

**BİR BOYUTLU RASGELE KRİSTAL YAPILAR: HALKALI KRİSTAL
TASARIMLARI, GENETİK ALGORİTMA UYGULAMALARI VE
FOTONİK YASAKLI BAND HESAPLARI**

MELİH GÖKTUĞ CAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ

TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

AĞUSTOS 2015

ANKARA

Fen Bilimleri Enstitü onayı

Prof. Dr. Osman EROĞUL

Müdür

Bu tezin Yüksek Lisans derecesinin tüm gereksinimlerini sağladığını onaylarım.

Prof. Dr. Murat ALANYALI

Anabilim Dalı Başkanı

Melih Göktuğ CAN tarafından hazırlanan “BİR BOYUTLU RASGELE KRİSTAL YAPILAR: HALKALI KRİSTAL TASARIMLARI, GENETİK ALGORİTMA UYGULAMALARI VE FOTONİK YASAKLI BAND HESAPLARI” adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Hamza KURT

Tez Danışmanı

Tez Jüri Üyeleri

Başkan : Yrd. Doç. Dr. Rohat MELİK

Üye : Doç. Dr. Hamza KURT

Üye : Yrd. Doç. Dr. İlyas Evrim ÇOLAK

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.

(İmza)

(Adı Soyadı)

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 2015

Melih Göktuğ CAN

**BİR BOYUTLU RASGELE KRİSTAL YAPILAR: HALKALI KRİSTAL
TASARIMLARI, GENETİK ALGORİTMA UYGULAMALARI VE
FOTONİK YASAKLI BAND HESAPLARI**

ÖZET

E. Yablonovitch ve S. John'un 1987 senesinde yayımlanan çalışmaları sayesinde Fotonik Kristaller (FK) hakkındaki araştırmalar zamanla artan bir ilgi oluşturdu. Fotonik kelimesi fotonlar vesilesiyle gerçekleştirilen işlemleri kastederken farklı kırılma indisli dielektrik malzemelerin periyodik olarak dizilmesiyle bu fotonların manipüle edildiği ortamlar FK olarak adlandırılmaktadır. Aslında fotonlarla ilgili bu yapının ardındaki temel bakış açısı kuantum mekaniğine dayanmaktadır. Belirli dalga özelliğini gösteren elektronların yarı-iletken bir kristal yapı içerisinde belirli yönlerde ilerleyebilmesi gibi fotonlarında periyodik yapılarda tıpkı elektronlar gibi ilerleyeceği öngörülmüş ve elektronik yasaklı bantların bir benzerinin fotonlar için de geçerli olduğu gösterilmiştir. Kristal yapının örgü potansiyeli yeterince yüksekse eğer herhangi bir yönde elektron iletimi sağlanamaz örneğin, valans bandı ile iletim bandı arasında enerjiye sahip elektronlar yarı iletken malzemelerde iletilememektedir, benzer şekilde fotonlar için FK örgü yapısının oluşturabileceği bir Fotonik Yasaklı Bant (FYB) söz konusudur. İşte bu özelliklerinden dolayı FK'lar pek çok çalışmada kullanılmışlardır. Bunların başlıca bir tanesi de bir boyutlu nano dalga klavuzu yapılarıdır. Bu yapılarda temel olarak sadece FK örgünün desteklediği frekans aralığında iletim yapar ve geniş bir FYB içerebilirler; ancak bu dielektrik yapılardaki periyodik kırılma indisi geçişlerindeki bir bozukluk, dolayısıyla periyodikliğin bozulması durumunda yasaklı bandın içerisinde iletim gerçekleşebilir. Bu durum genel olarak elektromanyetik (EM) dalganın bozukluğun bulunduğu

bölgede hapsolmasına (kavite) ve bu hapsolmanın yoğunluğuna (Q faktör) bağlı olarak EM dalganın zamanla ya iletim yoluyla yapı içerisinde ilerleyerek (Q_w) ya da sızma yoluyla yapının etrafını saran dielektrik malzemeye geçerek (Q_a) sonlanmasına neden olur. Bu çalışmada, bu tür bir boyutlu (1B) kavite yapılarının özellikleri yapıyı oluşturan FK'lar rastgele yerleştirildiği durumlar için incelenmiştir. Ayrıca farklı polarizasyonlarda EM dalgalar için yapının rezonans sağladığı kavite frekanslarının keşişmesi dolayısıyla yapının polarizasyon bağımsız olması sağlanmıştır. Ayrıca tamamen rasgele yerleştirilmiş 1B FK yapıların genetik algoritma uygulamalarıyla kavite değerlerinin arttırılması ve bu yapılara ait FYB hesaplamalarının analitik çözümleri bu tezin önemli kazanımlarıdır.

Anahtar Kelimeler: Fotonik kristaller, Elektromanyetik dalgalar, Fotonik yasaklı bant aralığı, Bir boyutlu fotonik kristaller, Nano dalga, Kavite yapıları, Rezonatörler.

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. –**

Melih Göktuğ CAN

**ONE DIMENSIONAL RANDOMLY LOCATED CRYSTAL STRUCTURES:
ANNULAR DESIGNS, GENETIC ALGORITHM IMPLEMENTATIONS AND
PHOTONIC BAND GAP CALCULATIONS.**

ABSTRACT

E. Yablonovich and S. John's pioneering studies about Photonic Crystals (PCs) have gathered the interest of researchers around world since the time that the idea was proposed in 1987. . The term "photonic" describes operations related to photons within a medium that is composed of periodically generated dielectric structures with different refractive indices. Such materials are designed to manipulate the photons propagation and they are called Photonic Crystals. In fact, fundamentals of the photonic crystal structure is based on quantum mechanics. Similar to electrons movement under the presence of periodically varying potential in a semi-conducting crystal, photons in periodic dielectric structures behave like electrons in many ways. If lattice potential of the crystal structure is high enough electron propagation in any direction is forbidden. For example, electrons which have insufficient energies, with respect to valance band and conduction band energy differences, can not propagate in semi conductor materials, similarly PC lattice may generate a complete Photonic Band Gap (PBG) in which no photon is allowed to propagate. Due to this unique feature of the PC's, they are investigated in many different studies. One structure that is heavily explored is the one dimensional nanobeam waveguide structures. Mainly, this kind of structures transmits photons in allowed states and there may appear a broad PBG; however, if there is a defect in the periodically modulated refractive index variation, a transmission of photons for defect states in the PBG region can occur. This usually results in trapping of electromagnetic (EM) wave in the defect

region. The defect mode with Q-value consumes it in time by propagating in the waveguide (Q_w) and by leakages to the surrounding dielectric material (Q_a). In this work, properties of the 1D cavity structures are investigated in the case of the 1D PCs composed of randomly located air holes. Besides, cavity resonance frequency overlapping for the EM waves in different polarizations is investigated. In other words, polarization independent cavity structure is achieved. Besides, Q factor enhancement for 1D PC structures with genetic algorithm implementation and analytic PBG calculation of the structures are important explorations performed in the presented thesis.

Keywords: Photonic crystals, Electromagnetic waves, Photonic band gap, 1D photonic crystals, Nanobeam, Cavity structures, Resonators.

TEŞEKKÜR

Beni daima araştırma için Őevklendiren, ufuk aan önermelerde bulunan, her Őeyden önemlisi insanlığıyla örnek olan sevgili hocam Doç. Dr. Hamza KURT'a, olmasaydı çalışmalarım hep eksik kalacak olan değerli dostum Bilgehan Barış ÖNER'e, hayatımda bana ışık tutan, tüm doğru adımlarımdın arkasındaki isim sevgili eşim Ayşenur CAN'a ve yine kıymetli tecrübelerinden faydalandığım TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerine ve tüm TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi ailesine teőekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

| | |
|--|------|
| ÖZET..... | iv |
| ABSTRACT..... | vi |
| TEŞEKKÜR..... | viii |
| İÇİNDEKİLER..... | ix |
| TABLoların LİSTESİ..... | x |
| ŞEKİLLERİN LİSTESİ..... | xi |
| KISALTMALAR..... | xiv |
| SEMBOL LİSTESİ..... | xvi |
| 1. GİRİŞ..... | 1 |
| 1.1. Tanıtım ve Çalışmanın Amacı..... | 1 |
| 1.2. Dalga Klavuzları ve Elektromanyetik Analizleri..... | 5 |
| 1.3. Halkalı Fotonik Kristaller..... | 10 |
| 2. BİR BOYUTLU NANO DALGA KILAVUZLARINDA MODİFİYE DELİKLİ FOTONİK KRİSTALLERLE POLARİZASYONDAN BAĞIMSIZ KAVİTE OLUŞTURULMASI..... | 15 |
| 2.1. Halkalı Fotonik Kristal ile 1B Kavite Tasarımı..... | 17 |
| 2.2 HFK'le Tasarlanmış 2 ve 3B yapını Sonlu Farklı Zaman Düzlemi Methoduyla İncelenmesi | 24 |
| 3. MODİFİYE GENETİK ALGORİTMA KULLANILARAK RASTGELE YERLEŞTİRİLMİŞ 1 BOYUTLU FOTONİK KRİSTAL YAPILAR VE YASAKLI BANT ARALIKLARININ HESAPLANMASI..... | 36 |
| 3.1 Genetik Algoritmanın 1B FK Yapılara ygulanması..... | 36 |
| 3.2 Rasgele Dizilmiş 1B FK yapılarda FYB Hesabı..... | 41 |
| 4.SONUÇ..... | 51 |
| KAYNAKLAR..... | 53 |
| ÖZGEÇMİŞ..... | 57 |

TABLULARIN LİSTESİ

| Tablo | Sayfa |
|--|--------------|
| Tablo 2.1. Yapının farklı bölümlerinde TE ve TM modda ilerleyen dalga tarafından hissedilen efektif kırılma indisleri..... | 33 |
| Tablo 3.1 Değişen delik sayısına bağlı, periyodik dizilmiş 1B FK yapıda ve rasgele yerleştirilmiş 1B FK yapıda kavite değerleri..... | 39 |

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

| Şekil | Sayfa |
|--|-------|
| Şekil 1.1. 1B, 2B ve 3B FK'ların basit bir gösterimi. Farklı renkler, farklı kırılma indise sahip dielektrik malzemeleri göstermektedir. FK'ların kristal örgü özelliklerini, bir veya daha fazla eksen boyunca görülen periyodikliği belirler. | 2 |
| Şekil 1.2. Durum yoğunluğunun şematik gösterimi, (a) serbest uzay ve yanında serbest uzay durum yoğunluğu frekans ilişkisi (b) bir boyutlu fotonik kristal ve yanında bu örgüye ait durum yoğunluğu, (c) bir boyutlu fotonik kristal ve ortasında kusur, yanında bu yapıya ait durum yoğunluğu grafiği ve kusur modu. | 4 |
| Şekil 1.3 Örnek 1B FK yapılar, a) temel kavite tasarımı, b) yüksek kavite elde edilmiş ayna segment ve konikleştirilmiş deliklerden oluşan kavite tasarımı, c) dikdörtgen şekilli ayna segment ve araları daraltılarak oluşturulan kusur bölümü, d) eğimli FK ler kullanılarak oluşturulan kusur bölümü ve yüksek modda elde edilen yüksek kavite değeri | 5 |
| Şekil 1.4. Geleneksel bir 1B periyodik FK örnekleri , a) üzerine açılmış hava delikleriyle oluşturulan 1B fotonik Kristal dalga klavuzu, b) hava ortamında periyodik dizilmiş FK, c) hava ortamında doluluk oranı periyodik değiştirilerek kırılma indisi varyasyonu sağlanan çok katmanlı FK yapı | 6 |
| Şekil 1.5 Dalga kavuzları ve dağılım diyagramları, a) standart dalga klavuzu koyu renk çevreleyen ortamdan farklı kırılma indisini ifade eder, b) klasik dalga klavuzunun periyodik olarak bölümlenmesiyle oluşturulmuş FK dalga klavuzu, c) klasik dalga klavuzuna ait dağılım diyagramı, d) FK dalga klavuzuna ait dağılım diyagramı | 7 |

| | |
|--|----|
| Şekil 1.6. Bir arayüze gelen, bu arayüzden yansıyan ve iletilen Elektrik, Manyetik alan ve dalga vektörü bileşenleri. | 9 |
| Şekil 1.7. a) Kare örgü, havaya dizilmiş silindirik dielektrik fotonik kristaller, b) üçgen örgü, dielektrik malzemenin içerisine açılmış hava delikleri. | 10 |
| Şekil 1.8. a) Kare örgüde TM moda ait, b) kare örgüde TE moda ait, c) üçgen örgüde TM moda ait, d) üçgen örgüde TE moda ait dispersiyon grafikleri. | 11 |
| Şekil 1.9. Kare ve üçgen örgüdeki 2B HFK yapılarına ait dispersiyon diyagramları. Düz çizgiler TM kesikli çizgiler TE modu ifade etmektedir. Boyalı alanlar her iki mod için FYB ları göstermektedir. a) Kare örgüde dış yarı çap 0.49a, iç yarıçap 0.02a, b) kare örgüde iç yarıçap 0.49a, iç yarıçap 0.11a c) üçgen örgüde dış yarıçap 0.47a, iç yarıçap 0.02a, d) üçgen örgüde dış yarıçap 0.47a, iç yarıçap 0.14a. | 13 |
| Şekil 2.1. Geleneksel 1B nano kavite dalga klavuzu yapısı | 17 |
| Şekil 2.2. a)Klasik bir 1B FK dalga klavuzunda TE ve TM mode iletim spektrumu, b) yapının ortasına düzensizlik eklendiğinde yapının iletim spektrumu ve düzensizlik modları. | 19 |
| Şekil 2.3 Polarizasyondan bağımsız 1B kavite yapısı için düzenlenen yapı ve tasarım parametreleri. | 20 |
| Şekil 2.4 HFK lerle oluşturulan 1B FK yapıya ait iletim spektrumu. | 22 |
| Şekil 2.5 L1 ve L2 değerlerine bağlı frekans farkı grafiği. | 25 |
| Şekil 2.6 Φ_1 ve Φ_2 değerlerine bağlı frekans farkı grafiği. | 27 |

| | |
|---|----|
| Şekil 2.7 3B araştırmaların sonucunda elde edilen optimum 3B yapı, yapısal bazı parametreler ve kırılma indisi değerleri. | 28 |
| Şekil 2.8 3B HFK yapıya ait iletim spektrumu | 29 |
| Şekil 2.9 3B yapının zamana bağlı a) TE mod Hz alan dağılımı, b) TM mod Ez alan dağılımı. | 30 |
| Şekil 2.10 3B yapının yükseklik ve genişliğe bağlı a) TE kusur modu rezonans frekanslarının oluşturduğu, b) TM kusur modu rezonans frekanslarının oluşturduğu örgüler. | 31 |
| Şekil 2.11 Yükseklik ve genişlik değerlerine bağlı olarak hem TE hem de TM modda kavite oluşan frekansların değişimi. | 32 |
| Şekil 2.12 Yapının ortasındaki normalize alan dağılımları a) TE polarizasyon, b) TM polarizasyon için. Devamlı ışık kaynağı yapının tam ortasına konmuş ve kararlı hal dağılımı çizdirilmiştir. | 34 |
| Şekil 2.13 3B yapının HFK kullanılmadan a) HFK yerine aynı kırılma indisli FK kullanılırsa elde edilen tasarım, b) 4 yerine 2 HFK kristal kullanılarak elde edilen tasarım, c) a' da verilen yapının iletim spektrumu, d) b' de verilen yapının iletim spektrumu. | 35 |
| Şekil 3.1 Yarı rasgele çok katmanlı dielektrik dizilimler a) Fibonacci serisine uygun dizilimin 6,7 ve 8. katmanları, b) Cantor serisine uygun dizilim. | 37 |
| Şekil 3.2 Rasgele dizilmiş 1 boyutlu Fotonik Kristal yapı | 38 |
| Şekil 3.3 Bir Boyutlu Fotonik Kristal Periyodik Yapı | 42 |
| Şekil 3.4 a) örnek rasgele yapı ve bölümlenmesi b) dielektrik katmanlar ve ABCD matrisi için gerekli parametreler. | 46 |

Şekil 3.5 Üstte rasgele dizilmiş simetrik 8 delikle oluşturulmuş FK yapı, allta bu yapıya ait ABCD matrisden hesaplanan Eşitlik 3.13'ün grafiği ve bu grafiğe fit edilmiş eğri. 48

Şekil 3.6 a) Rasgele yapıya ait iletim-frekans grafiği, b) Periyodik yapıya ait iletim-frekans grafiği 49

KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış olan kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Kısaltmalar Açıklama

| | |
|------------|-------------------------------|
| FK | Fotonik Kristal |
| EM | Elektromanyetik dalga |
| 1B | Bir Boyutlu kristal yapılar |
| 2B | İki Boyutlu kristal yapılar |
| 3B | Üç Boyutlu kristal yapılar |
| FYB | Fotonik Yasaklı Bant Aralığı |
| HFK | Halkalı Fotonik Kristaller |
| TM | Enine Manyetik Elektrik Alanı |
| TE | Enine Elektrik Alan |

SEMBOL LİSTESİ

Açıklama

Bu çalışmada kullanılmış olan simgeler, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

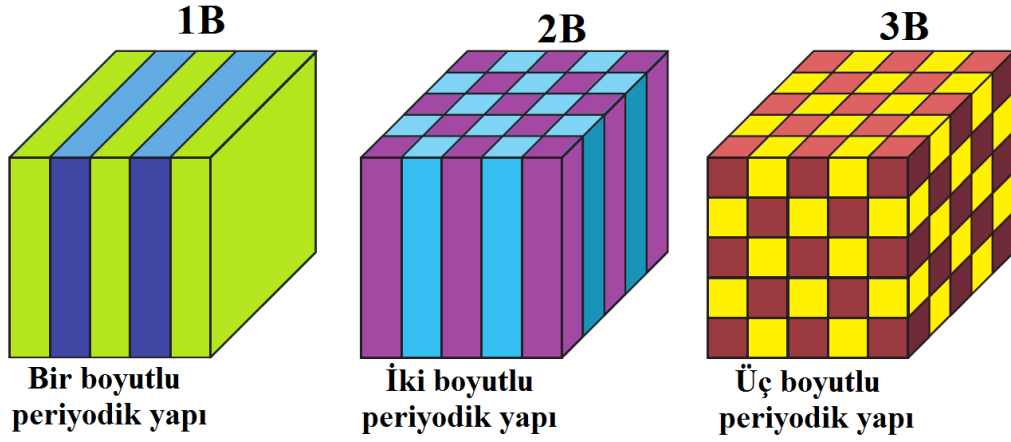
| | |
|-------------|---|
| k | Dalga vektörü |
| c | Hava Ortamında Yayılan Işık Hızı |
| n | Dielektrik Malzemenin Kırılma İndisi |
| a | Kristal Örgü Sabiti |
| $\omega(k)$ | Dalga Vektörü k 'ya Karşılık Gelen Açısal Frekans |
| n | Elektromanyetik Dalganın Kırılma İndisi |
| k_y | Dalga Vektörü k 'nın Boyuna Bileşeni |

1. GİRİŞ

1.1. Tanıtım ve Çalışmanın Amacı

Fotonik kristaller (FK) fotonların istenilen şekilde yönlendirilmesi, kontrol edilmeleri, için kullanılan bir veya çok boyutlu yapılardır [1]. Fotonik kristallerin en temel ve bu çalışmaya da yön veren özelliklerinden biri fotonik kristallerin frekans düzleminde yasaklı bant oluşturabilmeleri ve bunun kontrolüne yapısal veya malzeme tabanlı değişimler sayesinde izin vermeleridir [2]. Periyodik fotonik yapılarda yasaklı bant çalışmaları fotonik kristallerin icadından öncesine dayanır. Erwin Schrödinger'in elektronun potansiyelinin periyodik değişimi için bir dalga denklemi oluşturabilmesi elektronik gibi fotonik alanında da potansiyelin periyodik değişimini açıklamıştır. Fotonik kristallerle beraber iki ve üç boyutlu yapılarda da fotonun saçılımının kontrol edilebileceği öngörülmüştür. Farklı kırılma indislerinin periyodik dizildiği bu örgülere ilk olarak E. Yablonovitch Fotonik Kristal demiştir. Aynı yıl aynı dönemde kendisiyle benzer yapılarla çalışan S. John bu periyodik yapılarda oluşturulacak düzensizliklerin (kusurların), yapının yasaklı bandının içerisinde bir "kusur modu" oluşturacağını savunmuştur[3]. Fotonik kristallerin fotonik yasaklı bant çalışmaları için kullanımı bu çalışmayla beraber önemli bir araştırma araştırma konusu haline gelmiştir.

Amerikalı fizikçi P. W. Anderson yarı iletkenlerin içerisinde elektronların lokalize olabileceğini gösteren ilk kişidir [4]. Yapıdaki rastgelelilik ya da düzensizlik yeterince güçlü ise elektron dalga hareketini bozulacağını ve "durum yoğunluğu" diye adlandırılan bir lokalizasyonun gerçekleşebileceğini düşünmüştür. S. John'un 1987'deki çalışmasında yasaklı bant bölgesinin içerisinde oluşacağını öngördüğü "düzensizlik modu" teorisi tam olarak Anderson'un lokalizasyon modeline dayanmaktadır.



Şekil 1.1. 1B, 2B ve 3B FK'ların basit bir gösterimi. Farklı renkler, farklı kırılma indise sahip dielektrik malzemeleri göstermektedir. FK'ların kristal örgü özelliklerini, bir veya daha fazla eksen boyunca görülen periyodikliği belirler[1].

Serbest uzayda ilerleyen bir foton elektromanyetik spektrumun herhangi bir yerinde yani frekans uzayında her hangi bir noktada olabilir. Ancak Şekil 1'de gösterildiği gibi farklı boyutlarda oluşturulabilecek Fotonik kristal örgülerde, örgü sabiti, birbirini takip eden farklı malzemelerin kırılma indisleri, yapının sonlu olması durumunda, sonlu yapının kaç periyot olduğu gibi parametrelere bağlı olarak fotonun ilerlemesi belirli frekans ve yönlerde engellenebilir. Bu frekans bölgesi yasaklı bant olarak adlandırılmaktadır. Ve yine serbest uzayda saçılan fotondan bahsedecek olursak, bu fotona ait ışımının bir dalga denklemi olduğunu düşünürsek 2π 'lik periyodun dalga boyuna oranı “ k ” dalga sayısını verir. Buradan ışığın açılma frekansını hesaplayacak olursak:

$$\omega = ck \tag{1.1}$$

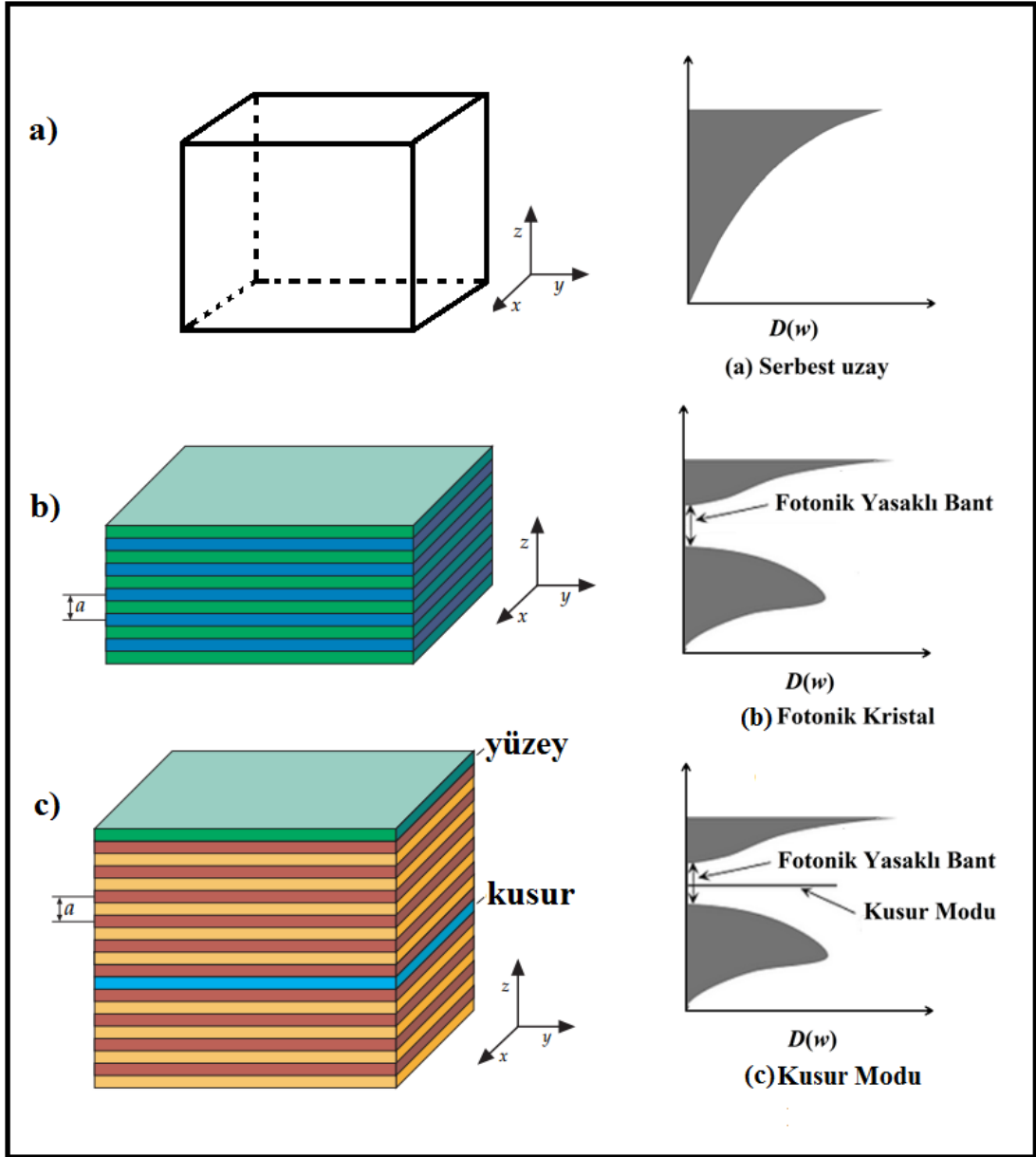
ifadesi ışığın saçılım ilişkisini verir[5,6]. Burada serbest uzay yerine kırılma indisi n olan bir ortam kullanılır ise “ c ” ışık hızı yerine ışığın bu ortamdaki ilerleme hızı “ $v = c/n$ ” ifade kullanılmalıdır. Fotonları çevreleyen ortamdaki bir “ V ” hacminin içerisinde durum yoğunlukları:

$$D(\omega) = \frac{\omega^2 V}{\pi^2 c^3} \quad 1.2$$

ile gösterilir. Burada yine serbest uzay yerine farklı bir ortam getirilirse ışık hızı yerine ortamın iletim hızı konulmalıdır. Işığın optik kontrolü için en temel yöntem ifade edilen durum yoğunluğunun kontrolüdür. Fotonik kristal yapılar ve bu yapıların periyodik örgülerindeki bir düzensizlik dolayısıyla periyodikliğin bozulması (kusur), ilk olarak Anderson daha sonra John'un ifade ettiği gibi ışığın yapı içerisinde ilerlerken özellikle bu bölgede lokalize olmasını sağlayacaktır. Anderson lokalizasyonu ile ifade edilen fenomenin fotonik araştırmadaki karşılığı bu durumdur.

Şekil 1.2.b'de görüldüğü gibi fotonik kristal örgü belirli frekanslarda ışığın saçılımını engellemektedir (Fotonik Yasaklı Bant) ve Şekil 1.2.c'de gösterildiği üzere yapıya bilinçli olarak eklenen bir kusur bu yasaklı bantın içerisinde bir saçılım frekansı oluşturmaktadır. Bu çalışmada bundan sonra farklı yapılarda da olsa genel olarak incelenen optiksel özellik bu mekanizmaya dayanmaktadır. Çalışmada bu noktada oluşan enerji yoğunluğuna “kavite”, ve bu kaviteye ait frekansa da “kavite frekansı” denecektir.

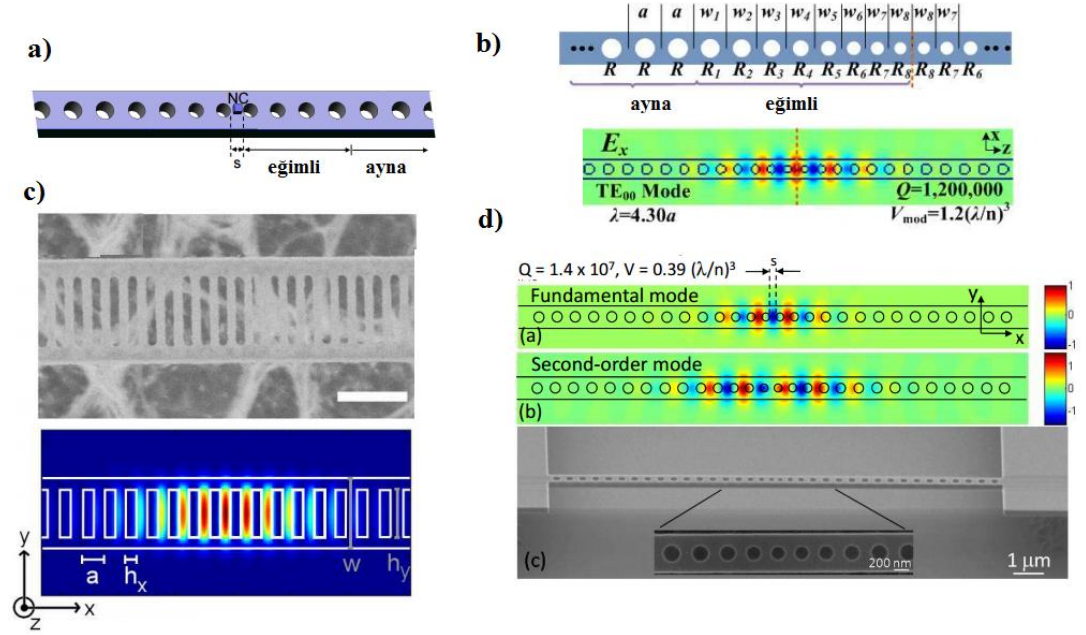
Kavite kelimesinin Türkçe tam karşılığı çukur, çınlac, oyuk kelimeleridir. Işığın kusurlu bölgede özellikle konuşlanması, Fabry-Perot ve dağılmış Bragg yansımalarından kaynaklanmaktadır, ve bu bölgedeki elektromanyetik alanın zamana göre spektral analizi enerjinin bu düzensiz bölgede hapsediğini gösterir. Bu nedenle kavite kelimesi alanın düzensiz modda lokalize oluşunu ifade etmek için uygundur.



Şekil 1.2. Durum yoğunluğunun şematik gösterimi, (a) serbest uzay ve yanında serbest uzay durum yoğunluğu frekans ilişkisi, (b) bir boyutlu fotonik kristal ve yanında bu örgüye ait durum yoğunluğu, (c) bir boyutlu fotonik kristal ve ortasında kusur, yanında bu yapıya ait durum yoğunluğu grafiği ve kusur modu.

1.2. Dalga Kılavuzları ve Elektromanyetik Analizleri

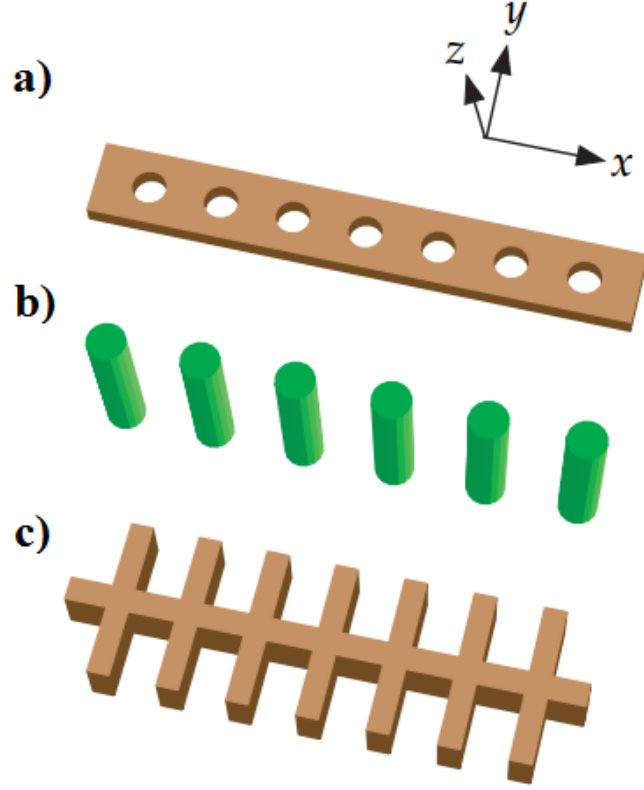
Son dönemde 1B fotonik kristal yapıların literatürde sıklıkla araştırılan yapılar olduğu görülmektedir[7-10]. Bu çalışmalarda araştırmacılar 1B FK yapıların değişik parametreleriyle oynayarak oldukça yüksek kaviteler elde etmişlerdir. Yapılarda kullanılan ayna segmentler sabit yarıçaplı FK'lerden oluşmaktadır ve daha sonra kusur bölgesine doğru FK yarı çapları doğrusal ya da yüksek dereceden fonksiyonlara orantılı olarak düşürülmektedir. Bu sayede çok yüksek kavite değerleri elde etmek mümkün olmaktadır. Bu çalışmalara ait görseller ve yapılar Şekil 1.3'de verilmiştir.



Şekil 1.3 Örnek 1B FK yapılar, (a) temel kavite tasarımı, (b) yüksek kavite elde edilmiş ayna segment ve konikleştirilmiş deliklerden oluşan kavite tasarımı, (c) dikdörtgen şekilli ayna segment ve araları daraltılarak oluşturulan kusur bölümü, (d) eğimli FK ler kullanılarak oluşturulan kusur bölümü ve yüksek modda elde edilen yüksek kavite değeri[7-10].

Işığın 2B yapılarda ilerlemesinin engellenmesi ve bütün enerjinin 1B hareket etmesinin çeşitli avantajları ve uygulamaları vardır. 1B FK dalga kılavuzları, dalga kılavuzunun modifiye edilmesi, FK'ların parametrelerinin ayarlanması, periyodik örgünün düzenlenmesi, FK'ların konikleştirilmesi ve benzeri pek çok yöntemle

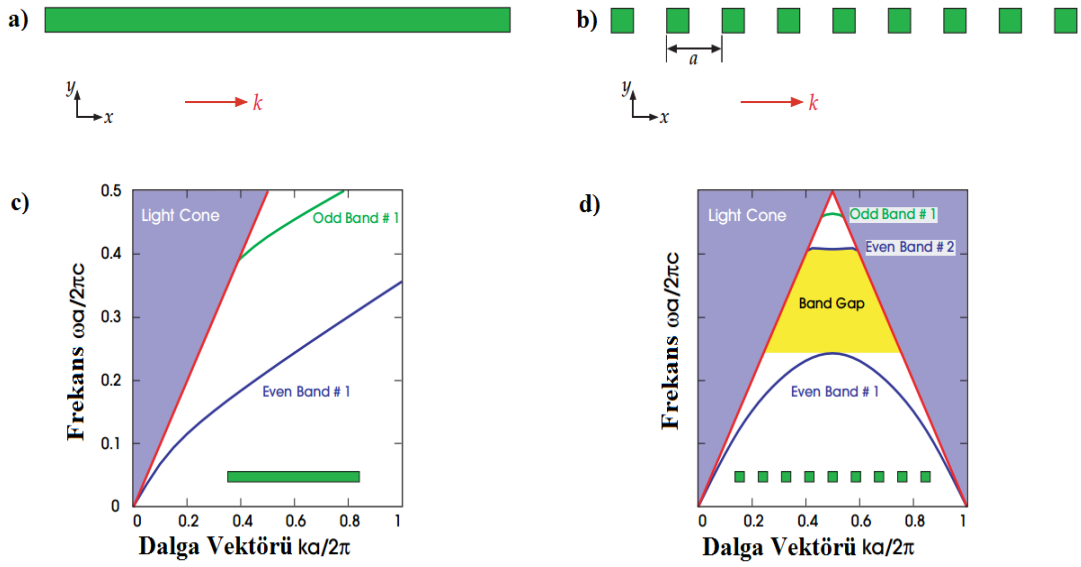
alışılmış ve bu yapıların ışığı iletme, hapsetme gibi özellikleri geliştirilmiştir. Şekil 1.4’de klasik bir 1B FK dalga klavuzu farklı formlarda gösterilmektedir.



Şekil 1.4. Geleneksel bir 1B periyodik FK rnekleri , a) zerine açılmış hava delikleriyle oluşturulan 1B fotonik Kristal dalga klavuzu, b) hava ortamında periyodik dizilmiş FK, c) hava ortamında doluluk oranı periyodik değiştirilerek kırılma indisi varyasyonu sağlanan çok katmanlı FK yapı[1].

Şekilde koyu ve açık renk farkı kırılma indisi farkını işaret etmektedir. Yapı ilgili dalga boyu aralığında ışığın bir boyutta ilerlemesini sağlayan bir dalga klavuzu yapısıdır. Geleneksel olarak silika yapının üzerine açılan hava delikleriyle oluşturulur, bizim çalışmalarımızda da bu Şekilde değerlendirildi; ancak farklı materyaller de kullanmak mümkündür. Şekil 1.5’de standart bir dalga klavuzunun periyodik olarak bölünmesiyle elde edilen bir boyutta periyodik FK dizisi

gösterilmektedir. Ayrıca Şekil 1.5.c ve 1.5.d'de bu iki farklı duruma ait ışık dağılım diyagramı verilmiştir. Sadece basit bölümlere ayırmak, böylece periyodik kırılma indisi değişimi sağlamak hemen çok geniş bir Fotonik Yasaklı Band (FYB) oluşturmakta hem de farklı modların dağılımının frekans ilişkisini yüksek dereceli denklemlere dönüştürmektedir. Frekansla ışık saçılımı arasındaki bu doğrusal olmayan ilişki aynı kılavuzda benzer uyarımlarla farklı frekanslarda, hızlı ışık, yavaş ışık, negatif kırılma indisi gibi fenomenlerin oluşturulabilmesini sağlamaktadır.



Şekil 1.5 Dalga kılavuzları ve dağılım diyagramları, a) standart dalga kılavuzu koyu renk çevreleyen ortamdan farklı kırılma indisini ifade eder, b) klasik dalga kılavuzunun periyodik olarak bölümlenmesiyle oluşturulmuş FK dalga kılavuzu, c) klasik dalga kılavuzuna ait dağılım diyagramı, d) FK dalga kılavuzuna ait dağılım diyagramı[1].

Bu dalga kılavuzlarının elektromanyetik (EM) analizlerini gerçekleştirmek için çalışmalarımız esnasında FDTD (Sonlu Farklı Zaman düzlemi) sayısal yöntemi kullanılmıştır. EM dalga denklemleri doğrudan Maxwell denklemlerinden türetilmektedir. Eğer ortamı optik dalga yayılımı için makul kabul edersek, yani kayınsız, doğrusal ve izotropik bir ortam kabul edersek Maxwell denklemlerinden

EM alanın zamana ve pozisyona bağılı denklemlerini çekmek oldukça kolaydır. Buradan dalga denklemi:

$$\nabla^2 E - \mu\epsilon \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = 0 \quad 1.3$$

olarak elde edilir[11-12].

Çalışma boyunca iki farklı polarizasyon türü göz önünde bulundurulmaktadır, TM (Enine Manyetik) ve TE (Enine Elektrik). Işığın dalga kılavuzunda ilerlemesi sırasında bir empedans değişikliğiyle karşılaşması durumunda kırılma, yansıma, iletim gibi olaylar gerçekleşmektedir. İki farklı polarizasyon için bu fenomenler farklı şekillerde ve oranlarda gerçekleşmektedirler, dolayısı ile FK dalga klavuzunun iki polarizasyon türünü aynı şekilde manipüle etmesi özel tasarım gerektirmektedir. TE polarizasyon için dalga kılavuzunda ilerleyen dalganın Şekil 1.6'daki gibi bir ara yüze gelmesi durumunda Eşitlik 1.3'de verilen dalga denklemini arayüzün iki tarafı için çözümlerse:

$$E_l(r,t) = E_l e^{-j(k_l \cdot r - \omega t)} \quad 1.4$$

formunda bir ifade elde edilir. Burada “ E_l ” genliktir “ l ” alt indisi ise farklı alanları ifade etmek için kullanılmaktadır. Bu alanlar Şekil 1.6'da i, t, r olarak sırasıyla gelen, iletilen ve yansıyan alanları ifade etmek için kullanılmaktadır. Çözüm için Maxwell denklemlerinin integral formlarından elde edilen sınır koşulları kullanılır. Buna göre arayüz üzerinde, elektrik ve manyetik alanların paralel bileşenleri, elektrik ve manyetik akının dik (normal) bileşenleri süreklidir.

Ayrıca fotonun momentumunun korunumunu da göz önünde bulundurunca, Snell'in yansıma kurallı ($\theta_i = \theta_r, n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_t$) gibi basit kavramları uygulayarak:

$$\frac{E_r}{E_i} = \frac{(n_1 \cos \theta_i - n_2 \cos \theta_t)}{(n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t)}, \quad 1.5$$

$$\frac{E_t}{E_i} = \frac{2n_1 \cos \theta_i}{(n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t)}$$

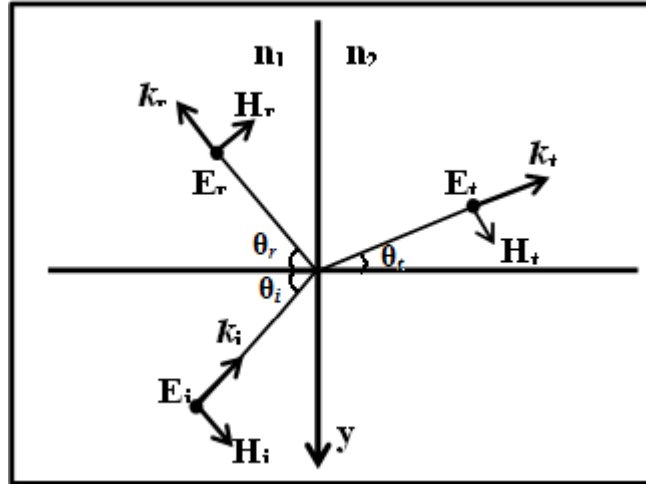
gelen Elektrik alanın yansıyan ve iletilen alanlara oranı TE polarizasyon için hesaplanabilir.

Benzer adımları TM mod için takip edersek bu sefer yansıyan ve iletilen manyetik alanların gelen manyetik alana oranını Eşitlik 1.6 verir ancak Elektrik alan ifadesi belirgin bir şekilde değişmektedir.

$$\frac{E_r}{E_i} = \frac{(n_1 \cos \theta_t - n_2 \cos \theta_i)}{(n_1 \cos \theta_t + n_2 \cos \theta_i)},$$

$$\frac{E_t}{E_i} = \frac{2n_1 \cos \theta_i}{(n_2 \cos \theta_t + n_2 \cos \theta_i)}$$
1.6

Dalga kılavuzunda ilerleyen ω_0 açısız frekanslı ve k_0 serbest uzay dalga vektörüne sahip kaynak için dalga denkleminin çözümünü de dalga kılavuzunda yayılmasına izin verilen modlar, dalga vektörleri hesaplanabilmektedir[13]. Ancak bu hesaplamalar araştırmanın konusu dışında olduğu için formülasyona yer verilmemektedir, öte yandan çalışma içerisinde gerekli yerlerde yayılım modlarından kısaca bahsedilmektedir.

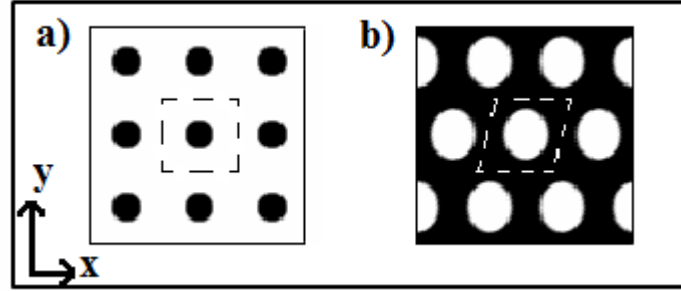


Şekil 1.6. Bir arayüze gelen, bu arayüzden yansıyan ve iletilen Elektrik alan, Manyetik alan ve dalga vektörü bileşenleri.

TE ve TM polarizasyonların dalga kılavuzunda farklı şekillerde ilerlemesi bazı uygulama zorluklarına yol açmaktadır. Bunun için dalga kılavuzu bir kaynakla aydınlatılmadan evvel polarize edici enstrumanlar kullanılmaktadır. Bu çalışmada bu problemi ortadan kaldırmak için TE ve TM polarizasyonlarının ikisi içinde aynı etkiyi sağlayacak 1B FK nano kavite yapısı tasarımı incelenmiştir. Bu amaçla Halkalı Fotonik Kristal (HFK) kullanımı uygun görülmüştür.

1.3. Halkalı Fotonik Kristaller

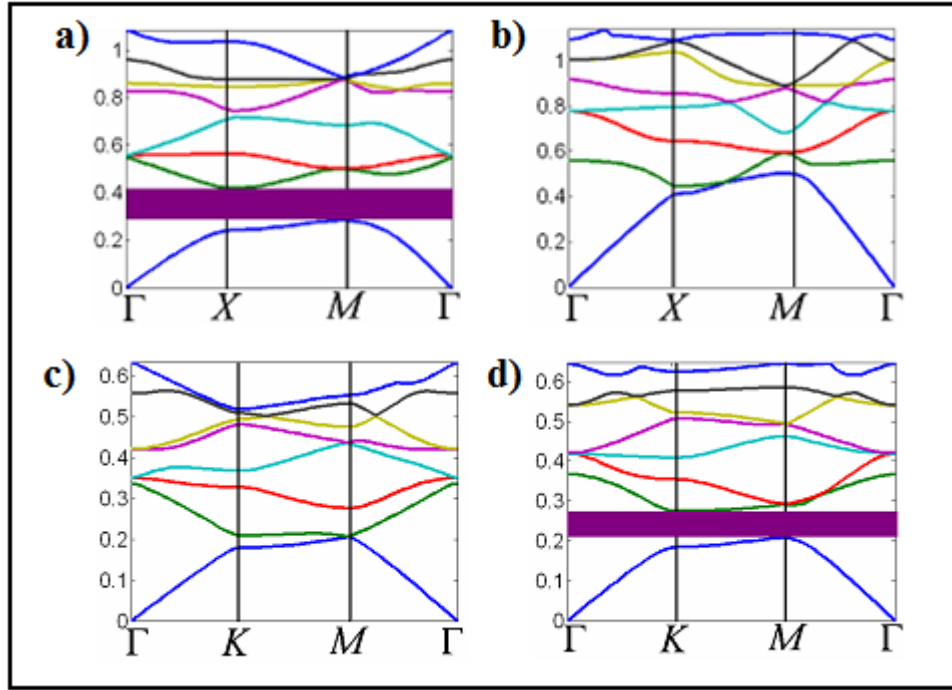
2005 yılında, 2 boyutlu fotonik kristallerin fotonik yasaklı bant özelliklerinin sıklıkla çalışıldığı bir dönemde, iki boyutlu yeni bir fotonik kristal örgüsü tanımlanmıştır [14]. Fotonik literatürde iki boyutlu yapılarda en çok kullanılan örgüler farklı kırılma indisli materyallerden birinin içerisine kare örgü şeklinde dizilmiş bir diğer kırılma indisli dielektrik malzeme çubukları veya üçgen örgülerdir. Genellikle hava ortamında dizilmiş dielektrik çubuklar veya dielektrik ortama açılmış hava delikleri şeklinde bir yapı yaygındır. Şekil 1.7’de örnek kare ve üçgen örgüler verilmiştir.



Şekil 1.7. a) Kare örgü, havaya dizilmiş silindirik dielektrik fotonik kristaller, b) üçgen örgü, dielektrik malzemenin içerisine açılmış hava delikleri.

Şekil 1.7’de paylaşılan örgüler geleneksel olarak kullanılan 2B FK yapılara aittirler. Kare örgüde $0.20a$ yarıçaplı dielektrik çubuklar hava ortamında periyodik dizilmiştir. Burada “ a ” Brillouin alanının x ve y yönündeki uzunluğu yani yapının bir periyodunun uzunluğudur. Aynı şekilde üçgen örgü için Şekil 1.7b’de verilen görselde yarıçapı $0.30a$ olan hava delikleri dielektrik malzemenin içine a periyotlarla

açılmıştır. Bu yapılarda farklı modların ilerleyişini gözlemlemek için yapılara ait dispersiyon diyagramları çıkartılmaktadır. Bunun için öncelikle yapıların ortasında verilen kesikli çizgilerle sınırlı birim alanları göz önüne alınır. Bu alanlara Brillouin alanı denir ve bu alanların x ve y yönünde artarda eklenmesiyle örgülerimiz oluşmaktadır. Bu yüzden bunları birim alanlarımız olarak düşünebiliriz. Örgünün dispersiyon analizini yapmak için bu birim alanların dispersiyon özelliklerinden yararlanılır, gerekli hesaplamalarla elde edilen kare ve üçgen örgüye ait dispersiyon grafikleri Şekil 1.8’de verilmiştir.



Şekil 1.8. a) Kare örgüde TM moda ait, b) kare örgüde TE moda ait, c) üçgen örgüde TM moda ait, d) üçgen örgüde TE moda ait dispersiyon grafikleri.

Şekildeki grafiklerde Γ, K, M Brillouin alanının sınırlarını belirten işaretlerdir. Γ birim alanının tam ortasını ve K bu noktadan $+x$ yönünde gidildiğinde varılan birim alanının kenar noktasını ve de son olarak M de bu noktadan $+y$ yönünde gidildiğinde varılan birim alanının köşe noktasını ifade eder. Brillouin alanının kenar uzunluklarını k_x ve k_y kabul edersek sırasıyla, $(0,0)$, $(k_x/2,0)$, $(k_x/2,k_y/2)$ koordinatlarını ifade etmektedirler. Öte yandan şekildeki grafikleri dikkatle incelersek belirli bir örgü türü

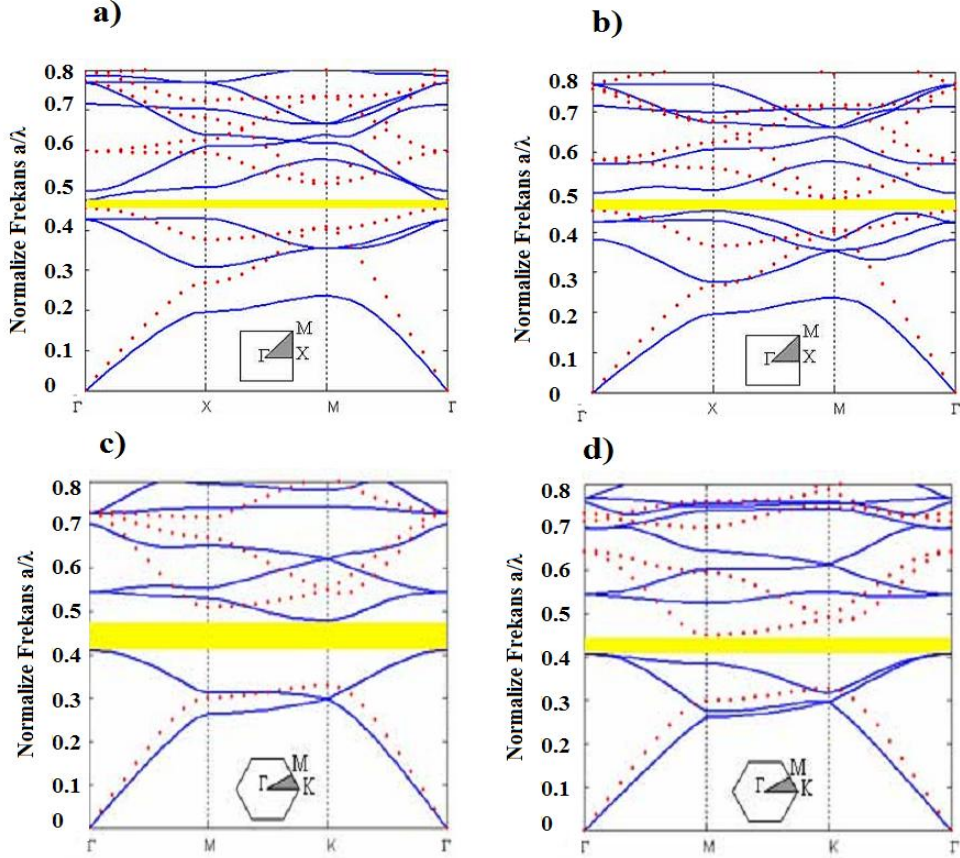
için TE ve TM modda ortak bir yasaklı bant, yani dispersiyon grafiğinde farklı renklerle gösterilen farklı modlardan herhangi birinin ilerlemediği, ortak bir iletim bandı bulunmamaktadır. Diğer yandan, Şekil 1.7 incelendiğinde farklı örgü türleri için farklı ortamlar kullanıldığı, birisi için çevreleyen ortam hava iken diğeri için dielektrik malzeme olduğu görülmektedir. Bu durumun sebebi her iki örgü türü için de yasaklı bantın olduğu dispersiyon grafiklerinin elde edilmek istenmesidir. Örgü türleri sabit kalacak şekilde ortam seçimlerimizi değiştirsek dahi her iki mod için de geçerli bir FYB bulunan bir ortam ve FK örgüsü elde edilememektedir.

Kurt araştırmalarında, uygulama sırasında geniş bir FYB penceresi elde etmenin, özellikle de farklı polarizasyonlar için aynı frekans bölgesinde çalışabilecek araçlar üretmenin zorluğundan bahsetmiş ve doğrudan bu problemi hedef almıştır [14]. Böylece maksat basit bir geometriye sahip bir yapı ile farklı polarizasyonların kullanılmasında kaynaklanan problemlerin önlenmesi olarak belirtilmiştir. Çalışmada, HFK kullanılmıştır. Periyodik kırılma indisli yapılarda özel bir durum olarak belirli kırılma indisleri ve/veya belirli periyot uzunluğu değerleri sağlandığında yapıya ait FYB genişliği [12]:

$$\Delta\omega_{gap} = \omega_0 \frac{4}{\pi} \sin^{-1} \left| \frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \right| \quad 1.7$$

olarak elde edilir. Eşitlik 1.7'deki durum özel bir periyot ve kırılma indisi yapısı için geçerli de olsa ihmal edilecek yüksek dereceli terimler dışında bu ifade genel olarak FYB genişliği hakkında bir fikir vermektedir. Kurt çalışmasında HFK'de deliğin içine eklenen dielektrik çubuğun hacmi %12'den küçükken dahi örgüye ait saçılım diyagramını önemli ölçüde değiştirdiğini tespit etmiştir. İçerideki dielektrik çubukların yarıçapı 0'dan başlayarak arttırılmış sonuç olarak birim hücredeki dielektrik malzemenin artışına bağlı olarak yasaklı bantın daraldığı görülmüştür. Keza Eşitlik 1.7 incelendiğinde birbirine yaklaşan kırılma indisleri mutlak değerli ifadeyi 0'a yaklaştırmaktadır bu da merkez frekans ω_0 ve bir katsayıyla çarpılacak olan radyan değerini düşürmektedir. Çalışmanın daha da özgün yanı ise denklemden doğrudan öngörülemez şekilde içerideki dielektrik çubuğun yarı çapının daha da arttırılması sonucunda ikinci bir FYB'in ortaya çıktığının gösterilmesidir. Bu yapı

ile geleneksel FK örgülerin dispersiyon diyagramlarıyla karşılaştırıldığında HFK'lerin çok daha geniş bir FYB'a sahip oldukları ve düşük normalize frekanslar için dahi bunu sağladığı görülmüştür. Şekil 1.9' da Kurt'un çalışmasının sonuçları paylaşılmıştır.



Şekil 1.9. Kare ve üçgen örgüdeki 2B HFK yapılarına ait dispersiyon diyagramları. Düz çizgiler TM kesikli çizgiler TE modu ifade etmektedir. Boyalı alanlar her iki mod için FYB ları göstermektedir. a) Kare örgüde dış yarı çap $0.49a$, iç yarıçap $0.02a$, b) kare örgüde iç yarıçap $0.49a$, iç yarıçap $0.11a$ c) üçgen örgüde dış yarıçap $0.47a$, iç yarıçap $0.02a$, d) üçgen örgüde dış yarıçap $0.47a$, iç yarıçap $0.14a$.

Şekil 1.9'dan da açıkça görüldüğü gibi HFK ile fark polarizasyonlardaki saçılımlar için 2B yapılarda üstüste FYB penceresi elde etmek mümkündür. Bu fenomeni inceleyen literatürde pek çok çalışma mevcuttur [15,16]. Mevcut çalışmada HFK

yapıların 1B dalga klavuzlarında da aynı etkiyi yaratıp yaratmayacağı, böylece 1B periyodik dalga klavuzlarında daha önce bahsedilen kusur yapıya eklendiğinde oluşacak kavitenin her iki polarizasyonda da elde edilebilmesi araştırılmıştır.

2. BİR BOYUTLU NANO DALGA KILAVUZLARINDA MODİFİYE DELİKLİ FOTONİK KRİSTALLERLE POLARİZASYONDAN BAĞIMSIZ KAVİTE OLUŞTURULMASI

Optik anahtarlama ve filtreleme gibi çeşitli uygulamalar için kullanışlı bir optik platform olmasından dolayı, nano boyutta kavite çalışmaları araştırmacıların büyük ilgisini çekmektedir. Şimdiye kadar ki hemen hemen bütün çalışmalar polarizasyon bağımsızlığı bir kenara bırakarak yüksek kalite faktörünü incelemiştir. Çalışmamızda, TE ve TM polarizasyon modları için benzer optik özellikler gösteren, HFK le oluşturulmuş 1 boyutta yayılan 2B ve 3B, polarizasyondan bağımsız nano boyutta ışığın kavitesi dalga klavuzunu açıkladık. Öte yandan, nano yapının yükseklik ve genişlik parametrelerindeki değişimlere bağlı olarak, TE, TM kesişim frekansının da değişimi incelenmiştir. Tasarlanan dalga klavuzu Silikon ($n_{Si}=3.46$) üzerine 12 hava deliği 4 tane HFK den oluşmaktadır. Yapıdaki tüm hava deliklerinin çapı $0.36a$ 'dır. Merkeze yakın halkalı fotonik kristallerin iç dielektrik çapları $0.18a$ iken merkezden daha uzaktaki iki halkalı fotonik kristalin iç dielektrik çapları $0.20a$ dır. 3B yapı için Silika ($n_{Silica}=1.52$) alt tabaka olarak kullanılmıştır. Her iki polarizasyonda istenen frekansta yüksek kalite faktörü elde etmek için dalga klavuzunun yükseklik ve genişlik parametreleri ayarlanabilir. Analizlerde, genişlik, yükseklik ve TE ve TM polarizasyonların kavite frekansları arasındaki ilişki incelendi. Her iki polarizasyon için ayrı ayrı elde edilen frekansları yapısal parametreler, genişlik ve yüksekliğin üçüncü dereceden polinomları olacak şekilde birer fonksiyona eşitlendi. Kesişim frekansı eğrisini bulmak için her iki polarizasyon için elde edilen polinomların birbirlerine eşit oldukları yerler hesaplandı. Bulgular, yapısal parametrelerin, her iki polarizasyonun rezonans modunda kavite frekanslarının kesişim mekanizması üzerindeki etkilerini izah ediyor.

Bu çalışmada, nano dalga klavuzunda ilerleyen farklı polarizasyondaki hüzmelerin kavite modu mekanizmaları sayısal olarak incelendi. Nano dalga klavuzu ve kavite yapılarını izah eden çok kapsamlı çalışmalar vardır. Oscar *et al* bir çalışmalarında, iki boyutlu fotonik kristal yapıdaki bir bozukluk tarafından üretilen optik mikro kavitenin deneysel tanımlamasını açıklamıştır [17]. Daha sonar Akahane *et al*. ışığın

fotonik kristal kaviteye hapsolmasını arttıracak yeni bir yaklaşım geliştirmiştir [18]. Bu yeni konsept fotonik Kristal yapı parametrelerinin zekice uyarlanmasına bağlıdır. Yapının iyi tasarımıyla çok küçük kavite hacimleri elde edilmiştir. Daha güncel çalışmalardan birinde Deotare *et al* özgün bir nano dalga kılavuzu yapısıyla temel ve ikinci seviye modlarda yüksek kalite faktörü elde etmiştir[10]. Tüm bu ve benzer çalışmalar, kısa bir literatür özeti sunmaktadır.

Yablonovitch ve John'un 1987 'deki öncü çalışmalarından beri fotonik kristallerin yasaklı bant özellikleri yüksek kalite faktörü elde etmek için kullanılmaktadır [2-3]. İki ve üç boyutlu fotonik Kristal yapıları inceleyen çok fazla çalışmanın yanında , mevcut trendlerden biri de nano dalga kılavuzu ve kavite gibi tek boyutlu periyodik yapılar üzerinedir. Dielektrik malzemeye periyodik olarak açılan hava delikleri dalga kılavuzu gibi davranırken yapının ortasında bulunan bir düzensizlik, dolayısıyla periyodikliğin bozulması kavite oluşmasını sağlamaktadır. Ancak, çoğu zaman, dielektrik malzemenin yapısal dağılımdan dolayı bu kavite tasarımları sadece tek tip polarizasyonu ya TM modu yada TE modu desteklemektedir. Zhang *et al* bir çalışmalarında belirli bir frekans için hem TE hem de TM modu destekleyen nano dalga kılavuzunu açıklamıştır [8]. Ancak, TE ve TM kavite frekanslarının kesişim mekanizmasını ayrıntılarıyla işleyen bir çalışma henüz yayımlanmamıştır. Biz bu çalışmamızda nano dalga klavuzunun pek çok farklı tasarımı için her iki polarizasyonunda desteklenebildiğini gösteriyoruz.

Fotonik kristallerin polarizasyondan bağımsız yasaklı bant özellikleri incelendiğinden, HFK ler yapıdaki düzensizliği ayarlamak için kullanılabilir. Bir boyutlu fotonik kristaller ve halkalı fotonik kristaller: bu iki konseptin birleşimi, bir arada kullanılması bu çalışmanın arkasındaki temel fikirdir. Analizler temel olarak düzensiz bölgesi HFK'lerden oluşturulmuş bir boyutlu fotonik kristal dalga klavuzları üzerinde yapılandırılmıştır. HFK'lerin kavite modu oluşturma ve iki polarizasyon için kavite frekansının kesişimi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Yapı çok basit tasarlanmış olsada, rezonans modda frekans kesişimine etkisi gözlemlenecek pek çok değişken vardır. Halkalı fotonik kristallerin iç yarı çapları ve yapının ortasındaki düzensizliğin boyutu gibi parametrelerin etkileri iletim spektrumlarının detaylı analizleriyle ayrı ayrı incelenmiştir. Çalışmanın

eksiksizliğinin doğrulanması için, benzer yaklaşımlar üç boyutlu yapı için tekrarlanmıştır.Yapının sonlu bir yükseklik değeri olacağı için, 3 boyutlu simülasyonlar çalışmanın çıkarımlarının gerçellenmesi için etkili bir yöntemdir. 3 boyutlu analizlere geçmeden önce, yükseklik haricindeki yapısal parametrelerin rolü hakkında fikir sahibi olmak için koşturma süresi daha kısa olan iki boyutlu sayısal analizlerden yararlanılmıştır.

2.1. Halkalı Fotonik Kristal ile 1B Kavite Tasarımı

Önceki bölümde de belirtildiği gibi, çalışmanın ana hattı iki boyutlu yapının analizleri ve daha sonra aynı analizlerin 3 boyutlu yapı için yapılarak sonuçların güncellenmesidir. Bütün simülasyonlar iki ve üç boyutlu sonlu farklı zaman domaini sayısal metoduyla koşturulmuştur[19]. MEEP adlı açık kaynak kodlu bir sayısal analiz programı bu iş için kullanılmıştır[20]. Şekil 2.1, bir boyutlu fotonik Kristal kavite dalga klavuzu örneğini göstermektedir. Düzensiz bölge belirli sayıdaki deliğin yapının ortasından kaldırılıp orada dielektrik bir bölge oluşturulmasıyla gerçekenir. Analizlerde “ a ” birim uzunluk olarak kullanılmıştır. Dalga klavuzunun genişliği $1.30a$ ve birbirini takip eden periyodik delikler arası mesafe $1.0a$ dır. Son olarak hava deliği çapları $0.36a$ dır. Eğer düzensiz bölgenin uzunluğu $1.0a$ seçilirse tüm yapı periyodik dizilmiş hava deliklerinden oluşur ve iletim grafiği yasaklı bant verir.

Kalite faktörünü arttırmak için yapılan çalışmalarda sıklıkla kullanılan bir boyutlu kavite dalga klavuzu Şekil 2.1'de gösterilmiştir. Dalga klavuzu genişliğiyle oynanması, kavite bölgesinin iki tarafında bulunan hava deliklerinin yarı çaplarının ayarlanması ve hava deliklerinin sayısının arttırılması gibi parametrelerin dikkatlice seçilmesiyle kavitenin kalite faktörünün arttırılması mümkündür. Ancak kalite

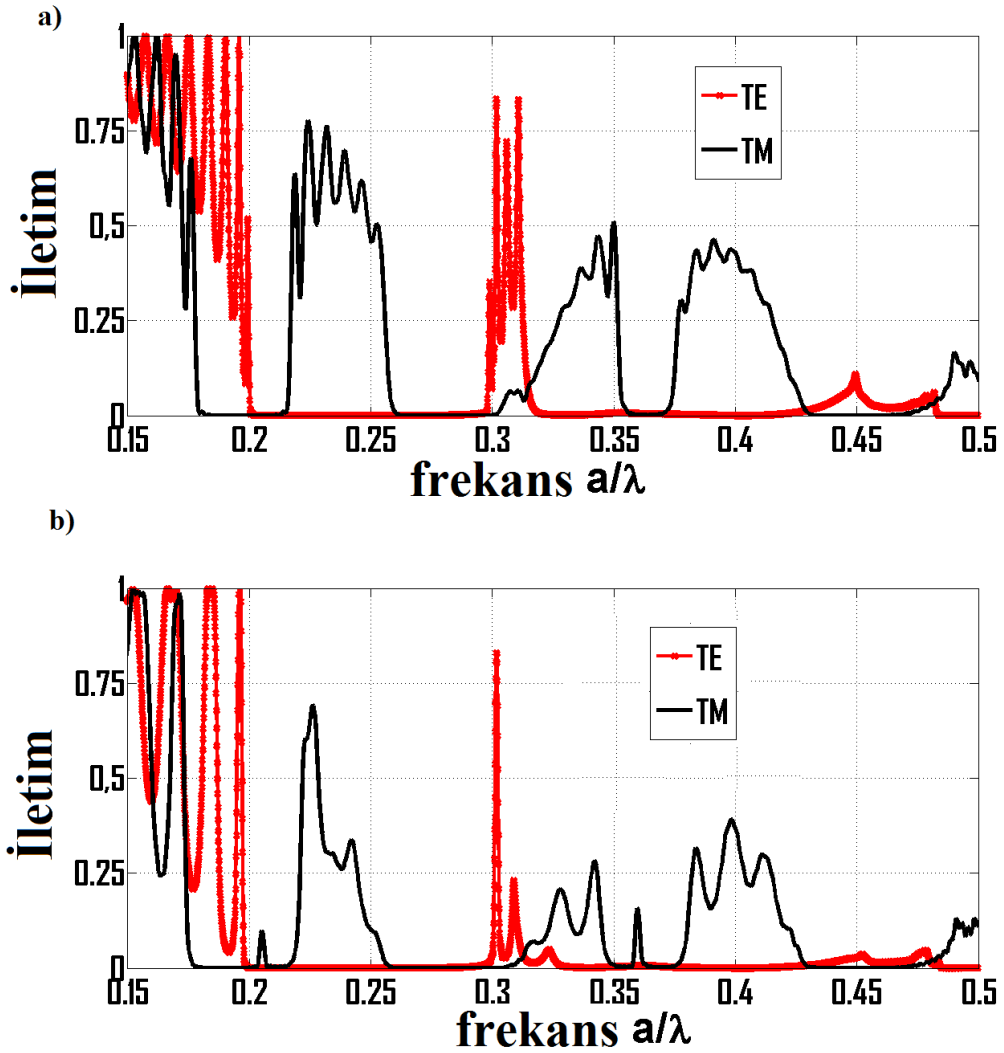


Şekil 2.1. Geleneksel 1B nano kavite dalga klavuzu yapısı.

faktörünün arttırılması bu çalışmada hedef alınmamıştır. Bu çalışmada sadece TE ve TM modun kesişimine odaklanılmıştır.

Şekil 2.1'de daha önceden FYB özelliğinden bahsedilen klasik bir 1B FK dalga kılavuzunun ortasında periyodikliğin bozulmasıyla elde edilen bir kavite yapısı paylaşılmıştır. Şekil 2.2a'da da yapının ortasında düzensizlik yokken TE ve TM polarizasyonların iletim spektrumları verilmiştir. Her iki polarizasyonda birbirinden farklı genişlikte, sınırları farklı yerlerde yasaklı bant aralıklarına sahiptir. Figürde gösterilen normalize frekans bölgesinde TE polarizasyonun yasaklı bant aralığı bölgesi sayısı TM polarizasyondan az olmasına karşın TE yasaklı bant aralıkları TM e göre daha geniştir. Ortadaki delikleri $3.0 a$ kaydırarak yapıya kavite eklediğimizde, iletim spektrumu beklenildiği gibi değişmektedir. Sonuçlar Figure 2.2 (b) de paylaşılmıştır.

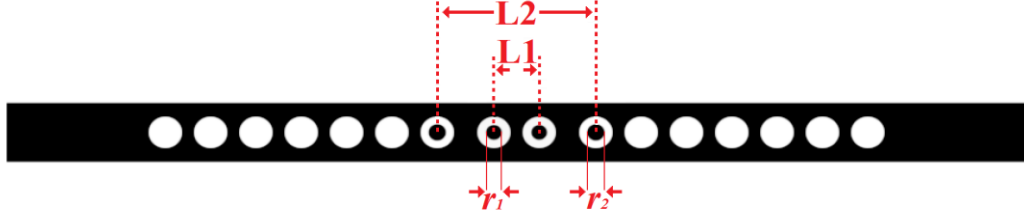
Tüm yapıların iletim spektrumları yapının çıkış gücünün kaynak gücüyle normalize edilmesiyle hesaplanmıştır. Referans kaynağın gücü de sadece $1.30 a$ genişliğinde homojen bir dielektrik dalga klavuzu varken ölçülmüştür. Figür 2(b) yapıdaki düzensizliğin etkisini göstermektedir. Şekilde gösterildiği gibi TM mod için oluşan kavite söz konusudur. Öte yandan aynı yapı TE mod için kavite oluşumu göstermemektedir. Çalışmada bundan sonar öncelikle TE mod için bir kavite oluşturmak ve daha sonar TM mod ile TE mod kavitelerinin aynı frekansta kesişmesini sağlamak esas alınmaktadır.



Şekil 2.2. a)Klasik bir 1B FK dalga kılavuzunda TE ve TM mode iletim spektrumu, b) yapının ortasına düzensizlik eklendiğinde yapının iletim spektrumu ve düzensizlik modları.

Daha önceki çalışmalarda gösterilmiştir ki HFK ler TE ve TM modları eşleştirmek için kullanılabilir. Benzer bir yaklaşım bu çalışmada da kullanılmıştır ve klasik bir boyutlu kavite yapısı düzensiz bölgesine HFK eklenerek yeniden tasarlanmıştır. Işığın enerjisi çoklukla bu düzensiz bölge ve etrafında yer almaktadır. Bu tasarımda polarizasyon kesişimini sağlamak için HFK'ler düzensiz bölge oluşturmak için kullanılmıştır.

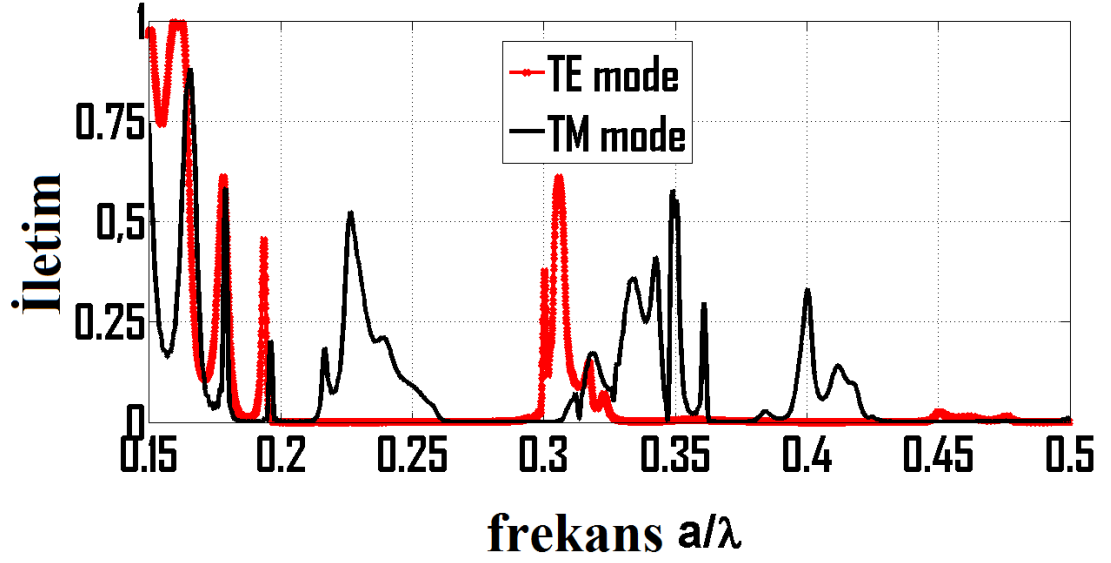
Şekil 2.3'de polarizasyon ayarlamak için yeniden tasarlanan nano dalga klavuzunu göstermektedir.



Şekil 2.3 Polarizasyondan bağımsız 1B kavite yapısı için düzenlenen yapı ve tasarım parametreleri.

Yapı her iki eksene göre de simetriktir. r_1 ve r_2 değişkenleri sırasıyla iç taraftaki iki halkalı fotonik kristalin iç yarı çapı ve dıştaki iki halkalı fotonik kristalin iç yarı çaplarını ifade etmektedir. Kavitenin dışında bulunan delikler için başka bir değişiklik yapılmamıştır. $L1$ ve $L2$ parametreleri ise sırasıyla içteki iki halkalı kristalin birbirinden ve dıştaki iki halkalı kristalin birbirinden uzaklıklarını ifade etmektedir. Her iki polarizasyonun kavite frekanslarının kesişmesini sağlamak için tasarımın ayarlanması gereken bu dört parametresi vardır. Yukarıda da bahsedildiği gibi kavitenin niteliği daha çok düzensiz bölgedeki değişikliklere hassastır. Dolayısıyla bu dört parametrenin kavite modlarını ayarlamak için uygun olduğu düşünülmüştür. Bu bölümde iki boyutlu yapıyla çalışarak yapılan analizlerin kattığı ön görü daha sonra 3 boyutlu yapıyla çalışırken yapısal parametrelerin belirlenmesinde yardımcı olacaktır. Şekil 2.4 halkalı fotonik kristallerle oluşturulmuş nano dalga klavuzunun iletim spektrumunu göstermektedir. Açıkça görülmektedir ki bu durumda TE kavite modu oluşmaktadır ve yakınlarında bir frekansta da TM kavite modu görülmektedir. Figür 2.4 ü incelerken, öncelikle Şekil 2.2 incelenmeli. Şekil 2.2a'da hem TE hem de TM modlar için çok geniş FYB pencereleri olduğu görülmektedir. Bu da yapının 1B periyodik FK lerden oluştuğunda farklı polarizasyonları geniş bir frekans spektrumunda durdurduğunu göstermektedir. Tabiki bu iletim çizelgesi, kırılma indisi, yapının genişliği, deliklerin çapı ve az da olsa deliklerin sayısı gibi yapısal parametrelere bağlı olarak değişmektedir. Bununla birlikte, genel olarak görülmektedir ki bu iletim bantları TM mod için pek çok kez

iletim pencereleriyle bölünmüştür. Öte yandan, TE modun neredeyse bilinen tüm normalize frekanlarda yapıda ilerleyemediği görülmektedir. Yapının ortasına bir kusur eklendiğinde TM moda ait iletim çizelgesinde, Figür 2.2.b, FYB'ın içerisinde bazı iletim frekansları olduğu görülmektedir. Bunlar 0.20 ve 0.36 normalize frekans değerleri civarındadırlar. Aynı çizelgede TE moda ait grafikte FYB aralıklarında herhangi bir iletim kanalı oluşmadığı da açıkça görülmektedir. Burada birinci kısımda bahsedilen, bu çalışmaya da ilham kaynağı olan literatürdeki pek çok çalışmanın tek bir polarizasyonu destekleyen 1B ve 2B FK örgüler üzerine yoğunlaştığını hatırlatmakta fayda var. Bu bakış açısıyla Figür 2.4 incelenirse, dikkat edilmesi gereken pek çok nokta olduğu görülmektedir. Yapının ortasına eklenmiş olan HFK ler yapının iletim spektrumunu her iki frekans için de çok önemli ölçüde değiştirmektedir. TM modda 0.2 normalize frekansta beliren iletim frekansının daha düşük normalize frekansa doğru ilerlediği ve iletim miktarının arttığı görülmektedir. Daha da bariz değişim ise TE modda görülmektedir. Yapıda sadece kusur modları oluşumunu gözlemek amacıyla ortasına periyodikliği bozan bir kusur eklendiğinde TE modun düşük frekanstaki FYB penceresi 0.20 normalize frekanstan başlayıp 0.30a kadar devam etmekte ve bir iletim frekansı, bir kusur modu oluşmamaktadır; ancak Figür 2.4' te TE modun FYB penceresini daha düşük normalize frekanslara genişlediği ve daha önceden FYB aralığı alt sınırı olan 0.2 normalize frekansta yüksek ilettime sahip bir kusur modu olduğu görülmektedir. Şekilden öncelikle bu frekanstaki kusur modunun kavite frekansı değil iletim penceresinin sınırında bir dalgalanma olduğu düşünülebilir. Bu sonuçlara ait bütün grafikler düşük ve yüksek normalize frekans bileşenleri olan geniş Gauss dalga üreten kaynaklarla aydınlatılan yapılardan elde edilmiştir. Öte yandan bütün dikkat çeken noktaların aydınlatılması için, ayrıca tüm kusur modlarında tek frekansta ışınım yapan sürekli dalga kaynaklarıyla da simülasyonlar tekrarlanmıştır. Böylece yapıda oluşan rezonanslar hem TM modda hem de TE modda iletim çizelgelerinde oluşan iletim bantlarının birer kusur modu olduğu görülmüştür.



Şekil 2.4 HFK lerle oluşturulan 1B FK yapıya ait iletim spektrumu.

Yapının ortasına HFK kristal eklemek ve bunların sayısının 4 olarak kararlaştırılması rastlantısal bir süreç değildir. Bu yapı yapıdaki simetriyi bozmamak amacıyla, tamamen rastgele düzenlenmiş yapılar bu çalışmada daha sonra incelenmiştir, en az iki HFK yapıdaki her bir hava deliğinin yerinde kullanılarak ayrı ayrı tüm farklı örgüler denenmiştir. Çalışmalar göstermiştir ki her durumda kusur modu rezonansı yapının kusur bölgesinde, yani ortasında, oluşmaktadır. Öte yanda yapıya eklenen HFK'lerin yapıyı en fazla kavite alanında olduklarında manipüle etmektedirler. HFK'lerin özelliklerinden en iyi şekilde yararlanmak için onların kavite alanına konulması bu şekilde kararlaştırılmıştır. Diğer bir yandan HFK'lerin sayısı da başlangıçta en az olacak şekilde yapının en iyileştirilmesi düşünülmüştür. Burada optimizasyon mantığı en az sayıda HFK kullanmak yani yapıyı olabildiğince basit bir halde tutmak bu durumda TE ve TM kavite frekanslarını aynı normalize frekans değerine taşımaktır. Böylece en basit şekilde polarizasyon bağımsız yapı elde edilmiş olacaktır. Yapı Şekil 2.3'te görülen taslak halini bu araştırmalar göz önünde bulundurularak almıştır.

Şekil 2.3 'te taslağı verilen ve 2.4'te yapısal değişkenlikleriyle oynanmadan ilk denemesiyle elde edilen iletim spektrumu paylaşılan yapının iletim çizelgesinde her iki mod için de kusur modu olduğu görülmektedir. TE ve TM mod için oluşan bu

modlar düşük normalize frekans bölgesinin yakınlarında ver birbirlerine oldukça yakın durumdadırlar. Fakat bu çalışmanın amacı bu rezonans frekanslarının üstüste gelmesidir. Aralarındaki frekans farkı çalışmada bundan sonra \mathcal{F} ile gösterilecektir. Çalışmanın amacı temel olarak $\mathcal{F} = 0$ değerini elde etmektir. Bunun için tasarlanan yapının parametreleri ayarlanacaktır. Bu sebeple her bir parametre ayrı ayrı kusur modlarını ve oluşumlarını nasıl etkiliyor bunlar incelenecektir. İlk incelenecek parametreler $L1$ ve $L2$ parametreleridir. Bunlar sırasıyla merkeze yakın iki HFK'in merkezlerinin birbirlerine uzaklığı ve dışarıdaki iki HFK'in merkezlerinin birbirine uzaklığıdır. Bir diğer parametreler $r1$ ve $r2$ ise sırasıyla merkeze yakın HFK'in içinde bulunan dielektrik çubuğun yarıçapı ve dışarıdaki iki HFK'in içinde bulunan dielektrik çubuğun yarıçapıdır. Parametrelerin dikkatlice ayarlanması kavite modunda rezonans frekanslarının kesişimini sağlayacaktır. Ayrıca üç boyutlu yapının kesişim karakteristiğinin de anlaşılması için 3B simülasyonlar daha sonar koşturulmuştur. Bu durumda özellikle dikkat edilmesi gereken parametre yükseklik olacaktır h . İki boyutlu simülasyonlarda sonlu sayıda hava deliği olduğundan geri yansılardan ve yapının kenarlarındaki sızmalardan kaynaklanan enerji kaybı oluşmaktadır. Ancak 3 boyutlu çalışmalarda, sonlu yükseklik değerinden dolayı artık düzleme dik doğrultuda da ışığın enerjisinde kayıp olacaktır. Dolayısıyla yükseklik parametresinin polarizasyonu oldukça etkilemesi beklenmektedir. Daha önceden 1B FK yapıda elektrik alanı yapının oluşturduğu 2B düzleme dik salınan TM polarizasyonda yapısal limitlerden kaynaklanan bir kayıp oluşmadığı için bu polarizasyonda kavite oluşumu gözlemleniyor olabilir. Kavite hesabını:

$$\frac{1}{Q} = \frac{1}{Q_w} + \frac{1}{Q_r} \quad 2.1$$

Eşitlik 2.1 ile ifade edersek kavite değerini belirleyen temel faktörün enerjinin yapıdan sızma miktarı olduğu görülmektedir. Denklemden Q kalite faktörünü, Q_w enerjinin, ya da gözlemlenen hangi faktör ise mesele elektrik alan, dalga klavuzunda azalıp yok olduğu zaman dilimini, Q_r enerjinin yapıyı saran havanın içinde azalarak

bittiği süreyi göstermektedir. Bu durumda enerji dalga kılavuzundan ne kadar yavaş sızarsa kavitenin o kadar yüksek olacağı öngörülebilir. Aynı bağlamda yapı 2B iken TM polarizasyonda salınım uzanımında bir sınır kısıtlaması olmadığından basitçe bu polarizasyona ait kavite değerlerinin gerçek bir sistemde olacağından daha fazla olacağı söylenebilir. İki boyutta elde edilen yapısal parametreler sonsuz yükseklik için geçerlidir; ancak pratikte yapının dikey ekseninde sınırlı bir uzunluğu olacaktır. Dolayısıyla yükseklik parametresini hesaba katmadan evvel diğer parametrelerin hangi uzayda değişeceğini belirlemek için iki boyutlu en iyi yapının parametreleri kullanılmıştır. Yani, üç boyutlu yapıda yapısal parametrelerinin tamamen yeniden taranması yerine, ki bu çok zaman kaybettirici, bu parametrelerin uzayı iki boyuttaki en iyi durumun parametrelerinin yakınına daraltılmıştır. Daha sonra, bu parametreleri sabitlenmiş ve genişlik ve yükseklik değerlerinin kesişim mekanizması üzerindeki etkileri incelenmiştir. Böylece geliştirilmiş metodla, genişlik ve yükseklik değerlerine bağlı bir kesişim fonksiyonu elde edilmiştir. Sıradaki bölümde 2B ve 3B nano dalga kılavuzları ve bunların kesişim performanslarının parameter değişikliklerine bağlantısı tartışılmıştır.

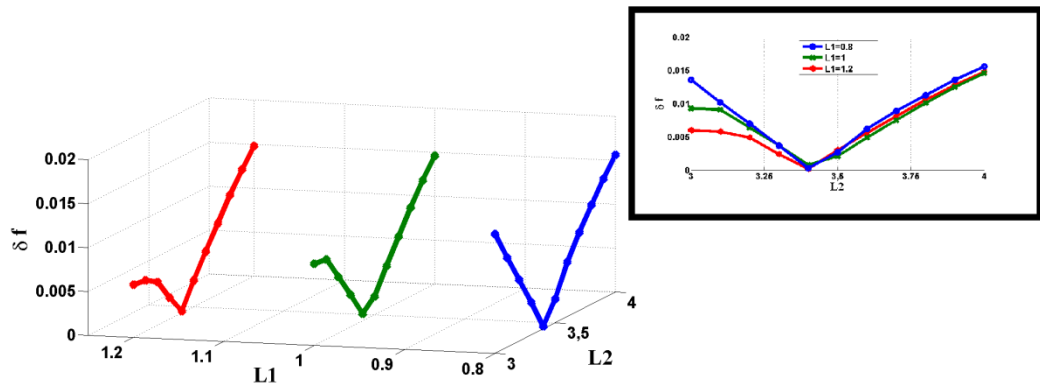
2.2 HFK'le Tasarlanmış 2 ve 3B yapını Sonlu Farklı Zaman Düzlemi Metoduyla İncelenmesi

Bu çalışmada, önceki bölümde de belirtildiği gibi yapısal analizler öncelikle iki boyutlu nano dalga kılavuzu için yapılmıştır. Özgün tasarımıımız farklı polarizasyonlar için kesişim frekansı sağlamaktadır. Yapının rezonans modu oluşturmak için yapılan analizlerde hassasiyeti geniş parametre skalalarında incelenmiştir. Değişkenlerin kesişim mekanizması üzerindeki etkilerini çözmek için parametre değişimlerini ifade eden örnek durumlar çizdirilmiştir. Burada bir noktaya dikkat çekmek gerekir, özellikle bir parametrenin yapının davranışı üzerindeki etkisini gözlemlemek için sadece o parametreyi değiştirerek yapının iletim spektrumu incelenmiştir; ancak bu durumda diğer parametrelerin sabitlenmesi gerekmektedir bu durumda da diğer parametrelerin de sabitken alabilecekleri pek çok değer olabileceği gerçeği ortaya çıkmaktadır. Bu durumda yapılan analizler etkisi

araştırılan parametrenin çeşitli farklı değerleri için de yapılmış olsa diğer parametrelere bağıllığını da araştırmak adına diğer parametrelerinde farklı değerlerle sabitlenip aynı analizlerin etkisi araştırılan parametre için tekrar tekrar yapılması gerekir. Bu araştırma süreci bu şekilde ilerlemiştir. Fakat anlaşılır ve analizi kolay ifade edilebilen grafikler sunabilmek için bu araştırmaların sonuçları diğer parametrelerin bir tek sabit değeri için etkisi araştırılan parametre varyasyonu olan sonuçlar paylaşılmıştır. Bilinmelidir ki bu sonuçlar tüm araştırma ve simülasyonların sonuçlarıyla paralel özellikler gösterdikleri anlaşıldıktan sonra paylaşılmıştır. Grafikler ve bunlara ait çıkarımlar, sonuçlar tüm olası parametre uzayını kapsamaktadır.

Simülasyonlar sonlu farklı zama düzleminde yapılmıştır. Hesaplama alanının birim uzunluğu a olarak belirlenmiştir. Kavite dalga klavuzunun tasarımı hem 2B hem de 3B yapılmıştır. 2B analizlerde dalga klavuzu kalınlığı $1.30a$ olarak seçilmiştir. Peşpeşe sıralanmış hava deliklerinin merkezleri arası $1.0a$ dır. Son olarak hava delikleri ile HFK'lerin dış yarıçapları eşit ve $0.36a$ dır.

Şekil 2.5 $L1$ parametresinin bir kaç değeri için $L2$ parametresinin varyasyonunun, farklı iki polarizasyonun kavitelelerinin oluştuğu normalize frekansların farkları üzerine etkisini göstermektedir. Figürde iki ayrı bölge olduğu görülmektedir.



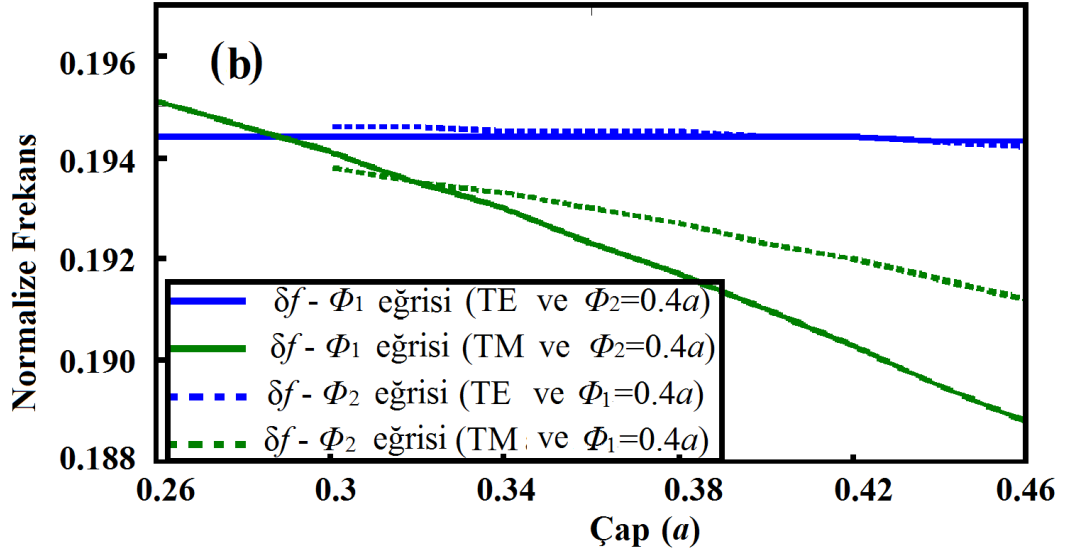
Şekil 2.5 $L1$ ve $L2$ değerlerine bağlı frekans farkı grafiği.

Figürden görülen ilginç bir özellik olarak δf değerinin minimum olduğu $L2$ değerinin üzerindeki skalada $L1$ 'in değişiminin önemli, etkin bir rolü olmadığı görülmektedir. $L2$ değişkeni bu 3.40a lık kritik değerinin altında olduğunda ise, $L1$ varyasyonunun farklı polarizasyonların rezonans frekanslarının kesişimine doğrusal olmayan etkisi görülmektedir. Böylece $L2$ 'nin belirli bir değer üzerinde olduğunda kavite hacminin artışına bağlı olarak düşen kavite değeri ve hapsolan enerji miktarı $L1$ değişkeninin kesişim mekanizması üzerindeki etkisini azalttığı düşünülebilir.

Analizler boyunca yapılan araştırmalar bu doğrultuda, yüksek kavite değerlerinde, kavite alanındaki görece ufak değişikliklerin kusur modunun iletim oranı ve frekansına oldukça etkilediği gözlemlenmiştir. Yapının bu özelliği TE ve TM modların rezonans frekanslarını kesişiminin sağlanmasında ayrıca yardımcı olmaktadır.

$r1$ ve $r2$ sırasıyla merkeze yakın olan ve dışarıdaki HFK çiftlerinin içinde bulunan dielektrik çubukların yarı çaplarını ifade etmektedir. Dielektrik çubuklarının çaplarının varyasyonları da, kavite alanının uzunluğunu ifade eden $L1$ ve $L2$ parametreleri gibi rezonans frekansı kesişim mekanizması üzerine etkisi açısından incelenmişlerdir. Bu çalışmada yarı çaplar yerine çapların incelenmesi araştırmanın yapıldığı değer uzayının çözünürlüğünü arttırmak içindir. Şekil 2.6 sabit bir Φ_2 değeri için ($\Phi_2 = 0.40a$) Φ_1 varyasyonunun δf üzerindeki etkisini çizdirmiştir. Benzer şekilde sabit bir Φ_1 değeri için de Φ_2 varyasyonu gene aynı şekilde incelenmiştir. Çizimde düz çizgiler Φ_1 değişimini ifade etmektedir. Φ_1 değişiminin TE ve TM moda ait oluşan kusur modu frekansında kesişim sağladığı görülmektedir. Öte yandan grafikten TE modun çap değişiminden çok etkilenmediği ortadadır; ancak TM moda ait kusur modu hem Φ_1 hem de Φ_2 varyasyonu durumunda oldukça yer değiştirmektedir. TE modun çap değişiminden etkilenmesiyle, TM modun etkilenmesinin çok farklı olması bu iki moda ait rezonans frekanslarının üstüste getirilmesini kolaylaştırmaktadır. Aksi halde her iki mod aynı şekilde etkilenecek olsaydı kesişimin sağlanması çok zor olabilirdi. Şekiller 2.5 ve 2.6 yapısal parametreler $L1$, $L2$, $r1$ ve $r2$ 'nin kesişim mekanizması üzerindeki etkileri

hakkında oldukça geniş fikirler sağlamaktadırlar. En içerideki HFK'lerin dışarıdakilerin arasındaki mesafe $3.40a$ ve üzerindeyken çok etkili olmadığı çıkarılmaktadır. Buna bağlı olarak içerideki dielektrik çubukların çaplarıyla oynamak bunların varyasyonundan çok daha fazla etkilenen TM modun kaydırılmasına bağlı olarak TE ve TM kusur modları frekanslarının kesişmesine neden olacaktır.



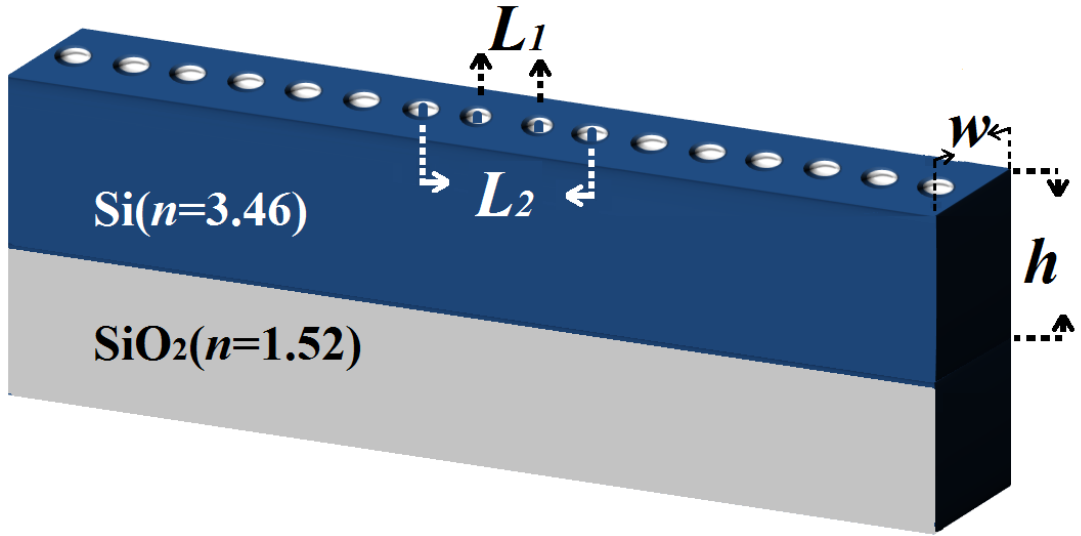
Şekil 2.6 Φ_1 ve Φ_2 değerlerine bağlı frekans farkı grafiği.

Kavitenin özelliği olarak çokça içerideki iki HFK arasında oluştuğunu doğal olarak Φ_1 değişiminin TE, TM kavite frekanslarının kesişimine etkisinin Φ_2 varyasyonundan daha etkili olduğunu söylemek mümkündür. Bu 2B analiz sonuçlarına dayanarak düzlemsel parametrelerin en iyilenmiş halleri 3B analize başlamak için ilk değerler olarak kullanılmaktadır.

Çalışmanın bütünlüğünü, üretilebilir bir konsept olduğunu göstermek amacıyla 2B düzlemde yapılan çalışmalar, 3B yapı için tekrar edilmiştir. 3B çalışmada fazladan bir tasarım parametresi olarak, h değişkeninin de farklı polarizasyonlarda dalga kılavuzunda oluşan kavitelelerin frekans değerlerinin aynı frekansa getirebilmesi üzerine etkileri araştırılmıştır. Bu durumda düzlemin dışına olan sızmalar gerçekleşmektedir, doğal olarak kavitede hapsedilen enerji ve kavitenin kalite

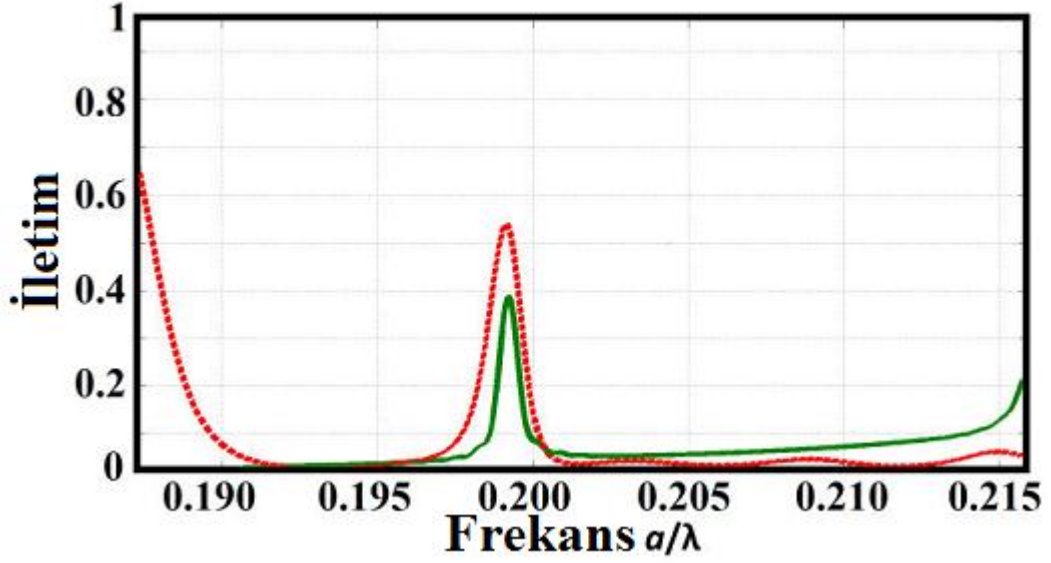
faktörü düşmektedir. En iyi durumu yani minimum δf ve maksimum muhtemel kavite faktörü için değişkenlerin değerleri $L_1=1.0a$, $L_2=3.5a$, $\Phi_1=0.36a$ ve $\Phi_2=0.40a$ olarak hesaplanmıştır. 3B çalışmada pek çok parametre olduğundan ve yapının 3B simülasyonunun numerik ağırlığının çok oluşundan zaman kaybı göz önünde tutularak araştırmalar 2B yapıya ait en iyi durumun parametre değerlerinin yakın komşuluğunda yapılmıştır.

Bu durumda simülasyonlar sonucu elde edilen en iyi 3B polarizasyon bağımsız kavite yapısı Şekil 2.7 de paylaşılmıştır. Yapı slika substratın üzerindedir ve kırılma indisi değerleri şekilde belirtilmiştir.



Şekil 2.7 Üç boyutlu araştırmaların sonucunda elde edilen optimum 3B yapı, yapısal bazı parametreler ve kırılma indisi değerleri.

3B yapıya ait iletim spektrumu Şekil 2.8’ de çizdirilmiştir. Kolayca görüleceği gibi hem TE hem de TM polarizasyon $a/\lambda = 0.19915$ frekansında rezonans moddadır. FYB’in ortasında oluşan bu modun bir kusur modu olduğu açıktır. Çalışılan dalga boyu şimdiye kadar çalışmanın alt yapısını oluşturan Maxwell Denklemleri ve varsayımsal yaklaşımların tamamı ölçeklendirilebilir olduğundan herhangi bir optik dalgaboyuna eşitlenebilir. $\lambda = 1550nm$ kabul edildiğinde kusur modu frekansını göz önünde bulundurarak yapının ördü sabiti $a = 309nm$ olmaktadır.



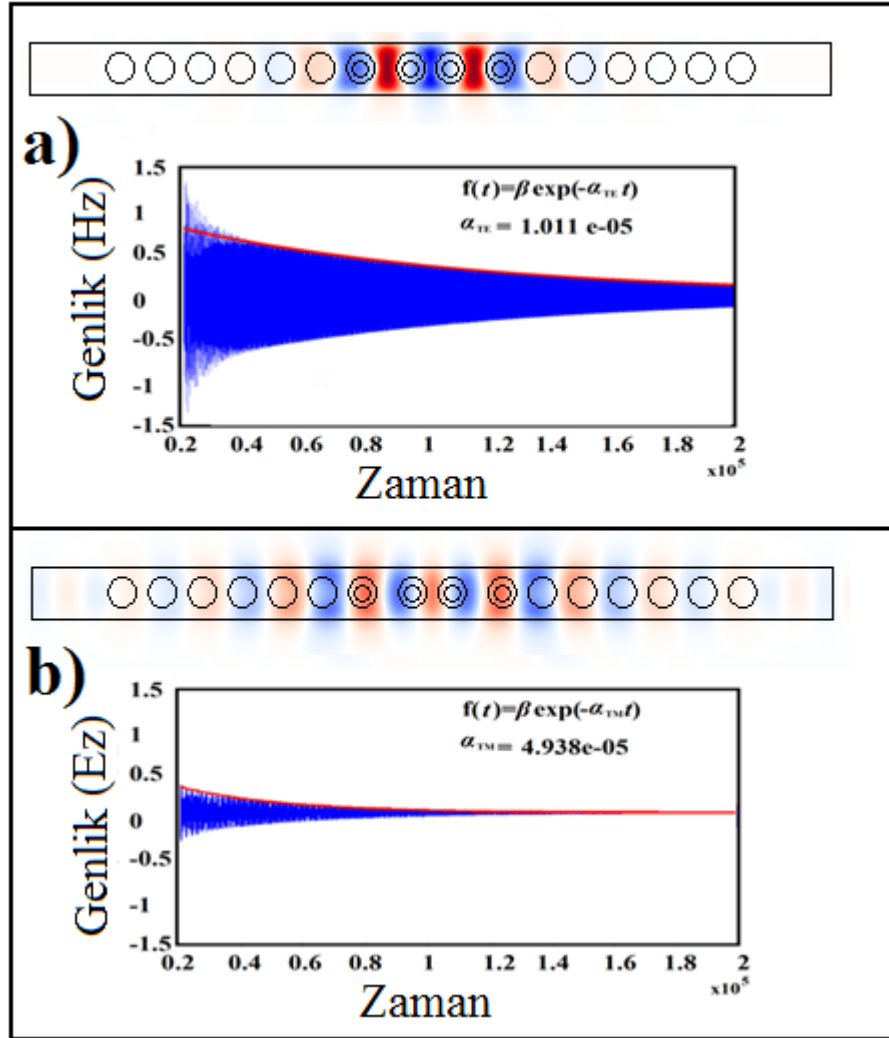
Şekil 2.8 3B HFK yapıya ait iletim spektrumu.

Bir başka çalışmada 3B bu yapı genişlik ve yükseklik değişkenlerinin frekans kesişimi üzerine etkileri göz önünde bulundurularak incelenmiştir [21]. Dikkat edilmelidir ki, sadece tek bir frekans, yükseklik, genişlik değeri için değil; ayrıca pek çok farklı noktada farklı yükseklik-genişlik-frekans değerleri için TE-TM polarizasyon kusur modları frekans kesişimleri sağlanmıştır. İletim spektrumu analizi için Gauss kaynak kullanılmıştır; ancak rezonanstaki elektrik ve manyetik alanların analizi için dalga klavuzunun ortasına noktasal devamlı kaynak konulurken rezonans frekansını yapı tekrar incelenmiştir. Işık kaynağının yapıyı beslemesi sonlandırıldığında elektrik ve manyetik alanların değişimi zamana bağlı gözlemlenmiştir. TE ve TM polarizasyonlara ait azalma katsayıları hesaplanabilir (bu alanların zamana bağlı yapıya dağılımlarından yararlanılarak). Buradan yola çıkılarak Q faktör:

$$Q_{(TE, TM)} = \frac{\mathcal{R}_r}{\alpha_{(TE, TM)}} \quad 2.2$$

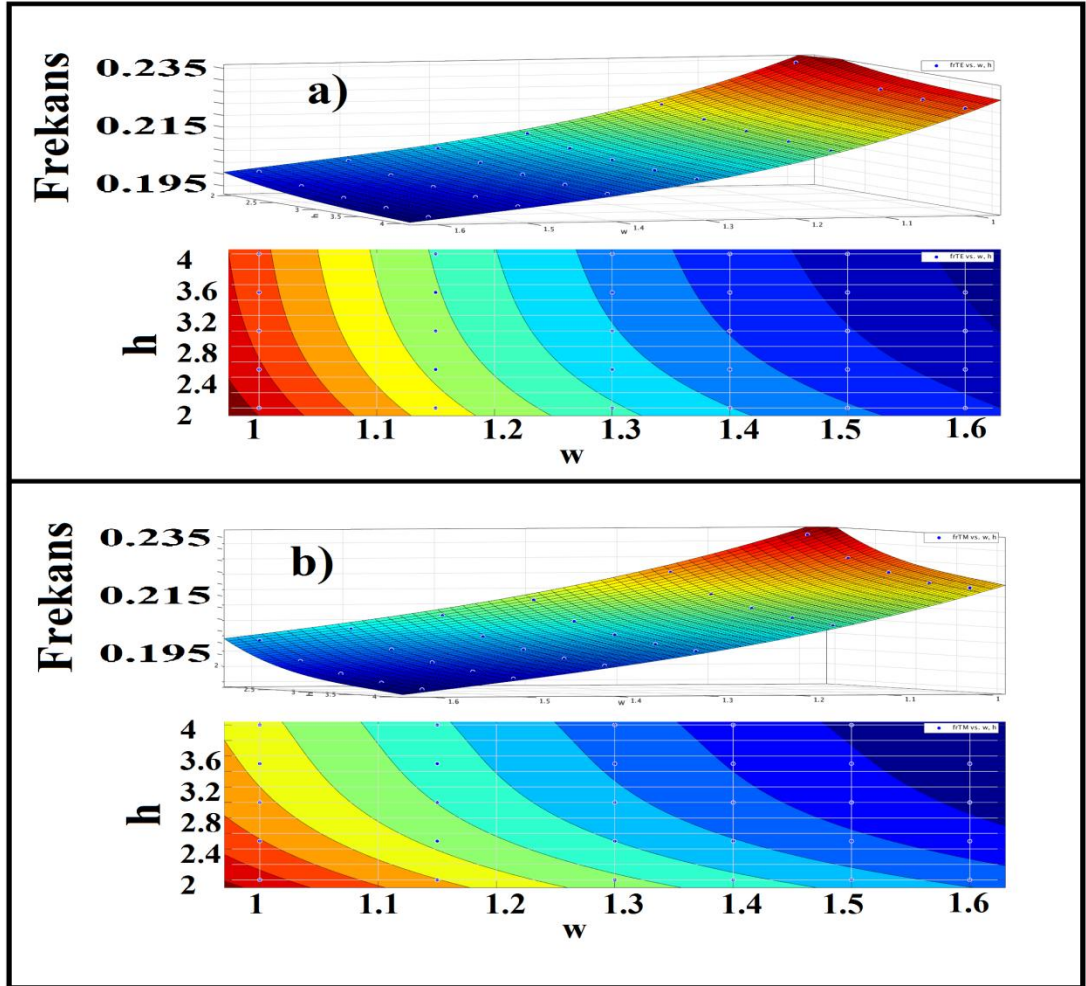
olarak hesaplanır.

Eşitlik 2.2’de f_r rezonans frekansını, α ise zayıflama katsayısını ifade etmektedir. Alan dağılımlarının zayıflama katsayılarını hesaplamak için bu alan dağılımlarına ait grafiklerin üzerine uyan bir azalma zarfı oluşturulmuştur. Bu zarf $\beta \exp(-\alpha t)$ formunda zamana bağlı zayıflayan bir sinyaldir. Burada β büyüklük katsayısı, α zayıflama katsayısı ve t de zamandır. Bu katsayılar, hesaplanma yöntemleri, oluşturulan azalma zarfı alanların zamana göre dağılımlarını gösteren Şekil 2.9.a’da TE mod için ve 2.9.b’de TM mod için verilmişlerdir.



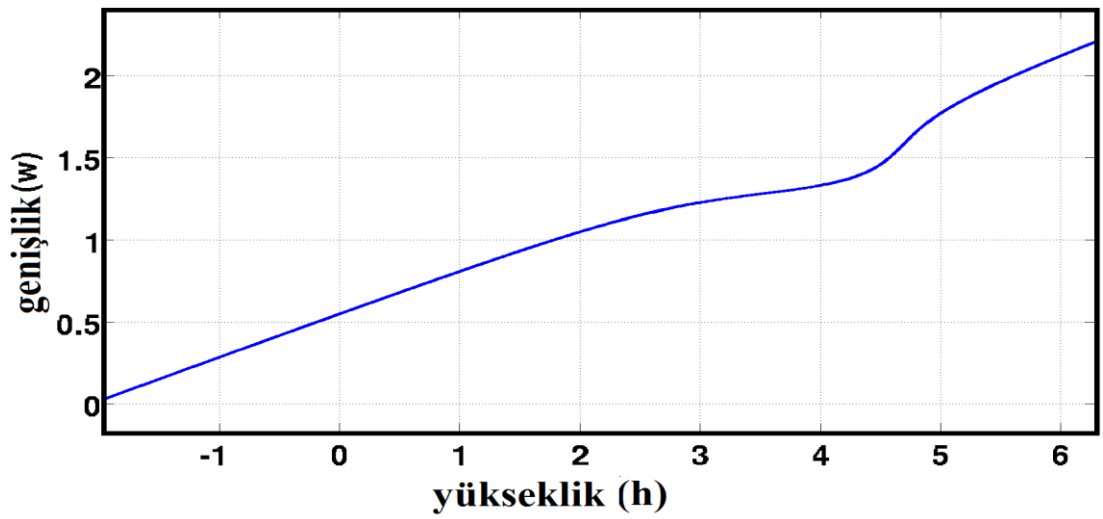
Şekil 2.9 3B yapının zamana bağlı a) TE mod Hz alan dağılımı, b) TM mod Ez alan dağılımı.

Grafikler ve Eşitlik 2.2 den yararlanılarak her iki polarizasyon için de aynı frekansta Q faktör TE için 61884 ve TM için 12669 olarak hesaplanmıştır. Ayrıca yapının yükseklik olarak tam orta noktasına, $z=h/2$, ait Hz (Manyetik alan z) ve Ez (Elektrik alan z) grafikleri de şekillerin üstünde paylaşılmıştır. TM mod geniş bir alana yayılırken, TE mod çoklukla kusur bölgesinde yoğunlaşmıştır. Kavitenin her iki tarafındaki toplam delik sayısı 12 dir. Unutulmamalıdır ki bu yapıda herhangi bir delik modifikasyonu, daraltarak değiştirme, yarı çap varyasyonu yapılmıştır. Yüksek kavite elde etmek bu araştırmanın alanı dışındadır ve yukarıdaki gibi pek çok yöntemle yada delik sayısı artırılarak kavitenin arttırılabileceği bilinmektedir.



Şekil 2.10 Üç boyutlu yapının yükseklik ve genişliğe bağlı a) TE kusur modu rezonans frekanslarının oluşturduğu, b) TM kusur modu rezonans frekanslarının oluşturduğu örgüler.

Yükseklik ve genişliğin 3B yapının TE ve TM rezonans frekanslarının kesişimi üzerine etkisini araştırmak için yapının bu parametrelerin değişimine verdiği cevaplar ayrı ayrı incelenmiştir. Her bir deneme için bir parametre değeri değiştirilmiş buna karşılık yapının iletim spektrumu, Elektrik ve Manyetik alanının zamanla değişimi incelenmiştir. Bu bilgilere bağlı olarak farklı yükseklik ve genişlik değerlerinde 3B yapının Q faktörü ve TE, TM kusur modu frekansları incelenmiştir. Yapılan pek çok simülasyonlarda parametrelerin ayarlanmasıyla TE ve TM rezonansların aynı frekanslarda oluştuğu senaryolar belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar yükseklik ve genişlik parametrelerine bağlı ortak frekans verileridir. Bu ortak frekansların anlaşılması için TE rezonansın elde edildiği frekans değerlerinin yükseklik ve genişlik parametrelerine bağlı değişimini ifade eden Şekil 2.10.a'daki örgü elde edilmiştir. Bu örgü yükseklik ve genişlik parametrelerinin 3. dereceden bir polinomudur. Benzer şekilde, Figür 2.10.b'de gösterilen TM polarizasyonuna ait örgü ile TE polarizasyonunun örgüsünün kesişim noktaları, aynı frekans değerinde, aynı yapı için yani aynı yükseklik ve genişlik değerinde rezonansın gerçekleştiği noktalardır. Dolayısıyla bu ortak rezonans frekansını sağlayan parametre değerleri yükseklik (x), genişlik (y) ve frekans (f(x,y)) olacak şekilde bir polinoma uydurulmuştur. Yükseklik ve genişliğin 3. dereceden bir polinomu olarak tanımlanan ortak rezonans frekansı eğrisi Şekil 2.11 de verilmiştir.



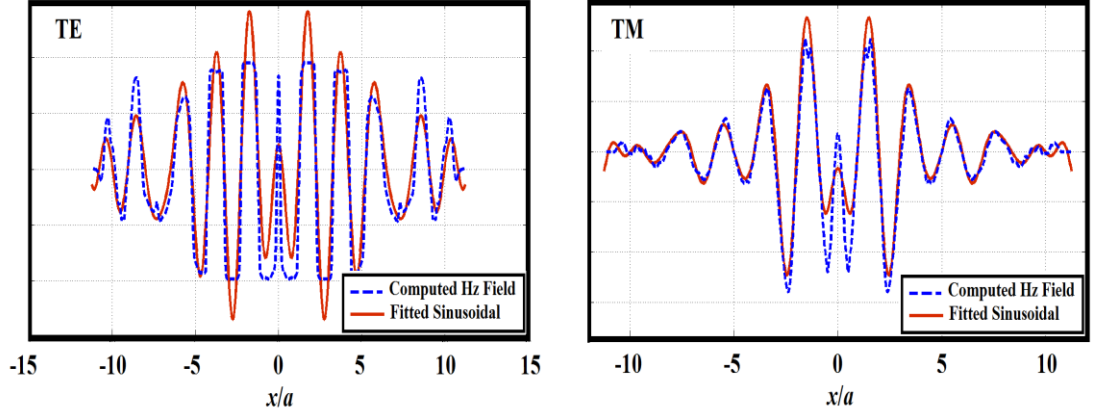
Şekil 2.11 Yükseklik ve genişlik değerlerine bağlı olarak hem TE hem de TM modda kavite oluşan frekansların değişimi.

Şekildeki eğri kesişim frekansının sağlandığı yükseklik değerlerine sahip yapılar için gerekli genişlik değerlerini göstermektedir. Eğride yükseklik değerinin aldığı negatif değerler için de elde edilecek kesişim frekansları belirtilmiştir; ancak bu durum tabiki fiziksel olarak mümkün olmayan bir durumdur, buna bağlı olarak yapıda ortak kavite frekansı elde edilmesi için gerekli minimum genişlik değerinin $0.5a$ dan yüksek bir değer olduğu seçilmektedir.

Çalışma 2B HFK dalga klavuzları için başlatılmış ve 3B yapılarla bitirilmiştir. İlk olarak kalsik bir 2B kavite yapısına HFK eklenerek TE ve TM kavite frekanslarının kesişimi sağlanmıştır. Bu yapının tüm parametreleri geniş bir skalada kesişim elde etmek için taranmıştır.




Yapıya ait sorulabilecek pek çok soru mevcuttur. Bu yapılarda periyodikliğin bozulmasıyla yapıda ilerleyen Bloch-mode salınım bozulmaktadır. Bu şekilde empedans değişiminden kaynaklanan dağıtılmış Bragg yansımaları ve bunların girişimiyle oluşan ilerleyen salınımlar bu çalışmanın incelediği elektrik ve manyetik alanları oluşturmaktadır. Bu tür yapılara Fabry-Perot yapıları denir ve çalışmamızda da görülen kavite birer Fabry-Perot rezonansıdır.

Ana nokta şudur ki, iki ayna arasında seken bir mod bulunmaktadır, bu mod TE de olabilir TM de. TE ve TM modların dalga klavuzunda ilerleyişleri genelde birbirinden farklıdır ve bunun sonucu olarak çalışmada daha önceden de ifade edildiği gibi üzerlerine etkiyen efektif kırılma indisleri farklıdır. Ayna görevi gören kısımlardan farklı şekilde yansımaktadırlar. Bu farklı modlara ait normalize alan dağılımları ve yapının farklı bölümlerinde etkiyen efektif kırılma indisleri sırasıyla Şekil 2.12 ve Tablo 2.1 de paylaşılmıştır. Öte yandan HFK kullanımıyla ilgili bir diğer ilginç soru ise, Şekil 2.13a de paylaşılan HFK ile aynı etkin kırılma indisine sahip ancak sadece yarıçapı daha küçük bir hava deliği kullanılan bir yapı aynı etkiyi sağlayabilir mi? Ya da dört tane kullanılan HFK yerine kusur bölgesinde 2 adet HFK kullanılırsa aynı etki sağlanabilir miydi? 2 HFK le yapılan tasarım Şekil 2.13 b de gösterilmektedir.



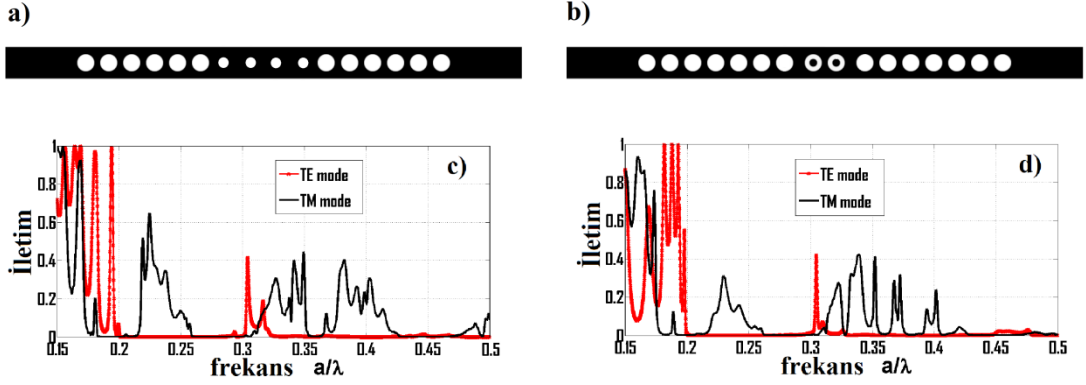
Şekil 2.12 Yapının ortasındaki normalize alan dağılımları a) TE polarizasyon, b) TM polarizasyon için. Devamlı ışık kaynağı yapının tam ortasına konmuş ve kararlı hal dağılımı çizdirilmiştir.

Tablo 2.1 Yapının farklı bölümlerinde TE ve TM modda ilerleyen dalga tarafından hissedilen efektif kırılma indisleri.

| | | | |
|---|--------------------------------------|-------------------|----------------------------|
|  | $R_{out}=0.36 a$ $R_{in} =0.20 a$ | TE kırılma indisi | $n=2.58$ |
| | | TM kırılma indisi | $n=2.87$ |
|  | $R_{out}=0.36 a$ $R_{in} =0.18 a$ | TE kırılma indisi | $n=2.51$ |
| | | TM kırılma indisi | $n=2.79$ |
|  | $R_{out}=0.36 a$ $R_{in} =0.00 a$ | TE kırılma indisi | $n=2.39$ |
| | | TM kırılma indisi | $n=2.39$ |

Bunları araştırmak için uygulanan simülasyon sonucunda elde edilen iletim spektrumları Şekil 2.13c ve d' de verilmiştir. Bu iletim spektrumlarından ve elde edilen tüm iletim frekanslarında yapıların ayrı ayrı belirlenen frekanslarda ışıma yapan devamlı kaynaklarla aydınlatılması sonucunda yapıda hapsolan ya da ilerleyen yada hemen sızıp yok olan elektrik ve manyetik alanların zamana bağlı değişimi incelenerek yapının detaylı analizi yapılmıştır.

İletim spektrumunda rezonans moda yakın tüm pikler incelenmiştir ve rezonans modu olup olmadıkları araştırılmıştır. Elektrik ve manyetik alan dağılımlarına bağlı gözlemlenmiştir ki rezonans gerçekleşen tek frekans paylaşılan kusur modudur. Diğer iletim pikleri dağıtılmış Bragg yansımalarından kaynaklanan iletim frekanslarıdır ancak bu frekanslarda gerçekleşen bir kavite oluşmamaktadır.



Şekil 2.13 3B yapının HFK kullanılmadan a) HFK yerine aynı kırılma indisli FK kullanılırsa elde edilen tasarım, b) 4 yerine 2 HFK kristal kullanılarak elde edilen tasarım, c) a) da verilen yapının iletim spektrumu, d) b)de verilen yapının iletim spektrumu.

Şekilde 3B yapının alternatif tasarımları a ve b’de verilmiştir. Bu görseller yapının x-y düzlemindeki görüntüsüdür. Yukarıda bahsedildiği, şekildeki iletim spektrumlarından da açıkça görüleceği gibi alternatif senaryolar TE, TM kavite frekansının kesişimi bir yana TE modda kavite bile oluşturamamaktadırlar. Bu vesileyle bir kez daha yapının özgünlüğü ve yetkinliği doğrulanmış olmaktadır.

Sonuç olarak bu çalışmada polarizasyondan bağımsız olarak kavite elde edilecek bir yapı elde edilecek bir yapı tasarlanmıştır. Bilinen literatürde polarizasyon bağımsız kavitenin tek bir frekansta değil geniş bir bantta elde edilebilen ilk çalışmadır. Yapısal parametrelerin değişimine bağlı olarak yapının özellikleri incelenmiştir. Hem 2B hem de 3B TE, TM kusur modu frekanslarının kesişimini sağlayan yapılar elde edilmiştir. Bu çalışma optik sensörlerden filtrele, anahtarlamalardan laser uygulamalarına kadar pek çok çalışmaya yol gösterecek niteliktedir. Polarizasyon uyumsuzluğundan kaynaklanan kazanç kayıplarının önüne geçmek tüm bu çalışma alanları gibi askeri ve sivil uygulamalarda, radar çalışmalarında maksimum menzilin artması gibi kazanımları da sağlayabilecektir.

3. MODİFİYE GENETİK ALGORİTMA KULLANILARAK RASTGELE YERLEŞTİRİLMİŞ 1 BOYUTLU FOTONİK KRİSTAL YAPILAR VE YASAKLI BANT ARALIKLARININ HESAPLANMASI

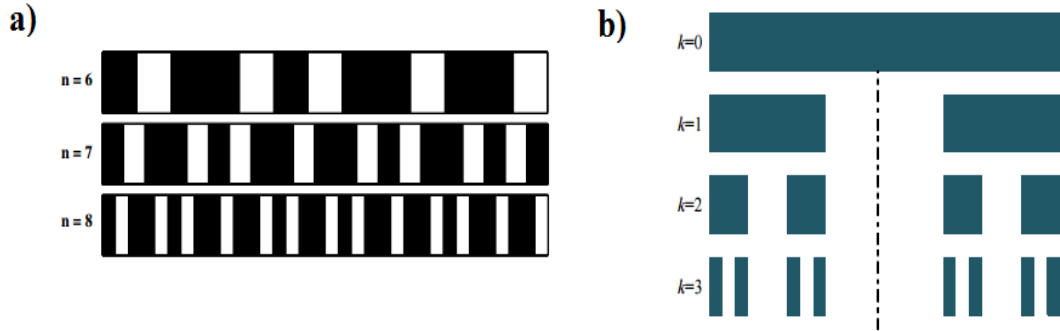
3.1 Genetik Algoritmanın 1B FK Yapılara uygulanması

Periyodik değişen dielektrik sabitler, ilerleyen-yansıyan ışık tarafından aydınlatılan pek çok arayüz, bu arayüzlerin uzaysal genişlikleri, fotonik kristallerin uzunlukları ve benzeri değişkenlerin de biri yada bir çoğu fotonik kristal araştırmaların ana konusu olmuşlardır. Ancak genel olarak Fotonik Kristal üzerine çalışmalar bu parametrelerden faydalanarak bir önceki bölümde ifade edilen Fotonik Yasaklı Bandın mühendisliği ve özelliklerinin arttırılmasının üzerinedir. Temel olarak Fotonik çalışmanın gelişimini incelersek beklendiği üzere ilk olarak 1 boyutlu yapıların çalışıldığını daha sonra araştırmanın 3 boyutlu yapılar üzerine yoğunlaştığını görülmektedir[22]. Ancak zamanla mikronun altındaki ebatlarda 3 boyutlu, görünür ışık ve kızılötesi yönlendirilebilecek yapıların üretiminin zorluğu araştırmaları tekrar 2 Boyutlu yapılaraya yönlendirmiştir[23]. Bu şekilde Fotonik Yasaklı Bant uygulamalarıyla lazerler, yüksek oranda yasıtıcı aynalar, süper prizmalar, yüksek kalite faktörlü kaviteler, düşük eşikli lazerler, tamamen optik anahtarlamalar, optik tranzistörler ve mantık kapılarının üretilmesi mümkün olmuştur [24-33]. Son dönem de ise 1 boyutlu Fotonik Kristal yapılar hem üretim kolaylıkları, hem çok daha yüksek frekansta ışıkla çalışmaya imkan vermesi ve opto mekanik uygulamalara açık olması nedeniyle gittikçe popüler olmuştur[34-35].

Önceki bölümde yapının bir bölgesindeki bir kristalin kaldırılması ya da periyodik kırılma indisi değişiminin bir şekilde aperiyojik hale getirilmesinin yapıda bu bozukluk bölgesinde bir kaviteye neden olduğu gösterilmiştir. Bu çalışmada ilginç nokta periyodikliğin bozulduğu bölgenin efektif kırılma indisine sahip geleneksel fotonik kristal örgü gene aynı bölgeye uygulandığında yapının polarizasyondan bağımsız olmadığı ve kavite değerlerinin düştüğü gözlemlenmiştir. Halkalı Fotonik Kristal sayısı kullanılan ayna segment sayısına oranla oldukça az sayıda dizilmiş de

olsa yapının kavitesinin karakterini çok büyük oranda belirlemiştir. Bu yapının etkisinin gözlemlenmesi yazarların farklı bir konuyu merak etmesini sağlamıştır. Periyodik yapının ortasında çeşitli manipülasyonlarla kavite ve güçlü bir filtreleme elde etmek yerine yapının tamamının aperiodyk olması yani tamamen rasgele dizilimde bir yapı olması durumunda; iletim spektrumu, filtreleme özellikleri, yüksek kavite, polarizasyon dönüşümü vb. gibi karşılaşılabilecek olası sonuçlar sınırsız ihtimaller içermektedir. Periyodik yapıya ait bütün sabit parametreler yayılan ışığın karşılaştığı her arayüzde farklı değerler alacak ve yapıdan beklenen özelliklerde bir iyileşme görmek mümkün olabilecektir.

Periyodik Fotonik Kristal dizisi yerine tamamen rasgele yerleştirilmiş Fotonik Kristal bir yapı planlanmıştır. Buna benzer çalışmalar tamamen rasgele olmasa da yarı rasgele olarak çalışılmıştır. Önemli örnekler Fibonacci ve Cantor serileri düşünülerek üretilen Fotonik Kristal yapılarıdır[36,37]. Bu yapılar Şekil 3.1’de paylaşılmıştır.

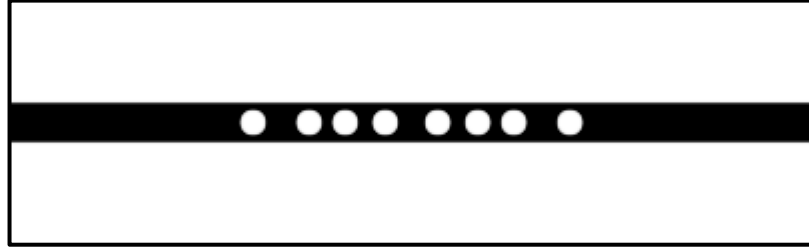


Şekil 3.1 Yarı rasgele çok katmanlı dielektrik dizilimler a) Fibonacci serisine uygun dizilimin 6,7 ve 8. katmanları, b) Cantor serisine uygun dizilim.

Bu yarı rasgele yapılar geleneksel FK yapılarından farklıdır ve periyodik değişmemektedirler; ancak birbirine ardına gelen bir kaç FK periyodik olmasa da yapıda bir sonraki kristalin ya da dielektrik katmanın nerede bulunacağı seriye bağlı olarak tahmin edilebilmektedir. Bu çalışmalarda her katman serinin varyasyonlarına göre değişkenlik göstereceği için her katmanın iletim spektrumu da değişmektedir. Bağlı olarak efektif lens tasarımları, çok kanallı filtre çalışmaları gibi çalışmalar için bu tür yarı rasgele yapılar oldukça ilgi çekici sonuçlar vermektedir. Sıralaması

değiştirilmiş bu ortamların, yarı rasgele dizilmiş Fotonik Kristallerin, bu tür üstün özellikler sağlayabilmesi, artan parametre sayısı ve bunların alabileceği değer skalasının genişliği tamamen rasgele dizilmiş FK yapıları araştırmak için cesaretlendirici olmaktadır.

Çalışmamızda literatürde daha önceden araştırılmamış olan tamamıyla rasgele dizilmiş 1B FK yapı incelenmiştir. Bu tür yapıların geleneksel FK yapılardan üstün olabilecek özellikleri iletim spektrumu ve kaviteleeri gibi çıktıları göz önünde bulundurularak karşılaştırılmıştır. Şekil 3.2 de rasgele dizilmiş 1B FK yapıya örnek verilmiştir.



Şekil 3.2 Rasgele dizilmiş 1 boyutlu Fotonik Kristal yapı.

Bu çalışmada geleneksel FK yapılara kusur modunun eklenmesi gibi aperiodyk yapının da ortasında bir kavite elde edilmek istenmiştir. Böylece rezonansın yapı üzerinde iki tarafında da yansıtıcı bölümler olması, rezonansın güvence altına alınması, amaçlanmaktadır. Bu yapıyla, aynı standartlarda oluşturulacak (aynı FK sayısı, aynı kırılma indisli ortamlar, aynı yarı çaplar vb.) periyodik ortamdan üstün olabilecek özelliklerine dikkat çekilmek hedeflenmiştir. Bunun için aperiodyk dizilen FK bloğa daha sonra bir kusur bölgesi eklenmiş ve aynı blok dizilimi simetrik olacak şekilde tekrarlamıştır.

Yarı rasgele yapılardan farklı olarak, sınırsız parametre uzayı bu olası yapıların tamamının incelenmesini oldukça güçleştirmektedir. Bu yüzden rasgele tasarlanmış

bir kaç farklı yapıdan faydalanılarak sadece o yapılardan belirli bir özellik bakımından daha üstün olan yapıları inceleme fikri ortaya çıkmıştır. Çalışmayı bu anlamda daha spesifik hale getirmek için temel amaç olara yüksek kavite değeri elde etmek güdülmüştür ve her bir yeni tasarımın bir önceki tasarımdan daha yüksek kavite vermesi hedeflenmiştir. Burada yazarlar modifiye edilmiş genetik algoritma methodundan yararlanmışlardır[38]. Daha önceden FK kristallerin rasgele dizilmesi sonucu dalgaboyunun altında odaklama sağlayan iletim kanalı çalışılmıştır ancak; burada yöntem kanaldaki dağıtıcıların yerleşiminin gittikçe iyileştirildiği bir algoritma değil, istenen iletim ve odağı sağlayacak dağınımın teorik hesaplanmasıyla elde edilmiştir. Yani bir çeşit tersine mühendislik yapılarak doğrudan istenen sonucu veren aperiodyk ama rasgele olmayan 2B bir dizilim oluşturulmuştur[39].

Bir boyutlu FK nano dalga kavite dizaynlarının kalite faktörleri genetik algoritma kullanılarak arttırılmıştır. Rasgele dizilmiş ve periyodik dizilmiş FK yapılardan, yapılar aynı kusu bölgesine sahipken, elde edilen kalite faktörleri karşılaştırılmış ve bu karşılaştırmalar yapının bir tarafındaki delik sayısı 3 ile 7 arasında değişirken tekrarlanmıştır.

Yarı çap, deliklerin birbirlerine uzaklıkları ve kırılma indisi araştırmanın değişkenleri olurken, kalite faktörü yapının uygunluk derecesini belirleyen parametre olmuştur. İlk iki rasgele yapı temel alınan yapılardır. Bundan sonra algoritmada “delete-all” methodu çalışılmıştır, böylece farklı jenerasyonlarda aynı örnekler kullanılmamıştır. Ayrıca bir optimizasyon süreci işleren o süreç içinde delik sayıları sabit tutulmuştur daha sonra farklı delik sayısı için aynı süreç tekrarlanmıştır. Her bir neslin rasgele oluşturulmasından sonra her örnek ayrı ayrı değerlendirilmiş ve uyumluluk parametrelerine göre (kalite faktörü) sıralanmışlardır. i her bir örneğin uyumluluk parametre değerinin sırasını ifade eden pozitif tek tamsayıdır ve algoritmanın bir sonraki basamağında i 'inci ve $i+1$ 'inci örnekler birbirleriyle çaprazlanmıştır. Uyumluluk faktörünün daha da iyileştirilmesi için geleneksel genetik algoritma burada modifiye edilmiş ve sıralaması iyi olan çiftler daha fazla çaprazlanmışlardır ve bir sonraki nesile etkilerinin arttırılması hedeflenmiştir.

İzlenen algoritmaya göre eğer bir nesildeki örnek sayısına n dersek i 'inci ve $i+1$ 'inci sıraya sahip örneklerin oluşturduğu çiftin çaprazlanma sayısını:

$$m - \binom{i-1}{2} \quad 3.1$$

ile ifade edebiliriz. Burada m 1. ve 2. sıradaki örneklerin çaprazlanma sayısına eşittir. Böylece her nesilde üretilen örnek sayısını sabit tutmak için bu sayının:

$$n = \binom{m(m+1)}{2} \quad 3.2$$

olması gerektiği hesaplanmıştır. Ek olarak n 'in tek sayı olabilmesi için m sayısının k pozitif tam sayıyken $4k$ ve ya $4k-1$ 'i sağlaması gerekmektedir.

Modifiye edilmiş genetik algoritmayla rasgele oluşturulan toplamda 6 ile 14 delik sayısına sahip yapıların ortasında oluşan kavite değerleri ve aynı delik sayılarına sahip periyodik dizilimli yapıların ortalarında birinci bölümde anlatıldığı gibi bir kusur modu oluşturulmasıyla elde edilen en yüksek kavite değerleri Tablo 3.1 de verilmiştir.

Tablo 3.1 Değişen delik sayısına bağlı, periyodik dizilmiş 1B FK yapıda ve rasgele yerleştirilmiş 1B FK yapıda kavite değerleri.

| Delik Sayısı | Periyodik Yapı Kavite | Rasgele Yapı Kavite |
|--------------|-----------------------|---------------------|
| 6 | 352 | 90 |
| 8 | 571 | 300 |
| 10 | 634 | 1268 |
| 12 | 646 | 8963 |
| 14 | 649 | 8475 |

Tablo 3.1 de dikkat çekici özellikler mevcuttur. Delik sayısı artmasına bağlı olarak beklenildiği üzere hem periyodik hem aperiodyk yapıda kavite artmaktadır. Görece az sayıda delikten oluşan yapılarda periyodik yapılara ait kavite değerlerinin daha yüksek olduğu görülmekte; ancak, aperiodyk yapılara ait kavite değerlerinin delik sayısındaki artışa daha yoğun tepki verdiği ve kavite değerlerinin daha hızlı arttığı ortadadır. Düzenli yapı belirli delik sayısından sonra doygunluğa ulaşmış gözükmemektedir; ancak, rasgele yapı ilk jenerasyonu yenilenip tekrar elde edilirse daha yüksek kavite değerleri elde etmek her zaman mümkündür. Bununla birlikte çok açıkça ortadadır ki standart bir FK kavite yapısı sadece kristallerin lokasyonlarının düzensizleştirilmesiyle çok yüksek kavite değerlerine kavuşabilir. Bu da benzer kavite çalışmaları için genetik algoritma uygulamalarını çok çekici hale getirmektedir.

3.2 Rasgele Dizilmiş 1B FK Yapılarda FYB Hesabı

Rasgele dizilmiş yapılara modifiye edilmiş genetik algoritma uygulamak tamamıyla rastlantısal sonuçlar almak yerine her adımda belirli bir parametrede daha iyi sonuçlar alınmasını, sonuç olarak aynı yansıtıcı bölüm sayısına sahip geleneksel bir 1B FK yapıda elde edilebileceğinden çok daha büyük kalite faktörleri elde edilmesini sağlamıştır. Bu çalışmamızda ve daha önce ifade edilen yarı rasgele 1B FK yapıların çalışıldığı araştırmalarda sonuçların matematiksel izahı oldukça eksiktir. İncelemelerin sonuçları daha çok empiriktir ve teorisinden ziyade methoduyla araştırmaları bir adım öne çıkarabilmektedir. Rasgele yapılarda ilerleyen EM enerjisi, periyodik yapılardan farklı olarak genel bir uzaysal Fourier açılımı ile ifade etmek mümkün değildir. Çünkü bir periyodu yoktur, dolayısıyla elektrik ve manyetik alanın dağılımını öngörememek bu tür yapılarla çalışmayı zorlaştırmaktadır.

1B periyodik ortamları basitçe elektriksel geçirgenlikleri belirli bir simetriye sahip olan ortamlar olarak tanımlayabiliriz.

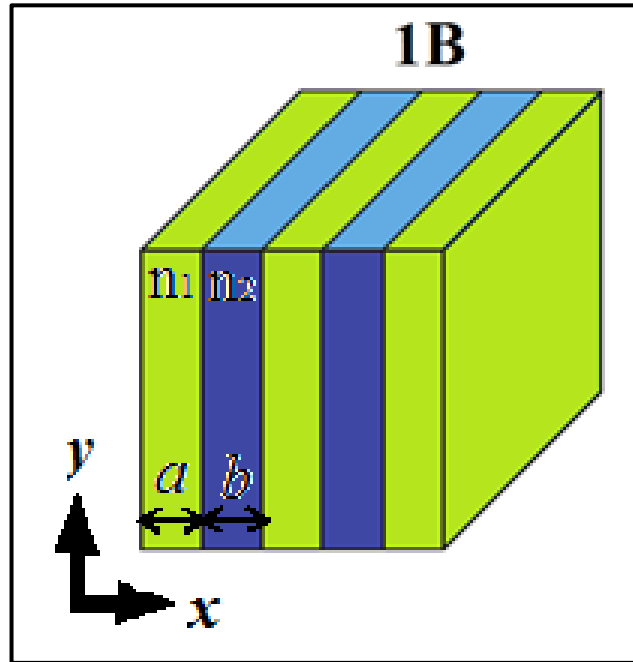
$$\varepsilon(x) = \varepsilon(x + \Lambda) \quad 3.3$$

ε elektriksel geçirgenlik x yayılım doğrultusu ve Λ yapının simetri vektörüdür. Eşitlik 3.3 ile ifade edilen bir ortamın simetri vektörü kadar farkla bakılan noktaları ortamda yayılan EM dalga için tamamen aynıdır. Burada çalışmamızı ve kullanacağımız formülasyonları manyetik olmayan ortamlarla ($\mu = \mu_0$) sınırladığımızı belirtmeliyiz. Bu durumda 1B periyodik ortamların yayılan enerjiye uyguladığı kırılma indisi ve empedans:

$$n(x) = n(x + \Lambda) \quad 3.4$$

$$\eta(x) = \eta(x + \Lambda) \quad 3.5$$

da periyodik olarak değişecektir ve eşitlik 3.4 ve 3.5'te ifade edildiği gibi bir formülasyon kullanmak mümkündür. Şekil 1.1'de belirtilen bir boyutlu en basit periyodik ortam Şekil 3.3 de verilmiştir.



Şekil 3.3 Bir boyutlu fotonik kristal periyodik yapı

Şekil 3.3 de paylaşılan ortam periyodik dizilmiş iki farklı kırılma indisli ortamlardan oluşmaktadır. Farklı kırılma indisli ortamların, n_1, n_2 , kırılma kalınlıkları da farklıdır sırasıyla a ve b olarak belirlenmiştir. Bu durumda yapının periyodu $\Lambda = a + b$ olur ve 1B periyodik ortamlar için yazdığımız eşitlik 3.3, 3.4 ve 3.5 de bu yapı için tamamen geçerlidir.

Bir ortamda ilerleyen ışığın dalga vektörünü:

$$E(x, y, t) = E(x)e^{i(\omega t - k_y y)} \quad 3.6$$

olarak ifade edebiliriz[13]. Eşitlikte k_y dalga vektörünün y komponentidir. Çalışmamızda yapının içerisinde dalga vektörü x eksenine paralel ilerleyen dalgaları incelediğimiz için eşitliğin y bağımlılığı da ortadan kalkmaktadır. Eşitlik 3.6 yı Şekil 3.2 de verilen ortam için Eşitlik 3.4 ve 3.5'i göz önünde bulundurarak tekrar yazarsak n_1 ve n_2 indislerine sahip katmanlar için iki farklı dalga vektörü ortaya çıkar. Maxwell denklemleri bu dalga vektörlerinin farklı katmanların sınırlarında devamlılık arz etmesi gerektiğini söylemektedir. Bu durumda dikkat edilmesi gereken, periyodik yapıda ilerleyen dalganın yapının belirli bir noktasındaki dalga vektörü ifadesinin değişen polarizasyonlar için farklı olacaktır. TE polarizasyon için $x - y$ düzlemine dik bir elektrik alan ve paralel bir manyetik alan mevcuttur ve iki farklı katmanın sınırında E_z ve H_{-y} devamlılık gösterir. Peşpeşe gelen arayüzlerdeki elektrik ve manyetik alan eşitlikleri bir önceki arayüzle ilişkilidir. Bir katmandaki ilerleyen ve yansıyan elektrik alan ve manyetik alan vektörleri toplamı arayüzde eşit olmalıdır. Bundan yararlanarak peşpeşe gelen üç arayüzde yazılacak elektrik ve manyetik alan eşitlikleri, aralarında $k\Lambda$ kadar uzaysal fark bulunan, k tam sayı, iki farklı noktada dalga vektörleri arasındaki ilişkiyi veren bir matris ifadesi ortaya çıkarır.

$$\begin{bmatrix} E x_i \\ E x'_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E x_{i+1} \\ E x'_{i+1} \end{bmatrix} \quad 3.7$$

i yapının kaçınıcı biri hücreinde bulunduğunu göstermektedir. x ileryen dalga vektörü indisi x' ise yansıyan dalga vektörü indisi olarak kullanılmıştır. Eşitlik 3.6'da verilen dalga vektörü Eşitlik 3.3 ve 3.4 'ü sağlayan frekanstan bağımsız monokromatik ortam için yazarsak:

$$E_K(x) = E_K(x + \Lambda) \quad 3.8$$

elde edilir. 1B periyodik ortamlarda ilerleyen dalgalar Bloch Kanunu'ü takip ederler ve basitçe bu şekilde ifade edilebilirler, eşitlikte K Bloch dalga sayısıdır ve ışığın dalga boyuna bağılıdır ($k_y = 0$). Eşitlik 3.8'den yararlanılarak aralarında $k\Lambda$ kadar fark bulunan ortamların dalga vektörleri için yazılacak denklem ile Eşitlik 3.7'i bir arada kullanacak olursak:

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{x_i} \\ E_{x'_i} \end{bmatrix} = e^{iK\Lambda} \begin{bmatrix} E_{x_i} \\ E_{x'_i} \end{bmatrix} \quad 3.9$$

ortaya çıkar[12]. Bu ifade oldukça zengin bir ifadedir. Bloch kanunu ile arayüzlerdeki Maxwell eşitliklerinin birbirini doğrulamasıdır. Aslında Bloch dalga yayınının analitik ispatı olarak da ifade edilebilir. Özetle, 1B çok katmanlı periyodik yapıda ileri yönlü sınır değer eşitliklerinden elde edilen matrix formunda katsayılar ile Bloch kanununu takip eden 1B periyodik ortamda yayılan dalganın fazör ifadesinin eşitlenmesi Denklem 3.9'ü oluşturmaktadır. Periyodik ortamlar için Eşitlik 3.9'dan yararlanarak elde edilen çok önemli bir diğer eşitlik:

$$\cos(K\Lambda) = \frac{1}{2} (A + D) \quad 3.10$$

dir[40]. Buradan Bloch dalga sayısı fonksiyonuna ulaşmak için birim hücre dönüşüm matrisi (A, B, C, D) ve yapının periyodunu bilmemiz yeterli olacaktır.

$$K(w) = \frac{1}{\Lambda} \cos^{-1} \left(\frac{1}{2} (A + D) \right) \quad 3.11$$

Basit bir 1B periyodik yapının FYB hesabı için Eşitlik 3.11 yeterli olacaktır. Şu ana kadar sıfır olarak kabul edilen k_y vektörünün de yapıda farklı açılarda ilerleyen

dalga için sıfırdan farklı alınması durumunda, arayüzlerdeki eşitliklere ve Bloch dalga denkleminde eklenmelidir [41]. Böyle farklı açılarda ve yüksek dereceli modlarda ışığın dağılımı grafiği elde edilebilecektir.

FYB hesabı için periyot ve dönüşüm matrisi hesaplarının gerekli olmasını göz önünde bulundurarak çalışmamızda geleneksel Bloch dalgası periyodu yerine yapının merkezine göre simetrik dalga denklemi elde edilecek bir yapı tasarlamayı böylece hem aperiodyk dizilim hem de FYB bant hesabı yapılabilen bir yapı üretebilmeyi tasarladık. Böylece Şekil 3.1’de belirtildiği gibi öncelikle FK’ler aperiodyk olarak dizilmiştir daha sonra kavitenin ortada olması ve yapının simetrik olması için aynı dizilim ortadan itibaren tersten uygulanmıştır. Yeni yapı da Bloch dalga fazör ifadesi:

$$e^{K(\Lambda-x)} \quad 3.12$$

olarak değişmiştir. Eşitlik 3.9 bu ifadeyi yerine yazarsak eşitlik 3.10’un yeni hali:

$$\cos(K(\Lambda - x)) = \frac{1}{2} (A + D) \quad 3.13$$

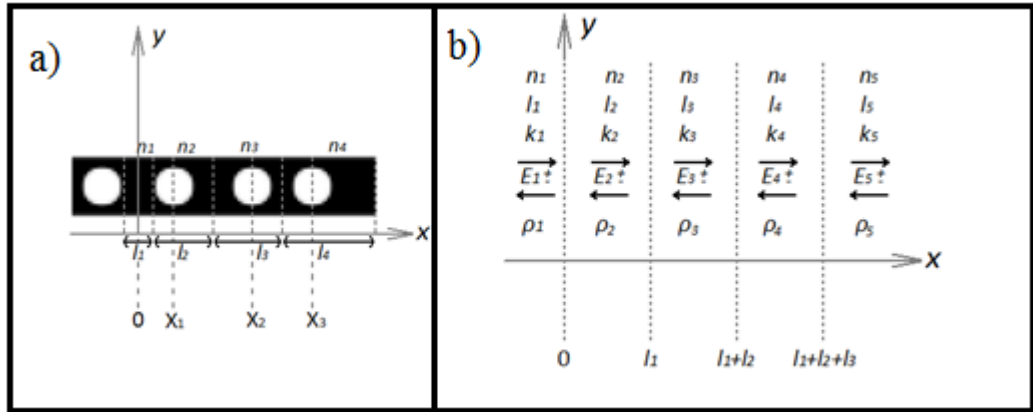
olur. Burada Λ yapının boyu, z enerjinin ilerme doğrultusudur. Denklemden yararlanarak Bloch dalga sayısının hesaplamak tekrar mümkündür; ancak aperiodyk yapı için yeni bir dönüşüm matrisi elde etmek gerekmektedir.

Basit 1B periyodik yapıda dönüşüm matrisi elde etmek için iki farklı kırılma indisi ve katmanların kalınlıklarının bilinmesi yeterli olmaktadır. Ancak aperiodyk dizilmiş FK’lerden oluşan bir ortamın dönüşüm matrisini yazmak için Etkin Kırılma İndisi (EMT)’nin çok iyi incelenmesi gerekmektedir. Bu konuda literatür oldukça zengindir[42-48]. EMT açılımını 2. Dereceden Taylor serisi açılımıyla yazarsak:

$$\varepsilon_{TE} = \varepsilon_0 + \frac{\pi^2}{3} (\alpha f (1-f) (\varepsilon_2 - \varepsilon_1))^2 \quad 3.14$$

Eşitlik 3.14 elde edilir. Denklemdede $\alpha = \Lambda / \lambda$ ' ya eşittir. Tasarladığımız yapının geleneksel periyottan farklı oluşturulmuş simetri uzunluğunun, yapıyı aydınlattığımız dalga boyunun oranı oldukça küçük olduğu durumlarda yüksek dereceli terimlerin katsayısı düşük olduğundan seri açılımını 2. dereceye kadar yazmak kabul edilebilir derecede doğru sonuçlar verecektir; ancak EMT'nin frekans yükseldikçe doğrusal olmayan sonuçlar verdiği de bir gerçektir [49]. Bu durumda spektrumun hemen her bölgesinde benzer doğrulukta bir yaklaşım sergilendiği söylenebilir. Ayrıca araştırmamızın bu kısmında yapının periyodu olarak herhangi bir noktanın yapının ortasına uzaklığı ($\Lambda - z$) değil doğrudan yapının uzunluğu (Λ) kullanılmıştır. Bu kabuller altında tasarlanan her bir rasgele dizilmiş 1B FK yapının analitik FYB hesabı yapılmıştır ve oldukça ilginç sonuçlar elde edilmiştir.

FYB hesabını yapabilmek için tasarlanan herhangi bir rasgele yapı öncelikle belli bir mantıkla bölümlere ayrılmıştır. Şekil 3.4 de örnek bir bölümlenme gösterilmektedir.



Şekil 3.4 a) örnek rasgele yapı ve bölümlenmesi b) dielektrik katmanlar ve ABCD matrisi için gerekli parametreler.

Şekil 3.4.a da verilen örnek rasgele yapının dielektrik katman olarak değerlendirilmesi 3.4.b de gösterilmiştir. Bu şekilde bir izah için her bir bölümün etkin kırılma indisi hesaplanmıştır. Çalışmada Sonlu Farklı Zaman Düzlemi Methodu

(FDTD) kullanılmıştır ve simülasyon programı olarak MEEP adlı açık kaynak kodlu program tercih edilmiştir. Hesaplama ekranının birim uzunluğu a kabul edilmiştir ve ışığın birim zamanda vakum ortamında aldığı yol 1 birim olarak düşünülmektedir. Bu kabuller altında her bir yapının aydınlatıldığı frekans aralığı $0.05/a$ ile $0.5/a$ arasında yüksek hassasiyetle değiştirilmiştir. Bu şekilde farklı yapılar için koşturulan simülasyon programında ABCD matrisi:

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \prod_{i=1}^a \prod_{j=1}^b \frac{1}{\tau(n_j, \lambda_i)} \begin{bmatrix} e^{ik(n_j, \lambda)l(n_j)} & \rho(n_j, \lambda_i)ie^{-ik(n_j, \lambda)l(n_j)} \\ \rho(n_j, \lambda_i)ie^{ik(n_j, \lambda)l(n_j)} & e^{-ik(n_j, \lambda)l(n_j)} \end{bmatrix} \quad 3.15$$

Eşitliğinden yararlanılarak elde edilmiştir. Döngüde matris çarpımının yapılabilmesi için kullanılan ilk ABCD' matrisi 2x2 birim matristir. Denklemden a toplam farklı dalga boyu sayısını, b ise toplam katman sayısını ifade etmek için kullanılmıştır. n_j ci katmanı λ_i i. dalga boyunu ifade etmektedir. Peşpeşe gelen birbirinden farklı aperiodyk katmanlarda ilerleyen ve yansıyan mod vektörlerinin arayüzlerde devamlılığıyla Eşitlik 3.15'i elde etmek mümkündür. Ancak son katmanda dışarıdan gelen bir EM dalga olmayacağı için son katman Eşitlik 3.15'de verilen seri hesaplandıktan sonra ayrıca hesaba eklenmektedir. Öte yandan eşitlik 3.15'de:

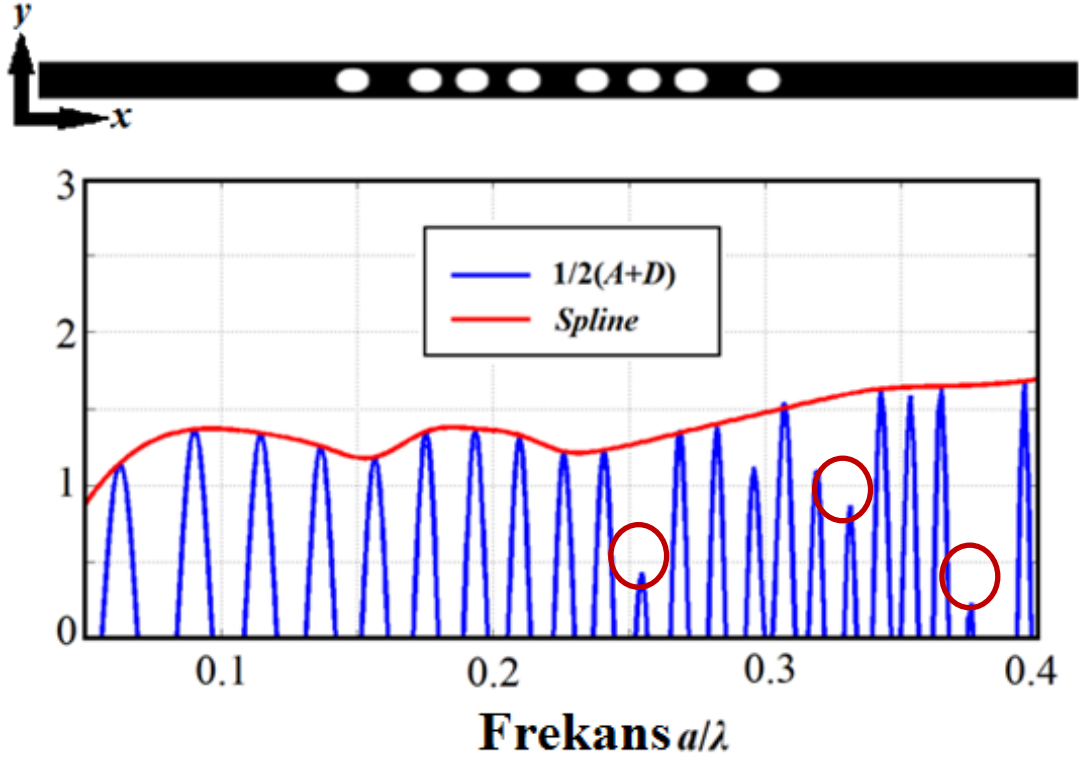
$$\rho(n_j, \lambda_i) = \frac{n(n_{j-1}, \lambda_i) - n(n_j, \lambda_i)}{n(n_{j-1}, \lambda_i) + n(n_j, \lambda_i)} \quad 3.16$$

Bu eşitlikte katman sayısına ve dalga boyuna bağlı n parametresi belirli katmanda o dalga boyunda geçerli etkin kırılma indisini ifade etmektedir. Hem katman sayısını hem de kırılma indisini belirtmek için n notasyonu kullanılmıştır, formülasyona bu bağlamda dikkat etmek gerekmektedir. Ayrıca Eşitlik 3.15' de:

$$\tau(n_j, \lambda_i) = 1 + \rho(n_j, \lambda_i) \quad 3.17$$

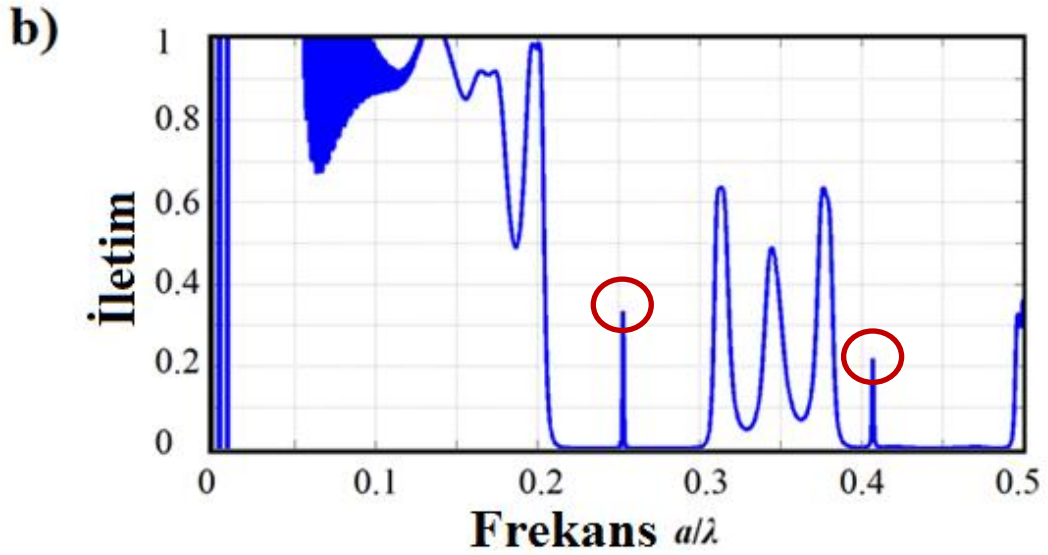
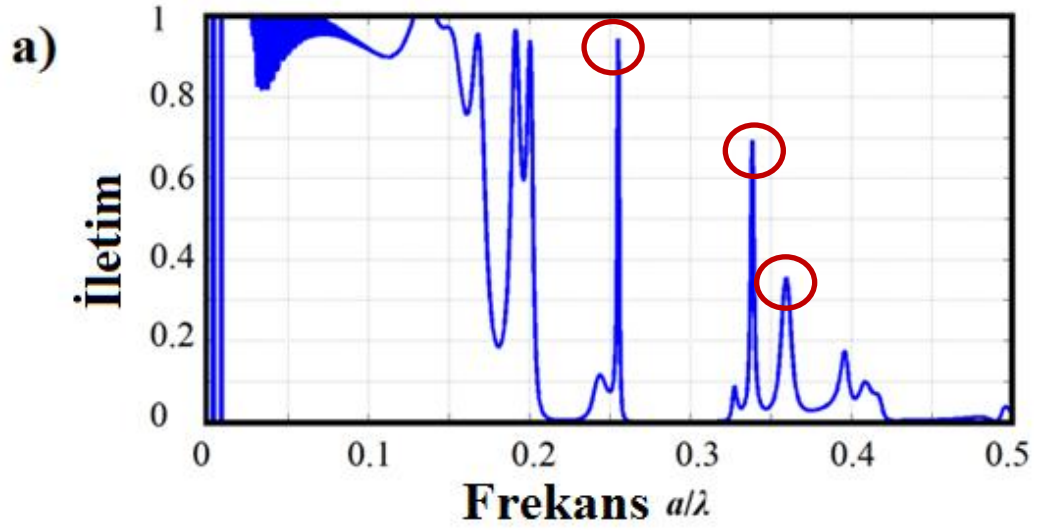
dir[50].

Eşitlik 3.14, 3.15 ve bazı kabuller altında, oluşturulan rasgele bir yapının ABCD matrisi hesaplanmıştır. Eşitlik 3.13'ü göz önünde bulundurarak dalga boyuna bağlı çizdirilen grafik Şekil 3.5'te paylaşılmıştır.



Şekil 3.5 Üstte rasgele dizilmiş simetrik 8 delikle oluşturulmuş FK yapı, allta bu yapıya ait ABCD matrisden hesaplanan Eşitlik 3.13'ün grafiği ve bu grafiğe fit edilmiş eğri.

Şekil 3.5 de verilen grafikte 1'in üzerinde değer alan bölgeler FYB'nin içerisinde yer almaktadırlar. Kırmızı dairelerle belirtilen 3 farklı frekansta da iletim söz konusudur. Yapıya ait kavite analizi yapıldığında alınan sonuçlar da göstermektedir ki bu üç frekansta bir durum yoğunluğu, yapının ortasında hapsolan enerji söz konusudur. Bu yapıya ve aynı deliklerle oluşturulmuş periyodik yapıya ait iletim grafikleri Şekil 3.6'da verilmiştir.



Şekil 3.6 a) Rasgele yapıya ait iletim-frekans grafiği, b) Periyodik yapıya ait iletim-frekans grafiği

Şekil 3.6'dan da görüldüğü üzere yapıya ait parametreler göz önünde bulundurularak elde edilen ABCD matris ve bundan çıkartılan Şekil 3.5'teki grafik ve bu grafiğin iletim bantları ile aynı rasgele yapıya ait iletim grafiği oldukça uyumludur. Bu da yapılan kabuller altında Eşitlik 3.14 ve 3.15'in oldukça tutarlı sonuçlar verdiğini göstermektedir. Ayrıca bu denklem farklı rasgele yapılar ve iletim grafikleri kullanılarak tekrar edilmiş, denklemin tutarlılığı sınanmıştır. Öte yandan

Şekil 3.6 b, de görüldüğü üzere düşük bantta bir durum yoğunluğu söz konusudur, rasgele yapıda bu rezonans mod korunmuş ayrıca FYB ın yüksek frekanstaki sınırında bir yeni mod daha oluşmuştur, bu çok kanallı filtre uygulamaları gibi uygulamalar için de bir avantaj teşkil etmektedir.

4.SONUÇ

Bu tez kapsamında ilk olarak 1 boyutlu fotonik kristal yapılarda polarizasyondan bağımsız kavite elde etmek hedeflenmiş ve bu kapsamda şimdiye kadar yapılan çalışmalar, kavite nedir, fotonik yasaklı band fenomeni ve halkalı fotonik kristal kavramları araştırılmıştır. Sonuç olarak 1 boyutlu fotonik kristal yapının ortasına yerleştirilen halkalı fotonik kristallerle polarizasyon hassasiyeti olmayan kaviteler elde edilmiştir.

Yapının ortasına uygulanan modifikasyonun daha sonra yapının tamamına uygulanması amaçlanmış ve tamamen rasgele 1 boyutlu fotonik kristal yapılarla çalışma fikri ortaya çıkmıştır. Ancak yapının tamamen rasgele olması limitsiz olasılıkla yapı tasarımı oluşturduğu için bir algoritma takip edilmiş ve incelenen her yapının belirli bir parametre açısından daima bir önceki yapıdan iyi olması hedeflenmiştir. Böylece araştırılacak yapı sayısı oldukça kısıtlanmıştır. Burada belirlenen parametre olarak kalite faktörü, takip edilen algoritma olarak da genetik algoritma seçilmiştir.

Modifiye edilen genetik algoritmayla elde edilen rasgele yapılara ait kalite faktörü değerleri periyodik yapılara ait kalite faktörü değerleriyle karşılaştırılmış ve oldukça yüksek artış değerleri elde edilmiştir.

Çalışmada daha sonra rasgele yapıların teorik analizini yapabilmek ön plana çıkmıştır. Bu bağlamda bu yapılara ait fotonik yasaklı bant analizini yapabilmek için öncelikle Etkin Ortam Teorisi incelenmiş daha sonra ABCD matris methodu analiz edilmiştir. Sonuç olarak bu teori ve methodların ışığında çok katmanlı rasgele dizilmiş fotonik kristal yapılara ait fotonik yasaklı bant hesabı elde edilebilmiştir. Sonuçlar oldukça tutarlıdır.

Çalışmalarda elde edilen sonuçlar ilk defa araştırılmış olup kendi alanlarına ışık tutmaktadırlar. Ayrıca çalışılan rasgele yapıların iletim spektrumları incelendiğinde polarizasyon çevirici olmayan tasarımlar üretebilmek, kavite arttırımı sağlayabilmek

ve çok kanallı filtreler oluşturmak gibi belli başlı alanlarda oldukça hassas tasarımlar oldukları görölmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Joannopoulos, J. D., Johnson, S. G., Winn, J. N., Meade, R. D., Photonic Crystals: Molding the Flow of Light, Second Edition, *Princeton University Press*, Princeton, New Jersey, 2008.
- [2] Yablonovitch, E., Inhibited Spontaneous Emission in Solid-State Physics and Electronics, *Physical Review Letters*, 58 (1987): 2059-2062.
- [3] John, S., Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices, *Physical Review Letters*, 58 (1987): 2486-2489.
- [4] Anderson, P. W., Absence of Diffusion in Certain Random Lattices, *Physical Review*, 109, 1492, 1958.
- [5] Inoue, Kuon, and Kazuo Ohtaka, eds. Photonic crystals: physics, fabrication and applications. Vol. 94. *Springer*, 2013.
- [6] Sakoda, Kazuaki. Optical properties of photonic crystals. Vol. 80. Springer Science & Business Media, 2004.
- [7] McCutcheon, Murray W., and Marko Loncar. "Design of a silicon nitride photonic crystal nanocavity with a Quality factor of one million for coupling to a diamond nanocrystal." *Optics express* 16.23 (2008): 19136-19145.
- [8] Zhang, Yinan, et al. "Ultra-High Q TE/TM dual polarized photonic crystal nanocavities." *Optics Letters* 34.17(2009)
- [9] Gong, Yiyang, and Jelena Vuckovic. "Photonic crystal cavities in silicon dioxide." *arXiv preprint arXiv:0910.0222* (2009).
- [10] Deotare, Parag B., et al. "High quality factor photonic crystal nanobeam cavities." *Applied Physics Letters* 94.12 (2009): 121106.
- [11] Joannopoulos, John D., et al. Photonic crystals: molding the flow of light. *Princeton University Press*, 2011.
- [12] Yariv, Amnon, and Pochi Yeh. Photonics: optical electronics in modern communications (the oxford series in electrical and computer engineering). *Oxford University Press, Inc.*, 2006.
- [13] Pollock, Clifford R. Fundamentals of optoelectronics. Irwin, 1995.
- [14] Kurt, Hamza, and D. S. Citrin. "Annular photonic crystals." *Optics express* 13.25 (2005): 10316-10326.

- [15] Giden, Ibrahim H., and Hamza Kurt. "Modified annular photonic crystals for enhanced band gap properties and iso-frequency contour engineering." *Applied optics* 51.9 (2012): 1287-1296.
- [16] Kurt, Hamza, and Mirbek Turduev. "Generation of a two-dimensional limited-diffraction beam with self-healing ability by annular-type photonic crystals." *JOSA B* 29.6 (2012): 1245-1256.
- [17] O. Painter , R. K. Lee , A. Scherer , A. Yariv , J. D. O'Brien , P. D. Dapkus , and I. Kim , “ Two-Dimensional Photonic Band-Gap Defect Mode Laser ,” *Science* 284 (1999): 1819 – 1821.
- [18] Y. Akahane , T. Asano , B. S. Song , and S. Noda , “ High-Q photonic nanocavity in a two-dimensional photonic crystal ,” *Nature* 425 , 944 – 947 (2003).
- [19] A. Taflove and S. C. Hagness, “The finite-difference time-domain method,” in *Computational Electrodynamics*. Norwood, MA, USA: Artech House, 2005
- [20] A. F. Oskooi, D. Roundy, M. Ibanescu, P. Bermel, J. D. Joannopoulos, and S. G. Johnson, “MEEP: A flexible free-software package for electromagnetic simulations by the FDTD method,” *Comput. Phys. Commun.*, vol. 181, no. 3, pp. 687–702, Mar. 2010
- [21] Can, M. G., B. B. Oner, and H. Kurt. "Polarization independent nanobeam cavity tuning using annular photonic crystals." *SPIE Photonics Europe*. International Society for Optics and Photonics, 2014.
- [22] Lin, Shawn-yu, et al. "A three-dimensional photonic crystal operating at infrared wavelengths." *Nature* 394.6690 (1998): 251-253.
- [23] McNab, Sharee, Nikolaj Moll, and Yurii Vlasov. "Ultra-low loss photonic integrated circuit with membrane-type photonic crystal waveguides." *Optics express* 11.22 (2003): 2927-2939.
- [24] H. Kosaka , T. Kawashima , A. Tomita , M. Notomi , T. Tamamura , T. Sato , and S. Kawakami , “ Superprism phenomena in photonic crystals ,” *Phys. Rev. B* 58 (1998): R10096 – R10099.
- [25] H. Y. Ryu , M. Notomi , and Y. H. Lee , “ Finite-difference time-domain investigation of band-edge resonant modes in finite-size two-dimensional photonic crystal slab ,” *Phys. Rev. B* 68 , (2003): 045209-045216.

- [26] P. R. Villeneuve , S. Fan , and J. D. Joannopoulos , “ Microcavities in photonic crystals: Mode symmetry, tunability, and coupling efficiency ,” *Phys. Rev. B* 54 , (1996): 7837 – 7842.
- [27] T. Yoshie , J. Vuckovic , A Scherer , H. Chen , and D. Deppe , “ High quality two-dimensional photonic crystal slab cavities ,” *Appl. Phys. Lett.* 79 , 4289 – 4291 (2001)
- [28] K. Srinivasan , P. E. Barclay , and O. Painter , “ Fabrication-tolerant high quality factor photonic crystal microcavities ,” *Opt. Express* 12 (2004): 1458 – 1463.
- [29] B. S. Song , S. Noda , T. Asano , and Y. Akahane , “ Ultra-high-Q photonic double-heterostructure nanocavity ,” *Nature Materials* 4 , 207 – 210 (2005).
- [30] S. Noda , M. Yokoyoma , M. Imada , A. Chutinan , and M. Mochizuki , “ Polarization mode control of two-dimensional photonic crystal laser by unit cell structure design ,” *Science* 293 , (2001): 1123 – 1125.
- [31] M. Notomi , H. Suzuki , and T. Tamamura , “ Directional lasing oscillation of two-dimensional organic photonic crystal lasers at several photonic band gaps ,” *Appl. Phys. Lett.* 78 , (2001): 1325 – 1327.
- [32] M. F. Yanik , S. Fan , and M. Soljagic , “ High-contrast all-optical bistable switching in photonic crystal microcavities ,” *Appl. Phys. Lett.* 83 , (2003): 2739 – 2741.
- [33] S. John and M. Florescu , “ Photonic bandgap materials: towards an all-optical micro-transistor ,” *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* 3 , (2001): S103 – S120.
- [34] Can, Melih Goktug, Bilgehan Baris Oner, and Hamza Kurt. "Polarization-Independent Photonic Crystal Fabry–Perot Cavity." *Photonics Technology Letters, IEEE* 27.2 (2015): 113-116.
- [35] Eichenfield, Matt, et al. "A picogram-and nanometre-scale photonic-crystal optomechanical cavity." *Nature* 459.7246 (2009): 550-555.
- [36] R. Verma, V. Banerjee, and P. Senthilkumaran, "Fractal signatures in the aperiodic Fibonacci grating," *Opt. Lett.* 39, (2014): 2557-2560,.
- [37] Y. Bouazzi, et. al., "Numerical Investigation on the Spectral Properties of One-Dimensional Triadic-Cantor Quasi-Periodic Structure," *Progress In Electromagnetics Research M*, 36, pp. 1-7, 2014.

- [38] Goldberg, D. E. (1989). Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning. Reading, MA: Addison-Wesley
- [39] Vellekoop, I. M., Ad Lagendijk, and A. P. Mosk. "Exploiting disorder for perfect focusing." *Nature Photonics* 4.5 (2010): 320-322.
- [40] Yariv, Amnon, and Pochi Yeh. *Optical waves in crystals*. Vol. 10. Wiley, New York, 1984.
- [41] Kittel, Charles. *Introduction to solid state physics*. Wiley, 2005.
- [42] Rytov, S. M. "Electromagnetic properties of a finely stratified medium." *SOVIET PHYSICS JETP-USSR* 2.3 (1956): 466-475.
- [43] Lalanne, Philippe, and Dominique Lemerrier-Lalanne. "On the effective medium theory of subwavelength periodic structures." *Journal of Modern Optics* 43.10 (1996): 2063-2085.
- [44] McPhedran, R. C., et al. "Lossy lamellar gratings in the quasistatic limit." *Journal of Modern Optics* 29.3 (1982): 289-312.
- [45] Bell, J. M., G. H. Derrick, and R. C. McPhedran. "Diffraction gratings in the quasi-static limit." *Journal of Modern Optics* 29.11 (1982): 1475-1489.
- [46] Bouchitte, G., and R. Petit. "Homogenization techniques as applied in the electromagnetic theory of gratings." *Electromagnetics* 5.1 (1985): 17-36.
- [47] Haggans, Charles W., Raymond K. Kostuk, and Lifeng Li. "Effective-medium theory of zeroth-order lamellar gratings in conical mountings." *JOSA A* 10.10 (1993): 2217-2225.
- [48] Campbell, Gene, and Raymond K. Kostuk. "Effective-medium theory of sinusoidally modulated volume holograms." *JOSA A* 12.5 (1995): 1113-1117.
- [49] Oner, B. B., M. G. Can, and H. Kurt. "Dual polarized broadband and all dielectric partial cloaking using stacked graded index structures." *Optics express* 22.17 (2014): 20457-20462.
- [50] S. J. Orfanidis, *Electromagnetic Waves and Antennas*, New Brunswick, NJ: Rutgers University, 2002

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : CAN, Melih Göktuğ
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri :13.06.1989 Samsun
Medeni hali : Evli
Telefon : 0 (312) 292 40 00
Faks : 0 (312) 292 40 91
e-mail : m.can@etu.edu.tr

Eğitim

Derece Eğitim Birimi Mezuniyet tarihi

| | | |
|---------------|--|------|
| Lisans | TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi | 2012 |
| Yüksek Lisans | TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi | 2015 |

İş Deneyimi

| Yıl | Yer | Görev |
|-----------|--|--------------------------------|
| 2012-2014 | TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi | Burslu Yüksek Lisans Öğrencisi |
| 2014-2015 | Roketsan A.Ş. | Test Mühendisi |

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

- [1] Can, M., B. Oner, and Hamza Kurt. "Polarization Independent Photonic Crystal Fabry-Perot Cavity." (2015).
- [2] Oner, B. B., M. G. Can, and H. Kurt. "Dual polarized broadband and all dielectric partial cloaking using stacked graded index structures." *Optics Express* 22.17 (2014): 20457-20462.
- [3] Can, Melih G., Bilgehan B. Oner, and Hamza Kurt. "Optical analysis of human eye using electromagnetic wave theory." *Journal of biomedical optics* 18.10 (2013): 105006-105006.
- [4] Oner, B. B., M. G. Can, and H. Kurt. "Broadband directional cloaking using graded index structures." *Transparent Optical Networks (ICTON), 2014 16th International Conference on. IEEE, 2014.*
- [5] Oner, Bilgehan B., Melih G. Can, and Hamza Kurt. "Partial cloaking by graded index photonic crystals." *SPIE Photonics Europe. International Society for Optics and Photonics, 2014.*
- [6] Subwavelength focusing by all dielectric graded index photonic crystal lens (pp. 143) Mirbek Turduev, Melih G. Can, Khalil Dadashi, Hamza Kurt, AES 2014 Hangzhou - China The 3rd Advanced Electromagnetics Symposium ISBN 978-2-9545460-5-6
- [7] Nano-beam cavity design with randomly located reflectors (pp. 183) Melih G. Can, Bilgehan B. Oner, Hamza Kurt, AES 2014 Hangzhou - China The 3rd Advanced Electromagnetics Symposium ISBN 978-2-9545460-5-6
- [8] Can, M. G., B. B. Oner, and H. Kurt. "Polarization independent nanobeam cavity tuning using annular photonic crystals." *SPIE Photonics Europe. International Society for Optics and Photonics, 2014.*