyutlu periyodik bir ortamda, örgünün periyodikliğini tanımlayan $\vec{a_1}$, $\vec{a_2}$ ve $\vec{a_3}$ birim vektörler vardır ve bu vektörlerin tam katlarının toplamı olan herhangi bir $\vec{R}$ vektörü vasıtasıyla yapılan öteleme altında ortam değişmez kalır.

Fotonik kristaller, birim hücrelerin periyodik dizilimi ile oluşturulmuş yapılardır. Öyle ki fotonik kristallerde dalga yayılımı ve mod analizi için yapının tamamının incelenmesi yerine küçük hücreler ve bu hücrelerin düzeni, yapının tamamı hakkında bilgi verebilir. Farklı dielektrik katmanların tekrarı fotonik kristale periyodik görünüm sağlamaktadır. Tek boyutlu durumda, farklı dielektrik sabitine sahip ortamların art arda dizilmesi sonucu oluşan yapı Bragg ızgaraları olarak bilinmektedir. Bragg ızgaraları sadece tek bir doğrultuda periyodik özellik göstermektedir.

Kristal yapının bazı veya farklı dielektrik sabitine sahip ortamların iki farklı eksen doğrultusunda tekrarlanması sonucu iki boyutlu fotonik kristal yapılar elde edilebilir. Bazın üç farklı eksen doğrultusunda dizilerek periyodik hale getirilmesi sonucu elde edilen homojen yapı ise üç boyutlu kristal yapıyı oluşturur. Ancak uygulamadaki güçlüklerinden dolayı üç boyutlu fotonik kristaller yerine bu yapıların iki boyutlu

formları kullanılmaktadır. Bu tez çalışmasında da iki boyutlu fotonik kristaller üzerine inceleme yapılmış ve üç boyutlu fotonik kristaller hakkında yorum yapılmıştır.

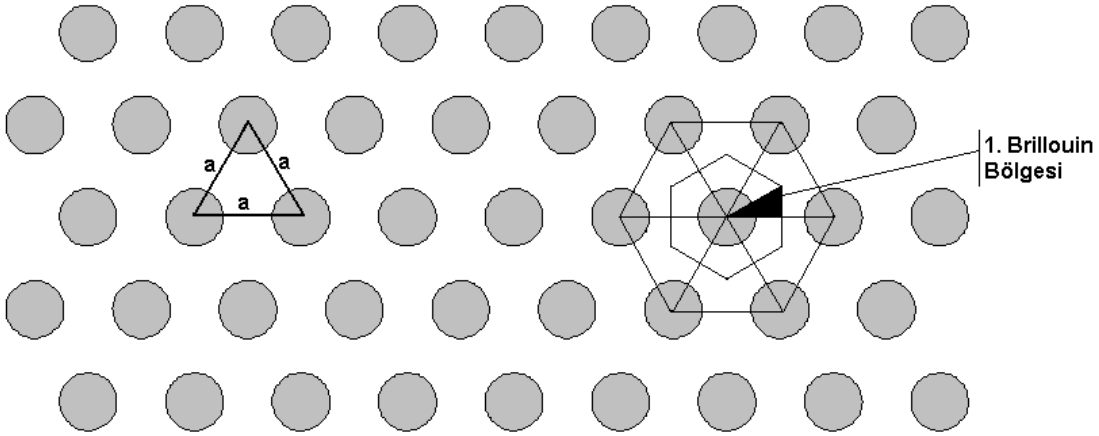
İki boyutlu fotonik kristallerde çoğunlukla iki örgü yapısı ile çalışma yapılır. Bunlar kare ve üçgen örgüye sahip yapılardır. Şekil 2.3'de kare örgü dizilimine sahip bir kristal yapı ve yapının 1. Brillouin bölgesi gösterilmiştir.



Şekil 2.3.Kare örgü dizilimine sahip kristal yapı ve 1.Brillouin bölgesi.

Yapıda dielektrik bölgeler yatay ve dikey doğrultuda a birim kadar tekrarlanarak periyodik hale getirilmiştir. Yapı üzerinde ayrıca örgüye ait 1.Brillouin bölgesi işaretlenmiştir. Bu bölge kristal yapısının tamamını temsil eden en küçük alan özelliği taşır ve hiç bir Bragg yansımasının bulunmadığı bir bölgedir. 1.Brillouin bölgesinin farklı simetrilerde tekrarlanması ile yapının tamamı elde edilebilir. Bu sebeple hesaplamalarda sadece bu bölgenin incelenmesi yeterli olmaktadır.

Fotonik kristal araştırmalarında sıklıkla kullanılan bir diğer örgü yapısı ise üçgen örgüdür. Üçgen örgünün özel bir hali olarak dielektrik bölgeler aralarında 60^0lik açı ve eşit uzaklıklarda periyodik dizilim ile oluşturulmuş kristal yapı ve 1.Brillouin bölgesi Şekil 2.4'de gösterilmiştir.



Şekil 2.4.Üçgen örgü dizilimine sahip kristal yapı ve 1.Brillouin bölgesi.

Fotonik kristallerde dalga yayılımını örgü yapının yanı sıra periyodik örgü içersinde oluşturulan kusurlu bölgeler de etkilemektedir. Kristal örgü içersindeki noktasal, bölgesel veya çizgisel kusurlar hem elektromanyetik dalganın yayılımını etkileyecek hem de fotonik kristalin bant yapısını değiştirecektir.

2.3. Fotonik Kristal için Dalga Eşitlikleri

Elektromanyetik alanın bir ortam içerisindeki hareketini ifade eden temel denklemler Maxwell denklemleridir ve fotonik kristallerde EM alanın çözümlerinin bulunabilmesi için bu denklemin çözülmesi gerekir. Serbest yük ve akım yoğunluğunun bulunmadığı ($\rho=0$, $J=0$) doğrusal, eş yönlü, dağıtmayan(dispersiyonsuz), kayıpsız ve manyetik olmayan ($\mu(r)=\mu_0$) bir ortamda makroskobik Maxwell denklemleri SI birim sisteminde;

$$\nabla \cdot \vec{D} = 0 \tag{2.3}$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \tag{2.4}$$

$$\nabla \times \vec{E}(\vec{r},t) = -\frac{\partial \vec{B}(\vec{r},t)}{\partial t} \tag{2.5}$$

$$\nabla \times \vec{H}(\vec{r},t) = \frac{\partial \vec{D}(\vec{r},t)}{\partial t} \tag{2.6}$$

şeklinde yazılırlar. İlk iki eşitlik sırasıyla deplasman alanı ve manyetik alan için Gauss yasaları olarak adlandırılır. Son iki eşitlik de Faraday ve Ampere yasaları olarak bilinirler. Sözü edilen ortam için yer değiştirme alanı, $\vec{D}$, ile elektrik alan, $\vec{E}$, ve manyetik alan, $\vec{H}$, ile manyetik akı yoğunluğu, $\vec{B}$, arasındaki ilişkiyi veren bünye denklemleri ise;

$$\vec{D}(\vec{r},t) = \varepsilon_0 \varepsilon(\vec{r}) \vec{E}(\vec{r},t) \tag{2.7}$$

$$\vec{B}(\vec{r},t) = \mu_0 \mu(\vec{r}) \vec{H}(\vec{r},t) \tag{2.8}$$

şeklindedir.

Yapı üzerindeki herhangi bir noktadan hareketle herhangi bir $\vec{R}$ vektörü kadar adımlar ile aynı fiziksel özelliklere sahip noktalar kümesine kristal yapı adı verilmektedir. Burada $\vec{R}$ öteleme vektörü kristalin periyodiklik boyutunu göstermektedir. Fotonik kristallerde dielektrik sabiti kristal örgüsünün periyodikliğine sahiptir. $\vec{R}$ öteleme vektörü ve $\vec{r}$ herhangi bir konum vektörü olmak üzere yapının dielektrik sabiti;

$$\varepsilon(\vec{r} + \vec{R}) = \varepsilon(\vec{r}) \tag{2.9}$$

olarak verilir. Bu nedenle fotonik kristalde makroskobik Maxwell denklemleri kristalin dielektrik sabiti için analitik veya sayısal yöntemlerle doğrudan çözülebileceği gibi, bu denklemlerden türetilen ikincil denklemler çözülerek de yapı için ilerleyen dalga çözümlerine ulaşılabilir.

Fotonik kristalde Maxwell denklemleri için zamanda harmonik çözümler bulunmak istendiğinde, alan bileşenlerinin zamana $e^{-j\omega t}$ şeklinde bağlı çözümler aranmalıdır. Vektör aritmetiğine ilişkin aşağıdaki vektör eşitliği denklemin daha anlamlı bir çözümünü verecektir.

$$\nabla \times \nabla \times (\vec{A}) = \nabla(\nabla . \vec{A}) - \nabla^2 . \vec{A} \tag{2.10}$$

Bu özellik Maxwell denklemlerine uygulanırsa ve dielektrik malzemeler için her zaman $\nabla\varepsilon(r)=0$ ve $\mu(r)\cong 1$ varsayımı yapılarak aşağıdaki eşitlikler elde edilir.

$$\nabla^2 \vec{E} = \mu_0 \varepsilon_0 \varepsilon \frac{\partial^2}{\partial t^2} \vec{E} \tag{2.11}$$

$$\nabla^2 \vec{H} = \mu_0 \varepsilon_0 \varepsilon \frac{\partial^2}{\partial t^2} \vec{H} \tag{2.12}$$

Bu tip ikinci dereceden diferansiyel denklemin çözümleri ise

$$E = E_0 e^{j(kr-\omega t)} \tag{2.13}$$

$$H = H_0 e^{j(kr-\omega t)} \tag{2.14}$$

formunda olur ki burada dalga vektörü (k) ve açısal frekans (ω) belirlenmelidir. Bu denklemlerden anlaşıldığı üzere dalgalar belirli bir genlik çarpımı ile zaman ve konuma göre değişen bir desen ile yayılmaktadır. Denklem eşitliklerin kullanılması ile yeniden düzenlendiğinde aşağıdaki eşitlikler elde edilir.

$$\frac{1}{\varepsilon(\vec{r})} \nabla \times \left[\nabla \times \vec{E}(\vec{r},t) \right] = (\frac{\omega}{c})^2 \vec{E}(\vec{r},t) \tag{2.15}$$

$$\nabla \times \frac{1}{\varepsilon(\vec{r})} \left[\nabla \times \vec{H}(\vec{r},t) \right] = (\frac{\omega}{c})^2 \vec{H}(\vec{r},t) \tag{2.16}$$

Yukarıdaki (2.16) eşitliği fotonik kristal araştırmacıları tarafından “ana denklem” olarak isimlendirilmektedir [32]. Ayrıca bu denklem bir özdeğer denklemidir ve $\frac{\omega^2}{c^2}$’nin özdeğerlerini gerçel olarak vermektedir. Fotonik kristallerin katı kristaller ile olan akrabalığından yola çıkılarak kuantum mekaniğinde kullanılan Schrödinger enerji özdeğer teoremi ile Maxwell denklemi karşılaştırılabilir.

2.4. Eşitliklerin Ölçeklenebilme Özelliği

Çalışmanın makroskobik bölgede kalması şartı ile Maxwell eşitliklerinin çözümlerinde uzunluk ölçeği temel niteliğinde değildir. Araştırmacılar elektromanyetik teorinin bu özelliği sayesinde geniş bir frekans bölgesinde benzer deneyler yürütebilmektedirler. a_1,

a_2 ve a_3 örgü sabitlerine sahip bir fotonik kristalde bütün boyutların sabit s uzunluğuyla ölçeklendirilerek yapının sıkıştırılması (s<1) veya genişletilmesi (s>1) durumunda elde edilecek normal kiplerin ve öz değerlerin yapının orijinal durumunda elde edilenlerle karşılaştırılması için ana denklemde konumların, dielektrik sabitinin ve dolanım operatörünün yeni ölçekte yazılması gerekir. Aşağıda eşitliklerin ölçeklendirilmesi ile değişimi gösterilmiştir [27,32].

$$\vec{r'} = s\vec{r}\,, \quad \nabla' = \nabla'/s \tag{2.17}$$

$$\frac{1}{\varepsilon(\vec{r})}\nabla\times\left[\nabla\times\vec{E}(\vec{r},t)\right]=\left(\frac{\omega}{c}\right)^2\vec{E}(\vec{r},t) \tag{2.18}$$

$$\frac{1}{\varepsilon(\vec{r'}/s)}s\nabla'\times\left[s\nabla'\times\vec{E}(\vec{r'}/s,t)\right]=\left(\frac{\omega}{c}\right)^2\vec{E}(\vec{r'}/s,t) \tag{2.19}$$

$$\frac{1}{\varepsilon(\vec{r'})}\nabla'\times\left[\nabla'\times\vec{E}(\vec{r'},t)\right]=\left(\frac{\omega}{cs}\right)^2\vec{E}(\vec{r'},t) \tag{2.20}$$

Ana denklemde **s** ile ölçekli niceliklerin seçilmesi sonucu **ω** frekansına sahip öz değer denklemi **ω/s** frekansına sahip öz değer denklemine dönüşmektedir. Fotonik kristal s ile ölçeklendirildiğinde öz kiplerin ve bunların açısal frekanslarının elde edilebilmesi için yapılması gereken, orijinal yapı için elde edilen çözümlerin ve bunların frekanslarının **s** ile bölünmesidir. Bu nedenle fotonik kristal için ana denklemin öz kiplerinin ve öz değerlerinin belirli bir uzunluk ölçeğinde çözümü diğer tüm uzunluk ölçeklerinde çözümü de belirler. Bu basit sonucun önemli avantajları mevcuttur. Bu sayede fotonik kristaller maliyetli ve üretimde zorluklar bulunan mikron bölgesi yerine mikrodalga bölgesinde test edilebilmektedir.

2.5. Fotonik Bant Yapısı

Atomik bir kristaldeki elektronlara benzer olarak, periyodik dielektrik yapılarda elektromanyetik dalgaların yayılımı belirli yönlerde ve belirli bir frekans aralığında yasaklanabilir. Bu benzerlik nedeniyle, fotonik kristallerin güçlü yansıma sergilediği bu dalga boyları bölgesi (yasaklı frekans bölgesi), "fotonik bant aralığı" (FBA) olarak

adlandırılır. Bu bakımdan fotonik kristaller yarıiletkenlerin optik benzeri olarak görülürler. Bant aralığı, belli ışık frekanslarının yayılımını sınırlar; bunun anlamı, bu maddeler, geleneksel optiğin yapamadığı biçimlerde ışığın kontrolünde kullanılabilirler. Böylece değişik maddeler ve farklı geometrik parametreler kullanarak fotonik kristaller yardımıyla ışığın ilerlemesi kontrol edilebilir.
Fotonik kristal içerisinde elektromanyetik dalgaların hareketinin belirlenmesi için (2.16) denkleminin çözülerek açısal frekans özdeğerlerinin bulunması gerekmektedir. Elektromanyetik alanın tek renkli düzlem dalgalar ($e^{j(kr-\omega t)}$) cinsinden çözümleri aranıyorsa, her bir **(k)** dalga vektörü için [$\boldsymbol{\omega_n(k)}$] ile gösterilen frekans özdeğerlerinin bulunması gerekir.

1.Brillouin bölgesi içerisindeki tüm dalga vektörleri için açısal frekans özdeğerlerinin [$\boldsymbol{\omega_n(k)}$] bulunarak dalga vektörüne **(k)** göre çizilmesi ile **"fotonik bant yapısı"** elde edilir [25]. Fotonik bant aralığının temel özellikleri 1990'ların başlarında deneysel olarak gösterilmiştir. Işık bant aralıklı yapılarda kusurlar oluşturularak kılavuzlanabilir. İki boyutlu doğrusal fotonik kristalin bant aralıklarından biri içinde kalan frekansa sahip ($\omega_{n,die} < \omega < \omega_{n,hava}$) ışık demetleri yapıdan tümüyle yansıyacaktır. Buna karşın fotonik kristal petek yapısı içerisinde bir sıranın (yolun) uzaklaştırılmasıyla oluşturulan dalga kılavuzu ışığın bir uçtan diğer uca iletimini sağlayacaktır [25].

Fotonik bant aralığının üstündeki ve altındaki bantlar, mod güçlerinin yüksek ε bölgelerinde veya düşük ε bölgelerinde olmasına göre ayrılabilir. Düşük ε bölgeleri çoğunlukla hava bölgeleridir. Bu nedenle, bir fotonik bant aralığının üstündeki bandı **"**hava bandı", altındaki bandı "dielektrik bant" olarak adlandırmak uygun olur. Bu isimlendirme, elektronik bant yapısında "değerlik" ve "iletim" bandı terimlerinin kullanılmasını anımsatmaktadır. Fotonik kristalin bant yapısında görülen bant aralıkları, kristalin uygulamada nasıl kullanılabileceği yönünde önemli bilgiler içerirler. Bant aralığının tanımlanması için bandın alt ve üst sınırlarındaki açısal frekans değerlerinin bilinmesi gerekir.

Bir periyodik yapı içerisindeki dalga yayılımının temel fiziksel özelliği, yapının elektromanyetik spektrumunda durdurma bandı oluşumuna neden olan Bragg yansıması olgusu veya Bragg rezonansıdır. Bragg yansıması, bir periyodik dalga kılavuzu gibi sınırlandırılmış periyodik yapı durumunda meydana geldiği gibi, sınırlandırılmamış ortam durumunda da meydana gelir. Üstelik iki durumda da Bragg yansıması, Bragg

kanunu olarak bilinen tek ve aynı koşulda meydana gelir. Bragg kanunu, periyodik dalga kılavuzunun ekseni boyunca yol alan dalgaların yapıcı girişiminin matematiksel formülasyonudur.

Eğer bir fotonik kristal, bir frekans bölgesi için herhangi bir açıda gelen, herhangi bir kutuplanmaya sahip ışığı yansıtıyorsa o zaman, kristalin bir "tam fotonik bant aralığına" sahip olduğu söylenir. İki ve üç boyutlu periyodik dielektrik yapıların pek çok çeşidi tam bir fotonik bant aralığına, yani; ışığın tamamının yansıdığı, iletimin neredeyse hiç olmadığı bir aralığa sahip olarak bilinir. Böylesi bir kristalde, eğer ışık yasaklı bölge içindeki bir frekansa sahip ise hiçbir ışık modu yayılamaz. Basit bir dielektrik ayna tam bir bant aralığına sahip olamaz; çünkü saçılma sadece bir eksen boyunca meydana gelir. Tam bir bant aralığına sahip olan bir madde oluşturmak için, üç boyutta periyodik olan dielektrik yapılar düzenlenmelidir.

2.6. Fotonik Bant Aralıklarının Eldesi

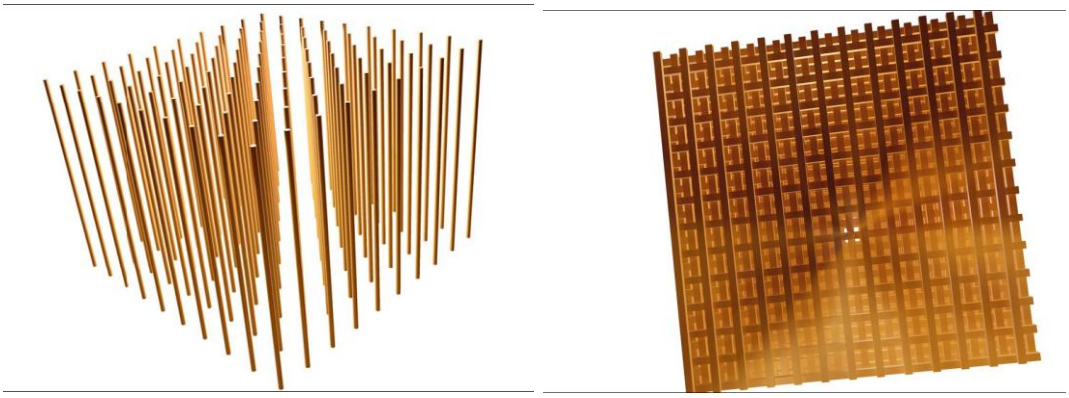
Fotonik kristallerde bant aralıkları yapı içerisinde elektromanyetik dalganın tutarlı bir şekilde çoklu saçılmalarından kaynaklanmaktadır. İki farklı saçılma söz konusudur: Mie saçılmalarının hakim olduğu mikroskobik saçılmalar; Bragg saçılmasının hakim olduğu makroskopik saçılmalar [29]. Bu iki mekanizma arasındaki etkileşim modlar için bir grup bant boşluğu üretir. Fotonik kristal bir yapıda aşağıda sıralanan parametreler her iki saçılma mekanizmasını da etkileyebilir.

- Kafes Geometrisi: Çoğunlukla bant boşluğunu etkiler
- Birim hücrenin dielektrik sabiti: Saçılma gücünü etkilemektedir
- Birim hücrenin şekli: Mikroskobik saçılma desenini etkiler
- Birim hücrenin boyutu: Mie saçılma desenini ve şiddetini etkiler

Fotonik kristaller tasarlanırken temel amaçlardan biri, bant aralıklarının EM spektrumun mümkün olduğunca geniş bir bölgesini kapsamasıdır. Bu durumda kristal daha geniş bir spektrumda uygulanabilir olmaktadır. Fotonik bant aralıklarının konum ve genişliklerini belirleyen temel nicelikler dielektrik sabiti, geometrik yapı ve "doldurma oranı"dır. Doldurma oranı, kristal yapıda bazların sahip olduğu hacmin kristalin tüm hacmine oranını ifade eder ve baz yarıçapının iki baz arasındaki mesafeye oranı olarak

tanımlanır. İstenilen frekans bölgesinde ve istenilen genişlikte bant aralıklarının eldesi için bu niceliklerin uygun seçilmesi gerekir. Ayrıca, EM alanın kutuplanma değerinden bağımsız "tam bant aralıkları" eldesi için uygun yapıların tasarlanması gerekir. Bu da ancak üç boyutlu kristallerle mümkündür.

Üç boyutlu fotonik kristallerin üretimindeki teknolojik zorluklar nedeniyle üç boyutlu yapılarla yapılan çalışmalar daha yaygındır. Dielektrik çubuklar ile oluşturulmuş iki boyutlu ve üç boyutlu fotonik kristal örnekleri Şekil 2.5'de verilmiştir. Üç boyutlu fotonik kristaller uzayda iki boyutta periyodiklik gösterirken üçüncü boyutta türdeştirler. Bu nedenle, bu yapılar için elektromanyetik alanın kutuplanma doğrultusu önem kazanmaktadır. *xy*- düzleminde tanımlanan iki boyutlu bir fotonik kristal için elektromanyetik alanın doğrusal bağımsız iki kutup kipinden bahsedilebilir: Elektrik alan vektörünün üçüncü boyuta paralel olduğu enine elektriksel (TE) ve manyetik alanın üçüncü boyuta paralel olduğu enine manyetik (TM) kipler.



(a) (b)

Şekil 2.5. Düzenli dielektrik çubuklardan oluşan fotonik kristaller [28].
(a) iki boyutlu
(b) üç boyutlu

Fotonik bant yapısı eldesine yönelik ilk çalışmalar, atomik/moleküler kristalin elektronik bant yapılarını elde etmek için kullanılan yöntemlerin Maxwell denklemleri için uyarlanmasına ilişkin çalışmalardır. Ancak, periyodik dielektrik ortamda Maxwell denklemleri için çözüm aranırken dikkat edilmesi gereken ilk nokta, elektromanyetik alanın vektörel doğasıdır.

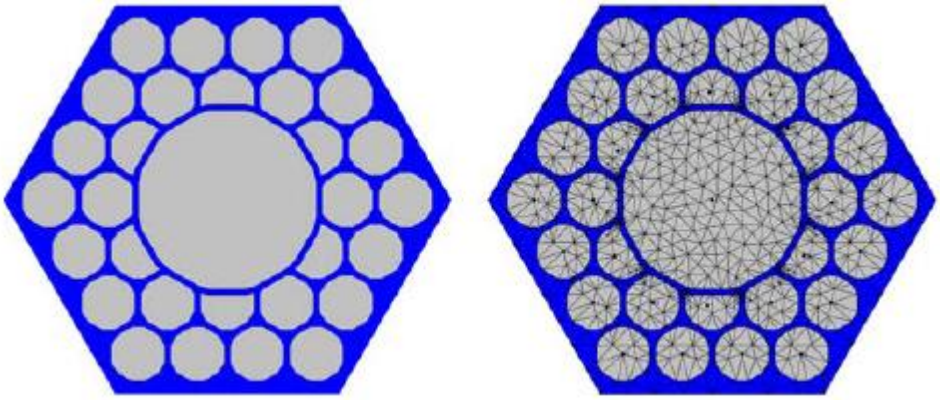
3. BÖLÜM

FOTONİK KRİSTALİN MODELLENMESİ VE BENZETİMİ

3.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM)

Sonlu Elemanlar Yöntemi (Finite Element Method, FEM), günümüzde karmaşık mühendislik problemlerinin hassas olarak çözülmesinde etkin olarak kullanılan bir sayısal çözümleme yöntemidir. İlk defa 1956 yılında uçak gövdelerinin gerilme analizi için geliştirilmiş olan bu yöntemin, daha sonraki on yıl içerisinde uygulamalı bilimler ve mühendislik problemlerinin çözümünde de başarılı olarak kullanılabileceği anlaşılmıştır [35]. Daha sonraki yıllarda ise sonlu elemanlar yöntemi ve çözüm teknikleri hızlı gelişmeler kaydetmiş ve günümüzde birçok pratik problemin çözümü için kullanılan en iyi yöntemlerden birisi olmuştur.

Yöntemin değişik mühendislik alanlarında popüler olmasının ana nedenlerinden birisi genel bir bilgisayar programının yalnız giriş verilerini değiştirerek herhangi bir özel problemin çözümü için de kullanılabilmesidir. Sonlu elemanlar metodundaki temel düşünce, karmaşık bir probleme, problemi basite indirgeyerek bir çözüm bulmaktır. Yöntemin problemi basite indirgemek için geometrinin üzerinde daha küçük alanlara ayrılmasına ilişkin örnek Şekil 3.1'de gösterilmiştir. Esas problemin daha basit bir probleme indirgenmiş olması nedeni ile kesin sonuç yerine yaklaşık bir sonuç elde edilmekte, ancak bu sonucun çözüm için daha fazla çaba harcayarak iyileştirilmesi ve kesin sonuca çok yaklaşılması, hatta kesin sonuca ulaşılması mümkün olmaktadır. Elde bulunan geleneksel matematiksel araçların kesin sonucu, hatta yaklaşık bir sonucu dahi bulmakta yetersiz kalması durumunda ise sonlu elemanlar metodunun kullanılması çok doğru bir tercih olmaktadır.



Şekil 3.1. Sonlu Elemanlar Yönteminin alanı üçgen ağlara bölmesi [36].

Sonlu Elemanlar Yöntemi bilgisayar benzetimlerinde sıklıkla başvurulan popüler bir yöntemdir. Mühendislik uygulamalarındaki karmaşık sınır koşulları, düzgün olmayan (dairesel) geometriler, zamana bağımlılık ve doğrusal olmayan problemlerde FEM diğer sayısal yöntemlere nazaran daha avantajlıdır [37].

Yayılan modların hesaplanmasında FEM kullanılmasının birçok avantajı vardır. Maxwell çözümlerinde uygun başlangıç fonksiyonlarının seçilmesi ile elektrik alanın süreksizliklerindeki sayısal sorunların önüne geçilebilir ve çok daha doğru modellemeler yapılabilir [36]. Bu tip süreksizliklerle fotonik kristallerdeki hava/dielektrik arayüzlerinde de karşılaşılır. Uyarlanabilir ağ düzeltme stratejileri ile daha doğru hesaplamalar ve daha kısa hesaplama süresi elde edilebilir. Düzlem Dalga Yönteminin (Plane-wave Expansion Method, PWE) başlangıç fonksiyonlarını tüm hesaplama alanında kullanmasının aksine FEM başlangıç fonksiyonlarını sadece sınırlandırılmış bölgede kullanır [36].

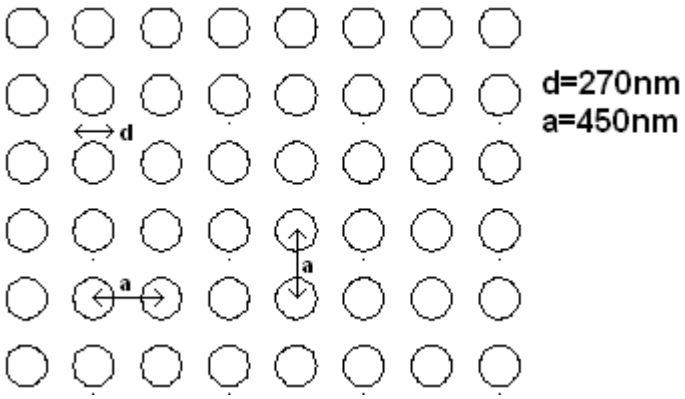
3.2. FEM ile Fotonik Dalga Kılavuzlarının İncelenmesi

Bu tez çalışmasında fotonik kristallerde dalga yayılımı, FEMLAB 3 Multiphysics Modelling adlı program ile incelenmiştir. İki boyutlu dalga kılavuzu ve optik kuplör amaçlı modelleme yapılarak model üzerinde dalganın yayılımı irdelenmiştir. İrdeleme için fotonik kristal içinde lineer bir kusur (bir çizgi kusuru) oluşturarak, bant aralığı içindeki frekanslar için ışık geçişine izin veren bir fotonik kristal dalga kılavuzu yapılabilir. Kristalin bant aralığı içinde kalan frekansa sahip bir ışık, dalga kılavuzuna hapsedilerek dalga kılavuzu boyunca kılavuzlanabilir. Kılavuzlanmış modların frekansı

fotonik bant aralığı içinde bulunduğundan dolayı modun kristal içine kaçması yasaklanır.

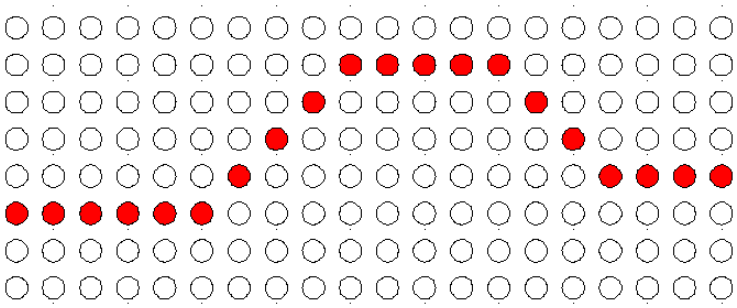
3.2.1. Fotonik Kristal Dalga Kılavuzunun Modellenmesi

İncelenen dalga kılavuzu modelinde hava içerisinde r=d/2=135 nm yarıçaplı daire kesitli GaAs malzemeler, Şekil 3.2'deki kare örgü biçiminde hava ortamında dizilmiştir.



Şekil 3.2. Birim hücresi d çaplı dairelerden oluşmuş kare örgü.

Kare örgü içerisinden fotonik bant aralığındaki frekansların ilerleyebileceği bir yol boyunca örgü içerisindeki daire kesitli GaAs bölgelerin çıkartılması ile Şekil 3.3 ve Şekil 3.4'deki dalga kılavuzları oluşturulmuştur. Böylece dalga, istenilen güzergah doğrultusunda hapsedilecek ve bu yol boyunca kılavuzlanacaktır.



Şekil 3.3. Fotonik kristal örgü yapı içerisinden çıkartılan bölgeler (dolgulu bölge).

Yapılan çalışmada fotonik kristaldeki GaAs bölgelerin birbirleri ile olan mesafeleri a=450nm'dir. Verilen değerler güncel teknoloji ile üretilebilecek fabrikasyon değerleridir [38]. Deliklerin yarıçapı ile delikler arası uzaklık arasındaki oran r/a = 0,3 olmaktadır. Bu oran aynı zamanda "doluluk oranı" olarak da adlandırılmaktadır.

Örgü içerisinde kullanılan daireler GaAs olarak modellenmiş ve dielektrik sabiti de FEMLAB 3 programının referans aldığı [39] şekilde

n_{GaAs} = -3.3285e5*lambda0_emwe+3.5031

olarak verilmiştir. Geride kalan diğer boşluk bölgeler ise $n_{air} = 1$ olarak modellenmiştir. Burada "lambda0_emwe" ile verilen değer elektromanyetik dalganın boşluktaki dalga boyudur.

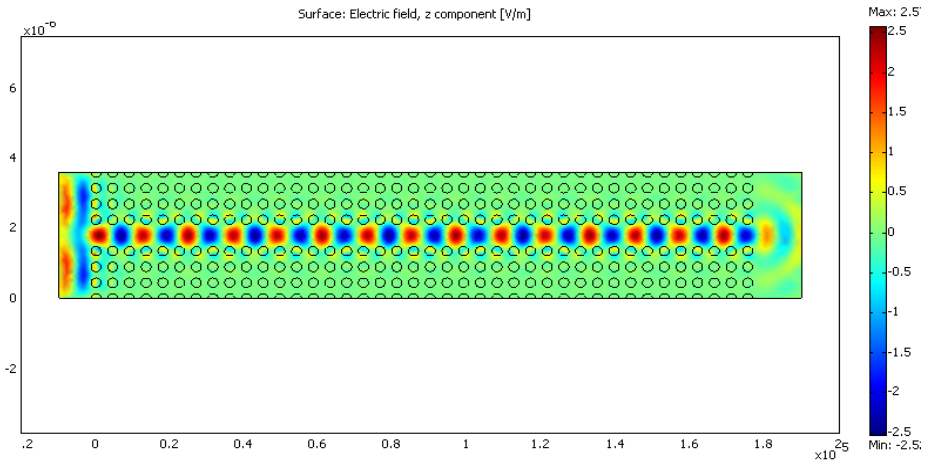
Modelde hava bölgesi sonsuz olarak modellenmemiş ve 11µm x 5µm ebadında sonlu kabul edilmiştir. Elektromanyetik dalga ortama salınırken kısa kenarlardan birinden tüm kenar boyunca z doğrultusundaki elektrik alanın bileşeni (E_{0z}) 1 V/m olarak kabul edilmiştir. Ayrıca Elektromanyetik dalganın boyu λ=913nm olarak ele alınmıştır. Modele ait parametreler Tablo 3.1'de verilmiştir.

Tablo 3.1. Dalga kılavuzu modeli için parametreler

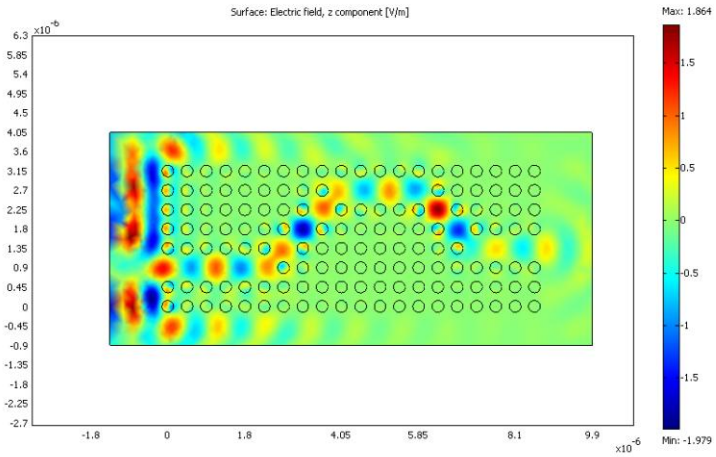
Parametre	**Değer**
Kristalin ebatı	11µm x 5µm (x,y)
Havanın dielektrik sabiti, n_{air}	1
GaAs dielektrik sabiti, n_{GaAs}	-3.3285e5*lambda0_emwe+3.5031
Elektrik alan, E_{0z}	1 V/m
Dalga boyu, λ	913nm
Doluluk oranı	0,3
Kristal örgüsü	Kare örgü

λ=913nm dalga boyunda elektromanyetik dalga kullanıldığında dalganın kıvrımsız fotonik kristal içerisinde yayılımı iki boyutlu görünüm olarak Şekil 3.4'de ve kıvrımlı fotonik kristal içerisinde iki ve üç boyutlu görünüm olarak Şekil 3.5'de verilmektedir. Görüldüğü gibi dalga ilerlemesi için hazırlanan yol boyunca ilerlemiş ancak diğer bölgelerde geriye yansımıştır. Dalgaboyu fotonik kristalin bant aralığında olduğundan dolayı dalga, fotonik kristal içerisinde yayılmamaktadır. Ancak kristal içerisinde

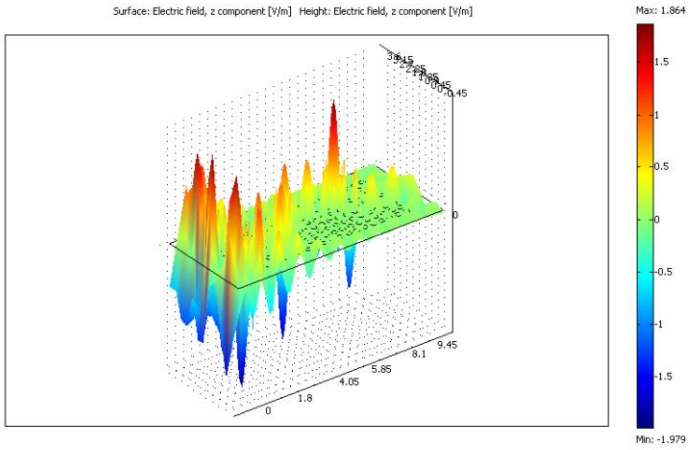
oluşturulan kusurlu bölge dalga yayılımı için uygundur ve dalga bu bölgede fotonik kristal tarafından kılavuzlanmıştır.



Şekil 3.4. λ = 913nm olan dalganın kıvrımsız FK içerisinde yayılımı.



(a)

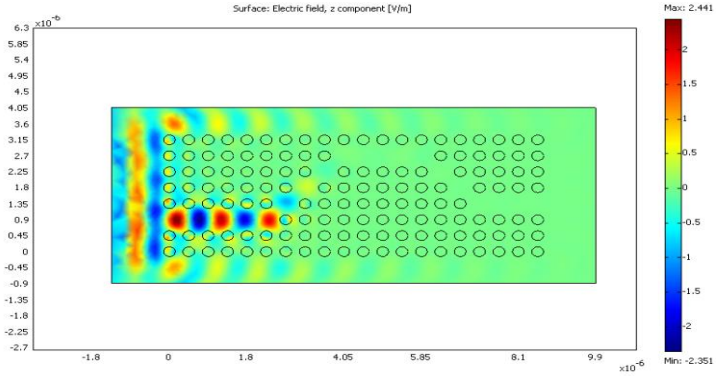


(b)

Şekil 3.5. λ=913nm olan dalganın kıvrımlı FK içerisinde yayılımı.
a) İki boyutlu
b) Üç boyutlu

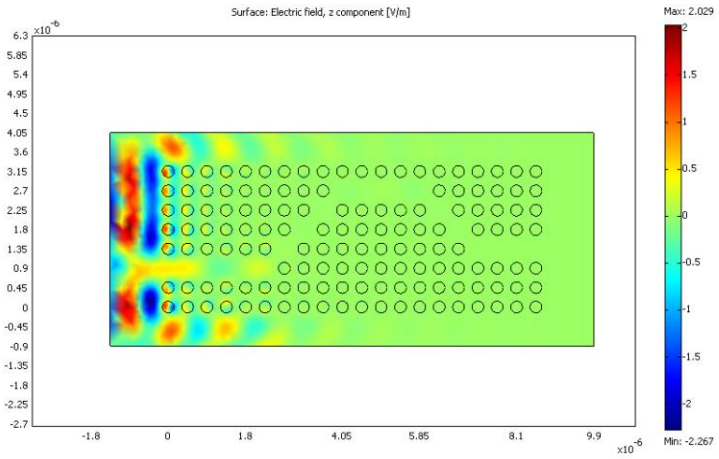
Bununla birlikte seçilen dalga boyundan daha küçük ve daha büyük dalga boylarında dalga yayılımını izleyebilmek için dalga boyunu λ=875nm değerine indirdiğimizde ve λ=975nm değerine yükselttiğimizde daha farklı bir durum sergilenmektedir.

Şekil 3.6'da fotonik kristal dalga kılavuzunda dalga boyu λ=875nm olan elektromanyetik dalga uygulandığı durum için dalga yayılımı gösterilmektedir. Dalga fotonik kristal içerisinde ilerlemeye başlamış ancak kıvrımdan daha ileriye yayılamamıştır.



Şekil 3.6. λ=875nm olan dalganın FK içerisinde yayılımı.

Şekil 3.7'de fotonik kristal dalga kılavuzunda dalga boyu λ=975nm olan elektromanyetik dalga uygulandığı durum için dalga yayılımı gösterilmektedir. λ=875nm dalga boyundaki ve λ=975nm dalga boyundaki dalga fotonik kristal içerisinde ilerleyememiştir.



Şekil 3.7. λ=975nm olan dalganın FK içerisinde yayılımı.

λ=875nm dalga boyundaki dalga kılavuzun geçirme bandının altında olduğundan dolayı dalga kılavuzlanmamıştır. Uygulanan dalganın dalga boyu revize edilerek λ=875nm'den daha kısa dalga boyları kullanıldığında dalga, kılavuz içerisinde ilerlemeyecektir. Benzer olarak λ=975nm dalga boyu kılavuzun geçirme bandının üstünde bir dalga boyu olduğu için dalga kılavuzlanmamıştır. Uygulanan dalganın dalga boyu revize edilerek λ=975nm'den daha uzun dalga boyları kullanıldığında dalga, kılavuz içerisinde ilerlemeyecektir. Fotonik kristalin sahip olduğu bant yapısının yanı sıra kusurlu bölge de bir bant yapısına sahiptir. Kusurlu bölgenin geometrisine ve bu geometriyi kapsayan kristal yapıya bağımlı olarak belirli bir bant aralığındaki dalgalar kılavuzlanmaktadır.

3.2.2. Fotonik Kristal Dalga Kılavuzunun Dalga Yayılımını Etkileyen Etmenler

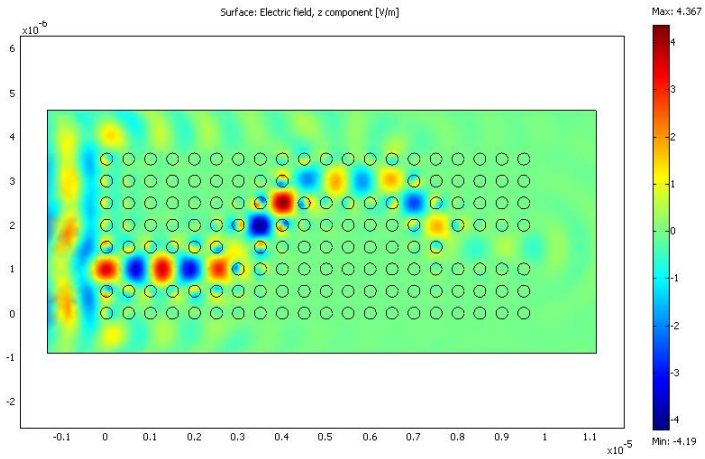
Fotonik kristal dalga kılavuzunda kılavuzun sahip olduğu geometrinin dalga yayılımına etkisinin incelenmesi için kılavuzun geometrisinde revizyona gidilmiştir. Kılavuz içerisindeki dielektrik bölgelerin çapı değiştirilmeden doluluk oranı r/a=0,27 olacak

şekilde farklı bir model oluşturulmuştur. Bu modelin parametreleri Tablo 3.2'de verilmiştir.

Tablo 3.2. Dalga kılavuzu modeli için parametreler

Parametre	**Değer**
Kristalin ebatı	12,5µm x 5,5µm (x,y)
Havanın dielektrik sabiti, n_{air}	1
GaAs dielektrik sabiti, n_{GaAs}	-3.3285e5*lambda0_emwe+3.5031
Elektrik alan, E_{0z}	1 V/m
Dalga boyu, λ	975nm
Doluluk oranı	0,27
Kristal örgüsü	Kare örgü

Şekil 3.8'de doluluk oranı 0,27 olan dalga kılavuzunda λ=975nm dalga boyuna sahip dalganın yayılımı gösterilmiştir. λ=975nm dalga boyuna sahip dalga 0,3 doluluk oranına sahip kılavuzda ilerlemez iken doluluk oranı 0,27 olduğunda ilerlediği görülmektedir. Bu sonuç, doluluk oranının düşürülmesi sonucu kılavuzun geçirme bandının daha uzun dalga boylarına kaydığını göstermektedir.



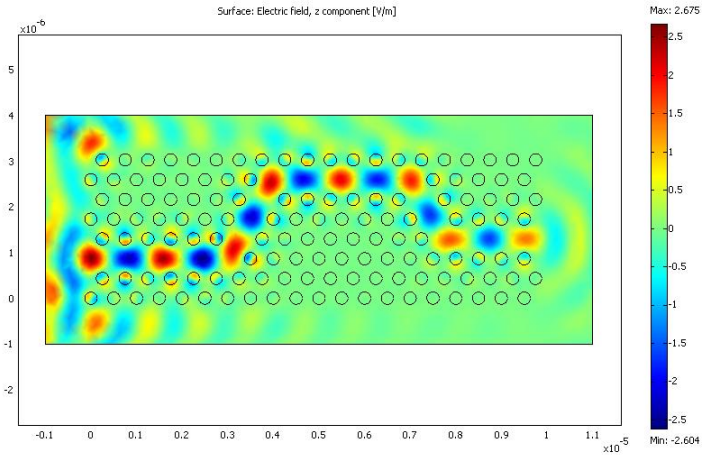
Şekil 3.8. λ=975nm olan dalganın doluluk oranı 0,27 olan FK içerisinde yayılımı.

Dalga kılavuzunun geometrisine ilişkin ayrıca kristal örgü yapısının da incelenmesi gerekmektedir. Doluluk oranı 0,27 olan dalga kılavuzunun örgü yapısı kare örgüden

üçgen örgüye değiştirildiğinde Şekil 3.9'daki dalga yayılımı elde edilmektedir. Bu modelin parametreleri Tablo 3.3'de verilmiştir.

Tablo3.3. Dalga kılavuzu modeli için parametreler

Parametre	**Değer**
Kristalin ebatı	12 µm x 5,5µm (x,y)
Havanın dielektrik sabiti, n_{air}	1
GaAs dielektrik sabiti, n_{GaAs}	-3.3285e5*lambda0_emwe+3.5031
Elektrik alan, E_{0z}	1 V/m
Dalga boyu, λ	975nm
Doluluk oranı	0,27
Kristal örgüsü	Üçgen örgü



Şekil 3.9. Üçgen örgü yapısındaki FK içerisinde dalga boyu λ=975nm olan dalganın dalga yayılımı.

Kristal örgüsü üçgen örgü olarak modellenen dalga kılavuzunda λ=975nm dalga boyuna sahip elektromanyetik dalganın kılavuz boyunca ilerlediği görülmektedir. Bu sonuçtan hareketle kare örgüye sahip dalga kılavuzu ile üçgen örgüye sahip dalga kılavuzunun geçirme bantları örtüşmektedir. Yalnız şu noktaya dikkat etmek gerekmektedir. Üçgen örgüye sahip dizilimde dielektrik bölgeler tüm komşu dielektrik bölgeler ile eşit mesafededir. Bunun sonucu olarak da fotonik kristal içerisindeki kusurlu bölgenin genişliği neredeyse tüm dalga kılavuzu boyunca sabit kalmaktadır. Ancak kare örgüye sahip dizilimde kusurlu bölgede genişlikler farklıdır. Buradan

hareketle, dalga kılavuzunda kıvrımlar mevcut ise kristal örgü yapısının dalga yayılımını etkileyebileceği söylenebilir.

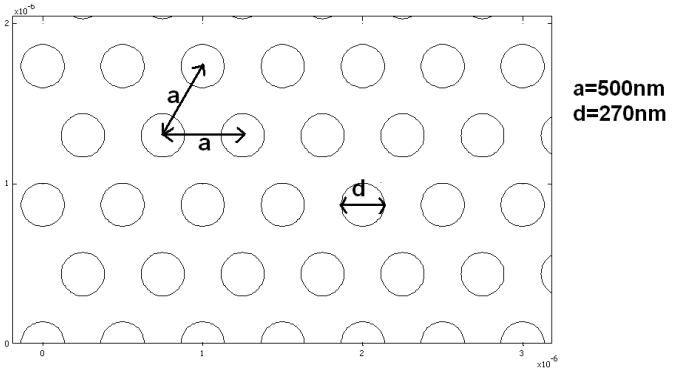
3.3. FEM ile Fotonik Kuplörlerin İncelenmesi

Bu tez çalışmasında, değişik kuplör tasarımları için dalga yayılımları FEM ile analiz edilmiştir. Bu kuplörler simetrik iki kollu, asimetrik iki kollu, simetrik N kollu ve asimetrik N kollu kuplörlerdir. Burada N, üç ve daha fazla çıkış koluna sahip kuplörler için çıkış kolunun sayısını ifade etmektedir. Simetrik iki kollu kuplörde dalga yayılımı incelenmiş ve aynı simetrik yapıya sahip farklı modeller ile karşılaştırma yapılmıştır. İki farklı asimetrik iki kollu kuplörde dalga yayılımı ve dalga yayılımını etkileyen etmenler incelenmiştir. Ayrıca herhangi sayıda çıkış koluna sahip kuplörler için simetrik ve asimetrik kuplörler modellenmiş ve bu kuplörler için genel bir yöntem ortaya konmuştur.

3.3.1. Simetrik Fotonik Kristal Kuplörün Modellenmesi

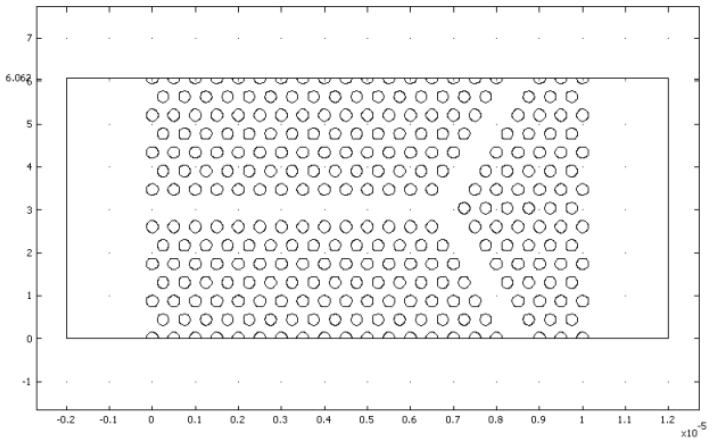
Ele alınan kuplör modellerinde hava içerisinde daire kesitli GaAs malzemeler üçgen örgü biçiminde hava ortamında dizilmiştir. Üçgen örgü içerisinden fotonik bant aralığındaki frekansların ilerleyebileceği bir yol boyunca örgü içerisindeki daire kesitli GaAs bölgelerin çıkartılması ile bir dalga kılavuzu oluşturulmuştur. Böylece dalga istenilen güzergâh doğrultusunda hapsedilecek ve bu yol boyunca kılavuzlanacaktır. Güzergâh ve fotonik kristalin yapısı fotonik kristal içerisinde yayılmakta olan elektromanyetik dalganın yayılımını doğrudan etkileyecektir.

Yapılan çalışmada fotonik kristaldeki GaAs bölgelerin yarıçapı r=135nm ve a=500nm'dir. Üçgen örgülü fotonik kristal Şekil 3.10'da verilmiştir. Verilen değerler güncel teknoloji ile üretilebilecek değerlerdir [38]. Deliklerin yarıçapı ile delikler arası uzaklık arasındaki oran r/a = 0,27 olmaktadır.



Şekil 3.10. Birim hücresi d çaplı dairelerden oluşmuş üçgen örgü.

İki adet birbirine eş kola sahip bir kuplör Şekil 3.11'de gösterilmiştir. Yapı bu haliyle iki boyutlu bir fotonik kristaldir. Üçgen örgülü fotonik yapı üzerinde kusurlar oluşturularak kuplör yapı elde edilmiştir.



Şekil 3.11. İki eş kola sahip kuplör yapı.

Örgü içerisinde kullanılan daireler GaAs olarak modellenmiş ve dielektrik sabiti de FEMLAB 3 Multiphysics Modelling programının referans aldığı [39] şekilde

n_{GaAs} = -3.3285e5*lambda0_emwe+3.5031

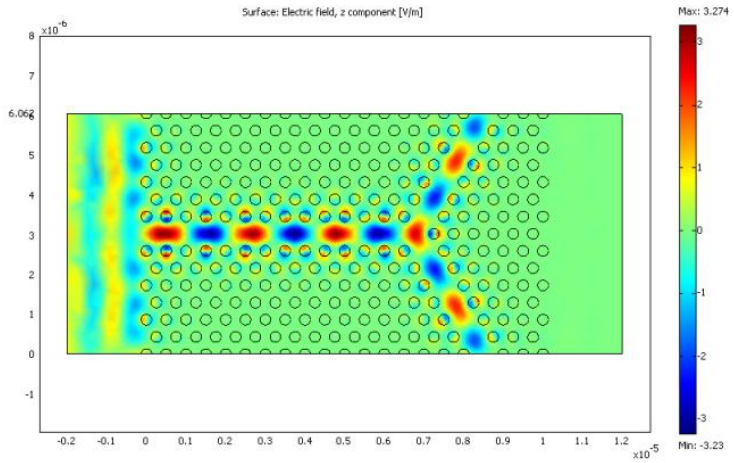
olarak verilmiştir. Geride kalan diğer boşluk bölgeler ise n_{air} =1 olarak modellenmiştir. Burada "lambda0_emwe" ile verilen değer, çalışmada kullanılan elektromanyetik dalganın boşluktaki dalga boyudur.

Modelde hava bölgesi sonsuz olarak modellenmemiş ve 14µm x 6µm ebadında sonlu kabul edilmiştir. Elektromanyetik dalga ortama salınırken kısa kenarlardan birinden tüm kenar boyunca z doğrultusundaki elektrik alanın bileşeni (E_{0z}) 1 V/m olarak kabul edilmiştir. Ayrıca Elektromanyetik dalganın boyu λ=1nm olarak ele alınmıştır. Kuplör modeline ait parametreler Tablo 3.4'de verilmiştir.

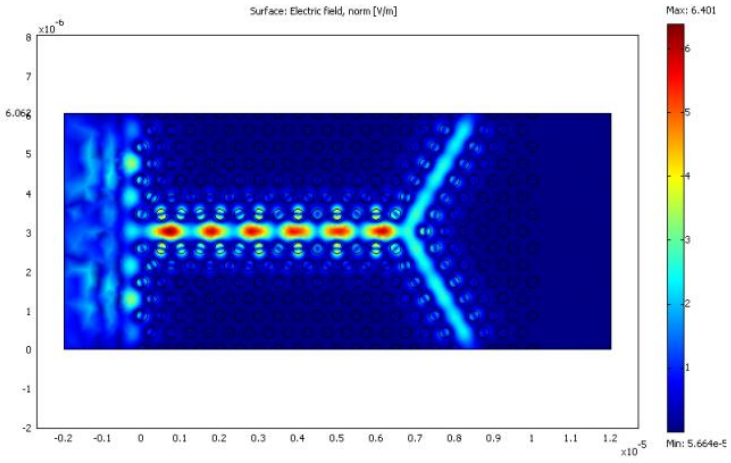
Tablo 3.4. FK kuplör modeli için parametreler

Parametre	**Değer**
Kristalin ebatı	14µm x 6µm (x,y)
Havanın dielektrik sabiti, n_{air}	1
GaAs dielektrik sabiti, n_{GaAs}	-3.3285e5*lambda0_emwe+3.5031
Elektrik alan, E_{0z}	1 V/m
Dalga boyu, λ	1nm
Doluluk oranı	0,27
Kristal örgüsü	Üçgen örgü

λ= 1nm dalga boyunda elektromanyetik dalganın fotonik kristal içerisinde yayılımı ve elektrik alan şiddeti Şekil 3.12'de verilmektedir. Görüldüğü gibi dalga, ilerlemesi için hazırlanan yol boyunca ilerlemiştir. Bununla birlikte dalga, kuplörün kollarında eşdeğer iki dalgaya ayrılmıştır. Şekil 3.13'de görüldüğü gibi iki bölgenin elektrik alan değerini gösterir eğriler üst üste çakışmaktadır.

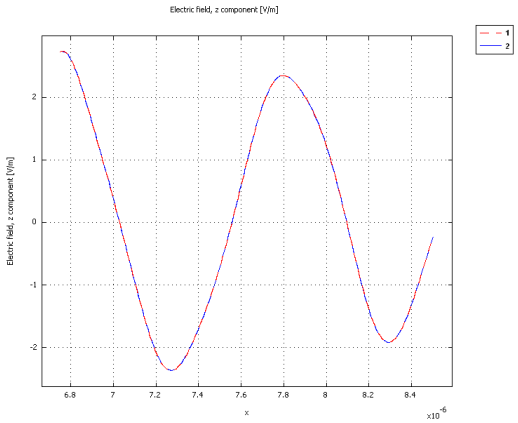


(a)



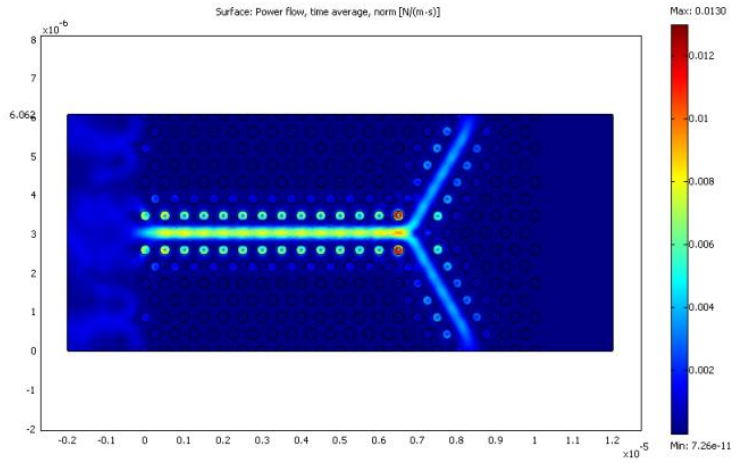
(b)

Şekil 3.12. Kuplör içersinde elektrik alan şiddeti.
a) Gerçek değerler
b) Normalize değerler



Şekil 3.13. Kuplör kollarında dalganın elektrik alan şiddeti. 1 eğrisi Şekil 3.12'deki aşağı kolu, 2 eğrisi ise yukarı kolu ifade etmektedir.

Kuplör kollarında dalganın elektrik alan şiddeti ve fazı aynı olan iki eş dalgaya ayrılmıştır. Bunun yanı sıra beklendiği üzere güç akışı da ikiye bölünmektedir. Fotonik kristal içerisindeki güç akışını gösterir sonuç Şekil 3.14'de gösterilmiştir.



Şekil 3.14. Kuplör üzerinde güç akışı.

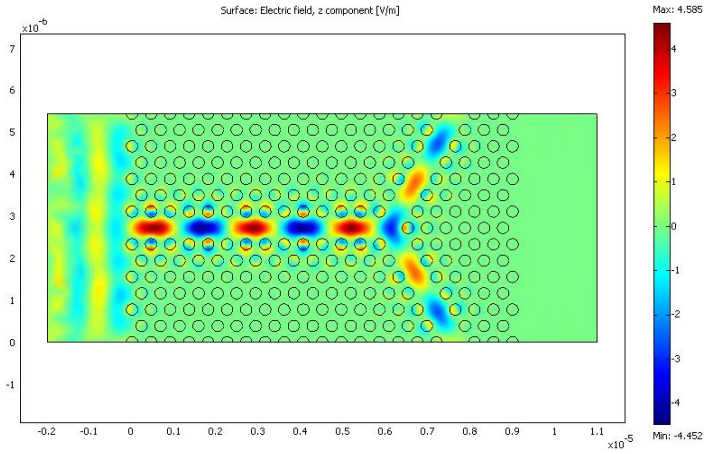
Simetrik kuplör, sahip olduğu tam simetrinin bir sonucu olarak, dalga boyu fotonik kristalin bant aralığında kalan elektromanyetik dalgayı veya sinyali ikiye bölmektedir.

3.3.2. Doluluk Oranının Simetrik Kuplöre Etkisi

Simetrik kuplör modelinin sahip olduğu geometrik özelliklerin dalga yayılımına olan etkisinin incelenebilmesi için geometrik yapıda bir takım revizyona ihtiyaç vardır. Öncelikli olarak kristalin doluluk oranında yapılan değişikliklerin dalga yayılımına etkisini ortaya koymak için kuplör Tablo 3.5'deki parametreler ile tekrar modellenmiş ve ilgili dalga yayılımı Şekil 3.15'de verilmiştir.

Tablo 3.5. FK kuplör modeli için parametreler

Parametre	**Değer**
Kristalin ebatı	13µm x 5,4µm (x,y)
Havanın dielektrik sabiti, n_{air}	1
GaAs dielektrik sabiti, n_{GaAs}	-3.3285e5*lambda0_emwe+3.5031
Elektrik alan, E_{0z}	1 V/m
Dalga boyu, λ	950nm
Doluluk oranı	0,3
Kristal örgüsü	Üçgen örgü



Şekil 3.15. Doluluk oranı 0,3 olan kuplör içerisinde elektrik alan şiddeti.

Doluluk oranındaki değişimin kuplörün gelen dalgayı ikiye ayırma karakterinde herhangi bir değişime yol açmadığı görülmektedir. Nitekim bu karakter fotonik kristalin parametre değerlerinin değil, yapının sahip olduğu genel simetrinin bir sonucudur. Ancak kuplörün doluluk oranının değişmesi bant aralığını değişmesine neden olmaktadır. Kristalin doluluk oranının yükselmesi sonucu kuplörün geçirgenlik bandı daha kısa dalga boylarına kaymıştır.

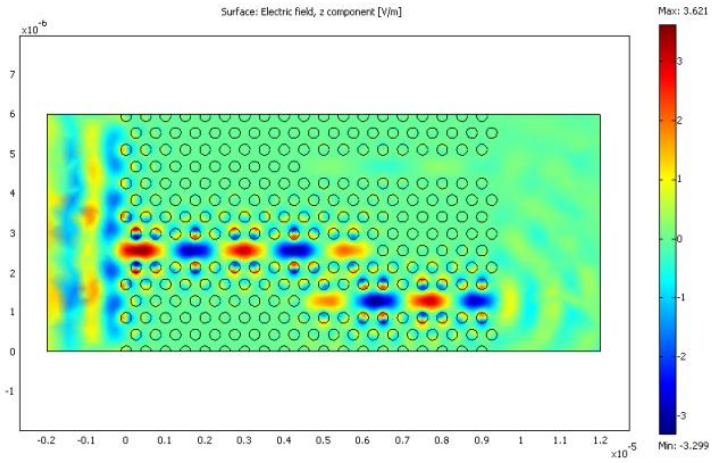
3.3.3. Asimetrik Fotonik Kristal Kuplör Modellenmesi

Bu çalışmada iki değişik model incelenmiştir. İlk modelde, giriş kolundaki elektromanyetik dalgayı, farklı genlikli iki parçaya ayıran asimetrik iki kollu fotonik kristal kuplör modellenmiştir. İkinci modelde ise, çıkış kollarında ilerleyen dalgalar arasında genlik ve faz farkı oluşturan kuplör modellenmiştir.

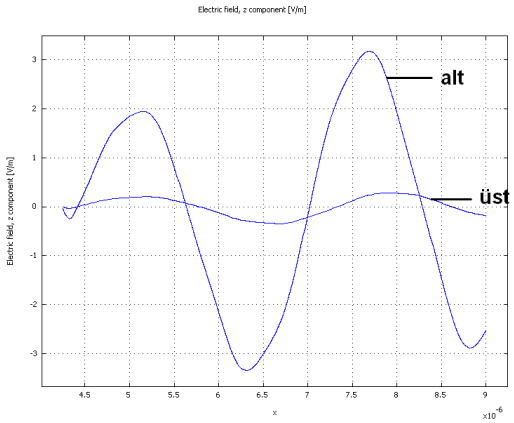
3.3.3.1. Model-1

Kuplörlerin bir başka kullanım amaçları ise dalgayı ve ışığı ½ oranı dışında başka keyfi oranlarda da bölebilmektir. Şekil 3.16'da dalga yayılımı, Şekil 3.17'de kollardaki elektrik alan şiddeti ve Şekil 3.18'de anlık güç akışı verilen fotonik kristal modeli bu düşünceye uygun bir kuplördür. Modellenen kuplörde dalganın fotonik kristalde ilerlemeye başladığı merkez kusur bölgesine 1,275µm ve 2,55µm uzaklıkta iki kusurlu

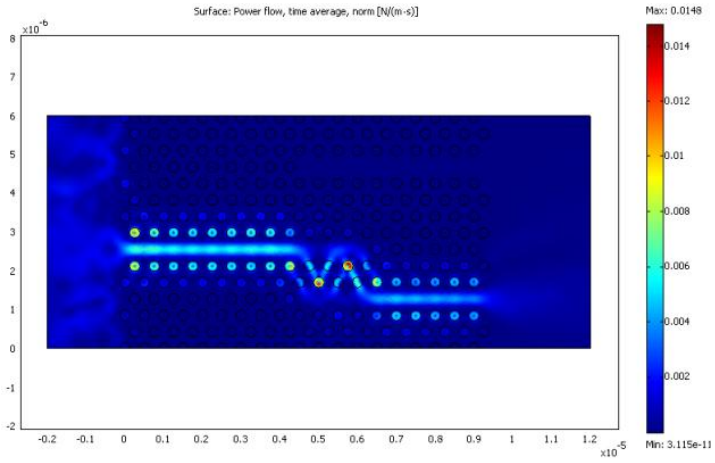
bölge oluşturulmuştur. Kuplörde çıkış kolu olarak oluşturulmuş kusurlu bölgeler eşit uzunluktadırlar.



Şekil 3.16. Fotonik kristal ile oluşturmuş asimetrik kuplörde elektrik alan şiddeti.



Şekil 3.17. Kuplör kollarında dalganın elektrik alan şiddeti.



Şekil 3.18. Asimetrik kuplör üzerinde güç akışı.

Kuplörün kolları arasındaki elektrik alan şiddetinin birbirine oranı, yaklaşık olarak $E_{üst}/E_{alt} = 1/10$ olmaktadır.

Üst bölgede ve alt bölgede elde edilen maksimum elektrik alan şiddetinin birbirine oranı ise;

$$E_{max\text{-}üst}/E_{max\text{-}alt} = -0,344 / -3,344 = 0,1028$$

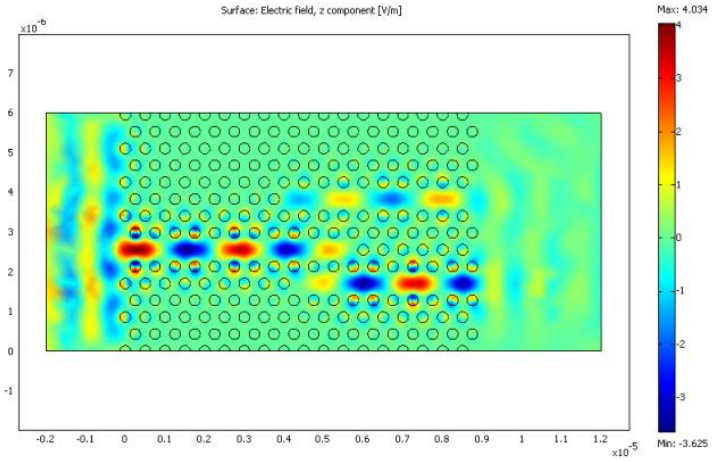
olarak hesaplanmaktadır.

Şekil 3.16'da dalga yayılımı gösterilen fotonik kristalde kuplör kolları ve kusurlar dalganın yayılmaya başladığı kusur bölgesine göre simetrik olmasa dahi kusurların x-eksenine göre eş noktalar kümesine sahip olduğu görülmektedir. Başka bir ifade ile de paralellik söz konusudur. Kuplörün alt ve üst kolları arasında bir paralellik olmasının yanı sıra herhangi bir simetrinin olmaması sonucu kollarda iletilen dalgaların elektrik alan şiddetlerine ait genlikler farklı olmaktadır. Elektrik alan şiddetleri oldukça farklı genlikte olmasına karşın açısal fazları birbirine çok yakındır.

Her iki bölge arasında elektrik alanın fazı ufak bir farklılık göstermektedir. Ancak fotonik kristal yapı daha da iyileştirilerek aradaki faz farkı sıfıra kadar azaltılabilir. Fotonik kristalin örgüsü dış yansımalar minimize edilebilecek kadar genişletilerek iyileştirme yapılabilir.

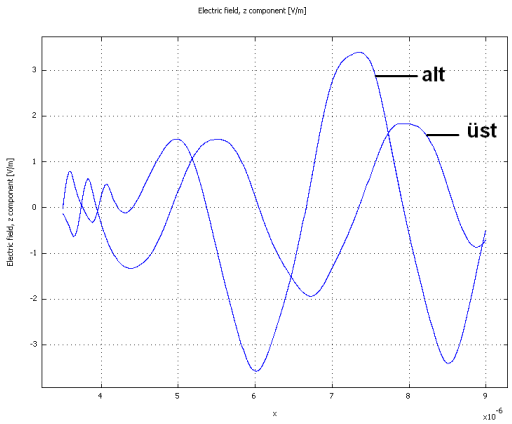
3.3.3.2. Model-2

Asimetrik kuplörde dalga yayılımı benzer bir model ile incelenmiştir. Bu modele ait dalga yayılımı Şekil 3.17'de gösterilmektedir. Dalga yayılımı gösterilen fotonik kristalde kusurlar dalganın yayılmaya başladığı bölgeye göre hem y-ekseni hem de x-eksenine göre farklı uzaklıklarda bulunan nokta kümelerinden seçilmiştir. Ayrıca kuplörde çıkış kolu olarak oluşturulmuş kusurlu bölgeler farklı uzunluktadırlar.



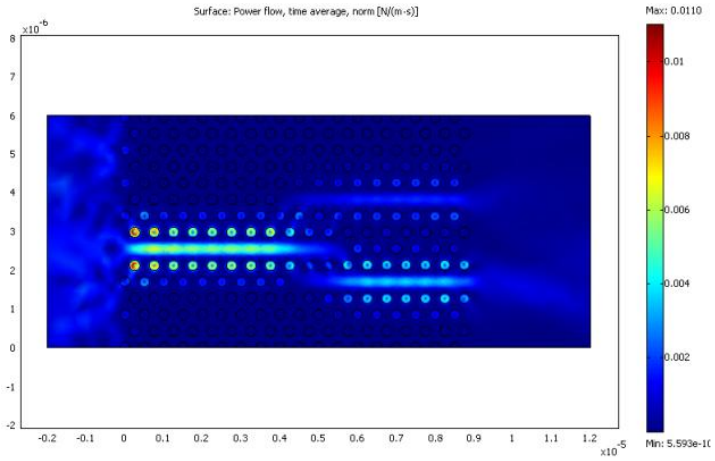
Şekil 3.19. Fotonik kristal ile oluşturmuş asimetrik kuplörde elektrik alan şiddeti.

Kuplör kolları arasında y-ekseni doğrultusunda bir ilişki bulunmamaktadır. x-ekseni doğrultusunda bir paralellik varmış gibi görünmesine karşın alt ve üst kolların uzunlukları farklıdır. Bu sebeple alt ve üst kollarda elektrik alanlar arasında açısal faz farkı doğmaktadır. Kuplörün alt ve üst kolundaki elektrik alan değişimi Şekil 3.20'de gösterilmiştir. Kuplör kolları dalgayı belli bir oranda ikiye ayırmanın yanı sıra iki dalganın fazları da birbirinden oldukça (yaklaşık 100°) farklıdır. Dalga yayılımı kollarda farklı fazlar ile ilerlemektedir. Ayrıca elektrik alan şiddeti, yayılım yönü doğrultusunca değişkendir. Bu sonuç iki kol arasında bir girişim olduğunu göstermektedir.



Şekil 3.20. Kuplör kollarında ilerleyen dalganın elektrik alan şiddeti.

Dalganın kuplör kollarında harcadığı anlık güç değerleri de farklıdır. Kuplör anlık güç akışı Şekil 3.21'de verilmiştir. Dalganın taşıdığı güç giriş kolundan çıkış kollarına geçişler sırasından GaAs bölgelerde yoğunlaşmıştır. Bunun sebebi bu bölgelerde dalga vektörünün (k) hava ortamına göre daha büyük olmasıdır.



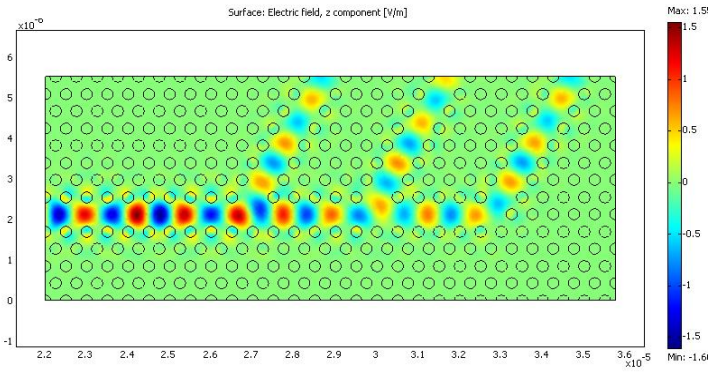
Şekil 3.21. Asimetrik kuplör üzerinde güç akışı.

3.3.4. Simetrik N Çıkışa Sahip Fotonik Kristal Kuplör Modellenmesi

Bölüm (3.3.1.)'de iki çıkış koluna sahip simetrik kuplör modeli incelenmiştir. Bu modelde ise çıkış kolu sayısı belirlenebilir bir simetrik kuplör modellenmiştir. Kuplör N=3 için modellenmiştir. Modele ilişkin parametreler Tablo 3.6'da, dalga yayılımı ise Şekil 3.22'de gösterilmiştir.

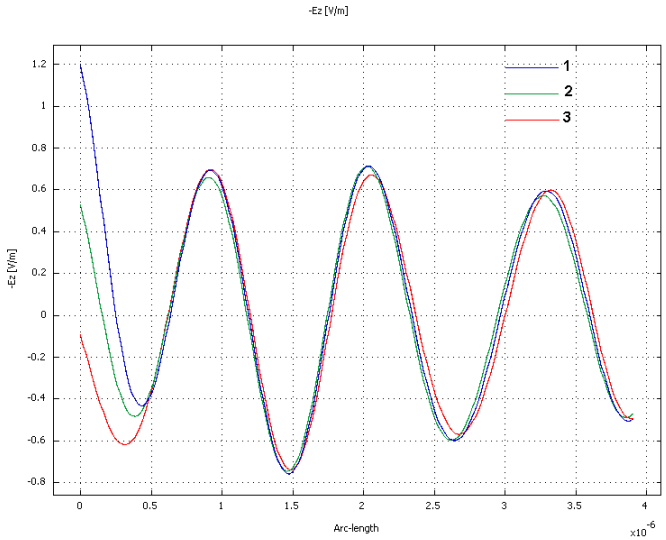
Tablo 3.6. FK kuplör modeli için parametreler

Parametre	**Değer**
Kristalin ebatı	14µm x 5,6µm (x,y)
Havanın dielektrik sabiti, n_{air}	1
GaAs dielektrik sabiti, n_{GaAs}	-3.3285e5*lambda0_emwe+3.5031
Elektrik alan, E_{0z}	1 V/m
Dalga boyu, λ	908nm
Doluluk oranı	0,27
Kristal örgüsü	Üçgen örgü



Şekil 3.22. Simetrik kuplörde dalga yayılımı (N=3).

Kuplör giriş kolundaki dalgayı üç eşit dalgaya ayırmıştır. Kuplör kolları soldan sağa doğru numaralandırılırsa 2 numaralı kol 1 ve 3 numaralı kollara göre (-1) çarpanlı elektrik alan şiddetine sahiptir. Bu değişimin tercih edilmediği uygulamalar için 2 numaralı kusurlu bölge yerine farklı bir kusurlu bölge oluşturularak tam eşitlik sağlanabilir. Kuplör kollarındaki elektrik alan şiddetleri 2 numaralı sonucun (-1) ile çarpılması ile Şekil 3.23'de verilmiştir.

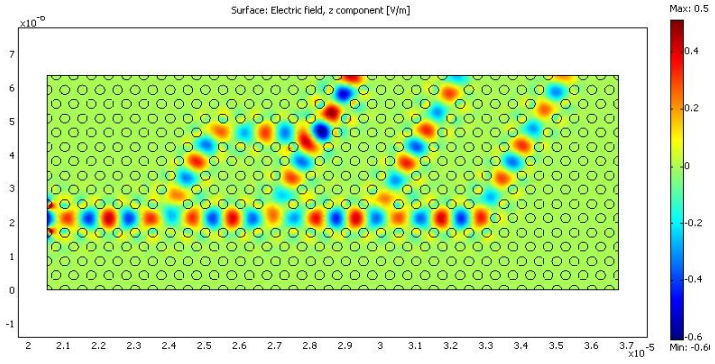


Şekil 3.23. Simetrik kuplörün çıkış kollarındaki elektrik alan şiddetleri.

Model üç çıkış koluna sahip bir kuplör modelidir ve farklı kuplör modelleri için (N>3) yeniden tasarlanabilir. Kuplör giriş kolundaki dalgayı N sayısınca eşit parçalara ayırmaktadır. Yeni tasarımlar için modelin geometrisinin değiştirilmesi yeterli olmaktadır.

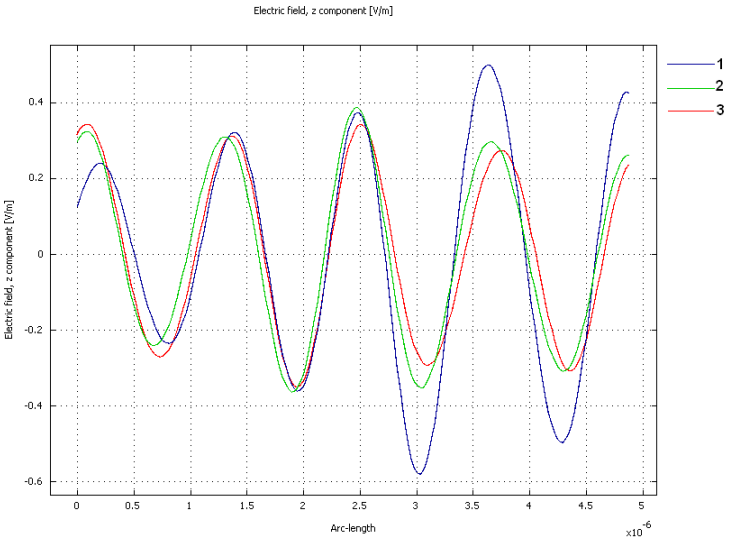
3.3.5. Asimetrik N Çıkışa Sahip Fotonik Kristal Kuplör Modellenmesi

Bu modellemede Bölüm (3.3.4.)'de tasarımı verilen N=3 çıkışa sahip modele asimetrik yapı kazandırılmıştır. Mevcut modelde elde edilen simetrik çıkışlardan hareketle asimetrik çıkışlar elde edilmiştir. Modelde 1 numaralı çıkış kolu, giriş koluna iki farklı kusurlu bölge ile bağlanmaktadır. Bu modele ait dalga yayılımı Şekil 3.24'de verilmiştir.



Şekil 3.24. Asimetrik Kuplörde dalga yayılımı (N=3).

Kuplör giriş kolundaki dalgayı üç dalgaya ayırmıştır. Kuplör kolları soldan sağa doğru numaralandırılırsa 2 numaralı kol 1 ve 3 numaralı kollara göre (-1) çarpanlı sonuçlara sahiptir. Ayrıca 1 numaralı çıkış kolu 2 ve 3 numaralı kolların yaklaşık iki katı elektrik alan şiddetine sahiptir. Kuplör kollarındaki elektrik alan şiddetleri 2 numaralı kuplörün (-1) ile çarpılması ile Şekil 3.25'de verilmiştir.



Şekil 3.25. Asimetrik kuplörün çıkış kollarındaki elektrik alan şiddetleri.

Model N=3 çıkış koluna sahiptir ve çıkış kolları eşit değildir. 2 ve 3 numaralı çıkış kollarında elektrik alan şiddetleri birbirine eşittir. Bunun yanı sıra 1 numaralı çıkış kolunda ise diğer çıkışlardan daha şiddetli elektrik alan şiddeti bulunmaktadır.

4. BÖLÜM

TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmada fotonik kristal yapılar ile elde edilen kuplör modellerinde elektromanyetik dalga yayılımı ve yayılımın fotonik yapı ile olan ilişkileri temeli sonlu elemanlar yöntemine dayanan benzetim teknikleri ile incelenmiştir. Çalışmada fotonik kristal dalga kılavuzu ve aynı fotonik yapıya sahip kusurları birbirinden farklı üç değişik fotonik kristal kuplör incelenmiştir. Çalışmada kuplör yapıları tayin edilirken fotonik kristalde sadece kusurların yapısal farklıkları ile dalga yayılımının nasıl etkileneceği ve bu farklılıkların ne gibi sonuçlar doğurabileceği sorularına yanıt bulunması amaçlanmıştır.

İlk olarak ele alınan normal dalga kılavuzu ile farklı dalga boylarındaki elektromanyetik dalgaların fotonik kristal içerisindeki davranışı incelenmiştir. Modelde dalga kılavuzunun açısal frekansı fotonik bant boşluğu içersinde kalan dalganın yayılımı ile bant boşluğunun altında ve üstünde açısal frekansa sahip dalgaların fotonik kristal içerisinde yayılımı incelenmiştir. Fotonik kristalin sadece fotonik bant boşluğu içerisindeki açısal frekansların yayılmasına yol açması ve bant boşluğu dışındaki frekansların sönümlenmesi fotonik kristal dalga kılavuzunun, dalga kılavuzu olarak işlev görmesinin yanı sıra aynı zamanda bir bant geçiren filtre işlevi de görmektedir.

Kuplör modellerinden simetrik iki kollu kuplör, sahip olduğu simetrik yapı sayesinde, açısal frekansı fotonik bant aralığı içinde kalan elektromanyetik dalgayı birbirine eş iki parçaya bölmektedir. Bu özelliği ile yapı ikiye bölme işlemi yapmaktadır ve 3dB kuplör olarak kullanılabilmektedir. Kuplörün her iki kolunda ilerleyen dalganın faz ve genlik değerleri eşittir. Bu eşitliğin doğal bir sonucu olarak her iki kolda harcanan güç eşittir. Elde edilen kuplör yapı özellikle birbirine eşit iki (veya farklı simetrik yapılar için daha fazla) sinyale ihtiyaç duyulan uygulamalar için uygun bir çözüm olarak görünmektedir.

Benzer olarak iki (veya farklı simetrik yapılar için daha fazla) sinyalin birbiri ile birleştirilmesi gereken uygulamalar için de uygun bir çözüm olabilir.

Fotonik kristalin üretiminde kullanılan ortamların çalışmada kullanılan ortamlardan daha farklı olması durumunda etkin indis, elektromanyetik alan şiddeti, anlık güç vb. değerler için farklı sonuçlar elde edilecektir. Fotonik kristalin örgü yapısı değiştirilmeden GaAs bölgelerin çapı ve/veya GaAs bölgelerin birbirine olan mesafesinin değiştirilmesi ile fotonik bant yapısı değiştirilebilir ve çalışma farklı frekans bölgelerine kaydırılabilir. Bu değişimlerin yanı sıra fotonik kristalin geometrik yapısı korunuyor ise kuplörün davranışı değişmeden kalacaktır.

Asimetrik kuplör modellerinden birinci kuplör modelinde ise yapı asimetriktir. Yapıdaki asimetri, fotonik kristalin dalga kılavuzu eksenine sadece y-ekseni doğrultusunda farklı mesafelerde kusurların oluşturulması ile sağlanmıştır. Fotonik kristalin simetri merkezinde yayılan elektromanyetik dalganın farklı uzaklıklardaki kusurları nasıl etkilediği incelenmiştir. Böylece elektromanyetik dalganın fotonik kristal içerisinde ve kusurlarda kat ettiği mesafe ile nasıl etkilendiği daha iyi anlaşılmaktadır. Modellenen kuplörde dalganın fotonik kristalde ilerlemeye başladığı merkez kusur bölgesine farklı uzaklıkta iki kusurlu bölge oluşturulmuştur. Kusurlu bölgelerde yayılan dalganın elektrik alan şiddeti bu mesafeler ile ters orantılı olarak birbirinden farklıdır. Kuplörün aşağı ve yukarı ayrılan kollarında yayılan dalganın elektrik alan şiddetlerinin birbirine oranı, yaklaşık olarak $E_{üst}/E_{alt} = 1/10$ olmaktadır. Bu yapı ile yakın bölgedeki elektrik alanın uzak bölgedeki elektrik alan şiddetinin yaklaşık 10 katı elektrik alan oluşması sağlanmıştır. Bu durumda kuplör modelinde bir sinyalin farklı genliklerde iki örneği elde edilmektedir. Modelin bu özelliği bilgi taşıyan bir işaretten örnek alınmasını gerektiren kuplör uygulamalarında tercih edilebilecek bir özelliktir.

Asimetrik kuplör modellerinden ikinci kuplör modelinde kuplörün ayrım kollarının oluşturulması için seçilen kusurlu bölgelerin oluşturduğu kümeler birbiri ile hem x-ekseni hem de y-ekseni boyunca farklı noktaları kapsamaktadır. Asimetrik geometrinin sonucu olarak farklı genlikte elektrik alan şiddeti elde edilmesinin yanı sıra, bu modelde ayrıca farklı fazda elektrik alanlar elde edilmektedir. Kuplörün kollarındaki faz farkı oldukça yüksektir.

Çalışmada incelenen modellerde güç akışları incelendiğinde harcanan gücün, dalganın yayıldığı kusurlu bölgelerin hava ortamında elektrik alan şiddeti ile doğru orantılı olarak yoğunlaştığı görülmektedir. Ayrıca kusurlu bölgelerin bitiminde GaAs bölgelerde harcanan güç değerleri yüksektir.

Asimetrik kuplör modellerinde kusurlu bölgelerin birbirine yaklaştığı geçiş bölgelerinde, güç akışı yüksek indisli GaAs ortamlarda yoğunlaşmaktadır. Bu durumun sebebi ise kusurlarda hava ortamında yayılan modların daha yoğun bir dielektrik ortama geçişi sırasında dalga vektörünün (k) büyümesidir.

N çıkış koluna sahip simetrik ve asimetrik modeller geliştirilebilir tasarımlar için örnek teşkil etmektedir. Her iki model de istenilen farklı N sayıları için tekrar modellenebilirler.

Fotonik kristal tasarımları farklı dielektrik ortamlar ve farklı frekanslar ile genişletilebilir. Güçlü bilgisayarlar ile daha geniş boyutlarda fotonik kristal modelleri oluşturulabilir ve bu şekilde modeller iyileştirilebilir. Fotonik kristal yapı üzerinde hava ve GaAs ortamların geometrik büyüklükleri değiştirilerek veya fotonik kristali oluşturan örgü yapısı değiştirilerek yeni tasarımlar yapılabilir.

KAYNAKLAR

1. Rayleigh, J.W.S., On The Remarkable Phenomenon of Crystalline Reflexion Described by Prof. Stokes, Phil. Mag. 26, 256-265 (1888).
2. Demir, H., Fotonik Kristaller Üzerine Bir İnceleme, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Kayseri 2005.
3. Cuesta-Soto, F., et al, All-optical Switching Structure Based on a Photonic Crystal Directional Coupler, Optics Express, 12(1), 2004.
4. Yeh, P., Yariv, A., Hong, C. S., Electromagnetic Propagation in Periodic Stratified Media, J. Opt. Soc. Am., 67, 423, 1977.
5. Yablonovitch, E., Inhibited Spontaneous Emission Solid-state Physics and Electronics, Phys. Rev. Lett., 58, 2059, 1987.
6. John, S., Strong Localization of Photons in Certain Dicordered Dielectric Superlattices, Phys. Rev. Lett. 58, 2486, 1987.
7. Noda,S., Tomoda, K., Yamamoto, N., and Chutinan, A., Full Three-Dimensional Photonic Bandgap Crystals at Near-Infrared Wavelengths, Science, 289(5479), 2000.
8. Peng L., Absorption and emission properties of photonic crystals and metamaterials, Master Thesis, Iowa State University, Iowa, 2007.
9. Li, M., The Study of Electromagnetic Wave Propagation in Photonic Crystals Via Planewave Based Transfer (Scattering) Matrix Method With Active Gain Material Applications, Ph. D. Thesis, Iowa State University, Ames,Iowa, 2007.
10. Yu, X., Anamalous Spatial Dispersion in Photonic Crystals, Ph. D. Thesis, Stanford University, 2008.
11. Villeneuve, P.R., et al., Single-mode Waveguide Microcavity for Fast Optical Switching, Optics Letters, 21(24), 1996.
12. Loncar, M., Yoshie T., Scherer A., Low-threshold Photonic Crystal Laser, Applied Physics Letters, 81(15), 2002.
13. Sakoda, K., Ohtaka, K., Ueta, T., Low-threshold Laser Oscillation Due to Group-velocity Anomaly Peculiar to Two- and Three-dimensional Photonic Crystals, Optics Express, 4(1) 1999.

14. Uranus, H.P., Hoekstra, H.J.W.M., Groesen, E., Modes of an Endlessly Single-Mode Photonic Crystal Fiber: A Finite Element Investigation, 9th Annual Proceedings Symposium IEEE/LEOS Benelux Chapter, 2004.
15. Kuang, W., Photonic Crystal Waveguides, Ph. D. Thesis, University of Southern California, California, 2005.
16. Jiang, Y., Photonic Crystal Waveguides Based Active and Passive Devices for Phased Array Antenna Systems, Ph. D. Thesis, University of Texas, Austin, 2006.
17. Noda, S., et al. Semiconductor Photonic Crystals, Science, 293, 1123, 2001.
18. Yoshie, T., Vuckovic, J., Scherer, A., High Quality Two-dimensional Photonic Crystal Slab Cavities, Applied Physics Letters, 79(26), 1-3, 2001.
19. Qiang, Z., Zhou, W., Soref, A., Optical Add-drop Filters Based on Photonic Crystal Ring Resonators, Optics Express, 5(4), 2007.
20. Y.-J. Lee, P.V. Braun, Three-dimensional Photonic Crystal Sensors, Proceedings Symposium IEEE/LEOS Bellingham Chapter, 2003.
21. Martinez A., et al., Analysis of Wave Propagation in a Two-dimensional Photonic Crystal With Negative İndex of Refraction: Plane Wave Decomposition of the Bloch Modes, Optics Express, 13(11), 4160-4175, 2005.
22. Ghattan Z., Hasek T., Shahabadi M., Koch M., Coupling of Free Space Sub-terahertz Waves into Dielectric Slabs Using PC Waveguides, Optics Express, 16(9), 2008.
23. Park, I., et al., Photonic Crystal Power-splitter Based on Directional Coupling, Optics Express, 12(5), 2004.
24. Yamamoto, N., Ogawa, T., Komori K., Photonic Crystal Directional Coupler Switch With Small Switching Length and Wide Bandwidth, Optics Express, 14(3), 2006.
25. Hu Z., Lu, Y.Y., Efficient Analysis of Photonic Crystal Devices by Dirichlet-to-Neumann Maps, Optics Express, 16(22), 2008.
26. Chen C.C., et al., Photonic Crystal Directional Couplers Formed by InAlGaAs Nano-rods, Optics Express, 13(1), 2005.
27. Çicek, A., 2 Boyutlu Doğrusal Olmayan Fotonik Kristallerin Modellenmesi ve Band Yapılarının Eldesi, Yüksek Lisans Tezi, Akdeniz Üniversitesi, Antalya, 2006.
28. Bulu, İ., Novel Approaches to Control the Propagation of Electromagnetic Waves: Metamaterials and Photonic Crystals, Bilkent Üniversitesi, Doktora Tezi, 2007.

29. Guo, S., Photonic Crystals: Modelling and Simulation, Ph. D. Thesis, Old Dominion University, USA, 2003.
30. FEMLAB 3 Multiphysics Modelling, http://www.comsol.com.
31. Dineen C., et al., Electromagnetic Field Structure and Normal Mode Coupling in Photonic Crystal Nanocavities , Optics Express, 13(13), 2005.
32. Çakmak, A.Ö., Photonic Crystal Based Sensing Using Band Edge Modulation, Yüksek Lisans Tezi, Sabancı Üniversitesi, İstanbul, 2005.
33. Foteinopoulou S., Electromagnetic Wave Propagation in Two-dimensional Photonic Crystals, Ph. D. Thesis, Iowa State University, Iowa, 2003.
34. Fogli F., Saccomandi L., Bassi P., Full Vectorial BPM Modeling of Index-Guiding Photonic Crystal Fibers and Couplers, Optics Express, 10(1), 2002.
35. Turner, M.J, Clough R.W., Martin H.C., Topp L.J., Stiffness and Deflection Analysis of Complex Structures, Aero. Sci., 23 (9), 1956.
36. Pomplun, J., et al., Finite Element Simulation of Radiation Losses in Photonic Crystal Fibers, Physica Status Solidi A Art. 204(11), 2007.
37. Azizurrahman B.M., et al. Finite Element Modal Solutions of Planar Photonic Crystal Fibers with Rectangular Air-holes, Optical and Quantum Electronics 37, 171–183, 2005.
38. Witzens, J., Dispersion in Photonic Crystals, California İnstitute of Technology, Ph. D. Thesis, California Institute of Technology, Pasadena, 2005.
39. Lien, C.S. , Physics of Optoelectronic Devices, Wiley-interscience, 1st Edition, 25 Aug 1995.

ÖZGEÇMİŞ

04.02.1984 yılında Kayseri'de doğdu. Orta öğrenimini Sema Yazar Anadolu Lisesi'nde tamamladı. 2006 yılında İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümünden mezun oldu. Aynı yıl Erciyes Üniversitesi Fen-Bilimleri Enstitüsü'nde yüksek lisans eğitimine başladı. Türk Telekom Kars İl Müd.'nde elektrik-elektronik mühendisi olarak çalışmaktadır.

Adres: Beyazşehir mah. 827. Sok. Emek apt. Daire:9

Kocasinan/ Kayseri

Telefon: 0352 251 33 23

e-posta: yavuz.almali@turktelekom.com.tr